

การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด
จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2563

การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด
จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2563

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด
จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

โสภณภรณ์ รัตนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
ชื่อผู้เขียน	นางสาวโสภณภรณ์ รัตนะ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบพัฒนาและประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเตาชีวมวลแบบดั้งเดิม และเตาแก๊สหุงต้ม การศึกษาเริ่มจากการออกแบบและคำนวณขนาดห้องเผาไหม้ และปริมาณอากาศที่ใช้ เตาใช้หลักการเผาไหม้ตรงร่วมกับการนำเอาแก๊สที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์มาเผาไหม้ร่วม โดยทำการป้อนอากาศสองช่องร่วมกันคือช่อง primary air และอากาศส่วนที่สอง Secondary air โดยมีเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ชังข้าวโพด เศษไม้ และฟางข้าว ทดสอบที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 - 1.40 ปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 ค่า ได้แก่ 3 kg/h, 5 kg/h และ 7.5 kg/h วิเคราะห์การทดสอบโดยวิธีการต้มน้ำ ในด้านการป้อนอากาศ Secondary air จะป้อนอากาศร่วมกับแก๊สที่เหลือจากการเผาไหม้ EGRA ในอัตรา 10% และ 20%

ผลการศึกษาด้านการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงที่เหมาะสมกับการใช้งานกับชีวมวลทั้ง 3 ชนิด คือ 20 cm และ 35 cm ตามลำดับ การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากชังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงที่ดีที่สุด ส่งผลให้เตาชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงและมีสมรรถนะการทำงานที่ดี เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูล 1.20 หรือ 17.12 m³/h และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 kg/h มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่ 0.92 kg/kWh และ 14.19 MJ/kWh ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 38.07% ใช้ระยะเวลาการเดือดของน้ำ 15 นาที อุณหภูมิการเดือดของน้ำอยู่ในช่วง 98.2-101.2 °C ในขณะที่ใช้เศษไม้และฟางข้าว ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเท่ากับ 35.56% และ 31.78% ตามลำดับ ผลการป้อน EGRA ในอัตรา 10% ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะ รวมถึงประสิทธิภาพความร้อนใกล้เคียงกับ EGRA ในอัตรา 0% หรือที่อัตราส่วนสมมูล 1.20 ในทางตรงกันข้ามมีการปล่อย CO, NO_x และ NO₂ ลดลง การสมดุลมวลขาเข้าของการเผาไหม้เท่ากับมวลออกหลังการเผาไหม้ โดยมวลรวมขาเข้าของเชื้อเพลิงอัดเม็ดเท่ากับ 21.63, 22.77 และ 18.72 ตามลำดับ โดยมวลขาออกจากระบบจะแบ่งออกเป็นปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ (CO, CO₂, H₂O, N₂, O₂) และถ่านรวมขี้เถ้า ในส่วนของ

การสมดุลพลังงานขาเข้าระบบเท่ากับ 60.71 MJ, 74.34 MJ และ 67.55 MJ ตามลำดับ ส่วนพลังงานที่ออกจากระบบจะมีพลังงานความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ การสูญเสียพลังงานความร้อนผ่านผนังเตา (Q_{WS}) และไอเสีย (Q_E) ด้านต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวลที่ ER 1.20 และ EGRA 10% พบว่าการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดให้ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนต่ำสุด 2.52 Baht/kWh และ 2.91 Baht/kWh ในขณะที่เตาแก๊สหุงต้มให้ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนสูงสุด 4.68 Baht/kWh และในส่วนของเศรษฐศาสตร์ที่ ER 1.20 ของการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด โดยมีระยะเวลาคืนทุน 1.25 year ผลตอบแทนสุทธิ 85,739.23 baht ผลประหยัด 28,294.12 baht/y และมีผลตอบแทนภายใน 74.82%

คำสำคัญ : ชีวมวล, เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง, เชื้อเพลิงอัดเม็ด, วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร



Title	DESIGN AND DEVELOPMENT OF HIGH EFFICIENCY BIOMASS STOVE FOR AGRICULTURAL WASTE PELLET
Author	Miss Sopaporn Rattana
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Natthawud Dussadee

ABSTRACT

The purpose of this research was to design, develop and evaluate performance of high efficiency biomass stove for pellet with compared conventional biomass stoves and liquefied petroleum gas stove. The research was started of design and calculate size of combustion chamber and air flow rate. The high efficiency biomass stove has direct combustion combined with exhaust gas recirculation with air. Which feeds two air channels together Is the primary air channel and the second air has pellet fuel by corn cob, wood chip and rice straw. The experiment was equivalent ratio of 0.6 - 1.40, adjust the fuel feed rate of fuel input rate, including 3 kg/h, 5 kg/h and 7 kg/h. Testing by boiling water. The second air which will feed exhaust gas recirculation with air the ratio of 10% and 20%

The results of this study on design high efficiency biomass stove have diameter and height combustion chamber with using three fuel was of 20 cm and 35 cm respectively. The use of corn cob pellet fuel at the best conditions resulting in a high efficiency biomass stove and have good performance using air at the equivalent ratio adjustment of 1.20 or 17.12 m³/h and the fuel feed rate of 3 kg/h. Have specific fuel consumption and specific energy consumption is 0.92 kg/kWh and 14.19 MJ/kWh providing the highest thermal efficiency. 38.07% use the boiling period of 15 minutes, boiling water temperature is between 98.2-101.2 °C. While the use of wood chips and rice straw gave the highest heat efficiency of 35.56% and 31.78% respectively. Increasing EGRA feed rate 10% given the rate of fuel consumption, energy

consumption and thermal efficiency close to 0% EGRA or equivalent ratio 1.20, on the contrary, the CO, NO_x and NO₂ emissions are reduced. Balancing the incoming mass of combustion is equal to the mass produced after combustion. The input mass of the pellet fuel is 21.63, 22.77 and 18.72 respectively. The output mass from the system is divided into the amount of product gas (CO, CO₂, H₂O, N₂, O₂) and total ash. The energy balance in the system is 60.71 MJ, 74.34 MJ and 67.55 MJ respectively. The energy released from the system has heat energy to be utilized. Heat loss of energy through the biomass stove wall (Q_{ws}) and exhaust (Q_E). The cost of producing the heat biomass ER 1.20 and EGRA 10% found that using corn cob pellets production costs of thermal energy minimum 2.52 baht/kWh and 2.91 baht/kWh, while the LPG maximum thermal energy production 4.68 baht/kWh. And in the economics, the ER 1.20 of the use of corn cob pellets provides the highest heat efficiency. With a payback period of 1.25 year, net returns of 85,739.23 baht, savings of 28,294.12 baht/y and an internal return of 74.82%

Keywords : Biomass, High efficiency biomass stove, Pellet fuel, Agricultural waste

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินุช จินดารักษ์ ซึ่งให้เกียรติเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาและให้นำคำแนะนำแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ รวมถึงคำปรึกษา ตลอดจนให้คำแนะนำและดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐพร ไชยญาติ และรองศาสตราจารย์เสมอขวัญ ตันติกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย รวมถึงการช่วยตรวจและแก้ไขรูปแบบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในโครงการ "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงาน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา" ในครั้งนี้

ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษาประจำปีงบประมาณ 2561 จากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน "โครงการ การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร" ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวัสดุในการพัฒนาผลิตภัณฑ์สู่ตลาดเชิงพาณิชย์ จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ "โครงการพัฒนาหน่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาเพื่อการสร้างนวัตกรรมด้านการเกษตร" ประจำปีงบประมาณ 2561

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่าน บุคลากรและเจ้าหน้าที่ทุกท่าน รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือพร้อมกับให้ความรู้และคำปรึกษาในการทำงานวิจัย จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

โสภณภรณ์ รัตนะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฐ
สารบัญภาพภาคผนวก	ด
สัญลักษณ์และตัวห้อย	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มา.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตการศึกษา	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
เชื้อเพลิงชีวมวล.....	4
เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Pellet).....	7
กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด	8
เชื้อเพลิงแข็ง.....	11
คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพเชื้อเพลิงแข็ง	11
ทฤษฎีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	21

กระบวนการเผาไหม้ชีวมวล	25
เทคโนโลยีเตาชีวมวล	29
สมการพื้นฐานการออกแบบเตาแก๊สชีวมวล	34
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	35
การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	40
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน	41
การตรวจเอกสาร	43
บทที่ 3 อุปกรณ์และการดำเนินการวิจัย	52
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	52
เชื้อเพลิงชีวมวลและการเตรียมเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ	62
วิธีการดำเนินการวิจัย	67
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	76
การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด	76
รายละเอียดการคำนวณการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด	80
การสร้างระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด	84
การวิจารณ์ผลการทดลอง	88
4.1 ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	88
4.2 อัตราการป้อนแก๊สที่เผาไหม้ร่วมกับอากาศ (EGRA)	99
4.3 มลพิษไอเสียของเตาชีวมวล (Biomass stove emission)	103
4.4 การสมดุลมวลและพลังงาน (Mass and Energy balance)	105
4.5 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน	109
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	113
สรุปผลการวิจัย	113
ข้อเสนอแนะ	114

ภาคผนวก ก แบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	115
ภาคผนวก ข การคำนวณและผลการทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	128
ภาคผนวก ค เผยแพร่ผลงานวิจัย	149
บรรณานุกรม.....	175
ประวัติผู้วิจัย.....	180



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทย.....	6
ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของอเมริกาและยุโรป	10
ตารางที่ 3 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ต้องการสำหรับประเทศไทย	10
ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเศษไม้และเศษไม้อัดเม็ด.....	18
ตารางที่ 5 ลักษณะสมบัติแนะนำในการเผาไหม้ของเศษไม้.....	19
ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีฟางข้าวอัดเม็ด	20
ตารางที่ 7 สมบัติของเชื้อเพลิงแบบแยกธาตุของชีวมวลที่ได้จากผลิตผลทางการเกษตร	22
ตารางที่ 8 คุณสมบัติของอากาศสำหรับการเผาไหม้.....	35
ตารางที่ 9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	51
ตารางที่ 10 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดในสภาวะต่าง ๆ.....	54
ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของขี้ข้าวโพดอัดเม็ด	63
ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของขี้ข้าวโพดอัดเม็ด	64
ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของเศษไม้อัดเม็ด.....	65
ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุเศษไม้อัดเม็ด	66
ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของฟางข้าวอัดเม็ด	67
ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของฟางข้าวอัดเม็ด.....	67
ตารางที่ 17 สรุปขั้นตอนการทดสอบของเตาแต่ละชนิด	74
ตารางที่ 18 การใช้งานเตาชีวมวลตามความต้องการ	76
ตารางที่ 19 เงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	77
ตารางที่ 20 สรุปขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด	83
ตารางที่ 21 สรุปสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากชีวมวล.....	98

ตารางที่ 22	เงื่อนไขการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้แก๊สหุงต้ม	110
ตารางที่ 23	เงื่อนไขการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	111
ตารางที่ 24	การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเทียบกับเตาหุงต้ม	111
ตารางที่ 25	การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลที่ป้อน EGRA 10%.....	112
ตารางที่ 26	สรุปการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	112
ตารางที่ 27	เงื่อนไขคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	134
ตารางที่ 28	เงื่อนไขการคำนวณมวลของระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	135
ตารางที่ 29	การคำนวณสมดุลโดยมวลของแก๊สผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ขี้ขี้ข้าวโพดอัดเม็ด.....	137
ตารางที่ 30	สรุปผลการคำนวณสมดุลมวลของระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	137
ตารางที่ 31	เงื่อนไขการคำนวณพลังงานขาเข้าระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	138
ตารางที่ 32	เงื่อนไขการคำนวณพลังงานขาออกระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	139
ตารางที่ 33	สรุปผลการคำนวณพลังงานขาออกระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	141
ตารางที่ 34	สรุปผลการคำนวณสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	143
ตารางที่ 35	สรุปผลการทดสอบอุณหภูมิเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงโดยใช้เชื้อเพลิงขี้ข้าวโพด.....	143
ตารางที่ 36	ผลการทดสอบอุณหภูมิเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงโดยใช้เชื้อเพลิงเศษไม้	144
ตารางที่ 37	ผลการทดสอบอุณหภูมิเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงโดยใช้เชื้อเพลิงฟางข้าว.....	145
ตารางที่ 38	เงื่อนไขการคำนวณเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้แก๊สหุงต้ม	145
ตารางที่ 39	เงื่อนไขการคำนวณเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด	146
ตารางที่ 40	การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้ขี้ข้าวโพด	147
ตารางที่ 41	การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้เศษไม้.....	148
ตารางที่ 42	การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้ฟางข้าว	148

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 เป้าหมายแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก.....	1
ภาพที่ 2 การจำแนกแหล่งพลังงานชีวมวล.....	5
ภาพที่ 3 เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk Palletizing press).....	8
ภาพที่ 4 เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Ring Palletizing press).....	8
ภาพที่ 5 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด.....	9
ภาพที่ 6 เชื้อเพลิงแข็ง.....	11
ภาพที่ 7 แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล.....	13
ภาพที่ 8 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ.....	14
ภาพที่ 9 อุปกรณ์พื้นฐานของบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter).....	15
ภาพที่ 10 (ก) ชังข้าวโพด (Corn cobs) (ข) ชังข้าวโพดอัดเม็ด (Corn cob pellet).....	17
ภาพที่ 11 (ก) เศษไม้ (Wood) (ข) เศษไม้อัดเม็ด (Wood pellet).....	18
ภาพที่ 12 (ก) ฟางข้าว (rice straw) (ข) ฟางข้าวอัดเม็ด (straw pellet).....	20
ภาพที่ 13 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	23
ภาพที่ 14 กลไกการเผาไหม้ชีวมวลและชั้นอุณหภูมิ.....	26
ภาพที่ 15 เครื่องผลิตโปรติวเซอร์แก๊สแบบ Up-draft, Cross-draft และ Down-draft.....	28
ภาพที่ 16 เตาอั้งโล่.....	29
ภาพที่ 17 เตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง หรือเตาซูปเปอร์อั้งโล่.....	30
ภาพที่ 18 เตาแก๊สชีวมวลแบบใช้เชื้อเพลิงกลบ.....	31
ภาพที่ 19 เตาหุงต้มเชื้อเพลิงกลบ.....	31
ภาพที่ 20 เตาชีวมวลแบบใช้ฟืน.....	32
ภาพที่ 21 เตาชีวมวลแบบไหลลงร่วมกับการเผาไหม้ตรง.....	33

ภาพที่ 22 เตาแก๊สชีวมวลกรุห้องเผาไหม้ประสิทธิภาพสูง	34
ภาพที่ 23 สมดุลมวลของกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์	36
ภาพที่ 24 สมดุลมวลของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	37
ภาพที่ 25 แบบเตาแก๊สซีไฟเออร์	43
ภาพที่ 26 เตาแก๊สซีไฟเออร์ควบคู่กับเตาชีวมวลระดับครัวเรือน	44
ภาพที่ 27 ลักษณะเตา และส่วนของท่อเผาไหม้	45
ภาพที่ 28 เตาแก๊สชีวมวลใช้วัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง	46
ภาพที่ 29 เตาชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนมาใช้ในการงานของวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์	48
ภาพที่ 30 เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง	49
ภาพที่ 31 เตาชีวมวลแบบ Inverted downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง	49
ภาพที่ 32 เตาชีวมวลแบบใช้ฟืน ขนาด 5 kW	50
ภาพที่ 33 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงแบบดั้งเดิม	53
ภาพที่ 34 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	57
ภาพที่ 35 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger)	58
ภาพที่ 36 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์	58
ภาพที่ 37 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล	59
ภาพที่ 38 พัดลมป้อนอากาศ	59
ภาพที่ 39 พัดลมดูดแก๊ส	60
ภาพที่ 40 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด	61
ภาพที่ 41 แคลมป์มิเตอร์	61
ภาพที่ 42 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบาย	62
ภาพที่ 43 ชั่งข้าวโพดอัดเม็ด	63
ภาพที่ 44 เศษไม้อัดเม็ด	65
ภาพที่ 45 ฟางข้าวอัดเม็ด	66

ภาพที่ 46 ขั้นตอนการดำเนินการงานวิจัย	69
ภาพที่ 47 วิธีการและขั้นตอนการทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด	73
ภาพที่ 48 ไดอะแกรมการออกแบบเตาชีวมวล	79
ภาพที่ 49 โครงสร้างเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	84
ภาพที่ 50 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	84
ภาพที่ 51 ลักษณะห้องเผาไหม้เตาชีวมวล	85
ภาพที่ 52 ระบบเติมอากาศและระบบดูดแก๊สของเตาชีวมวล	86
ภาพที่ 53 ฮีตแลกเปลี่ยนสำหรับเก็บและพักเชื้อเพลิงก่อนปล่อยเข้าสู่เตา	86
ภาพที่ 54 ระบบป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องด้วยสกรูลำเลียงของเตาชีวมวล	87
ภาพที่ 55 ฉนวนกันความร้อนจากวัสดุธรรมชาติ	87
ภาพที่ 56 การประกอบและติดตั้งเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด	88
ภาพที่ 57 แสดงผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	90
ภาพที่ 58 ผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	90
ภาพที่ 59 แสดงผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล	91
ภาพที่ 60 ผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือด	92
ภาพที่ 61 การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	93
ภาพที่ 62 การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	93
ภาพที่ 63 ผลของการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน	94
ภาพที่ 64 ผลของการปรับอัตราการป้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือด	95
ภาพที่ 65 ผลของชนิดเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	96
ภาพที่ 66 ผลของชนิดเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	96
ภาพที่ 67 ผลของชนิดเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน	97
ภาพที่ 68 แสดงผลของชนิดเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือด	98
ภาพที่ 69 การปรับอัตราการป้อน EGRA ที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	100

ภาพที่ 70 การปรับอัตราการป้อน EGRA ที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ.....	100
ภาพที่ 71 การปรับอัตราการป้อน EGRA ที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน	101
ภาพที่ 72 การปรับอัตราการป้อน EGRA ของซังข้าวโพดที่มีผลอุณหภูมิน้ำเดือด.....	102
ภาพที่ 73 การปรับอัตราการป้อน EGRA ของเศษไม้ที่มีผลอุณหภูมิน้ำเดือด.....	102
ภาพที่ 74 การปรับอัตราการป้อน EGRA ของฟางข้าวที่มีผลอุณหภูมิน้ำเดือด	103
ภาพที่ 75 ผลการศึกษาแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ของเตาชีวมวล.....	104
ภาพที่ 76 ผลการศึกษาแก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) ของเตาชีวมวล.....	105
ภาพที่ 77 ผลการศึกษาแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂) ของเตาชีวมวล.....	105
ภาพที่ 78 การสมดุลมวลของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด	106
ภาพที่ 79 การสมดุลพลังงานของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด.....	106
ภาพที่ 80 การสมดุลมวลของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้.....	107
ภาพที่ 81 การสมดุลพลังงานของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้	107
ภาพที่ 82 การสมดุลมวลของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงฟางข้าว	108
ภาพที่ 83 การสมดุลพลังงานของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงฟางข้าว	108
ภาพที่ 84 การประเมินต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อน.....	109

สารบัญภาพภาคผนวก

	หน้า
ภาพผนวกที่ 1 แบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	116
ภาพผนวกที่ 2 ส่วนประกอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	117
ภาพผนวกที่ 3 ภาพด้านข้าง-หน้า เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	118
ภาพผนวกที่ 4 ภาพด้านหน้า-หลัง เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	119
ภาพผนวกที่ 5 ภาพด้านบน-ล่าง เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	120
ภาพผนวกที่ 6 ภาพ Isometric ห้องเผาไหม้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	121
ภาพผนวกที่ 7 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	122
ภาพผนวกที่ 8 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	123
ภาพผนวกที่ 9 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	124
ภาพผนวกที่ 10 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	125
ภาพผนวกที่ 11 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง	126
ภาพผนวกที่ 12 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	127

สัญลักษณ์และตัวห้อย

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	พื้นที่	m ²
A	น้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ	g
B	น้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ	g
C _p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	kJ/kg·K
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
h	ค่าความร้อนแฝง	kJ/kg
H	ความสูง	m
HHV	ค่าความร้อนสูงของแก๊สเชื้อเพลิง	MJ/kg
LHV	ค่าความร้อนต่ำของแก๊สเชื้อเพลิง	MJ/kg
i	ดอกเปีย	%
m	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้	kg
$\dot{m}$	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	kg/h
n	อายุ	y
P	กำลังการผลิตไฟฟ้า	kWh
q	อัตราการไหล	m ³ /h
Q	ปริมาณความร้อน	KJ
SEC	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	MJ/kWh
SFC	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	kg/kWh
t	ระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิง	h
T	อุณหภูมิ	°C
v	ความเร็ว	m/s
V	ปริมาตร	m ³
W	น้ำหนัก	kg

ตัวย่อ	ความหมาย
A/F	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
C	คาร์บอน
CO	คาร์บอนมอนอกไซด์
CO ₂	คาร์บอนไดออกไซด์
EGRA	Exhaust Gas Recirculation with Air
ER	Equivalence Ratio
FC	คาร์บอนคงที่
H	ไฮโดรเจน
H ₂ O	น้ำ
IRR	อัตราผลตอบแทนภายใน
M	ความชื้น
N	ไนโตรเจน
NPV	ผลตอบแทนสุทธิ
O	ออกซิเจน
PA	primary air
PB	ระยะเวลาคืนทุน
S	ซัลเฟอร์
SA	secondary air
VM	สารระเหย
wt	น้ำหนักโดยมวล

อักษรกรีก	ความหมาย	หน่วย
η	ประสิทธิภาพ	%
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
ϕ	อัตราส่วนสมมูล	
ϵ	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี	

ตัวห้อย	ความหมาย
air	อากาศ
ab	อากาศแวดล้อม
ash	ขี้เถ้า
Actual	จริง
c	การพาความร้อน
E	แก๊สไอเสีย
fuel	เชื้อเพลิง
gas	แก๊สชีวมวล
in	เข้าระบบ
loss	การสูญเสียพลังงาน
out	ออกจากระบบ
r	การแผ่รังสี
s	ผลรวม
thermal	ความร้อน
theory	ทฤษฎี
U	ใช้ประโยชน์
WS	ผนังและปล่องไอเสีย

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันเชื้อเพลิงพลังงานจากฟอสซิล เช่น น้ำมันดิบ แก๊สธรรมชาติ และถ่านหิน มีปริมาณลดลงและมีแนวโน้มที่จะหมดลง จากการสำรวจเผยว่าน้ำมันดิบจะหมดลงในอีก 30 ปี (กุลนันท์ คันธิก, 2553) เนื่องจากเชื้อเพลิงเป็นแหล่งพลังงานที่มีความสำคัญและมีอิทธิพลต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและต่อไปในอนาคต การเพิ่มขึ้นของประชากรส่งผลให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามอย่างรวดเร็วซึ่งสวนทางกับปริมาณการผลิตเชื้อเพลิงพลังงานของประเทศ (สมมาส แก้วล้วน และคณะ, 2556) โดยน้ำมันดิบเป็นพลังงานที่มีการใช้มากที่สุดคิดเป็น 50.6% รองลงมาเป็นถ่านหิน 7.8% และแก๊สธรรมชาติ 6.5% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานคิดเป็นร้อยละ 99.9% ของการนำเข้าพลังงานทั้งหมด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562) ผลจากการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ส่งผลให้รัฐบาลมีนโยบายที่จะส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น โดยมีการกำหนดวางแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของปี พ.ศ. 2561-2580 (AEDP2018) มีการปรับเป้าหมายให้สูงขึ้นจากแผน AEDP2015 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนในปี 2559-2579 โดยกำหนดแผนการใช้พลังงานทดแทนในสัดส่วน 30% ของการใช้พลังงานทั้งหมดในปี 2580 โดยเน้นสาระสำคัญประกอบด้วย 3 สัดส่วน คือไฟฟ้า 4.2% เพิ่มขึ้นเป็น 8.56% ภาควความร้อน 19.15% เพิ่มขึ้นเป็น 21.12% ขณะที่สัดส่วนเชื้อเพลิงชีวภาพจาก 6.65% ปรับลดลงเหลือ 3.04% รวมทั้งหมดเป็น 30.02%

แผนพัฒนาพลังงานทดแทน พลังงานทดแทนเพื่อผลิตไฟฟ้า	แผน AEDP2015		แผน AEDP2018		ผลต่าง 2018-2015
	เป้าหมาย*	ดำเนินการแล้ว	แผนพัฒนาตาม PDP2018	รวมเป้าหมาย	
พลังงานแสงอาทิตย์ (MW)	6,000	2,849	12,725	15,574	9,574
ชีวมวล (MW)	5,570	2,290	3,496	5,786	216
พลังงานลม (MW)	3,002	1,504	1,485	2,989	- 13
ก๊าซชีวภาพ (น้ำเสีย/ของเสีย) (MW)	600	382	546	928	328
ขยะชุมชน (MW)	500	500	400	900	400
ขยะอุตสาหกรรม (MW)	50	31	44	75	25
พลังงานขนาดเล็ก (MW)	376	188	-	188	- 188
พลังงานขนาดใหญ่ (กฟผ.) (MW)	2,906	2,918	-	2,918	12
ก๊าซชีวภาพ (พืชพลังงาน) (MW)	680	-	-	-	- 680
รวม (MW)	19,684	10,662	18,696	29,358	9,674
ผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน : AE (%)	20%	10%	20%	33%	13%

ภาพที่ 1 เป้าหมายแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562

เนื่องจากแก๊สหุงต้มมีความจำเป็นต่อการครองชีพของประชาชน ส่วนใหญ่การปรุงอาหารโดยใช้แก๊สหุงต้มช่วยให้เกิดความสะอาดสบายและประหยัดเวลาขึ้นจากเดิม ทำให้แก๊สหุงต้มกลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับทุกครัวเรือน โดยเฉพาะในแหล่งที่มีความเจริญ ทำให้มีการนำเข้าแก๊สหุงต้มในปริมาณที่สูงขึ้นตามเศรษฐกิจของประเทศ โดยได้จากแหล่งก๊าซธรรมชาติในประเทศ 55% จากโรงกลั่นน้ำมันในประเทศ 23% และจากการนำเข้า 22% ส่งผลให้ราคาแก๊สหุงต้มในประเทศไทย มีราคาค่อนข้างสูงเฉลี่ยถึงละ 365 บาท (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2562) จึงส่งผลกระทบต่อในเรื่องของต้นทุนการผลิต และชีวิตความเป็นอยู่ที่ยากลำบากขึ้นของคนในชุมชน เพราะส่วนใหญ่จะใช้แก๊สหุงต้มในการประกอบอาหาร และผลของราคาที่เพิ่มขึ้นของแก๊สหุงต้ม จึงต้องมีการแสวงหาเชื้อเพลิงที่จะนำมาใช้ทดแทนแก๊สหุงต้มเพื่อลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือน ที่ผ่านมามีการนำเข้าเอทิลแอลกอฮอล์เป็นเชื้อเพลิงในภาคครัวเรือนมีการส่งเสริมและพัฒนาให้นำมาใช้ งาน เนื่องด้วยอาชีพของคนไทยส่วนใหญ่เป็นอาชีพเกษตรกรรม ซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยวจะมีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในชุมชนปริมาณค่อนข้างสูง มีลักษณะกระจายอยู่ตามพื้นที่ในชุมชน เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด เศษไม้ ทะลายปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น โดยที่ผ่านมามีเกษตรกรในชุมชนมีการกำจัดเศษวัสดุเหลือทิ้งทางหลายรูปแบบ เช่น การทำปุ๋ย และการเผาทำลายส่วนหนึ่ง ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ เกิดปัญหาหมอกควัน ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคนในชุมชน ดังนั้นการส่งเสริมการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจึงเป็นอีกช่องทางหนึ่ง ที่รัฐบาลพยายามส่งเสริมให้มีการใช้งานเพิ่มขึ้นทั้งภาคครัวเรือนและภาคอุตสาหกรรมตามนโยบายไทยแลนด์ 4.0 (พิสมัย เสถียรยานนท์, 2558) แต่การจะนำเชื้อเพลิงเหล่านี้นี้มาใช้จำเป็นต้องมีการออกแบบเทคโนโลยีเตาชีวมวลให้รองรับกับเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในชุมชนด้วย

การใช้ประโยชน์จากเตาสำหรับหุงต้มในประเทศไทย แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ เตาแก๊สหุงต้มกับเตาชีวมวล โดยถ้าเทียบสัดส่วนการใช้งาน ส่วนใหญ่จะใช้เตาแก๊สหุงต้มเป็นหลัก ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพเตาชีวมวลโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพทางความร้อนอยู่ในช่วง 10-15% ในขณะที่เตาแก๊สหุงต้มมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 45-48% (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2546) ด้านข้อจำกัดในเรื่องประสิทธิภาพทางความร้อนที่ต่ำและการรองรับเชื้อเพลิงที่มีการส่งเสริมจากรัฐบาลให้มีการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดในอนาคต จึงจะต้องมีการออกแบบเตาชนิดใหม่ ให้มีความเหมาะสม รองรับการใช้งานเชื้อเพลิงเหล่านี้ และให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่สูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงให้ความสนใจในการออกแบบ และพัฒนาเตาชีวมวลรูปแบบใหม่ ที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงกว่าเตาชีวมวลแบบเดิม การออกแบบเน้นการออกแบบเพื่อใช้กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิง และการออกแบบห้องเผาไหม้ เพื่อรองรับการใช้งานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในสภาวะการทำงานที่เหมาะสม การศึกษาการป้อนปริมาณอากาศ การนำเข้าแก๊สบางส่วนกลับมาเผาไหม้เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพและลดมลพิษทางอากาศ ซึ่งการศึกษาดังกล่าวนำไปสู่การได้เทคโนโลยีเตาชีวมวลในระดับครัวเรือนที่สูงขึ้น เหมาะสมกับชุมชนและเป็นประโยชน์ต่อแผนการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทยที่สุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ที่สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในระดับครัวเรือน
2. เพื่อศึกษาตัวแปรและประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง และมลพิษไอเสีย
3. เพื่อศึกษาและประเมินต้นทุน และเศรษฐศาสตร์ การใช้เตาชีวมวลในระดับครัวเรือนของชุมชน

ขอบเขตการศึกษา

1. ศึกษาและออกแบบเตาชีวมวลระดับครัวเรือน ที่สามารถผลิตความร้อนได้ในช่วง 10-30 kW
2. ชีวมวลอัดเม็ดที่ใช้ทดสอบมาจาก ฟางข้าว เศษไม้ และซังข้าวโพด
3. ขนาดของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ศึกษามีขนาด 6 mm

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในท้องถิ่น
2. ได้ข้อมูลออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง
3. ได้ข้อมูลด้านสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและคู่มือการใช้งาน
4. ได้ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้งานเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและการตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ จะทำการกล่าวถึงพลังงานชีวมวล เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด เชื้อเพลิงแข็ง การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เทคโนโลยีเตาชีวมวล สมการออกแบบเตาชีวมวล การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน ส่วนการตรวจเอกสารจะนำเสนอในส่วนของการทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง เตาชีวมวลทั่วไปและการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

เชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งกักเก็บพลังงานหมุนเวียนจากพลังงานดวงอาทิตย์ ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสง และเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำได้อีก ในธรรมชาติสามารถนำมาผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิล (Fossil) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจจะหมดลงได้ในอนาคต ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต เช่น พืชและสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบและลักษณะเฉพาะแหล่ง ตามความหลากหลายทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้งาน และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อม ที่สำคัญคือการใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าซึ่งไม่เพิ่มประสิทธิภาพของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ใช้ไปนั้น เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่ เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้น ๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นอย่างมาก นั่นหมายความว่า การใช้ชีวมวลจะสามารถช่วยลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งตรงกันข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคการขนส่งหรือการใช้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า

ชีวมวลประกอบด้วยธาตุหลัก ๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งปริมาณของไนโตรเจน และธาตุอื่น ๆ แหล่งชีวมวลมีอยู่มากมายโดยทั่วไปสามารถจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ ชีวมวลแบบไม้ (woody) แบบไม่ใช่ไม้ (non woody) และของเสียจากสัตว์ ซึ่งมาจากแหล่งที่มาต่าง ๆ ดังภาพที่ 1 (นคร ทิพย์วงศ์, 2552)

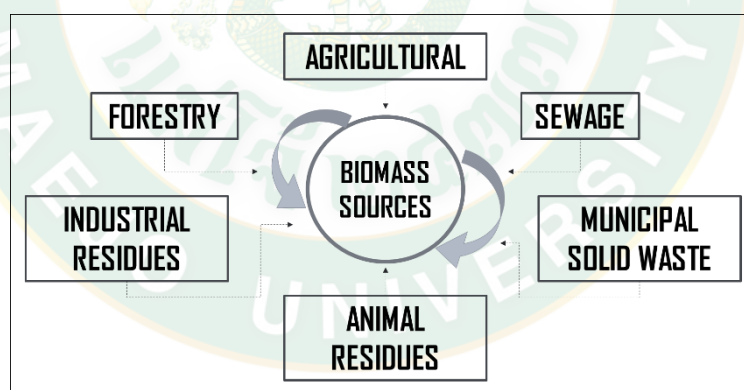
- ผลผลิตจากป่า ไร่ นา สวน ต้นไม้ และพืชต่าง ๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้ กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก จากส่วนเมล็ด เปลือก ผล และจากมวลสาหร่าย พืชน้ำ เป็นต้น

- ผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน แกลบ ฟาง ชังข้าวโพด เป็นต้น

- เศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการและการประกอบการของภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เลื่อย กลีเซอรีน สำเหล้า กากอาหาร รวมไปถึงของเสียจากโรงงานแปรรูป ของเสียประเภทพลาสติก และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม

- ของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน

- ผลิตภัณฑ์และของเสียจากสัตว์ เช่น ไขมัน มูลสัตว์ เป็นต้น



ภาพที่ 2 การจำแนกแหล่งพลังงานชีวมวล

แหล่งพลังงานชีวมวลปฐมภูมิที่ชัดเจน ได้แก่ ไม้ฟืน ซึ่งมีความสะดวกในการใช้และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะชนบท แหล่งที่มาของไม้ฟืนเหล่านี้หาได้ตามป่าไม้ พื้นที่ป่ากร้าง ป่าปลูก และต้นไม้ตามห้วยไร่ปลายนา ซึ่งจะเป็นส่วนลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ เป็นต้น (นคร ทิพย์วงศ์, 2552) ส่วนชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิ ได้แก่ เศษกากจากกระบวนการในโรงงาน ชีวมวลจากสัตว์เลี้ยง หรือจากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแปลงสภาพ

มาแล้ว ซึ่งปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผัน และขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ดังตารางที่ 1 แสดงศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทยของข้าว อ้อย ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน ถั่ว ยางพารา มะพร้าว และมะม่วงหิมพานต์ โดยพบว่าชีวมวลจากข้าวให้ปริมาณชีวมวลเหลือทิ้งสูงสุด ถัดมาเป็นชีวมวลจากอ้อย ชังข้าวโพด มันสำปะหลัง และปาล์มน้ำมัน ตามลำดับ ตัวเลขชีวมวลที่เหลือทิ้งทั้งหมดของประเทศไทยเฉลี่ยอยู่ที่ 70,038 ตัน/ปี โดยค่าความร้อนของชีวมวลแต่ละประเภทอยู่ในช่วง 6.57-17.93 MJ/kg ซึ่งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเหล่านี้สามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพได้ทั้งทางด้านเคมีและด้านกายภาพเพื่อผลิตและใช้เป็นพลังงานทดแทนแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิล สำหรับศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้น กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นปริมาณชีวมวล โดยศักยภาพชีวมวลมีค่าเฉลี่ย 562×10^3 TJ ซึ่งสามารถทดแทนน้ำมันดิบได้ 13×10^3 ktoe (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน, 2556)

ตารางที่ 1 ศักยภาพเชื้อเพลิงชีวมวลในประเทศไทย

ชนิดพืช	ชนิดชีวมวล	ค่าความชื้น (%)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
1. ข้าว	1. ฟางข้าว	10	12.33
	2. แกลบ	12	13.52
2. อ้อย	3. ใบและยอดอ้อย	9.2	15.48
	4. ชานอ้อย	50.73	7.37
3. ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	5. ยอด ใบ และลำต้น	42	9.83
	6. ชังข้าวโพด	40	9.62
4. มันสำปะหลัง	7. เหง้ามันสำปะหลัง	40	5.49
	8. กากมันสำปะหลัง	59.4	1.47
	9. เปลือกมันสำปะหลัง	59.4	1.49
5. ปาล์มน้ำมัน	10. ลำต้นปาล์มน้ำมัน	48.40	7.54
	11. ใบและทางปาล์ม	78	1.76
	12. ทะลายปาล์มเปล่า	58.60	7.24
	13. เส้นใยปาล์ม	38.50	11.40
	14. กะลาปาล์ม	12	16.90

6. ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง	15. ยอด ใบและลำต้น	10.93	16.23
7. ยางพารา	16. ดอก ราก และกิ่งก้าน	55	6.57
	17. เปลือกไม้ยางพารา	55	6.57
	18. ปีกไม้ยางพารา	55	6.57
	19. ชี้น้อยและเศษไม้	55	6.57
8. มะพร้าว	20. จั่นและทะลาย	12	15.4
	21. เปลือกและกาบ	12	16.23
	22. กะลามะพร้าว	12	17.93
9. มะม่วงหิมพานต์	23. เปลือก	6.6	5.49

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน, (2556)

เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด (Pellet)

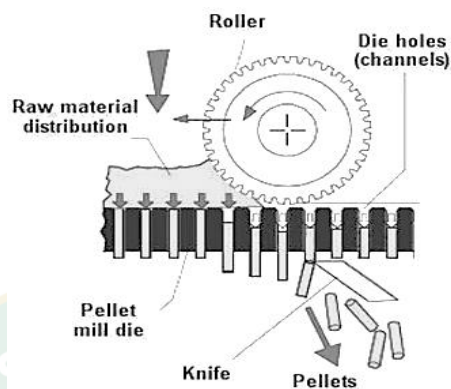
การใช้ประโยชน์จากชีวมวล หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนั้นค่อนข้างทำได้ยาก เนื่องจากชีวมวลมีคุณสมบัติและลักษณะที่มีความหลากหลาย โดยเฉพาะปัญหาด้านคุณสมบัติความหนาแน่นของชีวมวลที่มีค่าค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์จึงจำเป็นต้องนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่น (densification) และการอัดเม็ดเชื้อเพลิงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มความหนาแน่นให้กับเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากได้รับความสนใจและมีต้นทุนที่ต่ำ (อิทธิพงษ์ โสภกุล, 2558)

เชื้อเพลิงอัดเม็ด คือเชื้อเพลิงที่ถูกแปรรูปมาจากการอัดเม็ดชีวมวลให้มีลักษณะเป็นแท่งกลมที่มีความหนาแน่นสูง ทำให้ได้เชื้อเพลิงที่มีปริมาตรต่ำและมีปริมาณพลังงานความร้อนสูงขึ้น เชื้อเพลิงอัดเม็ดสะดวกในการจัดเก็บ การขนส่ง ง่ายต่อการนำไปใช้แปลงเป็นพลังงาน และยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับทรัพยากรธรรมชาติ การใช้ประโยชน์จากชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่การให้ความร้อนที่ฟักอาศัยในประเทศเขตหนาว และใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าหรืออุตสาหกรรมต่าง ๆ (ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก, 2558)

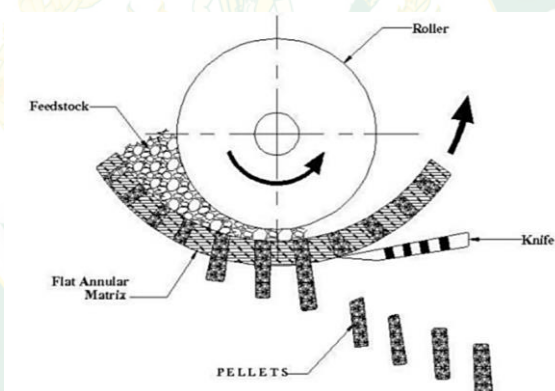
1. การอัดเม็ดชีวมวล

เครื่องอัดเม็ด (Pelletizing press) ประกอบด้วยแม่พิมพ์และลูกกลิ้ง ซึ่งแรงอัดระหว่างแม่พิมพ์กับลูกกลิ้งทำให้เกิดความร้อนจากแรงเสียดสี โดยทำการอัดวัตถุดิบผ่านแม่พิมพ์ที่เจาะเป็นรู ซึ่งมี 2 แบบ คือเครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk matrix press) และเครื่องอัดแม่พิมพ์วงแหวน (Ring matrix press) แท่งเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ถูกอัดออกมาแล้วจะถูกตัดด้วยใบมีดตามขนาดและความ

ยาวที่กำหนดไว้ ซึ่งปกติจะมีความยาวน้อยกว่า 30 mm และมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-15 mm ถ้าแท่งอัดมีขนาดใหญ่กว่านี้ จะใช้การอัดเป็นลูกบาศก์แทนการอัดเม็ดแบบเดิม (ทองทิพย์ พูลเกษม, 2552)



ภาพที่ 3 เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลม (Disk Palletizing press)



ภาพที่ 4 เครื่องอัดแบบแม่พิมพ์วงแหวน (Ring Palletizing press)

กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

1. กระบวนการย่อย (crushing process) เป็นกระบวนการบดย่อยวัตถุดิบที่ยังมีขนาดไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตต้องนำมาลดขนาดก่อน เช่น เศษไม้ ปีกไม้ เปลือกไม้ ฟางข้าว ใบอ้อย หญ้า เป็นต้น โดยเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการย่อยมีหลายประเภท เช่น shredder, crusher, hammer mill เป็นต้น
2. กระบวนการลดความชื้น (drying process) เป็นกระบวนการในการลดความชื้นเพื่อให้วัตถุดิบมีความชื้นที่เหมาะสมกับกระบวนการอัด เครื่องจักรที่ใช้คือ rotary drum dryer

3. กระบวนการผสม (mixing process) เป็นกระบวนการในการผสมวัตถุดิบที่ใช้ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เพื่อให้เข้ากัน

4. กระบวนการอัด (pelleting process) เป็นกระบวนการขึ้นรูปวัตถุดิบให้เป็นเม็ด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-10 mm ความยาว 3-6 cm หรือตามความต้องการ โดยเครื่องจักรที่ใช้มีอยู่หลายประเภท เช่น flat die pellet mill, ring die pellet mill, vertical ring die pellet mill เป็นต้น

5. กระบวนการระบายความร้อน (cooling process) เป็นกระบวนการระบายความร้อนให้กับเชื้อเพลิงชีวมวลที่ขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วให้เย็นตัวลง และคงรูปของเชื้อเพลิง

6. กระบวนการบรรจุ (packing process) เป็นกระบวนการบรรจุชีวมวลอัดเม็ดในถุงตามขนาดและตามความต้องการของลูกค้า



ภาพที่ 5 เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

2. มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด

สำหรับในประเทศไทยได้มีการศึกษากำหนดมาตรฐานของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดเพื่อจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยสำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานเมื่อปี พ.ศ. 2555 โดยในมาตรฐานผลิตภัณฑ์ฯ ได้สรุปคุณลักษณะที่ต้องการของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสำหรับประเทศดังแสดงในตารางที่ 2 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)

สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยสถาบัน Pellet Fuels Institute (PFI) โดยมาตรฐานได้แบ่งเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดไว้ 3 เกรด คือ

เกรดพรีเมียม เกรดมาตรฐาน และเกรดใช้งานทั่วไป คุณสมบัติที่แตกต่างของแต่ละเกรดคือช่วงของค่าความหนาแน่น เเปอร์เซ็นต์เถ้า และความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด แต่สำหรับประเทศในเอเชียจะใช้มาตรฐานของยุโรป EN 14961 และ ENplus และมาตรฐานอเมริกา (PFI) (มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2555)

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ดของอเมริกาและยุโรป

คุณสมบัติเชื้อเพลิง	มาตรฐาน PFI Standard	มาตรฐาน EN 14961-1
Bulk Density (kg/m^3)	609 - 737	≥ 600
Diameter (mm)	5.84 - 7.25	6 - 12
Pellet Durability Index (%)	95.0	≥ 95.0
Fines (%)	≤ 1.0	≤ 1.0
Inorganic Ash (%)	≤ 2.0	≤ 0.7
Length (%) greater than 1.50 (inches)	≤ 1.0	≤ 5
Moisture (%)	≤ 10.0	≤ 10
Chloride (%)	≤ 300 (ppm)	≤ 0.02 (%wt)
Heating Value (MJ/kg)	As-Rec. $\pm$ 2SD	Minimum value

ตารางที่ 3 คุณลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่ต้องการสำหรับประเทศไทย

คุณสมบัติ	เกรดธรรมดา	เกรดคุณภาพสูง
Bulk Density (kg/m^3)	$\geq 600 \text{ kg/m}^3$	$\geq 600 \text{ kg/m}^3$
Diameter (mm)	$\geq 6 \text{ mm} < 12 \text{ mm}$	$\geq 6 \text{ mm} < 12 \text{ mm}$
Pellet Durability Index (%)	$\geq 95 \text{ %wt}$	$\geq 95 \text{ %wt}$
Dust (%)	$\leq 3 \text{ %wt}$	$\leq 3 \text{ %wt}$
Length (mm)	$\geq 3.15 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$	$\geq 3.15 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$
Length (%) greater than 40 (mm)	$\leq 1 \text{ %wt}$	$\leq 1 \text{ %wt}$
Moisture (%)	$\leq 10 \text{ %wt}$	$\leq 10 \text{ %wt}$
Heating Value (MJ/kg)	$\geq 14.6 \text{ MJ/kg}$	$\geq 16.7 \text{ MJ/kg}$
Ash (%)	$\leq 20 \text{ %wt}$	$\leq 10 \text{ %wt}$
Chlorine (%)	$\leq 0.02 \text{ %wt}$	$\leq 0.02 \text{ %wt}$
Sulfur (%)	$\leq 0.08 \text{ %wt}$	$\leq 0.08 \text{ %wt}$
Nitrogen (%)	$\leq 0.3 \text{ %wt}$	$\leq 0.3 \text{ %wt}$

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555

เชื้อเพลิงแข็ง

เชื้อเพลิงแข็ง หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะที่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิปกติ และธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชนิดนี้ส่วนมากจะประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และเถ้า เมื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในอากาศแล้วจะให้พลังงานความร้อนออกมา โดยปกติเมื่อเกิดเผาไหม้คาร์บอนจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนไฮโดรเจนเมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้น้ำ เชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากธรรมชาติได้แก่ ถ่านหิน หินน้ำมัน ถ่านไม้ และถ่านโค้ก เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555)



ภาพที่ 6 เชื้อเพลิงแข็ง

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพเชื้อเพลิงแข็ง

กรณีของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวมีองค์ประกอบหลักๆ คือ C, H และ S นอกจากนั้นอาจจะมี N และ O ส่วนเชื้อเพลิงแก๊สมีองค์ประกอบพื้นฐานของ C_mH_n (สฟีน จอดนอก และคณะ, 2554) โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติขององค์ประกอบต่าง ๆ ของเชื้อเพลิงแข็ง มีวิธีการวิเคราะห์ที่หลากหลายโดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์ค่าความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิง

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) (ธนาพล ตันติสัตยกุล และคณะ, 2558)

การวิเคราะห์แบบประมาณ เป็นการวิเคราะห์โดยแบ่งกลุ่มองค์ประกอบในเชื้อเพลิงออกเป็น ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

ความชื้น (Moisture, M) คือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงชีวมวล ส่วนมากเชื้อเพลิงชีวมวลจะมีความชื้นสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตที่องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นน้ำ ปริมาณความชื้นที่พบในเชื้อเพลิงชีวมวลขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่นำมาใช้ควรมีความชื้นไม่เกิน 50% เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนในการไล่ความชื้น สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3173 โดยนำเชื้อเพลิงชีวมวลตัวมาให้ความร้อนคงที่ในตู้อบ (Drying Oven) ที่อุณหภูมิ 105 °C เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากเชื้อเพลิงชีวมวล ค่าความชื้นที่ได้สามารถคำนวณจากน้ำหนักของตัวอย่างเชื้อเพลิงที่ลดลงดังแสดงในสมการที่ 1

$$M = \frac{A - B}{A} \times 100$$

สมการที่ 1

เมื่อ	M	คือ ปริมาณความชื้นของชีวมวล (%)
	A	คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ (g)
	B	คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ (g)

สารระเหย (Volatile Matter, VM) คือ แก๊สและทาร์ (Tar) ที่อยู่ในเนื้อเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นตัวกลางที่ทำให้เกิดการติดไฟก่อนที่จะเผาไหม้คาร์บอนซึ่งอยู่ในถ่าน นอกจากนี้ถ่านที่มีปริมาณ Volatile สูงจะทำให้ติดไฟง่ายและลุกไหม้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้ามีปริมาณสารระเหยต่ำจะเกิดการติดไฟยาก และลุกไหม้อย่างช้า ๆ ในส่วนที่ลุกไหม้ง่าย ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณสารระเหยตามมาตรฐาน ASTM D3175 โดยนำตัวอย่างมาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 7 min แล้วนำมาคำนวณหาปริมาณสารระเหยจากการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่าง ดังสมการที่ 2-3

$$M = \frac{A - B}{A} \times 100$$

สมการที่ 2

$$VM (\%) = W (\%) - M (\%)$$

สมการที่ 3

เมื่อ	VM	คือ ปริมาณสารระเหยของชีวมวล (%)
	W	คือ ปริมาณน้ำหนักของชีวมวลที่หายไป (%)

คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon, FC) เป็นสารประกอบของคาร์บอน (Carbonaceous Residue) ที่ไม่รวม ซี้เถ้า (Ash) ที่เหลือจากอินทรีย์วัตถุหลังจากที่สารระเหยถูกไล่ออกไปแล้วสำหรับการวิเคราะห์การหาปริมาณคาร์บอนคงที่ตัวสามารถหาได้จากสมการที่ 4

$$FC = 100 - (\%Ash + \%W + \%VM)$$

สมการที่ 4

เมื่อ FC คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัวของชีวมวล (%)

Ash คือ ปริมาณเถ้าของชีวมวล (%)

ชี้เถ้า คือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ เชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะมีชี้เถ้าประมาณ 1 ถึง 3% ยกเว้น แกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนชี้เถ้าประมาณ 10-20% ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้และกำจัด พอสสมควร แต่ยังคงต้องควบคุม 20 องศาประกอบทางเคมีของปูนเม็ด (Clinker) ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีชี้เถ้ามาก โดยเฉพาะแกลบ วิเคราะห์ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM D3174 โดยนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปเผาให้ความร้อนในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C แล้วค่อย ๆ เพิ่มความร้อนเป็น 700-750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ของถ้วยอลูมิเนียมรวม กับน้ำหนักของเถ้าที่เหลือ จึงนำมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งสามารถคำนวณปริมาณเถ้าได้จากสมการที่ 5

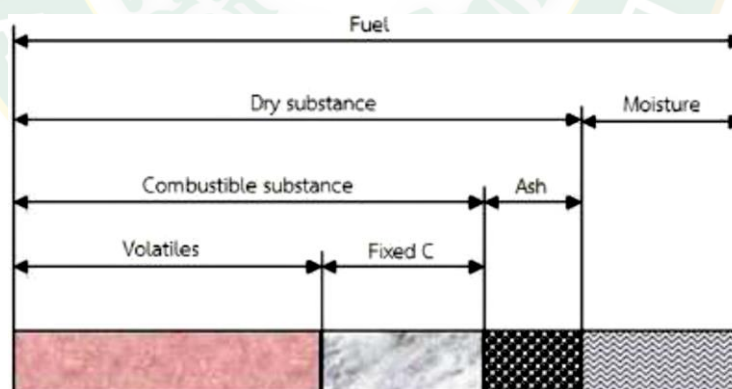
$$Ash = \frac{B}{A} \times 100$$

สมการที่ 5

เมื่อ Ash คือ ปริมาณเถ้าของชีวมวล (%)

A คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนทดสอบ (g)

B คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบ (g)

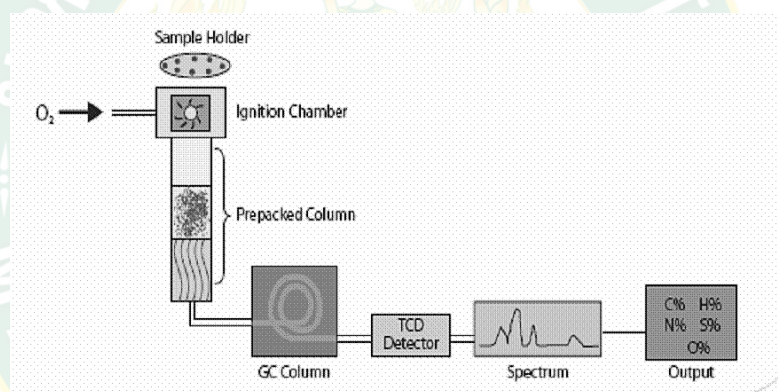


ภาพที่ 7 แสดงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงชีวมวล

ที่มา: บุชบา พฤกษาพันธุ์รัตน์ และคณะ (2555)

