



การพัฒนาเตาก๊าซชีววมวลไร่คว้นสำหรับการผลิตความร้อน
ในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์

ธนชาติ มหาวัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาเตาแก๊ชชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อน
ในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์

ชนชาติ มหาวัน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา


อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)
วันที่ 24 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560


อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

น /
.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)
วันที่ 24 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

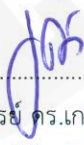
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชรัตน์ ธารารักษ์)
วันที่ 24 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร


.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)
วันที่ 24 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว


.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ 24 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2560

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจ ชุมชนโรงฆ่าสัตว์
ชื่อผู้เขียน	นายธนาต มหาวิน
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบพัฒนาและประเมินสมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ให้มีสมรรถนะเพิ่มสูงขึ้น โดยมีการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมและเตาแก๊สหุงต้ม การศึกษาเริ่มจากการออกแบบเตาให้มีลักษณะการเผาไหม้ตามหลักการแก๊สซิฟิเคชันประกอบด้วย การออกแบบคำนวณขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ความสูงของห้องเผาไหม้ ขนาดของพัดลมและปริมาณอากาศที่ใช้และขนาดเชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ ชังข้าวโพด เศษไม้ลำไยและแกลบ ด้านการทดสอบได้ปรับอัตราการป้อนอากาศคือ 37.6 46.4 และ 55.1 m^3/h ส่วนขนาดความยาวชีวมวลทั้งหมดคือ 2.54 5.08 และ 10.0 cm ยกเว้นแกลบที่มีการศึกษาวิเคราะห์เพียงขนาดเดียว ข้อมูลสมรรถนะได้วิเคราะห์ด้านอัตราความสิ้นเปลืองชีวมวลและพลังงาน อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ประสิทธิภาพความร้อนและการวิเคราะห์ผลทางเศรษฐศาสตร์ในด้านการประหยัดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาคืนทุนเมื่อใช้ในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์

ผลการศึกษาด้านการออกแบบเตาชีวมวลไร้ควันพบว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมเท่ากับการใช้งานกับชีวมวลทั้ง 3 ชนิด คือ 35 cm และ 60 cm ตามลำดับ อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมกับเตาชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ ชังข้าวโพด เศษไม้และแกลบมีค่าเท่ากับ 46.4 m^3/h ขนาดเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเมื่อใช้ชังข้าวโพดและเศษไม้ 5.02 cm อัตราความสิ้นเปลืองชังข้าวโพด เศษไม้และแกลบในสถานะที่เหมาะสมมีค่าเฉลี่ย 13.33 12.89 และ 8.48 kg/h ตามลำดับ การใช้ชังข้าวโพดให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด ถัดมาเป็นแกลบและเศษไม้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้ ชังข้าวโพด เศษไม้และแกลบมีค่าเฉลี่ย 23.6% 17.33 % และ 20.55 % ตามลำดับ ในด้านเศรษฐศาสตร์การใช้เตาแก๊สชีวมวลในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ให้ผลประหยัดค่าใช้จ่ายต่อปีเฉลี่ย 5,320.82 6,442.22 และ 9,220.52 Baht/y เมื่อใช้ชังข้าวโพด เศษไม้และแกลบที่ราคาไม่เกิน 0.50 Baht/kg ตามลำดับ ระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ยของการใช้งานเตาแก๊สชีวมวล

มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.34-2.33 year ปัจจัยที่ส่งผลต่อประหยัดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาคืนทุนได้แก่
ราคาชีวมวล ราคาก๊าซหุงต้มและระยะเวลาการใช้งาน

คำสำคัญ: เตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน เชื้อเพลิงชีวมวล ประสิทธิภาพความร้อน วิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์



Title	Development of Smokeless Producer Gas Stove for Heat Production in Slaughterhouse Community Enterprises
Author	Mr. Tanachat Mahawan
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisor Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Nigran Homdoun

ABSTRACT

The purpose of this research is to design, develop and evaluate performance of smokeless biomass gasification for heat production of slaughterhouse community enterprises in order to increase high when compared with conventional biomass stoves and liquefied petroleum gas stove. The research started from designing combustion characterized as the gasification principle consisting of design diameter and height of combustion chamber, blower size, air flow rate and biomass fuel size which includes corn cob, longan wood residue and rice husk. The experiment was to adjust air flow rate and biomass length of 37.6m³/h, 46.4m³/h, 55.1 m³/h and 2.54 cm, 5.08 cm and 10.0 cm respectively. Excluding, rice husk with analytical studies of only one size. The following data was analyzed; biomass and energy consumption, specific energy consumption, thermal efficiency and economic within cost savings and payback periods with using in slaughterhouse community enterprises.

The results of this study on the design of smokeless producer gas stove found that, the appropriate diameter and height combustion chamber with using three biomass were of 35 cm and 60 cm respectively. The suitable air flow rate for use of corn cob, longan wood residue and rice husk was of 46.4 m³/h and 5.02 cm of corn cob and longan wood residue. The ratio of biomass consumption of corn cob, longan wood residue and rice husk were of 13.33 kg/h, 12.89 kg/h, and 8.48 kg/h respectively. The use of corn cob was lead to higher thermal efficiency, next longan wood residue and rice husk and 23.6%, 17.33 % and 20.55% thermal efficiency respectively. The use of smokeless producer gas stove in slaughterhouse community enterprises was resulted in average annual cost savings of

5,320.82 baht/year, 6,442.22 baht/year and 9,220.52 baht/year at less than 0.5 baht/kg of biomass prices. The payback periods of smokeless producer gas stove was between of 1.34-2.33 year. The factors which effected on cost savings and payback period are biomass price, liquefied petroleum gas price and duration of work.

Keywords: Smokeless Producer Gas Stove, Biomass fuel, Thermal efficiency, Slaughterhouse Community Enterprises



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินุช จินดารักษ์ ซึ่งได้ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้ความรู้คำแนะนำต่าง ๆ และคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์ ซึ่งให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาร่วมในการทำวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมถึงตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์นี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน รวมถึงบุคลากรวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่พร้อมให้คำแนะนำหลาย ๆ ด้าน และเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ใน “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา” ครั้งนี้

ขอบคุณ โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ ภายใต้สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาที่ให้ทุนสนับสนุนในการวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบคุณครอบครัวและเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน พร้อมทั้งคำแนะนำและเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ธนาต มหาวัน

ตุลาคม 2560

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
สารบัญตารางผนวก	(13)
สารบัญภาพผนวก	(14)
สัญลักษณ์และตัวห้อย	(15)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
เชื้อเพลิงชีวมวล	5
การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวล	7
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	8
เตาก๊าซซิไฟเออร์แบบฟิกซ์เบด	10
เตาชีวมวลระบบแก๊สซิฟิเคชัน	12
สมการพื้นฐานการออกแบบเตาก๊าซชีวมวล	14
การประเมินกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	16
การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน	19
การตรวจสอบเอกสาร	20

	หน้า
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย	29
วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	29
วิธีการทดสอบก๊าซชีววมวลไร้ควัน	34
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	44
การออกแบบและพัฒนาเตาชีววมวลแบบไร้ควัน	44
รายละเอียดการคำนวณและการออกแบบเตาชีววมวลไร้ควัน	47
การพัฒนาเตาชีววมวลที่ได้จากการออกแบบ	51
คุณสมบัติพื้นฐานชีววมวลที่ใช้ในการทดสอบ	54
สมรรถนะของเตาชีววมวลแบบดั้งเดิมกับเตาก๊าซหุงต้ม	56
สมรรถนะของเตาชีววมวลแบบไร้ควันกับเตาก๊าซหุงต้ม	58
การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เตาชีววมวลไร้ควันสำหรับการใช้งานในวิสาหกิจ โรงฆ่าสัตว์	73
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	80
สรุปผลการวิจัย	80
ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก	85
ภาคผนวก ก แบบเตาก๊าซชีววมวลไร้ควัน	86
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบเตาก๊าซชีววมวลไร้ควัน	91
ภาคผนวก ค เผยแพร่ผลงานวิจัย	106
ภาคผนวก ง ประวัติผู้วิจัย	123

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	พื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตของพืชหลักแต่ละชนิด (หน่วย: 1000 ไร่/1000 ตัน)	6
2	ศักยภาพของชีวมวลประเภทต่าง ๆ	6
3	การวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณ (as Received Basis)	7
4	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Dry Basis)	8
5	ส่วนประกอบก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล	10
6	ผลการเปรียบอัตราการไหลอากาศเทียบกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง	36
7	ขั้นตอนการทดสอบของเตาก๊าซแบบดั้งเดิมก๊าซหุงต้ม และเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน	36
8	การใช้งานเตาชีวมวลตามความต้องการของวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์	44
9	เงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบเตาชีวมวล	45
10	สรุปขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลแบบไร้ควัน	50
11	การวิเคราะห์คุณสมบัติโดยประมาณ	54
12	การวิเคราะห์คุณสมบัติโดยแยกธาตุ	55
13	องค์ประกอบก๊าซชีวมวลจากเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน	68
14	การวิเคราะห์สมรรถนะของเตาชีวมวลไร้ควันสำหรับการใช้งานในวิสาหกิจชุมชน	72
15	การเปรียบเทียบชนิดและขนาดของชีวมวลที่ต่างกันสำหรับการใช้งานในวิสาหกิจชุมชน	73
16	การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เตาก๊าซชีวมวลไร้ควันสำหรับการใช้งานวิสาหกิจโรงฆ่าสัตว์	74
17	การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (ซังข้าวโพด)	75
18	การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (ไม้ส่ำไย)	76
19	การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (แกลบ)	76

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทยระหว่างปี 2555-2564	1
2	ตัวอย่างวิสาหกิจที่มีการใช้พลังงานจากก๊าซหุงต้มและชีวมวลในปริมาณสูง	2
3	เครื่องผลิตโปรติวเซอร์ก๊าซแบบ Up-draft, Cross-draft และ Down-draft	11
4	เตาชีวมวลระบบก๊าซซีพีเคชั่น	12
5	เตาก๊าซชีวมวลแบบใช้แก๊สและใช้ฟืน	14
6	เตาก๊าซชีวมวลใช้วัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง	20
7	เตาชีวมวลแบบไหลขึ้นโดยใช้เศษผักและแกลบเป็นเชื้อเพลิง	21
8	การนำเอาเตาชีวมวลแบบใช้แก๊สส่งเสริมให้กับชาวบ้านในพื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน	22
9	ไดอะแกรมการทำงานของเตาชีวมวลขนาด 20 kW	23
10	เตาก๊าซชีวมวลแบบ Invert downdraft โดยใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง	24
11	ไดอะแกรมของเตาชีวมวลขนาด 5 kW	25
12	ไดอะแกรมออกแบบเตาชีวมวลแบบ Inverted down draft	25
13	การทดสอบประสิทธิภาพเตาชีวมวลแบบ Inverted down draft	26
14	การทดสอบเตาก๊าซชีวมวลสำหรับการต้มเกลือจากบ่อเกลือสินเธาว์ จังหวัดน่าน	28
15	เตาก๊าซชีวมวลแบบดั้งเดิม	29
16	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ	30
17	เครื่องวัดอัตราการปนอากาศ	31
18	เครื่องชั่งน้ำหนักชีวมวลและน้ำ	31
19	ชีวมวลสำหรับการทดสอบ	32
20	เตาก๊าซชีวมวลแบบดั้งเดิม	33
21	เตาก๊าซหุงต้ม	33
22	ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	34
23	ไดอะแกรมชุดเก็บตัวอย่างก๊าซ	38
24	กระบวนการฆ่าเชื้อและน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์วิสาหกิจชุมชน	43
25	ไดอะแกรมการออกแบบเตาชีวมวล	46
26	ลักษณะของหัวเตาชีวมวลไร้ควัน	52
27	ลักษณะของห้องเผาไหม้เตาชีวมวลไร้ควัน	52
28	ตะแกรงรองชีวมวลของเตาชีวมวลไร้ควัน	53

ภาพที่	หน้า	
29	ชุดพัดลมป้อนอากาศและการติดตั้งใช้งาน	53
30	อัตราการความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม	56
31	อัตราการความสิ้นเปลืองพลังงานของเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม	57
32	ประสิทธิภาพความร้อนของเตาแบบดั้งเดิมเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม	57
33	อัตราการสิ้นเปลืองซังข้าวโพดของเตาชีวมวลแบบไร้ควันเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม	59
34	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเตาชีวมวลแบบไร้ควันเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม	59
35	อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของไม้ลำไย	60
36	อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของไม้ลำไย	60
37	อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแกลบ	61
38	อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแกลบ	61
39	ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง	62
40	อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับประสิทธิภาพความร้อน	63
41	อัตราการป้อนอากาศเทียบกับประสิทธิภาพความร้อน	64
42	ขนาดของความยาวเชื้อเพลิงที่มีผลกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของซังข้าวโพด	65
43	ขนาดของความยาวเชื้อเพลิงที่มีผลกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของซังข้าวโพด	65
44	ผลของขนาดความยาวของเชื้อเพลิงที่มีผลกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	66
45	ผลของขนาดความยาวของเชื้อเพลิงที่มีผลกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน	66
46	ขนาดความยาวซังข้าวโพดที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน	67
47	ขนาดความยาวของเศษไม้ลำไยที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน	67
48	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในและภายนอกเตาชีวมวลไร้ควัน เมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง	70
49	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในและภายนอกเตาชีวมวลไร้ควัน เมื่อใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง	70
50	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในและภายนอกเตาชีวมวลไร้ควัน เมื่อใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง	71
51	การเปลี่ยนแปลงราคาก๊าซหุงต้มเทียบกับราคาซังข้าวโพดและระยะเวลาคืนทุน	77
52	การเปลี่ยนแปลงราคาก๊าซหุงต้มเทียบกับราคาไม้ลำไยและระยะเวลาคืนทุน	78
53	การเปลี่ยนแปลงราคาก๊าซหุงต้มเทียบกับราคาแกลบและระยะเวลาคืนทุน	79
54	การวิเคราะห์ชั่วโมงการใช้งานที่มีผลต่อระยะเวลาคืนทุน	79

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวกที่		หน้า
1	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาก๊าซชีววมวลไร่ควั่น โดยใช้เชื้อเพลิงไม้ลำไย ขนาด 1 inch	92
2	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาก๊าซชีววมวลไร่ควั่น โดยใช้เชื้อเพลิง ไม้ลำไยขนาด 2 inch	93
3	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาก๊าซชีววมวลไร่ควั่น โดยใช้เชื้อเพลิง ซังข้าวโพดขนาด 1 inch	94
4	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาก๊าซชีววมวลไร่ควั่น โดยใช้เชื้อเพลิง ซังข้าวโพดขนาด 2 inch	95
5	แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาก๊าซชีววมวลไร่ควั่น โดยใช้เชื้อเพลิง ซังข้าวโพดขนาด 3 inch	96

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวกที่		หน้า
1	แบบเตาก๊าซชีวมูลไร่ควีน	87
2	แบบเตาก๊าซชีวมูลไร่ควีนและชุดป้อนอากาศ	88
3	แบบหัวเตาก๊าซชีวมูลไร่ควีน	89
4	แบบตะแกรงรองขี้เถ้าของเตาแก๊สชีวมูลไร่ควีน	90
5	ใบรายงานผลการวิเคราะห์แก๊สชีวมูลไม้ลำไย	97
6	ใบรายงานผลการวิเคราะห์แก๊สชีวมูลแกลบ	98
7	ใบรายงานผลการวิเคราะห์แก๊สชีวมูลซังข้าวโพด	99
8	ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของไม้ลำไย	100
9	ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของแกลบ	101
10	ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของซังข้าวโพด	102
11	ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของไม้ลำไย	103
12	ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของแกลบ	104
13	ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด	105

สัญลักษณ์และตัวห้อย

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่	m
C	คาร์บอน	
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	(kJ/kg K)
CH ₄	มีเทน	
C ₈ H ₈	สไตรีน	
CO ₂	คาร์บอนไดออกไซด์	
CO	คาร์บอนมอนอกไซด์	
CZR	อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง	m/°C
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง	m
ES	ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้	Baht
FC	อัตราพลังงานจำเพาะของน้ำ	
H	คาร์บอนคงตัว	%
	ไฮโดรเจน	
	ความสูง	m
h_{fg}	ค่าความร้อนแฝง	(kJ/kg)
HHV	ค่าความร้อนสูง	kJ/kg
H ₂ O	ไอน้ำ	
HVF	ค่าความร้อนเชื้อเพลิง	kJ/kg
FCR	อัตราส่วนความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	kg/min
I	อัตราลดค่า	%
IO	เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ	Baht
IRR	อัตราผลตอบแทนภายใน	Baht/year
LHV	ค่าความร้อนต่ำ	kJ/kg
M	อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน	kg/s
\dot{m}	อัตราการใช้เชื้อเพลิง	kg/h
m	มวล	kg
N	ไนโตรเจน	

