



รายงานการวิจัย

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากภูมิปัญญาท้องถิ่น
สำหรับการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส

**Biomass-Briquettes Fuel from Local Wisdom
For Producer Gas Production**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิรรัตน์ มุลศรี และคณะ
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ประจำปีงบประมาณ 2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากภูมิปัญญาท้องถิ่น
สำหรับการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส

**Biomass-Briquettes Fuel from Local Wisdom
For Producer Gas Production**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยรัตน์ มุลศรี และคณะ
สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ทุนอุดหนุนโดย
งบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2559

(ก)

ชื่องานวิจัย	เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากภูมิปัญญาท้องถิ่นสำหรับการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส
ผู้วิจัย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยรัตน์ มุลศรี และอาจารย์อาทิตย์ หุ่นเต็ม
สาขาวิชา	เคมี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
ปีที่เสร็จวิจัย	2560

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากภูมิปัญญาท้องถิ่นสำหรับการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่มีศักยภาพสำหรับใช้ในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวล 2) ศึกษาคุณสมบัติ คุณภาพและประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ ในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวล และ 3) เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยให้กับกลุ่มเกษตรกร หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน และประชาชนในท้องถิ่น จากการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้ในท้องถิ่นเตรียมได้จากวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรได้แก่ แกลบดำ ชังข้าวโพด ชานอ้อย จี้เลื่อย มูลวัว มูลสุกร และมูลไก่ โดยสูตรการเตรียมพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้นมานี้มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นอยู่ในช่วง 2-4% มีปริมาณสารที่ระเหยได้ในช่วง 65-69 % มีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 11-19 % และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 11-18% สำหรับแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้นมาและผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 0.1-0.5% มีปริมาณสารที่ระเหยได้ในช่วง 54-60 % มีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 16-24 % และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 19-30% สมบัติด้านความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งและเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว มีค่าปริมาณความร้อนสูงอยู่ในช่วงระหว่าง 17.95 MJ/kg - 18.35 MJ/kg และแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว จะให้ปริมาณพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 16-18 MJ/kg

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งและเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วพบว่า เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งให้โปรคิวเซอร์แก๊สที่มีองค์ประกอบของแก๊ส CO มากที่สุด รองลงมาได้แก่ แก๊ส H_2 , CO_2 และแก๊ส CH_4 ตามลำดับ สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านให้โปรคิวเซอร์แก๊สที่มีองค์ประกอบของแก๊ส CO มากที่สุด รองลงมาได้แก่ แก๊ส H_2 , CO_2 และแก๊ส CH_4 ตามลำดับ โดย

(ข)

แก๊ส CO, H₂ และ CH₄ โดยโปรคิวเซอร์แก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วจะมีปริมาณของแก๊ส CO, H₂ และ CO₂ ที่มากขึ้นเล็กน้อย แต่มีปริมาณของ CH₄ น้อยกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านมีอุณหภูมิของเปลวไฟที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่านเล็กน้อย ซึ่งอัตราการไหลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาเท่ากับ $2.106 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ทำให้การจุดติดไฟของแก๊สเชื้อเพลิงทำได้ง่ายและเกิดแก๊สอย่างสม่ำเสมอ และการเกิดเปลวไฟเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ จากการประเมินความพึงพอใจของการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จากผู้เข้ารับการถ่ายทอดเทคโนโลยีพบว่า มีระดับความพึงพอใจในภาพรวมอยู่ในระดับมาก

คำสำคัญ : วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร, ชีวมวลอัดแท่ง, โปรคิวเซอร์แก๊ส

Abstract

This study investigates the production of biomass from the local wisdom for the production of producer gas. The purpose of this research is to 1) study the production of solid waste fuel from agricultural waste that can be used for the production of gas from biomass stove 2) study the properties, quality and efficiency of the solidified fuel for producer gas production from the stove and 3) to transfer technology and knowledge from research to farmer groups, the public and the private agencies, and the local people. From the study, it found that local prepared biomass-briquettes fuel was prepared from agricultural biomass residues such as black rice husk, corn bagasse, sawdust, cow dung, pig manure and chicken manure. The biomass-briquettes fuel of different formula have the percentage of moisture content in the range of 2-4% , volatile content in the range of 65-69%, ash content in the range of 11-19% and the carbon content in the range of 11-18% . For the carbonized biomass-briquettes fuel of different formula have the moisture content in the range of 0.1-0.5%, the volatile content in the range of 54-60%, the ash content in the range 16-24% , and the carbon content in the range of 19-30% . The high heating value properties of the biomass-briquettes fuel and the carbonized biomass-briquettes fuel were 17.95 - 18.35 MJ / kg and 16 -18 MJ / kg, respectively.

Based on the study of the chemical composition of producers gas which derived from the of the biomass-briquettes fuel and the carbonized biomass-briquettes fuel by using biomass gasifier stove found that the biomass-briquettes fuel and the carbonized biomass-briquettes fuel produced the most CO gas, followed by H₂, CO₂ and CH₄, respectively. The producer gas which produced by using the carbonized biomass-briquettes fuel have a slightly higher amount of CO, H₂, and CO₂, but with less CH₄ than using the biomass-briquettes fuel. In addition the carbonized biomass-briquettes fuel has a higher flame temperature than the biomass-briquettes fuel. The flow rate of the reacted air is $2.106 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$, which makes the ignition of fuel gas easier and the fuel gas flow, the flame are consistent. Based on the satisfaction assessment of the utilization of this developed technology by technology transferers, the overall level of satisfaction was at a high level.

Keywords : agricultural waste, biomass-briquettes, producer gas

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยเพื่อศึกษาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากภูมิปัญญาท้องถิ่น สำหรับการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส โดยได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2559 โดยผ่านความเห็นชอบจาก คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์และสถาบันวิจัยและพัฒนา ที่ได้อำนวยความสะดวกในการ ดำเนินการวิจัย ตลอดจนคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ ที่ได้ เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ต่อการใช้เป็นแนวทางในการแก้ไข ปัญหาด้านพลังงานในปัจจุบัน ก่อให้เกิดการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างเหมาะสมใน ด้านการแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทน ตลอดจนส่งเสริมให้วิสาหกิจชุมชนและผู้ ที่สนใจทั่วไป ในการนำเอาข้อมูลและผลการวิจัยที่ได้นี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ต่อไป

ผศ. ดร. ปิรรัตน์ มุลศรี และคณะ

2560

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย	3
1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ชีวมวล	4
2.2 เชื้อเพลิงแข็งจากชีวมวล	7
2.3 แก๊สชีวมวล	11
2.4 การปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวมวล	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	27
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี	27
3.2 การเตรียมวัตถุดิบและสารละลาย	29
3.3 การออกแบบและเตรียมเครื่องมือ และชุดอุปกรณ์ในการวิจัย	32
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	43
4.1 ผลการศึกษาการสำรวจภูมิปัญญาท้องถิ่นในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทาง การเกษตรเพื่อใช้ประโยชน์และการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง	43

เรื่อง	หน้า
4.2 ผลการศึกษาทางกายภาพ ทางเคมี และการให้ความร้อนของเชื้อเพลิง ชีวมวลอัดแท่งและโปรคิวเซอร์แก๊สที่ได้	54
4.3 ผลการศึกษานำไปใช้จริงกับเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบต่าง ๆ และ ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ข้อจำกัด และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	71
เอกสารอ้างอิง	77
ภาคผนวก	79

สารบัญตาราง

ลำดับ	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ค่าพลังงานเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลบางชนิดกับเชื้อเพลิงจากฟอสซิล	6
ตารางที่ 3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
ตารางที่ 3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	28
ตารางที่ 4.1	แสดงปริมาณลิกนินและเซลลูโลส ที่วิเคราะห์ได้ในชีวมวลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา	48
ตารางที่ 4.2	แสดงการวิเคราะห์เชิงประมาณของความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ในชีวมวลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา	48
ตารางที่ 4.3	แสดงปริมาณโลหะหนักบางชนิดที่หลงเหลือตกค้างอยู่ในชีวมวลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา	49
ตารางที่ 4.4	แสดงลักษณะการขึ้นรูป ความแข็งและความหนาแน่นปรากฏของชีวมวลอัดแท่งแต่ละสูตร	50
ตารางที่ 4.5	แสดงสูตรในการเตรียม ส่วนผสม และอัตราส่วนการผสม ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง	57
ตารางที่ 4.6	แสดงประมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ	58
ตารางที่ 4.7	แสดงประมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่าน	59
ตารางที่ 4.8	แสดงประมาณความร้อน (HHV) ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมคาโลรีมิเตอร์ และจากการคำนวณทางทฤษฎี	60
ตารางที่ 4.9	แสดงประมาณความร้อน (HHV) ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมคาโลรีมิเตอร์ และการคำนวณทางทฤษฎี	61
ตารางที่ 4.10	องค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง	63
ตารางที่ 4.11	อัตราการไหลผ่านของอากาศเข้าและอุณหภูมิของเปลวไฟของเชื้อเพลิง	64

ลำดับ	หน้า
ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ผ่านการทำให้เป็นถ่าน ในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบต่าง ๆ	66
ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว ในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบต่าง ๆ	66
ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในด้านต่าง ๆ	68

สารบัญรูป

ลำดับ	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดแก๊สชีวมวลภายในเตาเผา	12
รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของ (ก) updraft gasifier และ (ข) downdraft gasifier	17
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของ crossdraft gasifier	18
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของ fluidized bed gasifier ซึ่งแบ่งออกเป็น (ก) bubbling fluidized bed และ (ข) circulating fluidized bed	19
รูปที่ 2.5 ลักษณะการทำงานของแก๊สซิฟิเคเตอร์แบบ entrained flow เปรียบเทียบกับ แบบ fluidized bed และแบบ updraft	20
รูปที่ 2.6 แสดงการใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวมวลทั้งทางตรงและการเปลี่ยนรูปใหม่	21
รูปที่ 2.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube สำหรับลดอุณหภูมิของแก๊ส	22
รูปที่ 2.8 การทำงานของเครื่องสกรับเบอร์แบบสเปรย์ในการดักจับอนุภาคและ ลดอุณหภูมิแก๊ส	23
รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเครื่องอัดแท่งชีวมวล	45
รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะเครื่องอัดแท่งชีวมวลด้วยมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้น เพื่อใช้ในการศึกษา	46
รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะเครื่องอัดแท่งชีวมวลด้วยมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อ ใช้ในการศึกษาโดยการอัดแรงจากด้านล่าง	46
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะเป่าอัดแท่งชีวมวลด้วยมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ ในการศึกษา (แบบต้น)	47
รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะเป่าอัดแท่งชีวมวลด้วยมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ ในการศึกษา (แบบกลาง)	47
รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง ที่ได้สูตรต่าง ๆ A-L	54
รูปที่ 4.7 แสดงชุดอุปกรณ์ในการเผาแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นถ่าน	56
รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการเผา ให้กลายเป็นถ่าน	56
รูปที่ 4.9 แสดงชุดเตาแก๊สซิฟิเคเตอร์ในการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส	62

(ญ)

ลำดับ	หน้า
รูปที่ 4.10 แสดงชุดลดอุณหภูมิของแก๊ส	62
รูปที่ 4.11 แสดงชุดอุปกรณ์ถังเก็บแก๊ส	63
รูปที่ 4.12 แสดงของเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบ up draft ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ	65
รูปที่ 4.13 แสดงของเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบ down draft ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานที่มีความจำเป็นต้องใช้ตั้งแต่ระดับครัวเรือน ระดับชุมชน จนถึงระดับอุตสาหกรรม ปัญหาการขาดแคลนพลังงานเชื้อเพลิงที่จะนำไปใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าทำให้ต้องมีการเสาะแสวงหาพลังงานทางเลือกใหม่ ๆ เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า เช่น พลังงานจากน้ำ จากลม และจากพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น แต่พลังงานดังกล่าวยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น สถานที่การผลิต ปริมาณที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ เช่น ปริมาณน้ำ ความเร็วลม การต่อต้านการใช้นิวเคลียร์ และการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ทำให้การใช้พลังงานดังกล่าวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อนยังไม่เกิดประสิทธิภาพดีเท่าที่ควร ในปัจจุบันการผลิตพลังงานความร้อนจากชีวมวลกำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากจากทั้งระดับครัวเรือน ร้านอาหาร และภาคอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) ที่มีส่วนประกอบหลักประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และพวกละเอียดต่าง ๆ หรือเรียกชื่อว่าเตาแก๊สชีวมวล ได้มีการประดิษฐ์คิดค้นและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย อีกทั้งการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สและการนำไปใช้ประโยชน์สามารถทำได้ง่าย โดยประสิทธิภาพของโปรดิวเซอร์แก๊สขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและคุณภาพของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตเป็นหลัก ปัญหาที่สำคัญของการผลิตแก๊สชีวมวลจากการเผาชีวมวลโดยตรง คือ โปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้มีคุณภาพแปรเปลี่ยนไปได้ง่ายตามชนิดและคุณสมบัติของชีวมวลที่นำมาใช้เชื้อเพลิง ทำให้การนำโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้ไปใช้งานตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการเป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพดีเท่าที่ควร และในบางครั้งมีแก๊สที่ปนเปื้อนซึ่งก่อให้เกิดผลเสียต่ออุปกรณ์ที่ใช้งาน รวมถึงก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาและพัฒนาการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำเร็จรูปจากภูมิปัญญาท้องถิ่นของจังหวัดเพชรบูรณ์ โดยแปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด ฟางข้าว แกลบ และมูลสัตว์ โดยใช้ EM หรือจุลินทรีย์สำหรับการหมักร่วมด้วยในกระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตแก๊สชีวมวลหรือโปรดิวเซอร์แก๊สในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ในเตาเผาชีวมวล ทำให้ได้พลังงานทดแทนที่ช่วยแก้ไขปัญหาด้านพลังงานในปัจจุบัน ก่อให้เกิดการจัดการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ ช่วยรักษาสังแวดล้อมจากการเผาทิ้งเศษขยะทางการเกษตร และได้เทคโนโลยีที่เป็นประโยชน์ต่อการผลิตพลังงานทดแทนของภาคเกษตรและอุตสาหกรรม ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่มีศักยภาพสำหรับใช้ในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวล
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติ คุณภาพและประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ ในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวล
3. เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยให้กับกลุ่มเกษตรกร หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน และประชาชนในท้องถิ่น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับภูมิปัญญาท้องถิ่นในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งและการพัฒนาโดยการแปรรูปให้เหมาะสมสำหรับการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สโปรคิวเซอร์แก๊สของเตาเผาชีวมวล
2. ได้ข้อมูลวิธีการผลิตและสูตรการผลิตของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง ทราบคุณสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเชิงความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ที่เหมาะสมกับการใช้งานในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในอนาคตต่อไป
3. ได้ข้อมูลทางกายภาพและทางเคมีของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งแต่ละสูตร
4. ได้ข้อมูลของการนำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสำเร็จรูปไปใช้ในการผลิตพลังงานความร้อน พลังงานกล และพลังงานไฟฟ้า ของท้องถิ่น และชุมชน
5. กลุ่มเกษตรกร หน่วยงานภาครัฐและเอกชนหรือผู้สนใจทั่วไปได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้
6. ทำให้เกิดการจัดการวัสดุเหลือทิ้งขังข้าวโพดของท้องถิ่น และการลดปัญหามลภาวะทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการเผาถ่านโดยใช้วิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้ช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้
7. ได้บทความทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารในประเทศหรือต่างประเทศอย่างน้อย 1 เรื่อง หรือสามารถนำไปจดสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตรได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการสำรวจภูมิปัญญาท้องถิ่นเกี่ยวกับการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้านการนำไปใช้ผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งในเขตพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์
2. ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเชื้อเพลิงอัดแท่ง โดยการแปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ ขังข้าวโพด เศษฟางข้าว แกลบ มูลสัตว์ ร่วมกับการหมักโดยใช้ EM หรือจุลินทรีย์ที่ได้จากการหมักของภูมิปัญญาของเกษตรกรในท้องถิ่นของจังหวัดเพชรบูรณ์

3. ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้
4. ทำการศึกษาคูณสมบัติของการเผาไหม้และองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ได้ รวมถึงเงื่อนไขและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน
5. ทำการศึกษาทดลองนำไปใช้กับเตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบไหลขึ้น (Up-draft gasifier) และเตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สแบบไหลลง (Down-draft gasifier) ขนาดเล็กและขนาดกลางที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในชุมชนของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนตำบลบ้านทุ่งสมอ อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์
6. ทำการเปรียบเทียบต้นทุนการผลิต ผลผลิตภาพและประสิทธิภาพการจากการใช้งานจริง ในภาคสนามและศึกษาแนวทางในการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ไปใช้ประโยชน์กับเตาผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สประเภทต่าง ๆ อย่างเหมาะสม
7. ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีและผลงานวิจัยแก่ตัวแทนของกลุ่มหน่วยงานภาครัฐและเอกชนวิสาหกิจชุมชนและเครือข่ายกลุ่มเกษตรกรในจังหวัดเพชรบูรณ์ หรือนำเสนอในการประชุมวิชาการ

1.5 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

ตั้งแต่ 1 ธันวาคม 2558 ถึง 31 มีนาคม 2560

1.6 สถานที่ดำเนินการวิจัย

- ห้องปฏิบัติการทางเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
- ศูนย์เรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงชุมชน ตำบลทุ่งสมอ อำเภอเขาค้อ เพชรบูรณ์
- ศูนย์เรียนรู้ด้านพลังงานทดแทนภาคเหนือ อำเภอเขาค้อ เพชรบูรณ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (biomass) หมายถึง สิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรืออินทรีย์สารต่าง ๆ เช่น ไม้ยืนต้น พืชที่มีส่วนประกอบเป็นแป้งและน้ำตาล วัชพืชบนบกและน้ำ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับเนื่องกับการเกษตร มูลสัตว์ ตลอดจนขยะอินทรีย์ที่มีอยู่ทั่วไป (วรณูช แจงสว่าง, 2553, หน้า 122) ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวล (biofuel) จึงเป็นเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากชีวมวลซึ่งอาจอยู่ในรูปของ ๆ แฉ่ง ของเหลว หรือแก๊สก็ได้ เมื่อนำเชื้อเพลิงเหล่านี้มาเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานจะได้พลังงานชีวมวล (biomass energy) ที่จัดว่าเป็นพลังงานหมุนเวียนประเภทหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดขึ้นหลายร้อยล้านปี ชีวมวลนับเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงสำหรับประเทศไทย เนื่องจากเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องอีกหลายประเภท ในแต่ละปีปริมาณชีวมวลที่ผลิตได้ทั้งประเทศยกเว้น ไม้และฟืนคาดว่ามีปริมาณที่มากกว่า 34 ล้านตัน จึงทำให้สามารถใช้ชีวมวลซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำการเกษตรกรรมหรืออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องมาใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมได้

2.1.1 แหล่งที่มาของชีวมวล

วัฏจักรของการผลิตชีวมวลเป็นวัฏจักรหมุนเวียนมีการเกิดขึ้นและมีการเปลี่ยนรูปของชีวมวลไปเป็นรูปแบบต่าง ๆ ตามห่วงโซ่อาหาร (food chain) ของสิ่งมีชีวิต โดยพืชที่มีคลอโรฟิลล์ ซึ่งเรียกว่า ผู้ผลิต (producer organism) จะใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ร่วมกับ น้ำ และ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ในการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างสารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโต ซึ่งพลังงานก็จะถูกเก็บอยู่ในพืชเหล่านั้น เมื่อมีการถ่ายโอนสสารและพลังงานไปยังสิ่งมีชีวิตที่กินพืชเป็นอาหาร (herbivores) เช่น กวาง เก้ง โค กระบือ ฯลฯ กลุ่มผู้บริโภคขั้นทุติยภูมิ (secondary customer) คือพวกที่กินสัตว์เป็นอาหาร (carnivores) เช่น เสือ สิงโต หมาป่า นกบางชนิด ฯลฯ และกลุ่มผู้บริโภคขั้นตติยภูมิ (tertiary customer) พวกสัตว์ที่กินทั้งสัตว์กินพืชและสัตว์กินสัตว์ (omnivores) รวมถึงผู้ที่อยู่ในระดับการกินขั้นสูงสุดซึ่งจะไม่ถูกกินโดยสัตว์อื่น หรือจัดอยู่ในลำดับสุดท้ายของการถูกกินเป็นอาหาร เช่น มนุษย์ ตามห่วงโซ่อาหาร ชีวมวลก็จะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นชีวมวลที่เป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตใหม่ที่ได้อินเข้าไปหรือบางส่วนอาจถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นสสารชนิดอื่น ๆ และถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม เมื่อสิ่งมีชีวิตทั้งที่เป็นผู้ผลิตและผู้บริโภคลำดับสุดท้ายตายลง ผู้ย่อยสลาย (decomposer organisms) ได้แก่ จุลชีวันทั้งหลาย จะช่วยทำลายหรือย่อยสลายซากพืชและซากสัตว์ให้เน่าเปื่อยผุพัง จนในที่สุดจะสลายตัวเป็นธาตุอาหารและปุ๋ยสะสมเป็นแหล่งอาหาร (nutrient pool) ในดินเพื่อให้ผู้ผลิต

นำไปใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป ดังนั้นชีวมวลที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านเชื้อเพลิง จึงอาจจำแนกตามแหล่งที่มาได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- 1) ชีวมวลที่มาจากพืช ได้แก่ ไม้ชนิดต่าง ๆ ทั้งไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง พืชวัตถุดิบ พืชน้ำมัน วัชพืชบกและวัชพืชน้ำ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และเศษพืชผักที่เหลือทิ้งจากบ้านเรือนหรืออุตสาหกรรม เป็นต้น
- 2) ชีวมวลที่มาจากสัตว์ ได้แก่ มูลสัตว์ต่าง ๆ เช่น วัว ควาย สุกร เป็ด ไก่ นก รวมถึงเศษซากของสิ่งมีชีวิตของสัตว์เหล่านั้นที่ตายลง เป็นต้น

2.1.2 การเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นพลังงาน

การเปลี่ยนรูปชีวมวลเพื่อให้กลายเป็นพลังงานสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ คือ กระบวนการที่นำพลังงานจากชีวมวลมาใช้โดยทำให้เกิดการแตกตัวของอินทรีย์สารที่มีอยู่ในชีวมวล และผลิตพลังงานออกมา เทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการแปรรูปชีวมวลเพื่อให้ได้เป็นพลังงานออกมามีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ การแปรรูปทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion) และการแปรรูปทางชีวเคมี (biochemical conversion) ดังนี้

1) การแปรรูปทางเคมีความร้อน เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลเพื่อให้ได้พลังงานจากชีวมวล ซึ่งได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง การย่อยสลายด้วยความร้อน และการแปรรูปเป็นแก๊สชีวมวล โดยการเลือกวิธีการดึงพลังงานจากชีวมวลออกมาใช้แบบใดจะขึ้นอยู่กับสถานะและลักษณะของชีวมวล โดยชีวมวลบางประเภทอาจต้องมีการแปรรูปให้เป็นแก๊สชีวมวลก่อนนำไปใช้ผลิตพลังงาน เพื่อปรับปรุงคุณภาพในเชิงองค์ประกอบทางเคมี การให้ความร้อน และมีลักษณะตามที่ต้องการที่จะนำมาใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม

- การเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลโดยการเผาในที่ที่มีอากาศ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสารอินทรีย์ในชีวมวลจะถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามปฏิกิริยาการเผาไหม้ และได้พลังงานความร้อนออกมา ชีวมวลที่นิยมใช้วิธีการนี้ได้แก่ ไม้ ฟาง หญ้า เป็นต้น โดยพลังงานของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณลักษณะของชีวมวล เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานของการเผาไหม้ของชีวมวลบางชนิดกับเชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าพลังงานเฉลี่ยของเชื้อเพลิงชีวมวลบางชนิดกับเชื้อเพลิงจากฟอสซิล

ชนิดของเชื้อเพลิง	ค่าพลังงานที่ให้ต่อปริมาณเชื้อเพลิง	
	เทียบต่อมวล (GJ/ ton)	เทียบต่อปริมาตร (GJ/ m ³)
ไม้ (ความชื้น 20%)	15	10
กระด้าง	17	9
มูลสัตว์ (แห้ง)	16	4
ฟาง	14	1.4
อ้อย	14	10
หญ้า (สด)	4	3
น้ำมันปิโตรเลียม	42	34
ถ่านหิน	28	50
แก๊สธรรมชาติ	55	0.04

ที่มา (ดัดแปลงมาจาก Boyle, 1996)

- การย่อยสลายด้วยความร้อน หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลโดยใช้ความร้อนในที่ที่มีปริมาณอากาศอย่างจำกัด ซึ่งจะเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปของ ๑ แข็ง ของเหลว และแก๊ส การย่อยสลายด้วยความร้อนนี้เป็นกระบวนการทางเคมีแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible chemical process) ทำที่อุณหภูมิตั้งแต่ 150 °C ขึ้นไป และจะต้องป้อนอากาศในปริมาณที่จำกัด แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน (H₂) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) แก๊สมีเทน (CH₄) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ อีกเล็กน้อย ของเหลือที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ ถ่าน (charcoal) และขี้เถ้า (ash) รวมถึงส่วนที่เป็นของเหลว เช่น น้ำมัน น้ำ และน้ำมันดิน (tar) เป็นต้น โดยที่อุณหภูมิประมาณ 100-120 °C จะเป็นช่วงของการไล่ความชื้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 275 °C ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาส่วนใหญ่มักจะเป็นแก๊ส เช่น แก๊ส CO, CO₂ และมีกรดน้ำส้มและเมทานอลถูกกลั่นออกมา ที่ช่วงอุณหภูมิ 280-350 °C สารที่มีองค์ประกอบทางเคมีซับซ้อนจะถูกกลั่นออกมา เช่น คีโตน (ketone) แอลดีไฮด์ (aldehydes) ฟีนอล (phenol) และเอสเทอร์ (ester) รวมทั้งแก๊สต่าง ๆ เช่น CO, CO₂ และ CH₄ สำหรับที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 °C สารระเหยง่ายจะถูกกลั่นแยกออกมาก และมีส่วนที่เหลือคือ ถ่านกับขี้เถ้า เกิดขึ้น

- การแปรรูปเป็นแก๊สชีวมวล หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยการสลายคาร์บอนในเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊ส โดยการเผาชีวมวลในอุปกรณ์ที่มีการควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า แก๊สชีวมวลหรือโพรวินเซอร์แก๊ส ซึ่งจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนได้ โดยแก๊สชีวมวลมีองค์ประกอบ คือ แก๊ส H₂ และ CO เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้

ก็ยังมีการเกิด CH_4 , CO และไอน้ำ ปนอยู่ด้วยบางส่วน ซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อน แต่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 600°C ขึ้นไป โดยคุณภาพของแก๊สชีวมวลที่ได้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของชีวมวลที่นำมาใช้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนของเตาเผา และลักษณะของเตาเผา เป็นต้น

2) การแปรรูปทางชีวเคมี เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนรูปของชีวมวลผ่านกระบวนการทางชีวเคมีที่ต้องใช้จุลินทรีย์ในการดำเนินการ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ การย่อยสลายในที่ที่ไม่มีอากาศ ซึ่งจะผลิตผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สชีวภาพ และการหมัก ซึ่งจะผลิตผลิตภัณฑ์เป็นแอลกอฮอล์

- การย่อยสลายในที่ที่ไม่มีอากาศ (anaerobic digestion) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ของชีวมวลโดยกระบวนการชีวเคมีที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยา (ไม่ใช้อากาศ) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะได้เป็นแก๊สชีวภาพ (biogas) ซึ่งเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊ส CH_4 และ CO_2 โดยอาจมีแก๊สอื่น ๆ ปนอยู่ด้วยบ้าง เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไฮโดรเจน (H_2) และไนโตรเจน (N_2) แก๊สชีวภาพโดยทั่วไปจะมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบอยู่ 50-75% ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์และสภาวะในการย่อยสลาย ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณแก๊สมีเทนที่เป็นองค์ประกอบ เช่น หากมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบ 60% จะให้ค่าความร้อนประมาณ $5,700 \text{ kcal/m}^3$ การนำแก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม ให้พลังงานความร้อนและการให้แสงสว่าง

- การหมักเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ (alcoholic fermentation) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบของชีวมวลโดยกระบวนการชีวเคมีเพื่อให้ได้เป็นเอทานอล (ethanol) หรือเมทานอล (methanol) ซึ่งจะมีแก๊ส CO_2 เกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้เกิดขึ้นด้วย ซึ่งแอลกอฮอล์ที่ได้จะมีการทำให้บริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรง หรือการนำไปผสมกับน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวถึงแล้วในบทที่ผ่านมา