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (นคร ทิพยาวงค์, 2553) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่สำคัญในเชื้อเพลิงแข็งได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และ กำมะถัน (S) บางครั้งอาจมีการวิเคราะห์หาธาตุฟอสฟอรัสและคลอรีนด้วย ปริมาณออกซิเจนสามารถหาได้จากผลต่างระหว่าง 100 กับผลรวมของร้อยละธาตุองค์ประกอบทั้งหมดกับร้อยละความชื้นและเถ้า การวิเคราะห์ธาตุทำได้โดยการกลั่นสลายเชื้อเพลิงแข็งในสภาวะออกซิไดซ์อย่างรุนแรง จนกระทั่งกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ แล้วจึงหาปริมาณของออกไซด์ที่เกิด ด้วยวิธีทางเคมีหรือทางกายภาพ โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยเครื่อง CHNS elemental analysis ดังภาพที่ 8 ซึ่งอาศัยหลักการการเผาไหม้ตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงให้กลายเป็นแก๊สผสม โดยชีวมวลตัวอย่างจะต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จึงสามารถวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ของตัวอย่างชีวมวลได้ตามมาตรฐาน ASTM



ภาพที่ 8 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ

ที่มา: Sophisticated Analytical Instrument Facility

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของเชื้อเพลิงแข็ง สามารถหาค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ได้ดังสมการนี้

$$Q = -8419.7 + 479.3C + 667.6H + 58.8O - 1207.7S \quad \text{สมการที่ 6}$$

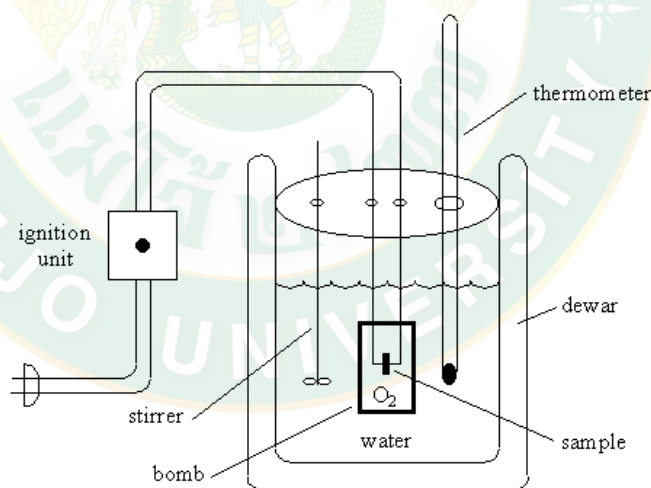
เมื่อ Q คือ ค่าความร้อนสูงสุดต่อ 1 kg (kJ/kg)

C, H, O และ S คือ ชีวมวลแห้งเป็นค่าร้อยละโดยน้ำหนักของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์

3. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว โดยทั่วไปจะใช้ Bomb calorimeter ในการวัด โดย Calorimeter เป็นอุปกรณ์ที่ถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้แก่ น้ำใน calorimeter และวัดค่าความร้อน ของเชื้อเพลิงจากปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากภายใน calorimeter ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ จะเกิดการควบแน่น ค่าความร้อนที่วัดได้จึงเป็นค่าความร้อนสูง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน)

การวิเคราะห์ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง สามารถวิเคราะห์ได้ตามมาตรฐาน ASTM D240 D4809 D2382 IP12 โดยใช้เครื่องทดสอบค่าความร้อนชีวมวล ซึ่งมีอุปกรณ์พื้นฐานดังภาพที่ 9 โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการเตรียมชีวมวลก่อนการทดสอบค่าความร้อน โดยการนำชีวมวลตัวอย่างไปบดและอัดเป็นเม็ดให้ได้น้ำหนักอยู่ในช่วง 0.5-1.0 g จากนั้นนำเม็ดชีวมวลตัวอย่างบรรจุลงไปใน Stainless steel bomb ทำการปิดฝา และอัดแก๊สออกซิเจนแล้วนำไป ใส่ลงในเครื่อง Bomb calorimeter หลังจากนั้นทำการกดปุ่มเริ่มทำงาน เครื่องจะทำงานและวิเคราะห์ค่าความร้อนออกมา ซึ่งเครื่องนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งหน่วย MJ/kg และ หน่วย kcal/kg (เจนจิรา อุตเรือน, 2561)



ภาพที่ 9 อุปกรณ์พื้นฐานของบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter)

ที่มา: สุชาติ พงษ์ศิริตันกุล (2558)

ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จะมีอยู่ 2 แบบคือค่าความร้อนต่ำ (LHV) และค่าความร้อนสูง (HHV)

ความร้อนต่ำ หรือ Lower Heating Value หมายถึง การนำชีวมวลหนัก 1 kg มาหา ค่าความร้อนค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนต่ำ ต่อ kg

ค่าความร้อนสูง หรือ Higher Heating Value หมายถึง การนำชีวมวลหนัก 1 kg มา ลด ความชื้น หรือกักน้ำออกให้หมด จากนั้น นำมาหาค่าความร้อน ค่าที่วัดได้คือ ค่าความร้อนสูงต่อ kg และมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$HHV = LHV + 23.95 (9H + MC)$$

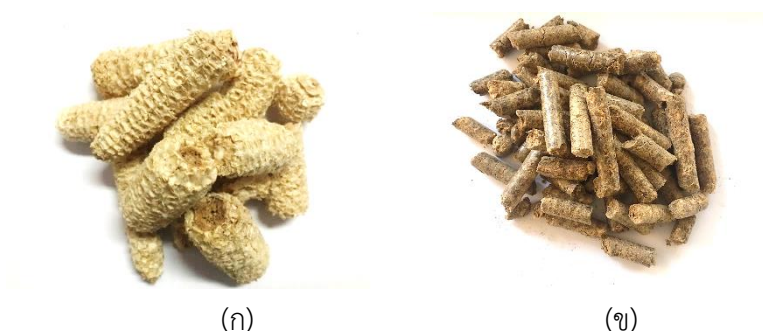
สมการที่ 7

เมื่อ	HHV	คือ ค่าความร้อนสูงของชีวมวล (kJ/kg)
	LHV	คือ ค่าความร้อนต่ำของชีวมวล (kJ/kg)
	H	คือ ปริมาณร้อยละของธาตุไฮโดรเจน

4. คุณสมบัติของซังข้าวโพด

จากข้อมูลสถิติการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศไทย ปี 2558 พบว่า พื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนมักปลูกบนที่ราบเชิงเขาและหุบเขามากถึง 5.05 ล้านไร่ หรือคิดเป็น 67.98% ของประเทศ โดยในแต่ละปีจะมีเศษวัสดุเหลือใช้ประเภท ต้น ตอ ใบ เปลือก และซังข้าวโพด เป็นจำนวนกว่า 3.99 ล้านตัน ที่รอการเผาทำลายในช่วงเดือน มกราคม - มีนาคม ของทุกปี ทำให้เกษตรกรจำเป็นต้องเผาในที่โล่ง เพื่อลดปริมาณและเตรียมพื้นที่สำหรับการเพาะปลูกในฤดูถัดไป (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2018)

จากการประเมินพบว่าประเทศไทยมีปริมาณซังข้าวโพดเหลือทิ้งจำนวน 1,019,654 ตันต่อปี เปลือกข้าวโพดจำนวน 304,782 ตันต่อปีโดยประเมินจากสัดส่วนชีวมวลซังข้าวโพด 20.14% และเปลือกข้าวโพด 6.02% โดยน้ำหนักของต้นข้าวโพด (กิตติกร สาสุจิตต์ และคณะ, 2558) การนำซังข้าวโพดมาแปรรูปเป็นพลังงานถือเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำซังข้าวโพดมาผ่านกระบวนการเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเชื้อเพลิงซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของซังข้าวโพดและซังข้าวโพดอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 5 อีกทั้งเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรและยังเป็นการลดปัญหาด้านการกำจัดเศษวัสดุ



ภาพที่ 10 (ก) ชังข้าวโพด (Corn cobs) (ข) ชังข้าวโพดอัดเม็ด (Corn cob pellet)

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของชังข้าวโพดและชังข้าวโพดอัดเม็ด

องค์ประกอบทางเคมี	ชังข้าวโพด	ชังข้าวโพดอัดเม็ด
Moisture (%)	11.82	8.37
Ash (%)	5.62	13.58
Volatile matter (%)	69.74	65.11
Fixed carbon (%)	12.82	12.94
Lower Heating Value (MJ/kg)	14.26	13.49

ที่มา: ใบบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของชังข้าวโพดจากแลปโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

5. คุณสมบัติของเศษไม้ (Wood)

องค์ประกอบทางเคมีของไม้เป็นคุณสมบัติหนึ่งในการออกแบบการใช้ประโยชน์ของไม้แต่ละชนิด ซึ่งโดยส่วนใหญ่ไม้จะมีการกระจายตัวขององค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดไม้ อายุ ความสูง และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ดังนั้นการจัดกลุ่มพอลิเมอร์ของไม้จึงสามารถจัดกลุ่มได้เป็น 3 ชนิดคือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ส่วนไฮโดรเซลลูโลสจัดเป็นคาร์โบไฮเดรตเช่นเดียวกับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 40-45% และเฮมิเซลลูโลสประมาณ 15-25% ส่วนที่เหลือจะประกอบด้วยน้ำตาลอื่น ๆ เช่น แป้งและเพคติน (ฐิตาภรณ์ ภูมิไชย์ และคณะ, 2555)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 11 (ก) เศษไม้ (Wood) (ข) เศษไม้อัดเม็ด (Wood pellet)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเศษไม้และเศษไม้อัดเม็ด

องค์ประกอบทางเคมี	เศษไม้	เศษไม้อัดเม็ด
Moisture (%)	11.79	8.18
Ash (%)	2.64	1.82
Volatile matter (%)	70.81	73.27
Fixed carbon (%)	14.76	16.73
Lower Heating Value (MJ/kg)	15.92	16.52

ที่มา: ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของเศษไม้จากแลปโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง

การแปรรูปเศษไม้เหลือทิ้งให้เป็นเชื้อเพลิงทางพลังงานทดแทน เป็นอีกวิธีหนึ่งในการนำเศษไม้เหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ โดยปกติการนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์ด้านพลังงานทดแทนสามารถทำได้สองแนวทาง

1. โดยกระบวนการทางชีวภาพ

2. โดยกระบวนการด้านความร้อน พบว่า เศษไม้จากโรงงานแปรรูปไม้และผลิตผลิตภัณฑ์จากไม้มีข้อจำกัดทางองค์ประกอบทางกายภาพและเคมี ประกอบด้วยโมเลกุลของ คาร์บอน ไฮโดรเจน และธาตุต่าง ๆ ไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแปรรูปพลังงานด้วยการใช้กระบวนการทางชีวภาพ ดังนั้น การนำเศษไม้เหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปไม้และผลิตผลิตภัณฑ์จากไม้ไปใช้ประโยชน์ในด้านการแปรรูปให้เป็นพลังงาน จะใช้กระบวนการแปรรูปทางความร้อนเป็นหลัก เช่น เทคโนโลยีการเผาตรง หรือแก๊สซิฟิเคชั่น เศษไม้อาจจะมามีที่มาจากหลายหลายพื้นที่ เช่น เศษไม้เหลือ

ทั้งจากโรงงานอุตสาหกรรม โรงงานฟอนิเจอร์ เครื่องเรือน และอุปกรณ์ที่ทำจากไม้ชิ้นต่าง ๆ ก่อนนำไปเผาไหม้ในเตาควรรคำนึงถึงลักษณะที่สำคัญของเศษไม้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ลักษณะสมบัติแนะนำในการเผาไหม้ของเศษไม้

ตัวแปร	Downdraft	Updraft
ความชื้น (% น้ำหนักเปียก)	12 (สูงไม่เกิน 25)	43 (สูงไม่เกิน 60)
เถ้า (% น้ำหนักแห้ง)	0.5 (สูงไม่เกิน 6)	14 (สูงไม่เกิน 25)
ขนาด (เซนติเมตร)	2-10	0.5-10

ที่มา : กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2557

6. คุณสมบัติของฟางข้าว (rice straw)

ฟางข้าวเป็นผลพลอยได้จากการทำนา ซึ่งในหนึ่งปีประเทศไทยปลูกข้าวประมาณ 61 ล้านไร่ มีฟางข้าวรวมทั้งส่วนที่เป็นตอซังมากกว่า 40 ล้านตัน โดยการทำนาในแต่ละไร่นั้นจะให้ฟางข้าวมากน้อยแตกต่างกันไป (นิติยา รื่นสุข และคณะ, 2551) ฟางข้าวเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เมื่อทำการเก็บเกี่ยวข้าวแล้วเกษตรกรส่วนใหญ่มักจะทำการเผาทำลาย บางส่วนถูกใช้เป็นวัสดุเพาะปลูกและอาหารสัตว์เนื่องจากฟางข้าวมีส่วนประกอบของธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน 0.65-0.70 %, ฟอสฟอรัส 0.08-0.10 %, โพแทสเซียม 1.40-1.60 %, แคลเซียม 0.40 % และ แมกนีเซียม 0.20 % และมีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้ เนื้อเซลล์ 21% ผนังเซลล์ 79% เซลลูโลส 33% เฮมิเซลลูโลส 26% ลิกนิน 7% และซิลิกา 13% (ถนัด รัตนานพวงศ์, 2531)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 12 (ก) ฟางข้าว (rice straw) (ข) ฟางข้าวอัดเม็ด (straw pellet)

ฟางข้าวเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่หาได้ง่ายและมีจำนวนมาก การนำฟางข้าวมาอัดเม็ดเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ถือเป็นการกำจัดของเสีย และสร้างมูลค่าให้แก่เกษตรกร อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมจากการเผาทำลาย การอัดเม็ดช่วยเพิ่มพื้นที่การจัดเก็บและง่ายต่อการขนส่งอีกด้วย

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีฟางข้าวอัดเม็ด

องค์ประกอบทางเคมี	ฟางข้าว	ฟางข้าวอัดเม็ด
Moisture (%)	8.20	6.43
Ash (%)	7.20	11.41
Volatile matter (%)	74.30	71.52
Fixed carbon (%)	10.30	10.64
Lower Heating Value (MJ/kg)	13.81	15.01

ที่มา: ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของฟางข้าวจากแลปมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ทฤษฎีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. ทฤษฎีการเผาไหม้และการคำนวณการเผาไหม้

ในการคำนวณการเผาไหม้จะคำนวณปริมาณต่าง ๆ ต่อปริมาณเชื้อเพลิงหนึ่งหน่วยอย่างไรก็ตามโดยทั่วไป สำหรับเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวจะใช้มวล 1 kg (เขียนตามความนิยมว่า kg-) กรณีของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลว จะแสดงสัดส่วนโดยมวล (kg/kg-) ของคาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ความชื้น และขี้เถ้าในเชื้อเพลิงด้วย C, H, S, O, N, H₂O, Ash ตามลำดับ

$$C + H + S + O + N + H_2O + Ash = 1 \quad \text{สมการที่ 8}$$

สมการที่แสดงความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างก่อนและหลังปฏิกิริยาเผาไหม้เรียกว่า สมการปฏิกิริยาเผาไหม้ สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



ปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้ H₂ และ O₂ จะไม่เปลี่ยนเป็น H₂O ทั้งหมดทันทีแต่จะต้องผ่านปฏิกิริยาพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้เกิด H₂O ด้วยความเร็วค่าหนึ่งและในขณะเดียวกันก็จะเกิดปฏิกิริยาที่ H₂O สลายตัวก่อนกลับกลายเป็น H₂ กับ O₂ อีกด้วย ดังนั้น H₂, O₂ และ H₂O จะยังคงอยู่ด้วยสัดส่วนค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในขณะนั้น (สภาวะสมดุลเคมี) อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ต่อสารตั้งต้นจะมีค่าสูงมาก หากอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ไม่ได้มีอุณหภูมิสูงมากแล้วจะพิจารณาว่าสารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ทั้งหมดก็ได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2546)

2. ปฏิกิริยาเผาไหม้

ปฏิกิริยาเผาไหม้มีลักษณะเด่นคือ เป็นปฏิกิริยาอุณหภูมิสูงและความเร็วสูงที่ประกอบด้วยอะตอมและอนุโมลอิสระรวมทั้งคุณสมบัติของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนทางกลศาสตร์ของก๊าซ กล่าวคือ ปฏิกิริยาการเผาไหม้ทั่วไปหากไม่สนใจกระบวนการระหว่างทางแล้ว ผลลัพธ์สุดท้ายแล้วจะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนใน สถานะก๊าซ เมื่อเริ่มเผาไหม้จะเกิดการกลายเป็นไอก่อน หลังจากนั้นจะทำปฏิกิริยาคายความร้อนในสถานะก๊าซระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับสารออกซิเดชัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2546)

เชื้อเพลิงของแข็งจะประกอบด้วยอะตอมของ C, H, O ฯลฯ ที่ทำพันธะกัน ในรูปแบบต่าง ๆ อะตอมเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับออกซิเจนก่อให้เกิดแสงและความร้อน จากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน สุดท้ายแล้วเชื้อเพลิงจะกลายเป็น CO_2 , H_2O

3. กระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง

รูปแบบการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็งแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน

1. Evaporating combustion เป็นปรากฏการณ์ที่เชื้อเพลิงแข็งที่มีจุดหลอมเหลวค่อนข้างต่ำจะหลอมเหลวก่อนการเผาไหม้ แล้วระเหยในทำนองเดียวกับเชื้อเพลิงเหลว หลังจากนั้นจึงเผาไหม้ ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิระเหยมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อน

2. Decomposing combustion เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิระเหย โดยเมื่อได้รับความร้อนเชื้อเพลิงจะสลายตัวด้วยความร้อน และเมื่อสารระเหยถูกปลดปล่อยออกจากพื้นผิวจะเกิดการเผาไหม้

3. Surface combustion เป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ในถ่านไม้หรือถ่านโค้กซึ่งแทบไม่มีสารระเหยและพบได้ในคาร์บอนคงที่หลังจาก Decomposing combustion โดยออกซิเจนหรือแก๊สที่มีคุณสมบัติออกซิเดชัน (เช่น CO_2) จะแพร่เข้าไปในช่องว่างบนพื้นผิวหรือภายในของแข็งแล้วเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้

4. Smoldering สำหรับสสารที่มีอุณหภูมิสลายตัวด้วยความร้อนต่ำ เช่น กระดาษ หลังจากเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน หากสารระเหยไม่ถูกจุดไฟบางครั้งจะเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวซึ่งทำให้เกิดควันขึ้นเป็นจำนวนมาก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Smoldering สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวมีการดำเนินไปอย่างต่อเนื่องภายใต้ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิติดไฟของสารระเหยถ้าบังคับควันให้ติดไฟ หรือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าจุดติดไฟของควันแล้ว การเผาไหม้จะเปลี่ยนรูปแบบเป็นการเผาไหม้ที่เกิดเปลวไฟ

ตารางที่ 7 สมบัติของเชื้อเพลิงแบบแยกธาตุของชีวมวลที่ได้จากผลผลิตทางการเกษตร

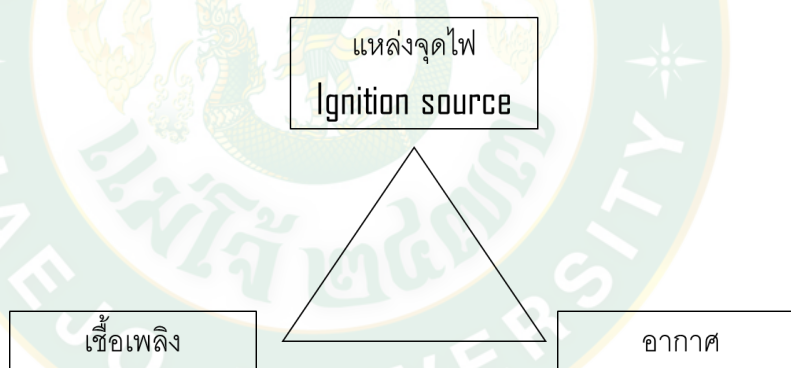
ชนิด	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
ฟางข้าว	38.5	6.1	39.3	0.7	0.2
ขี้ข้าวโพด	46.2	5.8	43.5	1.3	<0.01
ไม้ฟัน	51.8	5.7	40.9	0.1	<0.01
ขี้เลื่อย	50.3	5.7	41.0	0.2	2.7

ที่มา: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (2554)

4. องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีปฏิกิริยาและสภาวะที่เหมาะสม ปฏิกิริยาการเผาไหม้คือปฏิกิริยาการออกซิโดซ์เชื้อเพลิงให้กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจนสมบูรณ์ การเผาไหม้ทั่วไปจะมีตัวปฏิกิริยา คือเชื้อเพลิง (ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่) และอากาศ ซึ่งจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาเมื่อมีสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งก็คือแหล่งให้ความร้อนเพื่อจุดไฟ ดังกราฟสามเหลี่ยมในภาพที่ 13

หลักการในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นโดยการเกิดกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในช่วงเฟสของแข็ง (solid phase) และเฟสของแก๊ส (gas phase) ในกระบวนการไพโรไลซิสสารที่ระเหยได้ในเชื้อเพลิงจะระเหยออกมาจากผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง และผสมกับอากาศรอบ ๆ ทำให้เกิดการเผาไหม้ขึ้นเรียกว่า การเผาไหม้ช่วงแรก (Primary Combustion) หลังจากเผาไหม้ช่วงแรกแล้วยังมีบางส่วนที่ยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์อยู่นั้น เมื่อพบกับอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ต่อ และออกมาเป็นแก๊สเสียในที่สุด



ภาพที่ 13 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

การเริ่มต้นปฏิกิริยาการเผาไหม้ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (สุพิน จอดนอก, 2553) เริ่มต้นด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระก่อน แหล่งจุดไฟจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะจะให้พลังงานส่วนแรกแก่ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระจำนวนมาก พอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ดังภาพที่ 12 เมื่อเริ่มเกิดการเผาไหม้แล้วแหล่งจุดไฟจะไม่จำเป็นอีกต่อไป เพราะหลังจากเกิดการเผาไหม้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนต้นมากเกินพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลือเกิดการแตกตัวและเผาไหม้อย่างต่อเนื่องกันไปจนสมบูรณ์ (Spontaneous reaction)

การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ (Complete combustion) เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างออกซิเจนกับเชื้อเพลิงแล้วให้ผลออกมาเป็นความร้อน โดยทั่วไปความร้อนที่ได้จะคิดเป็นหน่วยน้ำหนักเชื้อเพลิง โดยปกติจะใช้ ออกซิเจนจากอากาศ ซึ่งประกอบด้วยออกซิเจนร้อยละ 21 ไนโตรเจนร้อยละ 79 เชื้อเพลิงส่วนใหญ่จะประกอบด้วยคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) กำมะถัน (S) และไนโตรเจน (N) ในการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะประกอบไปด้วย 3 กระบวนการดังนี้



ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 เรียกว่าสารประกอบเคมี ซึ่งเกิดขึ้นจากการนำธาตุมารวมตัวกันทำให้เกิดเป็นโมเลกุลขึ้น แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวกันระหว่าง 1 อะตอมของคาร์บอนกับ 2 อะตอมของออกซิเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และความร้อน

การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete Combustion) เชื้อเพลิง 1 ส่วนเผาไหม้พอดีกับออกซิเจนจำนวนหนึ่งตามสมการที่ 10-12 แต่ในทางปฏิบัตินั้น การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยปริมาณออกซิเจนที่พอดีเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการสัมผัสของออกซิเจนกับเชื้อเพลิงไม่ทั่วถึงกัน ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) นอกจากออกซิเจนที่มีไม่เพียงพอ ทำให้เผาไหม้สารระเหยไม่หมด ปกติสารระเหยเหล่านี้ยังคงมีความร้อนเหลืออยู่จึงเป็นการสูญเสียเชื้อเพลิงไปกับการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ดังสมการที่ 13



ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องป้อนอากาศให้มากกว่าปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎี (Excess Air) เพื่อให้การเผาไหม้มีโอกาสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในทุก ๆ ส่วนของเชื้อเพลิง อากาศบางส่วนที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จะหลุดออกจากห้องเผาไหม้กลายเป็นส่วนที่สูญเสียดังสมการที่ 14 แสดงการเผาไหม้ที่มีอากาศเกินพอดี



เพื่อให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงสุด ปริมาณอากาศเกินพอดีนี้นับว่าน้อยที่สุดเท่าที่ยังทำให้การเผาไหม้เกิดอย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไปแล้วการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel) จะให้ออกซิเจนเกินพอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 7 - 15

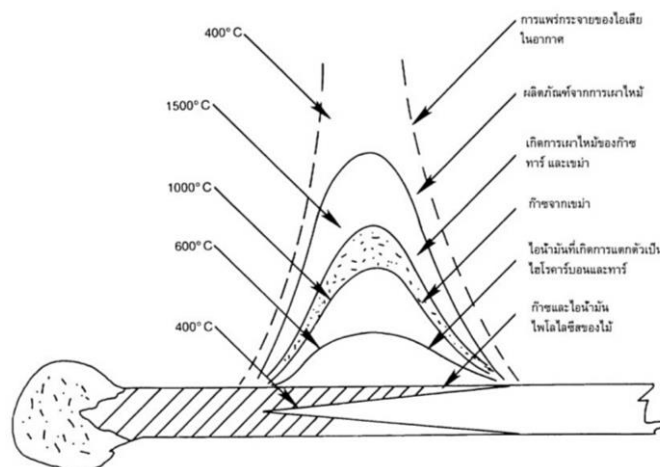
กระบวนการเผาไหม้ชีวมวล

เนื่องจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด ใช้กระบวนการเผาไหม้แบบเผาโดยตรงร่วมกับกระบวนการเผาไหม้แบบแก๊สซิฟิเคชัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้โดยตรงและกระบวนการเผาไหม้แก๊สซิฟิเคชัน

การเผาไหม้ชีวมวลเป็นกระบวนการในการเปลี่ยนรูปชีวมวลเพื่อการใช้ประโยชน์ด้านพลังงานหรือเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและประเภทของชีวมวล โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น 2 กระบวนการ คือการเปลี่ยนรูปทางชีวเคมี (Bio-chemical conversion) และการเปลี่ยนรูปโดยความร้อน (Thermo-chemical conversion) การเปลี่ยนรูปโดยความร้อนเป็นการสลายพันธะเคมีของชีวมวลไปเป็นแหล่งพลังงานที่อยู่ในรูปของแข็ง ของเหลวหรือแก๊ส วิธีการเปลี่ยนรูปโดยความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดหรือประเภทชีวมวล โดยแบ่งการใช้งานได้ 3 วิธี

1. การเผาไหม้โดยตรง

การเผาไหม้ชีวมวลเป็นกระบวนการที่ใช้อากาศเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์, 2558) เกิดจากสารอินทรีย์ของชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยการเผาไหม้โดยตรงนั้นจะเกิดกระบวนการทำให้เชื้อเพลิงแข็งเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นแก๊สก่อนและค่อยเกิดการเผาไหม้แก๊ส ซึ่งจะได้ความร้อนในลักษณะเปลวไฟและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำ โดยสัดส่วนของแก๊ส CO และ CO₂ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพในการเผาไหม้และปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ โดยมีกลไกการเผาไหม้ดังภาพที่ 13 แต่เนื่องจากประสิทธิภาพในการเผาไหม้โดยตรงค่อนข้างต่ำ จึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมาก การใช้เตาเผาแบบฟลูอิดไต์เบดจะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้สูงขึ้น



ภาพที่ 14 กลไกการเผาไหม้ชีวมวลและชั้นอุณหภูมิ

ที่มา: มหาวิทยาลัยบูรพา (2554)

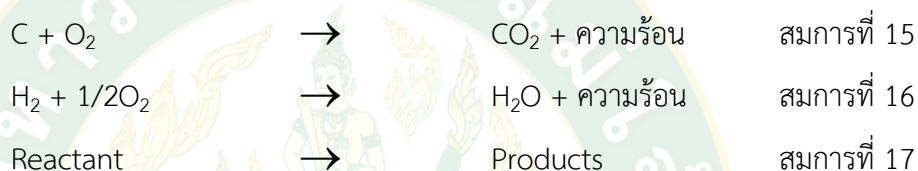
2. การแยกสลายด้วยความร้อน (Pyrolysis or Distillation Process)

เป็นการสลายพันธะเคมีของชีวมวลด้วยความร้อนในสภาพแวดล้อมที่ไร้ออกซิเจน (มหาวิทยาลัยบูรพา, 2554) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 200-600 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศปกติ ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยของแข็ง 30-50% ของเหลว 18-20% และแก๊ส 20-30% ปริมาณผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับการกำหนดเงื่อนไขของอัตราส่วนความร้อนและอุณหภูมิสูงสุด ปฏิบัติการแยกสลายด้วยความร้อนแบ่งได้ 2 กระบวนการ คือการแยกสลายด้วยความร้อนอย่างช้า อัตราการให้ความร้อนของชีวมวลต่ำกว่า 10 °C/s สารระเหยออกมาช่วงอุณหภูมิ 250-500 °C ที่อุณหภูมิ 600 °C การแยกสลายด้วยความร้อนจะสิ้นสุดได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นถ่านส่วนแก๊สที่ออกจาก Slow Pyrolysis ประกอบด้วย CO, CO₂, CH₄, C₂H_n เป็นต้น โดยมีค่าความร้อนอยู่ระหว่าง 10.5-15 MJ/m³ อีกกระบวนการหนึ่งคือการแยกสลายด้วยความร้อนอย่างรวดเร็ว อัตราการให้ความร้อนของชีวมวลอยู่ระหว่าง 10-100 °C/s ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนสูงเช่น เอทิลีน โพรเพน ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C ของแข็งและของเหลวจะเกิดการสลายตัวเพิ่มขึ้นซึ่งจะเพิ่มปริมาณไฮโดรคาร์บอนในแก๊สสูงขึ้น

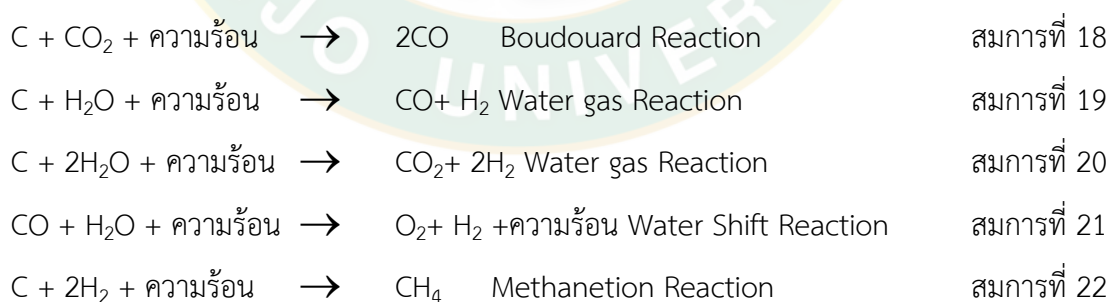
3. แก๊สซิฟิเคชัน

โดยปฏิกิริยาเคมีในแต่ละชั้นของเครื่องผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สแบ่งเป็นโซนต่าง ๆ 4 โซน คือชั้นการเผาไหม้ ชั้นรีดักชัน ชั้นไพโรไลซิส และชั้นทำให้แห้ง ปฏิกิริยาทั้ง 4 ชั้น สามารถแยกออกจากกันตามผลผลิตจากปฏิกิริยาทางเคมีที่ได้ปริมาณออกซิเจนในแต่ละชั้นที่อุณหภูมิแตกต่างกันรายละเอียดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละชั้นมีดังนี้ (วีระชัย อาจหาญ, 2550)

1) Combustion Zone อากาศจะถูกส่งผ่านเข้ามาบริเวณนี้เป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงกับอากาศสัมผัสกันเป็นจุดแรกทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำตามสมการที่ 15 ถึง 17 อุณหภูมิโซนนี้จะอยู่ในช่วง 1,100 °C-1,500 °C

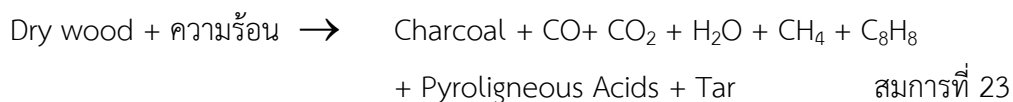


2) Reduction Zone คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่ได้จากชั้นการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นรีดักชันซึ่งในปฏิกิริยาชั้นนี้จะเป็นแบบดูดความร้อนโดยเปลี่ยนแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำบางส่วนให้มาเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่เกิดขึ้นในชั้นการเผาไหม้จะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนคือ ชั้นรีดักชันจะได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ 18 ถึง 22 และอุณหภูมิในโซนนี้จะอยู่ในช่วง 500-900 °C



3) Distillation Zone หรือ Pyrolysis Zone ในบริเวณนี้เชื้อเพลิงแข็งจะถูกย่อยสลายด้วยความร้อนที่สูงในที่ไม่มีออกซิเจนอยู่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการดูดความร้อนโดยรับความร้อนจากชั้นรีดักชันเพื่อเปลี่ยนแปลงสารอแกนิคในเชื้อเพลิงให้ได้สารระเหยแก๊สที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ อุณหภูมิในชั้นนี้จะอยู่ในช่วง 200-600 °C ของแข็งที่เหลือในชั้นนี้คือ คาร์บอนที่อยู่ในรูปถ่านซึ่งจะทำปฏิกิริยาในชั้นรีดักชันและการเผาไหม้ในกรณีใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 23 ในช่วงแรก

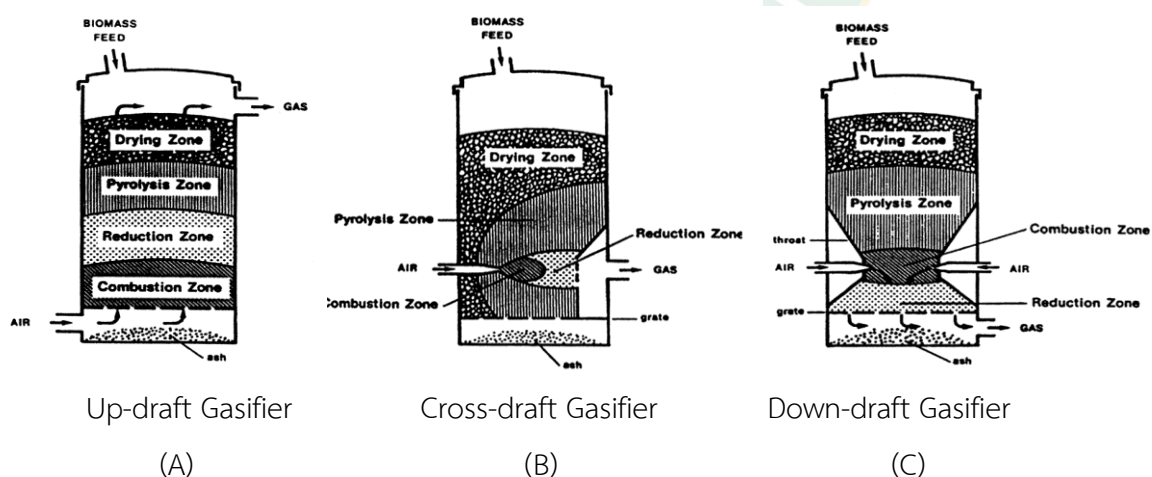
อุณหภูมิในบริเวณนี้จะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งสูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงจึงเริ่มสะสมความร้อนอีกครั้งเพื่อการเกิดปฏิกิริยาค้างต่อไป



4) Drying Zone กระบวนการนี้พลังงานส่วนหนึ่งจะใช้ในการระเหยความชื้นจากเชื้อเพลิง เมื่อกระบวนการนี้เริ่มขึ้น น้ำหนักของเชื้อเพลิงจะลดขนาดลง และสีของเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนไปคือจะมีสีเข้มขึ้น พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหยความชื้นจะใช้โดยประมาณ 1.26 kcal/kg น้ำ หรือ 5.27 kJ/kg น้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้สมการที่ 24 และผลผลิตของขั้นนี้คือไอน้ำและสารละลายที่ปนออกมาเล็กน้อย อุณหภูมิโซนนี้จะอยู่ในช่วง 100-135 °C



เตาชีวมวลที่ออกแบบมีลักษณะการเผาไหม้แบบผสม คือเป็นการเผาไหม้โดยตรงร่วมกับการเผาไหม้แบบแก๊สซิฟิเคชัน กระบวนการของเตาแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือแบบไหลขึ้น (Up-draft) แบบไหลขวาง (Cross-draft) และแบบไหลลง (Down-draft) โดยคุณลักษณะของทั้ง 3 ชนิด แสดงไว้ในภาพที่ 15 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (ชนธกานต์ ไสยง และคณะ, 2556)



ภาพที่ 15 เครื่องผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สแบบ Up-draft, Cross-draft และ Down-draft

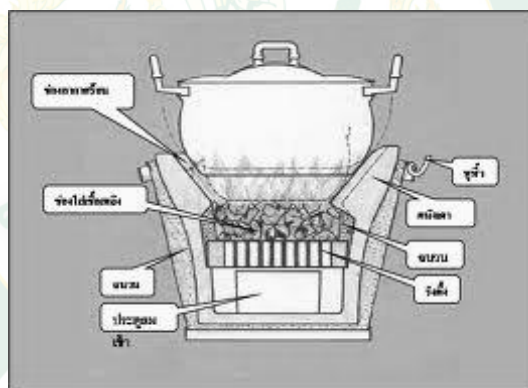
ที่มา: Reed, 1988

เทคโนโลยีเตาชีวมวล

เตาชีวมวลหรือเตาหุงต้มคือภาชนะที่ใช้รองรับหรือประกอบเป็นส่วนในการเผาไหม้เชื้อเพลิง และนำความร้อนที่เกิดขึ้นใช้ประโยชน์ได้ทันที เตาหุงต้มมีส่วนประกอบ 3 ส่วนสำคัญคือส่วนที่เกิดการเผาไหม้ ส่วนที่ให้อากาศที่ช่วยในการเผาไหม้เข้า และส่วนที่ให้ไอเสียออก

1. เตาอั้งโล่

เตาอั้งโล่ส่วนใหญ่ใช้กับถ่านไม้ มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกด้านบนเปิด ภาชนะที่ใช้หุงต้มจะวางอยู่ด้านบนของเตา ถ่านไม้จะวางอยู่ด้านบนของรังผึ้งหรือห้องเรียกเผาไหม้ ส่วนด้านล่างเป็นห้องรองรับเถ้าจากการเผาไหม้ด้านหน้าตอนล่างของเตาจะมีช่องเปิดให้อากาศเข้าไปเผาไหม้ โดยผ่านรังผึ้งขึ้นไปยังถ่านไม้แสดงดังภาพที่ 16 ประสิทธิภาพในการใช้งานในปัจจุบันของประเทศไทยอยู่ที่ประมาณ 23-32% และพบว่ามีการใช้งาน 71% ของครัวเรือนในชนบท 50 หมู่บ้านทั่วประเทศไทย



ภาพที่ 16 เตาอั้งโล่

ที่มา: Energy saving technology (2553)

2. เตาซูเปอร์อั้งโล่

เตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงแสดงดังภาพที่ 17 คือเตาอั้งโล่ที่ถูกปรับปรุงรูปทรง โดยใช้หลักวิชาการเข้ามาช่วยทำให้รูปร่างเพรียว สวยงาม ทนทานมากขึ้น จุดไฟติดเร็วขึ้น ไม่มีควันและแก๊สพิษที่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ หุงต้มสุกเร็ว เก็บความร้อนได้นาน สามารถวางหม้อหรือภาชนะประกอบอาหารได้ 9 ขนาด ที่สำคัญคือประหยัดฟืนและถ่านได้มากกว่าเตาอั้งโล่ธรรมดาถึง 15-20% คือเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูงหนึ่งเตาใช้ถ่านน้อยกว่าเตาอั้งโล่รุ่นเก่าประมาณ 151 kg/y ถ้าถ่านกิโลกรัมละ 5 baht ก็สามารถประหยัดเงิน ได้ถึงปีละ 755 baht กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์

พลังงาน ได้พัฒนาเตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง และได้ปรับปรุงประสิทธิภาพ มาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี ซึ่งโดยทั่วไป เตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง มีประสิทธิภาพสูง ถึง 29% เทียบกับเตาหุงต้มทั่วไปที่มีประสิทธิภาพประมาณ 20% (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561)



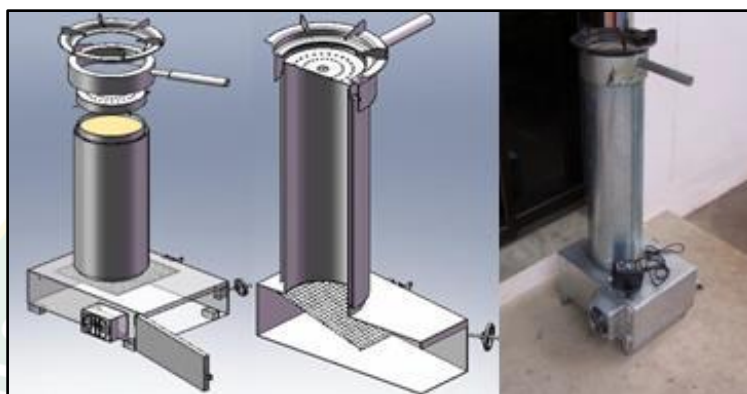
ภาพที่ 17 เตาหุงต้มประสิทธิภาพสูง หรือเตาซูเปอร์อั้งโล่

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2561)

3. เตาแก๊สชีวมวล

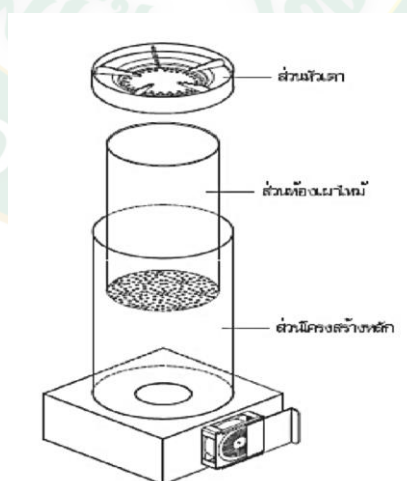
เตาแก๊สชีวมวลเป็นเตาที่ถูกพัฒนาจากเตาซูเปอร์อั้งโล่ และเตาผืนมีการใช้งานในระดับครัวเรือนอยู่ 2 ประเภท คือเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลลงกลับหัว (Inverted Downdraft Biomass Gas Stove) (วรารณ ทุมชาติ, 2557) และเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลขึ้น (Updraft Biomass Gas Stove) ในส่วนของเตาชีวมวลแบบไหลลงกลับหัวจะมีกระบวนการเผาไหม้คล้ายกับแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง แต่แตกต่างกันตรงที่แนวทางการเผาไหม้จะไหลจากด้านบนของเตาลงสู่ด้านล่างและมีการเป่าอากาศย้อนจากด้านล่างสู่ด้านบน เตาชนิดนี้เรียกอีกอย่างว่าเตาชีวมวลกลับแสดงดังภาพที่ 18 (กิตติกร สาสุจิตต์ และคณะ, 2552) ส่วนประกอบหลักของเตาประกอบด้วย หัวเตา ห้องเผาไหม้ ห้องเก็บขี้เถ้า และพัดลมเป่าอากาศ การใช้งานทั่วไปมักนิยมใช้เชื้อเพลิงกลบเป็นหลัก ซึ่งจะใช้กลบประมาณ 1.5 kg จากนั้นจุดไฟเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจากด้านบน เมื่อเชื้อเพลิงลุกไหม้แล้วให้เปิดสวิตช์พัดลมเพื่อให้พัดลมทำงานป้อนอากาศเข้าสู่เตาจากด้านล่างขึ้นไปข้างบน เมื่อเตาลุกไหม้เป็นระยะ 2 cm ให้ครอบหัวเตา จากนั้นจุดไฟที่หัวเตาอีกครั้งเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ต่อเนื่อง กระบวนการ

เผาไหม้ของเตาแก๊สชีวมวลนี้จะเป็นไปตามกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (อนุรักษ์ หอสูงเนิน และคณะ, 2554) สร้างและพัฒนาารูปแบบเตาหุงต้มสำหรับครัวเรือนโดยใช้แกลบมีโครงสร้าง 3 ส่วน ประกอบด้วยส่วนโครงสร้างหลัก ส่วนห้องเผาไหม้ และส่วนหัวเตา ใช้แกลบจำนวน 2 kg สามารถให้ความร้อนต่อเนื่อง 60 นาที และจากการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยวิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) พบว่ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ย 29.18% แสดงดังภาพที่ 18



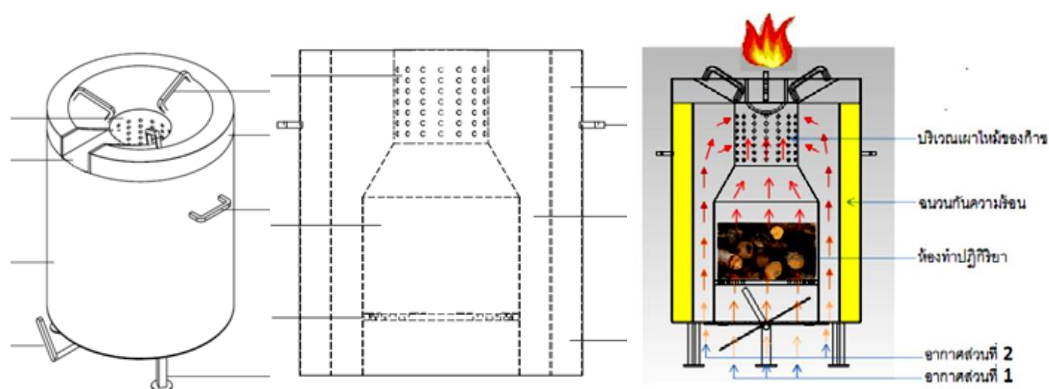
ภาพที่ 18 เตาแก๊สชีวมวลแบบใช้เชื้อเพลิงแกลบ

ที่มา: ณัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ (2551)



ภาพที่ 19 เตาหุงต้มเชื้อเพลิงแกลบ

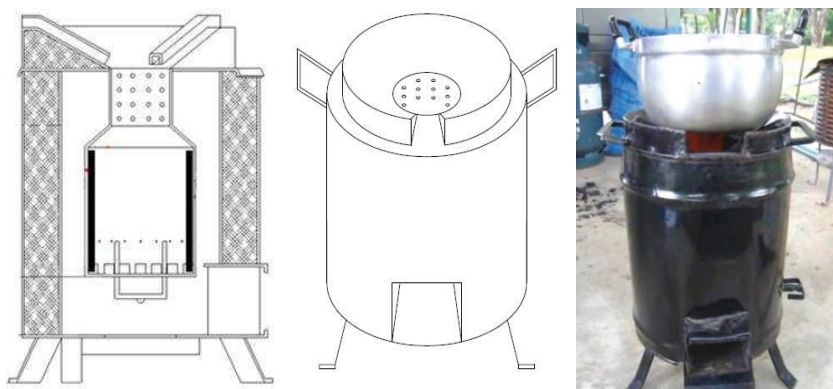
ที่มา: อนุรักษ์ หอสูงเนิน และคณะ (2554)



ภาพที่ 21 เตาชีวมวลแบบไหลลงร่วมกับการเผาไหม้ตรง

ที่มา: สมมาส แก้วล้วน และคณะ (2556)

การเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนของเตาแก๊สชีวมวลสามารถทำได้โดยการเพิ่มอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ Us Patent 6,336,449 (M. Drisdelle, 2002) พบว่าการควบคุมอัตราการไหลของอากาศโดยการติดตั้งพัดลมเพื่อช่วยให้อากาศไหลเข้าสู่เตาชีวมวลได้อย่างสม่ำเสมอ เช่นอนุสิทธิบัตรเลขที่ 7017 (Jung lang lin, 2012) ได้มีการติดตั้งพัดลมเพื่อเป่าอากาศไปยังห้องเผาไหม้ผ่านท่อนำอากาศอย่างน้อย 2 ทาง ซึ่งแต่ละท่อจะทอดออกไปในทิศทางตามแนวเส้นสัมผัสสัมผัสกับหน้าตัดของห้องเผาไหม้ทำให้อนุภาคขนาดเล็กที่อยู่ในห้องเผาไหม้มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ดีแสดงดังภาพที่ 20 และจากการศึกษาพบว่า (สมมาส แก้วล้วน และคณะ, 2556) เตาชีวมวลที่ได้พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 30.6% ซึ่งเตาชีวมวลแบบใช้ฟันในรูปแบบเดียวกันทำการเพิ่มตัวฉนวนให้แก่เตา (พิสิษฐ์ มณีโชติ และคณะ, 2013) ได้ทำการศึกษาเตาแก๊สชีวมวลรู่ห้องเผาไหม้ประสิทธิภาพสูง เป็นการออกแบบและพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลชุมชนขึ้นใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งาน ให้เหมาะสมและคุ้มค่ากับการใช้งานในชุมชน โดยการกรัดด้วยอิฐทนไฟในห้องเผาไหม้ดังภาพที่ 21 ซึ่งเตาแก๊สชุมชนที่ออกแบบใหม่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 14.2 เซนติเมตร และมีความสูงของห้องเผาไหม้เท่ากับ 31.7 เซนติเมตร ใช้หลักการเผาไหม้แบบไหลลงกลับหัวจากการทดสอบพบว่าเตาแก๊สชีวมวลที่ออกแบบใหม่มีประสิทธิภาพ 23.14% ในขณะที่เตาแก๊สชีวมวลแบบเดิมที่ไม่ได้รู่ห้องเผาไหม้มีประสิทธิภาพเพียง 16.40%



ภาพที่ 22 เตาแก๊สชีวมวลกรูห้องเผาไหม้ประสิทธิภาพสูง

ที่มา: พิสิษฐ์ มณีโชติ (2559)

สมการพื้นฐานการออกแบบเตาแก๊สชีวมวล

การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้มสามารถคำนวณได้สมการดังนี้

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = \frac{Q_b}{\text{LHV}_{\text{bio}}}$$

สมการที่ 25

เมื่อ $\dot{m}_{\text{fuel}}$ คือ ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)
 Q_b คือ ปริมาณความร้อนที่ต้องการ (kW)
 LHV_{bio} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

การคำนวณหาปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงต่อการใช้งาน 1 ครั้ง สามารถคำนวณได้สมการดังนี้

$$m_{\text{Total}} = \dot{m}_{\text{fuel}} \times t_{\text{Total}}$$

สมการที่ 26

เมื่อ m_{Total} คือ ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงต่อครั้ง (kg/h)
 t_{Total} คือ ระยะเวลาในการต้ม (min)

การคำนวณหาปริมาณห้องเผาไหม้สามารถคำนวณได้สมการดังนี้

$$V_{\text{Chamber}} = \frac{\dot{m}_{\text{Total}}}{\rho_{\text{Ap}}}$$

สมการที่ 27

เมื่อ V_{Chamber} คือ ปริมาณห้องเผาไหม้ (m^3)
 ρ_{Ap} คือ ความหนาแน่นที่ปรากฏเท่ากับ 230 kg/m^3

การคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ สามารถคำนวณได้สมการดังนี้

$$D_{\text{Chambe}} = \left(\frac{V_{\text{Chamber}}}{H_{\text{Chamber}} \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} \quad \text{สมการที่ 28}$$

เมื่อ D_{Chambe} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (m)
 H_{Chambe} คือ ความสูงของห้องเผาไหม้ (m)

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

1. อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

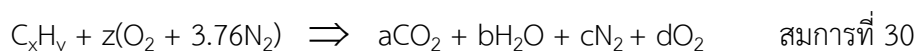
จากข้อมูลดังตารางที่ 8 สามารถนำมาคำนวณหาปริมาณออกซิเจนหรืออากาศที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเชื้อเพลิง มวลสารสัมพันธ์เป็นความสัมพันธ์โดยโมล ดังนั้นต้องทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของกิโลกรัมโมล ก่อนนำมาคำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี สามารถคำนวณโดยการสมดุลระหว่างมวลขาเข้าและมวลขาออกจากระบบ ดังนี้

มวลที่เข้าระบบ = มวลที่ออกจากระบบ สมการที่ 29

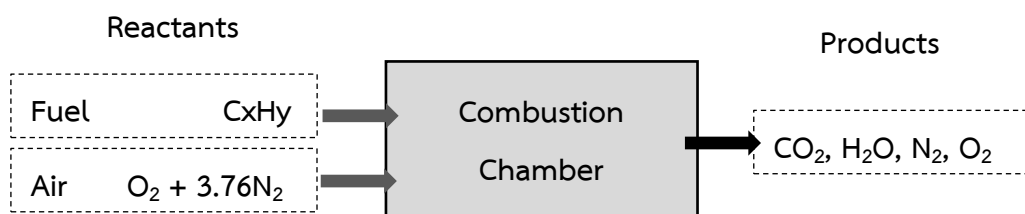
ตารางที่ 8 คุณสมบัติของอากาศสำหรับการเผาไหม้

องค์ประกอบ	ร้อยละองค์ประกอบ	
	โดยปริมาณ	โดยมวล
ออกซิเจน (O_2)	21.00	23.20
ไนโตรเจน (N_2)	79.00	76.80
$\text{O}_2: \text{N}_2$	1 : 3.76	1 : 3.35

สำหรับกระบวนการเผาไหม้ มวลที่เข้าระบบคือเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิง คือชีวมวลขาออกจากระบบ ถ้าพิจารณาระบบเผาไหม้ที่มีสถานะคงที่ คือไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา สามารถคำนวณได้ดังนี้



เมื่อ x, y, z, a, b, c, d คือ ค่าสัมประสิทธิ์คงตัว



ภาพที่ 23 สมดุลมวลของกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์

กระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นการยากที่จะผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้สม่ำเสมอทั่วถึงกันภายในห้องเผาไหม้ โดยปกติจะทำการป้อนปริมาณอากาศให้เท่ากับทฤษฎี ดังนั้นจึงต้องป้อนอากาศในปริมาณที่เพิ่มมากกว่าทฤษฎีเล็กน้อย อัตราส่วนของปริมาณอากาศจริงต่อปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเรียกว่าอัตราส่วนอากาศ