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
n	อายุโครงการ	year
NPV	มูลค่าปัจจุบัน	Baht
O	ออกซิเจน	
PB	ระยะเวลาคืนทุน	year
Q	ปริมาณความร้อน	kJ
S	ซัลเฟอร์	
SEC	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน	kJ/s
SGR	อัตราแก๊สซิฟิเคชันจำเพาะ	kg/m ² °C
	อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	kg/m ² °C
T	อุณหภูมิ	°C
t	ระยะเวลา	h, min
V	ปริมาตร	m ³
VM	ปริมาณสารระเหย	%
อักษรกรีก	ความหมาย	หน่วย
η	ประสิทธิภาพ	%
Σ	ผลรวม	
ρ	ความหนาแน่น	kg/m ³
ตัวห้อย	ความหมาย	
air	อากาศ	
Ap	ปรากฏ	
Fuel	เชื้อเพลิง	
g	ก๊าซ	
gasification	เครื่องผลิตโปรดิวเซอร์แก๊ส	
o	ระยะเวลาการใช้งาน	
r	ห้องเผาไหม้	
th	ความร้อน	

ตัวห้อย

TOT

s

U

W

ความหมาย

รวม

เริ่มต้น

การใช้ประโยชน์

น้ำ

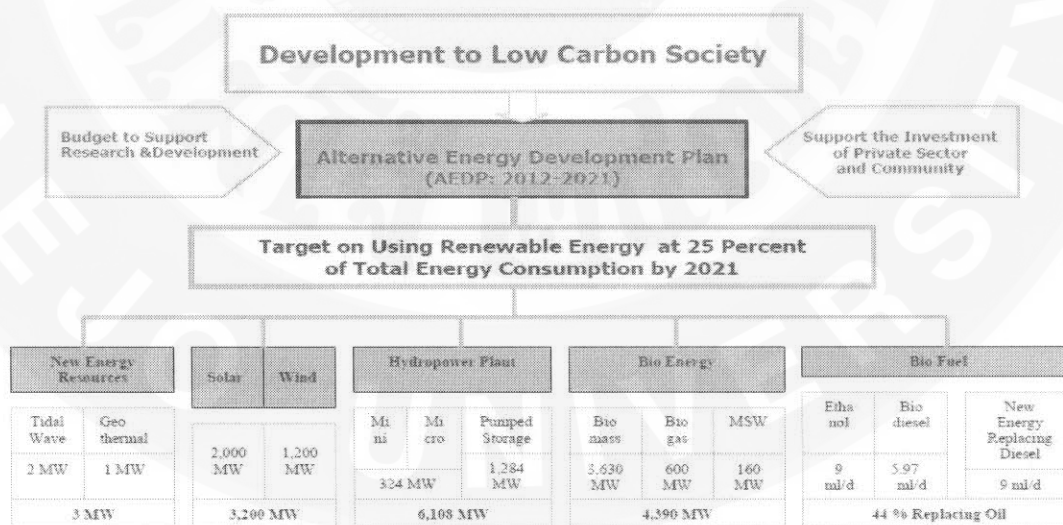


บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

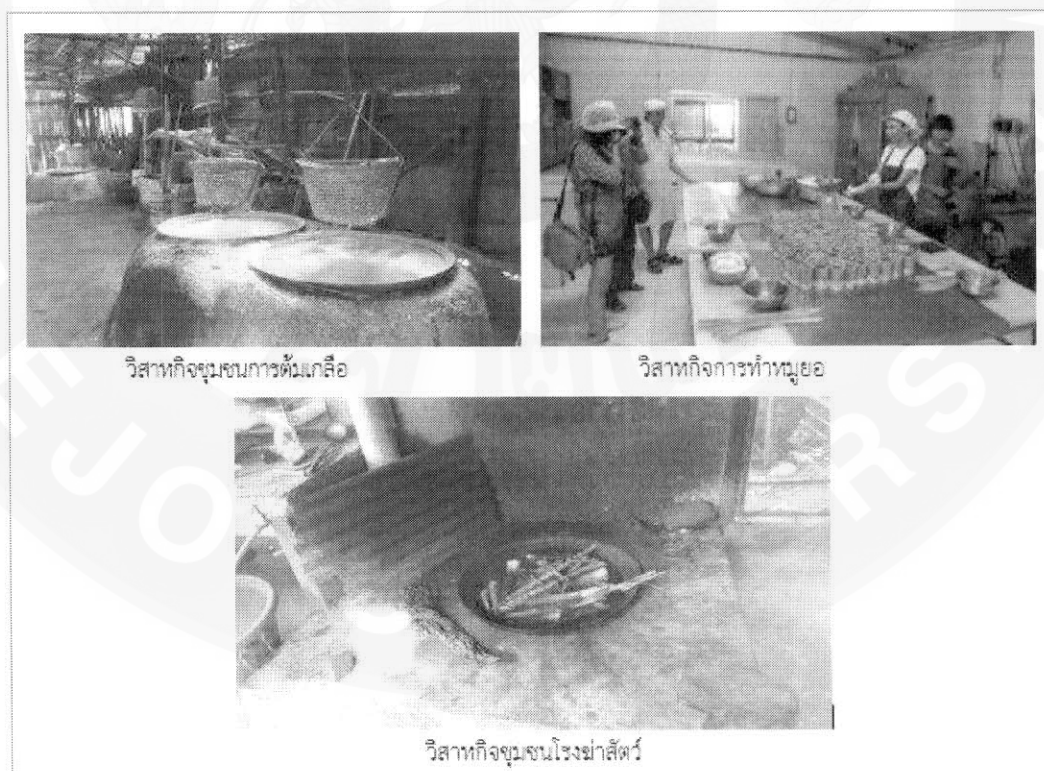
ปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงจากพลังงานตามแบบ (Conventional energy) มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งได้แก่ น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซปิโตรเลียมเหลว ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น ประเทศไทยในฐานะที่เป็นประเทศที่นำเข้าพลังงานสูงเกือบ 85% จึงได้รับผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556) อย่างไรก็ตามทางรัฐบาลก็มีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนอื่น ๆ เช่น พลังงานชีวมวล พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานน้ำ เป็นต้น โดยกระทรวงพลังงานมีแผนพัฒนาพลังงานทดแทนระยะ 21 ปี ในปี พ.ศ. 2558-2579 ที่มีการมุ่งเน้นให้ใช้พลังงานทดแทน 30% ซึ่งในปี พ.ศ. 2558 มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศ 12% ดังภาพที่ 1 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) ซึ่งการเพิ่มของราคาเชื้อเพลิงในปัจจุบันที่มีผลกระทบต่อชุมชนโดยตรงทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาวิจัยการใช้พลังงานในชุมชน (ธนศ, 2547) พบว่าชุมชนมีค่าใช้จ่ายทางพลังงานมากถึง 20% ของรายได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศทางด้านเกษตรกรรม วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีปริมาณค่อนข้างสูง และส่วนใหญ่กระจายอยู่ในชุมชน แต่ละท้องถิ่นก็สามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนสำหรับในชุมชนได้



ภาพที่ 1 แผนการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทยระหว่างปี 2555-2564

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2555)

การใช้พลังงานในชุมชนส่วนใหญ่นอกจากการใช้กับยานพาหนะแล้วก็จะมีความเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานด้านความร้อน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เชื้อเพลิงคือ ก๊าซหุงต้ม น้ำมัน มีแนวโน้มว่าจะหมดไปในอนาคตและมีราคาที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ผลกระทบด้านนี้ทำให้ชุมชนมีค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในระดับครัวเรือนอาจได้รับผลกระทบไม่มากนัก แต่ถ้าเป็นระดับวิสาหกิจชุมชนแล้วจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตสินค้ากับชุมชนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ กลุ่มวิสาหกิจชุมชนที่ใช้ก๊าซหุงต้มในการต้ม นึ่ง หรือทอดจะเป็นกลุ่มที่มีการใช้ก๊าซหุงต้มสูง เช่น วิสาหกิจชุมชนต้มเกลือ วิสาหกิจการทำหมุย และ วิสาหกิจโรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น ภาพที่ 2 ซึ่งถ้าวิสาหกิจชุมชนสามารถใช้เชื้อเพลิงที่มีต้นทุนต่ำกว่าก๊าซหุงต้ม เช่น การใช้เชื้อเพลิงชีวมวลก็จะส่งผลให้วิสาหกิจมีต้นทุนในการผลิตต่ำลงทำให้มีกำไรเพิ่มสูงขึ้นอีกทั้งยังช่วยยกระดับชีวิตความเป็นอยู่ของสมาชิกในชุมชนให้ดีขึ้นได้ โดยใช้ชีวมวลที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น ซังข้าวโพด แกลบ เศษไม้ที่ทิ้งจากการแปรรูปทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังช่วยลดในเรื่อง การเผาในที่โล่งของชุมชนลงได้ซึ่งจะช่วยลดปัญหาเรื่องหมอกควันที่เกิดจากชุมชนลงได้ การนำเอาชีวมวล เช่น ซังข้าวโพด เศษไม้ลำไย และแกลบ มาใช้ผลิตเป็นพลังงานความร้อนในปัจจุบันยังมีประสิทธิภาพการใช้งานค่อนข้างต่ำโดยเฉลี่ยศักยภาพจะอยู่ระหว่าง 10-16% (จิตรภรณ์, 2555) สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากการคุณภาพของเชื้อเพลิงที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากการออกแบบเตาชีวมวลไม่สอดคล้องกับชนิดเชื้อเพลิง



วิสาหกิจชุมชนการต้มเกลือ

วิสาหกิจการทำหมุย

วิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์

ภาพที่ 2 ตัวอย่างวิสาหกิจที่มีการใช้พลังงานจากก๊าซหุงต้มและชีวมวลในปริมาณสูง

ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติของชีวมวลและการออกแบบเตาหลักการเผาไหม้ที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลให้สูงขึ้นได้ ซึ่งในหลักการออกแบบเตาชีวมวลที่เหมาะสมจำเป็นต้องศึกษาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมการสูญเสียความร้อนตลอดจนกระบวนการกำจัดเถ้าออกจากเตา ในส่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงโดยเฉพาะ ความชื้น ขนาด ชนิด ของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้ประสิทธิภาพทางความร้อนและต้นทุนการใช้เชื้อเพลิง ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการออกแบบและสร้างเตาชีวมวลให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่มีอยู่ในท้องถิ่น ได้แก่ ชังข้าวโพด เศษไม้ลำไย และแกลบ โดยมีการศึกษาผลของความชื้น ขนาด และอัตราส่วนอากาศที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพในการเผาไหม้และต้นทุนในการใช้งานสำหรับกิจกรรมด้านการต้ม ทอด และมีการศึกษาเปรียบเทียบการประเมินสมรรถนะและต้นทุนของเตาชีวมวลกับการใช้ก๊าซหุงต้ม ผลจากการวิจัยนี้จะใช้เป็นแนวทางให้ชุมชนหรือวิสาหกิจสามารถนำเอาชีวมวลในท้องถิ่นนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่าเป็นการเพิ่มรายได้และรักษาสิ่งแวดล้อมให้กับชุมชนต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

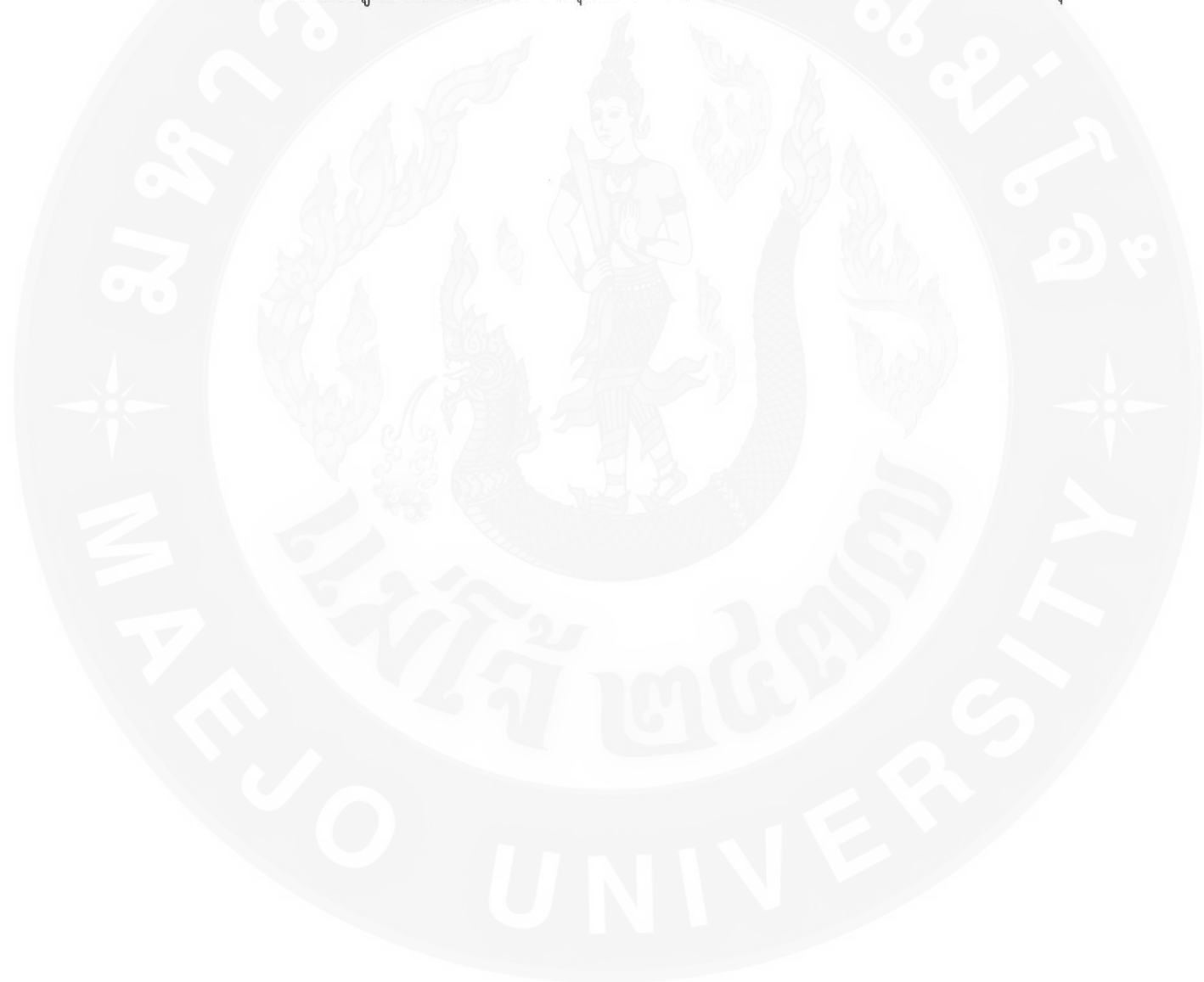
1. เพื่อออกแบบ พัฒนา สร้างเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน สำหรับการใช้งานในผลิตความร้อนของวิสาหกิจชุมชน
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่ส่งผลต่อสมรรถนะเตาชีวมวลไร้ควัน ได้แก่ ชนิด ขนาด อุณหภูมิความชื้น อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
3. เพื่อประเมินสมรรถนะและต้นทุนการผลิตพลังงานของเตาชีวมวลแบบไร้ควันเมื่อใช้ในการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชน

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาขนาดของเตาชีวมวลอยู่ในช่วง 40-60 kW ของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ป้อนเข้าไป
2. เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบประกอบด้วย ชังข้าวโพด แกลบ และ เศษไม้
3. ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 10-30%
4. ขนาดของชังข้าวโพดและเศษไม้ ศึกษาทั้งหมด 3 ขนาด ยกเว้นแกลบจะศึกษาเพียง 1 ขนาด
5. การทดสอบการใช้งานเตาชีวมวลจะทดสอบภายใต้ กิจกรรมการต้มหรือทอดโดยเปรียบเทียบสมรรถนะกับเตาก๊าซที่ใช้ก๊าซหุงต้ม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เตาชีวมวลไร้ควันที่ใช้วัสดุทางการเกษตรสำหรับผลิตความร้อนที่เหมาะสมต่อวิสาหกิจชุมชนที่สามารถเผยแพร่ให้กับชุมชนได้อันจะนำไปสู่การลดต้นทุนทางด้านเชื้อเพลิงในการผลิต และลดการเผาวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ทำให้เกิดมลพิษทางด้านอากาศของชุมชนได้
2. ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมรรถนะเตาชีวมวลไร้ควัน
3. ทราบข้อมูลด้านสมรรถนะและต้นทุนของเตาชีวมวลไร้ควันสำหรับการนำไปใช้งานวิสาหกิจชุมชน



บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ จะทำการกล่าวถึงเชื้อเพลิงชีวมวลและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ชนิดของเตาผลิตก๊าซโปรดิวเซอร์ ส่วนการตรวจเอกสารจะนำเสนอในส่วนของการทดสอบเตาผลิตก๊าซโปรดิวเซอร์ เตาชีวมวลทั่วไปและการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. เชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงและเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบและลักษณะเฉพาะแหล่งตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจึงมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญคือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้น ๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่งหรือการใช้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า (นิมิต, 2553)

ปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดพื้นที่ปลูก ผลผลิตของพืชหลักและไม้ยางพารา ปี 2551 และ 2552 วัสดุทางการเกษตรที่เหลือทิ้งทางภาคเหนือที่พบส่วนใหญ่ได้มาจากซังข้าวโพด แกลบ อ้อย เศษไม้และปาล์ม ซึ่งสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาแปรรูปเป็น Bio-coal และต่อยอดทางธุรกิจได้ สำหรับศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะ

ประเมินจากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้น ๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นปริมาณชีวมวลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 พื้นที่เพาะปลูกพืชและผลผลิตของพืชหลักแต่ละชนิด (หน่วย : พันไร่/พันตัน)

ชนิด	2551		2552	
	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต	พื้นที่เก็บเกี่ยว	ผลผลิต
อ้อย	6,588	73,502	6,023	66,816
ข้าว	66,772	31,651	68,519	31,508
ข้าวโพด	6,518	4,249	6,905	4,616
ปาล์มน้ำมัน	2,885	9,271	3,189	8,162
มันสำปะหลัง	7,397	25,156	8,584	30,088
ไม้ยางพารา	11,372	3,166	11,600	3,090

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2556)

ตารางที่ 2 ศักยภาพของชีวมวลประเภทต่าง ๆ

ชนิด	ผลผลิต (ton)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือทิ้ง (ton)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้นใบ/เปลือก	170,383.17	19.44	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ทะลายเปล่า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		ใย	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
		กะลา	38,959.04	18.46	719.18	17.02
		ก้าน	2,203,740	9.83	21,824.24	516.62
มันสำปะหลัง	30,088,025	ลำต้น	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชนิด	ผลผลิต (ton)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวล เหลือทิ้ง (ton)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
ไม้ยางพารา	3,090,280	กิ่งก้าน	312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628990.82	15.40	9686.46	229.30
		กาบ	464250.95	16.23	7534.79	178.36
		กะลา	128936.58	17.93	2311.83	54.73
รวม	145,853,073		59,539,905.20		504,339.40	11,938.67

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน (2556)

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวล

ในการแสดงคุณลักษณะของเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณ ความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิง ซึ่งแบ่ง ออกได้เป็นแบบพื้นฐานเปียก (Wet Basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (As Received Basis) และแบบพื้นฐาน แห้ง (Dry Basis) จากการอบวัสดุเชื้อเพลิงให้ร้อนในภาชนะปิดภายใต้บรรยากาศของก๊าซควบคุมเพื่อไล่ ความชื้นออกให้หมด (นคร, 2553) ผลการวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งมีข้อสังเกต คือ อัตราส่วนระหว่างสารระเหยต่อคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ประมาณ 2.5-3.5 เท่า สำหรับไม้ และ 2.5-5.2 เท่า สำหรับเศษวัสดุการเกษตร ปริมาณเถ้าในชีวมวลเศษวัสดุการเกษตรมีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวลประเภทไม้ ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะระบุถึงปริมาณธาตุต่าง ๆ ในเชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน การวิเคราะห์ชีวมวลแบบแยกธาตุแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณ (As Received Basis)

ชนิดของเชื้อเพลิง	VM (%)	FC (%)	ASH (%)	HHV (kJ/kg)
ถ่านไม้ลำไย	26.9	56.7	7.75	22,500
ไม้ลำไย	77.8	16.6	2.50	17,800
ซังข้าวโพด	72.2	12.1	2.20	16,300

ตารางที่ 4 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Dry Basis)

ชนิดของเชื้อเพลิง	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
ถ่านไม้ลำไย	79.6	3	13.2	0.29	0
ไม้ลำไย	48.8	5.2	44.6	1.4	0
ซังข้าวโพด	46.2	4.9	43.2	1.2	0.3

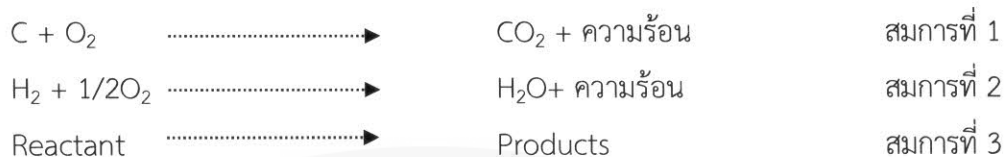
3. กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน

กระบวนการก๊าซซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านไม้ ถ่านหิน แกลบ ชีลื้อย และวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถติดไฟได้ ให้กลายเป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงในถังๆ มีออกซิเจนอยู่อย่างจำกัดซึ่งก๊าซที่ได้มีส่วนประกอบหลักของก๊าซที่ติดไฟได้ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), ไฮโดรเจน (H₂), และมีเทน (CH₄) ดังตารางที่ 5 และพวกสารระเหยต่าง ๆ ซึ่งก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นี้เรียกว่า โปรดิวเซอร์ก๊าซ ค่าความร้อนของก๊าซที่ได้จากกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันจะมีค่าอยู่ในช่วง 4-5 MJ/Nm³ ประสิทธิภาพของการผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซ ขึ้นกับกระบวนการผลิตและคุณภาพของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตเป็นหลัก

เทคโนโลยีการผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซจากเชื้อเพลิงแข็งเป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญสำหรับงานทางด้านอุตสาหกรรมและครัวเรือน พลังงานที่ผลิตขึ้นได้จากโปรดิวเซอร์ก๊าซมีการใช้อย่างแพร่หลายเมื่อ 100 ปีที่ผ่านมาแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งประเทศในยุโรปเป็นแหล่งที่มีถ่านหินที่สามารถผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซได้ และใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว เป็นต้น และในระดับครัวเรือนการผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซสามารถใช้ในการหุงต้มอาหาร ให้ความร้อนแก่บ้านเรือนซึ่งในสมัยที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้ยังสามารถใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้ในการให้แสงสว่างยามค่ำคืนได้อีกด้วยแต่เมื่อมีการนำเอาผลิตภัณฑ์น้ำมันปิโตรเลียมมาใช้อย่างกว้างขวางจึงทำให้ความสำคัญของเชื้อเพลิงชนิดนี้ลดน้อยลงไป ปฏิบัติการเคมีในแต่ละชั้นของเครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซแบ่งเป็นโซนต่าง ๆ 4 โซน คือชั้นการเผาไหม้ ชั้นรีดักชัน ชั้นไพโรไลซิสและชั้นทำให้แห้ง ปฏิบัติการทั้ง 4 ชั้น (ไชยวัฒน์, 2553) สามารถแยกออกจากกันตามผลผลิตจากปฏิกิริยาทางเคมีที่ได้ปริมาณออกซิเจนในแต่ละชั้นที่อุณหภูมิแตกต่างกันรายละเอียดปฏิกิริยาเคมี ในแต่ละชั้นมีดังนี้

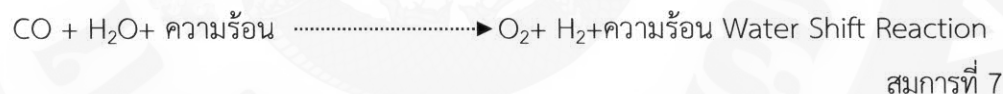
3.1 Combustion Zone

อากาศจะถูกส่งผ่านเข้ามาบริเวณนี้เป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงกับอากาศสัมผัสกันเป็นจุดแรก ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ตามสมการที่ 1 และ 2 อุณหภูมิโซนนี้จะอยู่ในช่วง 1,100–1,500°C



3.2 Reduction Zone

คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่ได้จากชั้นการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นรีดักชันซึ่งในปฏิกิริยาชั้นนี้จะเป็นแบบดูดความร้อนโดยเปลี่ยนก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำบางส่วนให้มาเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่เกิดขึ้นในชั้นการเผาไหม้จะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนคือ ชั้นรีดักชันจะได้คาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ 4 และอุณหภูมิในโซนนี้จะอยู่ในช่วง 500-900 °C



3.3 Distillation Zone หรือ Pyrolysis Zone

ในบริเวณนี้เชื้อเพลิงแข็งจะถูกย่อยสลายด้วยความร้อนที่สูงในที่ไม่มีออกซิเจนอยู่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการดูดความร้อนโดยรับความร้อนจากชั้นรีดักชันเพื่อเปลี่ยนแปลงสารออกแกนิกลงในเชื้อเพลิงให้ได้สารระเหยก๊าซที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ อุณหภูมิในชั้นนี้จะอยู่ในช่วง 200-600 °C ของแข็งที่เหลือในชั้นนี้คือ คาร์บอนที่อยู่ในรูปถ่านซึ่งจะทำปฏิกิริยาในชั้นรีดักชันและการเผาไหม้ในกรณีที่ไม่เป็นเชื้อเพลิงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 9 ในช่วงแรกอุณหภูมิในบริเวณนี้จะเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งสูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้หลังจากนั้นอุณหภูมิลดลงจึงเริ่มสะสมความร้อนอีกครั้งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาครั้งต่อไป



3.4 Drying Zone

กระบวนการนี้พลังงานส่วนหนึ่งจะใช้ในการระเหยความชื้นจากเชื้อเพลิงเมื่อกระบวนการนี้เริ่มขึ้นน้ำหนักของเชื้อเพลิงจะลดลงขนาดและสีของเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนไปโดยมีสีเข้มขึ้น พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการระเหยความชื้นจะใช้โดยประมาณ 1.26 kcal/kg น้ำ หรือ 5.27 kJ/kg น้ำ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ดังสมการที่ 10 และผลผลิตของขั้นนี้คือไอน้ำและสารละลายที่ปนออกมาเล็กน้อย



ตารางที่ 5 ส่วนประกอบก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล

ส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิง	ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น (%)
H ₂	12 – 20
CO	17 – 22
CO ₂	9 – 15
CH ₄	2 – 3
N ₂	50 – 54
Gas calorific value (MJ/Nm ³)	4-5

ที่มา: นคร ทิพย์วงศ์ (2553)

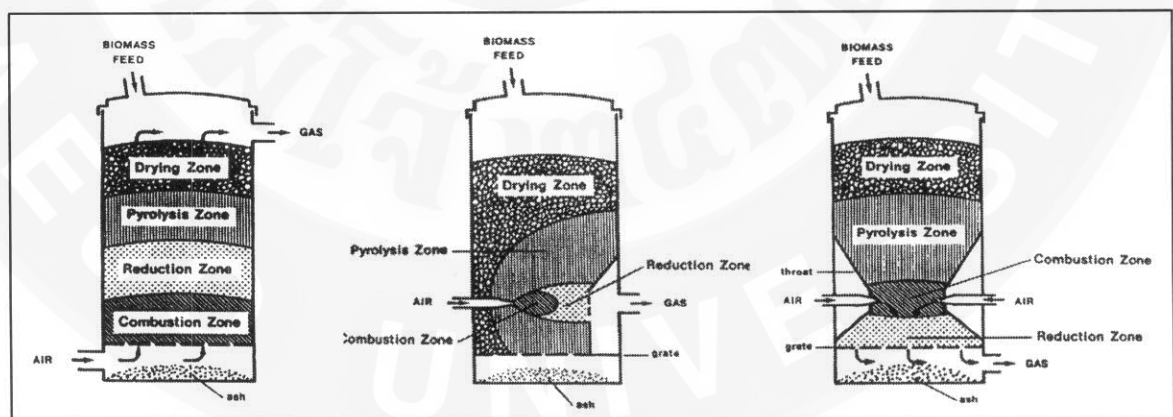
เตาก๊าซซีไฟเออร์แบบฟิกซ์เบด

เครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซแบบฟิกซ์เบดก๊าซซีไฟเออร์ (Fixed Bed Gasifier) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ เครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซแบบไหลขึ้น (Up-draft) เครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซแบบไหลขวาง (Cross-draft) และเครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซแบบไหลลง (Down-draft) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, 2559) โดยคุณลักษณะของเครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซทั้ง 3 ชนิด แสดงไว้ในภาพที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. Up-draft Gasifier ดังภาพที่ 3 (ก) แบ่งโซนเชื้อเพลิงออกเป็น 3 โซน เรียงจากด้านบนลงมา ด้านล่างคือ Distillation Zone, Reduction Zone และ Combustion Zone โดยอากาศจะไหลเข้ามาทางด้านล่างและก๊าซที่ผลิตได้จะไหลออกมาทางด้านบน Gasifier ประเภทนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมมากนัก เพราะว่ามีปัญหาทางเรื่อง Clinker, Tar และต้องมีการเติมน้ำเข้าไปช่วยในการทำปฏิกิริยาที่ Reduction Zone

2. Cross-draft Gasification ดังภาพที่ 3 (ข) ซึ่ง Gasification ประเภทนี้การออกแบบจะง่ายและมีขนาดเล็ก อากาศจะเข้ามาทางด้านหนึ่งและก๊าซที่ผลิตได้จะออกไปในด้านตรงกันข้าม อากาศที่เข้ามาในตอนแรกนั้นจะผ่าน Combustion Zone และ Reduction Zone ตามลำดับเพื่อผลิตก๊าซ โดยที่อากาศเข้ามาจะมีความเร็วและปริมาณสูงมากเพื่อให้การเผาไหม้ที่บริเวณ Combustion Zone เป็นไปอย่างรวดเร็ว บริเวณของ Combustion Zone และ Reduction Zone จะอยู่ตรงกลางของ Gasifier และมีเชื้อเพลิงที่ยังไม่เผาไหม้ล้อมรอบอยู่ ซึ่งจะเป็นการดีเพราะว่าเป็นการป้องกันอุณหภูมิของผนังเตาไม่ให้สูงเกินไป

3. Down-draft Gasifier ดังภาพที่ 3 (ค) แบ่งโซนเชื้อเพลิงออกเป็น 3 โซน เรียงจากด้านบนลงมาด้านล่าง คือ Distillation Zone, Combustion Zone และ Reduction Zone โดยอากาศจะไหลเข้ามาทางด้านบนและก๊าซที่ผลิตได้จะไหลออกมาทางด้านล่าง ซึ่งข้อดีของเครื่องผลิตก๊าซประเภทนี้ คือ บริเวณ Combustion Zone จะไม่ติดกับบริเวณส่วนที่เป็นขี้เถ้า ดังนั้นในกรณีที่อุณหภูมิของ Combustion Zone สูง ๆ จะไม่ทำให้เกิดการละลายและรวมตัวเป็นก้อนของขี้เถ้า (Clinker) และนอกจากนี้ Gasifier ชนิดนี้ยังสามารถนำความชื้นที่ได้จากการอบเชื้อเพลิงที่บริเวณ Distillation Zone มาใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ Reduction Zone ได้ด้วย



Up-draft Gasifier

(ก)

Cross-draft Gasifier

(ข)

Down-draft Gasifier

(ค)

ภาพที่ 3 เครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซแบบ Up-draft, Cross-draft และ Down-draft