2.2 เชื้อเพลิงแข็งจากชีวมวล

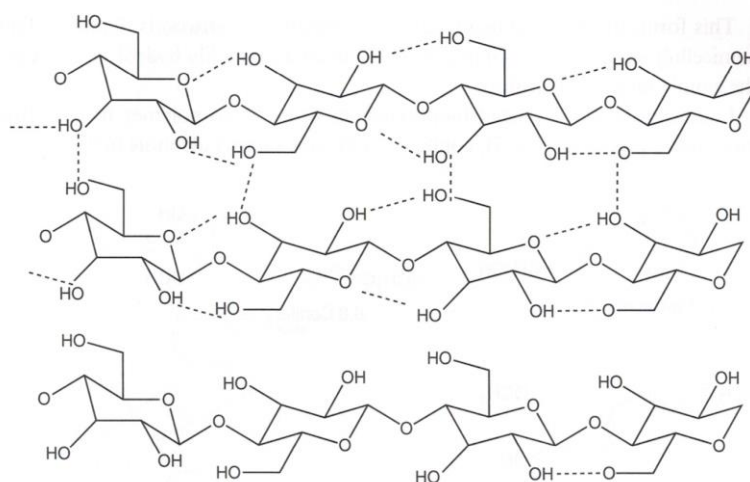
เชื้อเพลิงแข็งที่ได้มาจากชีวมวลมีอยู่หลายชนิด ซึ่งสามารถนำมาใช้โดยตรงหรือการแปรรูปเพื่อให้มีคุณภาพดีขึ้นตามความต้องการนำไปใช้งาน โดยการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงแข็งจากชีวมวลส่วนใหญ่จะเป็นการนำไปเผาไหม้เพื่อให้พลังงานความร้อน และอาจเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนที่ได้ไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น ๆ ที่ต้องการ จากที่ได้กล่าวถึงชีวมวลมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้ พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวลที่เป็นของแข็งจะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของชีวมวล โดยทั่วไปแล้วชีวมวลที่มีสภาพแข็งและเนื้อแน่น เช่น ไม้เนื้อแข็ง ชังข้าวโพด อ้อย จะให้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้สูงกว่าชีวมวลที่ได้จากพืช เช่น หญ้า ฟางข้าว ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพในการให้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลจึงมักนำชีวมวลไปแปรรูปเป็นชีวมวลอัดแท่ง เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนดีขึ้น ในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะ ไม้ และชีวมวลอัดแท่ง ดังนี้

2.2.1 ไม้

ประเทศไทยเรามีเชื้อเพลิงแข็งชีวมวลประเภทไม้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเป็นประเทศเกษตรกรรม และมีทรัพยากรป่าไม้เป็นจำนวนมาก ในอดีตมีการนำไม้มาใช้เป็นฟืนเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับการหุงต้ม ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการคมนาคมทางรถไฟ และใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องจักรไอน้ำ เป็นต้น ต่อมาเมื่อมีการค้นพบและผลิตเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม จึงมีการใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงลดน้อยลงไป แต่เมื่อเกิดภาวะน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมมีราคาแพง และมีเทคโนโลยีเกี่ยวกับการไฟฟโวลซิส และแก๊สซิฟิเคชันที่สูงขึ้น ทำให้ไม้ซึ่งเป็นชีวมวลที่มีอยู่จำนวนมากได้รับความสนใจนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนอีกรูปแบบหนึ่ง เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการเกิดขึ้นสั้นกว่าเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม ตลอดจนการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องทำให้การนำไม้มาใช้งานเป็นเชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพขึ้นไม่เหมือนกับในอดีต สิ่งที่สำคัญเกี่ยวกับไม้ มีดังนี้

2.2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีในไม้ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่

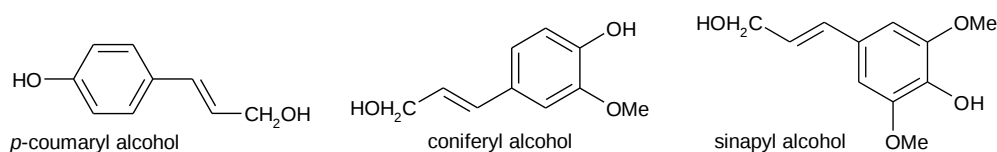
1) เซลลูโลส (cellulose) เป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ชนิดหนึ่ง ซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 50-65 ของพอลิแซ็กคาไรด์ทั้งหมดในต้นไม้ (plant)



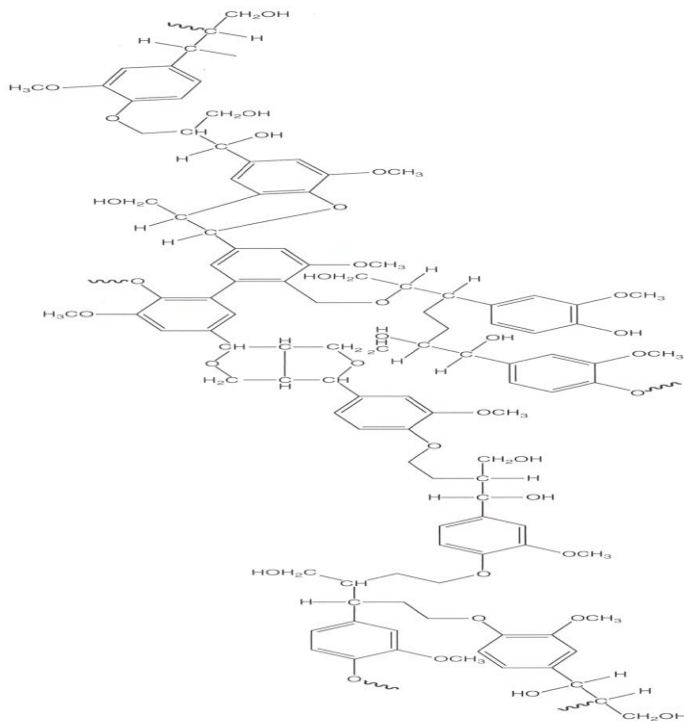
2) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นสารพอลิแซ็กคาไรด์อีกชนิดหนึ่ง ที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 35-50 ในผนังเซลล์ของพืชเฮมิเซลลูโลสจะมีอยู่ระหว่างเซลลูโลสไมโครไฟบริล (cellulose microfibrils) ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง โดยปริมาณของ เฮมิเซลลูโลสเป็นสิ่งที่บ่งชี้ถึงชนิดไม้เนื้อแข็งหรือไม้เนื้ออ่อน โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น ไซโลส (xylose) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง บีตา (1-4) เป็นสายโซ่หลัก และอาจมีแมนโนส (mannose) กาแล็กโทส (galactose) หรือกลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นสายโซ่หลักด้วย นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลชนิดอื่น เช่น อะราบินโนส (arabinose) กรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) มาต่อกันเป็นสายโซ่แขนง เฮมิเซลลูโลสเป็นเส้นใยอาหาร (dietary fiber) ที่ไม่ละลายน้ำ ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว ละลายในสารละลายด่างเจือจาง

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือ ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) และแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก (cation exchange) เมื่ออยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้ของมนุษย์

3) ลิกนิน (lignin) เป็นไบโอพอลิเมอร์ (biopolymer) ในไม้ที่พบได้ในพืชเท่านั้น เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์อีกชนิดหนึ่งที่นอกเหนือจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส แต่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าพบในไม้ใบกว้าง (hardwood) ไม้ใบแคบ (softwood) และพืชล้มลุก (grasses) ในพืชใบแคบหรือไม้ตระกูลสนจะพบลิกนินประมาณ 25-30 % ส่วนในไม้ใบกว้างจะมีลิกนินประมาณ 20-25 % ในโมเลกุลของโคพอลิเมอร์ (copolymer) ของลิกนินจะประกอบด้วยมอนอเมอร์หลัก ๆ 3 ชนิด คือ พารา-คูมาริล (p-coumaryl) คอนิเฟอริล (coniferyl) และซินาปิลแอลกอฮอล์ (sinapyl alcohol)



ลิกนินเป็นสารที่ทำให้พืชมีโครงสร้างแข็งแรง โมเลกุลพอลิเมอร์ของลิกนินจัดเรียงตัวกันแบบบดอัดกันเกิดขึ้นต่อจากการฟอร์มตัวของพอลิแซ็กคาไรด์ผนังเซลล์จนกระทั่งสิ้นสุดการสร้างผนังเซลล์ ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนินที่พบจากพืช เป็นดังนี้



4) สารแทรก (extractives) คือ สารที่พืชให้ออกมากเพื่อทำการกลั่นด้วยไอน้ำ (steam distillation) หรือการใช้ตัวทำละลายสกัด (solvent extraction) ซึ่งมักพบอยู่ในปริมาณน้อย สาร

แทรกนี้จะประกอบไปด้วยสารประกอบหลากหลายชนิด เช่น ไขมัน (fats) กรดไขมันอิสระ (free fatty acids) วัก (waxes) เรซิน (resins) แทนนิน (tannins) กัมม (gums) เทอร์พีนอยด์ (terpenoids) ฟลาโวนอยด์ (flavanoids) สติลบีปีน (stilbenes) โทรโพลีเนนส์ (tropolens) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยได้ (volatile hydrocarbons)

จากองค์ประกอบที่ได้กล่าวมาจึงทำให้ไม้เป็นชีวมวลที่ให้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้สูงกว่าชีวมวลที่ได้จากพืชล้มลุก เศษหญ้า และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เนื่องจากมีลักษณะที่แข็งและแน่น โดยทั่วไปแล้วปริมาณความร้อนที่ไม้ให้จะขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบสำหรับไม้แห้งจะให้ค่าความร้อนประมาณ 19.8-21.0 MJ/ kg (HHV) และ 17-19 MJ/ kg (LHV) ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 500-1,100 kg/ m³ ขึ้นอยู่กับชนิดของไม้เมื่อลิกนินจะมีค่าความร้อนของการเผาไหม้ที่สูงกว่าเซลลูโลส (26 กับ 18 MJ/ kg ตามลำดับ) โดยค่าความร้อนจะแปรเปลี่ยนไปตามปริมาณลิกนิน ปริมาณความร้อนของการเผาไหม้ของไม้แห้งในหน่วย MJ/ kg สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$CV = 17.5 F + 26.5 (1-F) \quad (1)$$

เมื่อ F คือสัดส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในไม้ โดยไม้แห้งมีค่าความร้อนประมาณ 75% ของถ่านหินคุณภาพดี และประมาณ 40% ของปิโตรเลียม อย่างไรก็ตาม ไม้มักจะมีความชื้นปนอยู่ด้วย 40-45% สำหรับไม้เนื้ออ่อน การเผาไม้สดหรือเรียกว่าไม้เขียว (green wood) จะให้ค่าความร้อนประมาณ 5 MJ/ kg หากทิ้งให้มีความชื้นลดลงเหลือประมาณ 15% เมื่อนำไปเผาไหม้จะให้ค่าความร้อนประมาณ 15 MJ/ kg ซึ่งไม้ที่มีความชื้นอยู่มากจะต้องใช้เวลานานเพื่อไล่ความชื้นออกไปก่อน ทำให้มีการสูญเสียความร้อนในช่วงไล่ความชื้นนี้ด้วย ดังนั้นการใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงจึงควรต้องใช้ไม้ที่แห้งหรือผ่านการไล่ความชื้นก่อนจึงจะมีประสิทธิภาพในการให้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้สูง

2.2.2 ชีวมวลอัดแน่น

ชีวมวลที่มีความแข็งและความหนาแน่นต่ำ เช่น หญ้า ฟางข้าว เศษวัสดุที่เหลือทิ้งจากทั้งภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรม เมื่อนำมาเผาให้ความร้อนจะให้ค่าความร้อนต่ำและมีระยะเวลาการเผาไหม้สั้น จึงได้มีการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลที่มีความหนาแน่นต่ำโดยการนำมาอัดให้เป็นเม็ดหรือเป็นแท่ง เพื่อให้มีความหนาแน่นและความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้ค่าความร้อนจากการเผาไหม้ดีขึ้น โดยชีวมวลอัดแท่งมักเรียกกันทั่วไปว่า แท่งเชื้อเพลิงเขียว (green fuel briquette) โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรหรืออุตสาหกรรมการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ชานอ้อย วัชพืชหรือใบไม้ มาอัดให้เป็นแท่งโดยใช้เครื่องอัดเย็นจากเครื่องอัดแท่งแบบสกรูหรือแบบเกลียวโดยอาศัยความเหนียวของยางในวัสดุเหล่านั้นเป็นตัวเชื่อมประสานและมีความชื้นพอดี แล้วนำไปตากแดดให้แห้ง จะได้แท่งเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้แทนฟืนและถ่านได้เป็นอย่างดีสำหรับการหุงต้ม ตลอดจนใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ในครัวเรือนรวมถึงในอุตสาหกรรมขนาดเล็กได้อย่างดี การอัดแท่งเชื้อเพลิงนี้ทำเช่นเดียวกับการอัดถ่าน

เขียว (green charcoal) ซึ่งสามารถทำได้ง่าย สะดวก ต้นทุนไม่สูงมากนัก เช่น แท่งเชื้อเพลิงเขียวจากเศษ วัชพืช จากขานอ้อย หรือจากขานอ้อยผสมกับขุยมะพร้าว เป็นต้น ซึ่งแท่งเชื้อเพลิงที่ได้จะให้ค่าพลังงาน ความร้อนจากการเผาไหม้สูงและมีเผาไหม้ได้นานกว่าการนำชีวมวลมาเผาโดยตรง แต่ทั้งนี้ชีวมวลอัดแท่ง จะให้ปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้ต่ำกว่าฟืนและถ่าน โดยอาจมีควันมากในช่วงเริ่มต้นของการเผาไหม้และอาจมีการดูดความชื้นในอากาศทำให้เกิดราขึ้น และและมีประสิทธิภาพลดลงจึงควรต้องเก็บไว้ อย่างมิดชิดหากต้องเก็บไว้นาน ๆ เชื้อเพลิงเขียวที่ทำจากเศษพืชเน่าเปื่อย เช่น ใบไม้เน่าเปื่อยหรือขาน อ้อยเน่าเปื่อย เป็นเชื้อเพลิงเขียวที่มีคุณภาพดี หากมีการผสมผงถ่านที่เหลือทิ้งลงไปเล็กน้อยจะทำให้มี คุณภาพสูงขึ้นใกล้เคียงฟืนและถ่าน (ขึ้นกับอัตราส่วนการผสมและคุณภาพของวัตถุดิบ) เนื่องจากแท่ง เชื้อเพลิงเขียวมีค่าความหนาแน่น (density) ใกล้เคียง 1 ดังนั้นจึงสามารถนำไปเผาเป็นถ่าน (carbonization) ได้และถ่านที่ได้ สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนได้สูง

2.2.3 ถ่านจากชีวมวล

ถ่านเป็นเชื้อเพลิงจากชีวมวลที่ดี ได้จากการคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ชีวมวลแข็ง ชนิดต่าง ๆ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน กะลามะพร้าว ไม้ ช้างข้าวโพด รวมถึงเปลือกผลไม้ที่มีความ หนาแน่นสูง และชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีความหนาแน่นและความแข็งแรงพอเหมาะ เช่น เมล็ด และเปลือกฝักมะขามที่เสียหายจากรา (ปิยรัตน์ มุลศรี วิไลพร ปองเพียร และกฤษฎา มุลศรี, 2555) สามารถนำไปเปลี่ยนรูปเป็นถ่านได้ทั้งหมด กระบวนการคาร์บอนไนเซชันเริ่มขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 280 °C และถูกคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 – 500 °C ถ่านที่ได้จะให้ปริมาณความร้อนประมาณ 30 MJ/ kg ใกล้เคียงกับถ่านหินคุณภาพดี โดยเซลล์ลูโลส เฮมิเซลล์ลูโลส และลิกนินที่มีอยู่ในไม้ มีออกซิเจนเป็น องค์ประกอบ ตลอดช่วงของการคาร์บอนไนเซชัน ออกซิเจนจะถูกไล่ออกไปกับสารที่ระเหยได้ต่าง ๆ ทำให้ มีสัดส่วนของออกซิเจนลดลง ส่งผลให้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจากไม้ คุณภาพของถ่านที่ได้จาก กระบวนการจะมีปริมาณคาร์บอนคงตัว 40-86 % สารระเหย 9-38 % ปริมาณเถ้า 2-9 % และความชื้น 3-15 % โดยค่าความร้อนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณคาร์บอนคงตัว ถ่านไม้ที่มีคุณภาพดีสามารถใช้แทน ถ่านโค้กในการหลอมและขึ้นรูปโลหะ ตลอดจนใช้เป็นสารกรองน้ำและเป็นสารฟอกสีได้

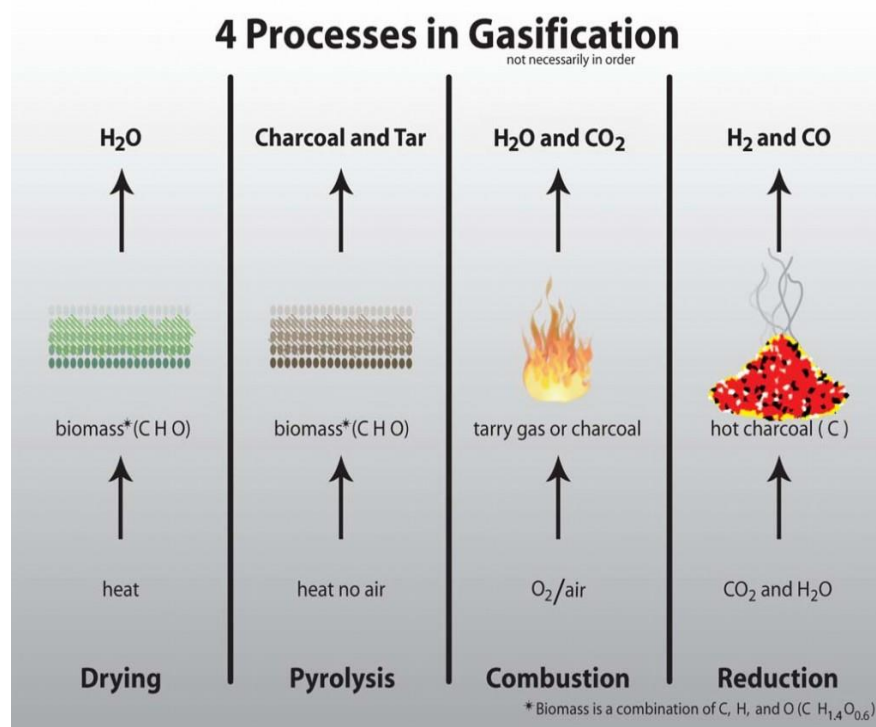
2.3 แก๊สชีวมวล

การเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งชีวมวล เช่น ไม้ ถ่านหิน แกลบ ชี้อเลื้อย หรือวัสดุเหลือใช้ทาง การเกษตร ให้เป็นแก๊สเรียกว่า แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) เป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในที่ ๆ มีอากาศจำกัด ทำให้เกิดความร้อนบางส่วนและความร้อนนี้จะไปเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องอื่นๆ ทำให้ได้แก๊ส เชื้อเพลิง แก๊สเกิดขึ้น โดยแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นี้เรียกว่า แก๊สชีวมวล ซึ่งมีส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เนื่องจากแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่สามารถ ควบคุมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ ทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิและประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง มีเขม่า

น้อย โดยสามารถนำมาใช้เผาไหม้เพื่อให้พลังงานความร้อนโดยตรง หรือเป็นเปลี่ยนพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานกล ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า รวมถึงใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์รอบต่ำบางชนิดได้

2.3.1 ปฏิริยาเคมีทางความร้อนของการเกิดแก๊สชีวมวล

กระบวนการเกิดแก๊สชีวมวลภายในเตาเผาสามารถแบ่งโซนการเกิดแก๊สตามปฏิริยาทางเคมีและความแตกต่างของอุณหภูมิ ได้เป็น 4 โซน ได้แก่ โซนการทำแห้ง (drying zone) โซนไพโรไลซิส หรือโซนของการกลั่น (pyrolysis or distillation zone) โซนการเผาไหม้หรือโซนออกซิชั่น (combustion or oxidation zone) และโซนรีดักชัน (reduction zone) ดังรูปที่ 2.1

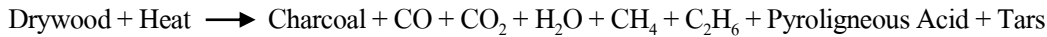


รูปที่ 2.1 กระบวนการเกิดแก๊สชีวมวลภายในเตาเผา

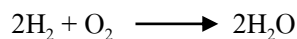
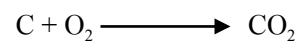
ที่มา (<http://engin1000.pbworks.com/w/page/18942701/Gasifier%20Go-Kart>)

2.3.1.1 โซนการทำแห้ง หรือ drying zone ในโซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100 – 200 °C ซึ่งอุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้มีความร้อนที่ทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนทำให้ระเหยตัวออกมาในรูปของไอน้ำ

2.3.1.2 โซนไพโรไลซิส หรือ pyrolysis zone เป็นโซนที่มีอุณหภูมิประมาณ 200 – 500 °C โดยความร้อนจากโซนการเผาไหม้และโซนรีดักชันจะแพร่เข้ามาสู่โซนนี้ทำให้เกิดการกลั่นตัวของสารอินทรีย์ในชีวมวลได้ผลิตภัณฑ์หลักคือ เมทานอล กรดน้ำส้ม และน้ำมันดิน ส่วนแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านกระบวนการนี้คือคาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะทำปฏิริยาต่อไปในโซนรีดักชันและการเผาไหม้ ปฏิริยาที่ได้ในโซนไพโรไลซิสเขียนแสดงได้ดังสมการ

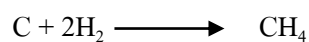
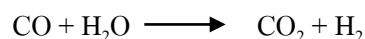
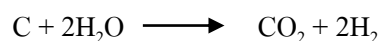
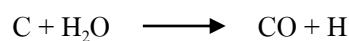
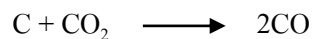


2.3.1.3 โซนการเผาไหม้ หรือ combustion zone ในส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำให้อากาศและเชื้อเพลิงสัมผัสผสมกัน โดยอากาศจะถูกส่งเข้ามาในโซนนี้จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างแก๊สออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ โดยอุณหภูมิในโซนการเผาไหม้นี้อยู่ที่ประมาณ $1,100 - 1,500^{\circ}\text{C}$ ผลผลิตหลักของปฏิกิริยาการเผาไหม้ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการ



เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซนรีดักชันและโซนไพโรไลซิสต่อไป

2.3.1.4 โซนรีดักชัน หรือ reduction zone ในส่วนนี้แก๊สร้อนที่ผ่านมาจากโซนการเผาไหม้จะไหลผ่านมายังโซนรีดักชันนี้ทำให้ในโซนนี้มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง $500 - 900^{\circ}\text{C}$ โซนรีดักชันมีปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยารีดักชัน โดยแก๊สบางส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ซึ่งได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในโซนการเผาไหม้ จะถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ จากการที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ทำให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนเกิดปฏิกิริยาดังนี้



โดยปฏิกิริยาแรกจะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ส่วนปฏิกิริยาที่สองเรียกว่าเบอดูอาร์รีดักชัน (boudouard reduction) ซึ่งจะทำได้ผลผลิตหลักเป็น CO เช่นกัน ส่วนและปฏิกิริยาที่สามเรียกว่า วอเตอร์แก๊สรีดักชัน (water gas reduction) เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C ได้ผลผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยแก๊ส CO และแก๊ส H_2 เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ ซึ่งมีแก๊ส CO เป็นแก๊สผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งปริมาณของแก๊ส CO ในแก๊สชีววมวลนี้จะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าแก๊ส CO_2 จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้มากน้อยเพียงใด โดยปฏิกิริยารีดักชันจะเกิดขึ้นได้ดีมากขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ พื้นผิวสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับเชื้อเพลิงแข็ง และความเร็วของการสัมผัสของแก๊สและเชื้อเพลิง เป็นต้น ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้า

เตาเผาจึงมีผลต่อการผลิตแก๊สด้วย เนื่องจากเชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและทำให้เกิดปริมาณช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมากจึงทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมากทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ลดลงจึงมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวมวลต่ำ แต่หากขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้ความดันภายในเตาสูญเสียไปมาก ทำให้ต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่เพื่อทำให้ความดันเพิ่มขึ้นทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้นและมีฝุ่นออกมากับแก๊สชีวมวลเพิ่มขึ้น โดยขนาดเชื้อเพลิงแข็งที่เหมาะสมควรมีขนาดประมาณ 20 – 100 mm สำหรับอิทธิพลจากปัจจัยของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาในโซนรีดักชันนี้ หากมีอุณหภูมิสูงกว่า 900 °C แก๊ส CO₂ ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊ส CO และหากอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 1,100 °C จะทำให้แก๊ส CO₂ ทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็นแก๊ส CO ดังนั้นประสิทธิภาพของเตาเผาจึงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในโซนรีดักชัน เนื่องจากปฏิกิริยาแรกและปฏิกิริยาที่สองข้างต้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ดังนั้นจึงทำให้อุณหภูมิของแก๊สจากโซนการเผาไหม้ที่เข้าสู่โซนรีดักชันมีอุณหภูมิลดลง สำหรับปฏิกิริยาที่สามเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำที่เข้ามากับแก๊สจากโซนเผาไหม้กับคาร์บอนร้อน ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 600 °C และให้แก๊ส H₂ และแก๊ส CO₂ เป็นผลิตภัณฑ์ โดยปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเช่นกันเนื่องจากทำให้ส่วนผสมของแก๊ส H₂ ในแก๊สชีวมวลเพิ่มขึ้นและมีผลต่อค่าความร้อนที่ได้ในกระบวนการ แต่ถ้าหากในแก๊สที่ผ่านเข้ามามีไอน้ำมากเกินไปก็อาจจะทำปฏิกิริยากับแก๊ส CO เกิดเป็นแก๊ส CO₂ และแก๊ส H₂ ได้ดังปฏิกิริยาในสมการที่สี่ ซึ่งเรียกว่า วอเตอร์ชิฟต์รีดักชัน (water shift reduction) ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้ควรมีปริมาณความชื้นไม่มากเกินไป นอกจากนี้แก๊ส H₂ บางส่วนอาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทน (CH₄) ขึ้นในโซนนี้ได้ดังปฏิกิริยาในสมการที่ห้าเรียกว่า การผลิตมีเทน (methane production) ซึ่งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่งในแก๊สชีวมวล แต่ปริมาณ CH₄ จะเกิดขึ้นเล็กน้อยจากกระบวนการนี้

2.3.2 รูปแบบของการผลิตแก๊สชีวมวล

การผลิตแก๊สชีวมวลเพื่อให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพและกระบวนการผลิตเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ควรต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจาก อุณหภูมิ อัตราความเร็วในการเผาไหม้ ปริมาณของอากาศในเตาเผา เป็นต้น ดังนั้นรูปแบบและการดำเนินการที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวมวลจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยรูปแบบการผลิตแก๊สชีวมวลอย่างง่ายโดยทั่วไปอาจแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบหลัก ๆ ดังนี้

2.3.2.1 การแก๊สซิฟิเคชันด้วยอากาศ (air gasification) เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายที่สุดสำหรับการผลิตแก๊สชีวมวล เป็นกระบวนการแบบดูดความร้อนและต้องการอากาศที่ใช้ในกระบวนการน้อย โดยมีค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณอากาศ ที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้พอดีตามทฤษฎี (equivalence ratio) ประมาณ 0.25 แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้ประกอบด้วยแก๊ส CO H₂

และไนโตรเจน (N_2) โดยเป็นแก๊สที่มีพลังงานไม่สูงมากนักเนื่องจากมีแก๊ส N_2 ซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย

2.3.2.2 การแก๊สซิฟิเคชันด้วยออกซิเจน (oxygen gasification) วิธีการนี้จะใช้แก๊สออกซิเจน (O_2) โดยตรงในการเผาไหม้เพื่อผลิตแก๊สชีวมวล โดยทั่วไปแล้วการผลิตแก๊สชีวมวลโดยวิธีการนี้จำนวน 1 ตัน จะต้องใช้ปริมาณออกซิเจน 1/3 ตัน แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีพลังงานอยู่ในระดับปานกลาง ซึ่งมีแรงดันเพียงพอที่จะลำเลียงส่งแก๊สไปใช้ประโยชน์โดยใช้ส่งได้ นอกจากการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้วยังสามารถนำไปใช้ในการผลิตเมทานอล แอมโมเนีย หรือมีเทน ได้อีกด้วย วิธีการแก๊สซิฟิเคชันด้วยออกซิเจนนี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าแบบแรกและมีฝุ่นละอองเกิดขึ้นปนมากับแก๊สน้อยกว่า แต่วิธีการนี้ใช้แก๊ส O_2 ในการเผาไหม้ซึ่งมีราคาแพงจึงเหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวมวลในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มากกว่าขนาดเล็ก