ถ้าให้ m แทนอัตราส่วนอากาศ และ A แทนปริมาณของอากาศที่ใช้จริง จะได้ว่า

$$m = A/A_0 \text{ หรือ } A = mA_0 \text{ ปริมาณอากาศส่วนเกินคือ } (m-1) = 100\%$$

การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้มากกว่าทฤษฎี เพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์นั้นอาจช่วยลดการสูญเสียความร้อนไปกับแก๊สไอเสีย และอาจทำให้เกิดอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ลดลง อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ความร้อนไปยังพื้นผิวรับความร้อน นอกจากนี้ปริมาณอากาศส่วนเกินก่อให้เกิด (NO_x) ซึ่งเป็นมลภาวะที่สำคัญตัวหนึ่งและหากเชื้อเพลิงมีส่วนประกอบของกำมะถันก็จะทำให้เกิด SO_3 และในที่สุดก็จะกลายเป็น SO_4 ซึ่งจะกัดกร่อนพื้นผิวของอุปกรณ์ในระบบ ดังนั้นจึงควรลดปริมาณอากาศส่วนเกินให้น้อยที่สุด โดยที่ยังเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยสามารถคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-fuel Ratio) ทางทฤษฎี ได้ดังสมการนี้

$$AF_{th} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} = \frac{\rho_{air} \times A \times v_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad \text{สมการที่ 31}$$

เมื่อ $\dot{m}_{air}$ คือ อัตราการไหลของมวลอากาศ (kg/s)

$\dot{m}_{fuel}$ คือ อัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิง (kg/s)

ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ 1.2 kg/m^3

A คือ พื้นที่หน้าตัดท่อลม (m^2)

V_{air} คือ ความเร็วลม (m/s)

2) อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, ϕ : ER)

$$\phi = \frac{A/F_{Actual}}{A/F_{theory}}$$

สมการที่ 32

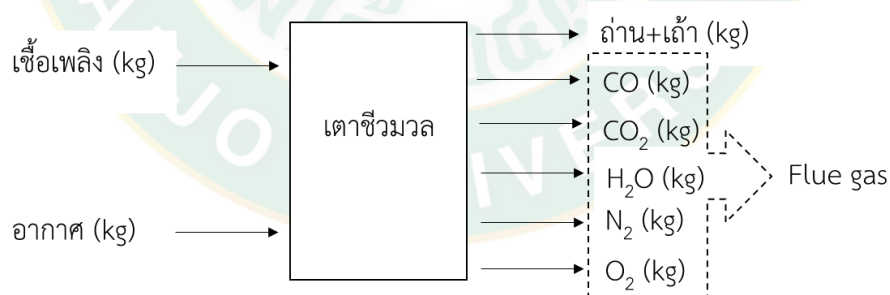
เมื่อ A/F_{Actual} คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง

A/F_{theory} คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทฤษฎี

3) การสมดุลมวลและพลังงาน

การสมดุลมวล

กระบวนการเผาไหม้ มีกระแสเข้า (Input stream) สองกระแส คือเชื้อเพลิงและอากาศ มีกระแสออก (Output stream) สองกระแส คือแก๊สผลผลิตจากการเผาไหม้ (Flue gas) และเถ้า (Ash) เฉพาะในกระบวนการเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงแข็งที่มีเถ้าเป็นองค์ประกอบ โดยการวิเคราะห์สมดุลมวลของระบบ คือมวลที่เข้าระบบเท่ากับมวลที่ออกจากระบบอาจเขียนตามสมการดังนี้ (กองพัฒนารักษาการบุคคลด้านพลังงาน, 2553)



ภาพที่ 24 สมดุลมวลของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

$$m_{in} = m_{out}$$

สมการที่ 33

$$m_{in} = m_{fuel} + m_{air}$$

สมการที่ 34

$$m_{out} = m_{ash} + \text{Flue gas}$$

สมการที่ 35

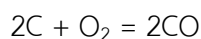
เมื่อ m_{in} คือ มวลที่เข้าระบบ (kg)

m_{out} คือ มวลที่ออกจากระบบ (kg)

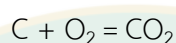
m_{fuel}	คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg)
Flue gas	คือ มวลของแก๊สไอเสีย (CO , CO_2 , H_2O , O_2 , N_2) (kg)
m_{ash}	คือ มวลของขี้เถ้ารวมกับถ่าน (kg)

ก) การวิเคราะห์โดยมวลของแก๊สผลิตภัณฑ์

การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะเกิด CO



การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะได้เกิด CO_2 H_2O N_2 O_2



ส่วนประกอบอากาศโดยมวล ประกอบด้วย $\text{O}_2 = 23.20\%$ และ $\text{N}_2 = 76.80\%$

ข) สมการในการคำนวณหามวลของอากาศ



การสมดุลพลังงานงาน

เป็นกฎของการอนุรักษ์พลังงาน โดยพลังงานที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบในรูปต่าง ๆ ได้แก่ การสูญเสียไปกับแก๊สไอเสีย และการสูญเสียโดยการแผ่รังสีที่พื้นผิว เป็นต้นเขียนตามสมการได้ดังนี้

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{out}} \quad \text{สมการที่ 39}$$

$$Q_{\text{in}} = m_{\text{fuel}} \times \text{LHV} \quad \text{สมการที่ 40}$$

$$Q_{\text{out}} = Q_u + Q_{\text{loss}} \quad \text{สมการที่ 41}$$

เมื่อ Q_{in} คือ พลังงานที่เข้าสู่ระบบ (MJ)

Q_{out} คือ พลังงานที่ออกจากระบบ (MJ)

Q_u คือ พลังงานที่ใช้ประโยชน์ (MJ)

Q_{loss} คือ พลังงานที่สูญเสีย (MJ)

โดยการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา (Q_{loss}) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

ก) การสูญเสียโดยการแผ่รังสี

$$q_r = 4.8791 \varepsilon \cdot \left\{ \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ab}}{100} \right)^4 \right\} \quad \text{สมการที่ 42}$$

ข) การสูญเสียโดยการพาความร้อน

ผนังเตาด้านบน

$$q_c = 2.7995 \cdot (T_w - T_{ab})^{1.25} \quad \text{สมการที่ 43}$$

ผนังเตาด้านข้าง

$$q_c = 2.1995 \cdot (T_w - T_{ab})^{1.25} \quad \text{สมการที่ 44}$$

ผนังเตาด้านล่าง

$$q_c = 1.4997 \cdot (T_w - T_{ab})^{1.25} \quad \text{สมการที่ 45}$$

ค) การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตา

$$Q_s = a_s \cdot (q_r + q_c) \quad \text{สมการที่ 46}$$

เมื่อ	q_r	คือ	การสูญเสียโดยการแผ่รังสี (kcal/m ² hr)
	q_c	คือ	การสูญเสียโดยการพาความร้อน (kcal/m ² hr)
	Q_s	คือ	การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตา (kcal/hr)
	ε	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ผิวผนัง สำหรับผนังที่เป็นสนิม = 0.8 สำหรับผนังที่ทาสี = 0.4 ~ 0.7
	a_s	คือ	พื้นที่รวมของผนังเตา (m ²)
	T_w	คือ	อุณหภูมิผิวของผนัง (K)
	T_{ab}	คือ	อุณหภูมิห้อง (K)

ง) การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตา

$$Q_{sw} = Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3} \quad \text{สมการที่ 47}$$

Q_{ws}	คือ	การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตา
Q_{s1}	คือ	การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตาด้านบน
Q_{s2}	คือ	การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตาด้านข้าง
Q_{s3}	คือ	การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตาด้านล่าง

การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

1) อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลคืออัตราส่วนของน้ำหนักเชื้อเพลิงต่อเวลาหาได้จากสมการดังนี้ (Belonio, 2005)

$$SFC = \frac{\dot{m}_{Fuel}}{\dot{Q}_U} \quad \text{สมการที่ 48}$$

เมื่อ SFC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)
 $\dot{m}_{Fuel}$ คือ มวลเชื้อเพลิงต่อเวลา (kg/h)
 $\dot{Q}_U$ คือ พลังงานที่ใช้ในการระเหยของน้ำ (kJ/h)

3) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ หาได้จากสมการดังนี้ (Belonio, 2005)

$$SEC = \frac{\dot{m}_{Fuel} LHV}{\dot{Q}_U} \quad \text{สมการที่ 49}$$

เมื่อ SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kWh)
 $\dot{m}_{Fuel}$ คือ มวลเชื้อเพลิงต่อเวลา (kg/h)
 $\dot{Q}_U$ คือ พลังงานที่ใช้ในการระเหยของน้ำ (kJ/h)
 LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

4) การประเมินประสิทธิภาพความร้อน

การทดสอบประสิทธิภาพเตาชีวมวลจะใช้วิธีการทดสอบโดยการต้มน้ำ (Boiling test) จากพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำต่อพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (ณัฐวุฒิ, 2551)

$$\eta_{th} = \frac{Q_U}{Q_{Fuel} + Q_E} \times 100 \quad \text{สมการที่ 50}$$

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวล (%)
 Q_U คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kJ)
 Q_{Fuel} คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (kJ)
 Q_E คือ พลังงานไฟฟ้าที่ป้อนแก่เตาชีวมวล (kJ)

ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์หาได้ความร้อนที่ใช้ในการอุ่นและระเหยน้ำ

$$Q_U = [m_{w1} C_{pw} (T_{wb} - T_{wi})] + [m_{w2} h_{fg}] \quad \text{สมการที่ 51}$$

เมื่อ	m_{w1}	คือ มวลน้ำเริ่มต้น (kg)
	m_{w2}	คือ มวลน้ำระเหย (kg)
	T_{wi}	คือ อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น
	T_{wb}	คือ อุณหภูมิน้ำเดือด
	C_{pw}	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.186 kJ/kg·K
	h_{fg}	คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ 2,257 kJ/kg

ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงหาได้ตามสมการ

$$Q_{\text{Fuel}} = m_{\text{Fuel}} \times \text{LHV}_{\text{biomass}} \quad \text{สมการที่ 52}$$

เมื่อ	m_{Fuel}	คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg)
	$\text{LHV}_{\text{biomass}}$	คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน

1. การประเมินต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวล

การคำนวณต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานจำเพาะ (Specific Cost Consumption: SCC) ดังแสดงในสมการที่ 50 ค่าที่นำมาใช้ในการคำนวณนั้นได้มาจากต้นทุนพลังงานเชื้อเพลิง (ผลคูณของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้กับราคาเชื้อเพลิง และหารด้วยมวลน้ำระเหย)

$$\text{SCC} = \frac{\text{Cost}_{\text{Fuel}} \times m_{\text{Fuel}}}{m_{w2} \times Q_U} \quad \text{สมการที่ 53}$$

เมื่อ	SCC	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานจำเพาะ (baht/kwh)
	$\text{Cost}_{\text{Fuel}}$	คือ ราคาเชื้อเพลิง (baht/kg)
	m_{Fuel}	คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)
	m_{w2}	คือ มวลน้ำระเหย (kg)
	Q_U	คือ ปริมาณความร้อนนำไปใช้ประโยชน์ (kWh)

2. การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวล

2.1 วิธีการประเมินผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value : NPV)

สมการวิเคราะห์ผลตอบแทนสุทธิ เป็นเกณฑ์การตัดสินใจในการลงทุน จะลงทุนเมื่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวก และไม่ควรลงทุนถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นลบ

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - \left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} + C_0 \right)$$

สมการที่ 54

เมื่อ	NPV	คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (baht)
	B_t	คือ ผลตอบแทนในปีที่ t ($t=1, 2, 3, \dots, n$)
	C_t	คือ ต้นทุนในปีที่ t ($t=1, 2, 3, \dots, n$)
	C_0	คือ ต้นทุนในปีเริ่มต้น (baht)
	i	คือ อัตราดอกเบี้ย (baht)
	n	คือ อายุของโครงการ (y)

2.2 วิเคราะห์ผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR)

หมายถึงอัตราลดค่า (discount rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะต้องจ่ายในการลงทุนเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินการประหยัดพลังงาน ตลอดอายุโครงการจากคำนิยามข้างต้นการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนลดค่าจะต้องทราบข้อมูลดังนี้

$$\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t} - \left(\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} + C_0 \right) = 0 \quad (\text{IRR หรือ } r) \quad \text{สมการที่ 54}$$

เมื่อ	IRR	คือ อัตราผลตอบแทนภายใน (%)
	B_t	คือ ผลตอบแทนในปีที่ t ($t=1, 2, 3, \dots, n$)
	C_t	คือ ต้นทุนในปีที่ t ($t=1, 2, 3, \dots, n$)
	C_0	คือ ต้นทุนในปีเริ่มต้น (baht)
	i	คือ อัตราดอกเบี้ย (baht)
	n	คือ อายุของโครงการ (y)

2.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB)

คือระยะเวลาคืนทุน (เป็นจำนวนปี/เดือนหรือวัน) เป็นการประเมินค่าโครงการ โดยไม่คำนึงถึงภาษีและดอกเบี้ยทำให้ง่ายต่อการคำนวณ สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$PB = \frac{TI}{Cs}$$

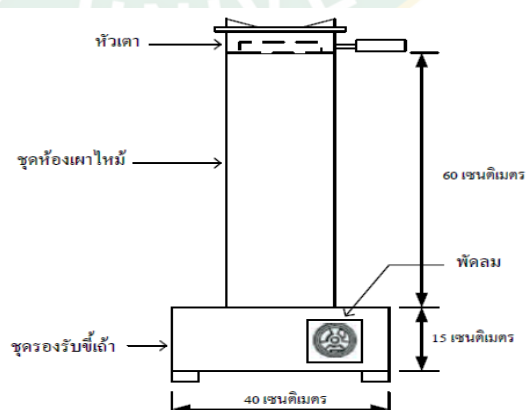
สมการที่ 55

เมื่อ TI คือ เงินลงทุนสุทธิ (Total Investment) (baht)
Cs คือ รายได้ต่อปี (Cost saving) (baht/y)

การตรวจสอบเอกสาร

ผลจากการค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาออกแบบและพัฒนาเตาซีมวลประสิทธิภาพสูง การใช้งานและการประเมินสมรรถนะเตาซีมวลมีดังต่อไปนี้

วรารักษ์ ทุมชาติ (2557) ได้ศึกษาสมรรถนะการใช้งานเตาแก๊สซีมวลแบบ Inverted downdraft โดยใช้แอลเป็นเชื้อเพลิง ลักษณะการทำงานเป็นแบบกะ ใช้พัดลมเป่าอากาศ หัวเตาแก๊สเป็นแบบหัวเดี่ยว และนำไปทดสอบกับการใช้งานในชุมชนจังหวัดลำปาง โดยมีการศึกษาความเร็วลม 4 ระดับ คือ 4.89, 7.41, 9.41 และ 10.21 m/s โดยใช้การปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลการศึกษาพบว่าแก๊สที่ได้จากเตาซีมวลมีอุณหภูมิและเปลวไฟใกล้เคียงกับแก๊สหุงต้มแบบใช้แก๊สแอลพีจี โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับการควบคุมความเร็วของพัดลม ระยะเวลา น้ำเดือดเกิดขึ้นที่ 60, 14, 12, 8 min น้ำเดือดที่อุณหภูมิ 97 °C และรักษาอุณหภูมิของน้ำเดือดได้ 6, 20, 20, 23 min มีการใช้กำลังไฟฟ้า 9-25 W มีอัตราการลงทุนเฉลี่ย 2 y



ภาพที่ 25 แบบเตาแก๊สซีไฟเออร์

ที่มา: วรารักษ์ ทุมชาติ (2557)

วิโรจน์ ไชยสมทิพย์ และคณะ (2557) ทำการออกแบบเตาแก๊สซีฟเออร์ควบคู่กับเตาชีวมวลระดับครัวเรือน โดยเตามีลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ชั้นโดยชั้นในเป็นโซนแก๊สซิฟิเคชัน (ห้องเผาไหม้) และชั้นนอกเป็นโซนไฟโรไลซิส (ห้องอบถ่านชีวมวลด้วยความร้อน) ทำการทดลองโดยเปรียบเทียบการใช้งานเตาเฉพาะในโซนแก๊สซิฟิเคชัน และการใช้เตาทั้ง 2 โซน (โซนแก๊สซิฟิเคชันและโซนไฟโรไลซิส) ใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวกันคือ แกลบ พบว่าการใช้เตาเฉพาะในโซนแก๊สซิฟิเคชันจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน 24.3% ในขณะที่การใช้เตาทั้ง 2 โซนจะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลงเป็น 24% แสดงให้เห็นว่าในการใช้งานเตาเฉพาะในโซนแก๊สซิฟิเคชันจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่า เพราะความร้อนไม่ถูกส่งถ่ายไปใช้งานในโซนไฟโรไลซิส และเมื่อเปรียบเทียบการใช้งานเตากับชีวมวลต่างชนิดกัน ได้แก่ แกลบ ช้างข้าวโพด และถ่านไม้ พบว่ามีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน 24, 21 และ 13% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแกลบเป็นเชื้อเพลิงที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด แลเมื่อนำเชื้อเพลิงผสมระหว่าง แกลบร่วมกับถ่านไม้จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยประมาณ 11-41%



ภาพที่ 26 เตาแก๊สซีฟเออร์ควบคู่กับเตาชีวมวลระดับครัวเรือน

ที่มา: วิโรจน์ ไชยสมทิพย์ และคณะ (2557)

วิรัตน์ เจริญบุญ (2560) ได้ออกแบบและศึกษาต้นแบบเตาชีวมวลแบบอากาศไหลขึ้นและเผาไหม้จากด้านบนลงล่าง โดยใช้แกลบเป็นแหล่งเชื้อเพลิง และสามารถบรรจุเชื้อเพลิงแกลบได้สูงสุด 1.659 kg มีประสิทธิภาพทางความร้อน 10.36% โดยเตามีกำลังการผลิต 1.28 kW เมื่อใส่เชื้อเพลิงเข้าไป 12.50 kW จะสามารถสร้างแก๊สร้อนที่จุดไฟให้ลุกติดได้ภายในเวลา 2.87 min เปลวไฟสามารถลุกไหม้ได้นานมากถึง 27.59 min อุณหภูมิของเปลวไฟที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 416-684 °C

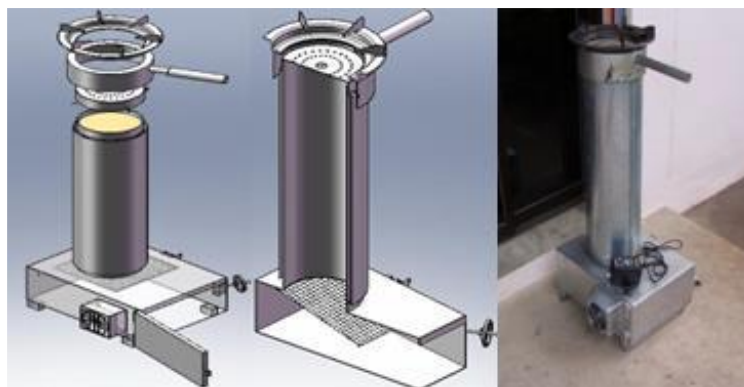
และมีค่า Fuel Consumption Rate (FCR) เฉลี่ยเท่ากับ 3.184 kg/h สามารถนำไปใช้งานสำหรับการทำอาหารได้หลากหลายรายการ เช่น ต้มยาไก่บ้านใช้เวลาเพียง 25 min และต้มน้ำปริมาตร 2 L ให้เดือดเพื่อชงกาแฟหรือนมร้อนได้ภายในเวลา 8 min



ภาพที่ 27 ลักษณะเตา และส่วนของท่อเผาไหม้

ที่มา: วิรัตน์ เจริญบุญ (2560)

ณัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ (2551) ได้ศึกษาและทดสอบเตาชีวมวลแบบใช้เกลบหรือที่เรียกว่า Inverted downdraft gasifier ที่ใช้ห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอกสูง 60 cm โดยพบว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 46.12, 55.31 และ 67.37% ของค่าในทางทฤษฎี อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 619, 652 และ 703 °C ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล มีค่าเท่ากับ 19.17, 17.31 และ 16.46 % เตาชีวมวลมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 3.6, 4.7 และ 4.9 kg/h และมีอัตราการเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจำเพาะ (SGR) เท่ากับ 76.19, 99.91 และ 102.85 kg/m²·h ตามลำดับ และเมื่อชุมชนนำเอาเตาแก๊สชีวมวลไปใช้งานในระดับครัวเรือนในกิจกรรมประกอบอาหารสามารถประหยัดเงินค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงได้ 2,160 Baht/y โดยมีจุดคุ้มทุน 1.4 y



ภาพที่ 28 เตาแก๊สชีวมวลใช้วัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง

ที่มา: ณัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ (2551)

อนุรักษ์ หอสูงเนิน และคณะ (2554) ได้ศึกษาเพื่อสร้างและพัฒนาแบบเตาหุงต้มสำหรับครัวเรือนแบบ Invert downdraft Gasification โดยใช้กลบมีโครงสร้าง 3 ส่วน ประกอบด้วยส่วนโครงสร้างหลัก ส่วนห้องเผาไหม้ และส่วนหัวเตา มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ 0.20 m สูง 0.50 m ใช้กลบจำนวน 2 kg สามารถให้ความร้อนต่อเนื่อง 60 นาที และจากการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยวิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) พบว่ามีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ย 29.18% และเมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านพลังงานระหว่างการใช้เตาหุงต้มเชื้อเพลิงกลบกับการใช้แก๊สแอลพีจี พบว่าเตาหุงต้มเชื้อเพลิงกลบสามารถประหยัดมากกว่า 5.145 บาทต่อครั้ง

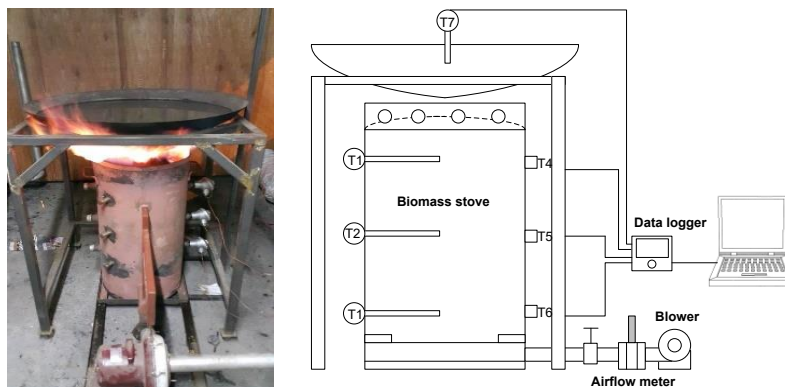
ชนธกานต์ ไสยั้ง และคณะ, 2556 ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสามารถใช้งานกับเชื้อเพลิงได้หลากหลายขนาด และลดต้นทุนการผลิต โดยทำการออกแบบและพัฒนาหาขนาดอัตราส่วนห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม ทดสอบวัสดุฉนวน และออกแบบเตาแก๊สชีวมวลที่สามารถใช้งานกับเชื้อเพลิงขนาดยาว ผลการทดสอบด้วยการต้มน้ำพบว่าเตาแก๊สชีวมวลอัตราส่วนห้องเผาไหม้หลักกับห้องเผาไหม้ข้างขนาดที่เหมาะสมที่สุดคืออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.17 อัตราความสูง 1.67 โดยใช้ปูนซีเมนต์กรุห้องเผาไหม้ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 36.58 %

สมมาส แก้วล้วน และคณะ (2556) ได้ทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW ที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับการใช้เตาแก๊สแบบใช้แก๊สหุงต้ม (แอลพีจี) เป็นเชื้อเพลิง เตาแก๊สหุงต้มที่ใช้ทดสอบเป็นแบบชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และประสิทธิภาพสูง (SG5) ทดสอบโดยวิธีการต้มน้ำที่ 15 kg เวลา 100 min โดยพบว่าการใช้เตาชีวมวลให้ประสิทธิภาพความร้อน 30.6% ซึ่งต่ำกว่าการใช้เตาแก๊สแอลพีจี ชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำและสูงประมาณ 67%

และ 60% แต่ว่าต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลกลับถูกกว่า 76-80% ดังนั้นการใช้เตาชีวมวลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของชุมชนในการลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนและลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกเมื่อเทียบกับใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

พิสิษฐ์ มณีโชติ และคณะ (2556) ทำการออกแบบห้องเผาไหม้เตาชีวมวลจากเซรามิกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาชีวมวล โดยในการวิจัยได้มีการทดลองเนื้อดินปั้น โดยใช้วัตถุดิบคือดินดำสำเร็จรูป ขี้เถ้าแกลบ และดินเชื้อ ผสมตามอัตราส่วนโดยกำหนดกลุ่มตัวอย่างได้ 3 สูตร พบว่าในการศึกษาความเป็นไปได้โดยทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพนั้น เนื้อดินปั้นในสูตรที่ 3 ซึ่งมีส่วนประกอบคือเนื้อดินปั้นร้อยละ 90 ขี้เถ้าแกลบร้อยละ 5 และดินเชื้อร้อยละ 5 เป็นสัดส่วนที่มีความเหมาะสมในการทำห้องเผาไหม้เซรามิก โดยมีค่าการหดตัวอยู่ที่ร้อยละ 4 และก็ยังมีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การทดลองหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลโดยใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ตามท้องตลาด ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน 29.86%

ธนชาติ มหาวัน และคณะ (2559) ได้ศึกษาเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อน โดย เปรียบเทียบกับเตาแก๊สหุงต้ม เตาชีวมวลที่ใช้ทดสอบเป็นเตาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 cm และสูง 85 cm หัวเตาเป็นแบบชนิดถอดออกได้ ใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง และสามารถบรรจุซังข้าวโพดได้สูงสุด 11-12 kg ป้อนอากาศด้วยพัดลมเป่าอากาศ และปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทดสอบเป็น 3.12 3.30 และ 3.36 โดยมีภาระโหลดในการต้มน้ำ (WBT) ต่อครั้งจำนวน 80 ลิตร พบว่าการปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีผลกระทบต่อสมรรถนะการทำงานของเตา โดยให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 21.5 % อุณหภูมิภายในเตามีค่าเฉลี่ย 517 °C มีต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตความร้อนต่ำสุด 0.94 บาท/kWh ซึ่งต่ำกว่าการใช้แก๊ส หุงต้มเป็นเชื้อเพลิงประมาณ 3.5 เท่า



ภาพที่ 29 เตาชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนมาใช้ในการงานของวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์
ที่มา: ธนชาติ มหาวัน (2560)

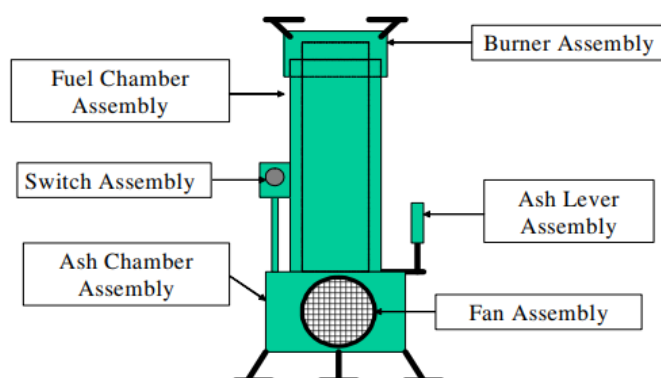
วิลาวัลย์ คุ่มเหม (2562) ได้ศึกษาเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ห้องเผาไหม้ ชุดเติมอากาศ และชุดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เตาชีวมวลมีรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm ความสูง 55 cm ผนังเตาใช้เหล็กแผ่นขนาด 3 mm ผนังเป็นทรงกระบอก ห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm เจาะรูขนาด 5 mm ส่วนล่างของตัวเตามีช่องสำหรับระบายแก๊สออก ด้านข้างมีท่อขนาด 2 inch สำหรับเติมอากาศโดยใช้พัดลมเติมอากาศขนาด 2 inch 220 Volt ทำหน้าที่เป็นตัวป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และควบคุมอัตราการไหลของอากาศ ช่อง primary air และ secondary air จำนวน 2 ตัว โดยใช้วาล์วเปิดและปิดลม มีชุดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องโดยใช้สกรูลำเลียงที่มีกำลังขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อให้มีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วด้วยกระแสไฟฟ้า เมื่อทำการทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของเตาชีวมวลโดยการป้อนเชื้อเพลิงจากซังข้าวโพดและซังข้าวโพดอัดเม็ด พบว่าซังข้าวโพดอัดเม็ดมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่าที่ 6.15 kg/h ทำการป้อนอากาศช่อง primary air ที่ A/F_{Ratio} 6.885 มีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 36.31% และเมื่อทำการป้อนอากาศเข้าสู่ช่อง secondary air ที่ 10% พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น 39.06% สามารถผลิตความร้อนได้ 13.80 kW



ภาพที่ 30 เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง

ที่มา: วิลาวัลย์ คุ่มเหม (2562)

Belonio (2005) ได้ศึกษาออกแบบสร้างและทดสอบเตาชีวมวลแบบ Inverted downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เตาที่ออกแบบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 cm ความยาวห้องเผาไหม้ 65 cm ส่วนประกอบหลักของเตาแก๊สชีวมวลประกอบด้วย หัวเตา ห้องเผาไหม้ ห้องเก็บขี้เถ้าและชุดป้อนอากาศ เติมเชื้อเพลิงได้ 1 ครั้งต่อการใช้งาน จากการทดสอบการต้มน้ำพบว่าเตาแก๊สชีวมวลมีประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 13.3% มีระยะเวลาสตาร์ท 1.64 min ระยะเวลาใช้งานเฉลี่ย 50 min และอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย 1.59 kg/h



Schematic Drawing of Rice Husk Gas Stove

ภาพที่ 31 เตาชีวมวลแบบ Inverted downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง

ที่มา: Belonio (2005)

(Vyas et al., 2014) ได้ออกแบบและพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลแบบ Inverted downdraft สำหรับการประกอบอาหาร ส่วนประกอบของเตาชีวมวลประกอบด้วยห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมอากาศ ช่องอากาศเข้า ตระแกรง ช่องอากาศผสม ผังเตาด้านนอก และใช้ซังข้าวโพดและขี้เลื่อยอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง ทดสอบหาประสิทธิภาพเตาจากการต้มน้ำ ปริมาตรห้องเผาไหม้ 0.0109 m^3 เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.178 m และความสูงของห้องเผาไหม้ 0.441 m ผลการทดสอบประสิทธิภาพเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพดมีประสิทธิภาพเฉลี่ย $29.59\text{-}33.89 \%$ ขณะเดียวกันเมื่อใช้ขี้เลื่อยอัดแท่งมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง $38.68\text{-}40.53 \%$

(Panwar and Rathore, 2008) ได้ออกแบบและศึกษาเตาชีวมวลแบบใช้ฟืน ขนาด 5 kW เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานในการปรุงอาหาร โดยเตาชีวมวลใช้กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ให้ประสิทธิภาพความร้อนประมาณ 26.5% และสามารถเริ่มและหยุดการการปลดปล่อยมลพิษในปริมาณที่ต่ำมาก สามารถใช้เชื้อเพลิงชีวมวลได้หลากหลายชนิด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ เช่น แก๊สโพเพน เป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่มีอุณหภูมิเปลวไฟ $736 \text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 32 เตาชีวมวลแบบใช้ฟืน ขนาด 5 kW

ที่มา: Panwar and Rathore (2008)

ตารางที่ 9 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

นักวิจัย	ประเภทเตา	เชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพความร้อน (%)
วิรัตน์ เจริญบุญ (2560)	Inverted Downdraft	แกลบ	24
		ซังข้าวโพด	21
		ถ่านไม้	13
		แกลบร่วมกับถ่านไม้	11-41
วิรัตน์ เจริญบุญ (2560)	Inverted Downdraft	แกลบ	10.36
ณัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ (2551)	Inverted downdraft gasifier	แกลบ	19.17
Belonio (2005)	Inverted downdraft	แกลบ	13.3
Vyas et al. (2014)	Inverted downdraft	ซังข้าวโพด	29.59-33.89
		ขี้เลื่อยอัดแท่ง	38.68-40.53
อนุรักษ หอสูงเนิน และคณะ (2554)	Invert downdraft Gasification	แกลบ	29.18
ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	Up-draft Gasifier	เศษไม้หรือกิ่งไม้	31.9
ชนธกานต์ ไสยง และคณะ (2556)	Up-draft Gasifier	ไม้พื้น	36.58
สมมาส แก้วล้วน และคณะ (2556)	Up-draft Gasifier	ไม้พื้น	30.6
พิสิษฐ์ มณีโชติ และคณะ (2556)	Up-draft Gasifier	ถ่านไม้	29.86
Panwar et al. (2008)	Up-draft Gasifier	ไม้พื้น	26.5
ธนาชาติ มหาวัน และคณะ (2559)	Invert downdraft Gasification	ซังข้าวโพด	21.5
วิลาวัลย์ คุ่มเหม (2562)	Up-draft Gasifier	ซังข้าวโพด	39.06
		ซังข้าวโพดอัดเม็ด	39.34

บทที่ 3

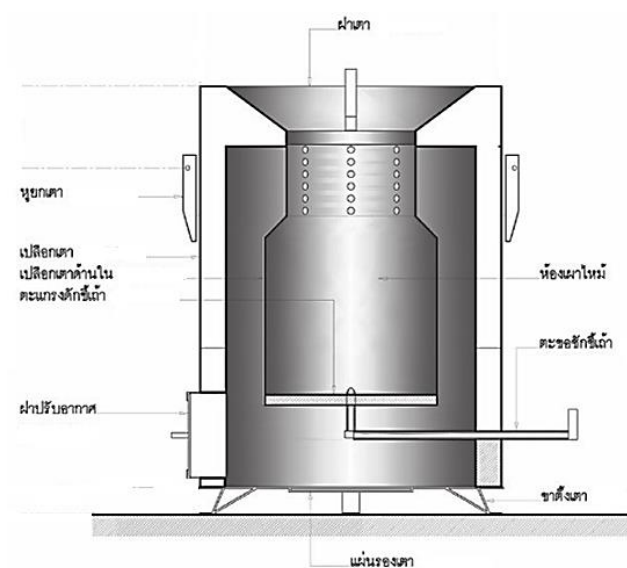
อุปกรณ์และการดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งได้มีการพัฒนามาจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงแบบดั้งเดิมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้น โดยในบทนี้จะเน้นการออกแบบพร้อมกับอธิบายถึงเครื่องมืออุปกรณ์ วัสดุ และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวิจัย ตลอดจนวิธีการดำเนินการทดสอบ โดยรายละเอียดเนื้อหาบทนี้มีดังต่อไปนี้

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงแบบดั้งเดิม

เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงแบบดั้งเดิมมีการป้อนอากาศแบบธรรมชาติ (Natural Draft) ใช้สำหรับเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ เศษไม้ กิ่งไม้ขนาดเล็ก เปลือกทะลายปาล์ม กะลามะพร้าว เหง้ามันสำปะหลัง ชังข้าวโพด และชานอ้อย เป็นต้น ขนาดเตารองรับปริมาณชีวมวลได้สูงสุด 2-7 kg/h หรือประมาณ 8-31 kW ใช้เชื้อเพลิงจากกิ่งไม้ขนาด 1-1.2 กิโลกรัม สามารถใช้งานได้นาน 30-40 นาที อุณหภูมิเฉลี่ยของเตาอยู่ในช่วง 800-900 องศาเซลเซียส ใช้การป้อนเชื้อเพลิงแบบเป็นช่วง ๆ ลักษณะการเผาไหม้เป็นการเผาไหม้แบบผสมระหว่างการเผาไหม้ตรงรวมกับการเผาไหม้แบบแก๊สซิฟิเคชัน ลักษณะของเตาแก๊สชีวมวลชนิดนี้จะเป็นเตาผนัง 2 ชั้น คือชั้นที่ 1 เป็นส่วนของการเผาไหม้ด้านใน และชั้นที่ 2 เป็นช่องสำหรับให้อากาศไหลผ่านออกสู่ด้านบนของเตา นอกจากนั้นยังมีช่องระบายชี้ออกทางด้านล่างของเตา และช่องด้านบนสำหรับใส่ชีวมวล (ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้) โดยแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้นั้นจะลอยขึ้นสู่ด้านบนและเกิดการลุกไหม้บริเวณด้านบนของเตาโดยอาศัยอากาศร้อนที่ถูกบังคับให้ไหลจากด้านล่างของเตาเข้าสู่ชั้นที่ 2 โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจากห้องเผาไหม้และไหลออกทางช่องทางออกด้านบนของเตาและเมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดการติดไฟของแก๊สชีวมวลโดยจะสังเกตได้จากเปลวไฟที่ได้ จะมีลักษณะเป็นลำพุ่งออกมาจากช่องทางออกของอากาศแสดงดังภาพที่ 33 ห้องเผาไหม้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 20 cm สูง 15 cm โดยการใช้งานสามารถใช้เศษไม้หรือกิ่งไม้เป็นเชื้อเพลิง และสามารถเติมเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่องซึ่งเมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำพบว่าเตาชีวมวลมีประสิทธิภาพทางความร้อนอยู่ที่ 31.9%



ภาพที่ 33 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงแบบดั้งเดิม

2. เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่มีขนาดอยู่ในช่วง 10 - 30 kW ใช้การป้อนอากาศแบบบังคับ (Forced draft) โดยเตาที่ออกแบบมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือห้องเผาไหม้ ชุดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง และชุดเติมอากาศ เตาชีวมวลมีรูปเป็นทรงกระบอกผนัง 3 ชั้น โดยมีขนาดความสูง 69.5 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 cm ผนังเตาใช้แผ่นเหล็กหนา 1.5 mm ม้วนเป็นทรงกระบอก และฉนวนความร้อนด้วยดินเหนียวกับเกล็ดดำที่อัตราส่วน 1:1 ความหนา 1 inch (สุปราณี วุ่นศรี และคณะ, 2558) ห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 20 cm สูง 15 cm เเจาะรูไว้รอบ ๆ จำนวน 90 รู แต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm มีช่องสำหรับระบายชี้ไถ่ด้านล่างของเตาพร้อมตะขอชักขึ้นได้ ด้านข้างมีท่อเติมอากาศขนาด 1.5 inch จำนวน 2 ท่อ และขนาด 1 inch จำนวน 1 ท่อ เติมอากาศโดยใช้พัดลม (Blower) ขนาด 2 inch ใช้ไฟ 220 Volt ขนาดกำลังพัดลม 373 W ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบการหมุนของพัดลม สามารถป้อนอัตราการไหลของอากาศได้ 7.5-275 m³/h และพัดลมดูดแก๊สขนาด 2 inch ใช้ไฟ 220 volt ขนาดกำลังพัดลม 93.25 W ทำการติดตั้งวาล์วเปิดปิด ส่วนชุดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง มีช่องใส่เชื้อเพลิงสำหรับเก็บและพักก่อนปล่อยเข้าสู่เตา โดยจะลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยสกรูที่ใช้กำลังขับ

จากมอเตอร์ เป็นอุปกรณ์สำหรับขนถ่ายเชื้อเพลิงเพื่อให้มีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วย สกรูลำเลียงที่มีขนาด 2 inch ระยะพิตช์ของใบเกลียว 3 cm ท่อลำเลียงยาว 30 cm ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และเกียร์ทด ขนาด 0.5 hp ควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอินเวอร์เตอร์ ปรับความถี่กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบขนาด 4.2A ใช้ไฟ 220 volt ด้านบนของหัวเตา ติดตั้งปล่องระบายควันขนาด 4 inch สูง 2 m

ตารางที่ 10 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดในสถานะต่าง ๆ

สถานะการทำงานของเตาชีวมวล	รูปภาพประกอบ
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด	
การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ด้านหน้า)	

การติดตั้งอุปกรณ์ทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพ
สูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด (ด้านข้าง)



เติมอากาศโดยใช้พัดลมขนาด 2 inch
ใช้ไฟ 220 Volt ขนาดกำลังพัดลม 373 W ใช้
อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบการหมุนของพัดลม



พัดลมดูดแก๊สขนาด 2 inch ใช้ไฟ 220 volt ขนาด
กำลังพัดลม 93.25 W ทำการติดตั้งวาล์วเปิดปิด



ชุดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง มีช่องใส่เชื้อเพลิงสำหรับเก็บและพักก่อนปล่อยเข้าสู่เตา โดยจะลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยสกรูที่ใช้กำลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์ เพื่อให้มีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง สกรูลำเลียงที่มีขนาด 2 inch ระยะพิตช์ของใบเกลียว 3 cm ท่อลำเลียงยาว 30 cm ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และเกียร์ทดขนาด 0.5 hp ควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอินเวอร์เตอร์ปรับความถี่กระแสไฟฟ้าขนาด 4.2A ใช้ไฟ 220 volt



การทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด 3 ชนิด ประกอบด้วย เศษไม้ ชังข้าวโพด และฟางข้าว



ทดสอบประสิทธิภาพด้วยวิธีการต้มน้ำ water boiling test โดยใช้หม้อขนาด 30 inch



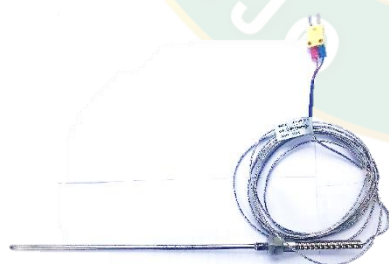
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด
ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการวัดอุณหภูมิน้ำเดือด



3. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

1) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

การวัดอุณหภูมิในการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง จะใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของน้ำร้อนและอากาศ โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิน้ำใช้ของ FW รุ่น FWK-2A ชนิด Type K สามารถวัดอุณหภูมิสูงสุด 600 °C มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 mm ยาว 10 cm ดังภาพที่ 34 (A) และใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิอากาศในเตาใช้ของ KEPLER รุ่น KTP-14 ชนิด Type K สามารถวัดอุณหภูมิสูงสุด 1200 °C มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ยาว 50 cm ดังภาพที่ 34 (B) ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ โดยจะเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 นาที ซึ่งมี 5 จุด คืออุณหภูมิห้องเผาไหม้ อุณหภูมิน้ำเดือด อุณหภูมิห้องซึ้งเถ้า อุณหภูมิท่อป้อนเชื้อเพลิง และอุณหภูมิปล่องควัน



(A)



(B)

ภาพที่ 34 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

2) เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger)

เครื่องบันทึกข้อมูล ทำหน้าที่อ่านและบันทึกค่าอุณหภูมิ โดยเชื่อมต่อกับสายวัดอุณหภูมิชนิด type K/F/T/E/R/S ยี่ห้อ LUTRON รุ่น TM-947USB โดยสามารถวัดอุณหภูมิในช่วงเวลาเดียวกันได้ 4 ช่อง และวัดอุณหภูมิในช่วง $-100 - 1,300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่าความแม่นยำ $\pm 0.1\%$ แสดงดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger)

3) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ของ CAUTION รุ่น UT300C เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (ใช้รังสีอินฟราเรด) โดยสามารถวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง $-32\text{ }^{\circ}\text{C} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าความแม่นยำ $\pm 2\%$ สภาพความเป็นรังสีแบบปรับแต่งได้ตั้งแต่ 0.10 ถึง 1.00 ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิผนังเตา แสดงดังภาพ 36



ภาพที่ 36 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์

3. เครื่องมือวัดน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ

1) เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักและชั่งมวลสำหรับทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยใช้เครื่องชั่งแบบดิจิตอลผลิตภัณฑ์ของ DIGI รุ่น DS-671 สามารถวัดได้ 0.2–30 kg ค่าความละเอียด 0.001 อุณหภูมิใช้งาน 5-40 °C แสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล

4. เครื่องมือวัดอัตราการป้อนอากาศและพัดลมป้อนอากาศ

1) พัดลมป้อนอากาศ

พัดลมป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ใช้พัดลมยี่ห้อ VENZ ขนาด 0.5 HP อัตราการไหลเชิงปริมาตร 7.5-275 m³/h แสดงดังภาพที่ 38



ภาพที่ 38 พัดลมป้อนอากาศ

2) พัดลมดูดแก๊ส (Electric Blower)

พัดลมดูดแก๊สเพื่อกลับมาเผาซ้ำ โดยดูดแก๊สที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จากปากเตา (โซนเผาไหม้ที่ 2) และป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ (โซนเผาไหม้ที่ 2) ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ใช้พัดลมยี่ห้อ Flow Max รุ่น BLOWER-2 ขนาด 2 นิ้ว กระแสไฟ 220 volt กำลังมอเตอร์ 150 watt ความเร็วรอบ 3,000 rpm อัตราการไหลเชิงปริมาตร 120 m³/h แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 พัดลมดูดแก๊ส

2) เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด

การวัดอัตราการป้อนอากาศเข้าเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัดของ BENETECH รุ่น GM 8901 สามารถวัดความเร็วอากาศอยู่ในช่วง ช่วงการวัด 0-45 m/s ความละเอียด $\pm 3\%$ อุณหภูมิช่วงที่ใช้งานอยู่ที่ 0 – 45 °C จะใช้ท่อพีวีซีขนาด 5.08 cm (2 inch) ต่อร่วมกับหน้าแปลนพีวีซี 2 ด้านวางเครื่องวัดความเร็วตรงกลางและประกอบเข้ากับท่ออากาศ และทำการติดตั้งเครื่องมือทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด

5. เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า

1) แคลมป์มิเตอร์ (Clamp meter)

แคลมป์มิเตอร์ ใช้สำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร หรือในระบบ โดยสามารถวัดค่ากระแสได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับสายไฟโดยตรง ใช้เครื่องตรวจวัดกำลังไฟฟ้าชนิดดิจิตอลมัลติมิเตอร์ยี่ห้อ Chauvin Arnoux รุ่น F05 แสดงดังภาพ สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ความถี่และความต้านทาน โดยวัดแรงดันได้ 600 Vac/dc และกระแสได้ 400 Lac/dc



ภาพที่ 41 แคลมป์มิเตอร์

6. เครื่องมือวัดค่าไอเสียของเตาชีวมวล

1) เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบาย

เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบายยี่ห้อ testo 350 เป็นเครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบว่าแก๊สที่ปล่อยออกมาที่ปล่อง มีประสิทธิภาพการเผาไหม้มากหรือน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถวัดได้ออกมาในรูปแบบของตัวเลข และนอกจากจะบอกค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้แล้ว สามารถบอกค่าอื่น ๆ ได้ เช่น %O₂, %CO, %CO₂ (cal) เป็นต้น เหมาะกับการวัดประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ (Boiler) และเตาเผา

(Furnace) มีเซนเซอร์วัดค่าแก๊ส 6 ชนิด คือ O_2 , CO , CO_{low} , NO , NO_{low} , NO_2 , SO_2 , H_2S , CO_2 – NDIR สามารถต่อโพรบได้อุณหภูมิสูงสุด 1,800 องศาเซลเซียส สามารถเก็บและบันทึกข้อมูลได้ สามารถใช้ร่วมกับเครื่องพิมพ์ไร้สาย สามารถพิมพ์ผลทดสอบได้ทันที



ภาพที่ 42 เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบาย

เชื้อเพลิงชีวมวลและการเตรียมเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบ

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบมี 3 ชนิด ได้แก่ ชีวมวลอัดเม็ดจาก ชังข้าวโพด เศษไม้ และฟางข้าว ซึ่งเป็นชีวมวลประเภทวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยมีรายละเอียดคุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลทั้ง 3 ชนิดดังนี้

1. ชังข้าวโพดอัดเม็ด (Cron cop pellet)

เชื้อเพลิงชังข้าวโพดอัดเม็ดที่ใช้ในการทดสอบ เป็นเชื้อเพลิงเหลือทิ้งจากการเกษตร เนื่องจากแต่ละปีจะมีเศษวัสดุเหลือทิ้งประเภท ต้น ตอ ใบ เปลือก และชังข้าวโพด เป็นจำนวนกว่า 3.99 ล้านตัน ที่รอการเผาทำลายในช่วงเดือน มกราคม - มีนาคม ของทุกปี จึงนำชังข้าวโพดที่เหลือจากการกะเทาะเม็ดจากพื้นที่ทำการเกษตรบนที่สูง โดยนำชังข้าวโพดมาตากให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นทำการบดด้วยเครื่องบดหยาบ และนำมาบดด้วยเครื่องบดละเอียดอีกครั้ง หลังจากนั้นทำการร่อนผ่านตะแกรง 0.1 cm ก่อนทำการอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลมของศูนย์วิจัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่น เฉลี่ย $1,152.15 \text{ kg/m}^3$ ค่าความร้อน 13.49 MJ/kg ความชื้น 8.37% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 cm

ความยาวเฉลี่ย 4 cm แสดงดังภาพที่ 43 และผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 13 ก่อนนำเชื้อเพลิงมาทดสอบ ทำการตากแดดเพื่อไล่ความชื้นบางส่วนออกก่อนนำไปเผาทดสอบ



ภาพที่ 43 ชังข้าวโพดอัดเม็ด

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชังข้าวโพดอัดเม็ด

การวิเคราะห์แบบประมาณ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Moisture (%)	ASTM D3302 M-15	8.37
Ash (%)	ASTM D7582-15	13.58
Volatile matter (%)	ASTM D7582-15	65.11
Fixed carbon (%)	ASTM D7582-15	12.94
Net calorific value (MJ/kg)	ASTM D5865-13	13.49
Cross calorific value (MJ/kg)	ASTM D5865-13	14.74

โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของชีวมวลประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลักและมีไนโตรเจน (N) เพียงเล็กน้อยสำหรับผลการวิเคราะห์ของชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพดอัดเม็ด

การวิเคราะห์แบบประมาณ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Carbon (%)	ASTM D5373-08	46.39
Hydrogen (%)	ASTM D5373-08	6.05
Nitrogen	ASTM D5373-08	0.50
Sulphur	ASTM D4239-12	0.01
Oxygen (%)	(plus errors)	40.67

2. เศษไม้อัดเม็ด (Wood pellet)

เชื้อเพลิงเศษไม้อัดเม็ดที่ใช้ในการทดสอบ เป็นเชื้อเพลิงเหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปไม้และผลิตผลิตภัณฑ์จากไม้ โดยเศษไม้มาจากหลายหลายพื้นที่ เช่น โรงงานเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน และอุปกรณ์ที่ทำจากไม้ชิ้นต่าง ๆ ที่เหลือจากการนำไปใช้ประโยชน์ ได้นำเศษไม้ดังกล่าวมาอัดเม็ดเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการแปรรูปให้เป็นพลังงาน โดยนำเศษไม้ตากให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ เพื่อไล่ความชื้น หลังจากนั้นทำการบดด้วยเครื่องบดละเอียดและทำการร่อนผ่านตะแกรง 0.1 cm ก่อนทำการอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลมของศูนย์วิจัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยเชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย $1,201.08 \text{ kg/m}^3$ มีค่าความร้อนอยู่ที่ 16.52 MJ/kg ความชื้น 8.18% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 cm ความยาว 2 cm แสดงดังภาพที่ 44 และผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 11 ก่อนนำเชื้อเพลิงมาทดสอบ ทำการตากแดดเพื่อไล่ความชื้นบางส่วนออกก่อนนำไปเผาทดสอบ



ภาพที่ 44 เศษไม้อัดเม็ด

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของเศษไม้อัดเม็ด

การวิเคราะห์แบบประมาณ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Moisture (%)	ASTM E871-82 (R13)	8.18
Ash (%)	ASTM D1755-15	1.82
Volatile matter (%)	ASTM D7582-10 ^{E1}	73.27
Fixed carbon (%)	ASTM D7582-10 ^{E1}	16.73
Net calorific value (MJ/kg)	ASTM E711-87 (R04)	16.52
Cross calorific value (MJ/kg)	ASTM E711-87 (R04)	17.99

โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของชีวมวลประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลักและมีไนโตรเจน (N) เพียงเล็กน้อยสำหรับการวิเคราะห์ของชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุเศษไม้อัดเม็ด

การวิเคราะห์แบบประมาณ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Carbon (%)	ASTM D5373-08	49.37
Hydrogen (%)	ASTM D5373-08	6.16
Nitrogen	ASTM D5373-08	0.41
Sulphur	ASTM D4239-12	0.02
Oxygen (%)	(plus errors)	41.05

3. ฟางข้าวอัดเม็ด (Straw pellet)

เชื้อเพลิงฟางอัดเม็ด เป็นเชื้อเพลิงเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำการเผาทำลายซึ่งเกิดเป็นปัญหามลพิษทางอากาศ ฟางข้าวรับซื้อจากเกษตรกรในจังหวัดเชียงใหม่ ทำการอัดเม็ดโดยตากฟางข้าวให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ หลังจากนั้นทำการบดด้วยเครื่องบดละเอียดและทำการร่อนผ่านตะแกรง 0.1 cm หลังจากนั้นทำการอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแบบแม่พิมพ์แผ่นกลมของศูนย์วิจัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชื้อเพลิงมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 640 kg/m^3 ค่าความร้อน 15.01 MJ/kg ความชื้น 6.43% มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 cm ความยาวเฉลี่ย 4 cm แสดงดังภาพที่ 45 และผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 15 ก่อนนำเชื้อเพลิงมาทดสอบ ทำการตากแดดเพื่อไล่ความชื้นบางส่วนออกก่อนนำมาเผาทดสอบ