5. เตาชีวมวลระบบก๊าซซิฟิเคชัน

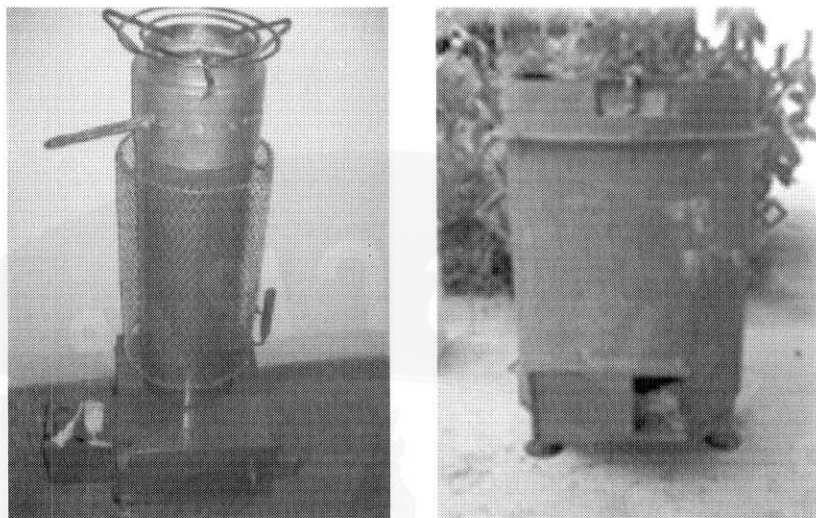
เตาชีวมวลระบบก๊าซซิฟิเคชันเป็นเตาที่ใช้ประกอบอาหารในระดับครัวเรือน โดยเตานี้ใช้หลักการกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันโดยแปรสภาพของเชื้อเพลิงแข็งให้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิง ดังภาพที่ 4 พัฒนาโดยศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ สำหรับเป็นแหล่งความร้อน เตาชนิดนี้เป็นเตาแบบพิกเบดแบบไหลลง (downdraft gasifier) มีส่วนประกอบหลักอยู่ 4 ส่วนคือ ส่วนป้อนเชื้อเพลิง ส่วนห้องเผาไหม้ ส่วนจัดเก็บขี้เถ้า และหัวเตาสำหรับกิจกรรมการประกอบอาหาร เตาชนิดนี้สามารถใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่เป็นของแข็งที่มีขนาด 1-2 inch ได้แก่ เศษไม้ต่าง ๆ ถ่าน ชิงช้าโพเด เป็นต้น โดยการใช้งานของเตาจะเริ่มป้อนเชื้อเพลิงจากทางด้านบนของเตาเพื่อรองเตาก่อน จากนั้นจุดเตาและใส่เชื้อเพลิงทั้งหมดลงในเตาซึ่งประจุเชื้อเพลิงได้ประมาณ 20-25 kg ในระหว่างการจุดเตาจะใช้พัดลมขนาด 100 W ป้อนอากาศเข้าเตาโดยมีอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงประมาณ 25-50% ของอากาศป้อนเข้าในสภาวะเผาไหม้สมบูรณ์ กระบวนการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงจะเกิดขึ้นโดยการทำปฏิกิริยาเป็น 4 โซน เรียงจากด้านบนลงมาด้านล่าง คือโซนอบแห้ง (drying zone) โซนไพโรไลซิส (pyrolysis zone) โซนเผาไหม้ (combustion zone) และโซนรีดักชัน (reduction zone) ก๊าซที่ได้จากเตาจะเป็นก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) มีเทน (CH₄) และไฮโดรเจน (H₂) และไหลออกมาตามท่อและออกที่หัวเตาเมื่อมีการจุดหัวเตาจะเกิดการลุกไหม้ การควบคุมปริมาณก๊าซสามารถควบคุมได้จากวาล์วที่อยู่ด้านล่างของหัวเตา เตาชนิดนี้เติมเชื้อเพลิงได้ต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาในส่วนของคุณค่าความร้อนที่ได้จากก๊าซเชื้อเพลิงจะมีค่าประมาณ 5,000 kJ/m³ (FAO 1986) ซึ่งถ้านำไปใช้ทดแทนก๊าซหุงต้มจะค่อนข้างจะมีปัญหาในเรื่องของคุณค่าความร้อนของก๊าซที่ต่ำกว่าก๊าซหุงต้มประมาณ 7-8 เท่า อย่างไรก็ตามด้วยโหลดความร้อนของการใช้งานในระดับครัวเรือนเตาก๊าซชนิดนี้ก็สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 4 เตาชีวมวลระบบก๊าซซิฟิเคชัน

เตาก๊าซชีวมวล

เตาก๊าซชีวมวลที่มีการใช้งานในระดับครัวเรือนปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือเตาก๊าซชีวมวลแบบไหลลงกลับหัว (วารภรณ์, 2557) และแบบไหลลงร่วมกับการเผาไหม้ตรง ดังภาพที่ 5 ในส่วนของเตาก๊าซชีวมวลแบบไหลลงกลับหัวกระบวนการเผาไหม้จะคล้ายกับเตาก๊าซซีพีเออร์แบบไหลลงแตกต่างกันตรงที่แนวทางการเผาไหม้จะไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่างและมีการเป่าอากาศย้อนจากด้านล่างสู่ด้านบน เตาชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเตาก๊าซชีวมวลกลับ (กิตติกร และคณะ, 2550) ส่วนประกอบหลักของเตาประกอบด้วย หัวเตา ห้องเผาไหม้ ห้องเก็บเชื้อเพลิงและพัดลมป้อนอากาศ การใช้งานโดยทั่วไปมักนิยมใช้เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทกลับเป็นหลัก อย่างไรก็ตามเตาก๊าซชีวมวลประเภทซีเออร์ เศษไม้และถ่านยังสามารถใช้ได้กับเตาชนิดนี้ การทำงานของเตาจะเริ่มจากการป้อนเชื้อเพลิงลงสู่ห้องเผาไหม้จนเต็ม ซึ่งจะใช้กลับประมาณ 1.5 kg จากนั้นจะต้องจุดไฟเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจากด้านบนของเตา เมื่อเชื้อเพลิงเริ่มลุกไหม้แล้วให้เปิดสวิทช์พัดลม ให้พัดลมทำงานป้อนอากาศเข้าสู่เตาจากด้านล่างขึ้นไปข้างบน เมื่อเตาลุกไหม้เป็นระยะทาง 2 cm ให้ครอบหัวเตา จากนั้นจุดไฟที่หัวเตาก๊าซซ้ำอีกครั้งหนึ่งเตาจะเกิดการลุกไหม้อย่างต่อเนื่อง การปรับความเร็วรอบของพัดลมส่งผลให้อัตราความสิ้นเปลืองชีวมวลเพิ่มขึ้น กระบวนการเผาไหม้ของเตาก๊าซชีวมวลชนิดนี้จะเป็นไปตามกระบวนการก๊าซซีพีเคชั่น คือมีโซนในการทำปฏิกิริยาทั้งหมด 4 โซน คือโซนแรกคือ โซนอบแห้งโซนนี้อยู่ด้านล่างของของการเผาไหม้เสมอ ถัดมาเป็นโซนกลั่นสลาย โซนนี้ชีวมวลบางส่วนจะถูกให้ความร้อนและสารระเหยบางส่วนจะถูกขับออกจากชีวมวล โซนที่สามเป็นโซนการเผาไหม้โซนนี้อากาศจะเผาไหม้กับเชื้อเพลิงในสถานะจำกัดออกซิเจน ผลผลิตของโซนนี้ได้แก่ออกไซด์คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โซนที่สี่เป็นโซนรีดักชั่น ซึ่งโซนนี้จะทำหน้าที่ในการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่สามารถเผาไหม้ได้คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน ส่วนเตาก๊าซชีวมวลแบบไหลลงร่วมกับการเผาไหม้ตรง เตาชนิดนี้บางครั้งเรียกว่าเตาก๊าซชีวมวลแบบใช้ฟืน เตาชนิดนี้ออกแบบเตาเป็นสามชั้นประกอบด้วย ห้องเผาไหม้ด้านบน เตาส่วนเป็นช่องทางเดินก๊าซเชื้อเพลิงและผนังเตา การเผาไหม้ของเตาก๊าซชีวมวลจะมีการควบคุมปริมาณอากาศที่ป้อน พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ชีวมวลจะไหลขึ้นสู่ด้านบน ก๊าซบางส่วนที่เผาไหม้จากสถานะจำกัดอากาศจะไหลย้อนลงสู่ด้านล่างและลอดผ่านช่องทางเดินก๊าซเชื้อเพลิงไหลออกตรงปากของห้องเผาไหม้ที่เจาะรูให้ก๊าซเชื้อเพลิงออก เมื่อก๊าซเชื้อเพลิงไหลออกและได้รับความร้อนจะเกิดการลุกไหม้บริเวณปากห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นการเผาไหม้เป็นครั้งที่สองทำให้การเผาไหม้ของชีวมวลมีการเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น



ภาพที่ 5 เตาแก๊สชีวมวลแบบใช้กลบและใช้ฟืน

ที่มา: Belonio (2005) ; ญัฐวุฒิ และคณะ (2551)

6. สมการพื้นฐานการออกแบบเตาแก๊สชีวมวล

6.1 ความต้องการพลังงานในการต้มน้ำ

การคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำร้อนสามารถคำนวณได้สมการดังนี้

$$Q_b = \frac{m_w \times ES}{t} \quad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อ	Q_b	คือ	ความต้องการพลังงานในการต้มน้ำ (kJ)
	m_w	คือ	มวลของน้ำสำหรับในการต้มน้ำ (kg)
	ES	คือ	อัตราพลังงานจำเพาะของน้ำ (kJ/kg)
	t	คือ	เวลาในการต้มน้ำ (s)

6.2 พลังงานที่ป้อนเข้าจะมีค่าเท่ากับ (FCR)

คือ อัตราส่วนของพลังงานที่ต้องการเผาไหม้ในเตามีอัตราส่วนของสมการ

$$FCR = Q_n \eta_{\text{stove}}$$

สมการที่ 12

เมื่อ	FCR	คือ	อัตราส่วนความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)
	Q_n	คือ	ความต้องการพลังงานในการต้มน้ำ (kJ)
	η_{stove}	คือ	ประสิทธิภาพความร้อนของเตา

6.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้หาได้ดังต่อไปนี้

$$D = \left(\frac{1.27 \text{ FCR}}{\text{SGR}} \right)^{0.5} \quad \text{สมการที่ 13}$$

เมื่อ	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (m)
	FCR	คือ	อัตราส่วนความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)
	SGR	คือ	อัตราการเกิดก๊าซซิฟิเคชันจำเพาะของชีวมวล (kg/m ² -h)

6.4 ความสูงของห้องเผาไหม้

$$H = \frac{\text{SGR} \times t}{\text{Pr} h} \quad \text{สมการที่ 14}$$

เมื่อ	H	คือ	ความสูงของห้องเผาไหม้ (m)
	SGR	คือ	อัตราการเกิด gasification ของชีวมวล (kg/m ² -h)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ (h)
	Prh	คือ	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m ³)

6.5 เวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ

$$t = \frac{\text{Pr} h \times V_r}{\text{FCR}} \quad \text{สมการที่ 15}$$

เมื่อ	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ (h)
	V_r	คือ	ปริมาตรของห้องเผาไหม้ (m ³)
	Prh	คือ	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m ³)
	FCR	คือ	อัตราส่วนความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)

7. การประเมินกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน

7.1 การประเมินระยะเวลาการทำงานของเตาชีวมวล

เวลาการทำงานร่วมกับเตาชีวมวลคือผลรวมของเวลาเริ่มในการจุดเตากับเวลาในการใช้งานเตาชีวมวล ผลรวมของเวลาการทำงานร่วมกับเตาชีวมวลหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ (นิมิต, 2553)

$$t_{TOT} = t_S + t_O$$

สมการที่ 16

เมื่อ	t_{TOT}	คือ	เวลาการทำงานรวมของเตาชีวมวล (min)
	t_S	คือ	เวลาเริ่มต้นการจุดเตาชีวมวล (min)
	t_O	คือ	เวลาในการใช้งานของเตาชีวมวล (min)

7.2 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวล

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลคืออัตราส่วนของน้ำหนักเชื้อเพลิงต่อเวลาหาได้จากสมการดังนี้ (นิมิต, 2553)

$$FCR = \frac{W_{Fuel}}{t_o}$$

สมการที่ 17

เมื่อ	FCR	คือ	อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/min)
	W_{Fuel}	คือ	น้ำหนักของชีวมวล (kg)

7.3 อัตราก๊าซซิฟิเคชันจำเพาะ

อัตราก๊าซซิฟิเคชันจำเพาะหรืออัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะหาได้จากสมการ

$$SCR = \frac{W_{Fuel}}{A_r \times t_o}$$

สมการที่ 18

เมื่อ	A_r	คือ	พื้นที่ตัดของห้องเผาไหม้ทรงกระบอก (m^2)
-------	-------	-----	---

7.4 อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง

อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิง คือ อัตราส่วนความยาวของห้องเผาไหม้ต่อเวลาใช้งานมีสมการดังนี้

$$CZR = \frac{L_r}{t_o}$$

สมการที่ 19

เมื่อ L_r คือ ความยาวของห้องเผาไหม้ (m)

7.5 การประเมินประสิทธิภาพความร้อน

การทดสอบประสิทธิภาพเตาชีวมวลจะใช้วิธีการทดสอบโดยการต้มน้ำ (Boiling test) จากพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำต่อพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

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

สมการที่ 20

เมื่อ η_{th} คือ ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวล (%)

Q_U คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kJ)

Q_{Fuel} คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (kJ)

ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์หาได้ความร้อนที่ใช้ในการอุ่นและระเหยน้ำ (ปรัชญา, 2555)

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

สมการที่ 21

เมื่อ m_{w1} คือ มวลน้ำเริ่มต้น (kg)

m_{w2} คือ มวลน้ำระเหย (kg)

C_{pw} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.186 (kJ/kg °C)

h_{fg} คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ 2,257 (kJ/kg)

ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงหาได้ตามสมการ

$$Q_{Fuel} = m_{Fuel} \times LHV_{Fuel} \quad \text{สมการที่ 22}$$

เมื่อ m_{Fuel} คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg)
 LHV_{Fuel} คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

7.6 การประเมินประสิทธิภาพระบบก๊าซซิฟิเคชัน

ประสิทธิภาพเครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซคืออัตราส่วนของปริมาณโปรดิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้เทียบกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใส่ในเครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซ ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้ (สุริน, 2557)

$$\eta_{gasifier} = \frac{Hv_g \times Q_g}{Hv_{Fuel} \times M_s} \times 100 \quad \text{สมการที่ 23}$$

เมื่อ $\eta_{gasifier}$ คือ ประสิทธิภาพเครื่องผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซ (%)
 Hv_g คือ ค่าความร้อนโปรดิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้ (kJ/m³)
 Q_g คือ อัตราการไหลเชิงโปรดิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้ (m³/s)
 Hv_{Fuel} คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงที่ใส่ (kJ/kg)
 M_s คือ อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใส่ (kg/s)

โดยที่ค่า Hv_g คือค่าความร้อนโปรดิวเซอร์ก๊าซที่ผลิตได้ สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Hv_g = \frac{12680V_{CO} + 10800V_{H_2} + 35900V_{CH_4}}{1 + 2.38V_{CO} + 238V_{H_2} + 9.52V_{CH_4}} \quad \text{สมการที่ 24}$$

เมื่อ V_{CO} คือ ปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยปริมาตร
 V_{H_2} คือ ปริมาตรของก๊าซไฮโดรเจนโดยปริมาตร
 V_{CH_4} คือ ปริมาตรของก๊าซมีเทนโดยปริมาตร

8. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ทางพลังงาน

8.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

คือผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลการประหยัดต้นทุนพลังงานจากมาตรการในรูปตัวเงินที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละปีตลอดอายุของโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไปภายใต้โครงการที่กำลังพิจารณา ณ อัตราลดค่า (discount rate) หรือค่าของทุน (cost of capital) ที่กำหนดจากค่านิยมข้างต้น การคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ หาได้ดังนี้

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_T}{(I+i)^T} - IO \quad \text{สมการที่ 25}$$

เมื่อ	n	คือ	อายุของโครงการ (year)
	ES_T	คือ	ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (energy cost savings) รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n
	IO	คือ	เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (total investment)
	I	คือ	อัตราลดค่า (discount rate)

8.2 วิเคราะห์ผลภายใน (Internal Rate of Return: IRR)

หมายถึงอัตราลดค่า (discount rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะต้องจ่ายในการลงทุนเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินการประหยัดพลังงาน ตลอดอายุโครงการจากค่านิยมข้างต้นการคำนวณหาอัตราผลตอบแทนลดค่าจะต้องทราบข้อมูลดังนี้

$$-IO + \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(I+IRR)^t} = 0 \quad \text{สมการที่ 26}$$

เมื่อ	n	คือ	อายุของโครงการ (year)
	ES_t	คือ	ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (energy cost savings) รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n
	IO	คือ	เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (total investment)
	IRR	คือ	อัตราผลตอบแทนภายใน (internal rate of return)

8.3 ระยะเวลาคืนทุน (Pay Back Period: PB)

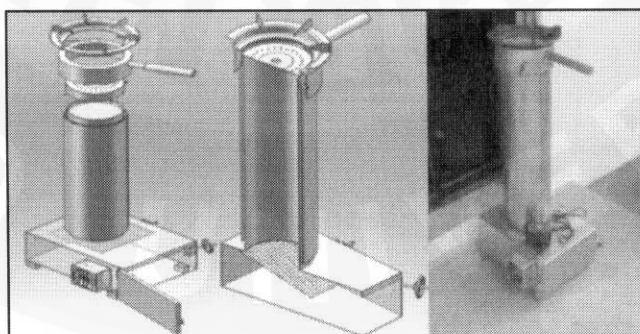
คือระยะเวลา (เป็นจำนวนปี/เดือนหรือวัน) ที่กระแสเงินสดรับจากโครงการสามารถชดเชยกระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิตอนเริ่มโครงการพอดีเนื่องจากโครงการที่ขอรับการสนับสนุนจะมีลักษณะการลงทุนเพียงครั้งเดียวในปีแรกและให้ผลตอบแทนที่เท่ากันทุกปีการหาค่า PB สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

$$\text{Pay Back Period} = \frac{\text{Total Investment (Baht)}}{\text{Energy Cost Saving (Baht / y)}} \quad \text{สมการที่ 27}$$