2.3.2.3 การแก๊สซิฟิเคชันแบบไพโรไลซิส (pyrolysis gasification) จากการที่ชีวมวลมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิด ดังนั้นเมื่อนำมาผลิตแก๊สชีวมวลจึงทำให้แก๊สที่ได้มีองค์ประกอบของสารระเหยสูงกว่าถ่านหิน วิธีการกลั่นสลาย (pyrolysis) จึงสามารถนำมาใช้ได้ในการกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเพื่อให้ได้แก๊สชีวมวลที่มีพลังงานปานกลาง โดยจะมีองค์ประกอบเป็นแก๊สมีเทน (light hydrocarbon) รวมถึงถ่านและน้ำมันจากกระบวนการผลิตอีกด้วย การแก๊สซิฟิเคชันแบบนี้แบ่งย่อยออกได้เป็น 2 วิธี ได้แก่

1) แก๊สซิฟิเคชันแบบไพโรไลซิสช้า (slow pyrolysis gasification) เป็นวิธีการที่ใช้อัตราการให้ความร้อนต่ำ ใช้อุณหภูมิปานกลาง และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน โดยวิธีนี้เป็นการผลิตแก๊สชีวมวลที่เกิดจากการแปรรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในถ่านและน้ำมันดินให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง แก๊สชีวมวลที่ได้จะเป็นแก๊สที่สะอาดและมีพลังงานในระดับปานกลาง ดำเนินการโดยนำถ่านไปเผาในฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized bed) ของทรายทำให้ทรายมีความร้อนสูงขึ้นและผ่านทรายร้อนนั้นไปยัง bed ที่สองซึ่งอยู่ถัดไป ทำให้เกิดการกลั่นสลายของถ่านใน bed แรกนี้ ถ่านส่วนหนึ่งใน bed ที่สองจะถูกเผาเพื่อที่จะให้ความร้อนกับไพโรไลซิสแก๊สและนำความร้อนที่ได้ใน fluidized แรก หรือป้อนความร้อนเข้าไปใหม่พร้อมกับชีวมวลเพื่อกความดันสูง

2) แก๊สซิฟิเคชันแบบไพโรไลซิสเร็ว (fast pyrolysis gasification) วิธีการที่ใช้อัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อวินาที) ใช้อุณหภูมิปานกลางและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้น โดยไอระเหยของโมเลกุลที่เกิดขึ้นระหว่างการกลั่นสลายนั้นสามารถที่แตกตัวให้สารโอลิฟิน (olefins) ได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์สารเคมีอื่นที่เป็นประโยชน์ได้ เช่น แก๊สโซลีน เม็ดพลาสติก สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และแอลกอฮอล์ เป็นต้น นอกจากการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้รูปแบบของกระบวนการผลิต 3 รูปแบบหลัก ๆ ข้างต้นแล้ว ยังมีการดัดแปลงและปรับปรุงกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลอีกหลายวิธี เพื่อทำให้ได้แก๊สชีวมวล และแก๊สเชื้อเพลิงใหม่รวมถึงได้ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการได้มากกว่า เช่น การ

แก๊สซิฟิเคชันด้วยไฮโดรเจน (hydrogen gasification) โดยการใช้แก๊สไฮโดรเจนไปทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีความดันสูงซึ่งจะสามารถเปลี่ยนองค์ประกอบภายในของแก๊สชีวมวลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวหรือแก๊สได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะของการเกิดปฏิกิริยา และการแก๊สซิฟิเคชันโดยวิธีเคมีและไฟฟ้าเคมี (chemical and electrochemical gasification) โดยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีของแก๊สชีวมวลเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจขึ้น เช่น การทำให้ปฏิกิริยารวมตัวระหว่างแก๊สชีวมวลกับแก๊สโบรมีน (Br_2) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สไฮโดรเจนโบรมไคด์ (HBr) และแก๊ส CO จากนั้นจึงนำแก๊ส HBr ที่ได้นั้นไปทำปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเพื่อให้ได้แก๊ส H_2 ต่อไป

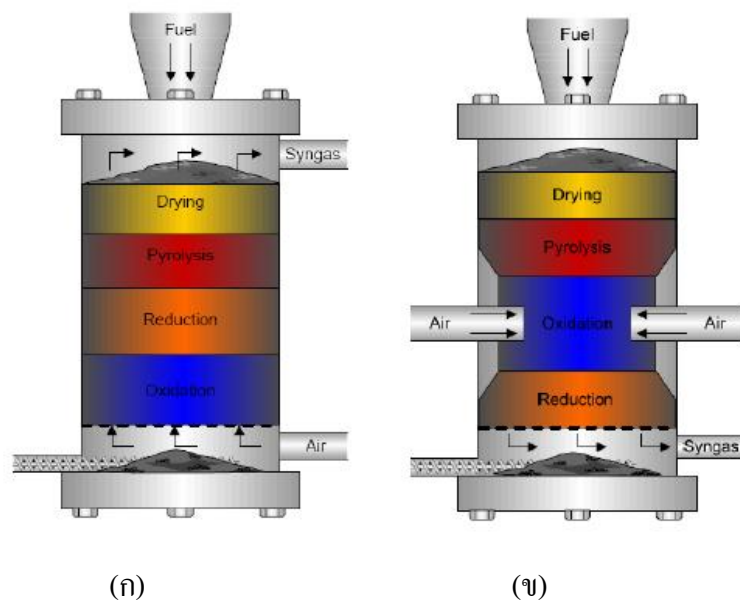
2.3.3 ประเภทของเตาผลิตแก๊สชีวมวล

การผลิตแก๊สชีวมวลเพื่อให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลที่มีคุณภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตพลังงานนั้น อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการดำเนินการผลิตแก๊สชีวมวลนั้นถือว่าเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเตาผลิตแก๊สชีวมวล (gasifier) ซึ่งต้องออกแบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามหลักการแก๊สซิฟิเคชันและปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นในแต่ละส่วน โดยทั่วไปแล้วเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้

2.3.3.1 แก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขึ้น (updraft gasifier) หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลสวน (counter flow) เป็นเตาผลิตแก๊สชีวมวลอย่างง่ายที่ป้อน เชื้อเพลิงเข้าไปจากด้านบนของเตาขณะที่อากาศถูกป้อนผ่านส่งตะแกรงด้านล่างขึ้นไป บริเวณด้านบนของตะแกรงจะเป็นโซนของการเผาไหม้ (oxidation zone) เมื่ออากาศผ่านไปยังบริเวณนี้จะเกิดการเผาไหม้กับเชื้อเพลิงเกิดแก๊ส CO_2 และน้ำ โดยแก๊สร้อนที่มีอุณหภูมิสูงจะเคลื่อนผ่านไปยังโซนรีดักชันต่อซึ่งเป็นส่วนที่มีปริมาณคาร์บอนเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยากับ CO_2 และน้ำ เกิดเป็นแก๊ส CO และแก๊ส H_2 จากนั้นแก๊สร้อนที่เกิดขึ้นก็จะไหลผ่านไปยังโซนไพโรไลซิสด้านบนซึ่งเป็นชั้นของชีวมวลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เกิดการกลั่นสลายสารอินทรีย์ในชีวมวลเหล่านั้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ $200 - 500^\circ\text{C}$ ต่อจากนั้นแก๊สร้อนก็จะไหลผ่านไปยังส่วนบนสุดซึ่งเป็นชั้นของชีวมวลที่มีความชื้น ทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกไปจากชีวมวล และทำให้แก๊สชีวมวลที่ออกจากเตาเผาชีวมวลมีอุณหภูมิต่ำลง ดังรูปที่ 2.2 (ก) ข้อจำกัดของแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขึ้น คือ มักมีสารระเหยและน้ำมันดินปนอยู่ในแก๊สชีวมวลมาก จึงไม่เหมาะในการนำไปใช้กับเครื่องยนต์โดยตรง แต่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรงในหม้อน้ำหรือเตาเผาเพื่อผลิตความร้อนสำหรับใช้ในการอบแห้งวัสดุทางการเกษตร หรือในอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ความร้อนหรือน้ำร้อนในกระบวนการ เป็นต้น

2.3.3.2 แก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง (downdraft gasifier) โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เตาจากด้านบน ส่วนอากาศเข้าจะถูกออกแบบมาให้เข้าด้านข้างไปยังส่วนของการเผาไหม้โดยตรงและถูกดูดให้ไหลลงสู่ด้านล่างของเตาเผา ดังรูปที่ 2.2 (ข) แก๊สที่ได้จากโซนของการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนที่อยู่เหนือตะแกรง ส่วนด้านบนของโซนการ

เผาไหม้จะเป็นชั้นของชีวมวลซึ่งมีปริมาณแก๊ส O_2 น้อยมากจึงเกิดการกลั่นสลายของสารอินทรีย์ทำให้เกิดไอระเหยและน้ำมันดินปนอยู่กับแก๊สร้อน ซึ่งจะถูกดูดให้ไหลลงมาผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนเช่นกัน ทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สได้ โดยการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิคงที่ในช่วง $800 - 1,000\ ^\circ C$ ซึ่งหากมีอุณหภูมิสูงกว่า $1,000\ ^\circ C$ ปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สมีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมินี้ปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นแก๊สซิฟิเออร์แบบไหลลงนี้จึงเป็นการออกแบบเตาผลิตแก๊สชีวมวลที่ช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนน้ำมันดินและสารระเหยจากเชื้อเพลิงแข็งที่เป็นปัญหาต่อการนำไปใช้งาน และแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้มีอุณหภูมิที่ไม่สูงหรือต่ำมากนัก



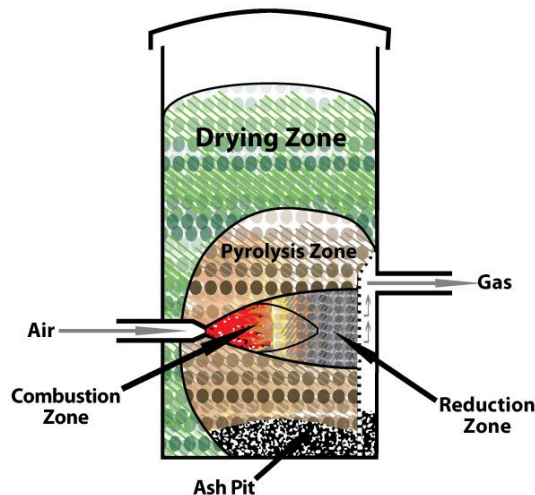
รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะของ (ก) updraft gasifier และ (ข) downdraft gasifier ที่มา (Oberberger & Thek, 2008, p.10)

หากเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันดินในแก๊สชีวมวลโดยวิธีนี้กับแก๊สซิฟิเออร์แบบไหลขึ้นแล้ววิธีการนี้จะช่วยลดปริมาณน้ำมันดินในแก๊สที่ผ่านโซนการเผาไหม้ให้ลดลงเหลือน้อยกว่า 10% ของน้ำมันดินและน้ำมันที่ได้จากแก๊สซิฟิเออร์แบบไหลขึ้น อีกทั้งแก๊สชีวมวลที่ได้ยังมีความสะอาดมากด้วย โดยแก๊สซิฟิเออร์ทั้งแบบไหลขึ้นและไหลลงจะป้อนอากาศเข้าไปยังเตาด้วยความเร็วต่ำ ดังนั้นจึงมีปริมาณเถ้าออกมากับแก๊สชีวมวลน้อยมาก

2.3.3.3 แก๊สซิฟิเออร์แบบไหลขวาง (crossdraft gasifier) เป็นเตาผลิตแก๊สชีวมวลที่ได้ออกแบบให้อากาศถูกดูดผ่านหัวฉีดเข้ามาตามแนวราบ โดยโซนของการเผาไหม้จะอยู่ถัดจากหัวฉีดไปตามด้วยโซนรีดักชัน ส่วนแก๊สชีวมวลจะนำออกจากเตาผ่านตะแกรงซึ่งอยู่ในแนวตั้งดังรูปที่ 2.3 ส่วนบริเวณรอบโซนการเผาไหม้และโซนรีดักชันจะเป็นโซนไพโรไลซิส หรือโซนของการกลั่นแยกสาร ในส่วนนี้น้ำมันดินและน้ำมันที่เกิดขึ้นรวมอยู่ในแก๊สจะไหลผ่านโซนรีดักชัน ทำให้น้ำมันดินและน้ำมันเกิด

การแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะออกสู่ภายนอก แก๊สชีวมวลที่ได้จึงมีปริมาณน้ำมันดินและน้ำมันสารระเหยปนอยู่ด้วยน้อยมาก เชื้อเพลิงที่ควรนำมาใช้กับแก๊สซิฟิเคชันแบบขวางนี้ควรใช้ถ่านไม้คุณภาพสูงเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถนำแก๊สชีวมวลที่ได้ไปใช้ในเครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ทางการเกษตรรวมถึงใช้ในยานพาหนะได้

Crossdraft Gasifier

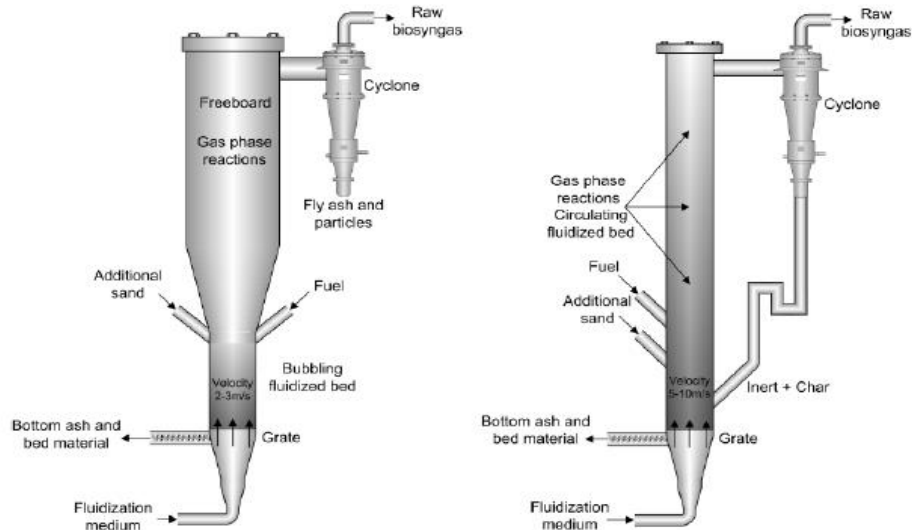


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของ crossdraft gasifier

ที่มา (<http://engin1000.pbworks.com/w/page/18942701/Gasifier%20Go-Kart>)

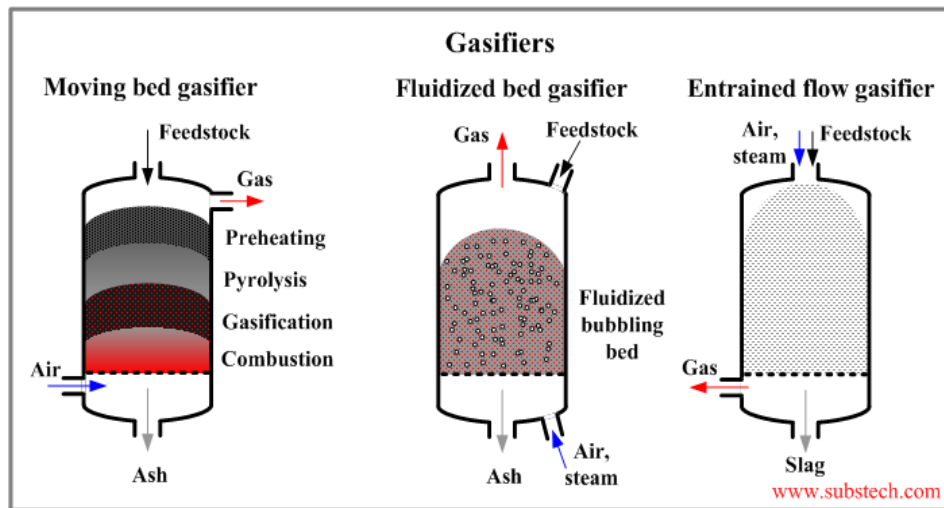
2.3.3.4 แก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed gasifier) เป็นเตาสำหรับการผลิตแก๊สชีวมวลที่ออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหาการอุดตันในเตาเผาเนื่องมาจากเถ้าหรือการจับตัวของอนุภาคที่เกิดขึ้นจากกระบวนการที่มีมากเกินไป ซึ่งมักเกิดขึ้นกับเตาแก๊สซิฟิเคชันสามชนิดแรกข้างต้น โดยเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบนี้จะนำอากาศให้ไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิงแข็งเมื่อความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้เชื้อเพลิงแข็งเกิดการลอยตัวขึ้นเสมือนของไหล ขณะที่เริ่มติดไฟ fluidized bed จะร้อนขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงจนถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิง จากนั้นจะป้อนเชื้อเพลิงเข้าไปในเตาอย่างสม่ำเสมอ ในเตาประเภทนี้ใช้วัสดุเฉื่อย เช่น ทราย หรือหินปูน (ตัวเร่งปฏิกิริยา) ลงไปในเตาด้วยเพื่อช่วยในการถ่ายเทความร้อน และช่วยในการทำความสะอาดแก๊สที่ได้ใน fluidized bed ข้อดีของแก๊สซิฟิเคชันแบบนี้คือ สามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาได้ง่ายเพื่อให้มีอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าได้ ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของอนุภาคเป็นก้อนเกิดขึ้น จึงสามารถใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีเถ้ามากได้ แต่ข้อเสียคือ การที่อากาศภายในเตามีความเร็วสูงจึงทำให้แก๊สชีวมวลที่ได้จะมีปริมาณเถ้าลอยและฝุ่นถ่านออกมาด้วย ดังนั้นก่อนนำแก๊สไปใช้งานจึงต้องมีระบบการบำบัดเถ้าลอยหรือฝุ่นขนาดเล็กด้วยเสมอ

แก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองก๊าซ (bubbling fluidized bed) ซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลของสารผสมแบบปั่นป่วน และฟลูอิดไคซ์เบดแบบไหลเวียน (circulating fluidized bed) ซึ่งเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำให้เกิดการไหลเวียนของสารผสมด้วย ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของ fluidized bed gasifier ซึ่งแบ่งออกเป็น (ก) bubbling fluidized bed และ (ข) circulating fluidized bed
ที่มา (Oberberger & Thek, 2008, p.11)

2.3.3.5 แก๊สซิฟิเคชันแบบไหลผ่าน (entrained flow gasifier) เป็นเตาสำหรับผลิตแก๊สชีวมวลที่ออกแบบให้ โดยให้สารผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย (suspended) หมุนวนภายในเตา เพื่อให้แก๊สและเชื้อเพลิงมีโอกาสสัมผัสกันมากที่สุดซึ่งจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น โดยเชื้อเพลิงและอากาศจะป้อนจากด้านบนของเตา ส่วนใหญ่แล้วแก๊สซิฟิเคชันแบบนี้จะใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตแก๊สชีวมวล รวมถึงเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็ก เช่น ขี้เลื่อย แกลบหรือถ่านแกลบก็สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในแก๊สซิฟิเคชันแบบนี้ได้ สิ่งที่ต้องควบคุมสำหรับเตาประเภทนี้คือ การควบคุมอัตราการไหลของอากาศและขนาดของเชื้อเพลิงต้องมีความเหมาะสมที่จะทำให้เกิดสภาพอนุภาคแขวนลอยได้ตลอดทั้งกระบวนการ ลักษณะและการทำงานอย่างง่ายของแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลผ่านเปรียบเทียบกับแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขึ้นและแบบฟลูอิดไคซ์เบดแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการทำงานของแก๊สซิไฟเออร์แบบ entrained flow เปรียบเทียบกับแบบ fluidized bed

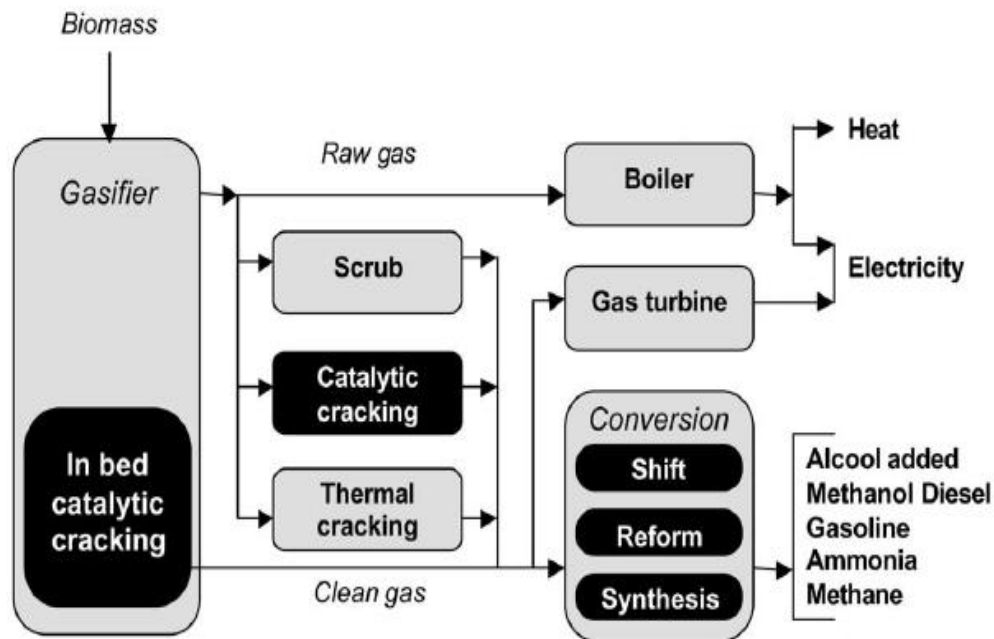
และแบบ updraft

ที่มา (<http://www.substech.com/>)

2.3.4 ประโยชน์ของแก๊สชีวมวล

การใช้ประโยชน์ของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงหรืออาจต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของแก๊สชีวมวลให้เหมาะสมก่อนกับการนำไปใช้งานแต่ละประเภท เนื่องจากชีวมวลมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อยู่หลายชนิด อีกทั้งยังมีถ่านและเถ้าเกิดขึ้นจากกระบวนการด้วย จึงทำให้แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้อาจมีฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก หรือไอระเหย น้ำมันดินและน้ำมันปนออกมากับแก๊สด้วย ดังนั้นสำหรับการนำไปใช้งานบางอย่างจึงต้องทำการบำบัดสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ออกไปก่อน นอกจากนี้อาจทำการดัดแปลงหรือเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลของสารที่อยู่ในแก๊สชีวมวลเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นด้วย โดยการใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวมวลและขั้นตอนที่ต้องดำเนินการเพื่อให้ได้แก๊สที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานแต่ละประเภทแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยแก๊สชีวมวลที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิไฟเออร์สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงานความร้อนได้โดยตรงจากหม้อไอน้ำ (boiler) หรือจากเตาเผาผลิตความร้อนที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ การอบแห้งวัสดุ การเกษตร นำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ สำหรับการนำแก๊สชีวมวลไปใช้ในเครื่องยนต์ เครื่องจักรและเครื่องยนต์กังหันแก๊ส (gas turbine) แก๊สชีวมวลที่ได้ควรต้องผ่านการบำบัดให้เป็นแก๊สที่สะอาดก่อนนำไปใช้ และบางครั้งอาจมีความจำเป็นต้องทำการแตกโมเลกุลของแก๊สชีวมวลให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้เหมาะสมในการนำไปใช้งานมากขึ้น นอกจากนี้แล้วแก๊สชีวมวลยังสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตสารเคมีอื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์ แก๊สโซลีน แอมโมเนีย และแก๊สมีเทน เป็นต้น โดยการนำแก๊สชีวมวลที่ได้มาผ่านกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อให้มีโครงสร้างโมเลกุลเปลี่ยนเป็นสารเคมีใหม่ที่ต้องการ ดังนั้นแก๊สชีวมวลจึงเป็นแก๊สเชื้อเพลิงทางเลือกอีกชนิดหนึ่งที่ได้รับ

ความสนใจในการศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียม นำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานยนต์ เครื่องยนต์ เครื่องจักร และการนำไปใช้ผลิตสารเคมีสำหรับอุตสาหกรรม เป็นต้น เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศที่มีทรัพยากรชีวมวลจำนวนมาก และระยะเวลาในการกำเนิดชีวมวลสั้นกว่าการกำเนิดปิโตรเลียมอย่างมาก



รูปที่ 2.6 แสดงการใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวมวลทั้งทางตรงและการเปลี่ยนรูปใหม่
ที่มา (Bekgiorno, De Feo, Della Rocca, & Napoli, 2003, p.9)

2.4 การปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวมวล

การผลิตแก๊สชีวมวลมักมีสิ่งปนเปื้อน เช่น แอวลอย อนุภาคขนาดเล็ก เหมะ สารที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา สารที่เป็นกรดระเหย และความชื้น ปะปนรวมอยู่ด้วยเสมอ ส่งผลทำให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้เมื่อนำไปใช้งานอาจก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับเครื่องมือหรือเครื่องยนต์ ตลอดจนคุณภาพของแก๊สที่มีความบริสุทธิ์ต่ำจะทำให้ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ที่ลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพการใช้แก๊สเชื้อเพลิงต่ำตามไปด้วย ดังนั้นการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สเชื้อเพลิงจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยการปรับปรุงคุณภาพที่สำคัญมีดังนี้

2.4.1 การทำความสะอาดแก๊ส

แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีองค์ประกอบทางเคมีหลัก สำหรับการใช้ประโยชน์เป็นแก๊สเชื้อเพลิงคือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน นอกจากนี้อาจมีแก๊สมีเทนและสารประกอบไฮโดรคาร์บอนปนอยู่ด้วย แต่สิ่งที่มีปนเปื้อนอยู่ในแก๊สชีวมวลจากกระบวนการผลิต เช่น อนุภาคขนาดเล็ก สารทาร์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารประกอบซัลเฟอร์อื่น ๆ จะทำให้คุณภาพของแก๊สชีวมวลลดต่ำลงและส่งผลต่อการนำไปใช้งาน

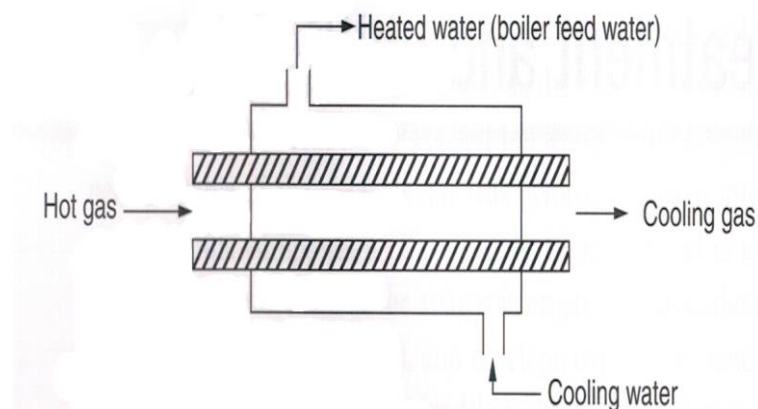
ดังนั้นจึงต้องมีการบำบัดแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้เพื่อลดองค์ประกอบที่มีอยู่เหล่านี้ให้ลดลงหรือหมดไปก่อนนำแก๊สชีวมวลที่ได้ไปใช้งาน โดยการทำความสะดวกแก๊สอาจทำได้ตามลำดับ ดังนี้

2.4.1.1 การกำจัดอนุภาคขนาดเล็ก เช่น เถ้าลอย หรือเขม่าที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ทำโดยการใช้อัดแยกแบบไซโคลน (cyclone separator) ซึ่งจะดำเนินการที่อุณหภูมิ 1000°C และความดัน 50 MPa สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า $5\text{ }\mu\text{m}$ ได้ แต่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่านี้ต้องใช้ถุงกรองฝุ่น (filter bag) หรือเครื่องดักฝุ่นไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator)