ภาพที่ 45 ฟางข้าวอัดเม็ด

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของฟางข้าวอัดเม็ด

การวิเคราะห์แบบประมาณ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Moisture (%)	ASTM D3302 และ D7582	6.43
Ash (%)	ASTM D7582	11.41
Volatile matter (%)	ASTM D7582	71.52
Fixed carbon (%)	ASTM D7582	10.64
Heating Value (MJ/kg)	ASTM D5865	15.01

โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของชีวมวลประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) เปีงองค์ประกอบหลักและมีไนโตรเจน (N) เพียงเล็กน้อยสำหรับผลการวิเคราะห์ของชีวมวลอัดเม็ดแสดงดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของฟางข้าวอัดเม็ด

การวิเคราะห์แบบประมาณ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Carbon (%)	CHNS/O Analyzer	39.70
Hydrogen (%)	EN 15104	5.12
Nitrogen (%)	EN 15104	0.35
Oxygen (%)	EN 15104	37.91

วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้จะทำการออกแบบพัฒนา สร้าง และทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อใช้งานในครัวเรือน โดยมีรายละเอียดของแผนการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. ทบทวนเอกสารทางวิชาการ และสืบค้นรวบรวมข้อมูล ศึกษาทฤษฎี เทคโนโลยีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

2. ศึกษาตัวแปรที่ผลต่อการใช้พลังงานของเตาแก๊สชีวมวลและเตาแก๊สหุงต้ม โดยใช้เงื่อนไขของการต้มน้ำ

3. ทดสอบการใช้พลังงานของเตาแก๊สหุงต้มพร้อมกับวิเคราะห์สมรรถนะของเตาเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการออกแบบเตาแก๊สชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

4. นำเงื่อนไขที่ได้มาออกแบบห้องเผาไหม้ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงโดยคัดเลือกชีวมวลอัดเม็ดที่ใช้ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว เศษไม้ และซังข้าวโพด

5. จัดเตรียมวัสดุ-อุปกรณ์สำหรับการสร้างห้องเผาไหม้ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

6. สร้างห้องเผาไหม้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและทำการทดสอบหาประสิทธิภาพความร้อนในเบื้องต้น

7. ปรับปรุงห้องเผาไหม้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง และทำการทดสอบ จากเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว เศษไม้ และซังข้าวโพด โดยใช้วิธีการต้มน้ำ ภายใต้สภาวะโหลดต่าง ๆ รวมถึงการศึกษาผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ Primary air อัตราการป้อนอากาศ Secondary air และการใช้แก๊สร้อนบางส่วนป้อนเข้าสู่เตา

8. ทดสอบการใช้งานของเตาแก๊สหุงต้มเพื่อใช้ประเมินสมรรถนะและเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพทางความร้อน เพื่อศึกษาการทำงานดังนี้

- 1) อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
- 2) อัตราการป้อนอากาศ Primary air
- 3) อัตราการป้อนอากาศ Secondary air
- 4) การใช้แก๊สร้อนบางส่วนป้อนเข้าสู่เตา

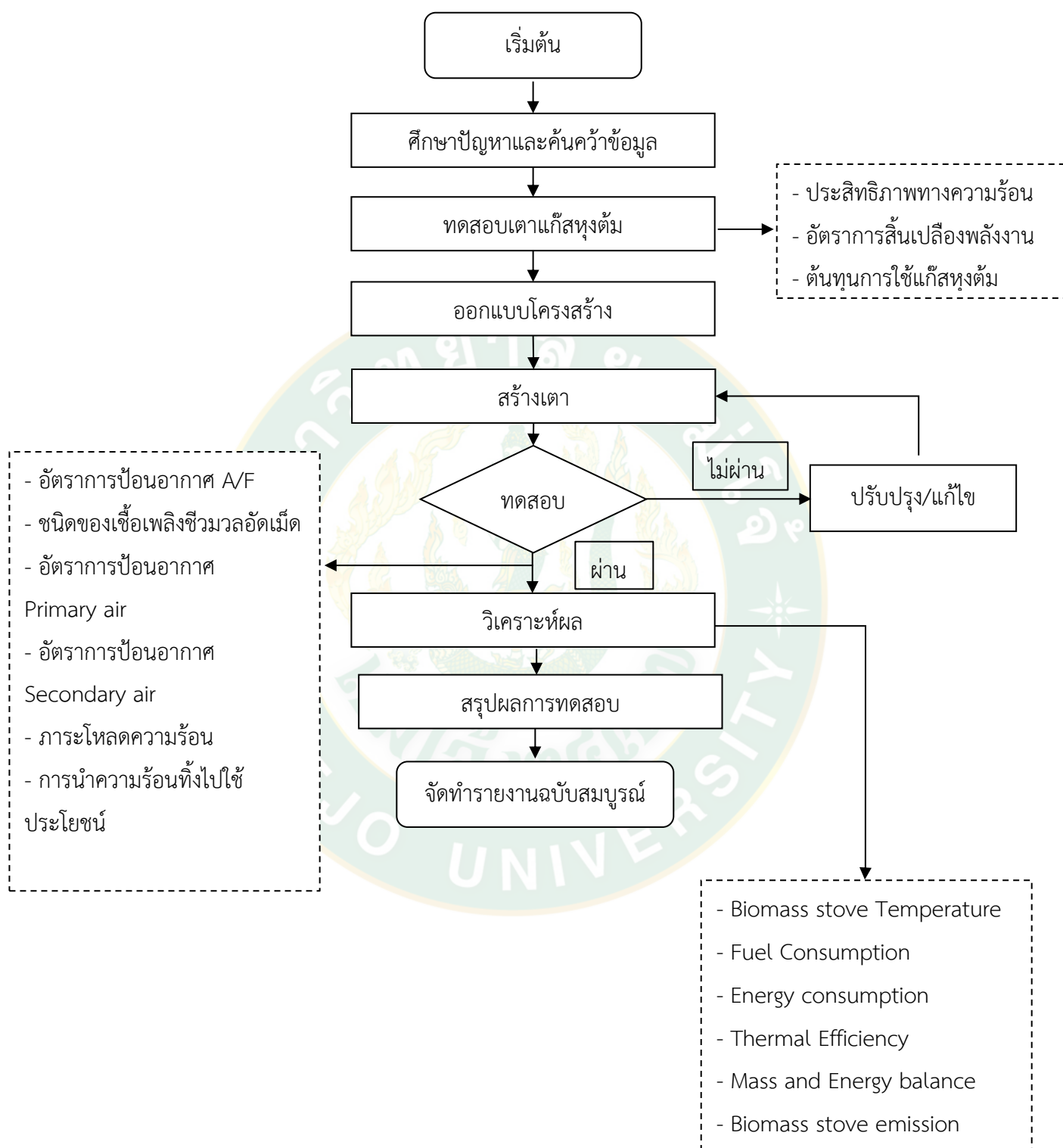
9. ประเมินและวิเคราะห์สมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง เปรียบเทียบกับการใช้เตาแก๊สหุงต้มเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบกับดังนี้

- 1) Biomass stove Temperature
- 2) Fuel Consumption
- 3) Energy consumption
- 4) Thermal Efficiency
- 5) Mass and Energy balance
- 6) Biomass stove emission

10. ประเมินเศรษฐศาสตร์การใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเทียบกับการใช้เตาแก๊สหุงต้ม

11. สรุปผล และจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์และบทความทางวิชาการ

สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการการศึกษา ได้ดังแผนภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ขั้นตอนการดำเนินการงานวิจัย

1. วิธีการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

การออกแบบหรือพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง คือต้องการนำเอาเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาใช้งานกับเตาชีวมวลในระดับครัวเรือนในรูปแบบของเชื้อเพลิงอัดเม็ด การออกแบบเริ่มจากการศึกษาภาระโหลดการใช้งานพลังงานความร้อนของชุมชนจากเตาชีวมวลและแก๊สหุงต้ม คำนวณปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้งาน คำนวณหาปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ออกแบบขนาดและรูปร่างของห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมโดยเน้นการเผาไหม้ในสภาวะสมบูรณ์ ออกแบบชุดป้อนอากาศ มีการนำเอาแก๊สบางส่วนมาเผาไหม้ซ้ำ และออกแบบระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ผลจากการออกแบบห้องเผาไหม้ที่ได้จะเป็นห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอกมีปริมาตร $4,710 \text{ cm}^3$ ระบบป้อนเชื้อเพลิงใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนกับเกียร์ทด โดยใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมอัตราการป้อนโดยทำงานในสภาวะต่อเนื่อง รายละเอียดการออกแบบและสร้างจะนำเสนอในบทที่ 4

2. วิธีการทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

การดำเนินการทดสอบและการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์หาสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง เปรียบเทียบกับแก๊สหุงต้มโดยใช้วิธีการต้มน้ำ (Water boiling test) โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1) เตรียมความพร้อมของเตาชีวมวล โดยปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง และอัตราการป้อนอากาศตามทฤษฎี เตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ในการทดสอบ เครื่องบันทึกอุณหภูมิ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เครื่องชั่งน้ำหนัก

2) นำเชื้อเพลิงที่เตรียมไว้ใส่ลงในห้องป้อนเชื้อเพลิง ทำการจุดเตา จากนั้นนำน้ำใส่ลงในหม้อขนาด 30 cm จำนวน 7 kg เพื่อทำการทดสอบต้มน้ำ

3) ทำการทดสอบการต้มน้ำ โดยบันทึกข้อมูลอุณหภูมิทุก ๆ 5 นาที ซึ่งข้อมูลที่บันทึกได้แก่

- น้ำหนักน้ำเริ่มต้น
- น้ำหนักน้ำสุดท้าย
- น้ำหนักเชื้อเพลิง
- น้ำหนักขี้เถ้า
- อุณหภูมิน้ำ
- อุณหภูมิภายในเตา

- อุณหภูมิภายนอกเตา
- อุณหภูมิปล่องควัน
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
- ความชื้นสัมพัทธ์
- ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้งาน

ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ 2-3 โดยเชื้อเพลิงที่ใช้มี 3 ชนิดได้แก่ เศษไม้อัดเม็ด ชังข้าวโพดอัดเม็ด และ ฟางข้าวอัดเม็ด เมื่อทำการทดสอบการต้มน้ำเสร็จแล้วนำข้อมูลที่ได้ประเมินและวิเคราะห์สมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

3. เงื่อนไขการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการใช้งานเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด สำหรับการทดสอบดังกล่าวจะใช้เชื้อเพลิง 3 ชนิดที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ได้แก่ เศษไม้อัดเม็ด ชังข้าวโพดอัดเม็ด และฟางข้าวอัดเม็ด ซึ่งในการทดสอบมีตัวแปรที่ควบคุม 3 ตัวแปร ดังนี้

1) อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิง

พิจารณาอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ได้จากการคำนวณ (ซึ่งแสดงการคำนวณในภาคผนวก ข) ของเศษไม้อัดเม็ดที่ $A/F = 6.09 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ ชังข้าวโพดอัดเม็ด ที่ $A/F = 5.71 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ และฟางข้าวอัดเม็ดที่ $A/F = 4.74 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$

ทดสอบโดยใช้ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้แก่ 3.0, 5.0 และ 7.5 kg/h

2) อัตราการป้อนอากาศช่อง Primary air

พิจารณาอัตราการป้อนอากาศช่อง Primary air ตามเงื่อนไขอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแต่ละ ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดดังข้อ 1) โดยกำหนดการป้อนอากาศที่ $ER = 0.6, 0.8, 1.0, 1.20$ และ 1.40

3) อัตราการป้อนอากาศช่อง Secondary air

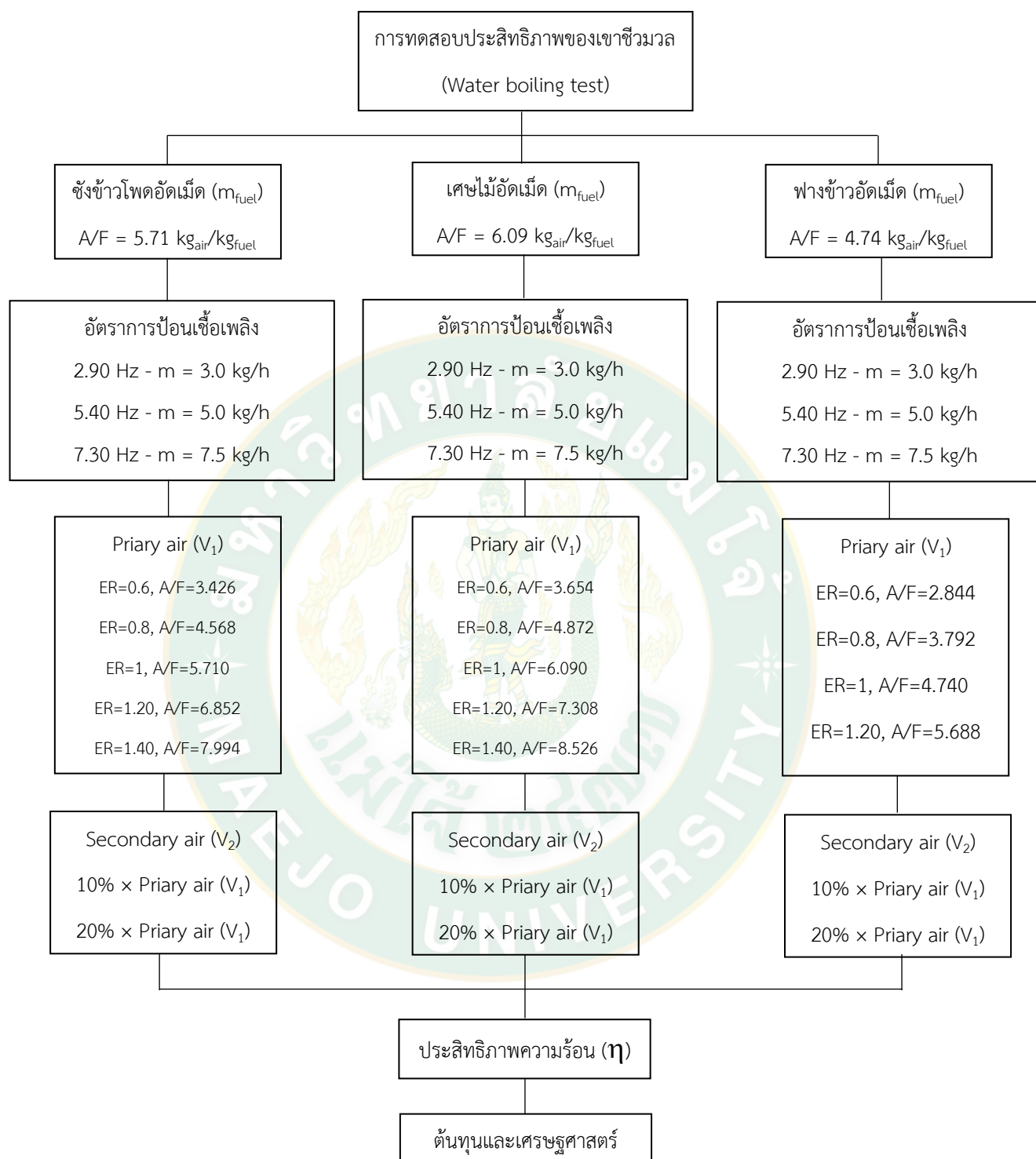
เมื่อทำการทดสอบดังข้อที่ 1) และ 2) แล้วนำเงื่อนไขที่ดีที่สุดมาทำการทดสอบโดยเพิ่มอัตราการป้อนอากาศช่อง Secondary air อีกหนึ่งทาง

โดยเพิ่มอัตราการป้อนอากาศ EGRA 10% และ 20% ของอัตราการป้อนอากาศช่อง Primary air หรือค่า ER ที่ดีที่สุดตามลำดับ

4) การประเมินและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

ในการประเมินและวิเคราะห์ผลการทดสอบ จะทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน ประสิทธิภาพทางความร้อน อุณหภูมิน้ำเดือด สมดุลมวลและพลังงานที่ใช้งานของเตา การปลดปล่อยมลภาวะ และการวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์





ภาพที่ 47 วิธีการและขั้นตอนการทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

4. วิธีการทดสอบสมรรถนะเตาแก๊สหุงต้ม

การทดสอบสมรรถนะของเตาแก๊สหุงต้มด้วยวิธีการต้มน้ำ โดยทำการบันทึกค่าทุก ๆ 5 นาที ซึ่งข้อมูลที่บันทึกได้แก่

- น้ำหนักน้ำเริ่มต้น
- น้ำหนักน้ำสุดท้าย
- น้ำหนักแก๊ส LPG ก่อนทำการทดสอบ
- น้ำหนักแก๊ส LPG หลังทำการทดสอบ
- อุณหภูมิน้ำ
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
- ความชื้นสัมพัทธ์

เมื่อทำการทดสอบการต้มน้ำเสร็จแล้วนำข้อมูลที่ได้ประเมินและวิเคราะห์อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน และประสิทธิภาพทางความร้อน

ตารางที่ 17 สรุปขั้นตอนการทดสอบของเตาแต่ละชนิด

ขั้นตอน	เตาชีวมวลแบบดั้งเดิม	LPG	เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง
1. ชั่งน้ำหนักน้ำเริ่มต้น	✓	✓	✓
2. ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงเริ่มต้นและสุดท้าย	✓	✓	✓
3. เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาชีวมวล	ซังข้าวโพดอัดเม็ด 3 kg/h เศษไม้อัดเม็ด 3.2 kg/h		ซังข้าวโพดอัดเม็ด เศษไม้อัดเม็ด ฟางข้าวอัดเม็ด ที่ 3.0, 5.0 และ 7.5 kg/h
4. ขนาดเชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาชีวมวล	ซังข้าวโพดอัดเม็ด 0.6 cm เศษไม้อัดเม็ด 0.6 cm		ซังข้าวโพดอัดเม็ด 0.6 cm เศษไม้อัดเม็ด 0.6 cm ฟางข้าวอัดเม็ด 0.6 cm
5. ระยะเวลาในการทดสอบ, hr	1.5	1.5	1.5

ขั้นตอน	เตาชีวมวลแบบดั้งเดิม	LPG	เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง
6. อัตราการไหลของอากาศ			ER = 0.6, 0.8, 1.0, 1.20 และ 1.40
7. บันทึกเวลาที่น้ำเริ่มเดือด	✓	✓	✓
8. ชั่งน้ำหนักน้ำที่สุดท้าย	✓	✓	✓
9. ชั่งปริมาณถ่าน	✓		✓
10. วัดปริมาณไฟฟ้า			✓
11. วิเคราะห์สมรรถนะ	✓	✓	✓
12. วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์	✓	✓	✓

5. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การใช้งานเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องทำการประเมินต้นทุนการผลิตความร้อน และวิเคราะห์ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์ เพื่อหาความคุ้มค่าด้านการใช้งานเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยใช้สมการในบทที่ 2 (สมการที่ 50-53) รายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การประเมินต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวล

1.1 ต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานจำเพาะ (Specific Cost Consumption: SCC)

2. การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวล

2.1 วิธีการประเมินผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value : NPV)

2.2 วิเคราะห์ผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR)

2.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การคำนวณการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่สามารถรองรับการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดในระดับครัวเรือน เพื่อใช้ในการประกอบอาหารและลดการใช้น้ำมันแก๊สซิงค์ เชื้อเพลิงที่ใช้ในการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถหาได้ง่ายตามพื้นที่ เช่น ช้างข้าวโพด ฟางข้าว และเศษไม้ โดยผ่านกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงเพื่อใช้ในการใช้งานและจัดเก็บ หลักการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงนั้น จะทำการออกแบบให้เตามีประสิทธิภาพในการเผาไหม้ที่ดีขึ้น และสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่อง โดยใช้หลักการของการเผาไหม้โดยตรงร่วมกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความร้อนที่สูงที่สุด การออกแบบใช้หลักการคำนวณอ้างอิงตามการออกแบบตามแบบเตาชีวมวลกลีบแบบอินเวอร์ตดาวน์ดราฟ (Inverted downdraft biomass stove) (Belonio A.T. 2005) มีตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ 2 ตัวแปร คือ ขนาดของห้องเผาไหม้ และเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ การออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงนี้ได้ทำการออกแบบภายใต้เงื่อนไขความต้องการ การใช้งานเตาชีวมวลในระดับครัวเรือน โดยได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การใช้งานเตาชีวมวลตามความต้องการ

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่	หน่วย
Q_{fuel}	ปริมาณความร้อนที่ต้องการ	30	kW
m_w	น้ำหนักน้ำ	7	kg
t_b	เวลาในการต้มน้ำเดือด	10	Min
t_{Total}	เวลาในการต้มน้ำต่อครั้ง	90	Min

ตารางที่ 19 เงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

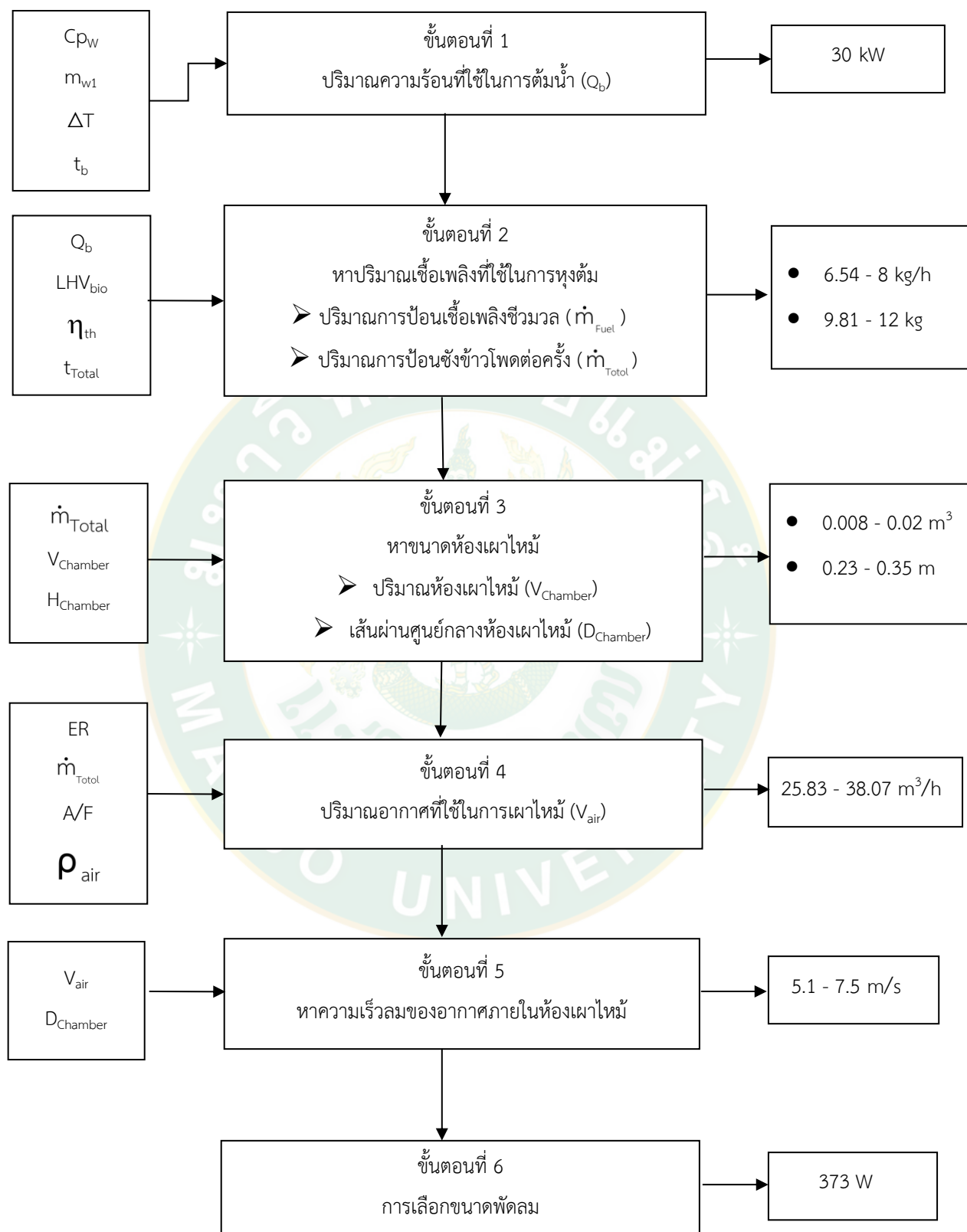
สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่	หน่วย
η_{th}	ประสิทธิภาพเตาชีวมวล	30	%
m_{fuel}	น้ำหนักเชื้อเพลิง	3, 5, 7.5	Kg/h
C_{pw}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	4.186	KJ/kg·K
$LHV_{Corncob}$	ค่าความร้อนของซังข้าวโพด	14,740	KJ/kg
$LHV_{Wood chip}$	ค่าความร้อนของเศษไม้	16,520	KJ/kg
$LHV_{Rice straw}$	ค่าความร้อนของฟางข้าว	15,010	KJ/kg
$D_{Chamber}$	เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้	0.20	m
$H_{Chamber}$	ขนาดความสูงของห้องเผาไหม้	0.15	m
ρ_{Wood}	ความหนาแน่นของเศษไม้	1,201.08	kg/m ³
$\rho_{Cron cob}$	ความหนาแน่นของซังข้าวโพด	1,152.15	kg/m ³
$\rho_{rice straw}$	ความหนาแน่นของฟางข้าว	640	kg/m ³
ρ_{air}	air density	1.20	kg/m ³
$A/F_{Corncob}$	อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงซังข้าวโพด	5.71	kg _{air} /kg _{fuel}
$A/F_{Wood chip}$	อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงเศษไม้	6.09	kg _{air} /kg _{fuel}
$A/F_{Rice straw}$	อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงฟางข้าว	4.74	kg _{air} /kg _{fuel}
ER	อัตราส่วนสมมูล	1	-

ในการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด มีขั้นตอนในการออกแบบทั้งหมด 6 ขั้นตอน ประกอบด้วย

1. ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ
2. หาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้ม
3. หาขนาดห้องเผาไหม้
4. ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้
5. หาความเร็วลมของอากาศภายในห้องเผาไหม้
6. การเลือกขนาดพัดลม

ไดอะแกรมขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดแสดงดัง
ภาพที่ 48 และรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนแสดงในรายละเอียดการคำนวณการออกแบบ
เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด





ภาพที่ 48 ไดอะแกรมการออกแบบเตาชีวมวล

รายละเอียดการคำนวณการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

โดยเบื้องต้นเป็นการคำนวณการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยใช้เชื้อเพลิงฟางข้าวอัดเม็ด ส่วนกรณีการใช้เชื้อเพลิงจากซังข้าวโพดอัดเม็ด และเศษไม้อัดเม็ดจะแสดงผลการคำนวณในภาคผนวก ข ขั้นตอนการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหุงต้ม

ขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะต้องทราบถึงค่าความต้องการพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหุงต้ม โดยค่าความต้องการพลังงานความร้อนสามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาดของห้องเผาไหม้ เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบเตาเพื่อรองรับปริมาณความร้อนที่ 30 kW

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้ม

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำจากขั้นตอนที่ 1 สามารถคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้มเพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ด ได้แก่ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ (Q_b) โดยกำหนดปริมาณความร้อนที่ต้องการออกแบบ 30 kW ค่าความร้อนของฟางข้าวอัดเม็ด (LHV_{bio}) มีค่าความร้อนเท่ากับ 15,010 kJ/kg การคำนวณหาปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 25 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ด } (\dot{m}_{\text{fuel, Rice straw}}) &= \frac{Q_b}{LHV_{bio}} \\ &= \frac{30 \text{ kW}}{15,010 \text{ kJ/kg}} \\ &= 3,600 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ด } (\dot{m}_{\text{fuel, Rice straw}}) &= 7.195 \text{ kg/h} \\ \text{ในส่วนของกรณีการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด } (\dot{m}_{\text{fuel, Corn cob}}) &= 8 \text{ kg/h} \\ \text{และเศษไม้อัดเม็ด } (\dot{m}_{\text{fuel, Wood chip}}) &= 6.54 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ดในระยะเวลา 1 h เสร็จสิ้นแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ดต่อการใช้งาน 1 ครั้ง ได้จากปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ด ($\dot{m}_{\text{fuel}}$) และระยะเวลาในการต้มน้ำ (t_{Total}) ซึ่งจากความต้องการการใช้งานเตาหุงต้มในงานวิจัยนี้มีความต้องการในการต้มน้ำ 90 min ต่อครั้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 26 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ดต่อครั้ง (m}_{\text{Total, Rice straw}}) &= \dot{m}_{\text{fuel}} \times t_{\text{Total}} \quad \text{สมการที่ 42} \\ &= \frac{7.195 \text{ kg/h} \times 90 \text{ min}}{60 \text{ min/h}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ด (m}_{\text{Total, Rice straw}}) &= 10.79 \text{ kg} \\ \text{ในส่วนของการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด (m}_{\text{Total, Corncob}}) &= 12 \text{ kg} \\ \text{และเศษไม้อัดเม็ด (m}_{\text{Total, Wood chip}}) &= 9.81 \text{ kg} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำและปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ดเพื่อให้ได้ค่าปริมาณพลังงานความร้อนตามที่ต้องการแล้ว สามารถคำนวณหาขนาดของห้องเผาไหม้ได้จากปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ด ($m_{\text{Total, Rice straw}}$) และความหนาแน่นฟางข้าวอัดเม็ด ($\rho_{\text{Rice straw}}$) เท่ากับ 640 kg/m^3 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 27 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณห้องเผาไหม้ (V}_{\text{Chamber, Rice straw}}) &= \frac{m_{\text{Total}}}{\rho_{\text{Ap}}} \\ &= \frac{10.79 \text{ kg}}{640 \text{ kg/m}^3} \\ \text{ปริมาณห้องเผาไหม้ (V}_{\text{Chamber, Rice straw}}) &= 0.02 \text{ m}^3 \\ \text{ในส่วนของการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด (V}_{\text{Chamber, Corncob}}) &= 0.01 \text{ m}^3 \\ \text{และเศษไม้อัดเม็ด (V}_{\text{Chamber, Wood chip}}) &= 0.008 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณปริมาณของห้องเผาไหม้ (V_{Chamber}) และกำหนดให้ห้องเผาไหม้มีความสูง 0.2 m สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ ($D_{\text{Chamber, Rice straw}}$) ได้จากสมการที่ 28 ดังต่อไปนี้

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D}_{\text{Chamber, Rice straw}}) = \left(\frac{V_{\text{Chamber}}}{H_{\text{Chamber}} \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5}$$

$$= \left(\frac{0.05 \text{ m}^3}{0.20 \text{ m} \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้	(D _{Chamber, Rice straw})	=	0.35 m
ในส่วนของการใช้ขี้ข้าวโพดอัดเม็ด	(D _{Chamber, Corncob})	=	0.25 m
และเศษไม้อัดเม็ด	(D _{Chamber, Wood chip})	=	0.23 m

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมต่อขนาดของห้องเผาไหม้และปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากหากมีอัตราการป้อนอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดควันระหว่างการใช้งานได้ โดยในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{V}_{\text{air}}$) เลือกใช้ค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1 ในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ $4.74 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ และค่าความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ $1.20 \text{ kg}/\text{m}^3$ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{V}_{\text{air}}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 29 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ } (\dot{V}_{\text{air, Rice straw}}) &= \frac{\text{ER} \times \dot{m}_{\text{fuel}} \times \text{A/F}}{\rho_{\text{air}}} \\ &= \frac{1 \times 7.195 \text{ kg/h} \times 4.74 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}}{1.20 \text{ kg}/\text{m}^3} \\ \text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ } (\dot{V}_{\text{air, Rice straw}}) &= 28.42 \text{ m}^3/\text{h} \\ \text{ในส่วนของการใช้ขี้ข้าวโพดอัดเม็ด } (\dot{V}_{\text{air, Corncob}}) &= 38.07 \text{ m}^3/\text{h} \\ \text{และเศษไม้อัดเม็ด } (\dot{V}_{\text{air, Wood chip}}) &= 33.19 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาความเร็วลมของอากาศภายในห้องเผาไหม้

เมื่อทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_{Chamber}) และปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{V}_{\text{air}}$) ที่เหมาะสมต่อขนาดของเตาชีวมวล โดยพื้นที่ (A) ของท่อป้อนลมเท่ากับ 0.00141 m^2 สามารถคำนวณหาความเร็วลมได้จากสมการที่ 30 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วลม } (V_{\text{air, Rice straw}}) &= \frac{\dot{V}_{\text{air}}}{A} \\ &= \frac{28.42 \text{ m}^3/\text{h}}{0.00141 \text{ m}^2 \times 3600 \text{ s}} \end{aligned}$$

ความเร็วลม	($V_{\text{air, Rice straw}}$)	=	5.6 m/s
ในส่วนของการใช้ขี้ข้าวโพดอัดเม็ด	($V_{\text{air, Corncob}}$)	=	7.5 m/s
และเศษไม้อัดเม็ด	($V_{\text{air, Wood chip}}$)	=	6.54 m/s

ขั้นตอนที่ 6 การเลือกขนาดพัดลม

จากค่าปริมาณอากาศสามารถนำไปเลือกขนาดของพัดลมที่มีความเหมาะสมกับเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยใช้ข้อมูลจากการคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงสูงสุดของช่วงการคำนวณคือ $38.07 \text{ m}^3/\text{h}$ จึงได้ทำการเลือกพัดลมที่ใช้ไฟ 220 V ขนาด 373 W ซึ่งมีอัตราการป้อนลมเฉลี่ย $7.5\text{-}275 \text{ m}^3/\text{h}$ ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการลมที่ผลิตได้นำมาใช้งานกับเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่มีขนาดห้องเผาไหม้ (V_{Chamber}) เท่ากับ 0.02 m^3 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D_{Chamber}) เท่ากับ 0.35 m

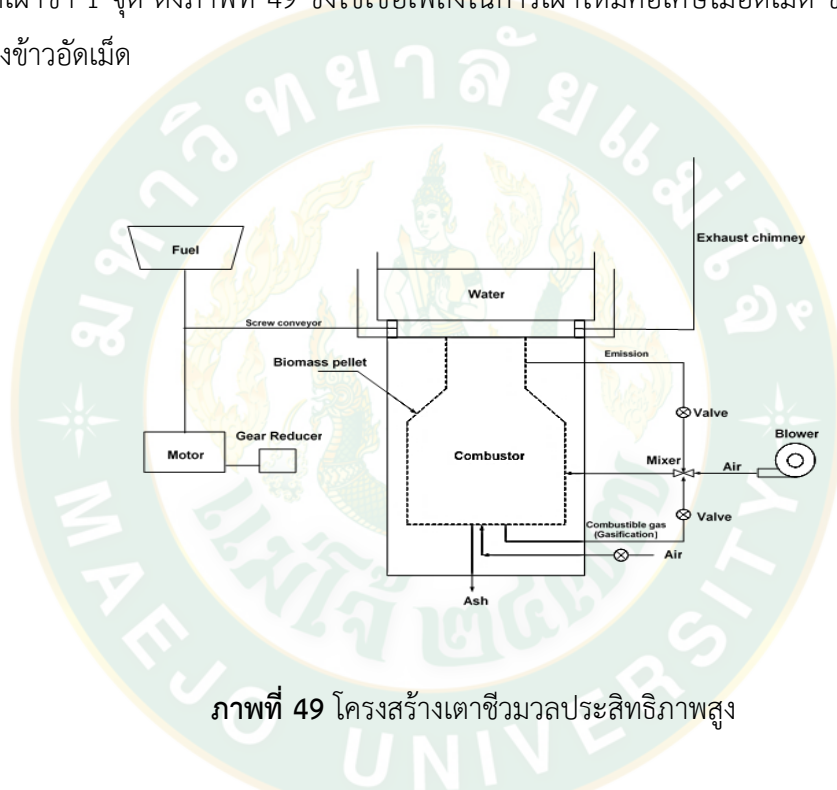
จากขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลแบบไร้ควันทั้ง 6 ขั้นตอนข้างต้น สามารถนำมาสรุปผลการออกแบบได้ดังตารางที่ 20 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 20 สรุปขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

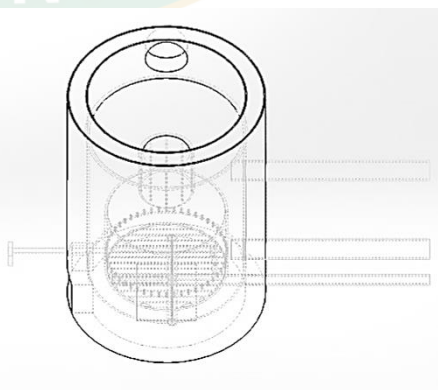
1.	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ (Q_b)	10-30	kW
2.	ปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล ($\dot{m}_{\text{fuel}}$)	2.90 - 8	kg/h
3.	ปริมาณการป้อนขี้ข้าวโพดต่อครั้ง (m_{Total})	9.81 - 12	Kg
4.	ปริมาตรห้องเผาไหม้ (V_{Chamber})	0.008-0.02	m^3
5.	เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D_{Chamber})	0.35	m
6.	ความสูงของห้องเผาไหม้ (H_{Chamber})	0.20	m
7.	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{V}_{\text{air}}$)	28.42-40.60	m^3/h
8.	ความเร็วลม (v_{air})	5.6-8	m/s
9.	เลือกขนาดพัดลม 373 W	373	W

การสร้างระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

จากการคำนวณการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด จะทำการเลือกค่าที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในช่วงการคำนวณของเชื้อเพลิง 3 ชนิดในการนำมาสร้างระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ซึ่งผลการออกแบบเตาเลือกใช้รูปทรงกระบอกและป้อนเชื้อเพลิงเพื่อใช้งานอย่างต่อเนื่อง โดยออกแบบเตาเป็น 3 ชั้น โดยชั้นในสุดคือห้องเผาไหม้ ชั้นกลางคือช่องทางเดินแก๊ส และชั้นนอกสุดคือฉนวนกันความร้อนและเสื่อนอกของเตา ห้องเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 m ความสูงของเตา 0.20 m มีการเติมอากาศเข้าห้องเผาไหม้ 2 จุด และมีการดูดแก๊สจากปากเตาเพื่อกลับมาเผาซ้ำ 1 จุด ดังภาพที่ 49 ซึ่งใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้คือเศษไม้อัดเม็ด ชังข้าวโพดอัดเม็ด และฟางข้าวอัดเม็ด



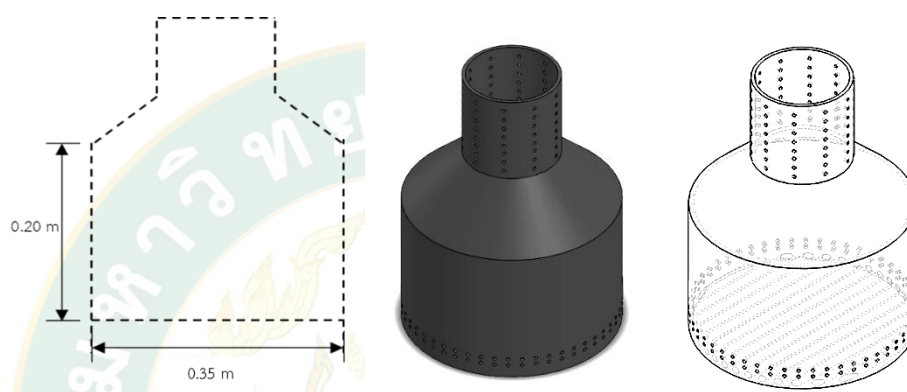
ภาพที่ 49 โครงสร้างเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 50 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

1. การสร้างห้องเผาไหม้

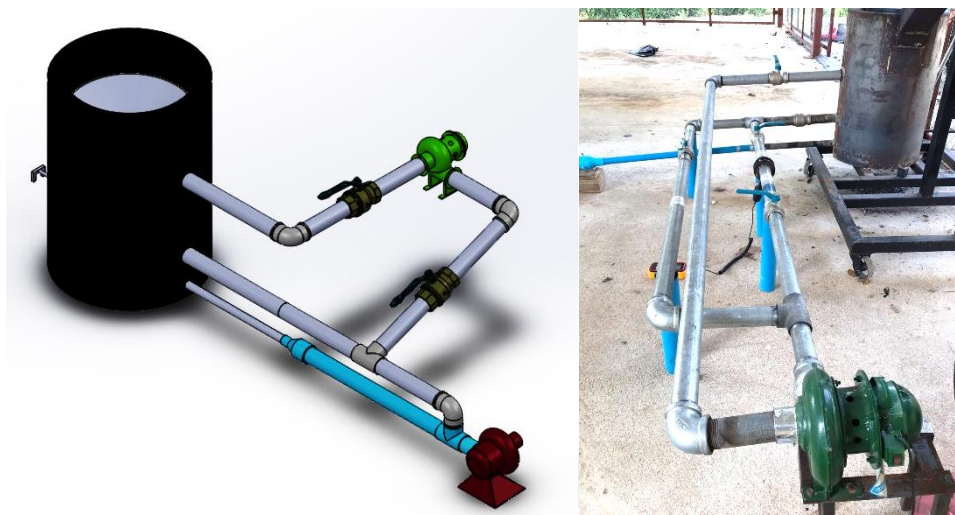
ห้องเผาไหม้ของเตาชีวมวลถูกสร้างขึ้นด้วยแผ่นเหล็กหนาขนาด 5 mm ซึ่งห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเจาะรูขนาด 5 mm รอบปากเตาและด้านล่างเตาเพื่อเป็นช่องให้อากาศไหลเข้าและไหลออกห้องเผาไหม้ โดยตัวห้องเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 m มีความสูง 0.20 m ดังภาพที่ 51



ภาพที่ 51 ลักษณะห้องเผาไหม้เตาชีวมวล

2. การจัดสร้างระบบเติมอากาศและระบบดูดแก๊ส

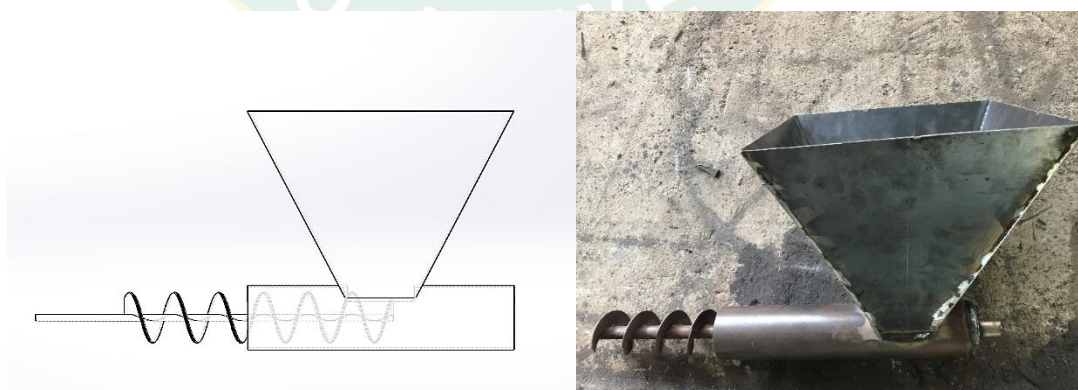
โดยในการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด ได้ทำการออกแบบบริเวณด้านข้างให้มีท่อเติมอากาศขนาด 1.5 inch จำนวน 2 ท่อ และขนาด 1 inch จำนวน 1 ท่อ เติมอากาศโดยใช้พัดลมขนาด 2 inch ใช้ไฟ 220 Volt ขนาดกำลังพัดลม 373 W ใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบการหมุนของพัดลม สามารถป้อนอัตราการไหลของอากาศได้ 7.5-275 m³/h และพัดลมดูดแก๊สขนาด 2 inch ใช้ไฟ 220 volt ขนาดกำลังพัดลม 150 W ทำการติดตั้งวาล์วเปิดปิด ดังภาพที่ 52



ภาพที่ 52 ระบบเติมอากาศและระบบดูดแก๊สของเตาชีวมวล

3. จัดสร้างระบบป้องกันเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง

ได้ทำการออกแบบ ชุดป้องกันเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องมีช่องใส่เชื้อเพลิงสำหรับเก็บและพักก่อนปล่อยเข้าสู่เตา โดยจะลำเลียงเชื้อเพลิงด้วยสกรูที่ใช้กำลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์ เป็นอุปกรณ์สำหรับขนถ่ายเชื้อเพลิงเพื่อให้มีการป้องกันเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วย สกรูลำเลียงที่มีขนาด 2 inch ระยะพิตช์ของใบเกลียว 3 cm ท่อลำเลียงยาว 30 cm ดังภาพที่ 53 ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และเกียร์ทดขนาด 0.5 hp ควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอินเวอร์เตอร์ปรับความถี่กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบขนาด 4.2A ใช้ไฟ 220 V ดังภาพที่ 54



ภาพที่ 53 ฮี้อปเปอร์สำหรับเก็บและพักเชื้อเพลิงก่อนปล่อยเข้าสู่เตา



ภาพที่ 54 ระบบป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องด้วยสกรูลำเลียงของเตาชีวมวล

4. การประกอบและติดตั้งเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การประกอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด ทำการนำส่วนประกอบต่าง ๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งมีอยู่ 3 ส่วนหลัก ๆ คือห้องเผาไหม้ ชุดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง และชุดเติมอากาศ เตาชีวมวลมีรูปเป็นทรงกระบอกผนัง 3 ชั้น โดยมีขนาดความสูง 69.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 cm ผนังเตาใช้แผ่นเหล็กหนา 1.5 mm ม้วนเป็นทรงกระบอก และฉาบฉนวนความร้อนด้วยดินเหนียวกับเกล็ดดำที่อัตราส่วน 1:1 ความหนา 1 inch



ภาพที่ 55 ฉนวนกันความร้อนจากวัสดุธรรมชาติ



ภาพที่ 56 การประกอบและติดตั้งเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยในบทนี้เป็นผลการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยชีวมวลที่ใช้ในการศึกษา คือ เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากซังข้าวโพด เศษไม้ และฟางข้าว ทำการทดสอบโดยวิธีการต้มน้ำ (Water boiling test, WBT) เพื่อศึกษาผลของค่าตัวแปร อัตราส่วนสมมูล อัตราการป้อนเชื้อเพลิง ชนิดเชื้อเพลิง อัตราการป้อนอากาศ EGRA ที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง รวมไปถึงการศึกษาลักษณะของมลพิษไอเสีย การสมดุลมวลสารและพลังงาน ท้ายสุดจะเป็นการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน ซึ่งรายละเอียดคำนวณแสดงในภาคผนวก ข และนำเสนอผลดังต่อไปนี้

4.1 ตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

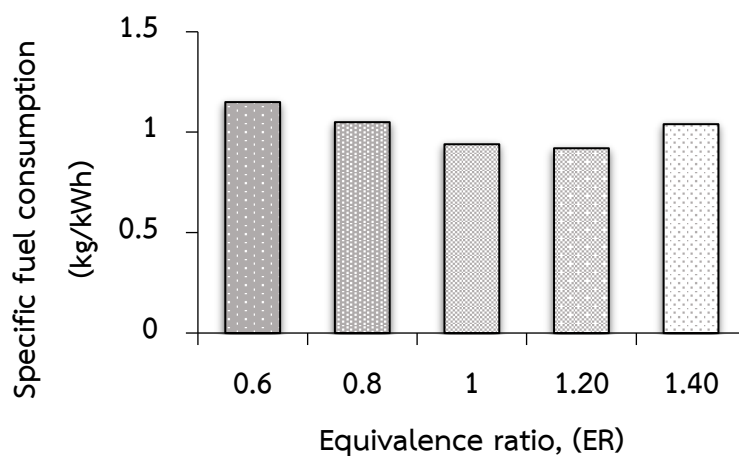
การทดสอบผลของตัวแปร ที่มีทำให้สมรรถนะการทำงานของเตาชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงขึ้น นั้น โดยจะทำการปรับการป้อนอากาศต่ออัตราส่วนสมมูลจำนวน 5 ค่า ได้แก่ 0.6, 0.8, 1, 1.20 และ 1.40 ทำการทดสอบกับการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 อัตราการป้อน ได้แก่ 3 kg/h, 5 kg/h

และ 7 kg/h ของเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด 3 ชนิด เมื่อทำการทดสอบครบกระบวนการแล้ว จะนำผลมาวิเคราะห์หาค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ประสิทธิภาพความร้อน และอุณหภูมิน้ำเดือดของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง รายละเอียดผลการทดสอบมีดังต่อไปนี้

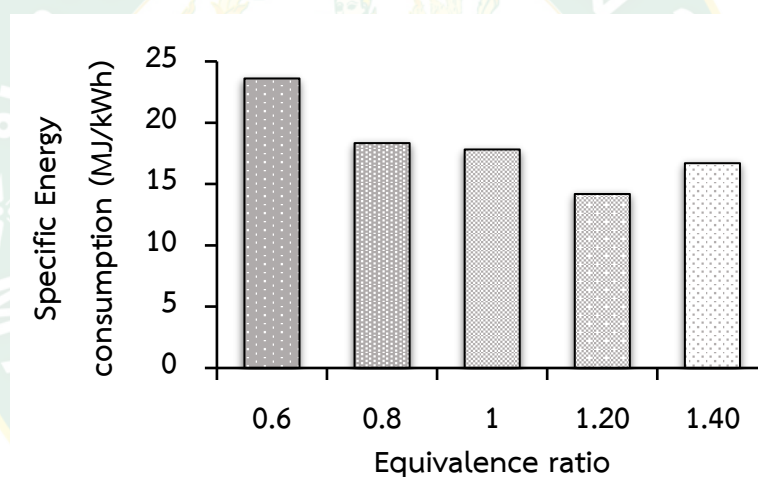
4.1.1 ผลของการปรับอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ภาพที่ 57 แสดงผลของการปรับอัตราส่วนผสม ที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด ผลการทดสอบพบว่า การปรับอัตราส่วนผสมที่ต่ำและสูงเกิน ทฤษฎีเกินไปส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดเพิ่มสูงขึ้น (ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และคณะ, 2558) ขณะเดียวกันกับการปรับอัตราส่วนผสม 1.20 ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด 0.92 kg/kWh เมื่อเทียบกับการปรับอัตราส่วนผสมทางทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงไม่ทั่วถึงกัน ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ สำหรับเชื้อเพลิงซังนั้นจำเป็นต้องป้อนอากาศในสภาวะอากาศเกินพอ (Excess air) จากทฤษฎีเล็กน้อย (Gaba and lordache, 2005) แต่อย่างไรก็ตามการปรับอัตราส่วนผสมเกิน 1.20 จะทำให้แนวโน้มอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอากาศเกินพอกเกินไปทำให้เกิดความร้อนสัมผัสเพิ่มขึ้น การสูญเสียความร้อนสัมผัสไปกับแก๊สไอเสียจะมีค่าสูงขึ้นที่อุณหภูมิของแก๊สสูงขึ้น (Bhattu et al., 2019) ส่งผลให้ใช้พลังงานในการการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จึงทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นเช่นกัน การปรับอัตราส่วนผสมที่ 0.6 ให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุด 1.15 kg/kWh ในขณะที่การปรับอัตราส่วนผสมที่ 1.4 ให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง เท่ากับ 1.04 kg/kWh

ขณะเดียวกันในด้านของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด เมื่อใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง พบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีแนวโน้มสอดคล้องกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Jagger et al., 2018) แสดงดังภาพที่ 58 โดยการปรับอัตราส่วนผสม 1.20 ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดคิดเป็น 14.19 MJ/kWh ในขณะที่การปรับอัตราส่วนผสมอัตราส่วนผสม 0.6 ให้ค่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงสุด 23.61 MJ/kWh



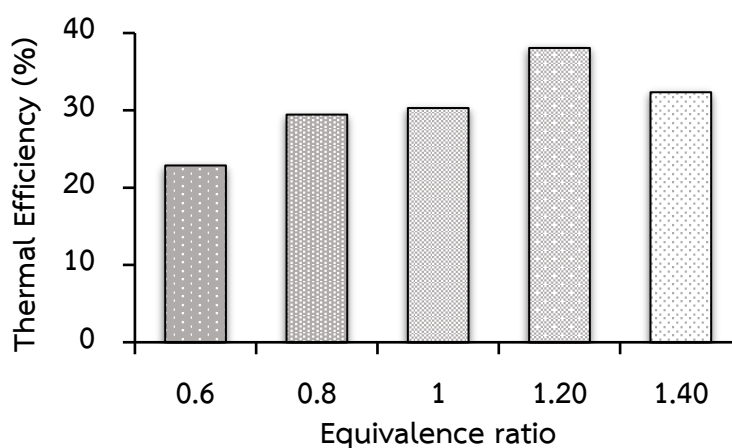
ภาพที่ 57 แสดงผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ



ภาพที่ 58 ผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่ออัตราการใช้พลังงานจำเพาะ

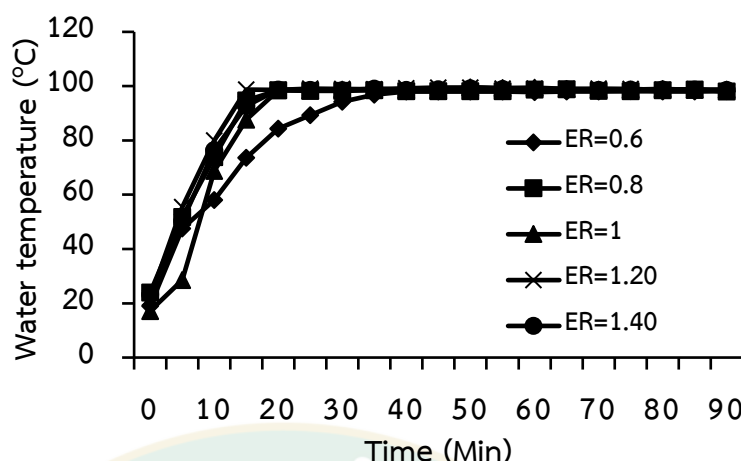
ภาพที่ 59 แสดงผลของการปรับอัตราส่วนสมมูล ที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน ผลการทดสอบพบว่าที่การปรับอัตราส่วนสมมูล 1.20 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 38.07 เนื่องจากการปรับอากาศส่วนเกินมากกว่าทฤษฎี ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีค่าสูงขึ้น (ธนาชาติ มหาวิน, 2560) และเมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลมากกว่า 1.20 ส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนลดลง เนื่องจากการป้อนอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงส่งผลให้พลังงานความร้อนถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศไปกับแก๊สไอเสีย ซึ่งนำไปสู่การลดลงของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการเผาไหม้ (Ghia and Gaba, 2000) ดังนั้นการควบคุมปริมาณอากาศเกินพอจึงมีความสำคัญ ต่อปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้

ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล (นิวัฒน์ เกตุชาติ และคณะ, 2559) และเมื่อเปรียบเทียบกับเตาชีวมวลกระทรวงพลังงานที่นำมาพัฒนา พบว่ามีประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 64.16



ภาพที่ 59 แสดงผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล

ภาพที่ 60 แสดงผลของการปรับอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่ออุณหภูมิการเดือดของน้ำ ค่อนข้างเสถียร และที่การปรับอัตราส่วนสมมูล 1.20 มีค่าอุณหภูมิการเดือดของน้ำสูงกว่าการปรับอัตราส่วนสมมูล 0.6 เกิดจากปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น นำไปสู่การถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในการเดือดได้เร็วขึ้น (ณัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ, 2551) โดยอุณหภูมิการเดือดของน้ำอยู่ในช่วง 98.2-99.6 °C ดังนั้นที่การปรับอัตราส่วนสมมูลในช่วง 1.20-1.40 ให้ระยะเวลาการเดือดของน้ำเร็วกว่า 10-15 min เนื่องจากปฏิกิริยาในชั้น Combustion zone เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นเมื่อปริมาณออกซิเจนเพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้น เกิดการส่งถ่ายความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ให้แก่ น้ำ ส่งผลให้การเดือดของน้ำสูงขึ้น (Ramirez et al., 2007)



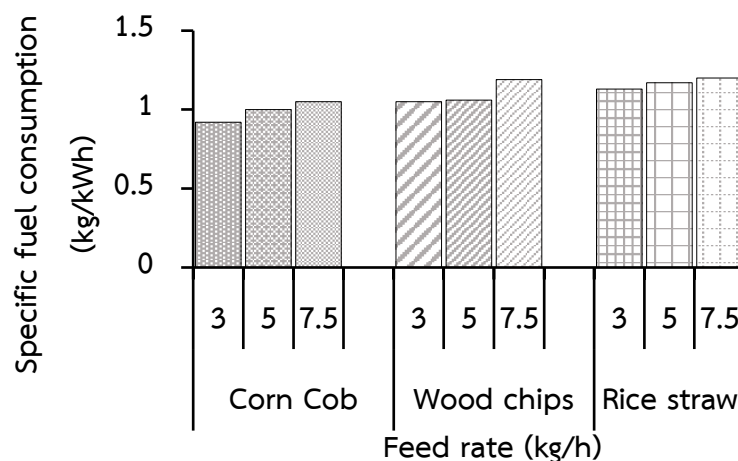
ภาพที่ 60 ผลของอัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือด

4.1.2 การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

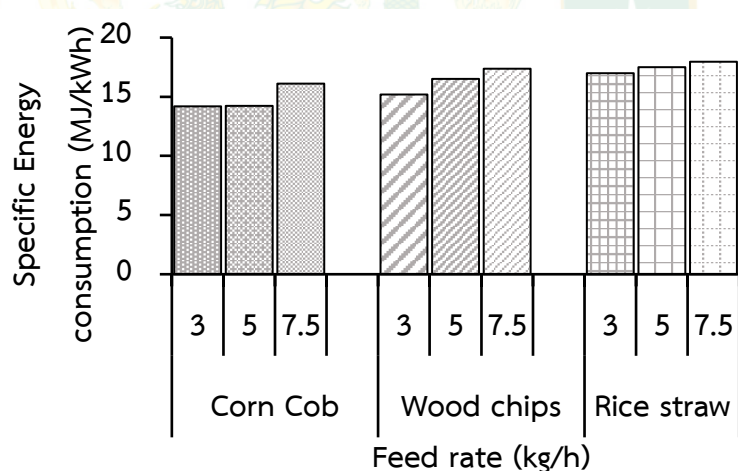
ภาพที่ 61 แสดงผลการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง พบว่าที่การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 kg/h ของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำกว่า เมื่อเทียบกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5 kg/h และ 7.5 kg/h โดยเฉพาะไม่ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด 0.92 kg/kWh เนื่องจากเชื้อเพลิงแข็งถูกเผาไหม้ ภายใต้อากาศส่วนเกินที่เหมาะสม ทำให้เตารักษาอุณหภูมิของเปลวไฟที่ปล่อยออกมาในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสของเชื้อเพลิงแข็ง ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนต่ำ ส่งผลให้ความต้องการเชื้อเพลิงในการผลิตความร้อนของเตาลดลง (Suresh et al., 2016) อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงส่งผลให้เกิดการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น ทำให้ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงขึ้นเช่นกัน (กฤษกร รับสมบัติ, 2555)

ขณะเดียวกันในด้านอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่าการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเชื้อเพลิงอัดเม็ดมีแนวโน้มสอดคล้องกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ โดยที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 kg/h ซึ่งข้าวโพดให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด 14.19 MJ/kWh แสดงดังภาพที่ 62 เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงมีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงหากใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่เหมาะสม จะทำให้การผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเกิดการเผาไหม้ทั่วถึงกัน จึงทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (ปรัชญา, 2555) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อเพลิงที่มากขึ้น ทำให้การควบคุมอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิง เพื่อการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จึงเป็นเรื่องที่ยาก (สมชาติ โสภณธนฤทธิ์ และคณะ, 2558) และเมื่อเทียบ

กับการใช้งานเตาแก๊สหุงต้ม พบว่าการทำงานของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าร้อยละ 7 เท่า (ธนชาติ มหาวิน, 2560)



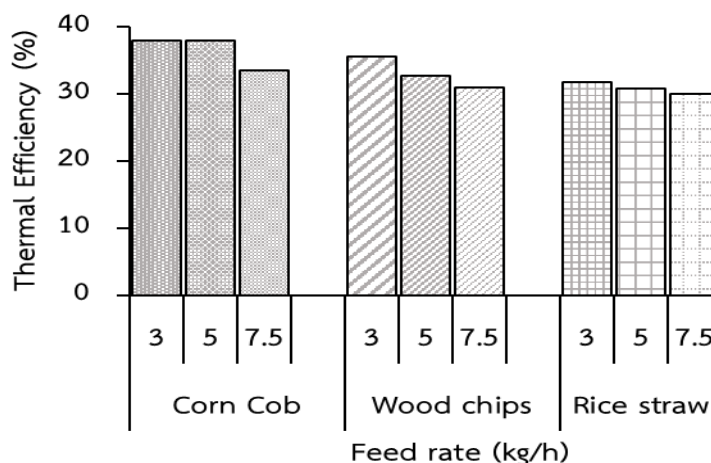
ภาพที่ 61 การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ



ภาพที่ 62 การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

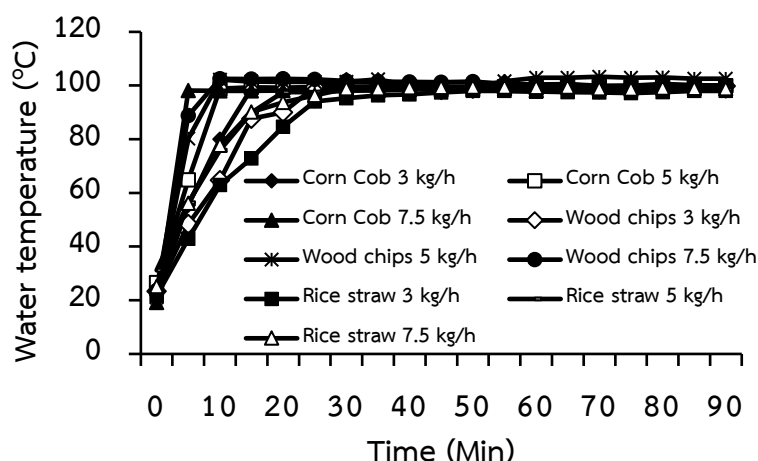
ภาพที่ 63 แสดงผลของการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน พบว่าการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 kg/h ของเชื้อเพลิงชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ที่ประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่าการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5 kg/h และ 7.5 kg/h เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ต่ำ ทำให้ลดการสูญเสียความร้อนของเตา ส่งผลให้เตามีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น (Igboanugo

and Ajieh, 2017) อย่างไรก็ตามเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง เป็นเตาที่มีการเผาไหม้ที่ดี มีการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต่ำ เมื่อเทียบกับพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ (ฐิตาภรณ์ ภูมิไชย, 2555) และเมื่อเทียบกับการใช้แก๊สหุงต้ม พบว่าประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ยยังคงต่ำกว่า โดยประสิทธิภาพความร้อนของแก๊สหุงต้มอยู่ในช่วงร้อยละ 50-55 (สนชาติ มหาวัน, 2559)



ภาพที่ 63 ผลของการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน

ภาพที่ 64 แสดงผลของการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือด พบว่าอุณหภูมิการเดือดของน้ำค่อนข้างเสถียร เกิดจากการปรับอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ทำให้ปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น นำไปสู่การถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในการเดือดได้เร็วขึ้น (นิกราน หอมดวง และคณะ, 2560) ซึ่งช่วงการเดือดของน้ำอยู่ที่ 10-15 min และอุณหภูมิการเดือดของน้ำอยู่ในช่วง 98.2-102.5 °C อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของปริมาณเชื้อเพลิงมีผลต่อการเผาไหม้ของเตาชีวมวล เนื่องจากเชื้อเพลิงแข็งมีความหนาแน่นสูงเมื่อใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่มาก ทำให้อากาศไม่สามารถเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงได้ทั่วถึง ถ้าเทียบกับการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต่ำ จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากกว่า (สมมาส แก้วล้วน และคณะ, 2556)

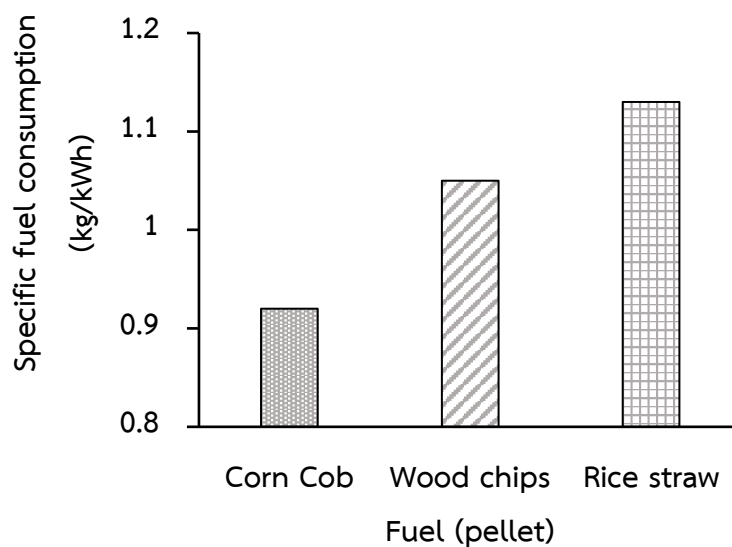


ภาพที่ 64 ผลของการอัตราการป้อนที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือด

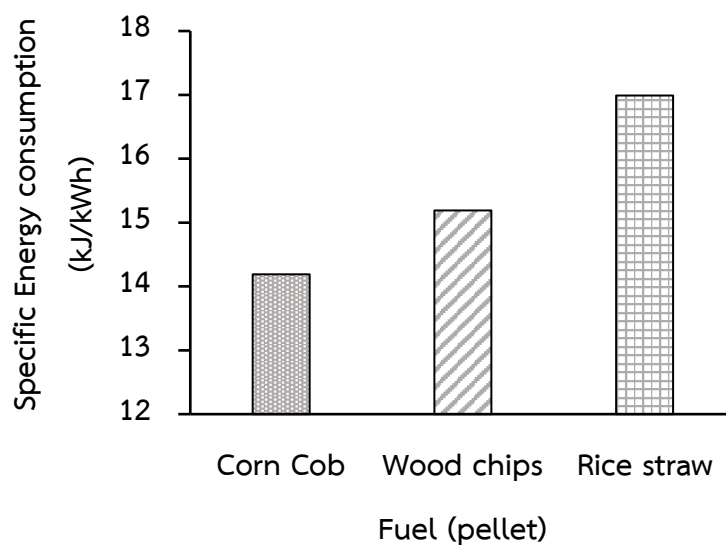
4.1.3 ผลของชนิดเชื้อเพลิง ที่มีผลต่อสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ผลของชนิดเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ที่การป้อนอากาศในอัตราส่วนสมมูล 1.20 และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 kg/h จากการทดลองพบว่าผลของชนิดเชื้อเพลิงมีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจากซังข้าวโพด ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด 0.92 kg/kWh แสดงดังภาพที่ 65 เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ต่างกัน ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่างกัน โดยปฏิกิริยาการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับความชื้นของเชื้อเพลิง ซึ่งซังข้าวโพดมีความชื้นค่อนข้างต่ำและมีค่าความร้อนที่สูง จึงส่งผลให้ใช้พลังงานน้อยกว่าในการระเหยน้ำในเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Patel et al., 2017) อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับการใช้งานเตาแก๊สหุงต้ม พบว่าการใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงกว่า 1.5 เท่า (ธนชาติ มหาวาน, 2560) ในขณะเดียวกันเชื้อเพลิงชีวมวลจากฟางข้าวให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุด 1.13 kg/kWh

ส่วนในด้านอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่าการเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิง ส่งผลให้เชื้อเพลิงจากซังข้าวโพดมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด 14.19 MJ/kWh แสดงดังภาพที่ 66 เนื่องจากการเผาไหม้โดยเฉพาะเชื้อเพลิงแข็ง มักจะเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมดและหลงเหลือเป็นขี้เถ้า (Ash) ผลจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่หมดทำให้ปลดปล่อยพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ต่ำลง (ฐานิตย์ เมธิยานนท์, 2558) ทั้งนี้ซังข้าวโพดเหลือปริมาณเถ้าอย่างน้อยที่สุด 0.582 kg เมื่อเทียบกับเศษไม้และฟางข้าว จึงทำให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด



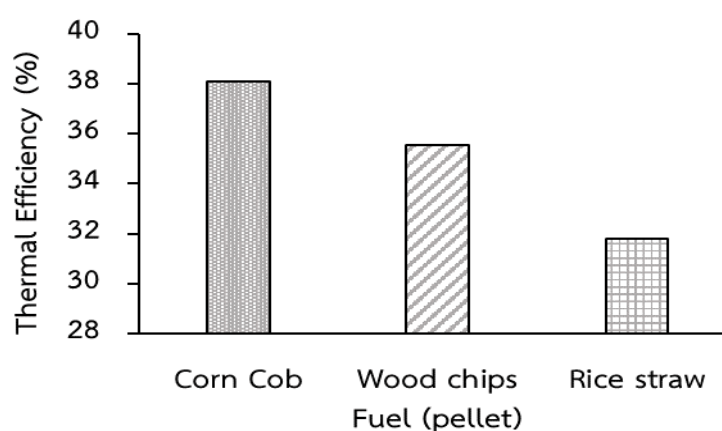
ภาพที่ 65 ผลของชนิดเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ



ภาพที่ 66 ผลของชนิดเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

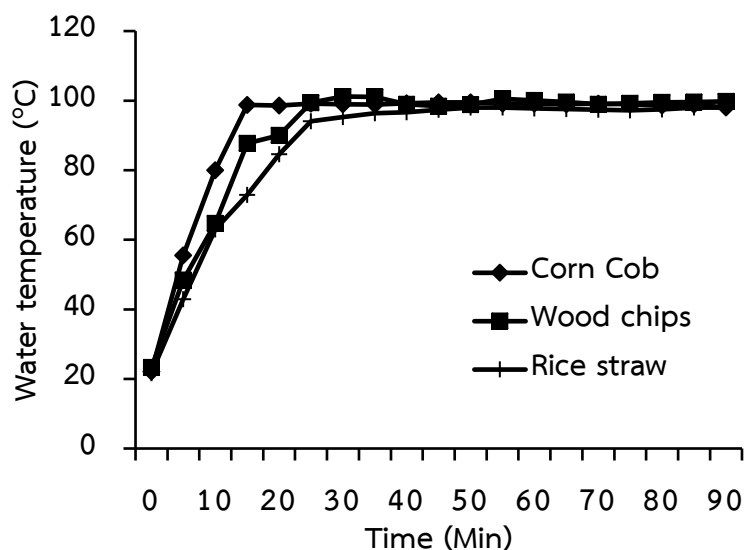
ภาพที่ 67 แสดงผลของชนิดเชื้อเพลิง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลจากซังข้าวโพด ให้อัตราการให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 38.07% เนื่องจากมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำ ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนของเตาเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้หมดทำให้ได้รับปริมาณความร้อนจากการเผา

ไหม้สูง (วิโรจน์ ไชยสมทิพย์, 2557) อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับการใช้แก๊สหุงต้ม พบว่าประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ยยังคงต่ำกว่า โดยประสิทธิภาพความร้อนของแก๊สหุงต้มสูงสุดเฉลี่ย 73% (V. K. Pantangi et al., 2007) ประสิทธิภาพของเตาชีวมวลยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเตาแก๊สหุงต้ม เนื่องจากเตาชีวมวลมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ไม่สมบูรณ์เพราะคุณสมบัติของเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น ค่าความร้อน และค่าความชื้น เป็นต้น และเมื่อเปรียบเทียบกับเตาแก๊สหุงต้มที่เป็น การเผาไหม้ในรูปของแก๊สซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Bormam, 1998)



ภาพที่ 67 ผลของชนิดเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน

ภาพที่ 68 แสดงผลของชนิดเชื้อเพลิง ที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือด พบว่าเชื้อเพลิงชีวมวลจากชังข้าวโพด ให้เวลาการเดือดของน้ำสูงสุดที่ 12 min เนื่องจากชีวมวลประเภทชังข้าวโพด เป็นเชื้อเพลิงมีการปลดปล่อยพลังงานสูงสุด (Patel et al., 2017) จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น จึงช่วยในการระเหยของน้ำได้สูงสุด (Masmoudi et al., 2017) และนำไปสู่การถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในการเดือดได้เร็วขึ้น โดยอุณหภูมิการเดือดของน้ำอยู่ในช่วง 98.2-101.2 °C



ภาพที่ 68 แสดงผลของชนิดเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือด

4.1.4 ผลสรุปเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

โดยเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ส่งผลให้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง มีสมรรถนะการทำงานที่ดี คือการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดชนิดซังข้าวโพด ใช้อากาศที่การปรับอัตราส่วนสมมูล 1.20 และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงเฉลี่ย 3 kg/h พบว่ามีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่ 0.92 kg/kWh และ 14.19 MJ/kWh ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 38.07% มีอุณหภูมิการเดือดของน้ำอยู่ในช่วง 98.2 - 101.2 °C

ตารางที่ 21 สรุปสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากชีวมวล

คุณลักษณะ	เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง		
	ซังข้าวโพด	เศษไม้	ฟางข้าว
ระยะเวลาในการใช้งาน (min)	90	90	90
ปริมาณเชื้อเพลิงที่เหมาะสม (kg/h)	3	3	3
อัตราส่วนสมมูล	1.20	1.20	1.20
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)	0.075	0.075	0.075
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)	0.92	1.05	1.13
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kWh)	14.19	15.19	16.99

ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kJ)	2.85	3.26	2.65
ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิง (MJ)	40.47	49.56	45.03
ประสิทธิภาพความร้อน (%)	38.07	35.56	31.78
ประสิทธิภาพรวม (%)	37.29	34.96	31.19

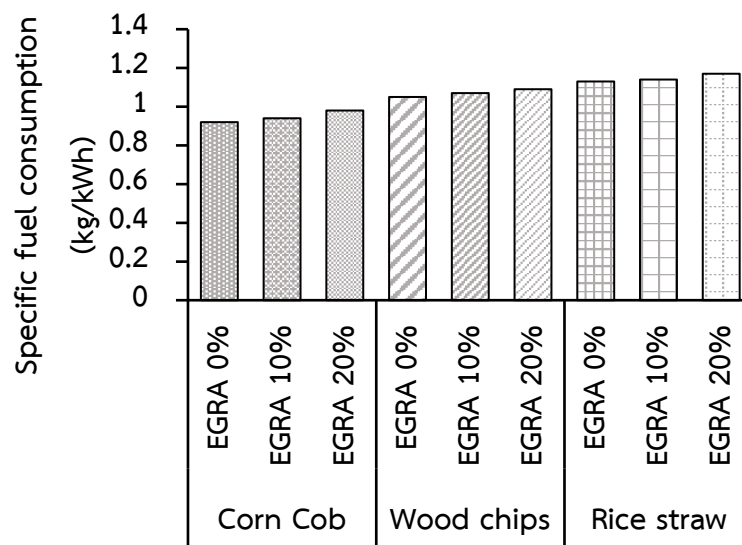
4.2 อัตราการป้อนแก๊สที่เผาไหม้ร่วมกับอากาศ (EGRA)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาชีวมวล ด้วยการนำเอาแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้แล้วจากปล่องไอเสีย และแก๊สที่ได้จากหลังตะแกรงห้องเผาไหม้ (Gasification gas) มาเผาไหม้ซ้ำ โดยการปรับใช้แก๊สทั้งสองส่วนเข้ามาในปริมาณที่เท่ากันด้วยวาล์วควบคุมผสมกันในสัดส่วนแก๊สที่เผาไหม้ซ้ำกับอากาศ 1:1 (Chen et al., 2019) โดยจะทดสอบในสภาวะที่อัตราส่วนสมมูล 1.20 ผลรวมของการป้อนแก๊สที่เผาไหม้ร่วมกับอากาศ (Exhaust Gas Recirculation with Air: EGRA) คิดเป็น 10% และ 20% ของการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด 3 ชนิด ที่อัตราการป้อนอากาศเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.6582 - 3.3163 m³/h โดยมีรายละเอียดดังนี้

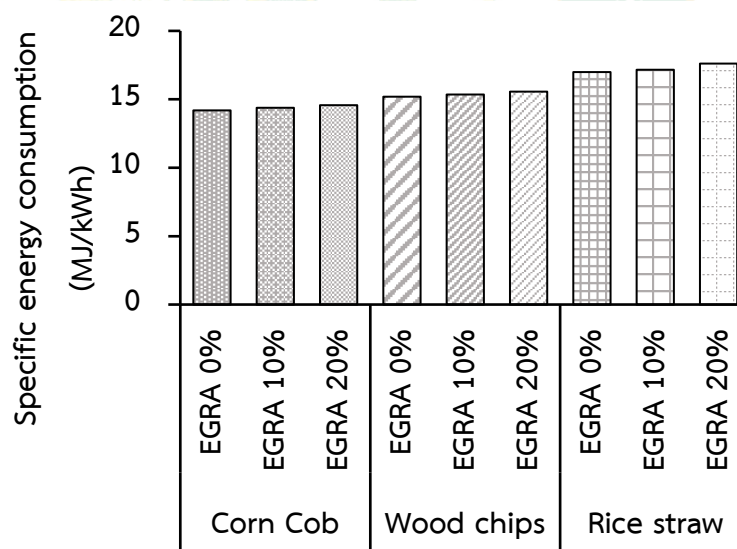
ภาพที่ 69 แสดงผลของการป้อนแก๊สที่เผาไหม้ร่วมกับอากาศที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ พบว่าการปรับอัตราการป้อน EGRA ที่ 10% และ 20% ส่งผลให้มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งนั่นหมายถึงการเพิ่มอากาศที่สูงเกินไป (Kirch et al., 2018) แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอากาศที่ได้น่าจะมีผลต่อความสะอาดของแก๊สที่เผาไหม้แล้ว ในส่วนของชนิดเชื้อเพลิงจะเห็นว่าที่การปรับอัตราการป้อน EGRA ที่ 10% ของการใช้ซังข้าวโพดให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด 0.94 kg/kWh เนื่องจากทางทฤษฎีการป้อนอากาศส่วนเกินควรสูงกว่าอัตราการป้อนอากาศทางทฤษฎี 10-20% จะส่งผลดีต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิง (สุพิน จอดนอก และคณะ, 2553) อีกทั้งการป้อนอากาศร่วมกันในส่วนของอากาศหลักและอากาศรองจะช่วยให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Deng et al., 2020)

ขณะเดียวกันในส่วนของการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่าการปรับอัตราการป้อน EGRA ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะแปรผันตรงกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ โดยที่การปรับอัตราการป้อน EGRA ที่ 10% ของการใช้ซังข้าวโพดให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด 14.38 MJ/kWh แสดงดังภาพที่ 70 เนื่องจากปริมาณความชื้นของเชื้อเพลิงส่งผลต่อผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ (เมธวัฒน์ สงพัฒน์แก้ว, 2556) การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นสูงส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานในเผาไหม้ลง ทำให้การผลิตความร้อนของเตาลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการผลิตความร้อนของ

เตาชีวมวลนั้นจะส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ และต้นทุนการผลิตความร้อนของเตา (ปัญญพร หนาดคำ, 2560)



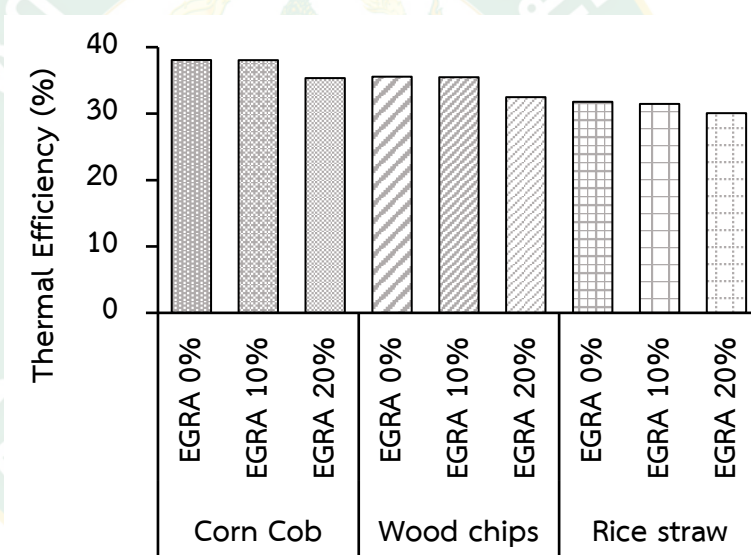
ภาพที่ 69 การปรับอัตราการป้อน EGRA ที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ



ภาพที่ 70 การปรับอัตราการป้อน EGRA ที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

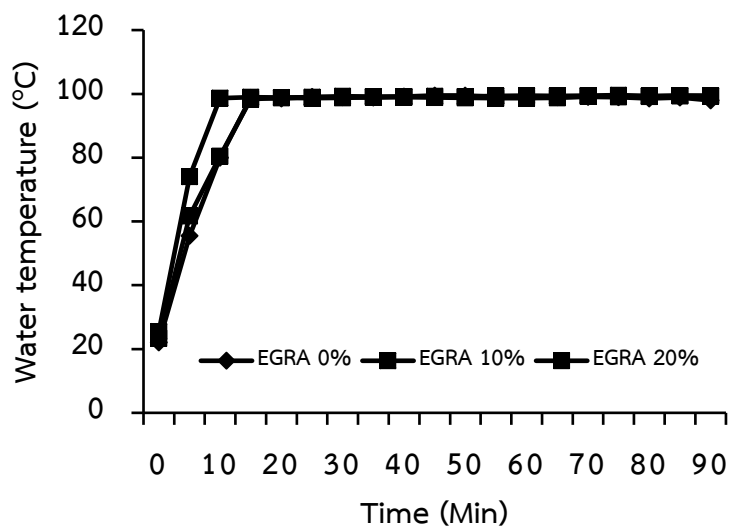
ภาพที่ 71 แสดงผลของการปรับอัตราการป้อน EGRA ที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน พบว่าการใช้เชื้อเพลิงจากขี้ข้าวโพดที่การปรับอัตราการป้อนอากาศ EGRA 0% ให้ประสิทธิภาพ

ความร้อนสูงสุดร้อยละ 38.07 และที่การปรับอัตราการป้อน EGRA 10% ให้ประสิทธิภาพความร้อนใกล้เคียงกับ EGRA 0% แต่หากมีการปรับอัตราส่วน EGRA เกิน 10% จะทำให้ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลมีแนวโน้มลดลง (พงศสฤติย์ ศรภักดี, 2561) แต่ในทางกลับกันการเพิ่ม EGRA ช่วยให้อัตราการไหลของอากาศที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้เชื้อเพลิงติดไฟได้เร็วขึ้นและปล่อยไอเสียน้อยลง (Kirch et al., 2017) เนื่องจากการเผาไหม้ในสภาวะคงที่เกิดขึ้นเมื่อผลิตภัณฑ์แก๊สซิฟิเคชันถูกเผาไหม้ด้วย EGRA ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในขณะที่เชื้อเพลิงแข็งกำลังถูกไฟโรไลซ์ ด้วยการไหลเวียนของอากาศที่สูงขึ้นในการปรับอัตราการป้อน EGRA ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้อยู่ในระดับที่สูงเป็นพิเศษ (Jain et al., 2018) ทำให้เกิดการปล่อยไอเสียที่ลดลงจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการป้อน EGRA จำเป็นสำหรับการเผาไหม้สารระเหยที่ปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิง (Ramachandra, 2003) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

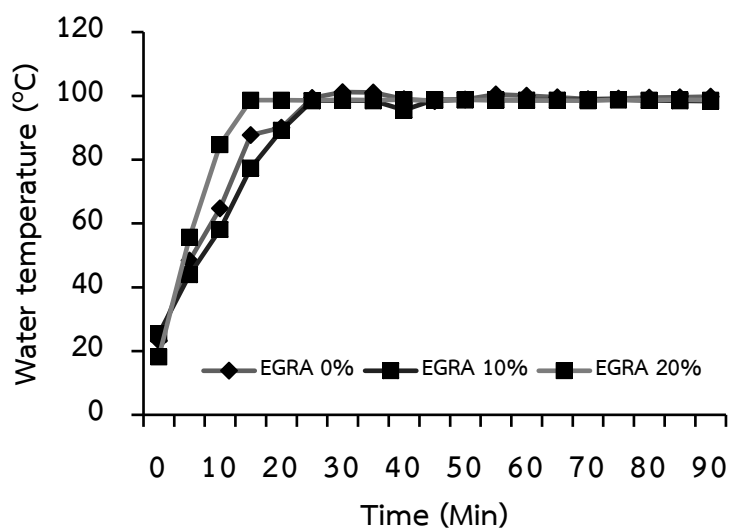


ภาพที่ 71 การปรับอัตราการป้อน EGRA ที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน

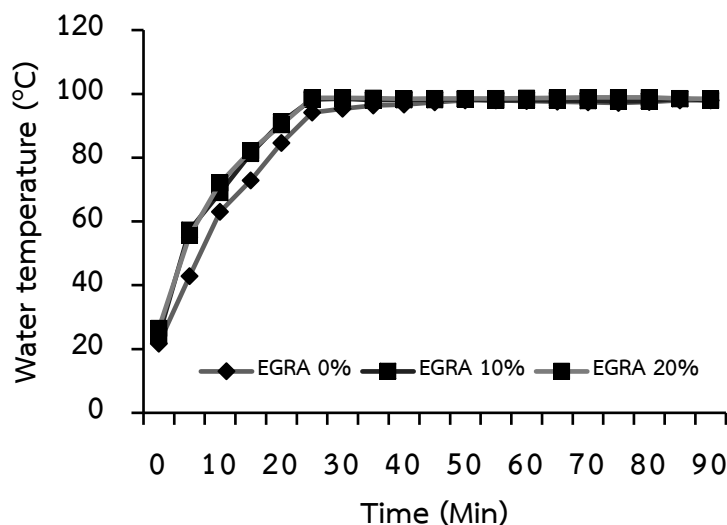
ในส่วนของผลการปรับอัตราการป้อน EGRA ของทั้งสามเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเดือดแสดงดังภาพที่ 72-74 เมื่อเทียบชนิดของการใช้เชื้อเพลิง พบว่าการใช้เชื้อเพลิงจากชังข้าวโพดที่การป้อน EGRA 10% ให้อุณหภูมิการเดือดของน้ำที่และระยะการเดือดของน้ำใกล้เคียงกับ EGRA 0% โดยมีช่วงอุณหภูมิการเดือดของน้ำอยู่ระหว่าง 98.7-99.8 °C เนื่องจากการเผาแก๊สซ้ทำให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงสมบูรณ์ขึ้น และทำให้ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ในการต้มน้ำรวมถึงการระเหยน้ำดียิ่งขึ้น (Mahawan et al., 2016)



ภาพที่ 72 การปรับอัตราการป้อน EGRA ของซังข้าวโพดที่มีผลอุณหภูมิน้ำเดือด



ภาพที่ 73 การปรับอัตราการป้อน EGRA ของเศษไม้ที่มีผลอุณหภูมิน้ำเดือด



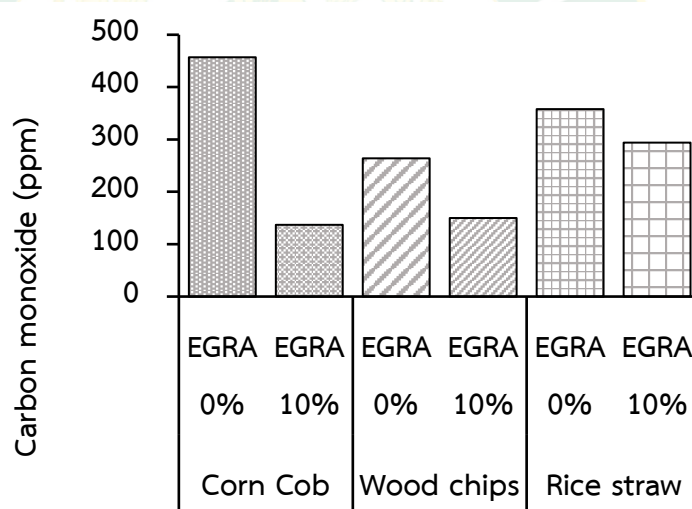
ภาพที่ 74 การปรับอัตราการป้อน EGRA ของฟางข้าวที่มีผลอุณหภูมิน้ำเดือด

4.3 มลพิษไอเสียของเตาชีวมวล (Biomass stove emission)

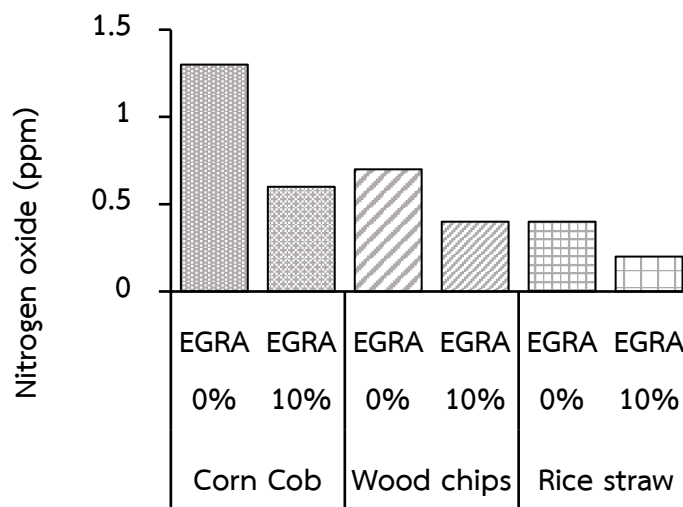
มลพิษไอเสียจากระบบเผาไหม้ชีวมวลแบบดั้งเดิมสำหรับการปรุงอาหารและการให้ความร้อนทั่วโลกเป็นสาเหตุหลักของการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรอันเป็นผลมาจากมลพิษทางอากาศ (Deng et al., 2019) โดยผลิตภัณฑ์ที่ออกจากปล่องควันเป็นสถานะแก๊ส ซึ่งสารที่เป็นสถานะแก๊สอย่างเช่น CO, SO₂, NO_x จะใช้หน่วยเป็น ppm (v) (ส่วนต่อล้านส่วนโดยปริมาตร) กระบวนการเผาไหม้ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเป็นกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งด้วยการเผาไหม้แบบเผาตรงร่วมกับการเผาไหม้แบบแก๊สซิฟิเคชันสามารถช่วยลดการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศลงได้ (Tryner et al., 2016) โดยจะใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซไอเสียจากปล่องระบายยี่ห้อ testo 350 เป็นเครื่องมือในการวัดค่ามลพิษไอเสียของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ภาพที่ 75-77 แสดงผลการศึกษาก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) แก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงของทั้งสามเชื้อเพลิง พบว่าการป้อนอากาศในส่วนของ EGRA 10% ส่งผลให้การปลดปล่อย CO, NO_x และ NO₂ ลดลงจาก EGRA 0% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐานกำหนด โดยมาตรฐานอากาศเสียที่ระบายออกจากโรงงานทั่วไปค่า CO ไม่เกิน 690 ppm และค่า NO_x ไม่เกิน 200 ppm (กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2553) เนื่องจากการป้อนอากาศที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดอุณหภูมิการลุกไหม้ของเปลวไฟสูงขึ้นตาม ทำให้เกิดการออกซิเดชันที่สมบูรณ์มากขึ้นเมื่อมีอากาศเพียงพอ จึง

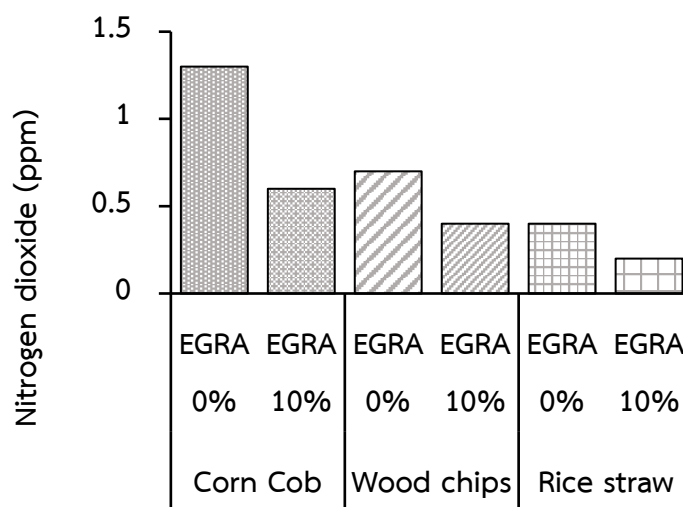
ส่งผลให้การปลดปล่อยแก๊ส CO, NO_x และ NO₂ ลดต่ำลง (Senneca et al., 2003) การเปลี่ยนแปลงชนิดของเชื้อเพลิง ส่งผลต่อองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงในส่วนการเผาไหม้ที่สอง เนื่องจากการปล่อยแก๊สไอเสียมีค่าแตกต่างกันไปตามลักษณะของเชื้อเพลิงชีวมวล อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ในกระบวนการไพโรไลซิสที่อัตราการไหลของอากาศในส่วน EGRA สูงเกินไปจะส่งผลให้แนวโน้มของการปลดปล่อย CO, NO_x และ NO₂ ในระหว่างการเผาไหม้สูงขึ้น เนื่องจากอากาศหุดย ภูมิที่มากเกินไปทำให้เปลวไฟการเผาไหม้ลดลง อุณหภูมิที่ทำให้เกิดเปลวไฟในกระบวนการไพโรไลซิสของเชื้อเพลิงลดลง (Basu and Prabir, 2010) ดังนั้นการควบคุมอัตราการป้อนอากาศทั้งอากาศหลักและอากาศหุดย ภูมิ จะสามารถสร้างเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ส่งผลต่อสุขภาพที่ดีสำหรับผู้ใช้งานในครัวเรือนได้เพราะการปล่อยแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้ที่ลดลง (Supramono and Inayati, 2013)



ภาพที่ 75 ผลการศึกษาแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ของเตาชีวมวล



ภาพที่ 76 ผลการศึกษาแก๊สออกไซด์ของไนโตรเจน (NO_x) ของเตาชีวมวล



ภาพที่ 77 ผลการศึกษาแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) ของเตาชีวมวล

4.4 การสมดุลมวลและพลังงาน (Mass and Energy balance)

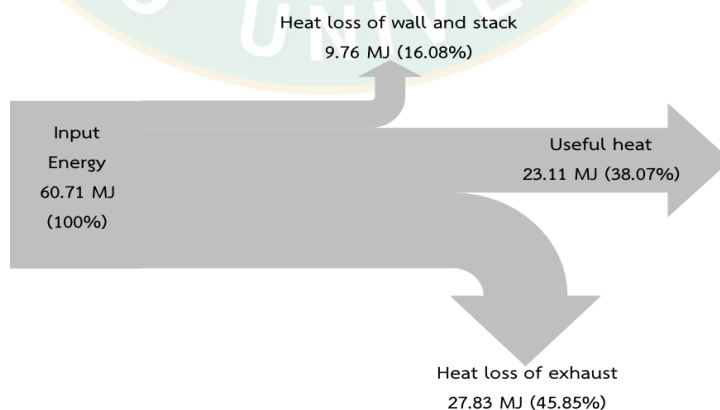
การสมดุลมวลของระบบในการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ที่การทดสอบอัตราส่วนสมมูล 1.20 ใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 kg/h ทำการทดสอบเป็นเวลา 1.5 h แสดงเงื่อนไขและการคำนวณการสมดุลมวลของระบบในภาคผนวก ข

ภาพที่ 78 แสดงเชื้อเพลิงที่เข้าระบบเมื่อใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด โดยเชื้อเพลิงที่เข้าระบบมีมวลรวม 4.5 kg หรือ 21% โดยมีอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในกระบวนการมีน้ำหนัก 17.13 kg หรือ 79% มีมวลที่เข้าระบบรวม 21.63 kg ส่วนมวลที่ออกจากระบบจะแบ่งออกเป็นปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ (CO , CO_2 , H_2O , N_2 , O_2) และถ่านรวมขี้เถ้า ซึ่งมีมวลออกจากระบบเท่ากับ 1.058 kg, 1.661 kg, 0.545 kg, 13.156 kg, 4.339 kg และ 0.873 kg ตามลำดับ

ในส่วนของการการสมดุลพลังงานของระบบโดยมีซังข้าวโพดเข้าระบบ 4.5 kg มีค่าความร้อน 13.49 MJ/kg ดังนั้นพลังงานรวมที่เข้าระบบ คือ 60.71 MJ (100%) ส่วนพลังงานที่ออกจากระบบมีพลังงานความร้อนที่เตาผลิตได้ 23.11 MJ (38.07%) ส่วนพลังงานสูญเสียที่เกิดในระบบถูกวิเคราะห์โดยคำนวณจากสมการตามทฤษฎีพลังงานที่สูญเสียของระบบเตาชีวมวล (สุรียา และ ณภัทร, 2559) ซึ่งพบว่าเตาชีวมวลมีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากผนังเตา (Q_{WS}) และไอเสีย (Q_E) โดยมีพลังงานความร้อนสูญเสีย 9.76 MJ (16.08%) และ 27.83 MJ (45.85%) ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 79



ภาพที่ 78 การสมดุลมวลของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด



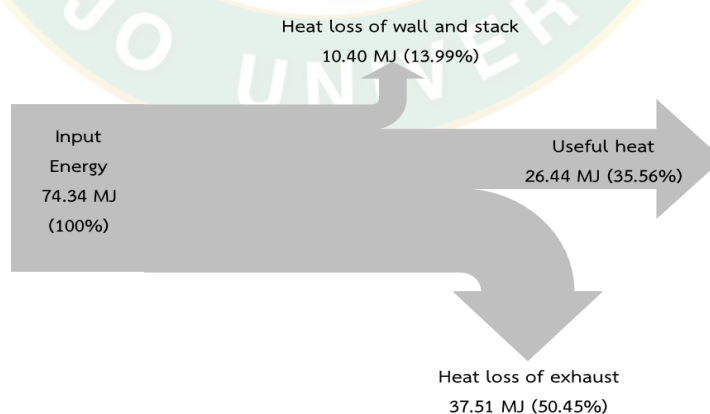
ภาพที่ 79 การสมดุลพลังงานของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด

ภาพที่ 80 แสดงการสมดุลมวลของระบบในการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้อัดเม็ด โดยเชื้อเพลิงที่เข้าระบบมีมวลรวม 4.5 kg หรือ 20% โดยมีอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในกระบวนการมีน้ำหนัก 18.27 kg หรือ 80% มีมวลที่เข้าระบบรวม 22.77 kg ส่วนมวลที่ออกจากระบบจะแบ่งออกเป็นปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ (CO , CO_2 , H_2O , N_2 , O_2) และถ่านรวมขี้เถ้า ซึ่งมวลออกจากระบบเท่ากับ 1.150 kg, 1.807 kg, 0.554 kg, 14.031 kg, 4.112 kg และ 1.115 kg ตามลำดับ

ในส่วนของการการสมดุลพลังงานของระบบโดยมีเศษไม้เข้าระบบ 4.5 kg มีค่าความร้อน 16.52 MJ/kg ดังนั้นพลังงานรวมที่เข้าระบบ คือ 74.34 MJ (100%) ส่วนพลังงานที่ออกจากระบบมีพลังงานความร้อนที่เตาผลิตได้ 26.44 MJ (35.56%) มีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากผนังเตา (Q_{WS}) และโอเสีย (Q_{E}) โดยมีพลังงานความร้อนสูญเสีย 10.42 MJ (13.99%) และ 37.51 MJ (50.45%) ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 81



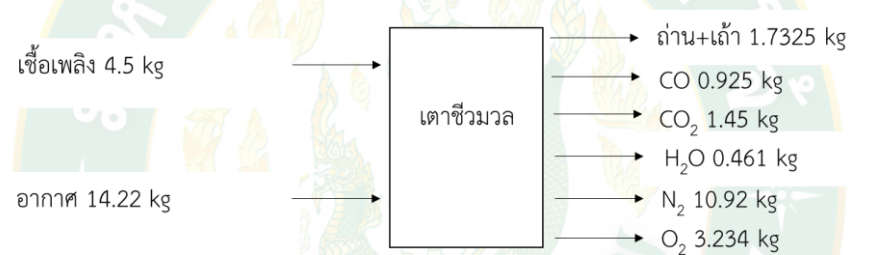
ภาพที่ 80 การสมดุลมวลของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้



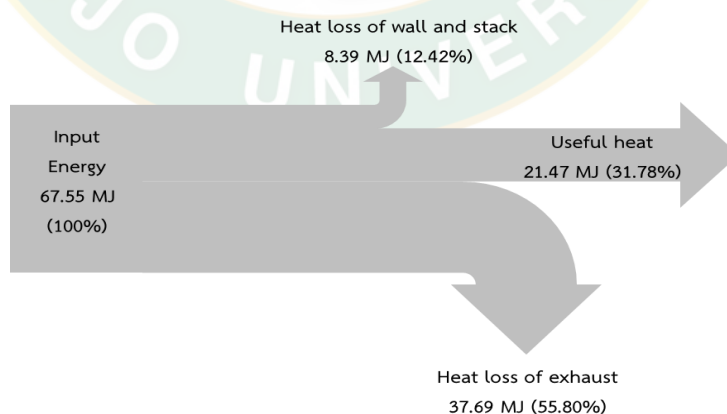
ภาพที่ 81 การสมดุลพลังงานของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงเศษไม้

ภาพที่ 82 แสดงการสมดุลมวลของระบบในการใช้เชื้อเพลิงฟางข้าวอัดเม็ด โดยเชื้อเพลิงที่เข้าระบบมีมวลรวม 4.5 kg หรือ 24% โดยมีอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในกระบวนการมีน้ำหนัก 14.22 kg หรือ 76% มีมวลที่เข้าระบบรวม 18.72 kg ส่วนมวลที่ออกจากระบบจะแบ่งออกเป็นปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ (CO , CO_2 , H_2O , N_2 , O_2) และถ่านรวมขี้เถ้า ซึ่งมีมวลออกจากระบบเท่ากับ 0.925 kg, 1.45 kg, 0.461 kg, 10.92 kg, 3.234 kg และ 1.7325 kg ตามลำดับ

ในส่วนของการการสมดุลพลังงานของระบบโดยมีฟางข้าวเข้าระบบ 4.5 kg มีค่าความร้อน 15.01 MJ/kg ดังนั้นพลังงานรวมที่เข้าระบบ คือ 67.55 MJ (100%) ส่วนพลังงานที่ออกจากระบบมีพลังงานความร้อนที่เตาผลิตได้ 21.47 MJ (31.78%) มีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากผนังเตา (Q_{WS}) และไอเสีย (Q_{E}) โดยมีพลังงานความร้อนสูญเสีย 8.39 MJ (12.42%) และ 37.69 MJ (55.80%) ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 83



ภาพที่ 82 การสมดุลมวลของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงฟางข้าว



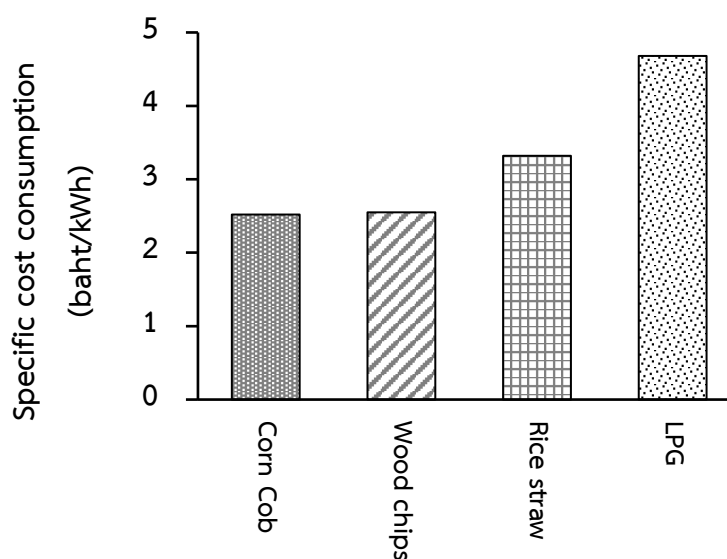
ภาพที่ 83 การสมดุลพลังงานของระบบเตาชีวมวลของการใช้เชื้อเพลิงฟางข้าว

4.5 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ทางพลังงานของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ได้ทำการประเมินต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวล โดยจะประเมินผลตอบแทนสุทธิ ผลตอบภายใน และระยะเวลาคืนทุน เป็นการประเมินหาอัตราผลตอบแทนสุทธิ ที่ทำให้ NPV มีค่าเท่ากับ 0 กล่าวคือ ทำให้เงินสดสุทธิในอนาคตทอนมูลค่ากลับมาปัจจุบันแล้ว มีค่าเท่ากับ เงินลงทุน ดังนั้นถ้าหากค่า IRR มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับต้นทุนทางการเงิน จะถือได้โครงการเหมาะสมที่จะลงทุน ซึ่งในหัวข้อนี้เป็น การประเมินต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนและต้นทุนด้านวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูงที่ค่า ER 1.20 ซึ่งให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด ที่การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ได้แก่ ชังข้าวโพด เศษไม้ และฟางข้าว โดยจะเปรียบเทียบกับการใช้ที่การป้อน EGRA 10% และการใช้งานเตาแก๊สหุงต้มในระดับครัวเรือน โดยรายละเอียดการคำนวณจะแสดงในภาคผนวก ข

4.5.1 การประเมินต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนของเตาชีวมวล

ภาพที่ 84 แสดงการประเมินต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนของเตาชีวมวลที่ ER 1.20 เทียบกับเตาแก๊สหุงต้ม พบว่าการใช้ชังข้าวโพดอัดเม็ดให้ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนต่ำสุด 2.52 baht/kWh ในขณะที่เตาแก๊สหุงต้มให้ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนสูงสุด 4.68 baht/kWh (สมมติ แก้วล้วน, 2556) เนื่องจากชังข้าวโพดอัดเม็ดมีราคาต้นทุนต่ำสุดอยู่ที่ 3.1 baht/kg ขณะที่แก๊สหุงต้มมีราคาต้นทุนสูงกว่าอยู่ที่ 21.2 baht/kg



ภาพที่ 84 การประเมินต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อน

ตารางที่ 24 แสดงการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเทียบกับเตาหุงต้ม ผลการศึกษาพบว่าเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ซังข้าวโพด เศษไม้ และฟางข้าว ใช้ระยะเวลาในการใช้งาน 1.5 h/round วันละ 3 round/d มีปริมาณการใช้พลังงาน 0.351 kWh/Round เมื่อเทียบกับแก๊สหุงต้มมีปริมาณการใช้พลังงาน 0.22 kWh/Round ทำให้มีต้นทุนการผลิตความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดเท่ากับ 16,974.71 baht/y, 17,467.46 baht/y และ 18,945.71 baht/y ตามลำดับ ขณะที่เตาแก๊สหุงต้มให้ต้นทุนการผลิตความร้อนเท่ากับ 45,267.30 baht/y มีค่าซ่อมบำรุงรักษา 1,000 baht/y ตารางที่ 25 แสดงผลสรุปการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงในการใช้งานเตาชีวมวล 2 ระบบ (ER 1.20 กับ EGRA 10%) พบว่าที่ ER 1.20 เมื่อใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดให้ระยะเวลาคืนทุนต่ำกว่า 1.25 year ผลตอบแทนสุทธิ 85,739.23 baht ผลประหยัด 28,294.12 baht/y และมีผลตอบแทนภายใน 74.82% เมื่อใช้เชื้อเพลิงเศษไม้อัดเม็ดให้ ผลตอบแทนสุทธิ 83,627.81 baht ผลประหยัด 27,801.37 baht/y และมีผลตอบแทนภายใน 73.30% และเมื่อใช้เชื้อเพลิงฟางข้าวอัดเม็ดให้ระยะเวลาคืนทุน 1.35 year ผลตอบแทนสุทธิ 77,293.57 baht ผลประหยัด 26,323.12 baht/y และมีผลตอบแทนภายใน 68.73% จากการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อนำไปใช้งานในครัวเรือน คือชนิดของเชื้อเพลิงเนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงแปรผันเพิ่มสูงขึ้นตามเศรษฐกิจของประเทศ จึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตและระยะเวลาการคืนทุนอาจเพิ่มสูงขึ้น และหากต้องการใช้งานเตาชีวมวลเพื่อลดมลพิษไอเสีย ระบบ EGRA 10% เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งมีต้นทุนที่สูงกว่าระบบ ER1.20 เล็กน้อย