การตรวจเอกสาร

ผลจากการค้นคว้าเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาออกแบบสร้าง การใช้งานและการประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลมีดังต่อไปนี้

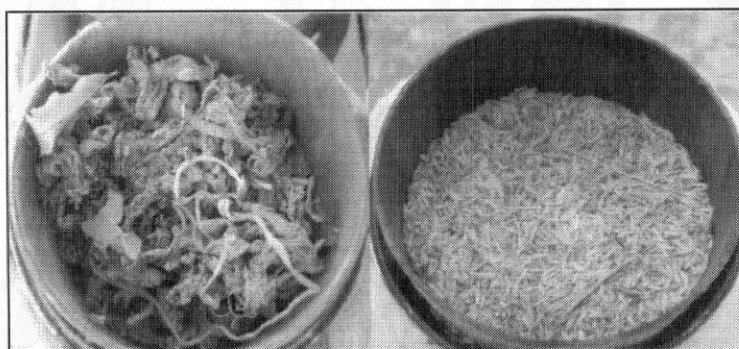
ณัฐวุฒิ และคณะ (2551) ได้ศึกษาและทดสอบเตาชีวมวลแบบใช้แก๊สหรือที่เรียกว่า Inverted downdraft gasifier ที่ใช้ห้องเผาไหม้แบบทรงกระบอกสูง 60 cm ดังภาพที่ 6 โดยพบว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 46.12, 55.31 และ 67.37% ของค่าในทางทฤษฎี อุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ 619, 652 และ 703 °C ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล มีค่าเท่ากับ 19.17, 17.31 และ 16.46% เตาชีวมวลมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 3.6, 4.7 และ 4.9 kg/h และมีอัตราการเกิดกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันจำเพาะ (SGR) เท่ากับ 76.19, 99.91 และ 102.85 kg/m² h ตามลำดับ และเมื่อชุมชนนำเอาเตาก๊าซชีวมวลไปใช้งานในระดับครัวเรือนในกิจกรรมประกอบอาหารสามารถประหยัดเงินค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงได้ 2,160 Baht/y โดยมีจุดคุ้มทุน 1.4 year



ภาพที่ 6 เตาก๊าซชีวมวลใช้วัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง

ที่มา: ณัฐวุฒิ และคณะ (2551)

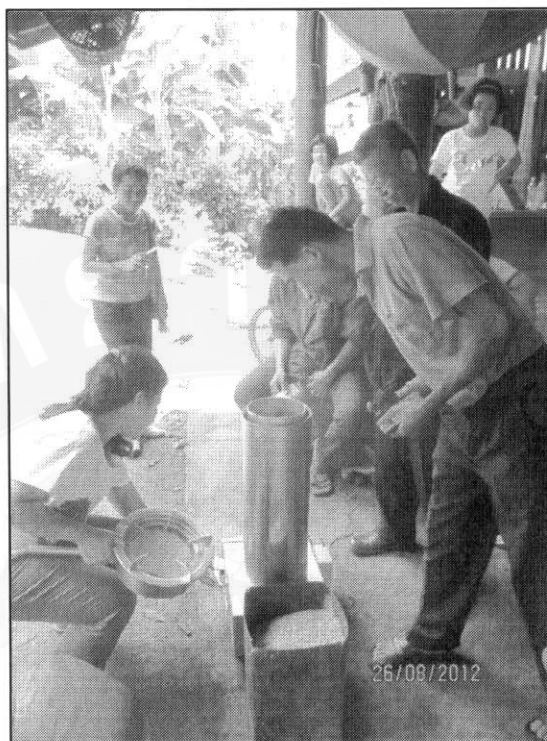
ฐิติกร และคณะ (2551) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีววมวลจากเตาชีววมวลแบบไหลขึ้นโดยใช้เศษผักและแกลบเป็นเชื้อเพลิง เตาก๊าซมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 cm สูง 60 cm บรรจุเศษผักได้ 0.9 kg และแกลบ 1.2 kg ดังภาพที่ 7 โดยมีการศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีววมวลและค่าความร้อน การทดสอบแบ่งอัตราการไหลอากาศเป็น 3 ระดับ คือ 2.65 m³/h, 7.42 m³/h, 8.76 m³/h ผลการทดสอบพบว่าค่าความร้อนของแกลบสูงกว่าเศษผักมีค่า 14.4 MJ/kg และ 12.39 MJ/kg ตามลำดับ ที่ความชื้น 1.38-2.24% ผลการศึกษาพบว่าการใช้เศษผักและแกลบเป็นเชื้อเพลิงมีสัดส่วนของก๊าซ CO และ CH₄ สูงสุดเท่ากับ 15.64%, 0.29% และ 16.34, 1.14% ตามลำดับ มีค่าความร้อนก๊าซเท่ากับ 1.911 kJ/Nm³ และ 2305.4 kJ/Nm³ ที่อัตราการไหล 7.42 m³/h และพบว่าเศษผักเป็นเชื้อเพลิงอีกทางเลือกหนึ่งของการใช้ชีววมวล



ภาพที่ 7 เตาชีววมวลแบบไหลขึ้นโดยใช้เศษผักและแกลบเป็นเชื้อเพลิง

ที่มา : ฐิติกร และคณะ (2552)

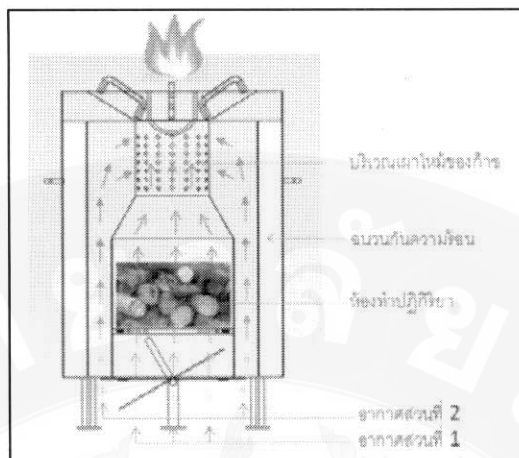
มูลนิธิพลังงานและสิ่งแวดล้อม (มพส) (2554) ได้นำเอาเตาก๊าซชีววมวลแบบใช้แกลบจากมหาวิทยาลัยแม่โจ้มาส่งเสริมการใช้งานให้กับชุมชนในพื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน ดังภาพที่ 8 เตาชีววมวลแกลบที่ใช้เป็นแบบเติมเชื้อเพลิงได้ 1.5 kg/ครั้ง ใช้งานได้อยู่ในช่วงเวลา 30-45 นาที มีพัดลมไฟฟ้า กระแสตรงเป่าอากาศขนาด 12V/1.5A เป่าอากาศเข้าเตาก๊าซชีววมวลช่วยประหยัดฟืนและก๊าซหุงต้มได้ประมาณ 20-30% หรือเทียบเท่าการใช้ฟืนครัวเรือนละ 30-40 kg/ปี และที่สำคัญยังสามารถช่วยลดปัญหาหมอกควันจากการเผาแกลบ มีประสิทธิภาพความร้อน 14% (จิตรภรณ์, 2556)



ภาพที่ 8 การนำเอาเตาชีวมวลแบบใช้แก๊บส่งเสริมให้กับ
ชาวบ้านในพื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน

ที่มา : มูลนิธิพลังงานและสิ่งแวดล้อม (2554)

สมมาส และคณะ (2556) ได้ทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW ดังภาพที่ 9 ที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับการใช้เตาก๊าซแบบใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง เตาก๊าซหุงต้มที่ใช้ทดสอบเป็นแบบชนิดหัวแรงประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และประสิทธิภาพสูง (SG5) ทดสอบโดยวิธีการต้มน้ำที่ 15 kg เวลา 100 นาที โดยพบว่าการใช้เตาชีวมวลให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำกว่าการใช้เตาก๊าซหุงต้ม ชนิดหัวแรงประสิทธิภาพต่ำและสูงประมาณ 67% และ 60% แต่ว่าต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลกลับถูกกว่า 76-80% ดังนั้นการใช้เตาชีวมวลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของชุมชนในการลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเทียบกับใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล



ภาพที่ 9 ไดอะแกรมการทำงานของเตาชีวมวลขนาด 20 kW

ที่มา : สมมาส และคณะ (2556)

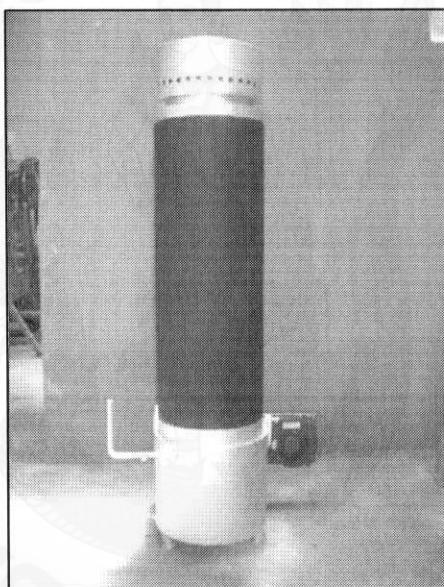
สัมพันธ์ และคณะ (2556) ได้ศึกษาสมรรถนะของเตาก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้น ที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัส เป็นเชื้อเพลิง เตาชีวมวลแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือตัวถังและไส้ ตัวถังมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 cm และสูง 65 cm มีอากาศที่ใช้เป่าเข้าเตาที่ช่อง Primary air และมีอากาศที่ใช้ผสมกับก๊าซเชื้อเพลิง Secondary air ผลศึกษาพบว่าเตาก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้นมีประสิทธิภาพความร้อน 78.6% มีความสามารถนำไปใช้กับห้องถนอมขนบได้เป็นอย่างดี

วรารักษ์ ทุมชชาติ (2557) ได้ศึกษาสมรรถนะการใช้งานเตาก๊าซชีวมวลแบบ Invert downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ลักษณะการทำงานเป็นแบบกะ ใช้พัดลมเป่าอากาศ หัวเตาก๊าซเป็นแบบหัวเดี่ยว และนำไปทดสอบกับการใช้งานในชุมชนจังหวัดลำปาง โดยมีการศึกษาความเร็วลม 4 ระดับ คือ 4.89, 7.41, 9.41 และ 10.21 m/s โดยใช้การปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลการศึกษาพบว่าก๊าซที่ได้จากเตาชีวมวลมีอุณหภูมิและเปลวไฟใกล้เคียงกับก๊าซหุงต้มแบบใช้ก๊าซหุงต้ม โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของพัดลม ระยะเวลาที่น้ำเดือดเกิดขึ้นที่ 60, 14, 12, 8 min น้ำเดือดที่อุณหภูมิ 97 °C และรักษาอุณหภูมิของน้ำเดือดได้ 6, 20, 20, 23 min มีการใช้กำลังไฟฟ้า 9-25 W มีอัตราการคืนทุนเฉลี่ย 2 year

Belonio (2005) ได้ศึกษาออกแบบสร้างและทดสอบเตาชีวมวลแบบ Inverted down draft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เตาที่ออกแบบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 cm ความยาวห้องเผาไหม้ 65 cm ส่วนประกอบหลักของเตาก๊าซชีวมวลประกอบด้วย หัวเตา ห้องเผาไหม้ ห้องเก็บขี้เถ้าและชุดป้อนอากาศเดิมเชื้อเพลิงได้ 1 ครั้งต่อการใช้งาน จากการทดสอบการต้มน้ำพบว่าเตาก๊าซชีวมวลมีประสิทธิภาพความ

ร้อนเฉลี่ย 13.3% มีระยะเวลาเริ่มต้น 1.64 min ระยะเวลาใช้งานเฉลี่ย 50 min และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย 1.59 kg/h

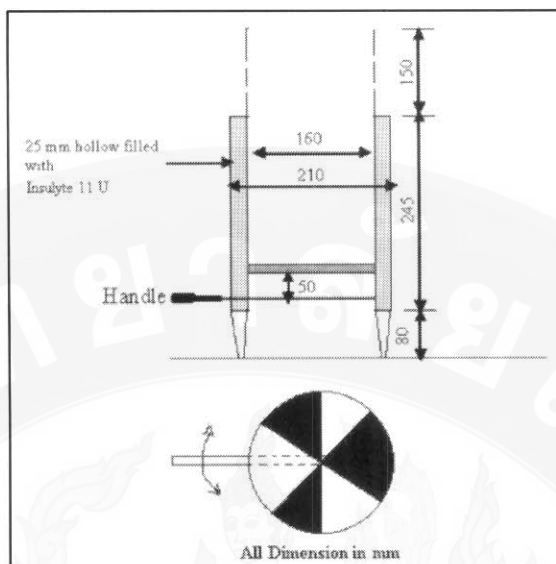
Pitaksa et al. (2006) ได้ศึกษาและทดสอบสมรรถนะการทำงานของเตาก๊าซชีววมวลแบบ Invert downdraft ดังภาพที่ 10 โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับเตาก๊าซหุงต้มที่ใช้ก๊าซหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพความร้อนเตาสูงสุดเท่ากับ 21.77% เวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นสตาร์ทเตา 2 min อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแกลบมีค่าเฉลี่ย 2.26 kg/h ระยะเวลาของน้ำเริ่มเดือดในการต้ม 2 kg เท่ากับ 8 min ลักษณะการเผาไหม้และลักษณะของเปลวไฟมีความคล้ายคลึงกับก๊าซหุงต้ม และมีระยะเวลาลงทุน 5.12 month สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย 7,030.44 Baht/y



ภาพที่ 10 เตาก๊าซชีววมวลแบบ Invert downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง

ที่มา : Pitaksa et al. (2006)

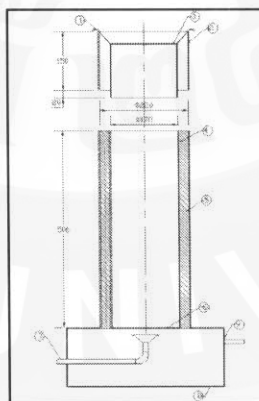
Panwar et al. (2008) ได้ออกแบบเตาชีววมวลขนาด 5 kW ดังภาพที่ 11 สำหรับการประกอบอาหาร โดยใช้วิธีการดูดอากาศธรรมชาติและสามารถใช้เชื้อเพลิงได้แบบหลากหลาย ผลการทดสอบพบว่าเตาชีววมวลมีประสิทธิภาพความร้อน 26.5% สามารถใช้งานได้ง่าย มีมลพิษต่ำ เปลวไฟที่ออกมาคล้ายกับเปลวไฟของก๊าซหุงต้ม มีอุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ย 736 °C



ภาพที่ 11 ไคอะแกรมของเตาชีวมวลขนาด 5 kW

ที่มา : Panwar et al. (2008)

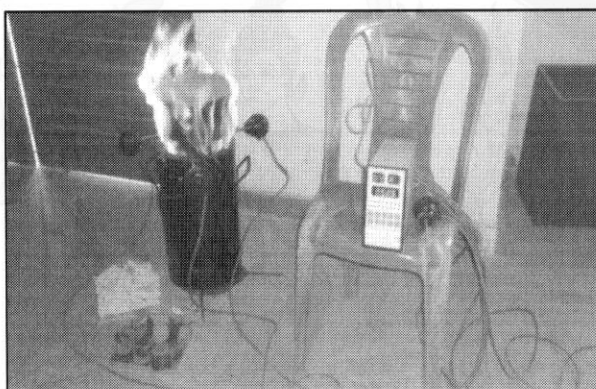
Ojolo et al. (2012) ได้ศึกษาออกแบบและทดสอบเตาชีวมวลแบบ Inverted down Draft ดังภาพที่ 12 โดยใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในชุมชนประเทศไนจีเรีย ผลศึกษาพบว่า เตาที่ออกแบบสร้างสามารถนำไปใช้ในชุมชนได้มีระยะเวลาในการจุดติดไฟ ประมาณ 6 min และระยะเวลาการใช้งาน 23 min อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.86 kg/h มีประสิทธิภาพจากการต้มน้ำให้เดือด 10.6% และต้นทุนในการผลิตอยู่ที่ 70 ดอลลาร์สหรัฐ



ภาพที่ 12 ไคอะแกรมออกแบบเตาชีวมวลแบบ Inverted down draft

ที่มา : Ojolo et al. (2012)