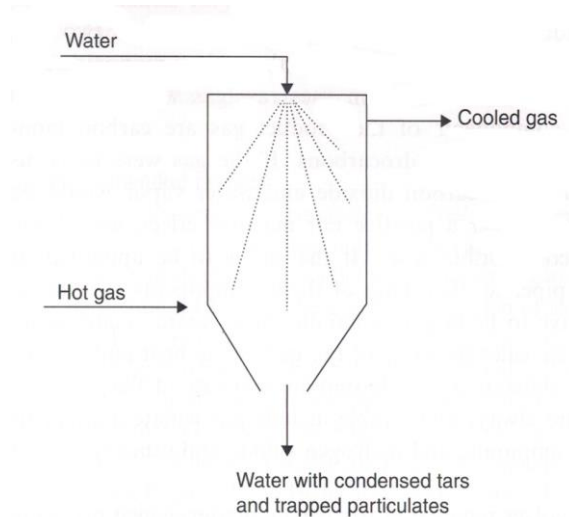
2.4.1.2 การลดอุณหภูมิของแก๊สที่ออกมาจากแก๊สซิฟิเคชันจะช่วยในการกำจัด สารอื่น ๆ ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น สารทาร์ สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ และน้ำมัน ให้ออกไปจากแก๊สได้ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของแก๊สลดลงจะทำให้สาร โมเลกุลใหญ่เหล่านี้กลั่นตัวเป็นของเหลวแยกออกไป โดยการลดอุณหภูมิของแก๊สนี้สามารถทำได้โดย

1) การใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) เป็นการปล่อยให้แก๊สร้อนไหลผ่านท่อที่มีการหล่อเย็นด้วยน้ำ ดังรูปที่ 2.7

2) การใช้เครื่องสครับเบอร์แบบสเปรย์ (spray tower scrubber) แบบเปียก เพื่อให้เกิดการรวมตัวกับความชื้น (wet scrubbing) ซึ่งจะช่วยให้แยกฝุ่นขนาดเล็ก รวมถึงแก๊ส SO_2 , NO_x , NH_3 , CO_2 , H_2S สารทาร์และสารประกอบขนาดใหญ่ออกไปได้ ดังรูปที่ 2.8

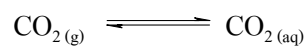
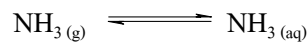


รูปที่ 2.7 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ shell-and-tube สำหรับลดอุณหภูมิของแก๊สที่มา (Schobert, 2013, p.364)

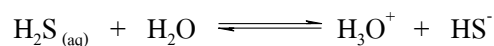
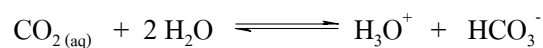
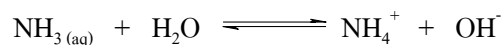
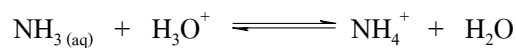


รูปที่ 2.8 การทำงานของเครื่องสครับเบอร์แบบสเปรย์ในการดักจับอนุภาคและลดอุณหภูมิแก๊สที่มา (Schobert, 2013, p.364)

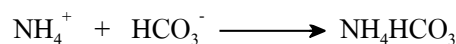
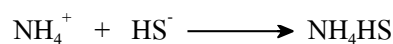
ตัวอย่างการกำจัดแก๊ส 3 ชนิด ที่มักมีปะปนอยู่ในแก๊สชีวมวล คือ แก๊ส NH_3 แก๊ส CO_2 และแก๊ส H_2S ซึ่งมีสมการระหว่างวัฏภาค แสดงได้ดังนี้



และในสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ สารเหล่านี้จะถูกไอออไนซ์ ได้ดังนี้



ในสถานการณ์จริง NH_4^+ จะเกิดปฏิกิริยาต่อไปดังนี้



เมื่อระบบของแก๊สซีพีเคชันประกอบด้วยแก๊สทั้งสามชนิดนี้ คือ แก๊ส NH_3 แก๊ส CO_2 และแก๊ส H_2S การแยกแก๊สเหล่านี้ออกไปด้วยระบบการทำให้อัตกกับความร้อนจะสามารถแยกแก๊สเหล่านี้ให้ออกไปจากแก๊สชีวมวลได้ จากนั้นแก๊สชีวมวลที่มีความบริสุทธิ์ขึ้นจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานตามที่ต้องการ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฐิติกร บุญชูวงศ์ รัตนชัย ไพรินทร์ ศิริชัย เทพา และศิรินุช จินดารักษ์ (2552) ได้ศึกษาการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สแบบอัปดราฟท์ (updraft) โดยใช้เศษผักและแกลบเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเตาผลิตแก๊สที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 cm สูง 60 cm มีฐานสำหรับนำเตาออกขนาด 30 x 15 cm ความจุของฐานเท่ากับ 18,000 cm³ เตาสามารถจุเชื้อเพลิงเศษผักและแกลบได้ 0.9 kg และ 1.2 kg ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สมีเทน (CH₄) และค่าความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้โดยในการทดลองมีการปรับอัตราการไหลของอากาศต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.738×10^{-3} , 2.026×10^{-3} และ 2.435×10^{-3} m³/s ซึ่งผลการทดลองหาค่าความร้อนของเศษผักและแกลบโดยตรงพบว่าค่าความร้อนของเศษผักและแกลบมีค่า 12.39 MJ/kg และ 14.4 MJ/kg ที่ความชื้น 2.24% และ 1.38% มาตรฐานเปียก (%wb) ตามลำดับ ส่วนการทดลองการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเชื้อเพลิงเศษผักและแกลบพบว่า โปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากการใช้เศษผักเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 15.64% แก๊สมีเทน 0.29% และมีค่าความร้อนเท่ากับ 1,911.92 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 2.026×10^{-3} m³/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมที่สุดของเชื้อเพลิงเศษผัก ในขณะที่การใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้มีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 16.34% แก๊สมีเทน 1.14% และมีค่าความร้อนเท่ากับ 2,305.44 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหลอากาศเท่ากับ 2.026×10^{-3} m³/s ซึ่งเป็นอัตราการไหลอากาศที่เหมาะสมที่สุดของเชื้อเพลิงแกลบ จะเห็นว่าโปรคิวเซอร์แก๊สที่ได้จากเศษผักและแกลบมีค่าความร้อนไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นเศษผักแห้งจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเป็นเชื้อเพลิงเสริมสำหรับการผลิตพลังงาน

ดิณณภพ แพงพม (2552) นักศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ศึกษาปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันของไมยราบยักษ์เพื่อให้ได้แก๊สผลิตภัณฑ์ได้แก่แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน โดยจะทำการศึกษาดัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ คือ ขนาดของไมยราบยักษ์ โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง ไมยราบยักษ์บดกับไมยราบยักษ์ที่เป็นกิ่ง หลังจากนั้นใช้ขนาดที่ดีที่สุดนำไปทดสอบโดยการเปลี่ยนอุณหภูมิ โดยการศึกษาการเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วง 600-900 °C เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดหลังจากนั้นนำไปผสมกับโดโลไมต์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วน โดโลไมต์ต่อไมยราบยักษ์ในอัตราส่วน 0.5:1, 1:1, 1.5:1, และ 2:1 โดยน้ำหนัก เพื่อหาสภาวะที่มีแก๊สไฮโดรเจนที่มากที่สุด จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์คือ ใช้ไมยราบยักษ์บด ที่อุณหภูมิ 900 °C และใช้อัตราส่วนของโดโลไมต์ ต่อไมยราบยักษ์ 1:1 จะได้ไฮโดรเจนถึง 7.5 % mole

บุญจรัตน์ โจลานันท์ อาทิตย์ พุทธรักษาติ และจันสุดา คำคู่ย (2554) ได้ศึกษาพลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์ โดยได้มุ่งพัฒนาเชื้อเพลิงอัดแท่งและรูปแบบการจัดการไมยราบยักษ์ด้านพลังงานทดแทนของชุมชน ซึ่งจากการศึกษาพบว่ากระบวนการคาร์บอนในเซชันให้ปริมาณถ่านไมยราบยักษ์ประมาณร้อยละ 20 โดยมวล และการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งส่งผลให้

ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 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 (มพข.238/2547) การศึกษาพบว่า อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนและระยะเวลาต้นทุนของการผลิตเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่งไมยราบยักษ์เท่ากับ 5.5 และ 1.2 ปี นอกจากกระบวนการจัดการไมยราบยักษ์ด้านพลังงานทดแทนที่ได้นำเสนอ ชุมชนยังให้ความสำคัญตระหนักต่อมาตรการควบคุมมลพิษและมาตรการกั้นกำไรรัฐชุมชนในรูปแบบกองทุนด้วย

ศิริมิรินทร์ มีสุข (2552) นักศึกษาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชีเอื้อโดยแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งทำในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งภายใต้สภาวะไนโตรเจน ขนาดอนุภาคของชีเอื้อ 0.25-0.45 มิลลิเมตร ความดันไอน้ำเท่ากับ 16 กิโลปาสกาล อัตราส่วนโดยมวลของชีเอื้อต่อตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 1:0.5 ถึง 1:3 และอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาในช่วง 500 ถึง 650 องศาเซลเซียส โดยใช้ร้อยละ 15.50 โดยน้ำหนักของนิกเกิลบนถ่านหินลิกไนต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์จากการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับเติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ผลผลิตและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแก๊สซิฟิเคชันขึ้นอยู่กับการทดลองโดยเฉพาะอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ขณะที่แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 650 $^{\circ}$ C โดยผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 60.98 โดยโมล ที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$ C จากแก๊สซิฟิเคชันชีเอื้อด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าระหว่าง 1.08 ถึง 2.07 และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.07 ที่อุณหภูมิ 600 $^{\circ}$ C พบว่าอัตราส่วนโดยมวลของชีเอื้อต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1:3 ให้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุดเท่ากับ 2.33

สุรพงษ์ คล้ายมุข (2545) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและไหลลงโดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง และมีการปรับอัตราการไหลของอากาศต่างกัน 3 ระดับในการทดลองเตาแต่ละชนิด และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบว่าเตาแบบใดที่จะผลิตแก๊สที่สามารถให้ค่าความร้อนได้สูงกว่าด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊ส (gas chromatography) และสำหรับอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองผลิตแก๊สของเตาแบบไหลลงคือ 2.33×10^{-3} , 3.42×10^{-3} , และ 4.66×10^{-3} m^3/s ส่วนอัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการทดลองผลิตแก๊สของเตาแบบไหลขึ้นคือ 3.59×10^{-3} , 4.31×10^{-3} , และ 5.03×10^{-3} m^3/s ผลการทดลองนั้นพบว่าเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นนั้น ให้ค่าความร้อนสูง (HHV) 4545.9 kJ/Nm^3 ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 4.31×10^{-3} m^3/s และผลการผลิต producer gas ด้วยเตาแบบไหลลงนั้นจะให้ค่าความร้อนสูง (HHV) 2135.76 kJ/Nm^3 ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ

$3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีอัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $4.31 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ของเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นน่าจะเหมาะสมที่จะนำเอา producer gas ไปใช้ประโยชน์ได้เนื่องจากปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ทางทฤษฎีของเตาแบบไหลขึ้นนั้น เกิดขึ้นได้ดีกว่าเตาชนิดอื่น จึงทำให้แก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าความร้อนสูง (HHV) มากที่สุด

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

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์	รุ่น	บริษัทผู้ผลิต
เครื่องชั่งทศนิยม ตำแหน่ง (Analytical balance)	BP 210S	Sartorius, Germany
เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)	PinAAcle 900F	PerkinElmer USA
เครื่องวัดพีเอช (pH meter)	GC700	EUTECH Singapore
เตาอบ (Hot air oven)	UM500	Memmert Germany
เครื่องให้ความร้อนและหมุนเวียน (Hotplate & Stirrer)	4658	Cole-Parmer USA
เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography, GC)	5890 II	Hewlett Packard USA
เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)	CWF13/13	Carbolite England
อ่างน้ำร้อนและเครื่องเขย่า (Water & Shaker bath)	WB22	Memmert Germany
เครื่องบดสารแบบบอลมิลล์ (Ball-mill machine)	Home made	Thaiarsaco Thailand

3.1.2 สารเคมี

ในการวิจัยนี้ สารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	สูตรเคมี	MW (g/mol)	เกรด	บริษัทผู้ผลิต
กรดไฮโดรคลอริก 37% (v/v) (Hydrochloric acid)	HCl	36.46	AR	Merck, Germany
กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid)	H ₂ SO ₄	98.07	AR	Fluka Switzerland
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide)	KOH	56.11	AR	Merck, Germany
แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide)	NH ₄ OH	35.05	AR	Sigma, USA
แอมโมเนียมเฟอรัสซัลเฟต (Ammonium ferrous sulfate hexahydrate)	FeSO ₄ ·(NH ₄) ₂ SO ₄ ·6H ₂ O	392.14	AR	Fluka Switzerland
ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride)	ZnCl ₂	136.29	AR	Sigma, USA
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	NaOH	40.00	Lab	Carlo Erba, Italy
แบเรียมคลอไรด์ไดไฮเดรต (Barium chloride dihydrate)	BaCl ₂ ·2H ₂ O	244.28	AR	Fluka Switzerland
เลดไนเตรต (Lead nitrate)	Pb(NO ₃) ₂	331.20	AR	Merck, Germany
ซิงค์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Zinc nitrate hexahydrate)	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	297.48	AR	Fluka Switzerland
กรดเบนโซอิก (Benzoic acid)	C ₆ H ₅ COOH	122.12	AR	Sigma USA
โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate)	Na ₂ CO ₃	105.99	AR	Fluka Switzerland
คอปเปอร์ไนเตรตไตรไฮเดรต (Copper nitrate trihydrate)	Cu(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	241.60	AR	Fluka Switzerland

3.2 การเตรียมวัตถุดิบและสารละลาย

3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้วัตถุดิบชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตรซึ่งได้แก่ แกลบดำ ชังข้าวโพด ชานอ้อย จี๊เลื่อย มูลวัว มูลสุกร และมูลไก่ โดยการนำชีวมวลที่จัดหามาได้จากแหล่งต่าง ๆ ในท้องถิ่น มาผึ่งตากแดดทิ้งไว้เพื่อไล่ความชื้นประมาณ 2-3 วัน จากนั้นนำวัตถุดิบชีวมวลที่มีขนาดใหญ่เช่น ชังข้าวโพด ไปทำการสับย่อยเพื่อลดขนาดให้เล็กลงโดยใช้เครื่องสับย่อยชีวมวล สำหรับมูลวัว มูลสุกร และมูลไก่ จะนำไปลดขนาดด้วยเครื่องบดแบบบดมิลล์ จากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อน จากนั้นนำชีวมวลทั้งหมดไปตากผึ่งแดดให้แห้งเพื่อไล่ความชื้นที่หลงเหลืออยู่อีกครั้ง แล้วจึงนำไปใส่ลงเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อเตรียมนำไปใช้งานต่อไป

3.2.2 การเตรียมสารละลาย

3.2.2.1 สารละลายกรดซัลฟริกความเข้มข้น 1.0 M

ปิเปตกรดซัลฟริกเข้มข้น (98%) ปริมาตร 53.99 mL ค่อย ๆ เทลงในขวดปริมาตรขนาด 1000 mL ที่บรรจุน้ำกลั่นไว้บางส่วนแล้วประมาณ 800 mL อย่างระมัดระวัง (ควรทำให้ผู้ดูดควัน) จากนั้นปรับปริมาตรของสารละลายด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.2.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 M

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ หนัก 40 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นประมาณ 400 mL ในบีกเกอร์ขนาด 500 mL คนด้วยแท่งแก้วจนกระทั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแข็งละลายหมด จากนั้นค่อย ๆ เทลงในขวดปริมาตรขนาด 1000 mL อย่างระมัดระวัง แล้วนั้นปรับปริมาตรของสารละลายด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.2.3 สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.0725 N

ชั่งโซเดียมคาร์บอเนต หนัก 3.84 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นประมาณ 400 mL ในบีกเกอร์ขนาด 500 mL คนด้วยแท่งแก้วจนกระทั่งโซเดียมคาร์บอเนตของแข็งละลายหมด จากนั้นเทลงในขวดปริมาตรขนาด 1000 mL และปรับปริมาตรของสารละลายด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.2.4 สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 M

ชั่งแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หนัก 1.7525 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นประมาณ 200 mL ในบีกเกอร์ขนาด 250 mL คนด้วยแท่งแก้วจนกระทั่งแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ของแข็งละลายหมด จากนั้นเทลงในขวดปริมาตรขนาด 500 mL และปรับปริมาตรของสารละลายด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.2.5 สารละลายแอมโมเนียมเพอร์สัลเฟตความเข้มข้น 1.0 M

ชั่งแอมโมเนียมเพอร์สัลเฟตหนัก 98 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นประมาณ 200 mL ในบีกเกอร์ขนาด 500 mL คนด้วยแท่งแก้วจนกระทั่งแอมโมเนียมเพอร์สัลเฟตของแข็งละลายหมด จากนั้นเทลงในขวดปริมาตรขนาด 250 mL และปรับปริมาตรของสารละลายด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

3.2.2.6 สารละลาย มาตรฐานคอปเปอร์ไนเตรด ความเข้มข้น 1 g/L

ชั่ง $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ มาหนัก 2.4482 กรัม ให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน ละลายด้วย 50 mL ของน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized distillation water, DI) ในบีกเกอร์ขนาด 100 mL จากนั้นถ่ายลงในขวดปริมาตรขนาด 500 mL แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐาน Cu^{2+}

3.2.2.7 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5-20 %

ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (37%) ปริมาตร 13.5, 27.1, 40.5 และ 54.1 mL ลงในขวดปริมาตรขนาด 100 mL ที่บรรจุน้ำกลั่นไว้บางส่วนแล้วจำนวน 4 ขวด ตามลำดับ แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร ภายหลังการเขย่าให้เข้ากันจะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5, 10, 15, และ 20 % ตามลำดับ

3.2.2.8 สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1%

ปิเปตกรดไนตริกเข้มข้น (conc. HNO_3) มา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 1%

3.2.2.9 สารละลายมาตรฐานตะกั่ว

ปิเปตสารละลายมาตรฐานเลดไนเตรด (lead nitrate standard stock solution) ความเข้มข้น 1,000 ppm มาปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรให้ถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน (น้ำดีไอ) จะได้สารละลายมาตรฐานเลดไนเตรดความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นทำการปิเปตสารละลายเลดไนเตรดความเข้มข้น 100 ppm มาปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ถึงขีดปริมาตร โดยใช้น้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายมาตรฐานเลดไนเตรดความเข้มข้น 10 ppm ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 0.50, 1.00, 2.00, 3.00 และ 4.00 ppm โดยทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วความเข้มข้น 10 ppm มา 0.50, 1.00, 2.00, 3.00 และ 4.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น 1% จนถึงขีดบอกริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานตะกั่วที่มีความเข้มข้น 0.50, 1.00, 2.00, 3.00 และ 4.00 ppm ตามลำดับ

3.2.2.10 สารละลายมาตรฐานแคดเมียม

ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียม ความเข้มข้น 1,000 ppm มาปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรให้ถึงขีดปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ฟิเชอ 5.0 จากนั้นปิเปตสารละลายมาตรฐานแคดเมียมความเข้มข้น 10 ppm มา 0.40, 0.8, 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ฟิเชอ 5.0 จนถึงขีดปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานแคดเมียมที่มีความเข้มข้น 0.40, 0.80, 1.20, 1.60 และ 2.00 ppm ที่มีฟิเชอเท่ากับ 5.0 ตามลำดับ

3.2.2.11 สารละลายมาตรฐานทองแดง

ปิเปตสารละลายมาตรฐานคอปเปอร์ไนเตรต (copper nitrate standard stock solution) ความเข้มข้น 1,000 ppm มาปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรให้ถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน (น้ำดีไอ) จะได้สารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นทำการปิเปตสารละลายคอปเปอร์ไนเตรตความเข้มข้น 100 ppm มาปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ถึงขีดปริมาตร โดยใช้น้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 ppm ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงที่มีความเข้มข้น 0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 6.00 ppm โดยทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานทองแดงความเข้มข้น 10 ppm มา 0.50, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00 และ 6.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นปราศจากไอออนและปรับฟิเชอของสารละลายด้วยกรดไนตริกเข้มข้น 1% จนถึงขีดบอกริมาตร ให้มีฟิเชอเท่ากับ 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

3.2.2.12 สารละลายมาตรฐานสังกะสี

ปิเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์ไนเตรต (zinc nitrate standard stock solution) ความเข้มข้น 1,000 ppm มาปริมาตร 10.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร แล้วทำการปรับปริมาตรให้ถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน (น้ำดีไอ) จะได้สารละลายมาตรฐานซิงค์ไนเตรตความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นทำการปิเปตสารละลายซิงค์ไนเตรตความเข้มข้น 100 ppm มาปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรให้ถึงขีดปริมาตร โดยใช้น้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายมาตรฐานซิงค์ไนเตรตความเข้มข้น 10 ppm ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานซิงค์ไนเตรตที่มีความเข้มข้น 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 และ 1.00 ppm โดยทำการปิเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์ไนเตรตความเข้มข้น 10 ppm มา 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 และ 1.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้น 1% จนถึงขีดบอกริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานสังกะสีที่มีความเข้มข้น 0.20, 0.30, 0.40, 0.50 และ 1.00 ppm ตามลำดับ

3.3 การออกแบบและเตรียมเครื่องมือ และชุดอุปกรณ์ในการวิจัย

3.3.1 การออกแบบและจัดทำเครื่องอัดแท่งชีวมวล

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาการเตรียมเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวลที่เหลือทิ้งจากการเกษตร เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาและการนำไปใช้ได้จริงในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวล จึงต้องทำการออกแบบและจัดทำเครื่องอัดแท่งชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรเพื่อใช้ในการศึกษา โดยในขั้นตอนนี้จะทำการออกแบบและจัดทำเครื่องอัดแท่งชีวมวลโดยใช้มือ มีขนาดพอเหมาะ และมีต้นทุนในการผลิตเครื่องอัดแท่งชีวมวลไม่แพง โดยทำการศึกษาและออกแบบเครื่องอัดแท่งชีวมวลทั้งแบบแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบตัน และแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบกลวง (มีรูภายในแท่งชีวมวล) แล้วนำไปทดสอบการนำไปใช้งานเพื่อให้ได้เครื่องอัดแท่งชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการทำการวิจัยในขั้นตอนต่อไป

3.3.2 การออกแบบและจัดทำเตาชีวมวล

ทำการศึกษารูปแบบและจัดทำเตาชีวมวลจากภูมิปัญญาท้องถิ่นที่สามารถนำมาใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผลิตขึ้นได้ โดยทำการออกแบบเตาชีวมวลแบบ up draft และเตาชีวมวลแบบ down draft ที่สามารถผลิตแก๊สชีวมวลได้จริงและมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการศึกษาการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ได้เตรียมขึ้น ตลอดจนมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนได้จริงต่อไป

3.3.3 การออกแบบและจัดทำชุดปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวมวล

ทำการศึกษารูปแบบและจัดทำชุดปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ เนื่องจากในการผลิตแก๊สชีวมวลนั้น แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ยังมีทั้งอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่ปะปนออกมากับแก๊สเชื้อเพลิง ตลอดจนแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ยังมีอุณหภูมิที่สูงอยู่ ดังนั้นจึงต้องจัดทำชุดอุปกรณ์ในการปรับปรุงคุณภาพของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ก่อน โดยในการออกแบบและการจัดทำชุดปรับปรุงคุณภาพแก๊สดังกล่าว เพื่อให้ได้ชุดอุปกรณ์ที่มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการศึกษาการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเชื้อเพลิง ตลอดจนมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนได้จริงต่อไป

3.3.4 การออกแบบและจัดทำชุดเก็บแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้

ทำการศึกษารูปแบบและจัดทำชุดเก็บแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ เพื่อให้การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวมวลนั้นมีความสะดวก โดยในการออกแบบและการจัดทำชุดเก็บแก๊สดังกล่าวจะคำนึงความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการศึกษาการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเชื้อเพลิงในขั้นตอนต่อไป ตลอดจนมีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในระดับชุมชนได้จริงต่อไป

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การศึกษาภูมิปัญญาท้องถิ่นในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในด้านพลังงาน

3.4.1.1 การศึกษาศักยภาพของชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรของจังหวัดเพชรบูรณ์

ทำการศึกษาและสำรวจทางด้านการทำการเกษตรของจังหวัดเพชรบูรณ์ เพื่อหาศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการศึกษาวิจัย

3.4.1.2 การศึกษาจากภูมิปัญญาท้องถิ่นในการจัดการพลังงานชุมชนและการแปรรูปวัสดุทางการเกษตรเพื่อเป็นพลังงานของชุมชน

ทำการสำรวจบุคคลในท้องถิ่นที่มีภูมิปัญญาในการจัดการพลังงานของชุมชน และการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานของชุมชน โดยการสัมภาษณ์

3.4.2 การศึกษาการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

3.4.2.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรที่ศึกษา ซึ่งได้แก่ปริมาณลิกนิน แอลฟา-เซลลูโลส แกมมา-เซลลูโลส และเบต้า-เซลลูโลส ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหยได้ ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ตลอดจนปริมาณโลหะหนักบางชนิดที่หลงเหลือตกค้างอยู่ในชีวมวลตัวอย่าง ดังนี้

1) การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุชีวมวล

ก. การวิเคราะห์หาปริมาณลิกนิน

1. ชั่งวัตถุดิบ (ที่ผ่านการบดให้ละเอียดแล้ว) หนักประมาณ 1.0 กรัม ใส่ลงไปในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร (บันทึกน้ำหนักที่แน่นอนไว้ที่ชั่งนิยม 4 ตำแหน่ง) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 72% ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ปิดบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิลา นำไปกวนบนเครื่องกวนสารที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง

2. เทสารละลายในข้อ 1 ลงไปในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ 150 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาณสารละลายให้เป็น 385 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

3. นำสารละลายที่ได้ไปรีฟลักซ์ (reflux) เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดตะกอน (ทิ้งไว้ค้างคืน)

4. ทำการกรองสารละลายด้วยกระดาษกรอง (บันทึกน้ำหนักของกระดาษกรองที่แน่นอนไว้) ล้างตะกอนด้วยน้ำร้อนหลาย ๆ ครั้ง นำตะกอนที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศา

เซลเซียส (นานประมาณ 1 ชั่วโมง) ทำให้เย็นโดยการทิ้งไว้ในเคลิเคเตอร์ จากนั้นนำตะกอนที่ได้ไปชั่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่าที่ได้

5. นำค่าน้ำหนักของตะกอนที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณลิกนิน ดังนี้

$$\text{ปริมาณลิกนิน (\%)} = (\text{น้ำหนักตะกอน} \div \text{น้ำหนักบดละเอียด}) \times 100$$

ข. การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส

- การเตรียมตัวอย่าง

1. ชั่งตัวอย่างหนัก 1.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร (บันทึกน้ำหนักไว้) จากนั้นเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร ปิดบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (จับเวลาทันทีที่เติมสารละลาย) นำไปกวนบนเครื่องกวนสารละลายเป็นเวลานาน 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร หลังจากครบกำหนดเวลาแล้ว กวนให้เข้ากัน แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

2. กรองสารละลายเพื่อแยกตะกอนออก แล้วทิ้งให้สารละลายใส จากนั้นนำสารละลาย 10 มิลลิลิตรแรกของการกรอง เก็บสารละลายใสเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณ 100 มิลลิลิตร

- การวิเคราะห์หาปริมาณแอลฟา-เซลลูโลส (เซลลูโลส)

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการกรองข้างต้นมาปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน

2. ค่อย ๆ เทกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงไป โดยเอียงขวดทำมุมประมาณ 45 องศา กับพื้น เพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรงของสารละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

3. หยดอินดิเคเตอร์ 2-4 หยด นำไปไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนสีจากสีเหลืองอมส้มเป็นสีน้ำตาลอมม่วง บันทึกปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไป

4. เตรียมสารละลายแบลนด์ โดยปิเปตโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ปริมาตร 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปทำวิธีการเดียวกับสารละลายตัวอย่างในข้อ 1-3

5. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณอัลฟา-เซลลูโลส ตามสมการ

$$\text{แอลฟา-เซลลูโลส (\%)} = 100 - [6.85 (V_2 - V_1) \times N \times 20 \div (A \times W)]$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

V_2 = ปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายแบลนค์ (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (นอร์มัล)

A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

6.85 = มิลลิกรัมสมมูลของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ทำให้ปฏิกิริยากพอดิกับเซลลูโลส (มิลลิลิตร)

- การวิเคราะห์หาปริมาณแกมมา-เซลลูโลส

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการกรองข้างต้นมาปริมาณ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในกระบอกตวงที่มีจุกปิด เติมสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 3 นอร์มัล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2-3 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ กรองสารละลายโดยเก็บส่วนใสไว้วิเคราะห์

2. ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่ได้จากการกรองข้างต้นมาปริมาณ 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตความเข้มข้น 0.5 นอร์มัล ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร แล้วผสมให้เข้ากัน

3. ค่อย ๆ เทกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงไป โดยเอียงขวดทำมุมประมาณ 45 องศาขึ้น เพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรงของสารละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