ตารางที่ 22 เงื่อนไขการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้แก๊สหุงต้ม

ค่าใช้จ่าย	หน่วย	แก๊สหุงต้ม
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	kg/h	1.3
ระยะเวลาในการใช้งาน	h/round	1.5
ระยะเวลาในการใช้งาน	round/d	3
ระยะเวลาในการใช้งาน	d/y	365
ราคาเชื้อเพลิงชีวมวล	baht/kg	21.2

หมายเหตุ: ราคาแก๊สหุงต้มถึงละ 318 บาท (15 กก.) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2563)

ตารางที่ 23 เงื่อนไขการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด

ค่าใช้จ่าย	หน่วย	ซังข้าวโพด	เศษไม้	ฟางข้าว
เงินลงทุนสร้างเตาชีวมวล	baht/unit	35,500	35,500	35,500
อายุการใช้งาน	y	5	5	5
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	kg/h	3	3	3
ระยะเวลาในการใช้งาน	h/round	1.5	1.5	1.5
ระยะเวลาในการใช้งาน	round/d	3	3	3
ระยะเวลาในการใช้งาน	d/y	365	365	365
ราคาเชื้อเพลิงชีวมวล	baht/kg	3.1	3.2	3.5
ปริมาณการใช้พลังงาน	kWh/round	0.351	0.351	0.351
ปริมาณการใช้พลังงานระบบ EGRA 10%	kWh/round	0.576	0.576	0.576
ราคาค่าไฟฟ้า	baht/kWh	4.4217	4.4217	4.4217
ค่าซ่อมบำรุงรักษา	baht/y	1,000	1,000	1,000
ดอกเบี้ย	%	5.375	5.375	5.375

หมายเหตุ: ราคาเชื้อเพลิงคิดราคาเทียบกับหน้าโรงงานผลิต (บริษัท บี.พี.15 จำกัด)

ราคาไฟฟ้าหน่วยละ 4.4217 บาท (การไฟฟ้านครหลวง, 2563)

อัตราดอกเบี้ยเงินกู้แบบมีระยะเวลา 5.375% (ธนาคารกรุงไทย, 2563)

ตารางที่ 24 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเทียบกับเตาหุงต้ม

ค่าใช้จ่าย	หน่วย	แก๊สหุงต้ม	ซังข้าวโพด	เศษไม้	ฟางข้าว
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	kg/kWh	0.22	0.92	1.05	1.13
ราคาเชื้อเพลิง	baht/kg	21.2	3.1	3.2	3.5
ต้นทุนการผลิตความร้อน	baht/kWh	4.68	2.85	3.36	3.96
ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยไฟฟ้า	baht/y	-	1,699.46	1,699.46	1,699.46
ต้นทุนการผลิต	baht/y	45,267.30	16,974.71	17,467.46	18,945.71

หมายเหตุ: แก๊สหุงต้มมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.30 kg/h (ชนชาติ มหาวิน, 2560)

แก๊สหุงต้มมีต้นทุนการผลิตความร้อน 4.68 Baht/kWh (สมมาส แก้วล้วน, 2556)

ตารางที่ 25 การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลที่ป้อน EGRA 10%

ค่าใช้จ่าย	หน่วย	ซังข้าวโพด	เศษไม้	ฟางข้าว
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	kg/kWh	0.94	1.07	1.14
ราคาเชื้อเพลิง	baht/kg	3.1	3.2	3.5
ต้นทุนการผลิตความร้อน	baht/kWh	2.91	3.42	3.99
ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยไฟฟ้า	baht/y	2,788.85	2,788.85	2,788.85
ต้นทุนการผลิต	baht/y	18,064.10	18,556.85	20,035.10

ตารางที่ 26 สรุปการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

รายการ	หน่วย	ซังข้าวโพด	เศษไม้	ฟางข้าว
ผลตอบแทนสุทธิ (NPV) ER 1.20	baht	85,739.23	83,627.81	77,293.57
ผลตอบแทนสุทธิ EGRA 10%	baht	81,064.68	78,953.26	72,619.02
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) ER 1.20	%	74.82	73.30	68.73
อัตราผลตอบแทนภายใน EGRA 10%	%	71.46	69.93	65.32
ผลประโยชน์ ER 1.20	baht/y	28,294.12	27,801.37	26,323.12
ผลประโยชน์ EGRA 10%	baht/y	27,203.20	26,710.45	25,232.20
ระยะเวลาคืนทุน (PB) ER 1.20	y	1.25	1.28	1.35
ระยะเวลาคืนทุน EGRA 10%	y	1.30	1.33	1.41

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยการทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ด ที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาขึ้นมาอยู่ในช่วง 10 - 30 kW ใช้การป้อนอากาศแบบบังคับ โดยมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือห้องเผาไหม้ ชุดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง และชุดเติมอากาศ เตาชีวมวลมีรูปทรงเป็นทรงกระบอกผนัง 3 ชั้น โดยมีขนาดความสูงของห้องเผาไหม้ 20 cm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 cm ชุดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วยประกอบด้วย สกรูลำเลียง ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และเกียร์ทดความเร็ว อัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอินเวอร์เตอร์ปรับความถี่ และชุดเติมอากาศประกอบด้วยพัดลมป้อนอากาศและอินเวอร์เตอร์สำหรับปรับความถี่ การใช้เตาชีวมวลแบบดั้งเดิมให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำกว่าในขณะที่การใช้เตาแก๊สสูงต้มให้ความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 73%

2. อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมที่สุดของการใช้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจาก ชังข้าวโพด เศษไม้ และฟางข้าว โดยใช้อากาศที่การปรับอัตราส่วนสมมูล 1.20 โดยที่อัตราการป้อนอากาศดังกล่าวต่อเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้อัตราความสัมพันธ์เชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะต่ำสุด และให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด

3. การเลือกใช้อัตราการป้อนที่ 3 kg/h ให้สมรรถนะการทำงานของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีค่าสูงสุด ทั้งในด้าน ประสิทธิภาพความร้อน อัตราความสัมพันธ์เชื้อเพลิงและพลังงาน เมื่อเทียบกับการอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5 kg/h และ 7.5 kg/h

4. การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดชนิดชังข้าวโพดเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด ส่งผลให้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและมีสมรรถนะการทำงานที่ดี เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูล 1.20 หรือ 17.12 m³/h และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 3 kg/h พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะต่ำสุดที่ 1.05 kg/kWh และ 14.19 MJ/kWh ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 38.07% เวลาในการเดือดของน้ำ 15 นาที อุณหภูมิการเดือดของน้ำอยู่ในช่วง 98.2-101.2 °C ในขณะที่การใช้เศษไม้และฟางข้าว ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเท่ากับ 35.56% และ 31.78% ตามลำดับ

5. ผลการป้อนอากาศที่ใช้ชังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง โดยการป้อนอากาศร่วมกัน 2 จุด คือ ช่อง primary air และ ช่อง secondary air จากการทดสอบพบว่า การป้อน EGRA เพิ่ม 10% ให้ประสิทธิภาพความร้อนใกล้เคียงกับ EGRA 0% และพบว่าการป้อน EGRA เพิ่ม 10% ส่งผล

ให้การปลดปล่อย CO, NO_x และ NO₂ ลดลง เนื่องจากการป้อนอากาศที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดอุณหภูมิการลุกไหม้ของเปลวไฟสูงขึ้นตาม ทำให้เกิดการออกซิเดชันที่สมบูรณ์มากขึ้นเมื่อมีอากาศเพียงพอ จึงส่งผลให้การปลดปล่อยแก๊สไอเสียจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงลดต่ำลง

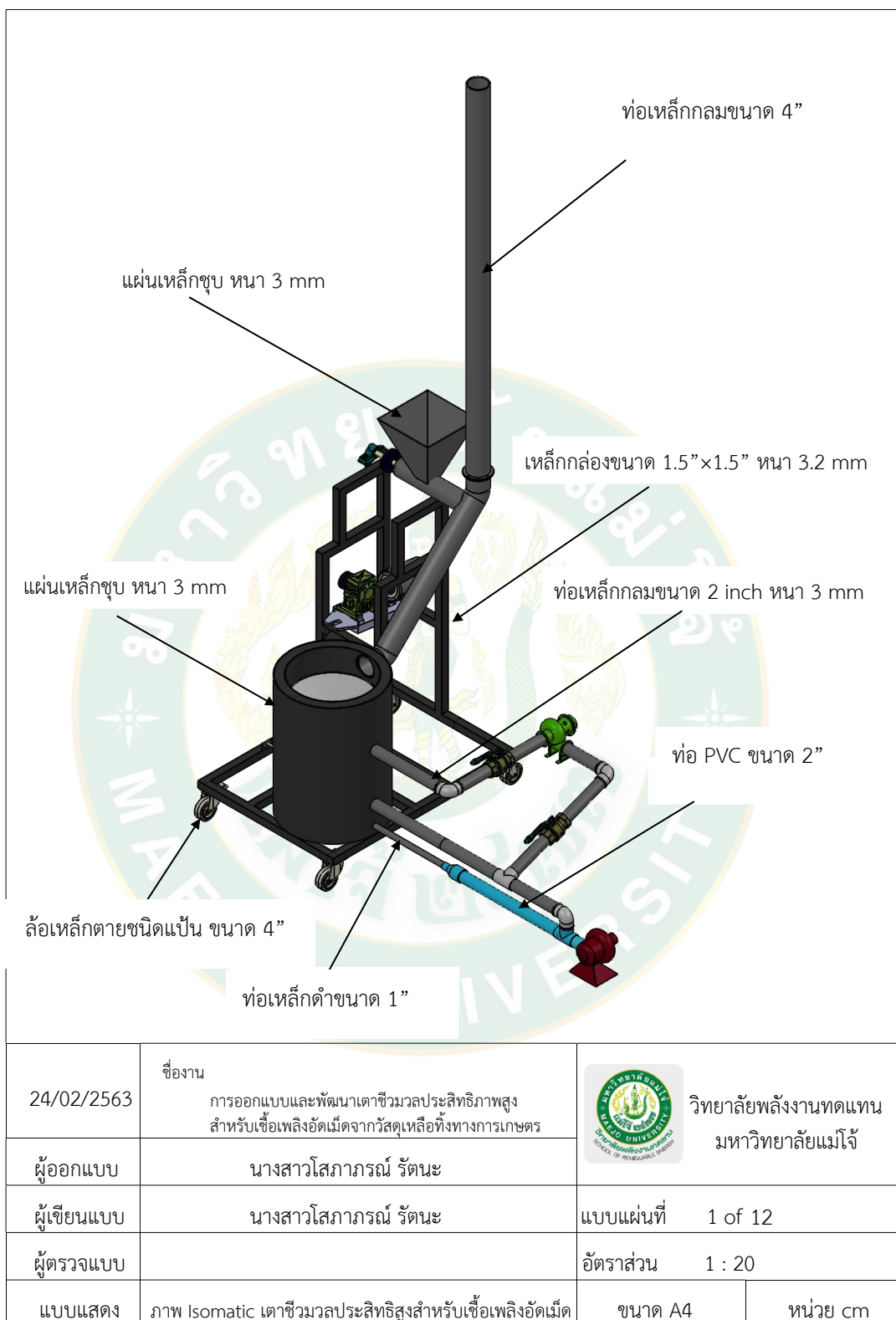
6. การสมดุลมวลและพลังงานของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดให้ประสิทธิภาพสูงสุดในระบบ ซึ่งมีมวลรวมเข้าระบบเท่ากับ 4.5 kg หรือ 21% โดยมีอากาศที่เข้าไปทำปฏิกิริยาในกระบวนการมีน้ำหนัก 17.13 kg หรือ 79% มีมวลที่เข้าระบบรวม 21.63 kg ส่วนมวลที่ออกจากระบบจะแบ่งออกเป็นปริมาณแก๊สผลิตภัณฑ์ (CO, CO₂, H₂O, N₂, O₂) และถ่านรวมชี้เถ่า ซึ่งมีมวลออกจากระบบเท่ากับ 1.058 kg, 1.661 kg, 0.545 kg, 13.156 kg, 4.339 kg และ 0.873 kg ตามลำดับ และในส่วนของการการสมดุลพลังงานของระบบ พบว่าพลังงานรวมที่เข้าระบบคือ 60.71 MJ (100%) ส่วนพลังงานที่ออกจากระบบมีพลังงานความร้อนที่เตาผลิตได้ 23.11 MJ (38.07%) มีการสูญเสียพลังงานความร้อนจากผนังเตา (Q_{WS}) และไอเสีย (Q_E) โดยมีพลังงานความร้อนสูญเสีย 9.76 MJ (16.08%) และ 27.83 MJ (45.85%) ตามลำดับ

7. การประเมินเศรษฐศาสตร์การผลิตความร้อนของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง มีเงินลงทุนในการผลิตเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง 35,500 baht/unit โดยจะคิดเศรษฐศาสตร์การผลิตความร้อนเตาชีวมวลที่ใช้งาน 2 ระบบ (ER 1.20 กับ EGRA 10%) เมื่อใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด เศษไม้ และฟางข้าว เทียบกับการใช้งานแก๊สหุงต้ม เชื้อเพลิงอัดเม็ดให้ต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 16,974.71 baht/y, 17,467.46 baht/y และ 18,945.71 baht/y ตามลำดับ ส่วนเตาแก๊สหุงต้มให้ต้นทุนการผลิตความร้อนรวมเท่ากับ 45,267.30 baht/y ด้านต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวลที่ ER 1.20 และ EGRA 10% พบว่าการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดให้ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนต่ำสุด 2.52 baht/kWh และ 2.91 baht/kWh ในขณะที่เตาแก๊สหุงต้มให้ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนสูงสุด 4.68 baht/kWh และในส่วนของเศรษฐศาสตร์พบว่าที่ ER 1.20 ของการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีระยะเวลาคืนทุน 1.25 year ผลตอบแทนสุทธิ 85,739.23 baht ผลประหยัด 28,294.12 baht/y และมีผลตอบแทนภายใน 74.82%

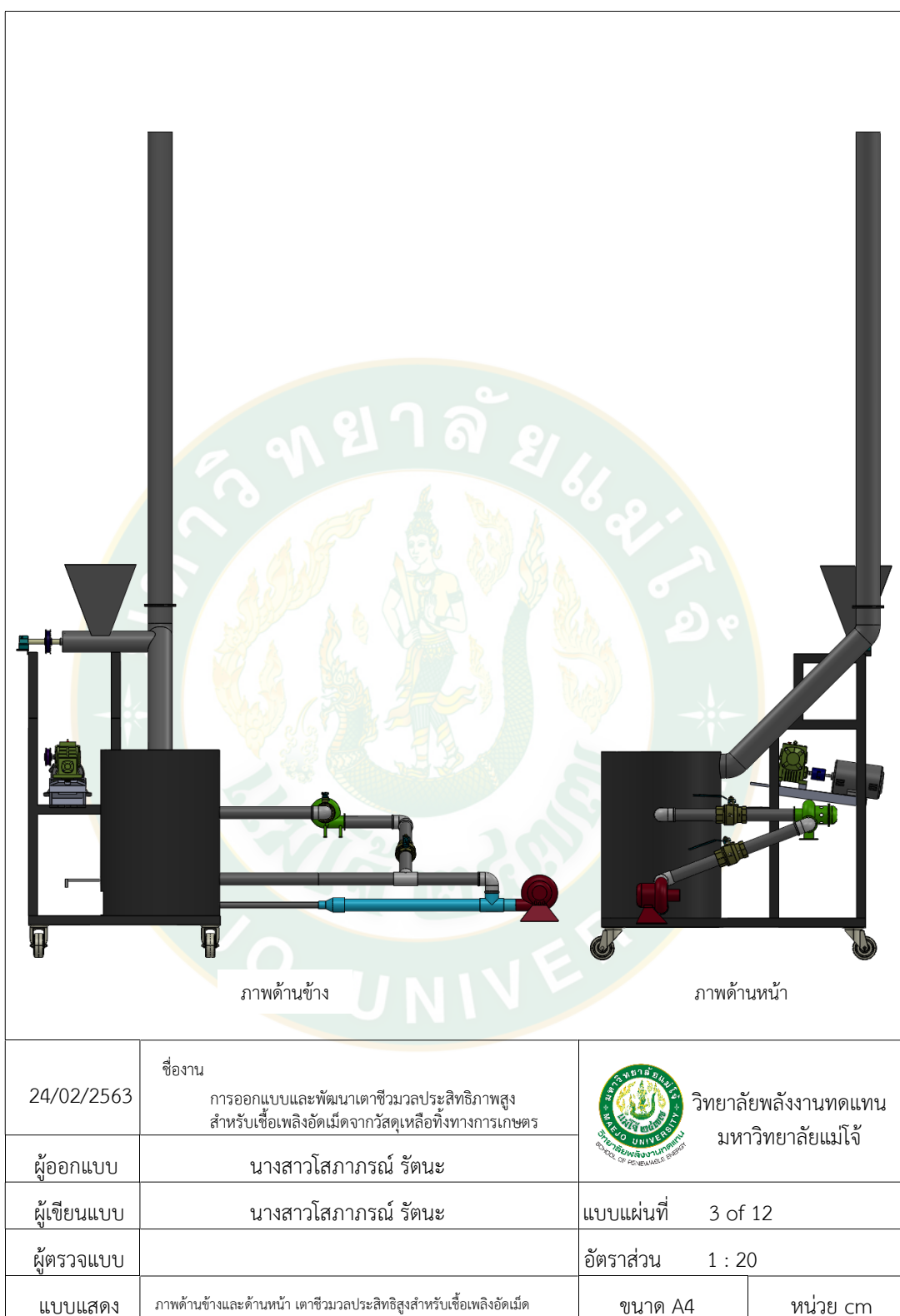
ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการออกแบบให้มีลักษณะการใช้งานในระบบวิสาหกิจชุมชนเพิ่มเติมขึ้น จะทำให้การใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดมีความหลากหลายเพิ่มขึ้น

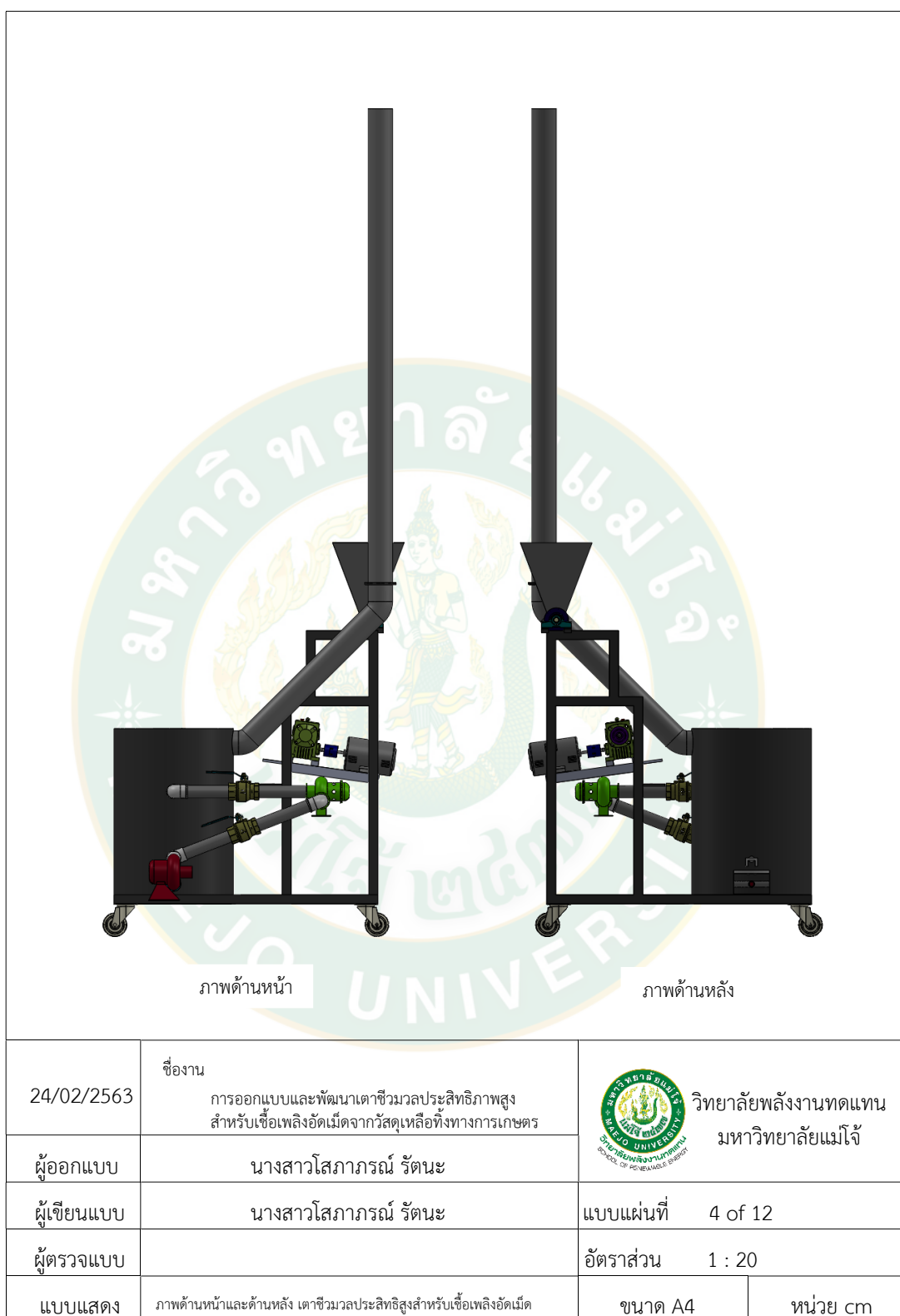




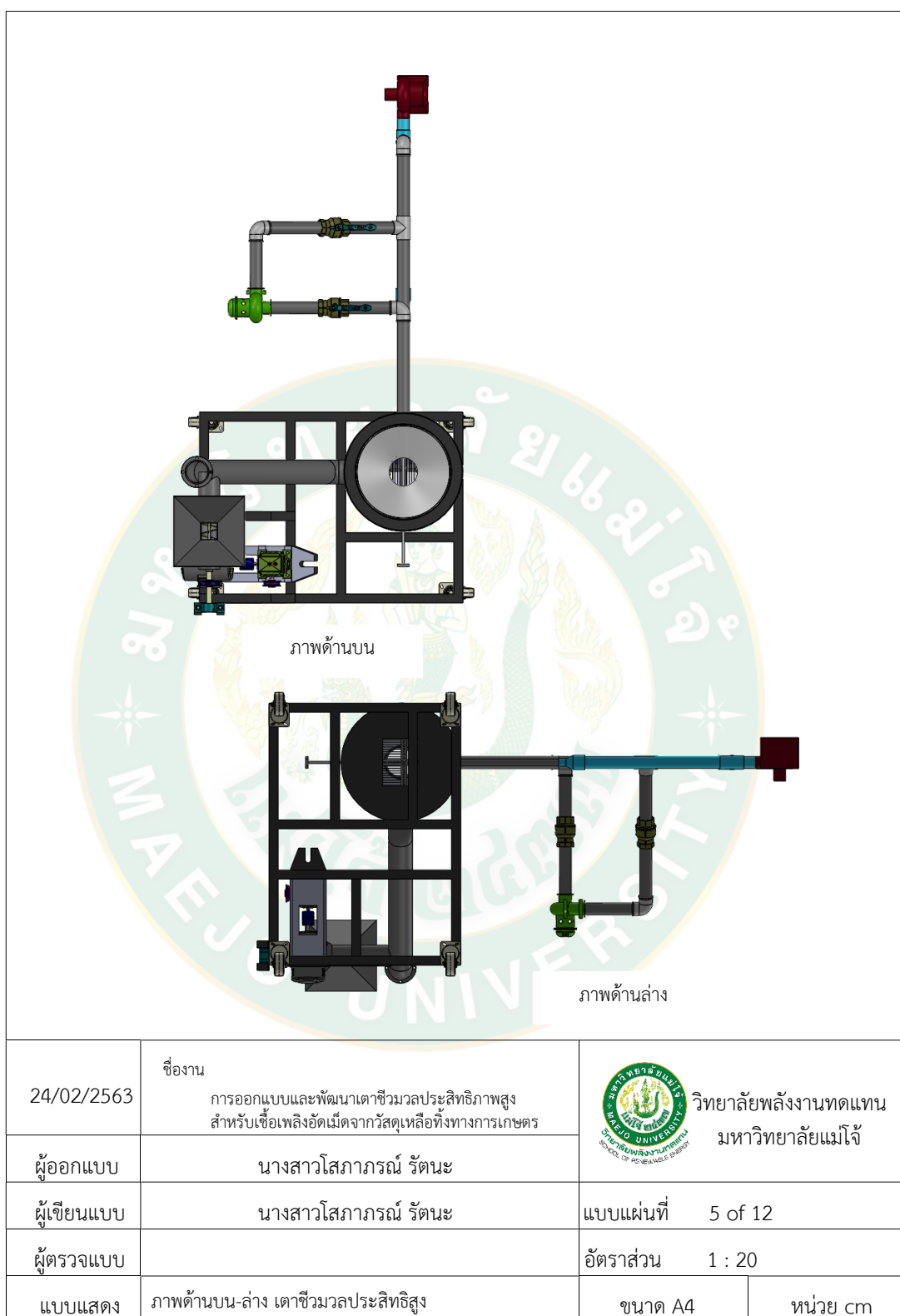
ภาพผนวกที่ 2 ส่วนประกอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



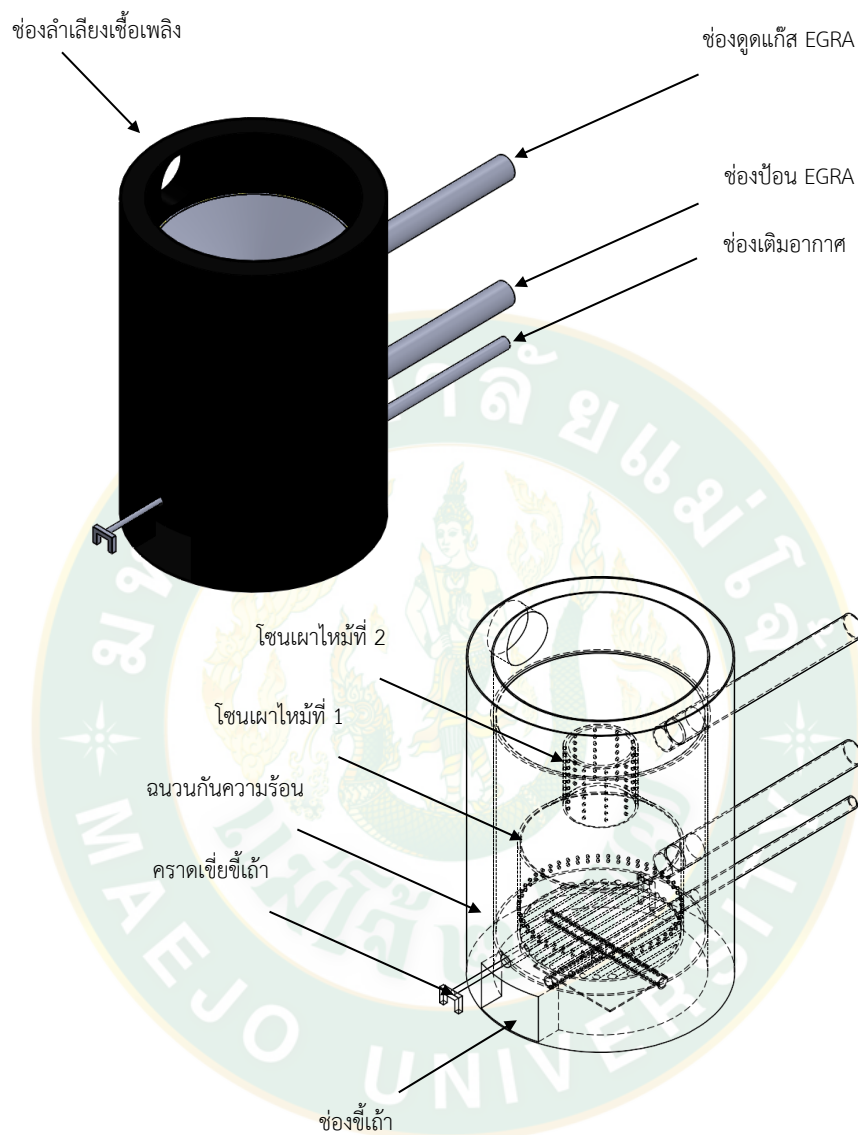
ภาพผนวกที่ 3 ภาพด้านข้าง-หน้า เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาพผนวกที่ 4 ภาพด้านหน้า-หลัง เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

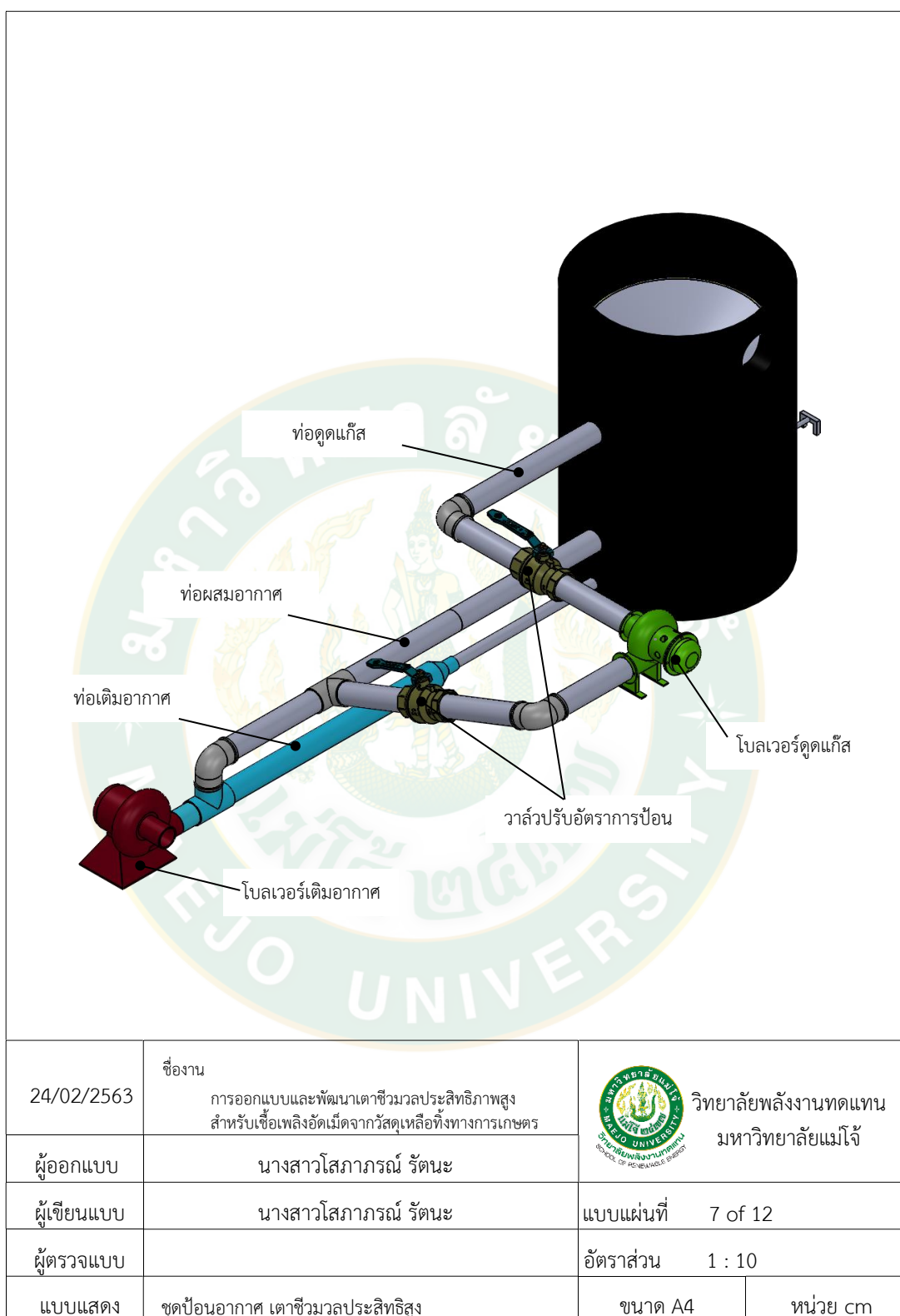


ภาพผนวกที่ 5 ภาพด้านบน-ล่าง เตาซีวมวลประสิทธิภาพสูง

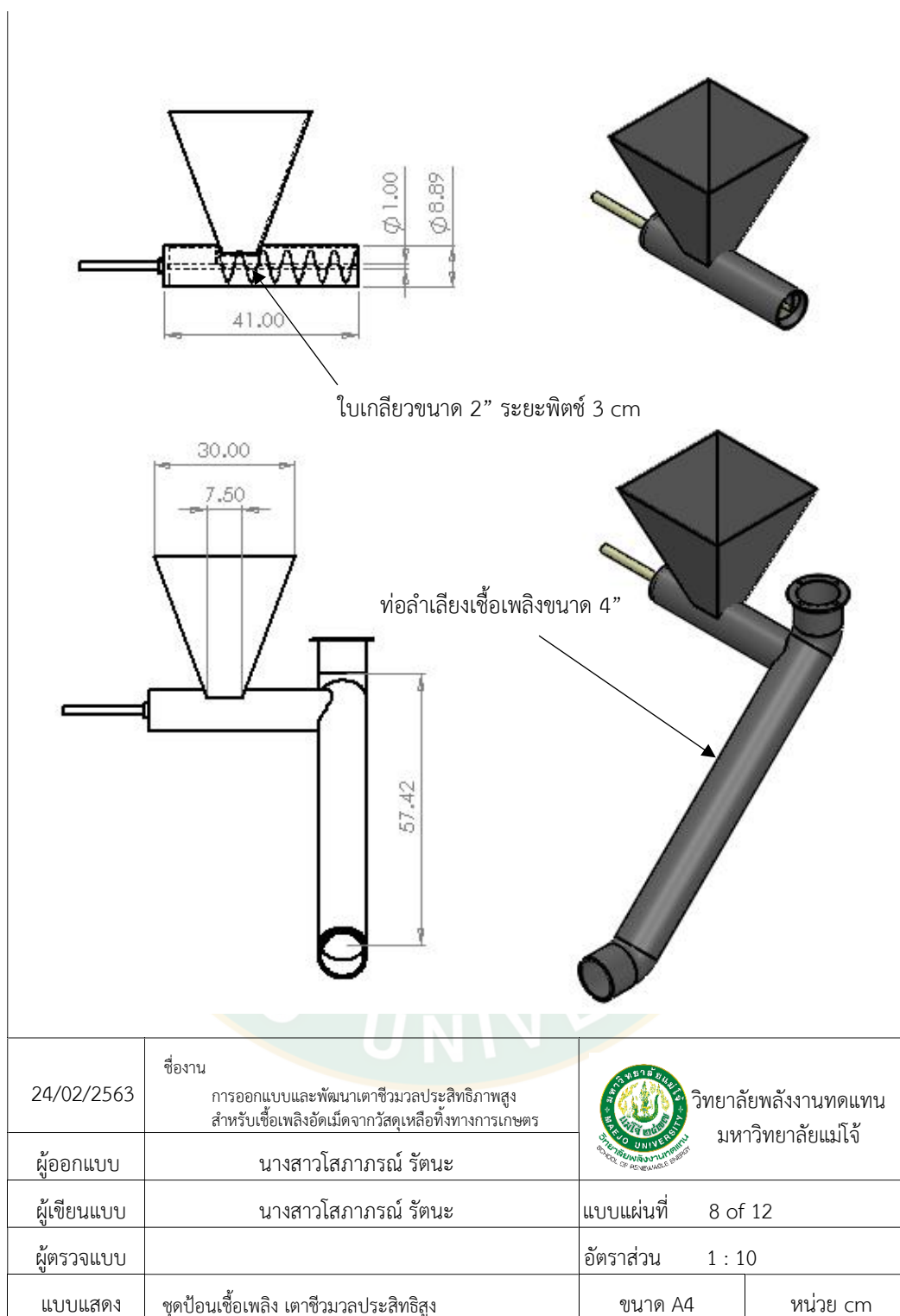


24/02/2563	ชื่องาน การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ออกแบบ	นางสาวโสภารัตน์ รัตนะ	
ผู้เขียนแบบ	นางสาวโสภารัตน์ รัตนะ	แบบแผ่นที่ 6 of 12
ผู้ตรวจแบบ		อัตราส่วน 1 : 10
แบบแสดง	ภาพ Isometric เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด	ขนาด A4 หน่วย cm

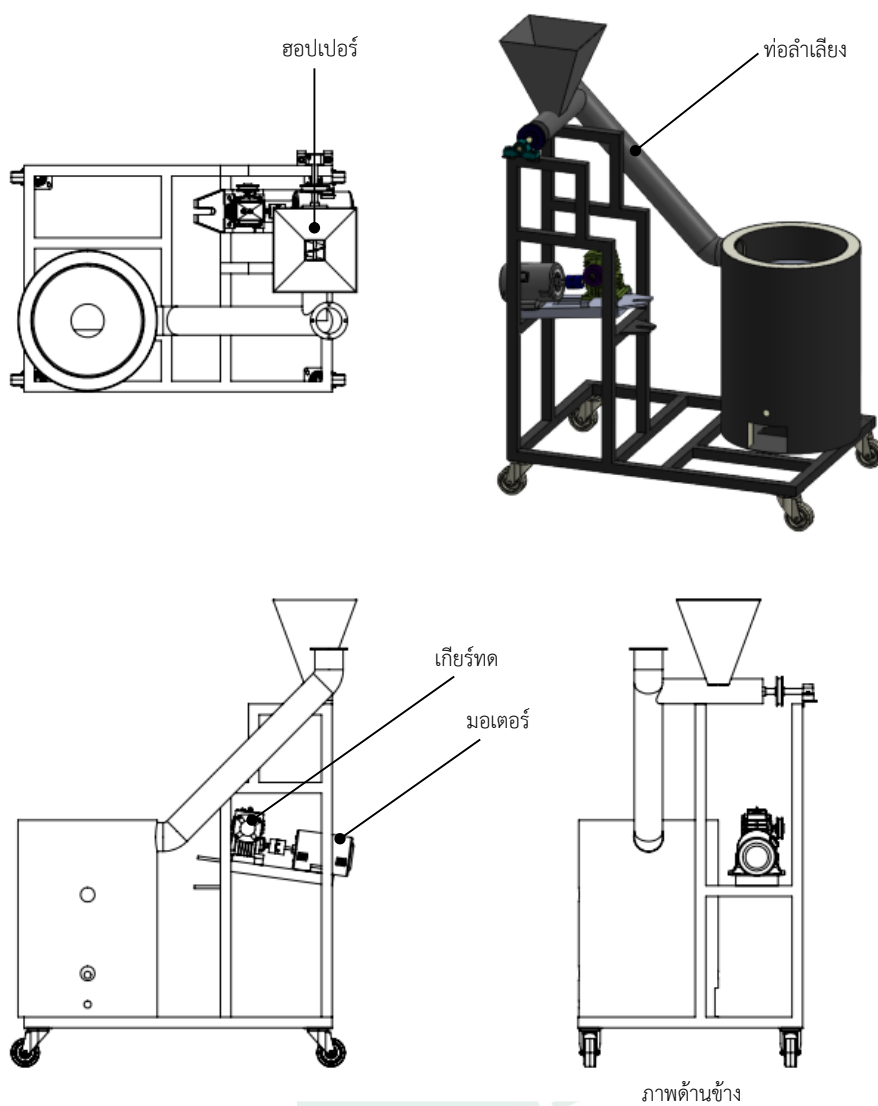
ภาพผนวกที่ 6 ภาพ Isometric ห้องเผาไหม้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาพผนวกที่ 7 ชุดป้อนอากาศเตาซีวมวลประสิทธิภาพสูง

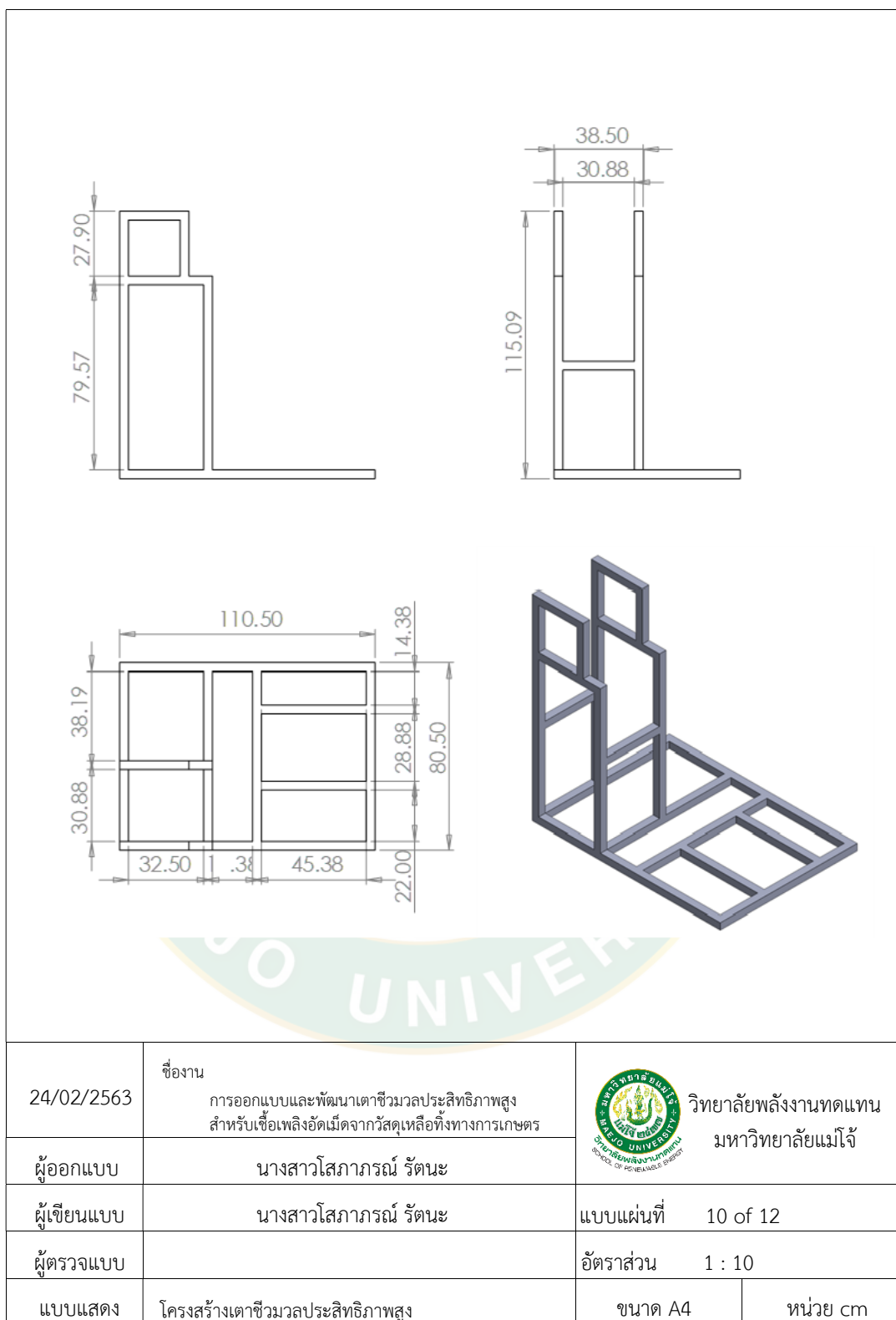


ภาพผนวกที่ 8 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

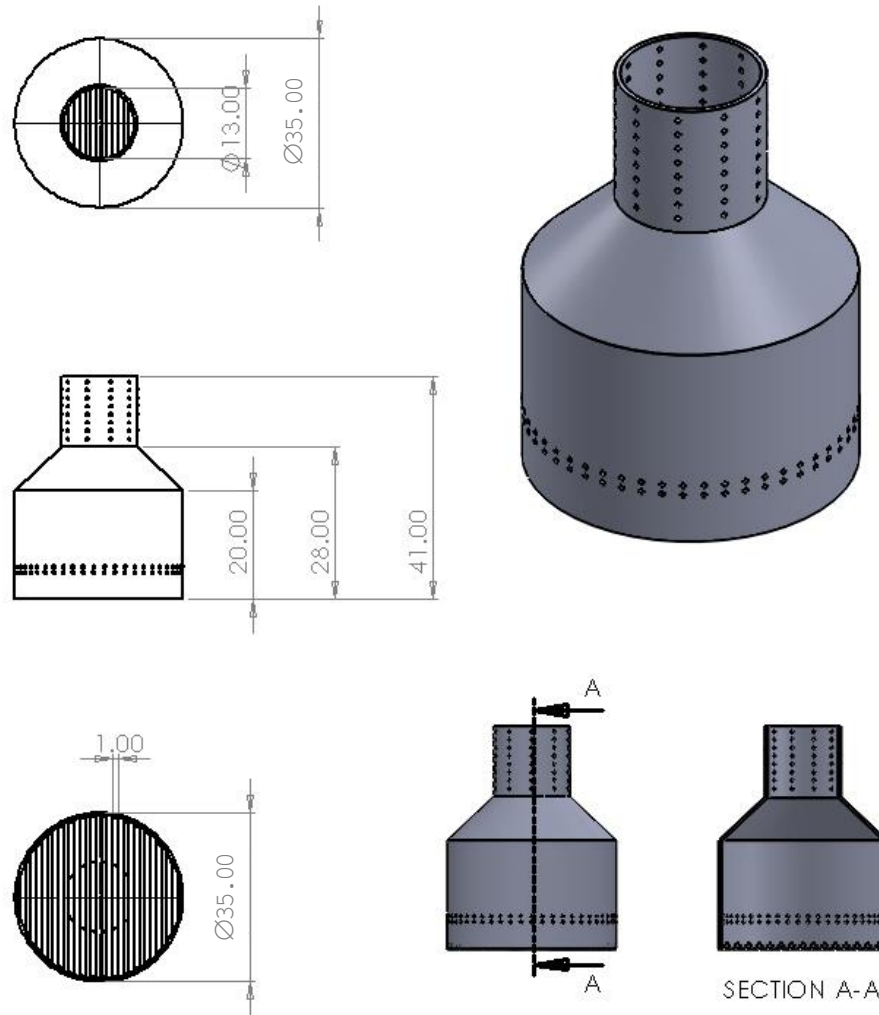


24/02/2563	ชื่องาน การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ออกแบบ	นางสาวโสภารัตน์ รัตนะ	
ผู้เขียนแบบ	นางสาวโสภารัตน์ รัตนะ	แบบแผ่นที่ 9 of 12
ผู้ตรวจแบบ		อัตราส่วน 1 : 10
แบบแสดง	ภาพด้านหน้า ด้านข้าง ด้านบน ระบบป้อนเชื้อเพลิง	ขนาด A4 หน่วย cm

ภาพผนวกที่ 9 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

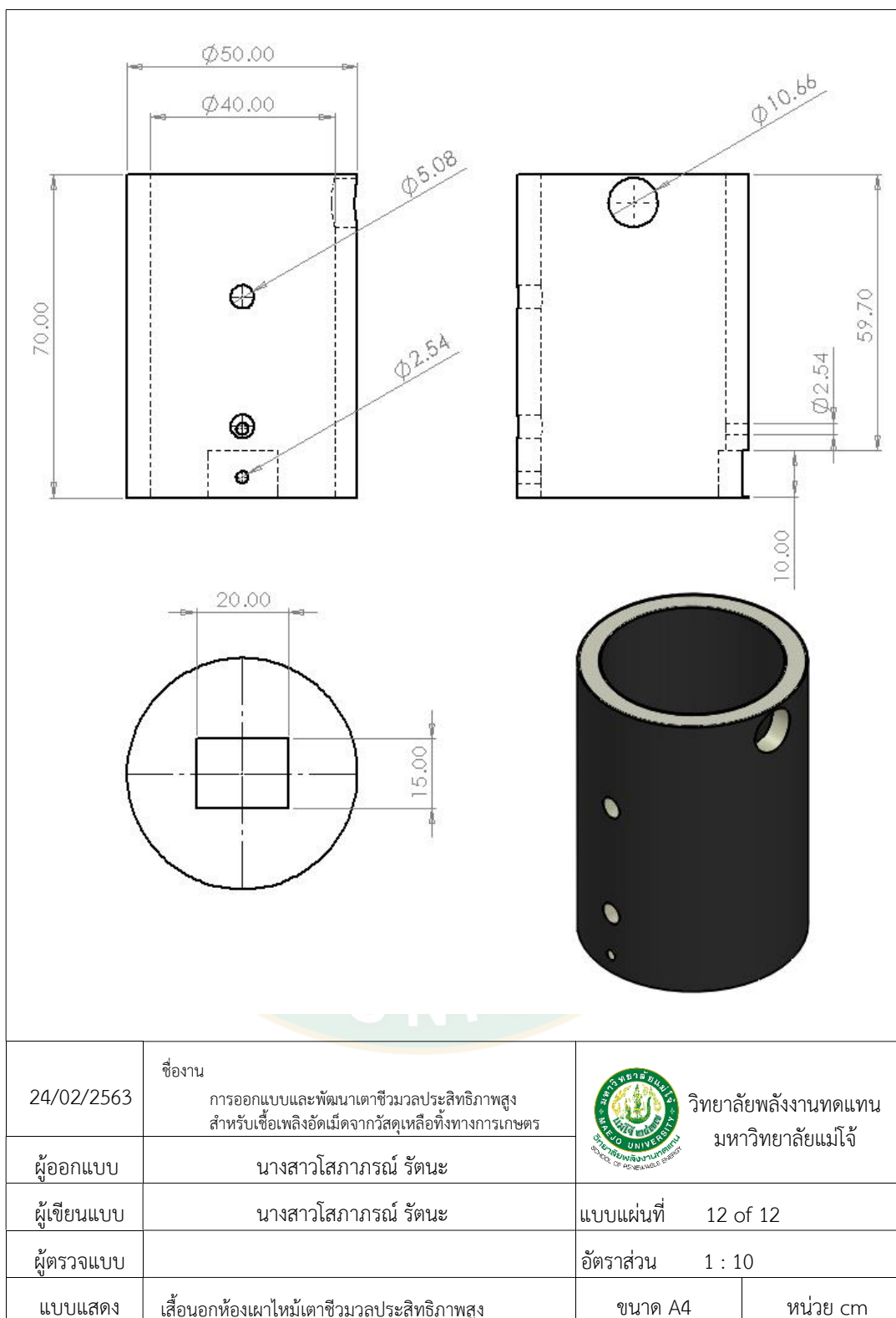


ภาพผนวกที่ 10 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



24/02/2563	ชื่องาน การออกแบบและพัฒนาเตาซีวมวลประสิทธิภาพสูง สำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	 วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ออกแบบ	นางสาวโสภารัตน์ รัตนะ	
ผู้เขียนแบบ	นางสาวโสภารัตน์ รัตนะ	แบบแผ่นที่ 11 of 12
ผู้ตรวจแบบ		อัตราส่วน 1 : 10
แบบแสดง	ภาพตัดห้องเผาไหม้เตาซีวมวลประสิทธิภาพสูง	ขนาด A4 หน่วย cm

ภาพผนวกที่ 11 ชุดป้อนอากาศเตาซีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาพผนวกที่ 12 ชุดป้อนอากาศเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาคผนวก ข

การคำนวณและผลการทดสอบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

รายละเอียดการคำนวณการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด

การคำนวณการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ด โดยใช้เชื้อเพลิงจากซังข้าวโพดอัดเม็ด และเศษไม้อัดเม็ด แสดงผลการคำนวณในขั้นตอนการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

กรณีการใช้เชื้อเพลิงจากซังข้าวโพดอัดเม็ด

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหุงต้ม

ขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะต้องทราบถึงค่าความต้องการพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหุงต้ม โดยค่าความต้องการพลังงานความร้อนสามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาดของห้องเผาไหม้ เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบเตาเพื่อรองรับปริมาณความร้อนที่ 30 kW