Vyas et al. (2014) ได้ออกแบบและพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลแบบ Inverted down Draft ดังภาพที่ 13 สำหรับการประกอบอาหาร ส่วนประกอบของเตาชีวมวลประกอบด้วยห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมอากาศ ช่องอากาศเข้า ตระแกรง ช่องอากาศผสม ผนังเตาด้านนอก และใช้ซังข้าวโพดและขี้เลื่อยอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง ทดสอบหาประสิทธิภาพเตาจากการต้มน้ำ ปริมาตรห้องเผาไหม้ 0.0109 m^3 เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.178 m และความสูงของห้องเผาไหม้ 0.441 m ผลการทดสอบประสิทธิภาพเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพดมีประสิทธิภาพเฉลี่ย 29.59-33.89% ขณะเดียวกันเมื่อใช้ขี้เลื่อยอัดแท่งมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 38.68-40.53%



ภาพที่ 13 การทดสอบประสิทธิภาพเตาชีวมวลแบบ Inverted down draft

ที่มา : Vyas et al. (2014)

ชนธกานต์ และคณะ (2556) ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสามารถใช้งานกับเชื้อเพลิงได้หลากหลายขนาด และลดต้นทุนการผลิต โดยทำการออกแบบและพัฒนาหาขนาดอัตราส่วนห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม ทดสอบวัสดุฉนวน และออกแบบเตาแก๊สชีวมวลที่สามารถใช้งานกับเชื้อเพลิงขนาดยาว ผลการทดสอบด้วยการต้มน้ำพบว่าเตาแก๊สชีวมวลอัตราส่วนห้องเผาไหม้หลักกับห้องเผาไหม้ข้างขนาดที่เหมาะสมที่สุดคืออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.17 อัตราความสูง 1.67 โดยใช้ปูนซีเมนต์กรุห้องเผาไหม้ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 36.58%

Ashrafi et al. (2015) ได้ศึกษาถึงแนวทางในการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้และการใช้ปีมความร้อนที่เหมาะสมกับการใช้งานในโรงฆ่าสัตว์ ซึ่งเป็นการนำมาใช้ในกระบวนการผลิตและการทำความสะอาด ความร้อนทิ้งที่ถูกนำกลับมาใช้นั้นได้จากหลากหลายกระบวนการภายในโรงฆ่าสัตว์ รวมไปถึงความร้อนทิ้งจากหม้อไอน้ำ ระบบผลิตน้ำร้อน การกำจัดขน ระบบทำความเย็น และระบบทำความร้อนในโรงงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำ INTEGRATION software และหลาย ๆ โครงการ

มาพัฒนาและปรับปรุงเพื่อให้สามารถนำมาใช้ร่วมกับระบบการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ โดยจะมีการติดตั้งตัวเพิ่มประสิทธิภาพหม้อไอน้ำ เพื่อนำความร้อนทิ้งจากกระบวนการต่าง ๆ กลับมาให้ความร้อนกับหม้อไอน้ำอีกครั้ง มีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมในการนำความร้อนทิ้งจากระบบทำความเย็นมาใช้ ในกระบวนการทำน้ำร้อนเพื่อกระบวนการผลิต การนำความร้อนจากทิ้งกลับมาใช้ได้ถึง 50% ถือว่ามีประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้สูงสุด ซึ่งจะเห็นว่าสามารถลดค่าใช้จ่ายในการผลิตความร้อนลงได้ นอกจากนี้ยังมีการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซหุงต้มที่ใช้ในกระบวนการผลิตน้ำร้อน โดยจะนำความร้อนทิ้งจากก๊าซหุงต้มนี้ไปใช้ร่วมกับความร้อนทิ้งจากระบบทำความเย็น จากการทำงานร่วมกันทั้งสองระบบทำให้สามารถทำน้ำร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิ 56-87 °C ซึ่งจะทำให้ลดการใช้พลังงานในช่วงของกระบวนการกำจัดขน หลังจากนั้นจะมีความร้อนเหลือทิ้งมากพอที่จะนำไปใช้ในการผลิตน้ำร้อนนำไปใช้ในกระบวนการทำความสะอาดได้อีก

จากการศึกษาและรวบรวมเอกสารเกี่ยวกับการใช้ออกแบบ ใช้งานเตาชีวมวลสรุปได้ว่าส่วนใหญ่พบว่าจะมีการพัฒนาในระดับครัวเรือน โดยมีขนาดอยู่ในช่วง 5-10 kW ดังถ้าต้องการให้กลุ่มงานวิสาหกิจชุมชนหรืออุตสาหกรรมในครัวเรือนได้มีการใช้ชีวมวลอย่างจริงจังควรจะต้องมีการออกแบบเตาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถรับโหลดหรือภาระได้สูง โดยสามารถใช้งานและให้ความร้อนเพียงพอต่อความต้องการวิสาหกิจชุมชนหรือชุมชนได้ ในเบื้องต้นทางวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ได้พัฒนาเตาก๊าซชีวมวลสำหรับการใช้ต้มเกลือจากบ่อเกลือสินเธาว์ บ้านบ่อหลวง อำเภอบ่อเกลือ จังหวัดน่าน ผลที่ได้เตาดังนี้สามารถให้ความร้อนได้สูงถึง 15-20 kW และใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงให้กับการต้มเกลือของชุมชนได้ดีพอสมควร ดังภาพที่ 14 แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากเตาดังนี้เป็นเตาตัวแรกของการพัฒนา ความไม่สมบูรณ์ของเตาชีวมวลมีอีกหลายประการที่ต้องการวิจัยและปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานในระดับชุมชน ประกอบด้วยการออกแบบพัฒนาห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม ระบบการป้อนเชื้อเพลิง การควบคุมปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิง การสูญเสียความร้อน รูปแบบความเหมาะสมสำหรับการใช้งานและประสิทธิภาพของเตาชีวมวล โดยศึกษาเปรียบเทียบกับเตาชีวมวลของชุมชนที่มีการใช้งานอยู่ คือเตาก๊าซหุงต้มและเตาชีวมวลแบบดั้งเดิม ซึ่งเป็นที่มาของความจำเป็นในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้



ภาพที่ 14 การทดสอบเตาก๊าซชีววมวลสำหรับการต้มเกลือ
จากบ่อเกลือสินเธาว์ จังหวัดน่าน

ที่มา : ธีรัฐติ และคณะ (2559)

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลไร้ควัน สำหรับการผลิตความร้อนมาใช้ในงานของวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ ซึ่งได้มีการพัฒนาจากเตาชีวมวลแบบดั้งเดิม เตาแบบเดิมมีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลได้เพียงชนิดเดียวคือ ชังข้าวโพด ส่งผลให้ระยะเวลาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงสั้น และไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ จึงมีการพัฒนาเตาชีวมวลไร้ควันที่สามารถใช้กับเชื้อเพลิงชีวมวลได้หลากหลายชนิด ทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้นั้นมีระยะเวลาที่ยาวนานกว่า และควบคุมอัตราการไหลของอากาศได้ ซึ่งเตาชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm ห้องเผาไหม้สูง 60 cm เมื่อได้มีการออกแบบและพัฒนาเตาแล้ว จะทำการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวล ได้ดังนี้

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เตาชีวมวลแบบดั้งเดิม

เตาชีวมวลแบบดั้งเดิมเป็นเตาชีวมวลที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับชีวมวลประเภทชังข้าวโพดเพียงชนิดเดียว เตาชีวมวลที่ออกแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 cm ห้องเผาไหม้สูง 50 cm ด้านล่างห้องเผาไหม้มีตะแกรงรองรับขี้เถ้าด้านล่างของตะแกรงใช้พัดลมขนาด 2 inch 220 V กำลังไฟฟ้า 93 W ไม่สามารถปรับอัตราการป้อนอากาศของเตาได้ เตาชีวมวลแบบดั้งเดิมดังภาพที่ 15



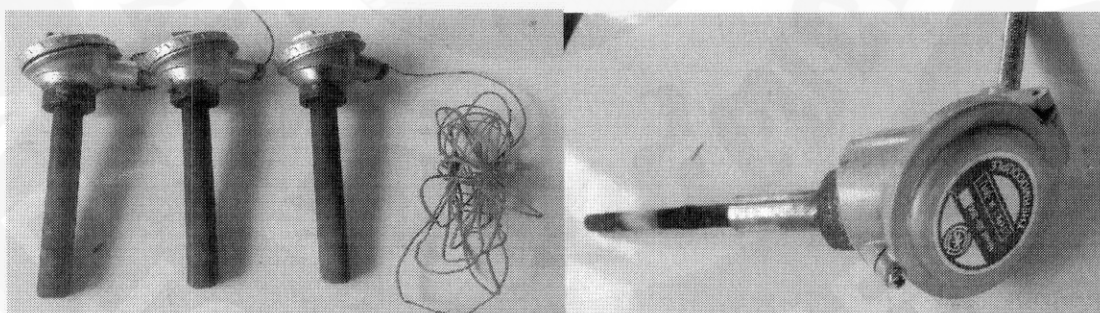
ภาพที่ 15 เตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

2. เตาชีวมวลแบบไร้ควัน

เตาชีวมวลที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นจากเตาชีวมวลแบบดั้งเดิม โดยเตาที่ออกแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm ห้องเผาไหม้สูง 60 cm ปรับอัตราการป้อนอากาศ สามารถใช้กับชีวมวลได้หลายประเภทและหลายขนาด ด้านล่างของเตาชีวมวลไร้ควันเป็นห้องกระจายลมและเก็บขี้เถ้าของเตา พัดลมสามารถป้อนและปรับอัตราการไหลของอากาศได้ เป็นพัดลมขนาด 2 inch มีอินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบการหมุนของพัดลม ใช้ไฟ 1 phase ขนาดกำลังพัดลม 373 W สามารถป้อนอัตราการไหลของอากาศได้ 7.5-275 m³/h ผนังเตาใช้เหล็กแผ่นขนาด 3 mm ม้วนขึ้นทรงกระบอก หัวเตาส่งเป็นรูปกรวยเจาะเป็นรูขนาด 5 mm

3. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิในการทดสอบสมรรถนะของเตาแบบดั้งเดิม แบบไร้ควัน และแบบหุ้มฉนวน จะใช้เทอร์โมคัปเปิล แบบ Type K ชนิดทนความร้อนได้สูงสุด 800 °C ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล (Datalogger) รุ่น tm-947 sd มีช่องบันทึกสูงสุด 4 ช่อง มีการเก็บข้อมูลทุก 5 min การวัดอุณหภูมิของผนังเตาชีวมวล จะใช้เทอร์โมคัปเปิล แบบ Type R จะวัดบริเวณ ส่วนหัว ส่วนกลาง และส่วนล่าง ของเตา และการวัดอุณหภูมิภายในเตา จะใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวของวัตถุแบบไม่สัมผัสกับวัตถุเป็นผลิตภัณฑ์ของ CEM รุ่น DT-8828 สามารถวัดอุณหภูมิพื้นผิวอยู่ในช่วง 50-1,000 °C ค่าความละเอียด 0.1 °C แสดงดังภาพที่ 16

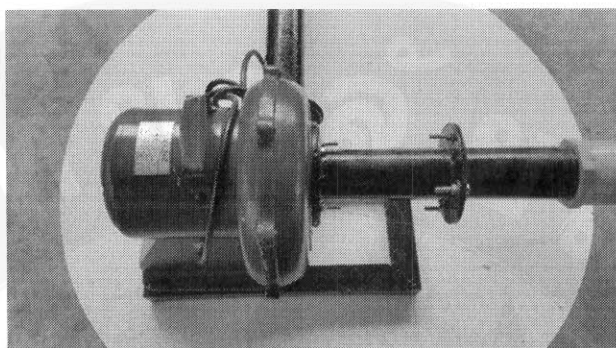


ภาพที่ 16 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

4. เครื่องวัดอัตราการป้อนอากาศ

การวัดอัตราการป้อนอากาศเข้าเตาชีวมวลไร้ควันใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัดของ Lutrom Electronic รุ่น YK-80 AM แบบใบพัดโลหะสามารถวัดความเร็วของก๊าซอยู่ในช่วง 0.4-35 m/s ความละเอียด 0.1 m/s ค่าความคาดเคลื่อน $\pm 2\%$ อุณหภูมิช่วงที่ใช้งานอยู่ที่ 0-60 °C ความละเอียด 0.1 °C จะใช้ท่อพีวีซีขนาด 5.08 cm (2 inch) ต่อร่วมกับหน้าแปลนพีวีซี 2 ด้านขวาง

เครื่องวัดอัตราการป้อนอากาศตรงกลางและประกอบเข้ากับท่ออากาศเครื่องวัดอัตราการป้อนอากาศ และการติดตั้งเครื่องมือทดสอบสมรรถนะเตาก๊าซชีววมวลโรควันดังภาพที่ 17



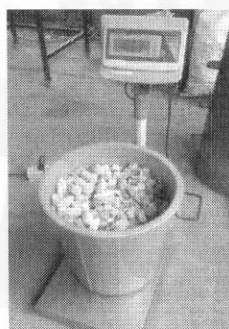
ภาพที่ 16 เครื่องวัดอัตราการป้อนอากาศ

5. เครื่องวัดความเร็วลม

เครื่องวัดความเร็วลมรุ่น DIGICON DA-45M สามารถวัดได้ทั้งความเร็วลมและอุณหภูมิ ที่มี ย่านการวัด 0.4~35.0 m/s, 1.4~90.0 km/h, 0.9~55.9 mph, 0.8~48.8 knots, 80~4930 ft/min, 0~50 °C 32~122 °F ใช้ในการตรวจวัดความเร็วลมก่อนเข้าเตา

6. เครื่องชั่งน้ำหนักชีววมวลและน้ำ

การชั่งน้ำหนักของชีววมวลและน้ำภายใต้สภาวะการทดสอบใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบทศนิยม 2 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นเครื่องชั่งน้ำหนักของ DIGI รุ่น DS-530 เป็นแบบดิจิตอลความละเอียด 0.01 g และ ชั่งน้ำหนักได้สูงสุดได้ถึง 60 kg และต่ำสุด 0.4 kg ค่าความคลาดเคลื่อน 20 g ภาพที่ 18



ภาพที่ 18 เครื่องชั่งน้ำหนักชีววมวลและน้ำ

7. ชีวมวลสำหรับการทดสอบ

เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการทดสอบเตาชีวมวล เป็นวัสดุเชื้อเพลิงชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร ประกอบด้วย ชังข้าวโพด เศษไม้ลำไย และแกลบ ซึ่งเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ที่หาได้ง่ายในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งได้แก่ เชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน ลำปาง พะเยา และน่าน เป็นต้น ชังข้าวโพดที่นำมาใช้ทดสอบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 16.16 MJ/kg มีความหนาแน่นเฉลี่ย 132.6 kg/m³ และความชื้นไม่เกิน 10% ในส่วนของเศษไม้ได้เลือกใช้เศษไม้ที่มาจากกิ่ง ก้าน จากต้นลำไย และเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากการตัดแต่งกิ่งไม้ของเกษตรกร พบมากในแถบภาคเหนือตอนบน เศษไม้ที่นำมาทดสอบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 15.92 MJ/kg มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 384.57 kg/m³ และความชื้นไม่เกิน 10% แกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากการสีข้าวแกลบที่นำมาทดสอบมีค่าความร้อนเฉลี่ย 14.61 MJ/kg มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 102.11 kg/m³ และความชื้นไม่เกิน 9%



ชังข้าวโพด

เศษไม้ลำไย

แกลบ

ภาพที่ 19 ชีวมวลสำหรับการทดสอบ

8. เตาชีวมวลแบบดั้งเดิม

เตาชีวมวลแบบดั้งเดิมเป็นเตาชีวมวลที่ออกแบบมาเพื่อใช้กับชีวมวลประเภทชังข้าวโพดเพียงชนิดเดียว เตาชีวมวลที่ออกแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 cm ห้องเผาไหม้สูง 50 cm ด้านล่างห้องเผาไหม้มีตะแกรงรองรับขี้เถ้าด้านล่างของตะแกรงใช้พัดลมขนาด 2 inch 220 V กำลังไฟฟ้า 93 W ไม่สามารถปรับอัตราการป้อนอากาศของเตาได้ เตาชีวมวลแบบดั้งเดิมดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 เตาก๊าซซีวมวลแบบดั้งเดิม