4. หยดอินดิเคเตอร์ 2-4 หยด นำไปไทเทรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนสีจากสีเหลืองอมส้มเป็นสีน้ำตาลอมม่วง บันทึกปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไป

5. นำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณแกมมา-เซลลูโลส ตามสมการ

$$\text{แกมมา-เซลลูโลส (\%)} = [6.85 (V_4 - V_3) \times N \times 20 \div (A \times W)]$$

เมื่อ V_3 = ปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

V_4 = ปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายแบลนค์ (มิลลิลิตร)

N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (นอร์มัล)

A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ (กรัม)

6.85 = มิลลิกรัมสมมูลของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ทำให้ปฏิกิริยากพอดิกับเซลลูโลส (มิลลิลิตร)

- การวิเคราะห์หาปริมาณเบต้า-เซลลูโลส (เฮมิเซลลูโลส)

ทำการคำนวณหาปริมาณเบต้า-เซลลูโลส จากค่าปริมาณของแอลฟา-เซลลูโลส และแกมมา-เซลลูโลส ตามสมการ

$$\text{เบต้า-เซลลูโลส (\%)} = 100 - (\text{แอลฟา-เซลลูโลส}) - (\text{แกมมา-เซลลูโลส})$$

2) การวิเคราะห์สมบัติเชิงประมาณ (proximate analysis)

ก. การหาปริมาณความชื้น (moisture)

การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นของถ่านตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3173 มีวิธีการดังนี้

1.1 ทำการอุ่นเตาเผาให้ร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C

1.2 อบด้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง ปลดออกทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

1.3 ชั่งถ่านหนัก 1.0 กรัม (โดยบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ลงไปในถ้วยกระเบื้อง แล้วนำไปอบจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณความชื้นในถ่านตัวอย่าง จากสมการ

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

เมื่อ A และ B = น้ำหนักของสารตัวอย่างก่อนอบและหลังอบ ตามลำดับ

ข. การหาปริมาณสารระเหยในตัวอย่าง (volatile matter)

การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหยของถ่านตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3175 มีวิธีการดังนี้

1.1 เผาด้วยกระเบื้องพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง ปลดออกทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

1.2 ชั่งถ่านที่แห้งสนิท หรือ ใช้ถ่านตัวอย่างที่ผ่านการหาปริมาณความชื้นแล้ว หนัก 1.0 กรัม (โดยบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ลงไปในถ้วยกระเบื้องและปิดฝา

1.3 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 °C นาน 7 นาที แล้วนำออกจากเตาเผาทันที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ในสภาพบรรยากาศประมาณ 20 นาที แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

1.4 บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา ทำซ้ำจนกระทั่งถ่านตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่

1.5 คำนวณหาปริมาณสารระเหยในถ่านตัวอย่าง จากสมการ

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

เมื่อ A และ B = น้ำหนักของสารตัวอย่างก่อนเผาและหลังเผา ตามลำดับ

ค. การหาปริมาณเถ้า (ash)

การวิเคราะห์หาปริมาณเถ้าของถ่านตัวอย่างโดยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D3174 มีวิธีการดังนี้

1.1 เฝากล้วยกระบือพร้อมฝาที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง ปั่นทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

1.2 ชั่งถ่านที่แห้งสนิท หรือ ใช้ถ่านตัวอย่างที่ผ่านการหาปริมาณความชื้นแล้วหนัก 1.0 กรัม (โดยบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ลงไปในถ้วยกระบือและปิดฝา

1.3 เฝาถ่านตัวอย่างที่อุณหภูมิ 650 °C (เปิดฝากล้วยกระบือขณะเผา) แล้วนำไปตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น

1.4 บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา ทำซ้ำจนกระทั่งถ่านตัวอย่างมีน้ำหนักคงที่

1.5 คำนวณหาปริมาณเถ้าในถ่านตัวอย่าง จากสมการ

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักถ่านตัวอย่างหลังเผา}}{\text{น้ำหนักถ่านตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 100$$

ง. การหาค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว ตามมาตรฐาน ASTM D3172-89 ซึ่งจะใช้ค่าที่หาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น (ASTM D3173) ปริมาณเถ้า (ASTM D3174) และปริมาณสารระเหย (ASTM D3175) โดยใช้การคำนวณตามสมการ ดังนี้

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

3) การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักตกค้างในวัสดุชีวมวลตัวอย่าง

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่ตกค้างอยู่ในวัสดุชีวมวลตัวอย่างซึ่งได้แก่ Ni Pb Cu Zn และ Cd โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอปซอพชั่นสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ของสารละลายโลหะหนักแต่ละชนิด

3.4.2.2 การศึกษาการเตรียมชีวมวลอัดแท่งและสูตรการเตรียมที่เหมาะสม

ทำการศึกษาการเตรียมชีวมวลอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร โดยทำการเตรียมส่วนผสมของชีวมวลแต่ละชนิดในสูตรการเตรียมต่าง ๆ จากนั้นทำการอัดขึ้นรูปชีวมวลอัดแท่งด้วยเครื่องอัดแท่งชีวมวลที่ประดิษฐ์ขึ้น ทำการตรวจสอบความสามารถในการขึ้นรูปเป็นแท่งชีวมวล ความแข็งและความคงตัว รวมถึงความหนาแน่นปรากฏของแท่งชีวมวลที่เตรียมได้ เพื่อหาสูตรการผสมที่มีความเหมาะสมในการนำไปศึกษาการผลิตแก๊สชีวมวลในขั้นตอนต่อไปจำนวน 12 สูตร

ทำการเตรียมถ่านจากแท่งชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้จากสูตรการเตรียมที่เหมาะสม โดยการนำไปเผาในเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ชีวมวลขนาดเล็ก จากนั้นนำไปศึกษาหาค่าประกอบทางเคมี และการผลิตแก๊สโปรคิวเซอร์ต่อไป

3.4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลอัดแท่ง

3.4.3.1 การหาค่าความหนาแน่นของชีวมวลอัดแท่ง

การหาความหนาแน่นปรากฏของชีวมวลอัดแท่งทำโดยทำการวัดขนาดของแท่งชีวมวลเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาตรของแท่งชีวมวล จากนั้นนำแท่งชีวมวลนั้นไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลทศนิยม 2 ตำแหน่ง แล้วคำนวณหาความหนาแน่นของแท่งชีวมวลแต่ละแท่งจากน้ำหนักที่วัดได้หารด้วยปริมาตรของแท่งชีวมวล โดยชีวมวลอัดแท่งแต่ละสูตรทำการหาความหนาแน่นของแท่งชีวมวลแต่ละแท่งประมาณ 20 แท่ง แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย

3.4.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลอัดแท่งและถ่านของชีวมวลอัดแท่ง

ก. การวิเคราะห์หาสมบัติแบบประมาณ

ทำการวิเคราะห์หาสมบัติแบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง ตลอดจนถ่านของชีวมวลอัดแท่งแต่ละสูตร ตามหัวข้อ

3.4.2.1

ข. การวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์

ทำการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟอร์ที่เป็นองค์ประกอบในชีวมวลอัดแท่ง และในถ่านชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้ ดังนี้

1. นำสารละลายที่ไทเทรตแล้วมาปรับให้มี pH 5.5-7.0 ด้วย NH_4OH (dil) แล้วให้ความร้อนกับสารละลายจนเดือด จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง และล้างด้วยน้ำร้อน 5-6 ครั้ง

2. ปรับให้สารละลายมีปริมาตร 250 mL และทำให้เป็นกลางด้วยสารละลาย NaOH

3. เติม HCl (1:9) 1 mL แล้วต้มให้เดือด

4. เติมน้ำละลาย BaCl_2 10 mL อย่างช้า ๆ จากปิเปต แล้วต้มต่อเป็นเวลา 15 นาที และตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง หรือตลอดคืน ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด

5. กรองสารละลายที่ได้ผ่านกระดาษกรอง Whatman No.42 เติมน้ำละลาย AgNO_3 1 หยด ลงไปในของเหลวที่กรองได้ ใส่กระดาษกรองด้วยน้ำร้อน จนกระทั่งของเหลวใส

6. ใส่กระดาษกรองเปียกที่มีตะกอนของ BaSO_4 ในถ้วยพอสเลนซ์ เฝานในเตาไฟฟ้า (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ $800 - 850^\circ\text{C}$ และให้ความร้อนจนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักกากของแข็งที่เหลือ

7. นำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาร้อยละซัลเฟอร์ ดังสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์} = \frac{\text{weight of BaSO}_4 \times 13.738}{\text{weight of sample}}$$

3.4.4 การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของชีวมวลอัดแท่ง

การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของชีวมวลอัดแท่งทำได้โดยใช้ 2 วิธี คือ การใช้เครื่องมือบอมคาร์ลอร์มิเตอร์ และการประมาณค่าจากสมการ แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่

ก) การหาปริมาณความร้อนโดยวิธีบอมคาร์ลอร์มิเตอร์

ก่อนการใช้งานเครื่อง AutoBomb (ในครั้งแรก) จะทำการ calibrate เพื่อทำการหาค่า waterequivalent ของ Bomb calorimeter พร้อมอุปกรณ์ โดยในการ calibrate ทุกครั้งควรใช้สาร Benzoic acid ซึ่งเป็นสารที่มีค่าความร้อนที่ได้รับการทดสอบจากโรงงานแล้วเป็นสารมาตรฐาน โดยทำการทดลองเพื่อหาปริมาณค่าความร้อนดังนี้

1. เตรียม sample (Benzoic acid) โดยชั่งน้ำหนักของ sample ประมาณ 1.1-1.2 g แล้วนำไปอัดเม็ด โดยที่ระหว่างทำการอัดเม็ดให้นำ cottonwire ใส่ลงไป และจะต้องได้เป็นเม็ดของ sample ที่มีลักษณะสมบูรณ์ไม่แตกหัก จากนั้นนำเม็ด sample ที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก (ความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง) แล้วบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้ไว้

2. นำ sample ที่ได้ใส่ลงไปใน crucible แล้ววางลงใน crucible support ring ของ Ignition terminal

3. ต่อ Firingwire เข้ากับขั้ว Electrode ทั้ง 2 ข้าง แล้วล็อกให้แน่น

4. นำปลายของสาร Firing cotton ผูกเข้ากับ Firingwire

5. หมุน crucible support ring ให้เข้าที่ แล้วหมุน ring clamping nut เพื่อล็อก crucible support ring ให้แน่น

6. เติมน้ำกลั่นลงใน Bomb body ประมาณ 1 mL

7. นำ Ignition terminal ใส่ลงใน Bomb body ก่อนใส่ควรตรวจความเรียบร้อยอีกครั้งแล้วปิดฝาให้แน่น

8. เติม oxygen ให้ Oxygen Bomb 30 bar

9. นำ Oxygen Bomb ที่ได้ทดสอบวงจรการจุดระเบิดโดยวาง Oxygen Bomb ไว้บน Bombconsole นำ Firing circuit test plug เสียบเข้ากับ Firing socket แล้วกดปุ่ม Test ไฟที่ปุ่ม Test จะต้องติด หากไฟที่ปุ่ม test ไม่ติดแสดงว่าวงจรไฟฟ้า (Firing wire) ที่ต่ออยู่ด้านใน Oxygen Bomb ขาดหรือหลวมหรือหลุด เมื่อทดสอบเสร็จให้นำ Firing circuit test plug เสียบกลับคืนในตำแหน่งเดิม

10. นำ Oxygen Bomb ใส่ลงไปใน Vessel (ภายใน Vessel จะบรรจุน้ำกลั่น โดยเมื่อชั่งน้ำหนักของ Vessel + น้ำ = 2.85 kg) ภายใน Vessel จะมีขาตั้งสำหรับรองรับ Oxygen Bomb อยู่

11. ปิดฝา Jacket cover กด Firing plug เพื่อให้ต่อเข้ากับ Firing socket ของ Oxygen Bomb แล้วกดปุ่ม Test ไฟที่ปุ่ม Test จะติด ถ้าไม่ติดแสดงว่า Firing plug ไม่ต่อกับ Firing socket

12. ตรวจสอบอุณหภูมิของ water jacket โดยอ่านค่าจาก thermometer แบบธรรมดา และตรวจสอบอุณหภูมิของ vessel โดยอ่านค่าจาก digital thermometer (Autotherm II) โดยอุณหภูมิของ water jacket และ vessel จะต้องเท่ากันหรือต่างกันได้ไม่เกิน 0.5 องศา

ในกรณีที่อุณหภูมิมีค่าแตกต่างกัน จะมี 2 กรณี คือ

- อุณหภูมิของ vessel สูงกว่าอุณหภูมิของ water jacket สามารถปรับได้จากตัวเครื่อง โดยหมุนปุ่ม balance ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา สังเกตการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แล้วหมุนกลับมาในตำแหน่งเดิม

- อุณหภูมิของ water jacket สูงกว่าอุณหภูมิของ vessel สามารถปรับได้โดยการนำเอาถัง vessel มาตั้งบน hotplate เพื่อเพิ่มอุณหภูมิ

13. ทำการป้อนข้อมูลให้กับเครื่อง

14. ทำการทดสอบหาค่าความร้อนตามวิธีการในคู่มือการใช้เครื่อง AutoBomb

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

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

เมื่อ VM = ปริมาณร้อยละของสารระเหย

FC = ปริมาณร้อยละของคาร์บอนคงตัว

ASH = ปริมาณร้อยละของเถ้า

3.4.5 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของโปรดิวเซอร์แก๊ส

ทำการศึกษาก่อนองค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้นของโปรดิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากการใช้ชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊ส CO, CH₄, H₂, CO₂ และ N₂ ซึ่งการวิเคราะห์หาปริมาณแก๊สแต่ละชนิดทำโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography (GC)

3.4.6 การศึกษาประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งจากการใช้งานจริง

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งในการทำไปใช้งานจริงกับเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบ up draft และแบบ down draft โดยจะศึกษาถึงประสิทธิภาพในด้านพลังงานความร้อน ด้านการผลิตแก๊สและระยะเวลาในการใช้งาน ด้านขั้นตอนและเงื่อนไขการใช้งาน ด้านความพึงพอใจของผู้ใช้งาน และด้านต้นทุนและความคุ้มค่าในการใช้เป็นพลังงานทดแทน ดังนี้

3.4.6.1 การศึกษาประสิทธิภาพในด้านพลังงานความร้อนที่ผลิตได้

ก) ทำการตรวจหาอุณหภูมิเปลวไฟ โดยใช้ thermocouple ในการวัดค่าอุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากโปรดิวเซอร์แก๊สที่จุดติดไฟ

ข) ทำการตรวจหาความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงโปรดิวเซอร์แก๊ส

1) ชั่งน้ำหนักปริมาณ 5,000 g ใส่ลงในหม้อภาชนะที่มีฝาปิด และวางอยู่บนเตาหุงต้มที่มีการป้องกันลม

2) เปิดวาล์วแก๊สและจุดติดไฟแก๊ส

3) วัดอัตราเร็วและความดันของแก๊สที่ไหลผ่านจากมิเตอร์

4) วัดอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 นาที จะกระทั่งน้ำเดือด

5) นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟระหว่างเวลากับอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น

6) คำนวณหาอัตราการให้ความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง

3.4.6.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สและระยะเวลาในการใช้งาน

- 1) ชั่งเชื้อเพลิงอัดแท่งหนัก 5 kg ใสลงไปในเตาชีวมวล
- 2) ทำการจุดเตาและบันทึกเวลาเริ่มต้นภายหลังจากการจุดไฟติด
- 3) วัดอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและอุณหภูมิเปลวไฟของแก๊สทุก ๆ 15 นาที
- 4) บันทึกเวลาที่ไฟของเตาดับสนิท (ระหว่างที่ทดลองควรมีการกระทุ้งแท่งเชื้อเพลิงในเตาอย่างสม่ำเสมอ) และคำนวณหาเวลาในการใช้งานแก๊สต่อน้ำหนักเชื้อเพลิง

3.4.6.3 การศึกษาขั้นตอนและเงื่อนไขการใช้งาน

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาขั้นตอนการนำแก๊สไปใช้ประโยชน์ในด้านเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับการเดินเครื่องยนต์ดีเซล สำหรับการสูบน้ำ เพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานจึงต้องเก็บแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ไว้ในถังเก็บแก๊สก่อน จากนั้นจึงผ่านแก๊สที่เก็บได้นั้นไปยังเครื่องยนต์สันดาปดีเซล โดยทำการศึกษารูปร่างเครื่องยนต์และการดัดแปลงเครื่องยนต์เพื่อให้รองรับการใช้งานจากโปรดิวเซอร์แก๊ส และขั้นตอนวิธีการใช้งานแก๊สเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ กำลังของเครื่องยนต์ที่ผลิตได้ และแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

3.4.6.4 การศึกษาต้นทุนและความคุ้มค่าในการใช้เป็นพลังงานทดแทน

ทำการวิเคราะห์และคำนวณต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ ปริมาณแก๊สที่ผลิตได้ต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงอัดแท่ง ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ แล้วทำการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG สำหรับการหุงต้ม

3.4.6.5 การศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

ทำการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งานจากผู้ที่สนใจเข้าร่วมการอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสำหรับการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สเพื่อใช้ในครัวเรือนและการเกษตร จากผลการวิจัยที่ได้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ได้ทำการศึกษาและพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งสำเร็จรูปจากภูมิปัญญาท้องถิ่นของจังหวัดเพชรบูรณ์ โดยการแปรรูปจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยในการวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการสำรวจภูมิปัญญาท้องถิ่นในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อใช้ประโยชน์และทำการศึกษาการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งและศึกษาสมบัติเบื้องต้นเพื่อให้ได้สูตรการเตรียมต่าง ๆ ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งแต่ละสูตร และศึกษาสมบัติทางเคมีและทางความร้อนของโปรดิวเซอร์แก๊ส ขั้นตอนที่ 3 เป็นการทดสอบการนำไปใช้จริงกับเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบต่าง ๆ และศึกษาประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ข้อจำกัดและความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ซึ่งรายละเอียดของผลการทดลองที่ได้จากการศึกษาในแต่ละขั้นตอน เป็นดังนี้คือ

4.1 ผลการศึกษาการสำรวจภูมิปัญญาท้องถิ่นในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อใช้ประโยชน์และการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

ในขั้นตอนนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็นขั้นตอนย่อย ๆ ต่าง ๆ ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการสำรวจภูมิปัญญาท้องถิ่นในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการนำไปใช้เป็นพลังงาน และขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งเพื่อให้ได้สูตรการเตรียมที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ศึกษาในขั้นตอนต่อไป โดยผลจากการศึกษาที่ได้จากแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้

4.1.1 ผลการศึกษาภูมิปัญญาท้องถิ่นในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในด้านพลังงาน

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการสำรวจข้อมูลของท้องถิ่นเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อการดำเนินการในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งต่อไป โดยทำการสำรวจศักยภาพของชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรของจังหวัดเพชรบูรณ์ และภูมิปัญญาท้องถิ่นในด้านการจัดการพลังงานชุมชนจากปราชญ์ชาวบ้านของท้องถิ่น ผลการสำรวจที่ได้เป็นดังนี้

4.1.1.1 ศักยภาพของชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรของจังหวัดเพชรบูรณ์

จากการสำรวจศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากชีวมวลการเกษตร โดยพิจารณาถึงปริมาณการเพาะปลูกในจังหวัดเพชรบูรณ์ในช่วง 5 ปี ย้อนหลังพบว่า จังหวัดเพชรบูรณ์มีศักยภาพทางการเกษตรอยู่ในระดับที่สูงมาก และมีภาคการเกษตรที่เข้มแข็ง ทั้งนี้การเกษตรกรรม การล่าสัตว์ และการป่าไม้ ถือเป็นภาคส่วนที่สำคัญของภาคการเกษตร ซึ่งในปี พ.ศ. 2557 มีสัดส่วนของมูลค่าทาง

เศรษฐกิจกว่าร้อยละ 99 จากภาคการเกษตรทั้งหมด โดยจังหวัดเพชรบูรณ์มีพื้นที่ทางการเกษตรทั้งสิ้น 3,291,426 ไร่ ซึ่งคิดเป็นเป็นร้อยละ 42 ของพื้นที่ทั้งหมดของจังหวัดเพชรบูรณ์ โดยมีพื้นที่พืชไร่มากที่สุดถึง 1,646,714 ไร่ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 50 ของพื้นที่ทางการเกษตรทั้งหมดของจังหวัดเพชรบูรณ์ และมีพื้นที่นาข้าวถึง 1,262,694 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 39 ในส่วนของปริมาณผลผลิตทางการเกษตร มีอัตราการเติบโตที่ค่อนข้างคงที่ มีอัตราเติบโตเฉลี่ยระหว่างปี พ.ศ.2554-2558 อยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.2 โดยในปี พ.ศ. 2557 มีปริมาณผลผลิตทางการเกษตรสำคัญทั้งสิ้นประมาณ 4,342 ล้านตัน โดยในปี พ.ศ. 2557-2558 มีผลผลิตอ้อยสูงสุดอยู่ที่ 2,784 ล้านตัน หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 63 ของผลิตผลทั้งหมด ตามมาด้วยข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ 662 ตัน หรือร้อยละ 15 ตามลำดับ พืชเศรษฐกิจของจังหวัดเพชรบูรณ์ได้แก่ ข้าว ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ อ้อยโรงงาน มันสำปะหลัง ถั่วเขียวผิวมัน ถั่วเขียวผิวดำ ยาสูบ ยางพารา มะขามหวาน และกะหล่ำปลี โดยเฉพาะอย่างยิ่งใช้พื้นที่ในการปลูกข้าวนาปีมากกว่า 1 ล้านไร่ และมีการใช้พื้นที่ในการปลูกยางพารา และอ้อยโรงงาน เพิ่มมากขึ้นทุกปี ดังนั้นวัสดุชีวมวลที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ แกลบดำจากการสีข้าวของโรงสี ที่มีอยู่ในปริมาณมาก ชังข้าวโพดที่ได้จากการสีข้าวโพด ชานอ้อยจากการหีบนำอ้อยรวมถึงขี้เถ้าที่ได้จากอุตสาหกรรมการผลิตส่วนประกอบของบ้านจากโรงงาน

4.1.1.2 การศึกษาภูมิปัญญาท้องถิ่นในการจัดการพลังงานชุมชนและการแปรรูปวัสดุทางการเกษตรเพื่อเป็นพลังงานของชุมชน

จากการสำรวจบุคคลที่มีภูมิปัญญาท้องถิ่นในด้านการจัดการพลังงานชุมชนและการแปรรูปวัสดุทางการเกษตรเพื่อใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานพบว่า มีปราชญ์ชาวบ้านอยู่สองท่านที่ได้มีการศึกษาและพัฒนาความรู้เกี่ยวกับการจัดการพลังงานชุมชน ได้แก่ คุณพยัคฆ์ จวนตรง ภูมิปัญญาท้องถิ่นด้านพลังงานทดแทน จังหวัดเพชรบูรณ์ ประธานศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงและพลังงานทดแทนตำบลทุ่งสมอ ซึ่งเป็นผู้ที่มีความรู้และความเชี่ยวชาญในด้านการผลิตแก๊สชีวภาพและแก๊สชีวมวลจากเตาแก๊สซิฟิเคอร์ รวมถึงการแปรรูปวัสดุทางการเกษตรเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานของชุมชน และคุณประสิทธิ์ ตระการฤทธิ์ ภูมิปัญญาท้องถิ่นด้านพลังงานทดแทน จังหวัดเพชรบูรณ์ อดีตผู้ใหญ่บ้านโนนแดง หมู่ 13 ตำบลบึงคล้า อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์ และประธานศูนย์การเรียนรู้เศรษฐกิจพอเพียงและพลังงานทดแทนบ้านโนนแดง ซึ่งเป็นผู้ที่มีความรู้และความเชี่ยวชาญในด้านการประดิษฐ์เตาชีวมวลขนาดเล็กเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมครัวเรือน และการผลิตแก๊สชีวมวลเพื่อใช้เป็นพลังงานสำหรับครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยทั้งสองท่านได้รับการคัดเลือกจากจังหวัดเพชรบูรณ์ให้เป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นของจังหวัดและเป็นปราชญ์ชาวบ้านที่อยู่ในทำเนียบหอภูมิปัญญาและวิถีชาวบ้านจังหวัดเพชรบูรณ์

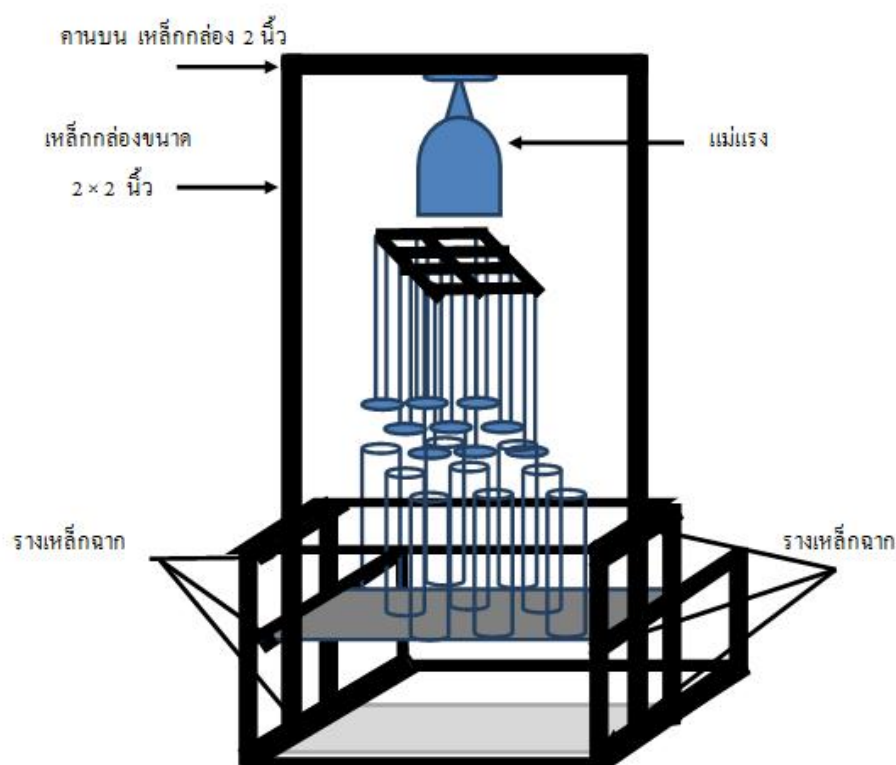
ดังนั้นจากการสำรวจที่ได้ถึงได้ไปศึกษาเรียนรู้ในศูนย์การเรียนรู้ทั้งสองแห่ง และได้ให้ปราชญ์ชาวบ้านทั้งสองท่านเป็นผู้เชี่ยวชาญและให้คำปรึกษาในการดำเนินการวิจัย

4.1.2 ผลการศึกษาการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

จากการศึกษาในขั้นตอนนี้ซึ่งเป็นการศึกษาถึงการเตรียมชีวมวลอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยผลการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลการศึกษาและการออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแท่งชีวมวลด้วยมือ ผลการศึกษองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุชีวมวลจากการเกษตร และผลการศึกษาการเตรียมชีวมวลอัดแท่งและสูตรการเตรียมที่เหมาะสม ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาในแต่ละส่วนเป็นดังนี้

4.1.2.1 ผลการศึกษาและออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแท่งชีวมวล

จากการศึกษาและออกแบบชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแท่งชีวมวลอย่างง่ายด้วยมือ ซึ่งเน้นถึงการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งโดยไม่ใช้เครื่องจักร ผลการออกแบบเป็นดังนี้



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะเครื่องอัดแท่งชีวมวล



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะเครื่องอัดแท่งชีวมวลด้วยมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษา



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะเครื่องอัดแท่งชีวมวลด้วยมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาโดยการอัดแรงจากด้านล่าง



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะปั้งอัดแห่งฉะมวณด้วยมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษา (แบบต้น)



รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะปั้งอัดแห่งฉะมวณด้วยมืออย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษา (แบบกลวง)

4.1.2.2 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุชีวมวลจากการเกษตร

จากการศึกษาวิเคราะห์หาปริมาณลิกนินและเซลลูโลสชนิดต่าง ๆ ตลอดจนสมบัติเชิงประมาณ (Proximate analysis) ของวัสดุชีวมวลจากการเกษตรที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งได้แก่ปริมาณความชื้น (Moisture) ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile Matter) ปริมาณเถ้า (Ash) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณลิกนินและเซลลูโลส ที่วิเคราะห์ได้ในชีวมวลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ชนิดของชีวมวล	ปริมาณของที่พบ (% โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแห้ง)			
	ลิกนิน	อัลฟา-เซลลูโลส	แกรมมา-เซลลูโลส	เบต้า-เซลลูโลส
แกลบดำ	16.42	80.46	5.84	13.70
ซังข้าวโพด	35.78	88.92	9.67	1.41
ชานอ้อย	32.20	84.30	10.87	4.83
ขี้เลื่อย	36.71	87.02	11.82	1.16