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้ม

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำจากขั้นตอนที่ 1 สามารถคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้มเพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ดได้แก่ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ (Q_b) โดยกำหนดปริมาณความร้อนที่ต้องการออกแบบ 30 kW ค่าความร้อนของซังข้าวโพดอัดเม็ด (LHV_{bio}) มีค่าความร้อนเท่ากับ 13,490 kJ/kg การคำนวณหาปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 41 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ด } (\dot{m}_{fuel, Corncob}) &= \frac{Q_b}{LHV_{bio}} \\ &= \frac{30kW}{13,490 \text{ kJ/kg}} \\ &= \frac{3,600s}{3,600s} \\ \text{ปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ด } (\dot{m}_{fuel, Corncob}) &= 8 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ดในระยะเวลา 1 h เสร็จสิ้นแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ดต่อการใช้งาน 1 ครั้ง ได้จากปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ด ($\dot{m}_{fuel}$) และระยะเวลาในการต้มน้ำ (t_{Total}) ซึ่งจากความต้องการการใช้งานเตาหุงต้มในงานวิจัยนี้มีความต้องการในการต้มน้ำ 90 min ต่อครั้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 42 ดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ดต่อครั้ง } (m_{Total, corncob}) = \dot{m}_{fuel} \times t_{Total}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{8 \text{ kg/h} \times 90 \text{ min}}{60 \text{ min/h}} \\ \text{ปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ด (m}_{\text{Total, corncob}}) &= 12 \text{ kg} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำและปริมาณการป้อนฟางข้าวอัดเม็ดเพื่อให้ได้ค่าปริมาณพลังงานความร้อนตามที่ต้องการแล้ว สามารถคำนวณหาขนาดของห้องเผาไหม้ได้จากปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ด ($\dot{m}_{\text{Total}}$) และความหนาแน่นซังข้าวโพดอัดเม็ด ($\rho_{\text{Cron cob}}$) เท่ากับ 1152.15 kg/m^3 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 43 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณห้องเผาไหม้ (V}_{\text{Chamber}}) &= \frac{\dot{m}_{\text{Total}}}{\rho_{\text{Ap}}} \\ &= \frac{12 \text{ kg}}{1,152.15 \text{ kg/m}^3} \\ \text{ปริมาณห้องเผาไหม้ (V}_{\text{Chamber}}) &= 0.01 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณปริมาณของห้องเผาไหม้ (V_{Chamber}) และกำหนดให้ห้องเผาไหม้มีความสูง 0.2 m สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_{Chamber}) ได้จากสมการที่ 44 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D}_{\text{Chamber}}) &= \left(\frac{V_{\text{Chamber}}}{H_{\text{Chamber}} \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} \\ &= \left(\frac{0.01}{0.20 \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} \end{aligned}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D}_{\text{Chamber}}) = 0.25 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมต่อขนาดของห้องเผาไหม้และปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากหากมีอัตราการป้อนอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้เกิดควันระหว่างการใช้งานได้ โดยในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (V_{air}) เลือกใช้ค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1 ในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และอัตราส่วน

อากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ $5.71 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ และค่าความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.20 kg/m^3 ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{m}_{\text{air}}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 45 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ } (\dot{V}_{\text{air}}) &= \frac{\text{ER} \times \dot{m}_{\text{fuel}} \times \text{A/F}}{\rho_{\text{air}}} \\ &= \frac{1 \times 8 \text{ kg/h} \times 5.71 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}}{1.20 \text{ kg/m}^3} \\ \text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ } (\dot{V}_{\text{air}}) &= 38.07 \text{ m}^3/\text{h}\end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาความเร็วลมของอากาศภายในห้องเผาไหม้

เมื่อทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_{Chamber}) และปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{m}_{\text{air}}$) ที่เหมาะสมต่อขนาดของเตาชีวมวล โดยพื้นที่ (Area) ของท่อป้อนลมเท่ากับ 0.00141 m^2 สามารถคำนวณความเร็วลมได้จากสมการที่ 46 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\text{ความเร็วลม } (v_{\text{air}}) &= \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\text{Area}} \\ &= \frac{38.07 \text{ m}^3/\text{h}}{0.00141 \text{ m}^2 \times 3600 \text{ s}} \\ \text{ความเร็วลม } (v_{\text{air}}) &= 7.5 \text{ m/s}\end{aligned}$$

กรณีการใช้เชื้อเพลิงจากเศษไม้อัดเม็ด

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหุงต้ม

ขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสำหรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจะต้องทราบถึงค่าความต้องการพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหุงต้ม โดยค่าความต้องการพลังงานความร้อนสามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาดของห้องเผาไหม้ เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบเตาเพื่อรองรับปริมาณความร้อนที่ 30 kW

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้ม

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำจากขั้นตอนที่ 1 สามารถคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้มเพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ด ได้แก่ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ (Q_b) โดยกำหนดปริมาณความร้อนที่ต้องการออกแบบ 30 kW ค่าความร้อนของเศษไม้อัดเม็ด

(LHV_{bio}) มีค่าความร้อนเท่ากับ 16,521 kJ/kg การคำนวณหาปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 41 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ด } (\dot{m}_{\text{fuel, Wood chip}}) &= \frac{Q_b}{\text{LHV}_{\text{bio}}} \\ &= \frac{30\text{kW}}{\frac{16,521 \text{ kJ/kg}}{3,600\text{s}}} \\ \text{ปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ด } (\dot{m}_{\text{fuel, Wood chip}}) &= 6.54 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ดในระยะเวลา 1 h เสร็จสิ้นแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ดต่อการใช้งาน 1 ครั้ง ได้จากปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ด ($\dot{m}_{\text{fuel}}$) และระยะเวลาในการต้มน้ำ (t_{Total}) ซึ่งจากความต้องการการใช้งานเตาหุงต้มในงานวิจัยนี้มีความต้องการในการต้มน้ำ 90 min ต่อครั้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 42 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ดต่อครั้ง } (m_{\text{Total}}) &= \dot{m}_{\text{fuel}} \times t_{\text{Total}} \\ &= \frac{6.54 \text{ kg/h} \times 90 \text{ min}}{60 \text{ min/h}} \\ \text{ปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ด } (m_{\text{Total}}) &= 9.81 \text{ kg} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำและปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ดเพื่อให้ได้ค่าปริมาณพลังงานความร้อนตามที่ต้องการแล้ว สามารถคำนวณหาขนาดของห้องเผาไหม้ได้จากปริมาณการป้อนเศษไม้อัดเม็ด ($\dot{m}_{\text{Total}}$) และความหนาแน่นเศษไม้อัดเม็ด ($\rho_{\text{Wood chip}}$) เท่ากับ 1,201.08 kg/m³ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 43 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณห้องเผาไหม้ } (V_{\text{Chamber}}) &= \frac{\dot{m}_{\text{Total}}}{\rho_{\text{Ap}}} \\ &= \frac{9.81 \text{ kg}}{1,201.08 \text{ kg/m}^3} \\ \text{ปริมาณห้องเผาไหม้ } (V_{\text{Chamber}}) &= 0.008 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณปริมาณของห้องเผาไหม้ (V_{Chamber}) และกำหนดให้ห้องเผาไหม้มีความสูง 0.2 m สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_{Chamber}) ได้จากสมการที่ 44 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D}_{\text{Chamber}}) &= \left(\frac{V_{\text{Chamber}}}{H_{\text{Chamber}} \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} \\ &= \left(\frac{0.008}{0.20 \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} \end{aligned}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D}_{\text{Chamber}}) = 0.23 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมต่อขนาดของห้องเผาไหม้และปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากหากมีอัตราการป้อนอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดควันระหว่างการใช้งานได้ โดยในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{V}_{\text{air}}$) เลือกใช้ค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1 ในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ $6.09 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ และค่าความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ $1.20 \text{ kg}/\text{m}^3$ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{m}_{\text{air}}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 45 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ } (\dot{V}_{\text{air}}) &= \frac{\text{ER} \times \dot{m}_{\text{fuel}} \times \text{A/F}}{\rho_{\text{air}}} \\ &= \frac{1 \times 8 \text{ kg/h} \times 6.09 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}}{1.20 \text{ kg}/\text{m}^3} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ } (\dot{V}_{\text{air}}) = 40.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาความเร็วลมของอากาศภายในห้องเผาไหม้

เมื่อทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_{Chamber}) และปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ($\dot{m}_{\text{air}}$) ที่เหมาะสมต่อขนาดของเตาชีวมวล โดยพื้นที่ (Area) ของท่อป้อนลมเท่ากับ 0.00141 m^2 สามารถคำนวณความเร็วลมได้จากสมการที่ 46 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วลม (v}_{\text{air}}) &= \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\text{Area}} \\ &= \frac{40.6 \text{ m}^3/\text{h}}{0.00141 \text{ m}^2 \times 3600 \text{ s}} \\ \text{ความเร็วลม (v}_{\text{air}}) &= 8.0 \text{ m/s} \end{aligned}$$

รายละเอียดการคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล

1. อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

สมการคำนวณการเผาไหม้ที่สมบูรณ์



ตารางที่ 27 เงื่อนไขคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ	ซังข้าวโพด	เศษไม้	ฟางข้าว
Carbon (kg)	0.4639	0.4937	0.3970
Hydrogen (kg)	0.0605	0.0616	0.0512
Oxygen (kg)	0.4067	0.4105	0.3791

1.1 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของซังข้าวโพด

Stoichiometric combustion (C)

C	O ₂	CO ₂
12 kg	(16×2) = 32 kg	12 + 32 = 44 kg
1 kg	2.67 kg	3.67 kg

∴ C = 1 kg, using O₂ = 2.67 kg for combustion to 3.67 kg CO₂

Corn cob C = 0.4639 × 2.67 = 1.2386 kg

Stoichiometric combustion (H₂)

2H ₂	O ₂	2H ₂ O
2 × (1×2) = 4 kg	(16×2) = 32 kg	4 + 32 = 36 kg
1 kg	8 kg	9 kg

Corn cob H = 0.0605 × 8 = 0.484 kg

Air for combustion = C + H – O₂
 = 1.2386 + 0.484 – 0.4067
 = 1.3129 kg

But, in the atmospheric have O₂ = 23 %

Ans. Using dry air for corn cob complete combustion are A/F = 1.3129/0.23
 = 5.71 kg_{air}/kg_{fuel}

1.2 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเศษไม้

$$\text{Wood chip} \quad C = 0.4937 \times 2.67 = 1.3182 \text{ kg}$$

$$H = 0.0616 \times 8 = 0.4928 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Air for combustion} &= C + H - O_2 \\ &= 1.3182 + 0.4928 - 0.4105 \\ &= 1.4005 \text{ kg} \end{aligned}$$

But, in the atmospheric have $O_2 = 23 \text{ wt\%}$

$$\begin{aligned} \text{Ans. Using dry air for wood chip complete combustion are } A/F &= 1.4005/0.23 \\ &= 6.09 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

1.3 การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของฟางข้าว

$$\text{Rice straw} \quad C = 0.3970 \times 2.67 = 1.06 \text{ kg}$$

$$H = 0.0512 \times 8 = 0.4096 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{Air for combustion} &= C + H - O_2 \\ &= 1.06 + 0.4096 - 0.3791 \\ &= 1.0905 \text{ kg} \end{aligned}$$

But, in the atmospheric have $O_2 = 23 \text{ wt\%}$

$$\begin{aligned} \text{Ans. Using dry air for rice straw complete combustion are } A/F &= 1.0905/0.23 \\ &= 4.74 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}} \end{aligned}$$

2. การสมดุลมวลและพลังงานของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 28 เงื่อนไขการคำนวณมวลของระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

คุณลักษณะ	หน่วย	ค่าคงที่
อัตราส่วนสมมูล	-	1.20
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง	kg/h	3
เวลาในการทดสอบ	h	1.5
อัตราการป้อนต่อเชื้อเพลิงขี้ข้าวโพด	kg _{air} /kg _{fuel}	5.71
อัตราการป้อนต่อเชื้อเพลิงเศษไม้	kg _{air} /kg _{fuel}	6.09

อัตราการใช้เชื้อเพลิงฟางข้าว	kg _{air} /kg _{fuel}	4.74
ใช้น้ำหนักซีเมนต์ฟางข้าวโพด	kg	0.873
ใช้น้ำหนักซีเมนต์เศษไม้	kg	1.115
ใช้น้ำหนักซีเมนต์ฟางข้าว	kg	1.7325

ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์โดยมวล เมื่อใช้ฟางข้าวโพดอัดเม็ด

ปริมาณเชื้อเพลิง $3 \text{ kg/h} \times 1.5 \text{ h} = 4.5 \text{ kg}$

ปริมาณอากาศ $\frac{1.20 \times 3 \text{ kg/h} \times 5.71 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}}{1.20 \text{ kg/m}^3} = 17.13 \text{ kg}$

ดังนั้นมวลเข้ารวม $4.5 + 17.13 = 21.63 \text{ kg}$

มวลซีเมนต์ 0.873 kg

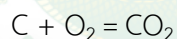
มวลแก๊สผลิตภัณฑ์ 20.757 kg

การวิเคราะห์โดยมวลของแก๊สผลิตภัณฑ์

การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะเกิด CO



การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะได้เกิด CO₂ H₂O N₂ O₂



ส่วนประกอบอากาศโดยมวล ประกอบด้วย O₂ = 23.20% และ N₂ = 76.80%

สมการในการคำนวณหามวลของอากาศ



ตารางที่ 29 การคำนวณสมดุลโดยมวลของแก๊สผลิตภัณฑ์ เมื่อใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด

มวลสารเชื้อเพลิง (%)	มวลสารเชื้อเพลิง (kg)	สาร เชื้อเพลิง	product of combustion kg/kg fuel			
			CO	CO ₂	H ₂ O	N ₂
45.39	0.4539	C	0.4539×2.33 =1.058	0.4539×3.66 =1.661		
6.05	0.0605	H ₂			0.0605×9 =0.545	
0.50	0.005	N ₂				17.13×0.768 =13.156

$$\therefore \text{มวลของออกซิเจนจากอากาศ} = 20.757 - 1.058 + 1.661 + 0.5451 + 3.156$$

$$= 4.339 \text{ kg}$$

ตารางที่ 30 สรุปผลการคำนวณสมดุลมวลของระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

มวลเข้า (kg)			มวลออก (kg)		
กระแส	ปริมาณ	%	กระแส	ปริมาณ	%
สมดุลมวลซังข้าวโพด					
เชื้อเพลิง	4.5	21	ซังเถ้า	0.873	4.04
อากาศ	17.13	79	CO	1.058	4.68
			CO ₂	1.661	7.68
			H ₂ O	0.545	2.52
			N ₂	13.156	60.82
			O ₂	4.339	20.06
รวม	21.63	100	รวม	21.63	100
สมดุลมวลเศษไม้					
เชื้อเพลิง	4.5	20	ซังเถ้า	1.115	4.90
อากาศ	18.27	80	CO	1.150	5.05
			CO ₂	1.807	7.97
			H ₂ O	0.554	2.43
			N ₂	14.031	61.62
			O ₂	4.112	18.06
รวม	22.77	100	รวม	22.77	100

สมดุลมวลฟางข้าว					
เชื้อเพลิง	4.5	24.04	ชี้ไ้	1.7325	9.25
อากาศ	14.22	75.96	CO	0.925	4.94
			CO ₂	1.45	7.75
			H ₂ O	0.461	2.46
			N ₂	10.92	58.33
			O ₂	3.234	17.27
รวม	18.72	100	รวม	18.72	100

2.2 การสมดุลพลังงานระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

โดยพลังงานที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับพลังงานที่ออกจากระบบ โดยพลังงานที่ออกจากระบบ ประกอบด้วยความร้อนที่นำประโยชน์ พลังงานความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ การสูญเสียผ่านผนังเตา และการสูญเสียไปกับแก๊สไอเสีย

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$Q_{in} = m_{fuel} \times LHV$$

$$Q_{out} = Q_u + Q_{loss}$$

ตารางที่ 31 เงื่อนไขการคำนวณพลังงานขาเข้าระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

คุณลักษณะ	หน่วย	ค่าคงที่
ปริมาณเชื้อเพลิงเข้าระบบ	kg	4.5
ค่าความร้อนของซังข้าวโพด	MJ/kg	14.74
ค่าความร้อนของเศษไม้	MJ/kg	16.52
ค่าความร้อนของฟางข้าว	MJ/kg	15.01
อัตราการป้อนต่อเชื้อเพลิงเศษไม้	kg _{air} /kg _{fuel}	6.09
อัตราการป้อนต่อเชื้อเพลิงฟางข้าว	kg _{air} /kg _{fuel}	4.74

ตัวอย่างการคำนวณสมดุลพลังงานระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

พลังงานขาเข้าเมื่อใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด จากสมการที่ 37

$$Q_{in} = m_{fuel} \times LHV$$

$$Q_{in} = 4.5 \text{ kg} \times 13.49 \text{ MJ/kg}$$

$$Q_{in} = 60.71 \text{ MJ}$$

ตารางที่ 32 เงื่อนไขการคำนวณพลังงานขาออกระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ตัวแปร	หน่วย	ค่าคงที่		
		ผนังปล่องควัน	ผนังเตาด้านข้าง	ผนังเตาด้านล่าง
ϵ	-	0.8	0.8	0.8
a	m ²	0.638	1.1	0.183
ซังข้าวโพดอัดเม็ด				
Tw	°C	101.9	110	206.7
Ta	°C	28.5	28.5	28.5
เศษไม้อัดเม็ด				
Tw	°C	118.9	113.9	213.8
Ta	°C	34.3	34.3	34.3
ฟางข้าวอัดเม็ด				
Tw	°C	124.1	77	212
Ta	°C	30.1	30.1	30.1

หมายเหตุ: ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีที่ผิวผนัง วัสดุเตาทำจากเหล็กจึงเลือกใช้สำหรับผนังที่เป็นสนิม = 0.8

ตัวอย่างการคำนวณการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา

1. การสูญเสียความร้อนผนังปล่องควัน

การสูญเสียโดยการแผ่รังสี จากสมการที่ 39

$$q_r = 4.8791 \epsilon \cdot \left\{ \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right\}$$

$$q_r = 4.8791 \times 0.8 \cdot \left\{ \left(\frac{101.9}{100} \right)^4 - \left(\frac{28.5}{100} \right)^4 \right\}$$

$$q_r = 449.12 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$$

การสูญเสียโดยการพาความร้อนผ่านผนังเตา จากสมการที่ 40

$$q_c = 2.7995 \cdot (T_w - T_a)^{1.25}$$

$$q_c = 2.7995 \cdot (101.9 - 28.5)^{1.25}$$

$$q_c = 601.45 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$$

การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตา จากสมการที่ 43

$$Q_{s1} = a_s \cdot (q_{rs} + q_{cs})$$

$$Q_{s1} = 0.638 \cdot (449.12 + 601.45)$$

$$Q_{s1} = 670.26 \text{ kcal/hr}$$

2. การสูญเสียความร้อนผนังเตาด้านข้าง

การสูญเสียโดยการแผ่รังสี จากสมการที่ 39

$$q_r = 4.8791 \cdot \epsilon \cdot \left\{ \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right\}$$

$$q_r = 4.8791 \times 0.8 \cdot \left\{ \left(\frac{110}{100} \right)^4 - \left(\frac{28.5}{100} \right)^4 \right\}$$

$$q_r = 518.03 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$$

การสูญเสียโดยการพาความร้อนผ่านผนังเตา จากสมการที่ 41

$$q_c = 2.1995 \cdot (T_w - T_a)^{1.25}$$

$$q_c = 2.1995 \cdot (110 - 28.5)^{1.25}$$

$$q_c = 538.61 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$$

การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตา จากสมการที่ 43

$$Q_{s2} = a_s \cdot (q_{rs} + q_{cs})$$

$$Q_{s2} = 1.1 \cdot (518.03 + 538.61)$$

$$Q_{s2} = 1162.30 \text{ kcal/hr}$$

3. การสูญเสียความร้อนผนังเตาด้านล่าง

การสูญเสียโดยการแผ่รังสี จากสมการที่ 39

$$q_r = 4.8791 \cdot \epsilon \cdot \left\{ \left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right\}$$

$$q_r = 4.8791 \times 0.8 \cdot \left\{ \left(\frac{206}{100} \right)^4 - \left(\frac{28.5}{100} \right)^4 \right\}$$

$$q_r = 1,746.26 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$$

การสูญเสียโดยการพาความร้อนผ่านผนังเตา จากสมการที่ 40

$$q_c = 1.4997 \cdot (T_w - T_a)^{1.25}$$

$$q_c = 1.4997 \cdot (206.7 - 28.5)^{1.25}$$

$$q_c = 976.43 \text{ kcal/m}^2\text{hr}$$

การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตา จากสมการที่ 43

$$Q_{s1} = a_s \cdot (q_{rs} + q_{cs})$$

$$Q_{s1} = 0.183 \cdot (1,746.26 + 976.43)$$

$$Q_{s1} = 498.25 \text{ kcal/hr}$$

การสูญเสียความร้อนรวมจากผนังเตา จากสมการที่ 44

$$Q_{ws} = Q_{s1} + Q_{s2} + Q_{s3}$$

$$Q_{WS} = 670.26 + 1,162.30 + 498.25$$

$$Q_{WS} = 2,330.82 \text{ kcal/hr หรือเท่ากับ } 9.76 \text{ MJ}$$

ความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ (Q_U)

การใช้เชื้อเพลิงจากซังข้าวโพด $Q_U = 23.11 \text{ MJ}$

ดังนั้นการสูญเสียไปกับแก๊สไอเสีย (Q_E)

$$Q_{in} = Q_{out}$$

$$Q_{out} = Q_U + Q_{WS} + Q_E$$

เมื่อ $Q_{in} = 60.71 \text{ MJ}$ จะได้ $60.71 = 23.11 + 9.76 + Q_E$

ดังนั้น $Q_E = 27.84 \text{ MJ}$

ตารางที่ 33 สรุปผลการคำนวณพลังงานขาออกกระบบเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

พลังงานเข้า	%	พลังงานออก	%
ซังข้าวโพดอัดเม็ด			
Q_{in} : 60.71 MJ	100	Q_U : 23.11 MJ	38.07
		Q_{WS} : 9.76 MJ	16.08
		Q_E : 27.84 MJ	45.85
เศษไม้อัดเม็ด			
Q_{in} : 74.34 MJ	100	Q_U : 26.44 MJ	35.56
		Q_{WS} : 10.46 MJ	14.07
		Q_E : 37.45 MJ	50.37
ฟางข้าวอัดเม็ด			
Q_{in} : 67.55 MJ	100	Q_U : 21.47 MJ	31.78
		Q_{WS} : 8.50 MJ	12.58
		Q_E : 37.58 MJ	55.64

รายละเอียดการคำนวณการประเมินสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ตัวอย่างการคำนวณเมื่อใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด

มวลน้ำเริ่มต้น (m_{w1}) = 7 kg

มวลน้ำสุดท้าย = 1.179 kg

มวลน้ำระเหย (m_{w2}) = 5.821 kg

ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_{pw})	= 4.186 kJ/kg·K
ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (h_{fg})	= 2,257 kJ/kg
อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (T_{wi})	= 22.1 °C
อุณหภูมิน้ำเดือด (T_{wb})	= 99.5 °C
เวลาในการทดสอบ	= 90 min , 5400 s

หาปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์

$$Q_U = [m_{w1} C_{pw} (T_{wb} - T_{wi})] + [m_{w2} h_{fg}]$$

$$Q_U = [7 \times 4.186 (99.5 - 22.1)] + [5.821 \times 2,257]$$

$$Q_U = 15,405.97 \text{ kJ}$$

ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล (η_{th})

$$\eta_{th} = \frac{Q_U}{Q_{Fuel}} \times 100$$

$$Q_{Fuel} = m_{Fuel} \times LHV_{biomass}$$

$$Q_{Fuel} = 3 \times 13,490$$

$$Q_{Fuel} = 40,470 \text{ kJ}$$

ดังนั้น

$$\eta_{th} = \frac{15,405.97}{40,470} \times 100$$

$$\eta_{th} = 38.07\%$$

ประสิทธิภาพรวม (η_{all})

$$\eta_{all} = \frac{Q_U}{Q_{Fuel} \times Q_E} \times 100$$

$$Q_{Fuel} = 40,470 \text{ kJ}$$

$$Q_E = 3600 \times P_e$$

$$P_e = 0.234 \text{ kW}$$

จะได้

$$Q_E = 3600 \times 0.234 \text{ kW}$$

$$Q_E = 842.4 \text{ kJ}$$

ดังนั้น

$$\eta_{all} = \frac{15,405.97}{40,470 + 842.4} \times 100$$

$$\eta_{all} = 37.29\%$$

หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (SFC)

$$SFC = \frac{\dot{m}_{Fuel}}{\dot{Q}_U}$$

$$SFC = \frac{3}{3.2636}$$

$$SFC = 0.92 \text{ kg/kwh}$$

หาอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

$$SEC = \frac{\dot{m}_{Fuel} LHV}{\dot{Q}_U}$$

$$SEC = \frac{3 \times 13,490}{2.8529}$$

$$SEC = 14.19 \text{ MJ/kwh}$$

ตารางที่ 34 สรุปผลการคำนวณสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

คุณลักษณะ	เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง		
	ซังข้าวโพด	เศษไม้	ฟางข้าว
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kWh)	0.92	1.05	1.13
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kWh)	14.19	15.19	16.99
ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kJ)	2.85	3.26	2.65
ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิง (MJ)	40.47	49.56	45.03
ประสิทธิภาพความร้อน (%)	38.07	35.56	31.78

ตารางที่ 35 สรุปผลการทดสอบอุณหภูมิเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงโดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด

เวลา (นาที)	Corn Cob pellet				
	Feed rate 3 kg/h	Feed rate 5 kg/h	Feed rate 7.5 kg/h	SA 10%	SA 20%
0	22.1	26.6	19.2	25.5	23.4
5	55.5	64.9	98.1	74.1	61.7
10	80	98.9	98	98.7	80.5
15	98.8	99.3	98	99	98.4
20	98.6	99.2	98.2	98.9	98.8
25	99.1	99.4	98.1	99	98.7
30	99	99.5	98.1	99.3	98.8
35	98.9	99.5	98.2	99.2	99
40	99.2	99.7	98.6	99.2	99

45	99.5	99.3	98.6	99.3	98.9
50	99.5	99.4	98.6	99.2	98.8
55	99.1	99.6	98.8	99.4	98.7
60	99.1	99.5	98.2	99.5	98.7
65	99	99.9	100.4	99.4	98.8
70	99.1	99.8	99.7	99.5	99.3
75	99	99.5	99.9	99.6	99.1
80	98.6	99.7	100.6	99.4	99.2
85	98.9	99.8	100.2	99.5	99.4
90	98	99.9	99.9	99.5	99.3

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิโดยทำการทดลอง 3 ซ้ำการทดลอง

ตารางที่ 36 ผลการทดสอบบดอนุกรมไม้เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงโดยใช้เชื้อเพลิงเศษไม้

เวลา (นาท)	Wood chips pellet				
	Feed rate 3 kg/h	Feed rate 5 kg/h	Feed rate 7.5 kg/h	SA 10%	SA 20%
0	23.3	21.1	23.6	25.4	18.2
5	48.4	80.3	88.8	44	55.7
10	64.7	102.2	102.5	58.1	84.7
15	87.7	101.5	102.4	77.4	98.7
20	90	101.4	102.5	89.2	98.7
25	99.4	101.4	102.3	98.5	98.6
30	101.2	101.4	101.7	98.6	98.8
35	101.1	102.3	101.5	98.5	98.7
40	99	99.9	101.4	95.6	98.8
45	98.39	99.6	101.3	98.8	98.6
50	98.87	99.4	101.5	98.8	98.8
55	100.5	101.6	100.6	98.7	98.8
60	100.1	102.9	100.4	98.7	98.6
65	99.6	102.9	100.5	98.7	98.6
70	99	103.3	99.9	98.8	98.5
75	99.2	102.9	99.9	98.8	98.8
80	99.5	103	99.9	98.6	98.7
85	99.6	102.6	99.8	98.5	98.8
90	99.8	102.5	100.2	98.4	98.7

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิโดยทำการทดลอง 3 ซ้ำการทดลอง

ตารางที่ 37 ผลการทดสอบอุณหภูมิตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงโดยใช้เชื้อเพลิงฟางข้าว

เวลา (นาทีก)	Rice straw pellet				
	Feed rate 3 kg/h	Feed rate 5 kg/h	Feed rate 7.5 kg/h	SA 10%	SA 20%
0	21.7	31.2	25.2	24.2	26.5
5	42.9	56.4	56.2	57.3	55.6
10	63	75.9	77.8	69.1	72.1
15	72.9	89.9	90.1	81.3	82.2
20	84.63	97.6	93.7	91.2	90.3
25	94.1	97.5	96.3	98.3	98.8
30	95.3	98	98.9	98.5	98.8
35	96.4	98.6	98.8	98.1	98.7
40	96.7	98.7	99.2	98.2	98.5
45	97.4	98.8	99.3	98.2	98.6
50	98	98.8	99.5	98.4	98.6
55	98	98	99.5	98	98.6
60	97.8	97.8	99.3	98.1	98.7
65	97.6	97.9	99.4	98	98.8
70	97.4	97.8	98.8	97.9	98.9
75	97.2	98.8	98.7	97.7	98.9
80	97.5	98.7	99.1	97.8	98.9
85	98	98.8	99	98.5	98.6
90	98	98.5	98.8	98	98.5

หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิโดยทำการทดลอง 3 ซ้ำการทดลอง

รายการคำนวณการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน

ตารางที่ 38 เงื่อนไขการคำนวณเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้แก๊สหุงต้ม

ค่าใช้จ่าย	หน่วย	แก๊สหุงต้ม
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	kg/h	1.3
ระยะเวลาในการใช้งาน	h/round	1.5
ระยะเวลาในการใช้งาน	round/d	3
ระยะเวลาในการใช้งาน	d/y	365
ราคาเชื้อเพลิงชีวมวล	baht/kg	21.2
ต้นทุนการผลิตความร้อน	kWh/round	25.242

หมายเหตุ: ราคาแก๊สหุงต้มถึงละ 318 บาท (15 กก.) (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2563)

ต้นทุนการผลิตความร้อนเมื่อใช้แก๊สหุงต้ม (baht/y)

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อรอบ	$1.3 \text{ kg/h} \times 1.5 \text{ h} = 1.95 \text{ kg/round}$
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อปี	$1.95 \text{ kg/round} \times 3 \text{ round/d} \times 365 \text{ d/y} = 2,135.25 \text{ kg/y}$
ต้นทุนการผลิตความร้อนต่อปี	$2,135.25 \text{ kg/y} \times 21.2 \text{ baht/kg} = 45,267.3 \text{ baht/y}$

ตารางที่ 39 เงื่อนไขการคำนวณเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด

ค่าใช้จ่าย	หน่วย	ซังข้าวโพด	เศษไม้	ฟางข้าว
เงินลงทุนสร้างเตาชีวมวล	baht	35,500	35,500	35,500
อายุการใช้งาน	year	10	10	10
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง	kg/h	3	3	3
ระยะเวลาในการใช้งาน	h/round	1.5	1.5	1.5
ระยะเวลาในการใช้งาน	round/d	3	3	3
ระยะเวลาในการใช้งาน	d/y	365	365	365
ราคาเชื้อเพลิงชีวมวล	baht/kg	3.1	3.2	3.5
ปริมาณการใช้ไฟฟ้า	kWh/round	0.351	0.351	0.351
ปริมาณการใช้ไฟฟ้า EGAR 10%	kWh/round	0.576	0.576	0.576
ราคาค่าไฟฟ้า	baht/kWh	4.4217	4.4217	4.4217
ค่าซ่อมบำรุงรักษา	baht/y	1,000	1,000	1,000
ดอกเบี้ย	%	5.375	5.375	5.375

หมายเหตุ: ราคาไฟฟ้าหน่วยละ 4.4217 บาท (การไฟฟ้านครหลวง, 2563)

อัตราดอกเบี้ยเงินกู้แบบมีระยะเวลา 5.375% (ธนาคารกรุงไทย, 2563)

ตัวอย่างการคำนวณเมื่อใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด

ประเมินต้นทุนการผลิตความร้อนเมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (baht/kg)

$$SCC = \frac{\text{Cost}_{\text{Fuel}} \times m_{\text{Fuel}}}{\dot{Q}_U}$$

$$SCC = \frac{3.1 \times 3}{2.853}$$

$$SCC = 2.52 \text{ baht/kg}$$

ต้นทุนการใช้ไฟฟ้า (baht/y)

ปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อรอบ	0.351 kWh/round
ปริมาณการใช้ไฟฟ้าต่อปี	$0.351 \text{ kWh/round} \times 3 \text{ round/d} \times 365 \text{ d/y} = 384 \text{ kWh/y}$
ต้นทุนการใช้ไฟฟ้าต่อปี	$384 \text{ kWh/y} \times 4.4217 \text{ baht/kWh} = 1,697.93 \text{ baht/y}$

ต้นทุนการผลิตความร้อนเมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (baht/y)

ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อรอบ	$3 \text{ kg/h} \times 1.5 \text{ h} = 4.5 \text{ kg/round}$
ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงต่อปี	$4.5 \text{ kg/round} \times 3 \text{ round/d} \times 365 \text{ d/y} = 4,927.50 \text{ kg/y}$
ต้นทุนการผลิตความร้อนต่อปี	$4,927.50 \text{ kg/y} \times 3.1 \text{ baht/kg} = 15,275.25 \text{ baht/y}$

ต้นทุนการผลิต (baht/y)

ต้นทุนการผลิตต่อปี	$1,697.93 \text{ baht/y} + 15,275.25 \text{ baht/y} = 16,973.18 \text{ baht/y}$
--------------------	---

ผลประหยัด

ต้นทุนการผลิตแก๊สหุงต้ม - ต้นทุนการผลิตเตาชีวมวล
 $45,267.3 \text{ baht/y} - 16,973.18 \text{ baht/y} = 28,294.12 \text{ baht/y}$

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 40 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพด

ปี	เงินลงทุน	เงินสุทธิ ER 1.20	เงินสุทธิ EGRA 10%
0	35,500.00	-35,500.00	-35,500.00
1		28,294.12	27,203.20
2		28,294.12	27,203.20
3		28,294.12	27,203.20
4		28,294.12	27,203.20
5		28,294.12	27,203.20
NPV (baht)		85,739.23	81,064.68
IRR (%)		74.82%	71.46%
PB (y)		1.25	1.30

หมายเหตุ: ดอกเบี้ย 5.375%

ตารางที่ 41 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้เศษไม้

ปี	เงินลงทุน	เงินสุทธิ ER 1.20	เงินสุทธิ EGRA 10%
0	35,500.00	-35,500.00	-35,500.00
1		27,801.37	26,710.45
2		27,801.37	26,710.45
3		27,801.37	26,710.45
4		27,801.37	26,710.45
5		27,801.37	26,710.45
	NPV (baht)	83,627.81	78,953.26
	IRR (%)	73.30%	69.93%
	PB (y)	1.28	1.33

ตารางที่ 42 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลเมื่อใช้ฟางข้าว

ปี	เงินลงทุน	เงินสุทธิ ER 1.20	เงินสุทธิ EGRA 10%
0	35,500.00	-35,500.00	-35,500.00
1		26,323.12	25,232.20
2		26,323.12	25,232.20
3		26,323.12	25,232.20
4		26,323.12	25,232.20
5		26,323.12	25,232.20
	NPV (baht)	77,293.57	72,619.02
	IRR (%)	68.73%	65.32%
	PB (y)	1.35	1.41

หมายเหตุ: ดอกเบี้ย 5.375%



การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

1. เผยแพร่ผลงานวิจัยหัวข้อเรื่อง สมรรถนะเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ในงานประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10 ระหว่างวันที่ 29-30 พฤศจิกายน 2560 และวันที่ 1 ธันวาคม 2560 ณ หอประชุมเฉลิมพระเกียรติมหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
2. เผยแพร่ผลงานวิจัยหัวข้อเรื่อง การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ดต่อเนื่อง ในการประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 14 ระหว่างวันที่ 13 – 15 มิถุนายน พ.ศ. 2561 ณ โนโวเทล ระยอง ริมน้ำรีสอร์ท
3. เผยแพร่ผลงานวิจัยหัวข้อเรื่อง EFFECT OF FORCED DRAUGHT ON HIGH EFFICIENCY BIOMASS STOVE WITH USING PELLET FUELED ในงานประชุมวิชาการนานาชาติ The 25th Tri-University International Joint Seminar & Symposium 2018 ระหว่างวันที่ 4 – 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2561 ณ สำนักบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (UNISERV)


TREC-10
 The 10th Thailand Renewable Energy for Community Conference

การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10

พลังงานยุคเปลี่ยนผ่าน

เล่าขานวิถีพอเพียง หล่อเลี้ยงชุมชนยั่งยืน

.....

New Era of Community Energy



ณ หอประชุมเฉลิมพระเกียรติ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

ร่วมจัดโดย





สารบัญ

FC - 015	การเลือกของชิ้นงานที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพสังเคราะห์เปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปิโตรเลียม นางสาวรัชฎาภรณ์ อินเกิด	109
FC - 016	การวิเคราะห์คุณสมบัติและต้นทุนการผลิตด้านชีวภาพ โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิส นางสาวประภัสสร รัตนโพนุลย์	120
FC - 017	การศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลของสัตว์ด้วยแหล่งน้ำที่แตกต่างกัน นางสาวศิริพร ศรีไคร์คันธ์	128
FC - 018	สมรรถนะแก๊สซีพีเออร์แบบฟลูอิดเบดเมื่อใช้ขี้ขี้วัวโพดเป็นเชื้อเพลิง นายพงษ์ธร มณฑิพย์	134
FC - 019	การปรับปรุงเสถียรภาพของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดโพรบ นายณรงค์ อินทพรหม	143
FC - 020	สมรรถนะเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร นางสาวโสภารัตน์ รัตนะ	152
FC - 021	การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยอากาศร้อนแบบสลับทิศทางการไหล ที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง นายภาสพงษ์ศักดิ์ บัณฑิตน์	158
FC - 023	การประเมินเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลไร้ควัน สำหรับการผลิตความร้อน ในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ นายธนชาต มหาวิน	166

Session : สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน

NC- 001	การใช้กระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมสู่ต้นแบบ “การดูแลคุณภาพน้ำชุมชน” เพื่อการบริหารจัดการน้ำอย่างยั่งยืน นางสาวเดือนดา ร่ำพามา	174
NC- 002	การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพจากระบบยูเอเอสขนาดเล็ก นายสุรเชษฐ์ กล้าณรงค์	185
NC- 003	การศึกษากาแบรินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่ราบจังหวัดแพร่ นายสุกชัย เพชรธาราวดี	191
NC- 004	การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อผลิตก๊าซมีเทน มุ่งสู่การจัดการสิ่งแวดล้อม ในฟาร์มสุกรอย่างยั่งยืน: กรณีศึกษาจังหวัดเชียงใหม่ นางสาวรุ่งนภา เขียววิจิตร	199
NC- 005	การพัฒนา และติดตั้งกรีนรูฟเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาสู่ภายในบ้าน นายวรัช พวงพรศรี	207
NC- 007	กรรมวิธีการผลิตไฟฟ้าแบบไฮโดรเจนด้วยผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าผ่านหินเพื่อเป็นวัสดุสำหรับอาคาร นายสันต์ เกื้อหนู	214
NC- 008	การบริหารจัดการขยะในสถานศึกษาผ่านการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม นายเด่นศักดิ์ หอมหวล	221
NC- 009	การศึกษาการเจริญเติบโตของต้นข้าว โดยการใช้แหล่งน้ำที่แตกต่างกัน นายณัฐวุฒิ ขาวสะอาด	228

สมรรถนะเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
Performance of Biomass Stove with using Agricultural Pellets Fuel

โสภารณ รัตน์¹, นิกราน หอมดวง^{1*}, ณัฐดิ ดุษฎี¹, นัฐพร ไชยญาติ¹ และ เสมอขวัญ ดันติกุล²,

¹ สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

² สาขาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะการทำงานของเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงจากขี้ข้าวโพดอัดเม็ด และเศษไม้อัดเม็ดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เปรียบเทียบกับการใช้เศษไม้ลำไยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 1 inch เตาชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบเป็นเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง ใช้การป้อนอากาศแบบธรรมชาติ (Natural Draft) โดยทดสอบและวิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน อุณหภูมิ น้ำ ประสิทธิภาพความร้อน และต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวล ผลการศึกษาพบว่าการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้ข้าวโพดอัดเม็ด ให้สมรรถนะในการทำงานสูงสุด รองมาเป็นเศษไม้อัดเม็ดและเศษไม้ลำไยตามลำดับ ทั้งในด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อุณหภูมิ น้ำเดือด และประสิทธิภาพความร้อน โดยการให้เชื้อเพลิงชีวมวลจากขี้ข้าวโพดอัดเม็ด มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการใช้เชื้อเพลิงจากเศษไม้อัดเม็ด และเศษไม้ลำไยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.25% - 36% และ 7.6% - 32.8% ตามลำดับ ช่วงอุณหภูมิ น้ำเดือดของการใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 91-98 °C ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลเมื่อใช้ขี้ข้าวโพดอัดเม็ดมีค่าสูงสุด 21.27% ถัดมาเป็นเศษไม้อัดเม็ด 19.65% และเศษไม้ลำไย 13.2% ต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดต่ำสุดเฉลี่ย 3-5 Baht/kWh ดังนั้นการใช้ชีวมวลอัดเม็ดกับเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีศักยภาพในการใช้งาน อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นจะต้องมีต้นทุนที่ต่ำหรือเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ไม่มีมูลค่าใดๆ

คำสำคัญ: เตาชีวมวล ชีวมวลอัดเม็ด วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ประสิทธิภาพความร้อน

¹นิกราน หอมดวง: Tel.: 0-533-3194 Email address: nigranghd@gmail.com



การวิเคราะห์ข้อมูล

ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล หมายถึงอัตราส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (Q_{useful}) ต่อพลังงานที่ป้อนเข้าสู่เตาชีวมวล (Q_{input}) โดยทดสอบตามมาตรฐานการต้มน้ำ (WBT) โดยหาได้จากสมการที่ 1 [4]

$$\eta_B = \frac{[m_{w1} \times c_{p,w} (T_{wB} - T_{wi})] [m_{w2} \times h_{fg}]}{m_{\text{fuel}} \times \text{LHV}} \quad (1)$$

เมื่อ	m_{w1}	คือ	มวลน้ำเริ่มต้น (kg)
	m_{w2}	คือ	มวลน้ำระเหย (kg)
	$C_{p,w}$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.186 kJ/kg °C
	h_{fg}	คือ	ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ 2,257 kJ/kg
	T_{wB}	คือ	อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (°C)
	T_{wi}	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้น (°C)
	m_{Fuel}	คือ	มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg)
	LHV	คือ	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

อัตราการสิ้นเปลืองชีวมวลหมายถึง ปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ต่อระยะเวลาการใช้งานของเตาชีวมวล โดยหาได้จากสมการที่ 2

$$FC = \frac{M}{T} \quad (2)$$

เมื่อ	FC	คือ	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)
	M	คือ	มวลเชื้อเพลิงชีวมวล (kg)
	T	คือ	ระยะเวลาการใช้งานเตาชีวมวล (h)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะหมายถึง ค่าดัชนีของการใช้พลังงานต่อหน่วยการกำลังการผลิต สามารถใช้ในการวิเคราะห์หาสมรรถนะของเตาชีวมวล โดยหาได้จากสมการที่ 3

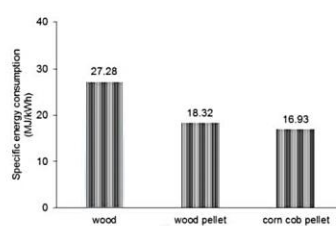
$$SEC = \frac{E}{Q_u} \quad (3)$$

เมื่อ	SEC	คือ	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (kJ/kWh)
	E	คือ	อัตราการใช้พลังงาน (kJ/h)
	Q_u	คือ	พลังงานที่เตาชีวมวลผลิตได้ (kW)



อัตราการใช้พลังงานจำเพาะ

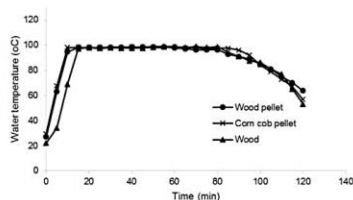
จากภาพที่ 4 เนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงจากขี้ข้าวโพดอัดเม็ดมีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำ จึงส่งผลให้มีอัตราการใช้พลังงานจำเพาะต่ำเฉลี่ย 16.93 MJ/kWh ถัดมาเป็นเศษไม้อัดเม็ด 18.32 MJ/kWh และไม้ลำไยสูงที่สุด 27.28 MJ/kWh การลดลงของอัตราการใช้พลังงานจำเพาะที่ต่ำจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวลให้ต่ำลง [6] ซึ่งจะเกิดผลดีเมื่อชุมชนนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามถ้าเปรียบเทียบกับด้านสมรรถนะการทำงานของเตาชีวมวลกับเตาแก๊สหุงต้มทั่วไป อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาชีวมวลจะต่ำกว่าเตาแก๊สหุงต้ม โดยเฉลี่ยประมาณ 7-8 เท่าของการใช้ชีวมวลทั่วไป [7]



ภาพที่ 4 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

อุณหภูมิการเดือดของน้ำจากเตาชีวมวล

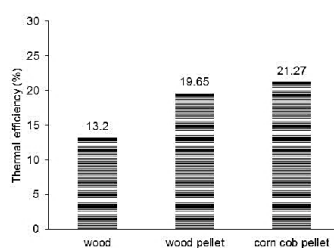
จากภาพที่ 5 การใช้เชื้อเพลิงจากขี้ข้าวโพดอัดเม็ดมีช่วงอุณหภูมิการเดือดของน้ำ ค่อนข้างเสถียรและมีความต่อเนื่องกว่าเศษไม้อัดเม็ดและไม้ลำไย โดยอุณหภูมิช่วงน้ำเดือดเฉลี่ยของเชื้อเพลิงทั้งสามชนิดอยู่ในช่วง 91-98 °C การใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดทำให้น้ำเดือดเร็วกว่าการใช้เศษไม้ลำไยปกติ โดยจะเดือดเร็วกว่าเฉลี่ย 33.33% สาเหตุที่เชื้อเพลิงอัดเม็ดให้อุณหภูมิที่เดือดสูงกว่าและเร็วกว่า เกิดจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ดีกว่าทั้งในด้านความหนาแน่น ขนาดเชื้อเพลิงและความสามารถในการคลุกเคล้ากับกับอากาศดีกว่าในระหว่างการเผาไหม้



ภาพที่ 5 อุณหภูมิการเดือดของน้ำจากเตาชีวมวล

ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล

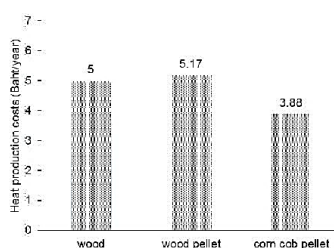
จากภาพที่ 6 การใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่าการใช้เศษไม้ลำไย โดยการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดมีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 21.27% ถัดมาเป็นเศษไม้อัดเม็ด 19.65% และไม้ลำไย 13.2% ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 32.82 – 37.94% อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบการเผาไหม้กับแก๊สหุงต้ม (LPG) [8] พบว่าการใช้แก๊สหุงต้มให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 57 - 61% โดยเฉลี่ยการเผาไหม้ด้วยแก๊สหุงต้มจะมีประสิทธิภาพความร้อนอยู่ในช่วง 50-55 % [5]



ภาพที่ 6 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล

ต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวล

ในการนำเตาชีวมวลไปใช้กับชุมชนสิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือราคาของเชื้อเพลิงต่อหน่วยการผลิตความร้อน จากภาพที่ 7 พบว่าการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดมีต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำสุด ถัดมาเป็นเศษไม้ลำไย และเศษไม้อัดเม็ดตามลำดับ โดยต้นทุนของการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดต่ำสุด ซึ่งเกิดจากลักษณะของชีวมวลที่มีคุณสมบัติที่สูงกว่า ขณะที่การอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากซังข้าวโพดก็ใช้พลังงานต่ำกว่าการอัดเม็ดเศษไม้และสุดท้ายคือส่วนของราคาซังข้าวโพดมีค่าต่ำกว่าเศษไม้ประมาณ 0.5 Baht/kg ดังนั้นต้นทุนการผลิตเศษไม้อัดเม็ดจึงสูงกว่าซังข้าวโพดอัดเม็ด อย่างไรก็ตามการส่งเสริมให้นำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมาใช้ในชุมชนเพิ่มสูงขึ้น โดยวัสดุชีวมวลที่ใช้ในชุมชนควรเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่หาง่าย ต้นทุนต่ำหรือไม่มีความเสี่ยงต่อการซื้อขาย จะทำให้ต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำลง



ภาพที่ 7 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล



สรุปผลการทดลอง

- การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากซังข้าวโพด ส่งผลให้สมรรถนะการทำงานของเตาชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งในด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อุณหภูมิน้ำ และประสิทธิภาพความร้อน ถัดมาเป็นเศษไม้อัดเม็ด และไม่ตามลำดับ

- โดยการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ น้อยกว่าการใช้เชื้อเพลิงจากเศษไม้อัดเม็ดและไม่ลำไย เฉลี่ยอยู่ในช่วง 6.25% - 36% และ 7.6% - 32.8% ตามลำดับ

- อุณหภูมิช่วงน้ำเดือดของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด เฉลี่ยอยู่ในช่วง 91-98 °C

- ซังข้าวโพดอัดเม็ดให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 21.27% รองลงมาเป็นเศษไม้อัดเม็ด 19.65% และไม่ลำไย 13.2% ตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 32.82 - 37.94%

- การใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดมีศักยภาพนำไปใช้กับชุมชนโดยมีต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 3.88 Baht/kWh และเศษไม้อัดเม็ดกับไม่ลำไยมีต้นทุนการผลิตความร้อนใกล้เคียงกันเฉลี่ยอยู่ที่ 5 Baht/kWh อย่างไรก็ตามการส่งเสริมให้นำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดมาใช้ในชุมชนเพิ่มสูงขึ้น โดยวัสดุชีวมวลที่ใช้ในชุมชนควรเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่หาง่าย ต้นทุนต่ำหรือไม่มีค่าในการซื้อขาย จะทำให้ต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำลง

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา และขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทนและศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานคณะกรรมการกลางว่าด้วยราคาสินค้าและบริการ. (2560). **ราคาจำหน่ายปลีกแนะนำแก๊สปิโตรเลียมเหลวบรรจุถัง (แก๊สหุงต้ม)**. ฉบับที่ 9
- [2] วราภรณ์ ทุมชาติ. (2557). **การผลิตโปรคิวเซอร์แก๊สจากเตาแบบ Inverted Downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง**. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 7(1), 26-39.
- [3] วรณรัตน์ ขาญนุกูล. (2552). **นโยบายพลังงานของประเทศ**, กระทรวงพลังงาน
- [4] นิกราน หอมดวง นฤมล ทิศใต้ กนกวรรณ ศรีคำวัง ธนชาติ มหาวัน กิตติกร สาสุจิตต์ และณัฐวัฒน์ ดุษฎี. (2560). **สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลแบบป้อนต่อเนื่องและป้อนเป็นช่วงเมื่อใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง**. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13. วันที่ 31 พฤษภาคม - 2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่.



- [5] สมมาส แก้วล้วน ดำรงศักดิ์ จันทสิทธิ์ สุรัชย์ จันทร์ศรี และเวคิน ปิยรัตน์. (2013). **การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW**. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 8(1), 24-33.
- [6] Radha Devi Bhattarai. (2014). **Household Fuel and Energy use for Rural Development in Nepal**. Doctoral Dissertation. Norwegian University.
- [7] ธนชาติ มหาวิน. (2560). **การพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [8] ธนชาติ มหาวิน ชูรัตน์ ธารักษ์ ณีฐาณี ดุษฎี กิตติกร สาสุจิตต์ และนิกราน หอมดวง. (2559). **สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ขี้ข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง**. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12. วันที่ 8-10 มิถุนายน 2559 ณ โรงแรมวังจันทร์แอรียา จังหวัดพิษณุโลก. คณะวิทยาศาสตร์ ร่วมกับมหาวิทยาลัยแม่โจ้.

การประชุมเสวนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10
พลังงานยุคเปลี่ยนผ่าน เล่าขานวิถีพอเพียง หล่อเลี้ยงชุมชนยั่งยืน

ขอขอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

นางสาวโสมภรณ์ รัตนะ

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิทยาคณะบรรยาย

สมรรถนะเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ด
จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ณ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง อำเภอป่าพะยอม จังหวัดพัทลุง
ให้ไว้ ณ วันที่ 30 พฤศจิกายน 2560


รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช ชำนิ
อธิการบดีมหาวิทยาลัยทักษิณ


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัช ไรอินทร์
นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ENERGY NETWORK OF THAILAND 14th



14th Conference on Energy Network of Thailand
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

13 - 15 มิถุนายน 2561 ณ โรงแรม ระยอง

Proceeding



ผู้สนับสนุน



หน่วยงานในเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย



การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ป้อนขี้ข้าวโพดอัดเม็ดต่อเนื่อง
Evaluation of High Biomass Stove Performance with Using Continuous
Corn cob Pellet Fuels Feeder

โสภารณ์ รัตน์¹, นัฐพร ไชยญาติ¹, เสมอขวัญ ตันติกุล², นิกราน หอมดวง^{1*} และ ณัฐภูมิ ดุษฎี¹

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

²คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

*: Email: nigranghd@gmail.com เบอร์โทรศัพท์ 0-533-3194, เบอร์โทรสาร 0-533-3194

บทคัดย่อ

RE-01-153

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะการทำงานของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง แบบชนิดป้อนเชื้อเพลิงอัดเม็ดต่อเนื่องที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ 3 kg/h โดยใช้ขี้ข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือตัวเตาชีวมวลและชุดป้อนเชื้อเพลิง ใช้พัฒนาระบบอากาศเข้าสู่เตา โดยมีการปรับอัตราส่วนผสม 0.75, 1 และ 1.20 ผลการทดสอบพบว่าที่การปรับอัตราส่วนผสม 1.20 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 33.77% การปรับเพิ่มอัตราส่วนผสมสูงสุดส่งผลให้สมรรถนะการทำงานของเตาเพิ่มสูงขึ้น โดยการปรับอัตราส่วนผสม 1.20 ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะ 0.38 kg/kWh และ 5.33 MJ/kWh ตามลำดับ และต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ขี้ข้าวโพดอัดเม็ดค่าสุด 1.71 Baht/kWh สรุปผลการวิจัยเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีศักยภาพในการนำไปใช้งานในชุมชน และควรมีการส่งเสริมให้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายต่อไป

คำหลัก: เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง, ขี้ข้าวโพด, เชื้อเพลิงอัดเม็ด, อัตราส่วนผสม

Abstract

The objective of this research to study the performance of high efficiency biomass stoves. The continuous fuel pellet feeding at a constant feed rate of 3 kg/h with using corn cob pellets as fuel. The high efficiency biomass stoves have two main components include the housing stove and feeding pellet set. The air input to combustion with blower and adjust equivalence ratio of 0.75, 1, and 1.20. The result was found that, the adjusting equivalence ratio (ER) at 1.20 was obtained higher thermal efficiency of 33.77%. Increasing of equivalence ratio increased the high performance of biomass stoves. Besides, the adjusting ER at 1.20 was lower the specific fuel consumption and energy consumption were of 0.38 kg/kWh and 5.33 MJ/kWh, respectively. The heat cost production of high efficiency biomass stoves was about of 1.71 Baht/kWh. Summary of research, the high efficiency biomass stoves have the potential to be used in the community and should be promoted to continue operation.