9. เตาก๊าซหุงต้ม

เตาชนิดนี้เป็นเตาที่มีขายตามท้องตลาดเรียกว่าเตาฟู่ มีส่วนประกอบหลักอยู่ 2 ส่วนคือชุดหัวเตาแก๊สและก๊าซหุงต้ม หัวเตาแก๊สเป็นเหล็กหล่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 inch แบบชนิดหนา มีชุดปรับอัตราผสมแก๊สหุงต้มกับอากาศ ต่อร่วมกับท่อแก๊สพร้อมตัวควบคุมแรงดันก๊าซหุงต้มน้ำหนักหัวเตาเฉลี่ย 4 kg ก๊าซหุงต้มที่ใช้ทดสอบเป็นผลิตภัณฑ์ของเวิลด์แก๊ส (World gas) ขนาด 15 kg ดังภาพที่ 21



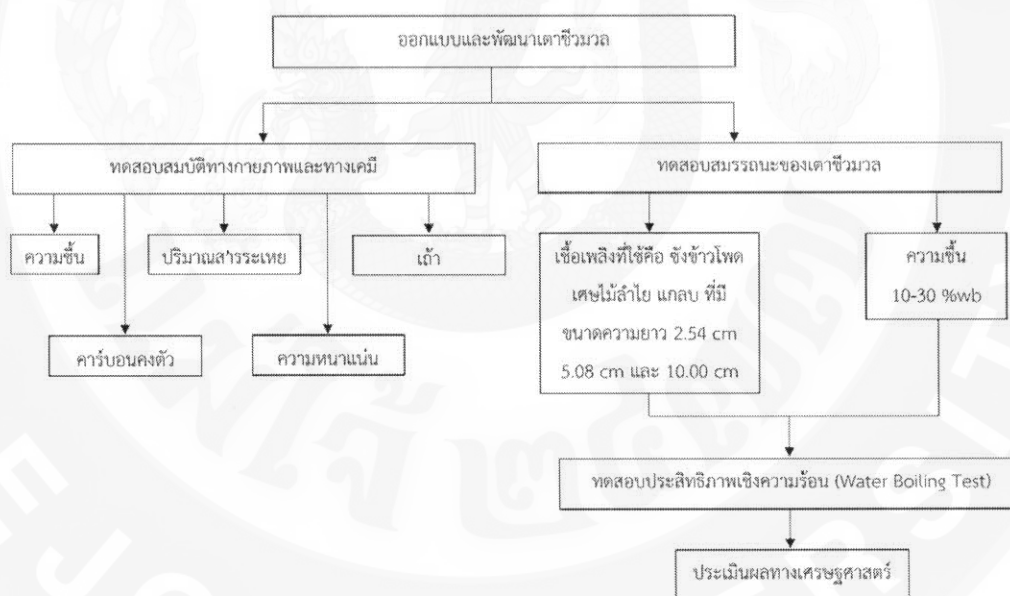
ภาพที่ 21 เตาก๊าซหุงต้ม

วิธีการทดสอบเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น

ในการศึกษานี้จะทำการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลไร่คว้น สำหรับวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ เพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม ที่วิสาหกิจชุมชนใช้ในปัจจุบัน โดยมีขั้นตอนหลัก ๆ ต่อไปนี้

1. การออกแบบและพัฒนาเพื่อปรับปรุงเตาชีวมวลแบบดั้งเดิม ให้สามารถปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ มีระบบป้องกันอากาศ และสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิดและหลายขนาด
2. การทดสอบสมบัติเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาชีวมวลแบบไร่คว้น
3. ประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลไร่คว้น
4. ประเมินความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์

สามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการการศึกษา ได้ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ขั้นตอนการดำเนินการการศึกษา

1. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

โดยมีการกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ คือ เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษานี้มี 3 ชนิด คือ ชังข้าวโพด เศษไม้ลำไย และแกลบ โดยค่าความยาวของชังข้าวโพดและเศษไม้ลำไยมีขนาดเป็น 2.54 cm, 5.08 cm และ 10.00 cm ค่าความชื้นของเชื้อเพลิงที่ใช้ออนให้กับเตาชีวมวลไร่ควันที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ 10-30%wb

2. การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาก๊าซชีวมวลไร่ควัน

ในการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาก๊าซชีวมวลไร่ควันนี้จะทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับเตาก๊าซหุงต้มโดยใช้วิธีการต้มน้ำ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 ทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักน้ำ 40 kg โดยจะชั่งน้ำหนักน้ำเริ่มต้น และชั่งน้ำหนักน้ำที่เหลือเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

2.2 เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ เชื้อเพลิงฟอสซิล (ก๊าซหุงต้ม) โดยจะทำการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการทดสอบ เชื้อเพลิงชีวมวลจะกำหนดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในแต่ละครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

2.3 วัดอุณหภูมิ จะทำการวัดอุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิแวดล้อม โดยจะทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 5 min เพื่อทราบถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำตลอดการทดสอบ และนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพเชิงความร้อน

2.4 บันทึกข้อมูลใน 3 ช่วง คือ ช่วงของระยะเวลาเริ่มต้นการทดสอบ ช่วงของระยะเวลาที่น้ำเดือด และจนกระทั่งเชื้อเพลิงหมด จะทราบถึงความแตกต่างของอุณหภูมิเพื่อนำไปวิเคราะห์หาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ และอัตราการเผาไหม้

2.5 ชั่งปริมาณเถ้า เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบช่องเก็บเถ้า

ตารางผลการทดสอบการป้อนอากาศเทียบกับอัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 6 ในส่วนสำหรับรายละเอียดของเตาชีวมวลแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลอง จะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลอากาศเทียบกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

ชีวมวล	ความเร็วลมป้อน (m/s)	อัตราการไหลอากาศ	อัตราส่วนอากาศ/เชื้อเพลิง
ซังข้าวโพด	4.3	37.6	3.24
	5.3	46.4	3.60
	6.3	55.1	4.12
เศษไม้	4.3	37.6	3.24
	5.3	46.4	3.60
	6.3	55.1	4.12
แกลบ	4.3	37.6	3.24
	5.3	46.4	3.60
	6.3	55.1	4.12

ตารางที่ 7 ขั้นตอนการทดสอบของเตาก๊าซแบบดั้งเดิมก๊าซหุงต้ม และเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน

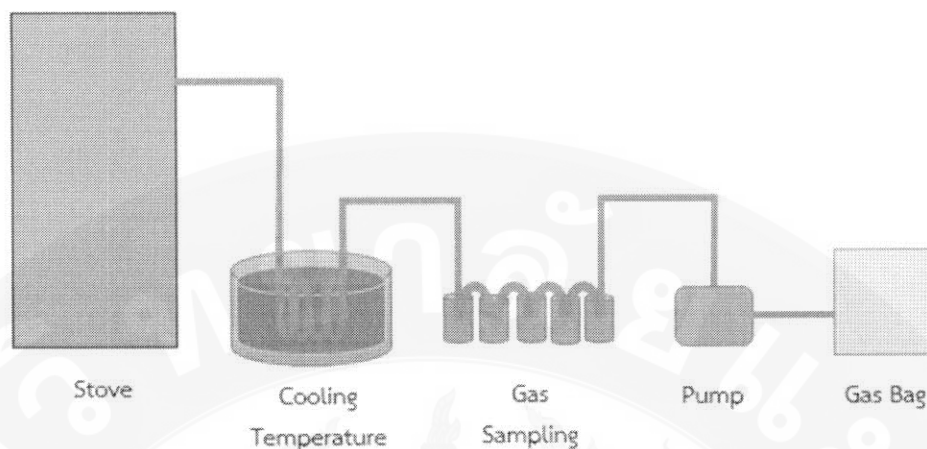
ขั้นตอน	เตาก๊าซชีวมวลแบบดั้งเดิม	LPG	เตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน
1. ชั่งน้ำหนักน้ำ 40 kg	✓	✓	✓
2. ชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงเริ่มต้นและสุดท้าย	✓	✓	✓
3. เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาชีวมวล	ซังข้าวโพด 10 kg		ซังข้าวโพด 11 kg เศษไม้ลำไย 29 kg แกลบ 8 kg
4. ขนาดเชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาชีวมวล	ซังข้าวโพด ... cm		ซังข้าวโพด และเศษไม้ลำไย 2.54, 5.04 และ 10.00 cm
5. ระยะเวลาในการทดสอบ	จนกระทั่งเชื้อเพลิงหมด	1 hr	จนกระทั่งเชื้อเพลิงหมด

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ขั้นตอน	เตาก๊าซชีววมวลแบบ ดั้งเดิม	LPG	เตาก๊าซชีววมวลไร้ควัน
6. อัตราการไหลของอากาศ			38, 46 และ 55 m ³ /hr
7. บันทึกเวลาที่น้ำเริ่มเดือด	✓	✓	✓
8. จับเวลาที่เชื้อเพลิงหมด	✓	✓	✓
9. ชั่งน้ำหนักน้ำที่เหลือ	✓	✓	✓
10. ชั่งปริมาณถ่าน	✓		✓
11. ทดสอบการใช้งานที่ ระยะเวลาต่อเนื่อง			50 hr
10. ชั่งปริมาณถ่าน	✓		✓

3. การเก็บตัวอย่างก๊าซชีววมวล

ก๊าซชีววมวลที่ได้จากเตาก๊าซชีววมวลไร้ควันในงานวิจัยนี้จะนำไปทดสอบและวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซที่ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ การเก็บตัวอย่างก๊าซชีววมวลเริ่มต้นจากการติดตั้งเครื่องมือเก็บตัวอย่างก๊าซซึ่งประกอบด้วย ชุดระบายความร้อนก๊าซชีววมวล ชุดทำความสะอาดก๊าซ บีมดูด และถุงเก็บก๊าซ การเก็บตัวอย่างเริ่มจากการทดสอบ จุดเตาเตาก๊าซชีววมวลไร้ควันไว้ประมาณ 20 นาที เพื่อรอให้อัตราการเกิดก๊าซมีความเสถียรและมีอุณหภูมิความร้อนคงที่ เมื่อครบ 20 นาที เปิดสวิตช์บีมให้บีมทำงานโดยดูดก๊าซเพื่อมาบ่อนที่ถุง ในเบื้องต้นให้ปล่อยก๊าซชีววมวลและอากาศในท่อทิ้งก่อนประมาณ 2 นาที จากนั้นจึงต่อท่อบรรจุก๊าซเข้าสู่ถุงเก็บก๊าซจนกระทั่งได้ก๊าซเต็มถุงจึงทำการปิดถุงลัตซ์ลึงด้วยพาราฟินและนำส่งให้ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์วิเคราะห์ ตัวอย่างไดอะแกรมการเก็บตัวอย่างก๊าซแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 โคอะแกรมชุดเก็บตัวอย่างก๊าซ

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นจะแบ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและทางเคมีเทคนิค การวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลทางเทคนิค จะทำการวิเคราะห์ถึงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (SGR) อัตราการเผาไหม้เชื้อเพลิงเชิงความร้อน และประสิทธิภาพเชิงความร้อน การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ จะทำการวิเคราะห์ถึงระยะเวลาในการคืนทุน และอัตราผลตอบแทนภายใน สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้

4.1 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิง

4.1.1 ค่าความร้อน (Calorimetric Value or Heating Value)

ปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อของเสียถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ หรือเรียกว่า ความร้อนของการเผาไหม้ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ มีหน่วยเป็น กิโลจูล (kJ) หรือ กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมของเสีย (kcal/kg)

4.1.1.1 ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) เป็นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเสีย ซึ่งรวมถึงปริมาณความร้อนแฝงที่ถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำที่เป็นองค์ประกอบของของเสียเกิดการควบแน่น

4.1.1.2 ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) เป็นค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเสียที่ไม่รวมค่าความร้อนแฝงค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำที่ตรวจวัดได้ในของเสีย ชนิดหนึ่งจะแตกต่างกันเสมอ โดยค่าความแตกต่างขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำหรือความชื้นที่อยู่ในของเสีย ดังนั้นในกรณีของเสียมีความชื้นมาก ๆ อาจใช้วิธีการตากแดดหรือผึ่งลมเพื่อลดความชื้นในของเสีย แล้วตรวจวัดเฉพาะค่าความร้อนสูงก็ได้ เนื่องจากในระหว่างการผลิตเชื้อเพลิงแท่งนั้น กระบวนการอัด

และการตากแห้งแห้งเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้ จะทำให้น้ำในของเสียถูกกำจัดออกไปบางส่วน และคงเหลือในแห้งเชื้อเพลิงอีกบางส่วน

4.1.2 ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

ปริมาณน้ำที่คงเหลืออยู่หลังจากที่ตากแห้งของเสีย ความชื้นของของเสียมีผลต่อค่าความร้อนโดยตรง โดยหากของเสียมีความชื้นมากจะทำให้มีการสูญเสียความร้อนไปกับการระเหยความชื้นในระหว่างการเผาไหม้ ทำให้ค่าความร้อนที่ได้ต่ำลง

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้น โดยอบที่อุณหภูมิ 103 °C เป็นเวลา 72 hr จากนั้นคำนวณหาปริมาณความชื้นด้วยสมการที่ 28

$$M_w = \frac{w - d}{d} \times 100 \quad \text{สมการที่ 28}$$

เมื่อ	M _w	คือ	ค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง
	w	คือ	ค่าน้ำหนักเริ่มต้น (kg)
	d	คือ	มวลแห้งของวัสดุ (kg)

4.1.3 เถ้า (Ash)

ส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการสันดาป ภายในเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา 6 hr ซึ่งประกอบด้วย ซิลิกาแคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ หรือเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้นั่นเอง ดังนั้น หากของเสียมีซีเถ้าปริมาณมาก จะเป็นปัญหาในการเผาไหม้และเพิ่มความยุ่งยากในการกำจัดเถ้าที่เกิดขึ้น

การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า โดยเผาที่อุณหภูมิ 500 °C แล้วค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิเป็น 700-750 °C เป็นระยะเวลา 2 hr จนได้น้ำหนักคงที่ แล้วคำนวณหาปริมาณเถ้าด้วยสมการที่ 29

$$\text{Ash}(\%) = \frac{w_f}{w_i} \times 100 \quad \text{สมการที่ 29}$$

เมื่อ	Ash	คือ	ค่าปริมาณเถ้า
	w _i	คือ	ค่าน้ำหนักเริ่มต้น (kg)
	w _f	คือ	ค่าน้ำหนักสุดท้าย (kg)

4.1.4 ปริมาณสารที่ระเหยได้ (Volatile Matters)

องค์ประกอบในของเสียที่สามารถระเหยได้เมื่อได้รับความร้อน ของเสียที่มีปริมาณสารระเหยได้สูง จะมีแนวโน้มที่มีค่าความร้อนสูงด้วย อย่างไรก็ตาม สารที่ระเหยได้บางชนิด อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำวัสดุเชื้อเพลิงไปใช้งาน เช่น สารอัลคาไลน์ในทะเลสาบ ปาล์มจะกลายเป็นยางเหนียวเกาะติดท่อน้ำในห้องเผาไหม้ ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อน้ำลดลง การวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย โดยนำมาเผาที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นระยะเวลา 7 min แล้วทำการคำนวณหาปริมาณสารระเหยด้วยสมการที่ 30

$$V_s = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100 \quad \text{สมการที่ 30}$$

เมื่อ V_s คือ ค่าปริมาณสารระเหย

4.1.5 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

ปริมาณสารประกอบคาร์บอนซึ่งระเหยได้ยาก โดยจะคงเหลืออยู่ในของเสีย หลังจากเผาสารระเหยออกไปแล้วที่อุณหภูมิ 750 °C ของเสียที่มีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงจึงมีช่วงเวลาในการลุกไหม้นาน

การวิเคราะห์คาร์บอนคงตัว โดยการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 3 hr หรือคำนวณจากสมการที่ 31

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = 100\% - (\% \text{ความชื้น} + \% \text{ปริมาณเถ้า} + \% \text{ปริมาณสารระเหย}) \quad \text{สมการที่ 31}$$

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางเทคนิค

จะทำการวิเคราะห์ค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะอัตราการเผาไหม้ และประสิทธิภาพเชิงความร้อน แสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ที่ได้ดังนี้

5.1 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลหาได้จาก การวัดปริมาณของชีวมวลที่ป้อนให้กับระบบ เทียบกับเวลาภายใต้สภาวะ การทำงาน อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลหาได้ จากสมการที่ 32

$$\text{FCR} = \frac{m_f}{t} \quad \text{สมการที่ 32}$$

เมื่อ	FCR	คือ	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/hr)
	m_f	คือ	น้ำหนักเชื้อเพลิง (kg)
	t	คือ	ระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (Sec)

ในการศึกษานี้ ใช้ซังข้าวโพด 11 kg, เศษไม้ลำไย 29 kg และแกลบ 8 kg

5.2 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (SGR)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ เป็นสัดส่วนของปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ต่อพื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้คูณกับระยะเวลาที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล หาได้จากสมการที่ 33

$$SGR = \frac{m_f}{A_f \times t} \quad \text{สมการที่ 33}$$

เมื่อ	A_f	คือ	พื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้ (m^2) ในการศึกษานี้ พื้นที่หน้าตัดของห้องเผาไหม้เป็น 30 cm หรือ 0.3 m
	SGR	คือ	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ($kg/m^2 \text{ hr}$)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ทั้งหมด (hr)