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้ทราบว่าชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรตัวอย่างที่นำมาใช้ในการศึกษาซึ่งมีปริมาณสารลิกนินมากที่สุด คือ ขี้เลื่อย ชีวมวลที่มีปริมาณอัลฟา-เซลลูโลสสูงที่สุด คือ ซังข้าวโพด ชีวมวลที่มีปริมาณแกรมมา-เซลลูโลสสูงที่สุดคือ ขี้เลื่อย และชีวมวลที่มีปริมาณเบต้า-เซลลูโลสสูงที่สุด คือ แกลบดำ

ตารางที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์เชิงประมาณของปริมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ในชีวมวลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ชนิดของชีวมวล	ค่าการวิเคราะห์เชิงประมาณขององค์ประกอบ (% โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักแห้ง)			
	ปริมาณความชื้น	ปริมาณสารระเหยได้	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
แกลบดำ	12.67	34.26	28.72	24.35
ซังข้าวโพด	11.74	45.82	30.80	11.64
ชานอ้อย	10.57	54.61	21.68	13.14
ขี้เลื่อย	6.12	70.74	8.58	14.56
มูลวัว	9.84	52.80	18.54	18.82
มูลสุกร	10.82	58.50	19.63	11.05
มูลไก่	10.77	48.61	21.22	19.4

จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณของความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ในชีวมวลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยพบว่า ชีวมวลตัวอย่างมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 9.84-12.67% ซึ่งซังข้าวโพดมีปริมาณความชื้นมากที่สุด ชีวมวลตัวอย่างมีปริมาณสารระเหยได้อยู่ในช่วง 34.26-70.74% ซึ่งจี้เลื่อยมีปริมาณสารระเหยได้มากที่สุด ชีวมวลตัวอย่างมีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 8.58-30.80% โดยซังข้าวโพดมีปริมาณเถ้ามากที่สุด และชีวมวลตัวอย่างมีปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 11.64-24.35% โดยเกลบดำมีปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในปริมาณมากที่สุด

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงปริมาณโลหะหนักที่อาจมีหลงเหลืออยู่ในชีวมวลจากการเกษตรซึ่งได้แก่ ปริมาณโลหะนิเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) แคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณโลหะหนักบางชนิดที่หลงเหลือตกค้างอยู่ในชีวมวลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

ชนิดของชีวมวล	ปริมาณของโลหะหนักบางชนิด (ppm)				
	Ni	Pb	Cu	Cd	Zn
เกลบดำ	0.182	0.159	0.596	0.021	0.942
ซังข้าวโพด	0.144	0.173	0.632	0.002	0.615
ชานอ้อย	0.172	0.182	0.601	0.001	0.468
จี้เลื่อย	0.168	0.121	0.536	0.001	0.718
มูลวัว	0.195	0.240	0.481	0.004	0.872
มูลสุกร	0.185	0.189	1.247	0.002	0.764
มูลไก่	0.190	0.207	1.805	0.005	2.132

จากการศึกษาปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบในชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ พบว่าชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรทุกชนิดมีปริมาณ โลหะหนักนิเกิล (Ni) อยู่ต่ำกว่า 0.195 ppm มีปริมาณ โลหะหนักตะกั่ว (Pb) อยู่ในปริมาณที่น้อยกว่า 0.240 ppm มีปริมาณ โลหะทองแดง (Cu) อยู่ในปริมาณ 0.481-1.805 ppm โดยชีวมวลมูลไก่มีปริมาณของโลหะทองแดงมากที่สุด ชีวมวลตัวอย่างมีปริมาณ โลหะหนักแคดเมียม (Cd) อยู่ต่ำกว่า 0.021 ppm และมีปริมาณ โลหะสังกะสี (Zn) อยู่ในช่วง 0.468-2.132 ppm โดยปริมาณโลหะหนักของ Ni, Pb และ Cd มีอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้ในการนำชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรทั้งหมดที่นำมาใช้ในการศึกษานี้จึงเป็นชีวมวลที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

4.1.2.3 ผลการศึกษาการเตรียมชีวมวลอัดแท่งและสูตรการเตรียมที่เหมาะสม

จากการศึกษาการเตรียมชีวมวลอัดแท่งโดยใช้สูตรการผสมต่าง ๆ ที่มีต่อลักษณะการขึ้นรูป ความแข็ง และความหนาแน่นของชีวมวลอัดแท่งที่ได้ ซึ่งอัตราส่วนการผสม 1 ส่วนแสดงถึงการใช้ชีวมวลนั้น 1 kg ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งได้ศึกษาถึงการเตรียมโดยใช้สูตรการผสมต่าง ๆ เพื่อให้ได้ชีวมวลอัดแท่งที่สามารถขึ้นรูปได้และมีความคงตัวดีมาก (***) ขึ้นรูปได้และมีความคงตัวดีปานกลาง (**) และขึ้นรูปได้และมีความคงตัวน้อย (*) การเตรียมเชื้อเพลิงอัดแท่งชีวมวลที่มีความแข็งแรงมาก (***) ที่มีความแข็งแรงปานกลาง (**) และมีความแข็งแรงน้อย (*) และนอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงความหนาแน่นปรากฏของแท่งชีวมวลที่ได้จากการเตรียม โดยผลที่ได้เป็นดังนี้

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะการขึ้นรูป ความแข็งและความหนาแน่นปรากฏของชีวมวลอัดแท่งแต่ละสูตร

ส่วนผสม	สูตรผสม	การขึ้นรูป	ความแข็ง	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm ³)
1. แกลบดำ: จี๊เลื่อย	1 : 1	***	***	0.5092
2. แกลบดำ: ชังข้าวโพด	1 : 1	***	**	0.5042
3. แกลบดำ: ชานอ้อย	1 : 1	***	**	0.4454
4. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5132
5. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.4894
6. แกลบดำ: ชังข้าวโพด: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.4212
7. แกลบดำ: จี๊เลื่อย	1 : 1	***	***	0.5408
8. แกลบดำ: ชังข้าวโพด	1 : 1	***	***	0.5236
9. แกลบดำ: ชานอ้อย	1 : 1	***	***	0.5049
10. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5570
11. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5258
12. แกลบดำ: ชังข้าวโพด: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5126
13. แกลบดำ: จี๊เลื่อย	1 : 1	**	**	0.3592
14. แกลบดำ: ชังข้าวโพด	1 : 1	*	*	0.3430
15. แกลบดำ: ชานอ้อย	1 : 1	**	**	0.3797
16. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	**	**	0.4013
17. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	**	**	0.3990
18. แกลบดำ: ชังข้าวโพด: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	*	*	0.4035

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะการขึ้นรูป ความแข็งและความหนาแน่นปรากฏของชีวมวลอัดแห้งแต่ละสูตร (ต่อ)

ส่วนผสม	สูตรผสม	การขึ้นรูป	ความแข็ง	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm ³)
19. แกลบดำ: จี๊เลื่อย	1 : 1	**	***	0.4708
20. แกลบดำ: ชังข้าวโพด	1 : 1	**	**	0.4293
21. แกลบดำ: ชานอ้อย	1 : 1	**	**	0.4186
22. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	**	**	0.4454
23. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.4894
24. แกลบดำ: ชังข้าวโพด: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	**	0.4739
25. แกลบดำ: จี๊เลื่อย	1 : 1	***	***	0.5023
26. แกลบดำ: ชังข้าวโพด	1 : 1	**	***	0.5556
27. แกลบดำ: ชานอ้อย	1 : 1	***	***	0.5595
28. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5788
29. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5670
30. แกลบดำ: ชังข้าวโพด: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5607
31. แกลบดำ: จี๊เลื่อย	1 : 1	***	***	0.5481
32. แกลบดำ: ชังข้าวโพด	1 : 1	***	***	0.5773
33. แกลบดำ: ชานอ้อย	1 : 1	***	***	0.5474
34. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5845
35. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5768
36. แกลบดำ: ชังข้าวโพด: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.5708
37. แกลบดำ: จี๊เลื่อย	1 : 1	**	**	0.3797
38. แกลบดำ: ชังข้าวโพด	1 : 1	**	**	0.3592
39. แกลบดำ: ชานอ้อย	1 : 1	**	**	0.3508
40. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	**	**	0.4013
41. แกลบดำ: จี๊เลื่อย: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	**	***	0.4098
42. แกลบดำ: ชังข้าวโพด: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	**	**	0.4035

ตารางที่ 4.4 แสดงลักษณะการขึ้นรูป ความแข็งและความหนาแน่นปรากฏของชีวมวลอัดแท่งแต่ละสูตร (ต่อ)

ส่วนผสม	สูตรผสม	การขึ้นรูป	ความแข็ง	ความหนาแน่นปรากฏ (g/cm ³)
43. แกลบดำ: จี้เลื่อย	1 : 1	**	***	0.4419
44. แกลบดำ: ชังข้าวโพด	1 : 1	**	**	0.4098
45. แกลบดำ: ชานอ้อย	1 : 1	**	**	0.4274
46. แกลบดำ: จี้เลื่อย: ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.4988
47. แกลบดำ: จี้เลื่อย: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	***	0.4878
48. แกลบดำ: ชังข้าวโพด: ชานอ้อย	1 : 0.5 : 0.5	***	**	0.4740

หมายเหตุ : - ลำดับที่ 1-6 และ 25-30 ใช้แยมเป็นสารผสมจำนวน 200 g
 - ลำดับที่ 7-12 และ 31-36 ใช้มูลวัวเป็นสารผสมจำนวน 200 g
 - ลำดับที่ 13-18 และ 37-42 ใช้มูลสุกรเป็นสารผสมจำนวน 200 g
 - ลำดับที่ 19-24 และ 43-48 ใช้มูลไก่เป็นสารผสมจำนวน 200 g
 - ลำดับที่ 25-48 เป็นสูตรที่ผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ ก่อนขึ้นรูป

จากผลการศึกษาการขึ้นรูป ความแข็งและความหนาแน่นของชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรโดยใช้สูตรในการเตรียมแท่งชีวมวลและทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดแท่งชีวมวลด้วยมือ ผลที่ได้พบว่า การเตรียมโดยใช้ชีวมวลแกลบดำเป็นส่วนประกอบหลักสามารถทำให้ชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรทุกชนิดสามารถขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลได้ โดยการใช้ตัวช่วยผสมในการขึ้นรูปแท่งชีวมวลเป็นมูลวัว (บดละเอียด) สามารถทำให้ได้แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความสามารถในการขึ้นรูปและความแข็งดีกว่าการใช้แยม มูลไก่ และมูลสุกร ตามลำดับ การใช้ชีวมวลส่วนผสมรองเป็นจี้เลื่อยสามารถทำให้การขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและความแข็งดีกว่าการใช้ชานอ้อยและชังข้าวโพด ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การนำชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรไปหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ ก่อนการนำไปขึ้นรูป จะช่วยทำให้ชีวมวลอัดแท่งของการใช้แยมและมูลวัวเป็นตัวประสาน เกิดการขึ้นรูปได้ดีกว่า และแท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งดีกว่าชีวมวลที่ไม่ผ่านการหมัก จากการพิจารณาถึงความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งพบว่ามีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.3430 – 0.5845 g/cm³ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่มีความเหมาะสมในการนำไปศึกษาในขั้นตอนต่อไปจะใช้ทั้งความสะดวกและความสามารถในการขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิง ความแข็ง และความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิง โดยความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลควรมีค่าที่สูงกว่า 0.5 g/cm³ โดยการใช้ส่วนผสมรองเป็นจี้เลื่อยจะทำให้ได้แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่

สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีความแข็งแรงสูงกว่าการใช้ชีวมวลเป็นขานอ้อยและการใช้ขังข้าวโพด แต่ทั้งนี้เนื่องจากชีวมวลเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่นเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างปริมาณขานอ้อยและปริมาณขังข้าวโพดเหลือทิ้งพบว่า ชีวมวลขังข้าวโพดมีปริมาณที่มากกว่าและหาได้ง่ายกว่าชีวมวลขานอ้อยในท้องถิ่นในเขตอำเภอเมืองและอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ อีกทั้งหากพิจารณาถึงสูตรการผสมโดยใช้ชีวมวลแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อยและขังข้าวโพดแล้วพบว่า มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับการใช้สูตรการผสมระหว่างแกลบค้ำกับขี้เลื่อยและขานอ้อย ซึ่งพบว่า มีความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลสูงกว่าการใช้สูตรการผสมระหว่างแกลบค้ำกับชีวมวลอย่างใดอย่างหนึ่ง จึงแสดงให้เห็นว่า การใช้สูตรการผสมโดยการใช้แกลบค้ำเป็นส่วนประกอบหลักและใช้ส่วนผสมรองเป็นชีวมวลผสมระหว่างขี้เลื่อยกับขังข้าวโพด หรือระหว่างขี้เลื่อยกับขานอ้อยจะทำให้ได้แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความแข็งแรงและมีความหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาจึงทำให้สามารถเลือกสูตรการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการศึกษาในขั้นตอนต่อไปได้จำนวน 12 สูตรผสม ดังนี้

1. สูตรแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อย ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 1 โดยมีแฉ่งเป็นตัวประสาน
2. สูตรแกลบค้ำผสมกับขังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 1 โดยมีแฉ่งเป็นตัวประสาน
3. สูตรแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อยและขังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 0.5 : 0.5 โดยมีแฉ่งเป็นตัวประสาน
4. สูตรแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อย ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 1 โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
5. สูตรแกลบค้ำผสมกับขังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 1 โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
6. สูตรแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อยและขังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 0.5 : 0.5 โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
7. สูตรแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อย ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 1 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีแฉ่งเป็นตัวประสาน
8. สูตรแกลบค้ำผสมกับขังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 1 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีแฉ่งเป็นตัวประสาน
9. สูตรแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อยและขังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 0.5 : 0.5 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีแฉ่งเป็นตัวประสาน
10. สูตรแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อย ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 1 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
11. สูตรแกลบค้ำผสมกับขังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 1 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
12. สูตรแกลบค้ำผสมกับขี้เลื่อยและขังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนผสม 1 : 0.5 : 0.5 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน

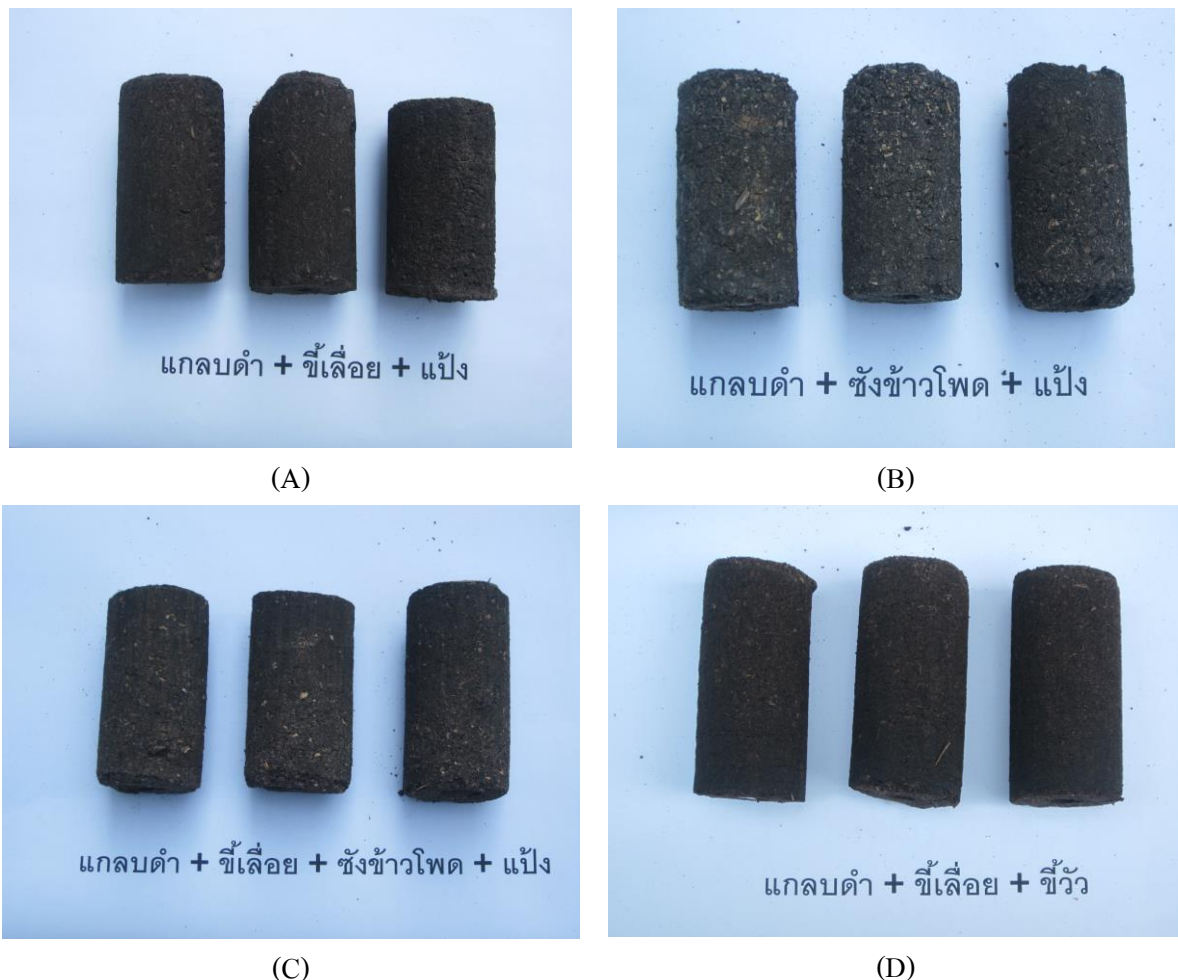
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง และโปรดิวเซอร์แก๊สที่ได้

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีบางประการของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งโดยได้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ไม่ผ่านการทำให้เป็นถ่าน และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 450°C และการศึกษาถึงสมบัติทางด้านการให้พลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลสูตรต่าง ๆ รวมถึงที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว อีกทั้งยังได้ศึกษาถึงอุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งทั้งสองแบบ ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

4.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีและการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

4.2.1.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

จากการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 350°C ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยา แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ได้สูตรต่าง ๆ A-L



(E)



(F)



(G)



(H)



(I)



(J)



(K)



(L)

รูปที่ 4.6 (ต่อ) แสดงลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ได้ (A)-(L)



รูปที่ 4.7 แสดงชุดอุปกรณ์ในการเผาแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นถ่าน



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการเผาให้กลายเป็นถ่าน

4.2.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ และที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่านแล้ว สูตรการเตรียมชีวมวลอัดแท่งต่าง ๆ เป็นดังนี้

ตารางที่ 4.5 แสดงสูตรในการเตรียม ส่วนผสม และอัตราส่วนการผสม ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

สูตร	ส่วนผสม	อัตราส่วนการผสม (by wt)	ตัวผสม
A	แกลบดำ : จี้เลื่อย	1 : 1	แป้ง
B	แกลบดำ : ชังข้าวโพด	1 : 1	แป้ง
C	แกลบดำ : จี้เลื่อย : ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	แป้ง
D	แกลบดำ : จี้เลื่อย	1 : 1	มูลวัว
E	แกลบดำ : ชังข้าวโพด	1 : 1	มูลวัว
F	แกลบดำ : จี้เลื่อย : ชังข้าวโพด	1 : 0.5 : 0.5	มูลวัว
G	แกลบดำ : จี้เลื่อย หมัก EM	1 : 1	แป้ง
H	แกลบดำ : ชังข้าวโพด หมัก EM	1 : 1	แป้ง
I	แกลบดำ : จี้เลื่อย : ชังข้าวโพด หมัก EM	1 : 0.5 : 0.5	แป้ง
J	แกลบดำ : จี้เลื่อย หมัก EM	1 : 1	มูลวัว
K	แกลบดำ : ชังข้าวโพด หมัก EM	1 : 1	มูลวัว
L	แกลบดำ : จี้เลื่อย : ชังข้าวโพด หมัก EM	1 : 0.5 : 0.5	มูลวัว

จากตารางที่ 4.5 สูตรการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ผ่านการคาร์บอนไนเซชัน ทั้ง 12 สูตร กำหนดให้เป็นสัญลักษณ์ สูตร A – สูตร L และสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันให้เป็นถ่านแล้วจะกำหนดให้เป็นสัญลักษณ์ สูตร A' – สูตร L' ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงประมาณ (proximate analysis) ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันแสดงดังตารางที่ 4.6 และของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการคาร์บอนไนเซชันแล้วแสดงได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 แสดงประมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ

สูตรการเตรียม	ค่าการวิเคราะห์เชิงประมาณขององค์ประกอบ (% wt)			
	ปริมาณความชื้น	ปริมาณสารระเหยได้	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
สูตร A	2.8730	67.5963	15.5019	14.0288
สูตร B	3.6372	65.6308	18.3125	12.4195
สูตร C	2.2574	68.6692	15.7127	13.3607
สูตร D	2.4572	66.0120	13.5255	18.0053
สูตร E	2.6318	65.7966	13.8024	17.7692
สูตร F	2.3088	67.8244	11.9458	17.9210
สูตร G	2.2826	67.5029	18.8664	11.3481
สูตร H	2.9842	68.4962	17.4642	11.0554
สูตร I	3.5504	67.2164	17.9572	11.2760
สูตร J	2.4901	67.0363	14.4288	16.0448
สูตร K	2.3721	66.1382	16.2010	15.2887
สูตร L	2.2908	65.0303	15.8979	16.7810

จากผลการศึกษาพบว่าแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้นมานี้มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้น (moisture percent) อยู่ในช่วง 2-4% มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสารที่ระเหยได้ (volatile matter percent) อยู่ในช่วง 65-69 % มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเถ้า (ash percent) อยู่ในช่วง 11-19 % และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon percent) อยู่ในช่วง 11-18%

ตารางที่ 4.7 แสดงประมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่าน

สูตรการเตรียม	ค่าการวิเคราะห์เชิงปริมาณขององค์ประกอบ (% wt)			
	ปริมาณความชื้น	ปริมาณสารระเหยได้	ปริมาณเถ้า	ปริมาณคาร์บอนคงตัว
สูตร A	0.1196	54.5480	16.2128	29.1196
สูตร B	0.5279	57.6804	21.3852	20.4065
สูตร C	0.2594	58.9791	19.9422	20.8183
สูตร D	0.1395	53.8570	18.5963	27.4072
สูตร E	0.2897	57.8583	18.4207	23.4313
สูตร F	0.3193	59.8273	18.6835	21.1699
สูตร G	0.1897	56.3079	21.8609	21.6415
สูตร H	0.4417	51.6555	22.7191	25.1837
สูตร I	0.2896	57.2689	22.4701	19.9714
สูตร J	0.1175	55.2807	20.7487	23.8531
สูตร K	0.3388	54.3396	23.2749	22.0467
สูตร L	0.4898	54.7227	22.8602	21.9273

จากผลการศึกษาพบว่าแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้นมาและผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้น (moisture percent) อยู่ในช่วง 0.1-0.5% มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสารที่ระเหยได้ (volatile matter percent) อยู่ในช่วง 54-60 % มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเถ้า (ash percent) อยู่ในช่วง 16-24 % และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon percent) อยู่ในช่วง 19-30%

4.2.1.3 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งและเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว โดยใช้เทคนิควิธีการหาค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง โดยใช้เครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) เปรียบเทียบกับการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงทางทฤษฎีโดยอาศัยสมการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของ Nhuchhem et al. (2012) โดยผลการศึกษาที่ได้ แสดงดังตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 แสดงประมาณความร้อน (HHV) ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ และจากการคำนวณทางทฤษฎี

สูตรการเตรียม	ค่าความร้อน (MJ/kg) Bomb calorimeter	ค่าความร้อน (MJ/kg) จากคำนวณทางทฤษฎี	
		Linear correlation	Non-Linear correlation
สูตร A	17.3046	18.1422	17.4277
สูตร B	16.9639	18.0603	17.0021
สูตร C	17.5963	18.0488	17.3100
สูตร D	18.0911	18.3132	17.8138
สูตร E	17.7987	18.3083	17.7746
สูตร F	18.0562	18.3464	18.0534
สูตร G	17.0530	17.8578	16.7363
สูตร H	16.8786	17.9572	17.0205
สูตร I	16.9041	18.0135	17.0155
สูตร J	17.6824	18.2220	17.6254
สูตร K	17.5778	18.1345	17.3155
สูตร L	17.9234	18.1925	17.3947

จากผลการศึกษาพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้โดยใช้สูตรการเตรียมต่าง ๆ นี้ มีค่าปริมาณความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) ซึ่งหาได้จากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนโดยใช้เครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ มีค่าอยู่ในช่วง 16.88 MJ/kg ถึง 18.09 MJ/kg ซึ่งจากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนทางทฤษฎีจากสมการของ Nhuchhem et al. (2012) ซึ่งสร้างสมการเพื่อหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลจากองค์ประกอบร้อยละ (% by wt. dry basis) ของสารระเหยได้ ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ในชีวมวลตัวอย่าง โดยได้สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ทั้งสมการแบบ linear correlation และแบบ non-linear correlation ซึ่งผลจากการคำนวณที่ได้พบว่าหากใช้สมการแบบ linear correlation ค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในช่วงระหว่าง 17.86 MJ/kg - 18.35 MJ/kg ในขณะที่การ

ใช้สมการแบบ non-linear correlation แสดงค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในช่วงระหว่าง 16.73 MJ/kg - 18.05 MJ/kg ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้นี้สามารถให้ปริมาณพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 16-18 MJ/kg

ตารางที่ 4.9 แสดงประมาณความร้อน (HHV) ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมคาโลรีมิเตอร์ และการคำนวณทางทฤษฎี

สูตรการเตรียม	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ค่าความร้อน (MJ/kg) จากคำนวณทางทฤษฎี	
	Bomb calorimeter	Linear correlation	Non-Linear correlation
สูตร A	17.4195	18.3516	17.2755
สูตร B	17.2238	18.0117	16.3998
สูตร C	17.5754	18.0608	16.6488
สูตร D	18.1773	18.2313	16.8353
สูตร E	17.8862	18.1805	16.9231
สูตร F	18.0941	18.1181	16.8760
สูตร G	17.3342	18.0053	16.2962
สูตร H	16.5750	18.0305	16.0632
สูตร I	16.9391	17.9461	16.1948
สูตร J	17.4136	18.0901	16.4797
สูตร K	17.2309	17.9615	16.0281
สูตร L	17.6954	17.9834	16.1116

จากผลการศึกษาพบว่า เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้โดยใช้สูตรการเตรียมต่าง ๆ และผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว มีค่าปริมาณความร้อนสูง (HHV) ที่วิเคราะห์ได้จากการใช้เครื่องบอมคาโลรีมิเตอร์ มีค่าอยู่ในช่วง 16.58 MJ/kg ถึง 18.18 MJ/kg ซึ่งจากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนทางทฤษฎีของเชื้อเพลิงชีวมวลจากสมการของ Nhuchhen et al. (2012) พบว่า จากการคำนวณโดยใช้สมการแบบ linear correlation ค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง ที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว มีค่าปริมาณความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 17.95 MJ/kg – 18.35 MJ/kg ในขณะที่การใช้สมการแบบ non-linear correlation แสดงค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง ที่ผ่านการเผาให้เป็นถ่านแล้วอยู่ในช่วงระหว่าง 16.03 MJ/kg - 17.28 MJ/kg ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วจะให้ปริมาณพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 16-18 MJ/kg

4.2.2 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊ส

ในการศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊ส ทำโดยใช้เตาแก๊สซิฟิเคอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นเอง ซึ่งเป็นเตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบ up draft ดังรูปที่ 4.9 โดยโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากแท่งเชื้อเพลิงชีวมวล จะถูกบำบัดเพื่อแยกเศษฝุ่นตะกอนออกก่อนในช่วงแรก เพื่อให้แก๊สเชื้อเพลิงที่ได้มีความบริสุทธิ์ขึ้น จากนั้นจะผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สดังรูปที่ 4.10 และผ่านไปยังถังเก็บแก๊สอย่างง่ายที่ประดิษฐ์ขึ้น ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.9 แสดงชุดเตาแก๊สซิฟิเคอร์ในการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส



รูปที่ 4.10 แสดงชุดลดอุณหภูมิของแก๊ส



รูปที่ 4.11 แสดงชุดอุปกรณ์ถังเก็บแก๊ส

4.2.2.1 ผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของโปรคิวเซอร์แก๊ส

จากการศึกษาสมบัติทางเคมีซึ่งวิเคราะห์ได้จากการใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว ผลที่ได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบทางเคมีของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