Keywords: High biomass stove, Corn crop, Pellet fuel, equivalence ratio

1. บทนำ

จากปัญหาการขาดแคลนการใช้พลังงานแก๊สสูงที่สุดในปัจจุบัน มีราคาการซื้อขายที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ปริมาณแก๊สสูงที่มีแนวโน้มที่จะหมดลงภายในอนาคตอันใกล้ ส่งผลให้ทางรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มสูงขึ้น ในช่วงปี 2559-2579 ให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30 ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศ [1] ปัจจุบันแก๊สสูงที่มีราคาเฉลี่ย 334 Baht/tank (ถัง 15 kg) [2] และคาดว่าจะสูงเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามภาวะเศรษฐกิจของโลกและประเทศไทย ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตและชีวิตความเป็นอยู่ของคนในชุมชนยากลำบากขึ้น เพราะส่วนใหญ่จะใช้แก๊สสูงในการประกอบอาหาร ซึ่งที่ผ่านมาการนำเอาชีวมวลที่อยู่ในท้องถิ่นมาใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนมีข้อจำกัดค่อนข้างมาก เนื่องจากมีปัญหาด้านความหนาแน่นที่ต่ำเกินไป การนำเอาชีวมวลเหล่านั้นมาอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงอัดเม็ดและอัดแท่งกำลังเป็นที่นิยมและได้รับการส่งเสริมจากทางภาครัฐ อย่างไรก็ตาม ด้านเตาชีวมวลที่มีอยู่ยังไม่มีการทดลองหรือนำมาใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงอัดเม็ดเลย การออกแบบเตาชีวมวลระดับชุมชนเพื่อรองรับเชื้อเพลิงอัดเม็ดจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจและควรศึกษา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจและมุ่งเน้นการศึกษาและ ทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ออกแบบมาเพื่อการใช้งานกับเชื้อเพลิงอัดเม็ด ผลที่ได้จากการทดลองจะเป็นข้อมูลในการ

เผยแพร่ให้กับชุมชนและเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพเตาชีวมวลที่มีอยู่ให้มีสมรรถนะการใช้งานที่สูงขึ้น

2. วิธีการทดลอง

2.1 หลักการออกแบบ พัฒนาเตาชีวมวล

แนวคิดการออกแบบหรือพัฒนาเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงคือต้องการนำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดที่มีอยู่ในท้องถิ่นมาใช้งานกับเตาชีวมวลในระดับครัวเรือน การออกแบบเริ่มจากการศึกษาระยะไกลการใช้พลังงานความร้อนของชุมชนจากเตาชีวมวลและแก๊สสูงที่มี ค่าอุณหภูมิความร้อนที่ต้องการใช้งาน ปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ ออกแบบขนาด รูปร่างห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมโดยเน้นการเผาไหม้ในสภาวะสมบูรณ์ ออกแบบชุดป้อนอากาศ การนำเอาแก๊สบางส่วนมาเผาไหม้ซ้ำและระบบป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ผลจากการออกแบบห้องเผาไหม้ที่ได้จะเป็นห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอกมีปริมาตร 6911.50 cm³ ระบบป้อนเชื้อเพลิงใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนโดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับอุณหภูมิการป้อนโดยทำงานในสภาวะต่อเนื่อง

2.2 อุปกรณ์ เครื่องมือและวัสดุทดสอบ

22.1 เครื่องมือประสิทธิภาพสูงมีขนาดอยู่ในช่วง 10-15 kW ใช้การป้อนอากาศแบบบังคับ (Forced draft) ใช้พัดลมเป่าอากาศ (Blower) ขนาด 373 W ป้อนอากาศเข้าด้านข้างของเตาชีวมวลทดสอบที่มีการเจาะรูรอบๆ จำนวน 90 รู แต่ละรูมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm โดยสามารถบังคับปริมาณอากาศให้เผาไหม้ทั้งแบบกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification process) และแบบเผาไหม้ตรง (direct combustion) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 20 cm สูง 22 cm เชื้อเพลิงป้อนแบบต่อเนื่องโดยป้อนทางด้านบนเตา เชื้อเพลิงอัดเม็ดจะเคลื่อนที่ด้วยสกรูลำเลียงที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และเกียร์ทด ด้านบนของหัวเตาติดตั้งปล่องระบายควัน ขนาด 50.8 mm สูง 1.5 m รายละเอียดดังรูปที่ 1 (ก)

2.2.2 ชีวมวลอัดเม็ดสำหรับทดสอบ

เชื้อเพลิงอัดเม็ดที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในชุมชนเขตพื้นที่ภาคเหนือ ซึ่งก็คือ ชังข้าวโพดอัดเม็ด ดังรูปที่ 1 (ข) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 8 mm และความยาวเฉลี่ยอยู่ในช่วง 35-38 mm ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงเฉลี่ย 1317 kg/m^3 มีความชื้นอยู่ในช่วง 8-12% รายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงอัดเม็ด แสดงในตารางที่ 1



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงและชังข้าวโพดอัดเม็ด

ตารางที่ 1 คุณสมบัติเคมี/ทางกายภาพของชังข้าวโพดอัดเม็ด [3]

Corn cob properties			
Proximate analysis (%wt.)		Ultimate analysis (%wt.)	
Moisture	11.82	C	42.12
Ash	5.62	H	6.52
Volatile	69.74	N	0.45
Fix carbon	12.81	O	45.11
HHV (MJ/kg)	13.99	S	0.01
Bulk density	1317 kg/m^3		

2.2.3 เครื่องมือวัด

เครื่องมือวัดในงานวิจัยประกอบด้วย เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ของ CENTER รุ่น CENTER 350 เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบใช้รังสีอินฟราเรด โดยสามารถวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง -20-500 °C เครื่องบันทึกอุณหภูมิเตาชีวมวลใช้อุปกรณ์การบันทึกของ LUNRON รุ่น TM-9478SD สามารถเก็บค่าและบันทึกข้อมูลได้ โดยเชื่อมต่อกับสายวัดอุณหภูมิชนิด type K/F/T/E/R/S โดยสามารถวัดอุณหภูมิในช่วงเวลาเดียวกันได้ 4 ช่อง วัดอุณหภูมิในช่วง 100 -1,700 °C วัดอุณหภูมิของน้ำร้อนด้วย

เทอร์โมคัปเปิลของ SPL รุ่น JB-10S ชนิด Type K สามารถวัดอุณหภูมิสูงสุด 400 °C และเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลของ DIGI รุ่น DS-671 สามารถวัดได้ 0.2-30 kg

2.3 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้กำหนดเงื่อนไขการทดลองการป้อนชังข้าวโพดอัดเม็ดในอัตรา 3 kg/h ใช้อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) 0.75, 1 และ 1.20 ในขณะที่ยังคงอัตราอากาศต่อเชื้อเพลิงคงที่ของชังข้าวโพดอัดเม็ดเท่ากับ $5.71 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ การทดสอบประสิทธิภาพเตาชีวมวลใช้วิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) เริ่มจากการนำชังข้าวโพดอัดเม็ด มาลดความชื้นด้วยการตากให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ ชังมวลน้ำและวัดอุณหภูมิในน้ำเริ่มต้น โดยวัดอุณหภูมิในน้ำและอากาศด้วยหัววัดอุณหภูมิ (เทอร์โมคัปเปิล type K) โดยเชื่อมต่อกับเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ทำการจุดเตาและป้อนเชื้อเพลิงและป้อนอากาศอย่างต่อเนื่องตามเงื่อนไข บันทึกค่าอุณหภูมิทุก 5 min ใช้เวลาในการทดสอบ 1 h และทำการทดสอบ 3 ชั่วโมง นำค่าที่ทดสอบได้มาวิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อุณหภูมิในน้ำ ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง และต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง รายละเอียดของสมการที่ใช้วิเคราะห์ ดังสมการที่ 1-8

การวิเคราะห์อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงคือการวิเคราะห์อัตราการใช้อากาศต่อชังข้าวโพดอัดเม็ดในสภาวะการทำงานจริงซึ่งหาได้จากสมการที่ 1

$$AF_{th} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad (1)$$

เมื่อ $\dot{m}_{air}$ คืออัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

และ $\dot{m}_{fuel}$ คือ อัตราการการใช้ชังข้าวโพดอัดเม็ด (kg/s)

อัตราส่วนสมมูลคืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่วัดได้จริงต่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2

$$\phi = \frac{A/F_{Actual}}{A/F_{Theory}} \quad (2)$$

เมื่อ ϕ คือ อัตราส่วนสมมูล A/F_{Actual} คืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง และ A/F_{Theory} คืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทฤษฎี

ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลคือพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำต่อพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงหาได้จากสมการที่ 3 [4]

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_{Fuel}} \times 100\% \quad (3)$$

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวล (%)
 Q_u คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kJ)
 Q_{Fuel} คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (kJ)

ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์หาได้ความร้อนที่ใช้ในการอุ่นและระเหยน้ำ โดยหาได้จากสมการที่ 4

$$Q_u = [m_{w1} C_{pw} (T_{wb} - T_{wi})] + [m_{w2} h_{fg}] \quad (4)$$

เมื่อ m_{w1} คือมวลน้ำเริ่มต้น (kg) m_{w2} คือมวลน้ำระเหย (kg)
 C_{pw} คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.186 kJ/kg °C h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ 2,257 kJ/kg T_{wb} คืออุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (°C) และ T_{wi} คืออุณหภูมิเริ่มต้น (°C)

ปริมาณความร้อนที่ได้จากขี้ข้าวโพดอัดเม็ดหาได้จากสมการที่ 5

$$Q_{Fuel} = m_{Fuel} \times HHV_{biomass} \quad (5)$$

เมื่อ m_{Fuel} คือมวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg) และ $HHV_{biomass}$ คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงหมายถึงปริมาณเชื้อเพลิง ชีวมวลที่ใช้ต่อระยะเวลาการใช้งานของเตาชีวมวลโดยหาได้จากสมการที่ 6

$$FCR = \frac{m_{Fuel}}{t} \quad (6)$$

เมื่อ FCR คืออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h) m_{Fuel} คือ มวลเชื้อเพลิงชีวมวล (kg) และ t คือระยะเวลาการใช้งานเตาชีวมวล (h)

อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเป็นอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ใช้ในการระเหยของน้ำ [5] โดยหาได้จากสมการที่ 7

$$SFC = \frac{\dot{m}_{Fuel}}{\dot{Q}_u} \quad (7)$$

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานหมายถึงสัดส่วนของพลังงานที่ใช้ในการระเหยของน้ำต่อปริมาณน้ำระเหยเป็นการใช้พลังงานต่อหน่วยการกำลังการผลิต [5] หาได้จากสมการที่ 8

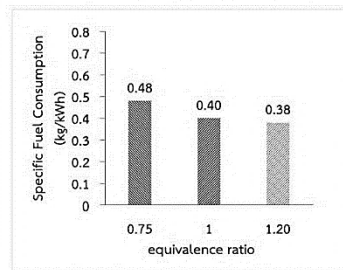
$$SEC = \frac{\dot{m}_{Fuel} HHV}{\dot{Q}_u} \quad (8)$$

เมื่อ SEC คืออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kWh)

4. ผลการศึกษา

4.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

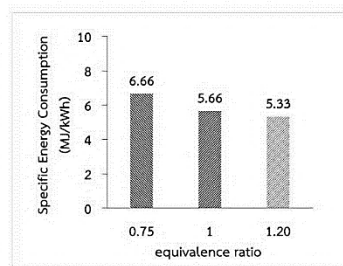
รูปที่ 3 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนผสมส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลดลง ที่อัตราส่วนผสม 0.75, 1 และ 1.20 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ 0.48 kg/kWh 0.40 kg/kWh และ 0.38 kg/kWh ตามลำดับ ที่อัตราส่วนผสม 1.20 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด ในขณะที่อัตราส่วนผสม 0.75 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด สาเหตุเกิดจากการเพิ่มอัตราส่วนผสมส่งผลให้การลุกไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น [6,7] สุดท้ายช่วยให้เกิดพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำสูงขึ้น



รูปที่ 3 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

4.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

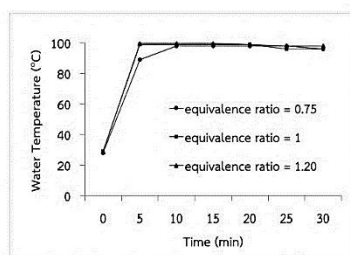
รูปที่ 4 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง พบว่าการปรับอัตราส่วนผสมแปรผันตรงกับค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ที่อัตราส่วนผสม 0.75, 1 และ 1.20 มีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 6.66 MJ/kWh 5.66 MJ/kWh และ 5.33 MJ/kWh ตามลำดับ การใช้อัตราส่วนผสม 1.20 ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด การปรับอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมจะส่งผลให้เชื้อเพลิงสามารถปลดปล่อยพลังงานได้สูงสุด และนำไปสู่ความสามารถในการผลิตพลังงานในการต้มน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน [6] อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบสมรรถนะการทำงานกับเตาแก๊สชุดเดิม พบว่าการใช้งานเตาชีวมวลยังมีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าโดยเฉลี่ยประมาณ 7-8 เท่า [7]



รูปที่ 4 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

4.3 การวิเคราะห์อุณหภูมิการเดือด

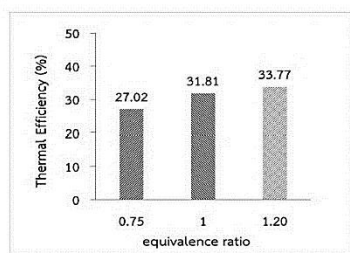
รูปที่ 5 แสดงอุณหภูมิการเดือดของน้ำ พบว่าอัตราส่วนสมมูลทั้ง 3 ค่ามีอุณหภูมิการเดือดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 98-99.5 °C โดยที่อัตราส่วนสมมูล 1 และ 1.20 มีอุณหภูมิและการเดือดของน้ำสูงสุด มีระยะเวลาในการเดือดเร็วกว่าอัตราส่วนสมมูล 0.75 ระยะเวลาของน้ำจะเริ่มเดือดที่ช่วงเวลา 3-4 min สาเหตุที่การใช้อัตราส่วนสมมูล 1 และ 1.20 ทำให้อุณหภูมิการเดือดเร็วกว่า เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เพิ่มขึ้น นำไปสู่การถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำในการเดือดได้เร็วขึ้น [4]



รูปที่ 5 อุณหภูมิและเวลาการเดือดของน้ำ

4.4 ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

รูปที่ 6 แสดงประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ถังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง พบว่าที่อัตราส่วนสมมูล 0.75 1 และ 1.20 มีประสิทธิภาพความร้อนอยู่ที่ 27.02, 31.81 และ 33.77% ตามลำดับ ที่อัตราส่วนสมมูล 1.20 เตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด การป้อนอากาศที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีค่าสูงขึ้น [6] อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับการใช้แก๊สหุงต้ม พบว่าประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 50-55% [8] ในขณะที่การเปรียบเทียบกับเตาชีวมวลกระทรวงพลังงานมี ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 21.27% [9]

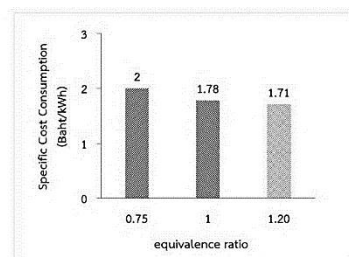


รูปที่ 6 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

4.5 ต้นทุนการผลิตความร้อนเตาชีวมวล

รูปที่ 7 แสดงต้นทุนการผลิตความร้อนเตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูงพบว่าต้นทุนการผลิตความร้อนของเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนสมมูล 0.75, 1 และ 1.20 มีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 2, 1.78

และ 1.71 Baht/KWh ตามลำดับ การปรับอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมส่งผลต่อต้นทุนการผลิตความร้อน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการใช้แก๊สหุงต้ม พบว่าการใช้แก๊สหุงต้มมีต้นทุนการผลิตเฉลี่ย 2.88 Baht/KWh [6] ซึ่งการใช้เตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูงให้ต้นทุนต่ำกว่าต้นทุนการใช้แก๊สหุงต้ม จากการวิเคราะห์ต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดกับเตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูง มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานในชุมชน อย่างไรก็ตามควรต้องมีการศึกษาในอัตราส่วนสมมูลเพิ่มเติมเพื่อหาจุดสูงสุดของประสิทธิภาพของเตาชีวมวลชนิดนี้



รูปที่ 7 ต้นทุนการผลิตความร้อนของเชื้อเพลิง

5. สรุปผลการศึกษา

- ผลการทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูงสามารถใช้กับเชื้อเพลิงอัดเม็ดได้ดี มีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 33.77% ที่อัตราส่วนสมมูล 1.20
- การปรับอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมส่งผลให้เตา มีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดและมีสมรรถนะการทำงานใน ภาพรวมที่ดีโดยมีต้นทุนการผลิตความร้อนที่ต่ำสุดเฉลี่ย 1.71 Baht/KWh
- การนำเอาถังข้าวโพดอัดเม็ดมาใช้กับเตาชีวมวล ประสิทธิภาพสูงมีความเป็นไปได้ และควรมีการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้งานในชุมชนและวิสาหกิจ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษาและขอขอบคุณทุนอุดหนุน การวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษากองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวง พลังงาน และสุดท้ายขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทนและ ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ใน การศึกษาวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555), *โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนา เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต*, กระทรวงพลังงาน.
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (2561), *รศวก๊าซ LPG, [ร ะ บ บ อ น โ ล กั น] , แ ท ล กั ง ที่ ม า*

<http://www.ryt9.com/s/nepo/2811631>, เข้าดูเมื่อวันที่ 12/4/2561.

[3] นิกราน หอมดวง ญัฐวุฒิ คุชกุ์ ขุรัตน์ อารารักษ์ และกิตติกร สาสุจิตต์ (2560). รายงานผลการวิจัยเรื่อง การเพิ่มคุณภาพชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรโดยกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นและทอริแฟคชั่นสำหรับการผลิตไฟฟ้าเพื่อชุมชน, โครงการวิจัยมหาวิทยาลัยแม่โจ้, หน้า 57-78.

[4] ญัฐวุฒิ คุชกุ์ กิตติกร สาสุจิตต์ นิกราน หอมดวง อภิชาติ สวนคำทอง และเสรี กังวานกิจ (2551). การประเมินสมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลสำหรับครัวเรือนโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง, *การประชุมวิชาการประจำปี*, สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้เชียงใหม่.

[5] วิรัตน์ เจริญบุญ (2017). เตาชีวมวลแปลงพลังงานเพื่อ เกษตรไทย, *วารสารวิทยาศาสตร์ มช.*, 45, หน้า 163-174

[6] ธนชาติ มหาวิน (2560). การพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์, *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้, หน้า 50-70.

[7] ธนชาติ มหาวิน ขุรัตน์ อารารักษ์ ญัฐวุฒิ คุชกุ์ กิตติกร สาสุจิตต์ และนิกราน หอมดวง (2559). สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ขี้วัวไต่เป็นเชื้อเพลิง, *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12*, คณะวิทยาศาสตร์ร่วมกับมหาวิทยาลัยแม่โจ้เชียงใหม่.

[8] สมมาส แก้วล้วน คำวงศ์ดี จันโทสี สุรัชย์ จันทศรี และเวทิน ปิยรัตน์ (2013). การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW, *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 8(1), 24-33.

[9] โสภารณ์ (2560). สมรรถนะเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร, *การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10*, วันที่ 29-30 พฤศจิกายน - 1 ธันวาคม 2560 ณ หอประชุมเฉลิมพระเกียรติ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาลัยเขตพัทลุง.



การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14 14th Conference on Energy Network of Thailand

ขอมอบเกียรติบัตรนี้เพื่อแสดงว่า

โสภาภรณ์ รัตนะ, นัฐพร ไชยญาติ, เสมอขวัญ ตันติกุล, นิกราน หอมดวง

และ ญัฐวุฒิ ดุษฎี

ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัย “ภาคบรรยาย”

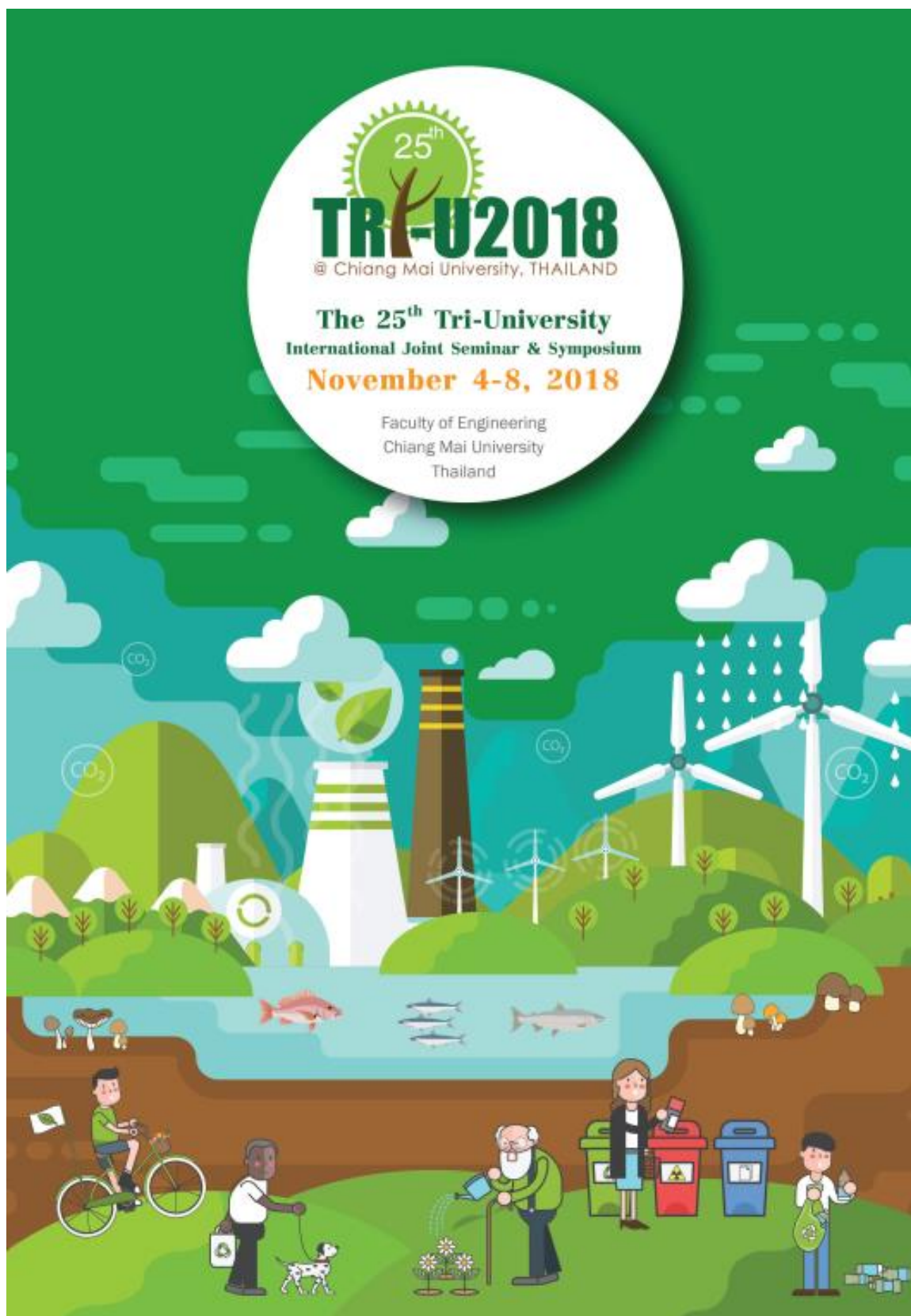
การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง

เมื่อใช้ป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ดต่อเนื่อง

ระหว่างวันที่ 13 - 15 มิถุนายน พ.ศ. 2561
ณ โรงแรมโนโวเทล ริมเพ จังหวัดระยอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิวกร อ่างทอง
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิรัชย์ โรยรินทร์
ประธานกรรมการฝ่ายวิชาการ





CONTENTS

November 5, 2018

SESSION 1.1 ENERGY (Room : INTANIN)

MJU_05 11:15 - 11:30	EFFECT OF FORCED DRAUGHT ON HIGH EFFICIENCY BIOMASS STOVE WITH USING PELLET FUELED Speaker : Sopaporn Rattana Maejo University	2
-------------------------	--	---

SKKU_04 11:30 - 11:45	CHITOSAN-GRAPHENE OXIDE FOAMS FABRICATED BY FREEZE-CASTING AND FREEZE-DRYING METHODS Speaker : Stephanie Kyungbin Lee Sungkyunkwan University	6
--------------------------	---	---

SUT_02 11:45 - 12:00	INVESTIGATION AND MODELING OF ENERGY AND WATER CONSUMPTIONS FOR A CENTRALIZED CHILLER SYSTEM IN SURANAREE UNIVERSITY TECHNOLOGY HOSPITAL Speaker : Andreas Prasetyadi Suranaree University of Technology	9
-------------------------	--	---

SESSION 1.2 ENVIRONMENT (Room : BUATONG)

BAU_08 11:15 - 11:30	BIODEGRADABILITY OF BIOPLASTIC IN NATURAL ENVIRONMENT Speaker : Anggun Rahman Bogor Agricultural University	16
-------------------------	--	----

JSU_12 11:30 - 11:45	WELL-TO-WHEEL ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION AND EMISSION FOR CONVENTIONAL AND ELECTRIC VEHICLE Speaker : Yiqiang Lyu Jiangsu University	20
-------------------------	--	----



EFFECT OF FORCED DRAUGHT ON HIGH EFFICIENCY BIOMASS STOVE WITH USING PELLET FUELED

Sopaporn Rattana¹

Sopaporn.rattana@gmail.com

Nigran Homdoun^{1,*}

nigranghd@gmail.com

Samerkhwan Tantikul²

Natthawud Dussadee¹

Sermasuk Buochareon¹

Rameshprabu Ramaraj¹

¹ School of Renewable Energy,
Maejo University, Chiang Mai 50290,
Thailand.

² Faculty of Engineering and
Agro-industry, Maejo University,
Chiang Mai 50290, Thailand.

ABSTRACT: The aims of this study were to find and compare the performance of biomass stoves with using air forced draught and natural draught with operate on corn cob pellets fuel. The most natural draught biomass stoves were used in Thailand local areas, and forced draught was the new biomass stoves design. The experiment was focused on the analysis of all performance including fuel and energy consumption, thermal efficiency and heat cost production. The result was found that, adjusting air-fuel ratio at 4.76 kg_{air}/kg_{fuel}, was obtained lower specific fuel and energy consumption which more than natural draught biomass stoves were of 65.14% and 68.52%, respectively. The thermal efficiency of forced draught biomass stoves was higher than of 37.01% and hot water temperature on boiling test in a range of 90-98°C. The heat cost production of natural draught biomass stove was obtained of 3.39 Baht/kWh_{th}, while the forced draught was achieved of 1.71 Baht/kWh_{th}. Finally, the forced draught biomass stoves are suitable for promote to the community.

Keyword: Forced Draft, Biomass stove, Pellet fuel, Air-fuel ratio

1. INTRODUCTION

At present, Thailand is facing high energy import problems which the energy was increasing along economic growth by 7.8% from in 2017 [1] and trend to continue. Currently, energy is one of most sensitive issues in Thailand, where almost 50% of the total commercial energy supply was imported [2]. Consequently, the population has suffered a rising cost of living. Especially liquefied petroleum gas (LPG) and fuel oil.

Thailand is an agricultural country with around 34% of the households throughout the country working in agriculture and 93% of them located in rural areas. The two major activities in the agriculture area are the cultivation of crops (54%) and integrated crop-livestock farming (35%) [2]. Fortunately, Thailand has more agricultural waste and government was promoted application about biomass energy which the development of high efficiency biomass stoves is a necessity. Previously, the most biomass stove use natural draught air input which that call natural draught biomass stove (NDBS) while new biomass stove was used forced draught air input and that was more than complete combustion is forced draught biomass stoves (FDBS). With higher biomass fuel technology, the pellet fuel began to be used up.

Therefore, the objective of this research found out compare performance of biomass stoves with using air forced draught and natural draught with operate on corn cob pellets fuel. The benefits are based on the development of biomass and biomass fuels.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Biomass stove conversional and high efficiency

The both biomass stove in experiment was used 10-15 kW, direct combustion and designed for use in biomass applications

2.1.1 Natural draught biomass stoves (NDBS)

The NDBS for use in experiment set up was demonstrated in Fig. 1(a). The NDBS was used principle of natural draft for air feeding. The combustion of NDBS was used combine direction combustion and gasification system which feeding of fuel on the top of stoves, pellet was burned in combustor. The bottom of that was removed the ash and the air feed in bottom to the top.

2.1.2 Forced draught biomass stoves (FDBS)

FDBS on test operation process shown in Fig. 1(b). The FDBS was used under forced draft for air feeding by blower 0.5 HP, and air feeding was side of stoves pass through holes of stoves wall for 90 holes. The diameter of holes was 5 mm, continuous feeding pellet fuel and use the gasification and direct combustion system. Pellet feeding on the top in to the combustor with using screw. The power input screw feeding was operated on electric motors and gear reducer with the inverter control.

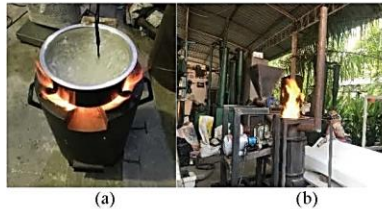


Fig.1 the NDBS (a) and the FDBS (b)

2.1.3 The biomass pellets

This research used corn cobs pellet operate to fuel testing which that was agricultural waste in the North of Thailand. The density, diameter, length and moisture of corn cob were of 1,317 kg/m³, 8 mm, 35-38 mm and 8-12%, respectively. The chemical properties of corn cob show in Table 1.

Table 1 The chemical properties of corn cob pellets

Corn cob properties			
Proximate analysis (%wt.)		Ultimate analysis (%wt.)	
Moisture	11.82	C	42.12
Ash	5.62	H	6.52
Volatile	69.74	N	0.45
Fix carbon	12.81	O	45.11
HHV (MJ/kg)	13.99	S	0.01
Bulk density		1317 kg/m ³	

2.1.4 Equipments

In the experimental was used measuring instrument including, the infrared thermometer of CENTER (CENTER 350) can be measuring between -20-500°C, Data logger of LUNRON (TM-9478SD) connect to Thermocouple measuring between 100-1,700°C, Thermocouple of SPL (JB-10S) Type K can use high temperature 400°C, and digital balance of DIGI (DS-671) can be measuring between 0.2–30 kg

2.1.5 Experimental procedure

The experiment was use constant A of 4.76 kg_{air}/kg_{fuel}. The testing of stoves efficiency was used water boiling test, next to write down every 5 min for 30 min of testing, and repeat all 3 tests. Finally, brining information for calculation about specific fuel consumption analysis, specific energy consumption, thermal efficiency, hot water temperature and heat cost production. The all equation for determine can calculated the following (1)-(5).

Thermal efficiency (η) was thermal energy that used boiling testing per thermal energy that used fuel combustion [2]. It could calculate from Eq. (1-3)

$$\eta_{th} = \frac{Q_U}{Q_{Fuel}} \times 100 \quad (1)$$

When η_{th} is thermal efficiency (%), Q_U is the heat energy transferred for use (kJ), Q_{Fuel} is the heat energy transferred for fuel (kJ).

The heat energy transferred for use warm and evaporate water with Eq. (2)

$$Q_U = [m_{w1}C_{pw}(T_{wb} - T_{wi})] + [m_{w2}h_g] \quad (2)$$

When m_{w1} is mass of Initial water (kg), m_{w2} is mass of evaporate water (kg), C_{pw} is Specific Heat of water 4.186 (kJ/kg°C), h_g is latent heat of evaporation 2,257 kJ/kg T_{wb} is The temperature of boiling water (°C) and T_{wi} is the temperature of Initial water (°C).

The heat energy transferred for corn cob pellets fuel Eq. (3)

$$\dot{Q}_{Fuel} = \dot{m}_{Fuel} \times HHV_{biomass} \quad (3)$$

When $\dot{m}_{Fuel}$ is mass of fuel (kg) and $HHV_{biomass}$ is high heating value for biomass fuel (kJ/kg).

Specific fuel consumption (SFC) was using ratio of fuels for evaporation [4]. It was followed Eq. (4).

$$SFC = \frac{\dot{m}_{Fuel}}{\dot{Q}_u} \quad (4)$$

Specific energy consumption (SEC) was energy ratio for evaporation per evaporated water amount. It was followed Eq. (5).

$$SEC = \frac{\dot{m}_{Fuel} HHV}{\dot{Q}_u} \quad (5)$$

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1 Specific fuel consumption

Fig. 3 showed the specific fuel consumption of NDBS and FDBS. It was found that, the operation FDBS was low specific fuel consumption than NDBS.

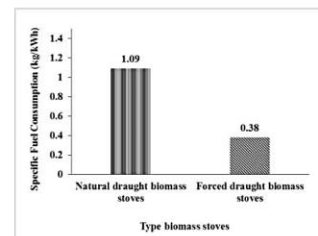


Fig.3 the specific fuel consumption

Due to, increasing of air amount was leaded to complete combustion and low consumption [5, 6]. The specific fuel consumption of FDBS low than 65.14% with adjusting A/F of 4.76 kg_{air}/kg_{fuel}. The specific fuel consumption of NDBS and FDBS were of 1.09 and 0.38 kg/kWh, respectively.

3.2 Specific energy consumption

Fig. 4 showed specific energy consumption of both biomass stove with using pellet fuel. The specific energy consumption of FDBS was obtained low than NDBS.



However, when compare the LPG stove, The FDBS was high specific energy consumption were compared [6]. The Specific fuel consumption of NDBS and FDBS were 16.93 and 5.33 MJ/kWh, respectively.

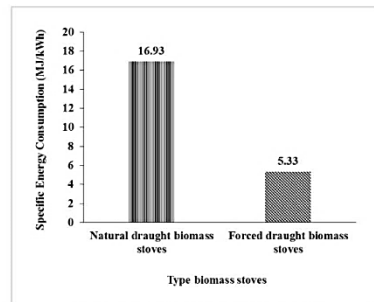


Fig. 4 specific fuel consumption

3.3 Analysis of hot water temperature

The analysis of hot water temperature in the boiling test shown in Fig. 5. The temperature of both biomass stove was similar, but during time of boil was difference. The FDBS was used short time than NDBS. Due to FDBS was obtained high efficiency combustion than NDBS [7]. The temperature of both biomass stove was in a range of 98-99.5°C

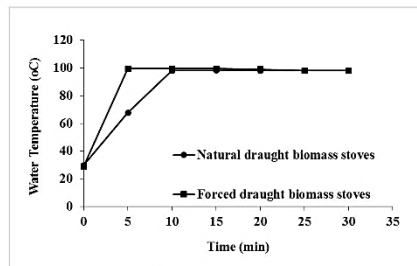


Fig. 5 hot water temperature

3.4 Thermal efficiency

The thermal efficiency of both biomass stove was expressed in Fig. 6. The operating of FDBS was obtained high thermal efficiency than NDBS due to completely combustion in the process. The highest thermal efficiency of FDBS was achieved of 33.77%. While NDBS was obtained 21.27%. However, comparing with LPG stoves founded that, the both biomass stove was low thermal efficiency than LPG stoves [8], because the combustion process in gas mode.

3.5 Heat cost production

Fig. 7 shown the heat cost production of NDBS and FDBS with operate on corn pellet fuel at optimum operation condition. The FDBS was obtained low heat cost production than NDBS. The heat cost production of NDBS and FDBS were 3.39 and 1.71 Baht/kWh, respectively. When compare with heat cost production of

LPG stoves was 2.88 Baht/kWh [6], which FDBS had lower heat cost production. Therefore, the use of FDBS was appropriated with corn pellet fuel and should be promote to community in Thailand.

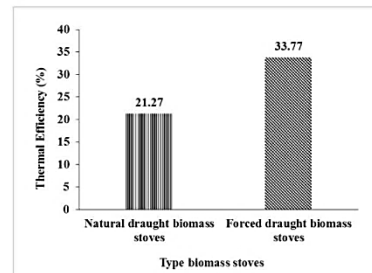


Fig. 6 thermal efficiency

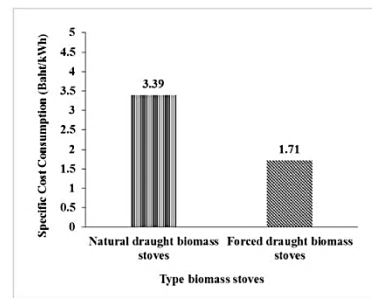


Fig. 7 Heat cost production

4. CONCLUSIONS

Performance of NDBS and FDBS founded effect of forced draught could use pellets was well on both high efficiency biomass stove. It had increase thermal efficiency 37.01% at 4.76 kg_{air}/kg_{fuel} of air-fuel ratio. Suitably changing of air feed cause of performance for efficiency biomass stove was higher. Specific fuel and energy consumption were 65.14% and 68.52%, respectively. However, low heat cost production was 1.71 Baht/kWh. Increasing of air forced draught let higher efficiency and should be promote to use in community.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to thanks for provided the research grand from School of Renewable Energy Maejo University "Project and development of the renewable energy potential graduates ASEAN". Scholarship of project Start up from graduate school Maejo University, Fiscal 2018 and EPPO: Energy Policy and Planning office, Ministry of Energy, Thailand, Fiscal 2018.

6. REFERENCES

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency (2018), Energy Situation 1/2018, Ministry of Energy.



- [2] Natthawud Dussadee, Kamoldara Reansuwan, Ram araj Rameshprabu (2014). Potential development of compressed bio-methane gas production from pig farms and elephant grass silage for transportation in Thailand. *Bioresource Technology* 155:438–441.
- [3] Tanate Chaichana, Magreasom Ali and Massaya Longsamman (2012). The Study of Thermal Efficiency of Household Cooking Stove. Original thesis, Program of Apply Physics – Energy, Faculty of Science, Thaksin University.
- [4] W. Jaremboon (2017). Rice Husk Gasifier Stove-Energy for Thai Agriculturalist, *KKU Science Journal* 45(1) 163-174.
- [5] Sopaporn Rattana, Nattaporn Chaiyai, Samerkhwan Tantikul, Nigran Homdoun, and Natthawud Dussadee (2018). Evaluation of High Biomass Stove Performance with Using Continuous Corn cob Pellet Fuels Feeder, 14th Conference on Energy Network of Thailand, 13 – 15 June 2561 Novotel Rayong Rim Pae Resort.
- [6] Thanachat Mahawan (2017). Development of Smokeless Producer gas Stove with Heat produced in Community slaughterhouse, Master of Engineering Thesis, School of Renewable Energy, Maejo University, pp 50-70.
- [7] Sommas Kaewluan, (2013). Performance Testing of the 20 kW Biomass Gas Stove, *SWU Engineering Journal* (2013) 8(1), 24-33.
- [8] Thanachat mahawan, Churat Thararux, Natthawud Dussadee, Kitikorn Sasujit and Nigran Homdoun (2016). Performance of Smokeless Producer gas Stove with using Corn Cob Fueled. 12th Conference on Energy Network of Thailand.



Sopaporn Rattana

Graduate student in Master of Engineering (Renewable Energy Engineering) Faculty of engineering, major Agricultural Engineering Biomass technology



Nigran Homdoun

Doctor of Engineering (Mechanical Engineering) Professional in Biomass Engineering and Automotive field. (Densification, Biofuel, Biomass Stove, Gasification, Combustion, Pyrolysis, Internal Combustion Engine and Power Plant)



Samerkhwan Tantikul

Assistant Professor of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo university. Professional in Automotive, Mechanical and Agricultural Machinery.



Natthawud Dussadee

Assistant Professor & Director, School of Renewable Energy, Maejo University. Professional in Agricultural Drying Processes, Energy Conservation, Solar energy and Thermal Process and Biofuels.



Sermuk Buochareon

Assistant Professor, School of Renewable Energy, Maejo University. Professional in Hydro energy, Petrochemicals of Science, Environmental chemistry, Agriculture and water resources.



Rameshprabu Ramaraj

M.Eng., M.Sc., M.Phil., Ph.D., Lecturer, School of Renewable Energy, Maejo University. Professional in scientific and engineering field including biology (animal, plant & microbes), sustainable resource engineering, environment and ecological engineering, and biofuels.



This is to certify that

Sopaporn Rattana Maejo University THAILAND

Attended The 25th Tri-University International Joint Seminar and Symposium
November 4-8, 2018

Hosted by Faculty of Engineering, Chiang Mai University, THAILAND

Given on November 8, 2018

Assistant Professor Nat Vorayos, Ph.D.
Dean, Faculty of Engineering
Chiang Mai University, THAILAND



บรรณานุกรม

- Ajieh, A.C. Igboanugo and M.U. 2017. **DESIGN AND CONSTRUCTION OF A BIOMASS STOVE FOR COOKING IN RURAL SETTLEMENTS IN NIGERIA.** Nigerian Research Journal of Engineering and Environmental Sciences,2(2), 351-359.
- Belonio, A.T. 2005. **Rice Husk Gas Stove Handbook, Appropriate Technology Center**Rice Husk Gas Stove Handbook, Appropriate Technology Center. Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University.
- Gaba, A. and S. F. Iordache 2005 **The Impact of Air Pollution on Health.** Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia.
- Dijan Supramono dan, Farah Inayati. 2013. **Performance of a Biomass-Gas Stove using Fuel of Rubber Wood Pellets.** Proceeding of the 13th International Conference on Quality in Research.
- Kirch Thomas, Birzer Cristian H., Medwell, Paul R. and Holden, Liam. 2018. **The role of primary and secondary air on wood combustion in cookstoves.** International Journal of Sustainable Energy,37(3), 268-277.
- Mengsi Deng, Pengchao Li, Ming Shan, Xudong Yang. 2020. **Optimizing supply airflow and its distribution between primary and secondary air in a forced-draft biomass pellet stove.** Environmental Research.
- Mohamed Ali Masmoudi, Kamel Halouani, Melik Sahraoui 2017. **Comprehensive experimental investigation and numerical modeling of the combined partial oxidation-gasification zone in a pilot downdraft air-blown gasifier.** Energy Conversion and Management, 144. 34-52.
- O. Senneca, Piero Salatino, R. Chirone. 2003. **Oxidative pyrolysis of solid fuels.** Analytical and Applied Pyrolysis,71(2), 959-970.
- Panwar N.L., and Rathore N.S. 2008. **Design and performance evaluation of a 5 kW producer gas stove.** Biomass and Bioenergy,32(13)49 – 1352.

- Ramirez, G. R.; Aguilera-Gonzalez, J. C.; Garcia-Diaz, G.; Nunez-Gonzalez, A. M., 2007. **Effect of urea treatment on chemical composition and digestion of Cenchrus ciliaris and Cynodon dactylon Hays and Zea mays residues.** J. Anim. Vet. Adv.,6(8), 1036-1041.
- Suresh R., Singh V. K., Malik J. K., Datta A. and Pal, R. C. 2016. **Evaluation of the performance of improved biomass cooking stoves with different solid biomass fuel types.** Biomass and Bioenergy, 95, 27-34.
- Vimal R. Patel, Darshil Patel, Nandan Varia, Rajesh N. Patel. 2017. **Co-gasification of lignite and waste wood in a pilot-scale (10 kWe) downdraft gasifier.** Energy, 119, 834-844.
- Vyas, D.K., Dipak, T., Viral, M. and Akbari, S.H. 2014. **Design and Development of Inverted Down Draft Gasifier for Cooking Purpose.** Scholars Journal of Engineering and Technology,2(2A), 113-122.
- V. K. Pantangi, A. S. S. R. Karuna Kumar, Subhash C. Mishra and Niranjana Sahoo. 2007. **Performance Analysis of Domestic LPG Cooking Stoves with Porous Media.** International Energy Journal, 8, 139-144.
- Shida Chen, Kangping Cui, Jinning Zhu, Yixiu Zhao, Lin-Chi Wang and Justus Kavita Mutuku. 2019. **Effect of Exhaust Gas Recirculation Rate on the Emissions of Persistent Organic Pollutants from a Diesel Engine.** Aerosol and Air Quality Research, 19, 812–819.
- นิวัฒน์ เกตุชาติ, คมเพชร อินลา, และบัณฑิต กฤดาคม. 2559. การศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวพันไฟวัสดุพูนชนิดเชื้อเพลิงแข็ง. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ ราชมงคลสุรินทร์ วิชาการ. ครั้งที่ 8293-299.
- วิรัตน์ เจริญบุญ. 2560. **เตาชีวมวลกลบพลังงานเพื่อเกษตรกรไทย.** ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 45(1), 168-174.
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์. 2558. **ทฤษฎีและเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งและชีวมวล.** โรงพิมพ์เจริญดีมั่นคงการพิมพ์.
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์, ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์, และ สมชาติ โสภณธนฤทธิ์. 2558. **อิทธิพลของการ**

จ่ายอากาศส่วนที่สองแบบหมุนวนที่มีต่อการเผาไหม้กลับในเตาเผาไหม้ ฟลูอิดซ์เบดแบบห้องเผาไหม้สั้นที่ใช้หัวฉีดกระจายอากาศ. **Research and Applications in Mechanical Engineering**, 1(1).

พิสมัย เสถียรยานนท. 2558. **ทฤษฎีการเผาไหม้**. แผนพัฒนาพลังงานทดแทน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. **โครงการศึกษากำหนดมาตรฐานของ Biomass Pellet เพื่อพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับอนาคต**. กระทรวงพลังงาน.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2562. **สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.dede.go.th > download > stat62 > sit_2_jan_62

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กระทรวงพลังงาน. 2546. **Combustion theory**. ตำราฝึกอบรมผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (ผชพ) ด้านความร้อน.

กุลนันท์ คันธิก. 2553. **สถานการณ์พลังงานโลก ผลกระทบต่อความมั่นคงด้านพลังงานของจีน**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิลาวัลย์ คุ่มเหม. 2562. **การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สำหรับ วิสาหกิจแปรรูปอาหาร**. วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สุพิน จอดนอก, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, และ จริง ดินเชิดชู. 2554. **คุณลักษณะการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาชีวมวลทรงกระบอก**. **วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี**, 13(2), 52-61.

สุรียา จักรวัฒนา และ ณภัทร สมุทรจักร. 2559. **การประเมินประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวลเหลือทิ้งด้วยเตาแก๊สซีไฟเออร์แบบก๊าซไหลลง**. **วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย**, 30(3), 37-46.

ชนธกานต์ ไสยิ๊ง และ จักรกฤต ไคร้ไท้. 2556. **การพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลสำหรับครัวเรือน**. วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ณัฐวุฒิ ดุษฎี, กิตติกร สาสุจิตต์, นิกราน หอมดวง, อภิชาติ สอนคำกอง และ เสรี กังวานกิจ. 2551. **การประเมินสมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลสำหรับครัวเรือนโดยใช้เกลบเป็นเชื้อเพลิง**. ใน **การประชุมวิชาการประจำปี สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่**.

นิกราน หอมดวง นฤมล ทิศาใต้ กนกวรรณ ศรีคำวัง เสริมสุข บัวเจริญ กิตติกร สาสุจิตต์ และ ณัฐวดี ดุษฎี. 2560. สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลแบบป้อนต่อเนื่องและป้อนเป็นช่วงเมื่อใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13. 228-236.

ธนาพล ตันติสัตยกุล สุริยา พงษ์เกษม ปรีย์ปวีณ ภูทัญญา และ ภาณุวัฒน์ ไถ่บ้านกวย. 2558. พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากทางมะพร้าว. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 23(3), 418-431.

ทองทิพย์ พูลเกษม. 2552. การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากเปลือกทุเรียนเพื่อทดแทนฟืนและถ่านในการหุงต้มในครัวเรือน. มหาวิทยาลัยมหิดล.

นคร ทิพยาวงศ์. 2552. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

วรารณ ทุมชาติ. 2557. การผลิตโปรติวเซอร์แก๊สจากเตาแบบ Inverted Downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 7(1), 26-39.

สุชาติ พงษ์ศิริตันกุล. 2558. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการจัดซื้อเครื่องวิเคราะห์บอมบ์ แคลอรีมิเตอร์. วิทยานิพนธ์ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

บุษบา พุกษาพันธุ์รัตน์ บุญรอด สัจจุลณุกิจ วุฒินันท์ นุ่นแก้ว ธนวัฒน์ ศรีพนมวรรณ และ ชัยวัฒน์ทานะรมณ. 2555. แนวทางการส่งเสริมมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแปรรูปในภาคอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).

ธัญพิสิษฐ์ พวงจิก. 2558. เม็ดเชื้อเพลิงจากไฟ : พลังงานทดแทนมูลค่ามหาศาล. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 23(1), 35-42.

พิสิษฐ์ มณีโชติ ประพิธาร์ ธนารักษ์ วิกานต์ วันสูงเนิน และ ณัฐเศรษฐ์ น้ำคำ. 2556. การพัฒนาห้องเผาไหม้เตาชีวมวลจากเซรามิก. นิพนธ์ต้นฉบับ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก, 33(5).

ฐิตาภรณ์ ภูมิไชย จีระวัฒน์ รียาพันธ์ กรรณิการ์ ชีระวัฒนสุข และ กฤษดา สังข์สิงห์. 2555. คุณสมบัติของไม้ยางพาราเพื่อการคัดเลือกพันธุ์ยาง. วารสารยางพารา (ISSN: 01254405), 33(3), 32-42.

ธนาชาติ มหาวัน. 2560. **การพัฒนาเตาก๊าซชีวมวลไร่คว้นสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชน โรงฆ่าสัตว์**. วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

วิโรจน์ ไชยสมทิพย์, สมศักดิ์ ตั้งวิไล และ อภินันต์ เสริมสิริตระกูล. 2557. **การสร้างเตาแก๊สซีฟเออร์ ควบคู่กับเตาชีวมวลระดับครัวเรือน**. วิทยานิพนธ์ สาขาวิชา เทคโนโลยีเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. 1-58.

สมมาส แก้วล้วน ดำรงค์ดี จันโทสี สุรัชย์ จันทรศรี และ เวคิน ปิยรัตน์. 2556. การทดสอบสมรรถนะ เตาชีวมวลขนาด 20 kW. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ**, 8(1), 24-33.

กิตติกร สาสุจิตต์ วราพงศ์ แสนพินิจ ณัฐพงษ์ วงศ์รินทร์ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี. 2558. การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากวัสดุเหลือทิ้งซึ่งและเปลือกข้าวโพด ด้วยเทคนิคการอัดรีดขึ้นรูปโดยใช้ตัวประสานแป้งมันผสมปูนขาว. **วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ**, 18(1), 5-14.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2562. **สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย**.

[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา

https://www.dede.go.th/download/stat62/frontpage_jan_dec_62.pdf

อนุรักษ์ หอสูงเนิน และ ยศวัฒน์ ทันวงษา. 2554. เตาหุงต้มเชื้อเพลิงแกลบสำหรับครัวเรือน.

ใน การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปี 2554.

อธิพงษ์ โสภกุล ชีระ ฤทธิรอด และ เทพฤทธิ์ ตูลาพิทักษ์. 2558. การศึกษาความเป็นไปได้ในการลงทุน ธุรกิจพลังงานชีวมวลอัดเม็ดของ หจก.ปิ้งรุ่งเรืองพืชผล. ในการ **ประชุมวิชาการทางธุรกิจและ นวัตกรรมทางการจัดการระดับชาติและนานาชาติ**. 1790-1796.

เจนจิรา อุตเรือน. 2561. **การเพิ่มคุณภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการทอรีรีแฟคชัน**. วิทยานิพนธ์ หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวโภาภรณ์ รัตน์ะ
เกิดเมื่อ	12 มิถุนายน 2535
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สถาบัน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ประวัติการทำงาน	สิงหาคม 2558 - สิงหาคม 2559 ทำงานตำแหน่งผู้ช่วยช่างโยธา บริษัท วงษ์สยามก่อสร้าง จำกัด โครงการวางท่อและก่อสร้างสถานีจ่ายน้ำแม่โจ้ การประปาส่วนภูมิภาค ตุลาคม 2561 - กันยายน 2562 ผู้ช่วยนักวิจัยโครงการ โครงการ การพัฒนาหลักสูตรบัณฑิตพันธุ์ใหม่เพื่อรองรับการอุตสาหกรรม อนาคต (New S-Curve) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้