องค์ประกอบทางเคมี ของโปรคิวเซอร์แก๊ส	ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของโปรคิวเซอร์แก๊สจาก เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง	
	ที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่าน	ที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว
Carbonmonoxide (CO)	18.6	19.2
Methane (CH ₄)	6.4	1.8
Hydrogen (H ₂)	16.5	17.5
Carbonmonoxide (CO ₂)	13.4	15.1

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วพบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งให้โปรคิวเซอร์แก๊สที่มีองค์ประกอบของแก๊ส CO มากที่สุด รองลงมาได้แก่ แก๊ส H₂, CO₂ และแก๊ส CH₄ ตามลำดับ ส่วน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วให้โปรคิวเซอร์แก๊สที่มีองค์ประกอบของแก๊ส

CO มากที่สุด รองลงมาได้แก่ แก๊ส H_2 , CO_2 และแก๊ส CH_4 ตามลำดับ โดยแก๊ส CO , H_2 และ CH_4 จัดว่าเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ติดไฟได้ ในขณะที่แก๊ส CO_2 ไม่ติดไฟ ทั้งนี้โปรคิวเซอร์แก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วจะมีปริมาณของแก๊ส CO , H_2 และ CO_2 ที่มากขึ้นเล็กน้อยจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่าน แต่จะมีปริมาณของ CH_4 น้อยกว่า

4.2.2.2 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊ส

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของโปรคิวเซอร์แก๊สโดยการวัดอุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเข้าโดยทำการวัดทุก ๆ 15 นาที เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วหาค่าเฉลี่ย ผลที่ได้เป็นดังตารางที่ 4.11 ดังนี้

ตารางที่ 4.11 อัตราการไหลผ่านของอากาศเข้าและอุณหภูมิของเปลวไฟของเชื้อเพลิง

อัตราการไหลผ่านของ อากาศเข้า (m^3/s)	อุณหภูมิของเปลวไฟ ($^{\circ}C$) ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง	
	ที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่าน	ที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว
0.724×10^{-3}	318	320
2.106×10^{-3}	364	376
2.538×10^{-3}	387	398

จากการศึกษาพบว่า การใช้อัตราการไหลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งทั้งที่ไม่ผ่านการทำให้เป็นถ่านและที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วพบว่า การใช้อัตราการไหลของอากาศเข้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของโปรคิวเซอร์แก๊สมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วจะมีอุณหภูมิของเปลวไฟที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่านเล็กน้อย ซึ่งจากการทดลองพบว่า การใช้อัตราการไหลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาเท่ากับ $2.106 \times 10^{-3} m^3/s$ นั้นจะทำให้การจุดติดไฟของแก๊สเชื้อเพลิงทำได้ง่ายและเกิดแก๊สเชื้อเพลิงขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และการเกิดเปลวไฟเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการดับบ่อยครั้งตลอดช่วงระยะเวลาในการศึกษา

4.3 ผลการศึกษาการนำไปใช้จริงกับเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบต่าง ๆ และประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ข้อจำกัด และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

จากการศึกษาการนำแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบต่าง ๆ ทั้งแบบ up draft และแบบ down draft ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 เพื่อหาประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงอัดแท่ง ตลอดจนข้อจำกัด และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ผลที่ได้เป็นดังนี้



รูปที่ 4.12 แสดงของเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบ up draft ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ



รูปที่ 4.13 แสดงของเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบ down draft ที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพ

4.3.1 ผลการศึกษาการนำไปใช้จริงกับเตาเผาแก๊สซิฟิเคอร์

ในการศึกษานี้ทำโดยการนำเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งทั้งที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่านและที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วไปทดลองใช้จริงกับเตาเผาแก๊สซิฟิเคอร์ ทั้งแบบ up draft และแบบ down draft เพื่อหาประสิทธิภาพของแท่งเชื้อเพลิงอัดแท่ง ผลที่ได้สรุปได้ดังตารางที่ 4.12 และ 4.13 ดังนี้

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่าน ในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิฟิเคอร์แบบต่าง ๆ

ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิฟิเคอร์แบบ	
	up draft	down draft
ระยะเวลาในการจุดติดไฟ (นาท)	5	8
อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)	387	360
ระยะเวลาในการผลิตแก๊ส (นาท)	130	120
ปริมาตรของแก๊สที่เก็บได้ (m^3)	2	1.8
ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ (kg)	0.32	0.41

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิฟิเคอร์แบบ up draft และแบบ down draft มีระยะเวลาในการจุดติดไฟอยู่ในช่วง 5-8 นาท ซึ่งให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดอยู่ในช่วง $360\text{-}387^{\circ}\text{C}$ มีระยะเวลาในการผลิตแก๊สประมาณ 120-130 นาท มีปริมาตรของแก๊สที่เก็บได้ประมาณ $1.8\text{-}2.0\text{ m}^3$ และมีปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ประมาณ 0.32-0.41 kg

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว ในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิฟิเคอร์แบบต่าง ๆ

ตัวแปรที่ศึกษา	ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิฟิเคอร์แบบ	
	up draft	down draft
ระยะเวลาในการจุดติดไฟ (นาท)	3	4
อุณหภูมิเปลวไฟ ($^{\circ}\text{C}$)	396	387
ระยะเวลาในการผลิตแก๊ส (นาท)	90	60
ปริมาตรของแก๊สที่เก็บได้ (m^3)	1.5	1.2
ปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ (kg)	0.45	0.58

จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของถ่านจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซิฟิเคชันแบบ up draft และแบบ down draft มีระยะเวลาในการจุดติดไฟอยู่ในช่วง 3-4 นาที ซึ่งให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดอยู่ในช่วง 387-396 °C มีระยะเวลาในการผลิตแก๊สประมาณ 60-90 นาที มีปริมาณของแก๊สที่เก็บได้ประมาณ 1.2-1.5 m³ และมีปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ประมาณ 0.45-0.58 kg

4.4.2 ผลการศึกษาความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

การศึกษาคำพึงพอใจของผู้ใช้งาน (ผู้ผ่านการฝึกอบรมถ่ายทอดเทคโนโลยี) ในการเตรียมถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส โดยการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานในด้านต่าง ๆ ซึ่งลักษณะของแบบประเมินเป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating scale) จำนวน 15 ข้อ มีตัวเลือก 5 ตัวเลือก คือ พึงพอใจมากที่สุดให้ 5 คะแนน พึงพอใจมากให้ 4 คะแนน พึงพอใจปานกลางให้ 3 คะแนน พึงพอใจน้อยให้ 2 คะแนน และ พึงพอใจน้อยที่สุดให้ 1 คะแนน

สำหรับเกณฑ์การประเมินความพึงพอใจต่อเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ในด้านต่าง ๆ ที่ได้จากการสอบถามและประมวลผลของคะแนนความพึงพอใจของผู้เข้ารับการอบรมในแต่ละด้านเพื่อแสดงระดับความพึงพอใจต่อเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ได้ใช้เกณฑ์ในการประเมิน ดังนี้

ค่าเฉลี่ย	ระดับความพึงพอใจ
4.51 – 5.00	พึงพอใจมากที่สุด
3.51 – 4.50	พึงพอใจมาก
2.51 – 3.50	พึงพอใจปานกลาง
1.51 – 2.50	พึงพอใจน้อย
1.00 – 1.50	พึงพอใจน้อยที่สุด

ผลที่ได้จากการสอบถามและการประมวลผลของความพึงพอใจต่อเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้และได้ถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับผู้ที่สนใจเข้าร่วมการอบรม แสดงได้ดังตารางที่ 4.14 ดังนี้

ตารางที่ 4.14 ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในด้านต่าง ๆ

หัวข้อในการประเมิน ความพึงพอใจ	ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในการใช้งานในระดับต่าง ๆ					ค่าเฉลี่ยการ ประเมิน
	มาก ที่สุด (5)	มาก (4)	ปาน กลาง (3)	น้อย (2)	น้อย ที่สุด (1)	
1.ความสะดวกและความง่ายในการ จัดหาวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิต เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง	(12) 60%	(6) 30%	(2) 10%			4.5 มากที่สุด
2.ความสะดวกและความง่ายของ วิธีการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัด แท่ง	(4) 20%	(10) 50%	(6) 30%			3.9 มาก
3.ความสะดวกและความง่ายของ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการ เตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง		(8) 40%	(6) 30%	(6) 30%		3.1 ปานกลาง
4.ลักษณะและคุณภาพของเชื้อเพลิง ชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้	(3) 15%	(9) 45%	(8) 40%			3.75 มาก
5.ความสะดวกและความง่ายของ วิธีการเตรียมถ่านเชื้อเพลิงชีวมวล อัดแท่ง	(6) 30%	(8) 40%	(6) 30%			4.0 มาก
6.ความสะดวกและความง่ายของ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการ เตรียมถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง	(6) 30%	(10) 50%	(4) 20%			4.1 มาก
7.ลักษณะและคุณภาพของถ่าน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้	(8) 40%	(8) 40%	(4) 20%			4.2 มาก
8.การใช้งานเชื้อเพลิงชีวมวลอัด แท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส จากเตาชีวมวล	(6) 30%	(10) 50%	(4) 20%			4.1 มาก
9.การใช้งานถ่านเชื้อเพลิงชีวมวล อัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส จากเตาชีวมวล	(5) 25%	(8) 40%	(7) 35%			3.9 มาก

ตารางที่ 4.14 (ต่อ) ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในการใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในด้านต่าง ๆ

หัวข้อในการประเมิน ความพึงพอใจ	ค่าเฉลี่ยความพึงพอใจในการใช้งานในระดับต่าง ๆ					ค่าเฉลี่ยการ ประเมิน
	มากที่สุด (5)	มาก (4)	ปาน กลาง (3)	น้อย (2)	น้อย ที่สุด (1)	
10.ประสิทธิภาพของการใช้ เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิต โปรคิวเซอร์แก๊ส	(3) 15%	(9) 45%	(7) 35%	(1) 5%		3.7 มาก
11.ประสิทธิภาพของการใช้ถ่าน เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิต โปรคิวเซอร์แก๊ส	(2) 10%	(8) 40%	(9) 45%	(1) 5%		3.55 มาก
12.คุณภาพของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง	(4) 20%	(10) 50%	(6) 30%			3.9 มาก
13.คุณภาพของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ ผลิตได้จากถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัด แท่ง	(3) 15%	(12) 60%	(5) 25%			3.9 มาก
14.ความคุ้มค่าของการใช้ประโยชน์ จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการ ผลิตแก๊สเชื้อเพลิง	(8) 40%	(8) 40%	(4) 20%			4.2 มาก
15.การนำเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นนี้ ไปใช้ประโยชน์ได้จริง	(6) 30%	(10) 50%	(4) 20%			4.1 มาก
ค่าเฉลี่ยรวมในทุกด้าน						3.93 มากที่สุด

จากการศึกษาพบว่าผู้เข้าอบรมมีความพึงพอใจต่อเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นและได้ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีผ่านโครงการอบรมเชิงปฏิบัติการ ในด้านต่าง ๆ ดังนี้ ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายในการจัดหาวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมากที่สุด (4.5) ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายของวิธีการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (3.9) ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับปานกลาง (3.1) ระดับความพึงพอใจด้านลักษณะและคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้อยู่ในระดับมาก (3.75) ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายของวิธีการเตรียมถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (4.0) ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ใน

ระดับมาก (4.1) ระดับความพึงพอใจด้านลักษณะและคุณภาพของถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้อยู่ในระดับมาก (4.2) ระดับความพึงพอใจด้านการใช้งานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวลอยู่ในระดับมาก (4.1) ระดับความพึงพอใจด้านการใช้งานถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวลอยู่ในระดับมาก (3.9) ระดับความพึงพอใจด้านประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สอยู่ในระดับมาก (3.7) ระดับความพึงพอใจด้านประสิทธิภาพของการใช้ถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สอยู่ในระดับมาก (3.55) ระดับความพึงพอใจด้านคุณภาพของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (3.9) ระดับความพึงพอใจด้านคุณภาพของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (3.9) ระดับความพึงพอใจด้านความคุ้มค่าของการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ในระดับมาก (4.2) ระดับความพึงพอใจด้านความคุ้มค่าของการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ในระดับมาก (4.1) ดังนั้นในภาพรวมของระดับความพึงพอใจของผู้ใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก (3.93)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากภูมิปัญญาท้องถิ่นสำหรับการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊ส โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยคือ 1) เพื่อศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวล 2) เพื่อศึกษาคุณสมบัติคุณภาพและประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่ได้ในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวล 3) เพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยให้กับกลุ่มเกษตรกร หน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน และประชาชนในท้องถิ่น ซึ่งการดำเนินการวิจัยได้แบ่งออกเป็น 3 ระยะคือ ระยะที่ 1 เป็นการศึกษาภูมิปัญญาท้องถิ่นเกี่ยวกับการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงสำหรับการเกษตรกรรม รวมถึงการใช้จุลินทรีย์ในการหมักวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อทำปุ๋ยหมัก ระยะที่ 2 เป็นการศึกษาสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ และระยะที่ 3 เป็นการนำไปใช้ทดสอบจริงกับชุดอุปกรณ์เตาเผาแก๊สซิฟิเคชันแบบต่าง ๆ และศึกษาประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ในการใช้งานจริงในภาคสนาม โดยการทำการวิจัยตามระยะต่างๆ สามารถสรุปผลการทดลองได้คือ

5.1 การศึกษาการสำรวจภูมิปัญญาท้องถิ่นในการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อใช้ประโยชน์และการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง

จากการศึกษาศักยภาพของวัสดุเหลือทิ้งจากชีวมวลการเกษตรพบว่า วัสดุชีวมวลที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งได้แก่ แกลบดำจากการสีข้าวของโรงสี ชังข้าวโพดที่ได้จากการสีข้าวโพด ชานอ้อย และขี้เลื่อย โดยจากภูมิปัญญาในท้องถิ่นของจังหวัดเพชรบูรณ์ซึ่งได้จากการสัมภาษณ์ปราชญ์ชาวบ้านของจังหวัดเพชรบูรณ์ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญในด้านการจัดการพลังงานชุมชนพบว่า ในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานชุมชนนั้น ได้มีการนำมาใช้ทั้งในรูปแบบของการนำชีวมวลเหล่านั้นมาหมักพร้อมกับเศษขยะอินทรีย์เพื่อให้ได้แก๊สชีวภาพนำมาใช้ในการหุงต้มในครัวเรือน ส่วนชีวมวลเหลือทิ้งที่ไม่มีสภาพเหมาะสมในการนำไปหมัก เช่น แกลบ ขี้เลื่อย และชังข้าวโพด ก็จะมีการนำไปเผาเพื่อผลิตพลังงานความร้อน โดยใช้เตาประสิทธิภาพสูง หรือนำไปใช้ในการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้เตาแก๊สซิฟิเคชันทั้งการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงโดยตรง หรือนำไปอัดแท่งเป็นก้อนเพื่อนำไปใช้ หรือการนำเศษชีวมวลไม้หรือฟืนไปเผาให้เป็นถ่านก่อนแล้วจึงนำไปอัดเป็นก้อนถ่านเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม และการนำไปใช้ในกิจกรรมทางการเกษตรหรือใช้ประโยชน์ตามที่ต้องการต่อไป

ในการเตรียมชีวมวลอัดแท่งซึ่งได้ศึกษาการเตรียมชีวมวลอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ใช้ได้แก่ แกลบดำ ชังข้าวโพด ชานอ้อย ขี้เลื่อย มูลวัว มูลสุกร และมูลไก่ โดยการนำไปอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องอัดแท่งก้อนเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่ประดิษฐ์ขึ้นเองซึ่งไม่ใช่ไฟฟ้า และ

สามารถเคลื่อนย้ายไปในที่ต่าง ๆ ได้ง่าย โดยจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของวัสดุชีว-มวลเหลือทิ้งจากการเกษตรซึ่งได้แก่ ปริมาณลิกนิน ปริมาณอัลฟา-เซลลูโลส ปริมาณแกรมมา-เซลลูโลส และปริมาณเบต้า-เซลลูโลส พบว่า แกลบดำ ชังข้าวโพด ชานอ้อย และจี้เลื่อย มีปริมาณลิกนินอยู่ในช่วง 16.4 – 36.7 % มีปริมาณอัลฟา-เซลลูโลสอยู่ในช่วง 80.5 – 88.9% มีปริมาณแกรมมา-เซลลูโลสอยู่ในช่วง 5.8 – 11.8% และมีปริมาณเบต้า-เซลลูโลสอยู่ในช่วง 1.2 – 13.7% จากการศึกษาวิเคราะห์เชิงประมาณของความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ในชีวมวลตัวอย่างได้แก่ แกลบดำ ชังข้าวโพด ชานอ้อย จี้เลื่อย มูลวัว มูลสุกร และมูลไก่ พบว่ามีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วง 6.1 – 12.7% มีปริมาณสารระเหยได้อยู่ในช่วง 34.3 – 70.7% มีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 8.6 – 30.8% และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวอยู่ในช่วง 11.1 – 24.4% นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงปริมาณโลหะหนักบางชนิดที่หลงเหลือตกค้างอยู่ในชีวมวลตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาพบว่าปริมาณโลหะหนักนิกเกิล (Ni) อยู่ต่ำกว่า 0.195 ppm มีปริมาณโลหะหนักตะกั่ว (Pb) อยู่ในปริมาณที่น้อยกว่า 0.240 ppm มีปริมาณโลหะทองแดง (Cu) อยู่ในปริมาณ 0.481-1.805 ppm มีปริมาณโลหะหนักแคดเมียม (Cd) อยู่ต่ำกว่า 0.021 ppm และมีปริมาณโลหะสังกะสี (Zn) อยู่ในช่วง 0.468-2.132 ppm จากการศึกษาการเตรียมชีวมวลอัดแท่งและสูตรการเตรียมที่เหมาะสมนั้นพบว่า การเตรียมโดยใช้ชีวมวลแกลบดำเป็นส่วนประกอบหลักสามารถทำให้ชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรทุกชนิดสามารถขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลได้ โดยการใช้ตัวช่วยผสมในการขึ้นรูปแท่งชีวมวลเป็นมูลวัว (บดละเอียด) สามารถทำให้ได้แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความสามารถในการขึ้นรูปและมีความแข็งแรงดีกว่าการใช้แป้ง มูลไก่ และมูลสุกร ตามลำดับ การใช้ชีวมวลส่วนผสมรองเป็นจี้เลื่อยสามารถทำให้การขึ้นรูปเป็นแท่งเชื้อเพลิงและมีความแข็งแรงดีกว่าการใช้ชานอ้อยและชังข้าวโพดตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า การนำชีวมวลเหลือทิ้งจากการเกษตรไปหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ ก่อนการนำไปขึ้นรูป จะช่วยทำให้ชีวมวลอัดแท่งของการใช้แป้งและมูลวัวเป็นตัวประสาน เกิดการขึ้นรูปได้ดีกว่า และแท่งเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงดีกว่าชีวมวลที่ไม่ผ่านการหมัก จากการพิจารณาถึงความหนาแน่นของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งพบว่า มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.3430 – 0.5845 g/cm³ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่มีความเหมาะสมในการนำไปศึกษาการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สซึ่งมีค่าความหนาแน่นของแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลสูงกว่า 0.5 g/cm³ โดยการใช้แกลบดำเป็นส่วนประกอบหลักและใช้ส่วนผสมรองเป็นชีวมวลผสมระหว่างจี้เลื่อยกับชังข้าวโพด หรือระหว่างจี้เลื่อยกับชานอ้อยจะทำให้ได้แท่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีความแข็งแรงและมีความหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาจึงทำให้สามารถเลือกสูตรการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการศึกษาในขั้นตอนต่อไปได้จำนวน 12 สูตรผสม ดังนี้

1. สูตร (A) แกลบดำผสมกับจี้เลื่อย ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 1 โดยมีแป้งเป็นตัวประสาน
2. สูตร (B) แกลบดำผสมกับชังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 1 โดยมีแป้งเป็นตัวประสาน
3. สูตร (C) แกลบดำผสมกับจี้เลื่อยและชังข้าวโพด ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 0.5 : 0.5 โดยมีแป้งเป็นตัวประสาน

4. สูตร (D) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้า ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 1 โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
5. สูตร (E) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้า ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 1 โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
6. สูตร (F) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้าและขี้เถ้าที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 0.5 : 0.5 โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
7. สูตร (G) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้า ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 1 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีแฉะเป็นตัวประสาน
8. สูตร (H) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้า ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 1 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีแฉะเป็นตัวประสาน
9. สูตร (I) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้าและขี้เถ้าที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 0.5 : 0.5 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีแฉะเป็นตัวประสาน
10. สูตร (J) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้า ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 1 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
11. สูตร (K) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้า ที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 1 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน
12. สูตร (L) แกลบคั่วผสมกับขี้เถ้าและขี้เถ้าที่มีอัตราส่วนการผสม 1 : 0.5 : 0.5 และผ่านการหมักด้วย EM นาน 1 อาทิตย์ โดยมีมูลวัวเป็นตัวประสาน

5.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งและโปรคิวเซอร์ที่ได้

จากผลการศึกษาพบว่าแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้นมานี้มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้น (moisture percent) อยู่ในช่วง 2-4% มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสารที่ระเหยได้ (volatile matter percent) อยู่ในช่วง 65-69 % มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเถ้า (ash percent) อยู่ในช่วง 11-19 % และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon percent) อยู่ในช่วง 11-18% สำหรับแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมขึ้นมาและผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของความชื้น (moisture percent) อยู่ในช่วง 0.1-0.5% มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของสารที่ระเหยได้ (volatile matter percent) อยู่ในช่วง 54-60 % มีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของเถ้า (ash percent) อยู่ในช่วง 16-24 % และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนคงตัว (fixed carbon percent) อยู่ในช่วง 19-30%

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งและเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว โดยใช้เทคนิควิธีการหาค่าความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องบอมบแคลอรีมิเตอร์ (Bomb calorimeter) เปรียบเทียบกับการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงทางทฤษฎีโดยอาศัยสมการคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนของ Nhuchhem et al. (2012) ผลที่ได้พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้โดยสูตรต่าง ๆ นี้ มีค่าปริมาณความร้อนสูง (High Heating Value, HHV)

จากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนโดยใช้เครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ มีค่าอยู่ในช่วง 16.88 MJ/kg ถึง 18.09 MJ/kg ซึ่งจากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนทางทฤษฎีจากสมการของ Nhuchhen et al. (2012) ซึ่งสร้างสมการเพื่อหาค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิงชีวมวลจากองค์ประกอบร้อยละ (% by wt. dry basis) ของสารระเหยได้ ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัว ในชีวมวลตัวอย่าง โดยได้สร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ทั้งสมการแบบ linear correlation และแบบ non-linear correlation ซึ่งผลจากการคำนวณที่ได้พบว่า หากใช้สมการแบบ linear correlation ค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในช่วงระหว่าง 17.86 MJ/kg - 18.35 MJ/kg ในขณะที่การใช้สมการแบบ non-linear correlation แสดงค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในช่วงระหว่าง 16.73 MJ/kg - 18.05 MJ/kg ดังนั้นทำให้ทราบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้นี้สามารถให้ปริมาณพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 16-18 MJ/kg สำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้โดยใช้สูตรการเตรียมต่าง ๆ และผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว มีค่าปริมาณความร้อนสูง (HHV) ที่วิเคราะห์ได้จากการใช้เครื่องบอมคาลอริมิเตอร์ มีค่าอยู่ในช่วง 16.58 MJ/kg ถึง 18.18 MJ/kg ซึ่งจากการวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนทางทฤษฎีของเชื้อเพลิงชีวมวลจากสมการของ Nhuchhen et al. (2012) พบว่า จากการคำนวณโดยใช้สมการแบบ linear correlation ค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว มีค่าปริมาณความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 17.95 MJ/kg - 18.35 MJ/kg ในขณะที่การใช้สมการแบบ non-linear correlation แสดงค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง ที่ผ่านการเผาให้กลายเป็นถ่านแล้วอยู่ในช่วงระหว่าง 16.03 MJ/kg - 17.28 MJ/kg ดังนั้นจึงทำให้ทราบว่าแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้ว จะให้ปริมาณพลังงานความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ 16-18 MJ/kg

จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วพบว่า เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งให้โปรตีนเซอร์แก๊สที่มีองค์ประกอบของแก๊ส CO มากที่สุด รองลงมาได้แก่ แก๊ส H_2 , CO_2 และแก๊ส CH_4 ตามลำดับ ส่วนเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วให้โปรตีนเซอร์แก๊สที่มีองค์ประกอบของแก๊ส CO มากที่สุด รองลงมาได้แก่ แก๊ส H_2 , CO_2 และแก๊ส CH_4 ตามลำดับ โดยแก๊ส CO , H_2 และ CH_4 จัดว่าเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ติดไฟได้ ในขณะที่แก๊ส CO_2 ไม่ติดไฟ ทั้งนี้โปรตีนเซอร์แก๊สที่ได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วจะมีปริมาณของแก๊ส CO , H_2 และ CO_2 ที่มากขึ้นเล็กน้อยจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่าน แต่จะมีปริมาณของ CH_4 น้อยกว่า

จากการศึกษาพบว่า การใช้อัตราการไหลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาในการผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สโดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งทั้งที่ไม่ผ่านการทำให้เป็นถ่านและที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วพบว่า การใช้อัตราการไหลของอากาศเข้าที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ของโปรตีนเซอร์แก๊สมีค่าที่เพิ่มขึ้น โดยเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ผ่านการทำให้เป็นถ่านแล้วจะมีอุณหภูมิของเปลวไฟที่สูงกว่าเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เป็นถ่านเล็กน้อย ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้อัตราการไหลของอากาศที่เข้าทำปฏิกิริยาเท่ากับ $2.106 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ นั้นจะทำให้การ

จุดติดไฟของแก๊สเชื้อเพลิงทำได้ง่ายและเกิดแก๊สเชื้อเพลิงขึ้นอย่างสม่ำเสมอ และการเกิดเปลวไฟเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ไม่เกิดการดับบ่อยครั้งตลอดช่วงระยะเวลาในการศึกษา

5.3 การศึกษาการนำไปใช้จริงกับเตาเผาแก๊สซีไฟเออร์แบบต่าง ๆ และประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงอัดแท่งข้อจำกัด และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน

จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซีไฟเออร์แบบ up draft และแบบ down draft มีระยะเวลาในการจุดติดไฟอยู่ในช่วง 5-8 นาที ซึ่งให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดอยู่ในช่วง $360-387^{\circ}\text{C}$ มีระยะเวลาในการผลิตแก๊สประมาณ 120-130 นาที มีปริมาตรของแก๊สที่เก็บได้ประมาณ $1.8-2.0\text{ m}^3$ และมีปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ประมาณ $0.32-0.41\text{ kg}$ สำหรับประสิทธิภาพของถ่านจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการนำไปใช้กับเตาเผาแก๊สซีไฟเออร์แบบ up draft และแบบ down draft มีระยะเวลาในการจุดติดไฟอยู่ในช่วง 3-4 นาที ซึ่งให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดอยู่ในช่วง $387-396^{\circ}\text{C}$ มีระยะเวลาในการผลิตแก๊สประมาณ 60-90 นาที มีปริมาตรของแก๊สที่เก็บได้ประมาณ $1.2-1.5\text{ m}^3$ และมีปริมาณเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ประมาณ $0.45-0.58\text{ kg}$

จากการศึกษาพบว่า ผู้เข้าอบรมมีความพึงพอใจต่อเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นและได้ทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีผ่านโครงการอบรมเชิงปฏิบัติการ ในด้านต่าง ๆ ดังนี้ 1.ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวก และความง่ายในการจัดหาวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมากที่สุด (4.5) 2.ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายของวิธีการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (3.9) 3.ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับปานกลาง (3.1) 4.ระดับความพึงพอใจด้านลักษณะและคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้อยู่ในระดับมาก (3.75) 5.ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายของวิธีการเตรียมถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (4.0) 6.ระดับความพึงพอใจด้านความสะดวกและความง่ายของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (4.1) 7.ระดับความพึงพอใจด้านลักษณะและคุณภาพของถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งที่เตรียมได้อยู่ในระดับมาก (4.2) 8.ระดับความพึงพอใจด้านการใช้งานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวลอยู่ในระดับมาก (4.1) 9.ระดับความพึงพอใจด้านการใช้งานถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาชีวมวลอยู่ในระดับมาก (3.9) 10.ระดับความพึงพอใจด้านประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สอยู่ในระดับมาก (3.7) 11.ระดับความพึงพอใจด้านประสิทธิภาพของการใช้ถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สอยู่ในระดับมาก (3.55) 12.ระดับความพึงพอใจด้านคุณภาพของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (3.9) 13.ระดับความพึงพอใจด้านคุณภาพของโปรคิวเซอร์แก๊สที่ผลิตได้จากถ่านเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งอยู่ในระดับมาก (3.9) 14.ระดับ

ความพึงพอใจด้านความคุ้มค่าของการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง อยู่ในระดับมาก (4.2) 15.ระดับความพึงพอใจด้านความคุ้มค่าของการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ในระดับมาก (4.1) ดังนั้นในภาพรวมของระดับความพึงพอใจของผู้ใช้ประโยชน์จากเทคโนโลยีที่ได้พัฒนาขึ้นนี้มีระดับความพึงพอใจอยู่ในระดับมาก (3.93)

เอกสารอ้างอิง

- ฐิติกร บุญชูวงศ์ รัตนชัย ไพรินทร์ ศิริชัย เทพา และศิรินุช จินดารักษ์ (2552). การศึกษาการผลิต **Producer gas** จากเตาผลิตแก๊สแบบ Updraft โดยใช้เศษผักและแกลบเป็นเชื้อเพลิง. เอกสารการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 ระหว่างวันที่ 29 เมษายน – 1 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก
- ดิณณภพ แพงพม (2552). การผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวลในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- บัญญัติ โจลานันท์ และอาทิตย์ พุทธรักษาติ (2554). พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงแข็งอัดแท่ง **ไมยราบยักษ์**. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ฉบับที่ 16 (1), หน้า 20-31.
- ศิริมรินทร์ มีสุข (2552). การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากชีเลื่อยโดยแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- สุรพงษ์ คล้ายมูล. (2545). การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สจากเตาผลิตแก๊สแบบไหลขึ้นและไหลลงโดยใช้ผักตบชวาอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- Bogale, W. (2009). **Preparation of charcoal using agricultural wastes**. *Ethip. J. Educ. & Sc.* 5(1) : p79-91.
- ประเสริฐ เทียนนิมิต ขวัญชัย สันทิพย์สมบุรณ์ และปานเพชร ชนินทร. (2556). เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- ปิยรัตน์ มูลศรี วิไลพร ปองเพียร และกฤษฎิญา มูลศรี. (2555). การผลิตถ่านกัมมันต์จากฝักระงับที่เสียหายจากการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์. รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์. เพชรบูรณ์. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- ปิยรัตน์ มูลศรี วิไลพร ปองเพียร และพยัคฆ์ จวนตรง. (2556). การผลิตไฟฟ้าจากการหมักขยะอินทรีย์โดยกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ. รายงานการวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์. เพชรบูรณ์. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- วรณูช แจ่มสว่าง. (2553). พลังงานหมุนเวียน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ฯ.
- อนุดร จำลองกุล. (2555). พลังงานทดแทน. กรุงเทพฯ : บริษัท ทริปเพิล เอ็ดดูเคชั่น จำกัด.
- Bekgiorno, V., De Feo, G., Della Rocca, C., Napoli, R.M.A. (2003). **Energy from gasification of solid wastes**. *Waste Management*. 23. p1-15.

- Boyle, G. (1996). **Renewable energy power for a sustainable future**. Alden University.
- Energypedia. (2015). **Types of Biogas Digester and Plant** [Online]. Available HTTP: www.energypedia.info/wiki/types_of_biogas_digesters_and_plants [2015, April 25].
- Fisher, D., Gagnon, D., & Sutcliffe, D. C. (2015). **Gasifier Powered Go-Kart** [Online]. Available HTTP: www.engin1000.pbworks.com/w/page/18942701/ [2015, June 14].
- Jorgensen, P. J. (2009). **Biogas-green energy**. 2nd ed. Aarhus : Aarhus University.
- Kopeliovich, D. (2013). **Combustion, pyrolysis and gasification of scrap tires** [Online]. Available HTTP: www.substech.com/dokuwiki/ [2015, June 16].
- Obernberger, I. & Thek, G. (2008). Combustion and gasification of solid biomass for heat and power production in Europe State of the Art and relevant future developments. Publish in: Proc.of the 8th European Conference on Industrial Furnaces and Boiler, April 2008, Portugal.
- Seadi, L., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. (2008). **Biogas Handbook**. Esbjerg : University of Southern Denmark.
- Sasse, L. (1988). **Biogas Plants**. Eschborn : The Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Schobert, H. (2013). **Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels**. New York : Cambridge University Press.
- Nhuchhen, D. R., Salam, P. A. (2012). **Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach**. *Fuel*. Vol 99. Pp 55-63.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์

1. ขอบข่าย

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ครอบคลุมถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ หลายประเภท เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีและเภสัชกรรม ใช้ฟอกสีในอุตสาหกรรมอาหาร น้ำตาล น้ำมันพืช น้ำอัดลม โมโนโซเดียมแอล-กลูตาเมต (Monosodium L-Glutamate) ใช้ดูดก๊าซในกั้นกรองบุรี เครื่องทำให้อากาศบริสุทธิ์ในโรงงานและใช้ในการกรองน้ำ

2. บทนิยาม

ความหมายของคำที่ใช้ในมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้ มีดังต่อไปนี้

2.1. ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ถ่านที่มีคุณสมบัติดูดซับสี กลิ่น รส บางชนิดได้เป็นอย่างดี ถ่านชนิดนี้มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ผลิตได้จากถ่านหิน ถ่านไม้ ถ่านกะลามะพร้าว หรือถ่านกระดูก ด้วยกรรมวิธีถ่อกัมมันต์

2.2. ค่าไอโอดีน (Iodine number) หมายถึงจำนวนมิลลิกรัมของไอโอดีนที่ถูกดูดซับไว้ด้วยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนหลังจากถูกดูดซับเป็น 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

3. ชนิดและชั้นคุณภาพ

3.1. ถ่านกัมมันต์แบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ

3.1.1. ชนิดผง (powdered activated carbon)

3.1.2. ชนิดเม็ด (granular activated carbon) แบ่งออกเป็นสองชั้นคุณภาพคือ

3.1.2.1. ชั้นคุณภาพพิเศษ (premium graded)

3.1.2.2. ชั้นคุณภาพที่ 1 (first graded)

3.1.3. ชนิดอัดเม็ด (pelletised activated carbon)

3.1.4. ชนิดแท่ง (block activated carbon)

4. ขนาด

4.1. ชนิดผง ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.2.1

4.2. ชนิดเม็ดและชนิดอัดเม็ด ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย แต่ปริมาณที่ผ่านแรง 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.2.2

4.3. ชนิดแท่ง ให้เป็นไปตามข้อตกลงระหว่างผู้ซื้อกับผู้ขาย

5. คุณลักษณะที่ต้องการ

5.1 ลักษณะทั่วไป

5.1.1 ชนิดผง ต้องเป็นผงสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

5.1.2 ชนิดเม็ดและชนิดอัดเม็ด ต้องเป็นเม็ดสีดำ ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

5.1.3 ชนิดแท่ง ต้องเป็นแท่ง ปราศจากสิ่งแปลกปลอมที่มองเห็นได้

การทดสอบให้ทำการตรวจพินิจ

5.2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมี

5.2.1 ชนิดผง ให้เป็นไปตามตารางที่ ผก 1

ตารางที่ ผก 1 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของชนิดผง

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า	600	AWWA B600
2	ความหนาแน่นปรากฏ กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เซนติเมตร	0.20 ถึง 0.75	

5.2.2 ชนิดเม็ด ให้เป็นไปตามตารางที่ ผก 2

ตารางที่ ผก 2 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของชนิดเม็ด

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด		วิธีทดสอบ ตาม
		ชั้นคุณภาพพิเศษ	ชั้นคุณภาพที่ 1	
1	ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า	1000	600	AWWA B604
2	ความชื้นร้อยละไม่เกิน	8		
3	ความหนาแน่นปรากฏกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเซนติเมตร	0.20		AWWA B604
4	ความแข็ง (Abrasion resistance) ร้อยละไม่น้อยกว่า	70		Ro-Tap Abrasion test

5.2.3. ชนิดอัดเม็ด ให้เป็นไปตามตารางที่ ผก 3

ตารางที่ ผก 3 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของชนิดอัดเม็ด

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้นร้อยละไม่เกิน	8	
3	ความหนาแน่นปรากฏกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตรเซนติเมตร	0.20	
4	ความแข็ง (Abrasion resistance) ร้อยละไม่น้อยกว่า	70	AWWA B604 Ro-Tap Abrasion test

5.2.4. ชนิดแท่ง ให้เป็นไปตามตารางที่ ผก 4

ตารางที่ ผก 4 คุณลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีของชนิดแท่ง

รายการที่	คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด	วิธีทดสอบตาม
1	ค่าไอโอดีนไม่น้อยกว่า	600	AWWA B604
2	ความชื้นร้อยละไม่เกิน	8	

6. การบรรจุ

- 6.1. ให้บรรจุถ่านกัมมันต์ในภาชนะบรรจุที่สะอาด แห้ง และปิดได้สนิท
 - 6.2. น้ำหนักสุทธิของถ่านกัมมันต์ในแต่ละภาชนะที่บรรจุ ต้องไม่น้อยกว่าที่ระบุไว้ที่ฉลาก
- การทดสอบให้ปฏิบัติตามข้อ 9.3

7. เครื่องหมายและฉลาก

7.1. ที่ภาชนะบรรจุถ่านกัมมันต์ทุกหน่วยอย่างน้อยต้องมีเลข อักษร หรือเครื่องหมายแจ้งรายละเอียดต่อไปนี้ให้เห็นได้ง่าย ชัดเจน

- (1) ชื่อผลิตภัณฑ์ตามชื่อมาตรฐาน
- (2) ชนิด และชั้นคุณภาพ
- (3) น้ำหนักสุทธิ เป็นกิโลกรัม
- (4) เดือน ปีที่ทำ หรือรหัสรุ่นที่ทำ

(5) ชื่อผู้ทำหรือโรงงานที่ทำ หรือเครื่องหมายการค้าที่จดทะเบียน

ในกรณีที่ใช้ภาษาต่างประเทศ ต้องมีความหมายตรงกับภาษาไทยที่กำหนดไว้ข้างต้น

8. การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน

ในการชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน ให้เป็นไปตามภาคผนวก ข

9. การทดสอบ

9.1. ข้อกำหนดทั่วไป

9.1.1. ให้ใช้วิธีทดสอบที่กำหนดในมาตรฐานนี้ หรือวิธีอื่นใดที่ให้ผลเทียบเท่า ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในมาตรฐานนี้

9.1.2. หากมิได้กำหนดไว้เป็นอย่างอื่น น้ำกลั่นและสารเคมีที่ใช้ต้องมีความบริสุทธิ์เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์

9.2. การทดสอบขนาด

9.2.1. ถ่านกัมมันต์ผง

9.2.1.1. เครื่องมือ

(1) แรง 150 ไมโครเมตร

(2) กุชครูซิเบล

9.2.1.2. วิธีทดสอบ

นำตัวอย่างประมาณ 25 กรัม ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมงจนได้มวลคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นให้รีบชั่งให้ทราบมวลที่แน่นอนถึง 0.001 กรัม (m_0) เทตัวอย่างใส่ในบีกเกอร์ เติมน้ำ 600 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถึง 700 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนให้เข้ากัน ทำแรงให้เปียกก่อนแล้วเทตัวอย่างช้า ๆ ผ่านแรงในขณะที่เทให้คนตัวอย่างเป็นครั้งคราว ล้างตัวอย่างที่ติดอยู่ในบีกเกอร์ออกให้หมด เมื่อเทตัวอย่างทั้งหมดลงบนแรงแล้วใช้น้ำล้างตัวอย่างอีกจนกระทั่งไม่มีตัวอย่างผ่านแรงอีก ถ่ายตัวอย่างที่ล้างบนแรง โดยใช้ น้ำช่วยใส่ลงในบีกเกอร์แล้วกรองผ่านกุชครูซิเบลซึ่งทราบมวลแน่นอนแล้ว นำกุชครูซิเบลนั้นไปอบที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 ชั่วโมงจนได้มวลที่คงที่ ปล่อยให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วรีบชั่งน้ำหนักทันที (m_1)

9.2.1.3. วิธีคำนวณ

คำนวณหาปริมาณที่ผ่านแรง จากสูตร

$$\text{ปริมาณที่ผ่านแรง ร้อยละ โดยน้ำหนัก} = 1 - \frac{m_1}{m_0} \times 100$$

เมื่อ m_0 คือ มวลของตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งแรก เป็นกรัม

m_1 คือ มวลของตัวอย่าง หลังจากอบแห้งครั้งที่ 2 เป็นกรัม

9.2.2. ถ่านกัมมันต์เม็ดและถ่านกัมมันต์อัดเม็ด

9.2.2.1. เครื่องมือ

(1) แรง 150 ไมโครเมตร

(2) เครื่องเขย่าที่มีอัตราการเขย่า 285 รอบต่อนาที ± 5 รอบต่อนาที มีลักษณะการเขย่าเป็นแบบขึ้นลงและหมุนวนพร้อมกัน

9.2.2.2. วิธีทดสอบ

ชั่งตัวอย่างประมาณ 100 กรัม ให้ทราบมวลที่แน่นอนถึง 0.1 กรัม ใส่ในแรง เขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 3 นาที ถ่ายส่วนที่ค้างบนแรงทั้งหมดลงในภาชนะที่ทราบมวลแน่นอนแล้ว ซึ่งแล้วคำนวณส่วนที่ค้างบนแรงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก

9.3 น้ำหนักสุทธิ

ชั่งตัวอย่างทั้งหมดพร้อมภาชนะบรรจุแล้วเทตัวอย่างออกซึ่งภาชนะเปล่าแล้วเฉลี่ยผลต่างของมวลที่ชั่งได้เป็นน้ำหนักสุทธิต่อภาชนะบรรจุ

การชักตัวอย่างและเกณฑ์ตัดสิน (ข้อ 8)

1. รุ่นในที่นี้ หมายถึง ถ่านกัมมันต์ชนิดและชั้นคุณภาพเดียวกัน ทำโดยกรรมวิธีเดียวกัน บรรจุในภาชนะบรรจุชนิดและขนาดเดียวกัน ที่ทำหรือส่งมอบหรือซื้อขายในระยะเวลาเดียวกัน

2. การชักตัวอย่างและการยอมรับ ให้เป็นไปตามแผนการชักตัวอย่างที่กำหนดต่อไปนี้ หรืออาจใช้แผนการชักตัวอย่างอื่นที่เทียบเท่ากันทางวิชาการกับแผนที่กำหนดไว้

2.1 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบการบรรจุ

2.1.1. ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันตามจำนวนที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ผข 1

2.1.2. ตัวอย่างทุกตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 6. จึงจะถือว่าถ่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

ตารางที่ ผข 1 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบการบรรจุ

ขนาดรุ่นหน่วยภาชนะบรรจุ	ขนาดตัวอย่างหน่วยภาชนะบรรจุ
ไม่เกิน 25	3
26 ถึง 50	4
51 ถึง 100	5
101 ถึง 300	6
301 ถึง 500	7
501 ถึง 800	8
801 ถึง 1000	9
เกิน 1001	10

2.2 การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบเครื่องหมายและฉลาก

2.2.1. ให้ชักตัวอย่างโดยวิธีสุ่มจากรุ่นเดียวกันตามจำนวนที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ ผข 2

2.2.2. จำนวนตัวอย่างที่ไม่เป็นไปตามข้อ 7. ในแต่ละรายการ ต้องไม่เกินเลขจำนวนที่ยอมรับที่กำหนดในตารางที่ ผข. 2 จึงจะถือว่าถ่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามที่กำหนด

ตารางที่ ผข 2 แผนการชักตัวอย่างสำหรับการทดสอบเครื่องหมายและฉลาก

ขนาดรุ่นหน่วยภาชนะบรรจุ	ขนาดตัวอย่างหน่วยภาชนะบรรจุ	เลขจำนวนที่ยอมรับ
ไม่เกิน 280	2	0
281 ถึง 500	8	1
เกิน 500	13	2

2.3. การชักตัวอย่างและการยอมรับสำหรับการทดสอบขนาด และคุณลักษณะที่ต้องการ

2.3.1. ให้ชักตัวอย่างจากตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบเครื่องหมายและฉลากแล้วมาภาชนะบรรจุเท่า ๆ กันให้ได้ตัวอย่างรวมกันไม่น้อยกว่า 1 500 กรัม ผสมตัวอย่างทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วแบ่งออกเป็น 3 ส่วนเท่า ๆ กัน บรรจุแต่ละส่วนลงในภาชนะที่สะอาด แห้ง และปิดได้สนิท พร้อมทั้งบันทึกรายละเอียดที่จำเป็นไว้ ตัวอย่างส่วนหนึ่งนำไปใช้ในการวิเคราะห์อีก 2 ส่วนที่เหลือให้ผู้เกี่ยวข้องเก็บไว้เป็นหลักฐาน

2.3.2. ตัวอย่างต้องเป็นไปตามข้อ 4 และข้อ 5 ทุกรายการ จึงจะถือว่าถ่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด

3. เกณฑ์ตัดสิน

ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ต้องเป็นไปตามข้อ 2.1.2., ข้อ 2.2.2. และข้อ 2.3.2. ทุกข้อจึงจะถือว่าถ่านกัมมันต์รุ่นนั้นเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมนี้

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างภาพการอบรมบูรณาการงานวิจัยสู่ชุมชน



การบรรยายหลักการสร้างเตาเผาภูมิปัญญา



การสาธิตการประกอบเตาและฝึกปฏิบัติ



การสาธิตการประกอบเตาและฝึกปฏิบัติ



การสาธิตการประกอบเตาและฝึกปฏิบัติ



ตัวอย่างถ่านมะขามที่ได้จากการเผาด้วยเตาเผา



ตัวอย่างถ่านกัมมันต์จากถ่านมะขามที่เตรียมได้

ประวัติผู้วิจัย

- ชื่อ: ดร. ปิยรัตน์ มุลศรี
- คุณวุฒิ: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ตำแหน่ง: อาจารย์ระดับ 7
- สถานที่ติดต่อ: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
-
- ชื่อ: นางสาววิไลพร ปองเพียร
- คุณวุฒิ: วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิทยาศาสตร์ศึกษา) คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
- ตำแหน่ง: พนักงานมหาวิทยาลัย สายวิชาการ
- สถานที่ติดต่อ: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
-
- ชื่อ: นางกฤษฎิญา มุลศรี
- คุณวุฒิ: ศิลปศาสตรบัณฑิต (บริหารธุรกิจ) คณะวิทยาการจัดการ
มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์
บริหารธุรกิจมหาบัณฑิต (บริหารธุรกิจ) คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
- ตำแหน่ง: อาจารย์ระดับ 7
- สถานที่ติดต่อ: คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์หาค่าความร้อน

ทำการ standardized calorimeter เพื่อหา energy equivalent of calorimeter โดยใช้กรดเบนโซอิก (Benzoic acid) ทำการทดลองเหมือนการหาค่าความร้อนทุกประการ

$$W = \frac{Hm + e_1 + e_3}{t}$$

เมื่อ W = energy equivalent of calorimeter ($\text{cal}/^{\circ}\text{C}$)

H = ค่าความร้อนในการเผาไหม้ของสารมาตรฐานกรดเบนโซอิก (6318 cal/g)

m = มวลของสารมาตรฐานกรดเบนโซอิกที่ใช้ (g)

t = ค่าแก้ไขของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ($^{\circ}\text{C}$)

e_1 = ค่าแก้ไขสำหรับความร้อน (cal) ในการเกิดของกรดไนตริก (HNO_3)

e_3 = ค่าแก้ไขสำหรับความร้อน (cal) ในการเผาไหม้ของลวด (2.3 cal/cm)

สารเคมีที่ต้องใช้

$0.0725 \text{ N Na}_2\text{CO}_3$ (3.84 กรัม ของ Na_2CO_3 แล้วเติมน้ำให้ครบ 1 ลิตร)

Methyl red หรือ Methyl orange indicator

ข้อมูลที่เก็บได้มีดังนี้

a = เวลาที่เริ่มกดปุ่ม ignition

b = เวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 60% ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทั้งหมด (ละเอียดถึง 0.1 นาที)

c = เวลาที่อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเริ่มจะคงที่ (หลังจากการเผาไหม้แล้ว)

t_a = อุณหภูมิที่เวลา a

t_c = อุณหภูมิที่เวลา c

r_1 = อัตราเร็วการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) ภายใน 5 นาที ก่อนการเผาไหม้

r_2 = อัตราเร็วการลดลงของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$) หลังจาก 5 นาที หลังเวลา c

c_1 = มิลลิลิตรของ $0.0725 \text{ N Na}_2\text{CO}_3$ ที่ใช้ในการไทเทรต

c_2 = ร้อยละของซัลเฟอร์ในสารตัวอย่าง

c_3 = ความยาวของลวดที่ถูกเผาไหม้ (cm)

W = energy equivalent of calorimeter ซึ่งหาได้จากการ standardized

m = มวลของสารตัวอย่าง (g)

Correction temperature rise (t)

$$t = t_c - t_a - r_1(b-a) + r_2(c-b)$$

ถ้าหลังจากเวลา c แล้ว อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก

$$t = t_c - t_a - r_1(b-a) - r_2(c-b)$$

Thermochemical corrections

- e_1 = ค่าแก้ไขสำหรับความร้อนในการเกิดของ $\text{HNO}_3 = c_1$ เมื่อใช้ Na_2CO_3 เข้มข้น 0.0725 N
- e_2 = ค่าแก้ไขสำหรับความร้อนในการเกิดของ $\text{H}_2\text{SO}_4 = 14 \times c_2 \times m$ (cal)
- e_3 = ค่าแก้ไขสำหรับความร้อนในการเผาไหม้ของลวด = $2.3 \times c_3$ (cal)

ค่าความร้อนสูงของสารตัวอย่าง

$$\text{HHV} = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m}$$

วิธีการหาปริมาณซัลเฟอร์ในสารตัวอย่าง

1. นำสารละลายที่ไทเทรตแล้วมาปรับให้มี pH 5.5-7.0 ด้วย NH_4OH (dil) แล้วให้ความร้อนกับสารละลายจนเดือด จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรอง และล้างด้วยน้ำร้อน 5-6 ครั้ง
2. ปรับให้สารละลายมีปริมาตร 250 mL และทำให้เป็นกลางด้วยสารละลาย NaOH
3. เติม HCl (1:9) 1 mL แล้วต้มให้เดือด
4. เติมสารละลาย BaCl_2 10 mL อย่างช้า ๆ จากปิเปต แล้วต้มต่อเป็นเวลา 15 นาที และตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 2 ชั่วโมง หรือตลอดคืน ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเดือด
5. กรองสารละลายที่ได้ผ่านกระดาษกรอง Whatman No.42 เติมสารละลาย AgNO_3 1 หยด ลงไปในช่องเหลวที่กรองได้ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำร้อน จนกระทั่งช่องเหลวใส
6. ใส่กระดาษกรองเปียกที่มีตะกอนของ BaSO_4 ในถ้วยพอสเลนซ์ เผาในเตาไฟฟ้า (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 800 – 850 °C และให้ความร้อนจนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักกากของแข็งที่เหลือ

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์

$$\text{เปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์} = \frac{\text{weight of BaSO}_4 \times 13.738}{\text{weight of sample}}$$

ตัวอย่างการคำนวณของขี้เถ้า

น้ำหนักของสารตัวอย่างเท่ากับ 1.0045 g

ความยาวของลวดที่ใช้ก่อนการทดลอง 10 cm

ความยาวของหลอดที่ไม่ถูกเผาไหม้ 7.5 cm

ความยาวของหลอดที่ถูกเผาไหม้ = $10 - 7.5 = 2.5$ cm

ปริมาตรของ 0.0725 N Na_2CO_3 ที่ใช้ไป = 1.2 mL

การเพิ่มอุณหภูมิภายใน 5 นาที ก่อนการเผาไหม้ = $29.54 - 29.54 = 0$ °C

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (r_1) = $(29.54 - 29.54 \text{ °C}) / 5 \text{ min} = 0$ °C/min

การลดลงของอุณหภูมิภายใน 5 นาที หลังการเผาไหม้ = $31.34 - 31.34 = 0$ °C

อัตราการลดลงของอุณหภูมิ (r_2) = $(31.34 - 31.34 \text{ °C}) / 5 \text{ min} = 0$ °C/min

ข้อมูลต่าง ๆ ที่อ่านได้แล้วใช้ในการคำนวณค่าความร้อนของซีลีเยเป็นดังนี้

ข้อมูล	ค่าที่ได้	ข้อมูล	ค่าที่ได้
a	5 นาที	c_1	1.20 mL
b	5.6 นาที	c_2	0.8199 %
c	9.30 นาที	c_3	2.50 cm
t_a	29.50 °C	e_1	1.20 cal
t_c	31.34 °C	$e_2 = 14(c_2)(m)$	11.53 cal
r_1	0 °C/min	$e_3 = 2.3(c_3)$	17.25 cal
r_2	0 °C/min	W	2381.86 cal/°C
m	1.0045 g		

คำนวณค่า corrected temperature rise (t)

$$t = t_c - t_a - r_1(b-a) + r_2(c-b)$$

$$t = 31.34 - 29.50 - (0)(5.60-5.0) + (0)(9.30-5.60) = 1.8 \text{ °C}$$

คำนวณหาความร้อนสูงของซีลีเย

$$\text{จาก } \text{HHV} = \frac{tW - e_1 - e_2 - e_3}{m}$$

$$\text{แทนค่า HHV} = \frac{(1.8)(2381.86) - 1.2 - 11.53 - 17.25}{1.0045}$$

$$= 4238.30 \text{ cal/g หรือ } 17.80 \text{ MJ/kg}$$

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์หาค่าความร้อนทางทฤษฎี

การวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนในทางทฤษฎีอย่างง่ายโดยใช้องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยวิธีพร็อกซิเมต (proximate analysis) ซึ่งจะให้ค่าปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon content, FC) ปริมาณสารระเหยได้ (volatile matter content, VM) และปริมาณเถ้า (ash content, ASH) ถูกสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์เพื่อใช้คำนวณหาความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลที่พัฒนาขึ้นโดย Nhuchhen และคณะ (2012) ซึ่งได้ใช้ค่าปริมาณร้อยละของ FC, VM และ ASH (% by wt. dry basis of biomass) ในการคำนวณหา 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

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

ตารางที่ ผข.1 แสดงประมาณความชื้น สารระเหยได้ เถ้า และคาร์บอนคงตัว ของชีวมวลอัดแท่งสูตรต่าง ๆ

ลำดับ	สูตรการเตรียม	ค่าการวิเคราะห์เชิงปริมาณขององค์ประกอบ (% by wt. dry basis)					
		เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง			ถ่านของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่ง		
		VM	ASH	FC	VM	ASH	FC
1	สูตร A	65.6543	15.0565	19.2892	54.4828	16.1934	29.3238
2	สูตร B	63.2437	17.6464	19.1099	57.3759	21.2723	21.3518
3	สูตร C	67.1191	15.3580	17.5229	58.8261	19.8905	21.2834
4	สูตร D	64.3900	13.1932	22.4169	53.7819	18.5704	27.6478
5	สูตร E	64.0650	13.4391	22.4959	57.6907	18.3673	23.9420
6	สูตร F	66.2585	11.6700	22.0715	59.6363	18.6238	21.7399
7	สูตร G	65.9621	18.4358	15.6022	56.2011	21.8194	21.9795
8	สูตร H	66.4521	16.9430	16.6048	51.4273	22.6187	25.9539
9	สูตร I	64.8299	17.3196	17.8504	57.1030	22.4050	20.4919
10	สูตร J	65.3670	14.0695	20.5635	55.2157	20.7243	24.0599
11	สูตร K	64.5693	15.8167	19.6140	54.1555	23.1960	22.6485
12	สูตร L	63.5406	15.5337	20.9257	54.4547	22.7482	22.7971

ตัวอย่างการคำนวณ

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งสูตร A มีค่า VM = 65.6543% ASH = 15.0565% และ FC = 19.2892%

เมื่อแทนค่าในสมการ linear correlation จะได้ว่า

$$\text{HHV} = 19.2880 - 0.2135(65.6543/19.2892) + 0.0234(19.2892/15.0565) - 1.9584(15.0565/65.6543)$$

$$\text{HHV} = 18.1422 \text{ MJ/kg}$$

เมื่อแทนค่าในสมการ non-linear correlation จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{HHV} = & 20.7999 - 0.3214(65.6543/19.2892) + 0.0051(65.6543/19.2892)^2 - 11.2277(15.0565/65.6543) \\ & + 4.4953(15.0565/65.6543)^2 - 0.7223(15.0565/65.6543)^3 + 0.0383(15.0565/65.6543)^4 \\ & + 0.0076(19.2892/15.0565) \end{aligned}$$

$$\text{HHV} = 17.4277 \text{ MJ/kg}$$