5.3 อัตราการเผาไหม้ (CZR)

อัตราการเผาไหม้ หาได้จากอัตราส่วนของความยาวของห้องเผาไหม้ต่อระยะเวลาที่ใช้เชื้อเพลิงชีวมวล มีค่าดังสมการที่ 34

$$CZR = \frac{l}{t} \quad \text{สมการที่ 34}$$

เมื่อ	CZR	คือ	อัตราการเผาไหม้ (m/hr)
	l	คือ	ความยาวของห้องเผาไหม้ (m) ในการศึกษานี้ความยาวของห้องเผาไหม้มีค่าเป็น 60 cm หรือ 0.60 m
	t	คือ	เวลาที่ใช้ทั้งหมด (hr)

5.4 ทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวล

การทดสอบประสิทธิภาพเตาชีวมวล จะใช้วิธีการทดสอบโดยวิธีการต้มน้ำ (Water Boiling Test) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 35

$$\eta = \frac{C_p m_1 \Delta T + m_2 L}{m_3 \text{LHV}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 35}$$

เมื่อ	m_1	คือ	ปริมาณน้ำเริ่มต้น (kg)
	m_2	คือ	ปริมาณน้ำที่ระเหย (kg)
	m_3	คือ	มวลของเชื้อเพลิง (kg)
	ΔT	คือ	การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิ น้ำเดือด ($^{\circ}\text{C}$)
	C_p	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ มีค่าเป็น 4.186 kJ/kg $^{\circ}\text{C}$
	L	คือ	ค่าความร้อนแฝงในการระเหยของน้ำ มีค่าเป็น 2,260 kJ/kg
	LHV	คือ	ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง kJ/kg

6. ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์

ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของการพัฒนาเตาก๊าซชีวมวลไว้ครั้นสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์นี้ จะทำการวิเคราะห์ถึง ระยะเวลาคืนทุนและผลตอบแทนภายใน

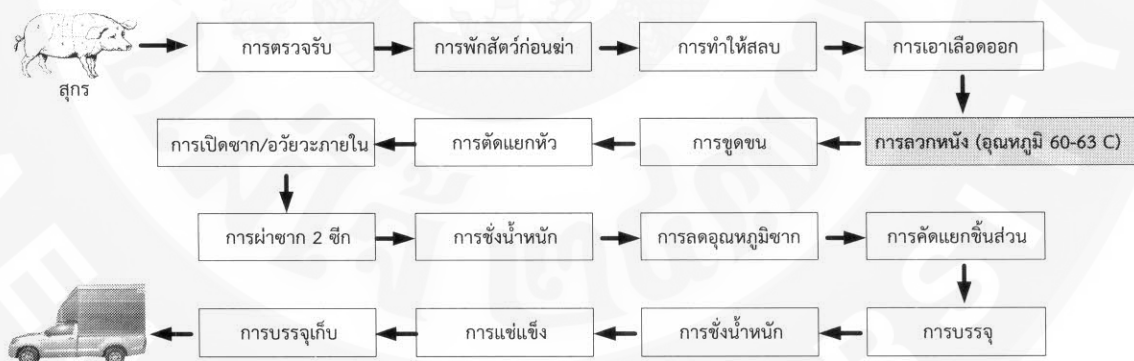
ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิสะสมจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับ ค่าเงินลงทุน ผลที่ได้รับจากการประเมินการลงทุนวิธีนี้จะทำให้ทราบว่า จะได้รับเงินทุนซ้ำหรือเร็วเท่าใด เพราะยิ่งถ้าคืนทุนเร็วโอกาสที่จะเสี่ยงต่อการขาดทุนในอนาคตก็จะน้อยลง สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 36

$$\text{Pay Back Period} = \frac{\text{Total Investment (Baht)}}{\text{Energy Cost Saving (Baht / y)}} \quad \text{สมการที่ 36}$$

7. กระบวนการใช้น้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์วิสาหกิจชุมชน

กระบวนการแปรรูปเนื้อหมูในโรงฆ่าสัตว์จากการสำรวจในวิสาหกิจชุมชนและการค้นคว้าเอกสารข้อมูลที่เกี่ยวข้องพบว่ากระบวนการแปรรูปเนื้อหมูมีกระบวนการหลายขั้นตอนดังภาพที่ 24 เริ่มจากการรับหมูมาจากฟาร์ม จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการตรวจรับ การพักสัตว์ก่อนฆ่า การทำให้สลบ จากนั้นจะเข้าสู่การนำเอาเลือดออกหรือการเชือด หลังจากได้มีการเชือดแล้วก็จะเข้าสู่กระบวนการลวกหนัง ในกระบวนการนี้จำเป็นที่จะต้องมีการใช้น้ำร้อนในการลวกหนังเพื่อการนำเอาขนของหมูออก อุณหภูมิที่ต้องการสำหรับการลวกจะอยู่ในช่วง 60-63 °C การลวกจะใช้เวลา 4-6 นาที ซึ่งใช้น้ำในปริมาณที่สูงและที่สำคัญเชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนใหญ่จะใช้แก๊สหุงต้มหรือใช้ฟืน โดยทั่วไปการใช้แก๊สหุงต้มจะมีประสิทธิภาพเฉลี่ยอยู่ในช่วง 45-60% ในขณะที่การใช้ฟืนส่วนใหญ่กับเตาฟืนแบบดั้งเดิมมีประสิทธิภาพสูงสุด 10% ซึ่งถือว่าเป็นการใช้ทรัพยากรที่ไม่คุ้มค่า หลังจากลวกหนังแล้วขั้นตอนต่อไปก็จะเป็นการขูดขน การตัดแยกหัว การเปิดซากและอวัยวะภายในของหมู หลังจากนั้นจะทำการผ่าซีกของเนื้อ การชั่งน้ำหนัก การลดอุณหภูมิซาก การคัดแยกชิ้นส่วน การบรรจุการชั่งน้ำหนัก การแช่แข็ง และการบรรจุสุดท้ายก่อนการขนส่งสู่ลูกค้า

สำหรับการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ก็จะเป็นการนำผลของความต้องการน้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์มาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ ซึ่งในเบื้องต้นอุณหภูมิที่ใช้ออกแบบจะอิงตามเกณฑ์ที่ศึกษาร่วมกับความเป็นไปได้ในการใช้น้ำร้อนในการบวนการอื่นผสมรวมด้วย



ภาพที่ 24 กระบวนการฆ่าและหมูและการใช้น้ำร้อนในโรงฆ่าสัตว์วิสาหกิจชุมชน

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิจารณ์

การออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลแบบไร้ควัน

เตาชีวมวลแบบไร้ควันนี้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับใช้งานในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ เพื่อใช้ในการต้มน้ำและลดการใช้ก๊าซ ก๊าซหุงต้ม โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการออกแบบเตาชีวมวลแบบไร้ควันนี้เป็นวัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร สามารถหาได้ง่ายตามแหล่งชุมชน ได้แก่ ชังข้าวโพด ซึ่งเป็นชีวมวลที่มีปริมาณมากในพื้นที่เขตภาคเหนือ หลักการออกแบบเตาชีวมวลนั้นจะออกแบบให้เตามีการเผาไหม้ที่ดี และมีปริมาณควันน้อย ใช้หลักการของการเผาไหม้โดยตรงร่วมกับกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน โดยปริมาณอากาศต่อเชื้อเพลิงจะต้องมีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความร้อนที่สูงที่สุด การออกแบบใช้หลักการคำนวณอ้างอิงตามการออกแบบตามแบบเตาชีวมวลกลับแบบอินเวอร์ดราฟ (Inverted downdraft biomass stove) (Belonio, 2005) มีตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบ 2 ตัวแปร คือ ขนาดของห้องเผาไหม้ และเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ การออกแบบเตาชีวมวลแบบไร้ควันนี้ได้ทำการออกแบบภายใต้เงื่อนไขความต้องการการใช้งานเตาชีวมวลของวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ และได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การใช้งานเตาชีวมวลตามความต้องการของวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่	หน่วย
m_w	มวลน้ำเริ่มต้น	40	L
t_b	เวลาในการต้มน้ำเดือด	20	min
t_{TOT}	เวลาในการต้มน้ำต่อครั้ง	50	min

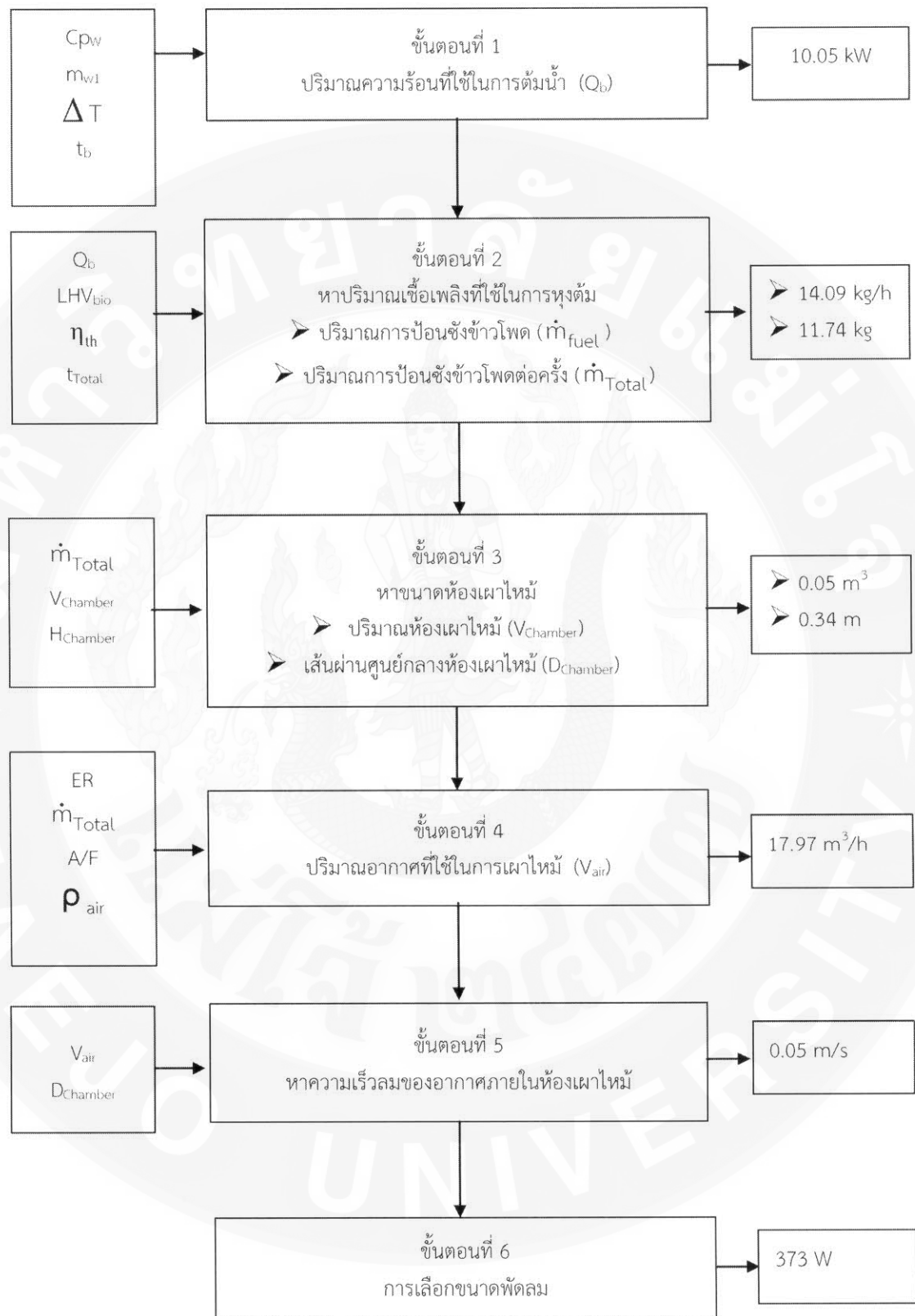
ตารางที่ 9 เงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบเตาชีวมวล

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่	หน่วย
C_{pw}	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	4.186	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
η_{th}	ประสิทธิภาพเตาชีวมวล	18	%
LHV_{bio}	ค่าความร้อนของซังข้าวโพด	14,260	kJ/kg
T_{wi}	อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น	28	$^\circ\text{C}$
T_{wb}	อุณหภูมิน้ำสุดท้าย	100	$^\circ\text{C}$
$H_{Chamber}$	ขนาดความสูงของห้องเผาไหม้	0.50	M
ρ_{Ap}	ความหนาแน่นที่ปรากฏ	230	kg/m^3
ER	Equivalence ratio	0.30	-
AVF	Stoichiometric air	5.10	kg-air/kg-fuel
ρ_{air}	air density	1.20	kg/m^3

ในการออกแบบเตาชีวมวลแบบไร้ควันมีขั้นตอนในการออกแบบทั้งหมด 6 ขั้นตอน ประกอบด้วย

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

ไดอะแกรมขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลไร้ควันแสดงดัง ภาพที่ 25 และรายละเอียดการคำนวณในแต่ละขั้นตอนแสดงในรายละเอียดการคำนวณการออกแบบเตาชีวมวลไร้ควัน



ภาพที่ 25 ไดอะแกรมการออกแบบเตาชีวมวล

รายละเอียดการคำนวณการออกแบบเตาชีวมวลโรควัน

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหุงต้ม

ขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลจะต้องทราบถึงค่าความต้องการพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหุงต้ม โดยค่าความต้องการพลังงานความร้อนสามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาดของห้องเผาไหม้ เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนตามที่ต้องการ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อน ได้แก่ มวลน้ำเริ่มต้น (m_w), ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (C_{pw}), ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำเริ่มต้นและอุณหภูมิของน้ำเดือด (ΔT) และระยะเวลาที่ทำให้น้ำเดือด (t_b) โดยการคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 37 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ } (Q_b) &= \frac{m_w \times C_{pw} \times \Delta T}{t_b} && \text{สมการที่ 37} \\ &= \frac{40 \text{ kg} \times 4.186 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times (100 - 28^\circ\text{C})}{20 \text{ min} \times 60 \text{ s}} \\ \text{ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ } (Q_b) &= 10.05 \text{ kW} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้ม

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำจากขั้นตอนที่ 1 เสร็จสิ้นแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้มเพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด ได้แก่ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ (Q_b) ค่าความร้อนของซึ่งข้าวโพด (LHV_{Fuel}) และประสิทธิภาพของเตาชีวมวล (η_{th}) โดยกำหนดให้เตาชีวมวลมีประสิทธิภาพเท่ากับ 18% และซึ่งข้าวโพดมีค่าความร้อนเท่ากับ 14,260 kJ/kg $^\circ\text{C}$ การคำนวณหาปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 38

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด } (\dot{m}_{Fuel}) &= \frac{Q_b}{LHV_{Fuel} \times \eta_{th}} && \text{สมการที่ 38} \\ &= \frac{10.05 \text{ kW}}{14,260 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \times 0.18} \\ &= \frac{10.05 \text{ kW}}{2,566.8 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด } (\dot{m}_{Fuel}) = 14.09 \text{ kg/h}$$

เมื่อทราบปริมาณการป้อนซังข้าวโพดในระยะเวลา 1 h เสร็จสิ้นแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณการป้อนซังข้าวโพดต่อการใช้งาน 1 ครั้ง ได้จากปริมาณการป้อนซังข้าวโพด (\dot{m}_{Fuel}) และระยะเวลาในการต้มน้ำ (t_{TOT}) ซึ่งจากความต้องการของวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์มีความต้องการในการต้มน้ำ 50 min ต่อครั้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 39 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนซังข้าวโพดต่อครั้ง } (\dot{m}_{\text{TOT}}) &= \dot{m}_{\text{Fuel}} \times t_{\text{TOT}} \quad \text{สมการที่ 39} \\ &= \frac{14.09 \text{ kg/h} \times 50 \text{ min}}{60 \text{ min/h}} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณการป้อนซังข้าวโพด } (\dot{m}_{\text{TOT}}) = 11.74 \text{ kg}$$

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำและปริมาณการป้อนซังข้าวโพดเพื่อให้ได้ค่าปริมาณพลังงานความร้อนตามที่ต้องการแล้ว สามารถคำนวณหาขนาดของห้องเผาไหม้ได้จากปริมาณการป้อนซังข้าวโพด (\dot{m}_{TOT}), และความหนาแน่นที่ปรากฏ (ρ_{Ap}) โดยกำหนดให้ความหนาแน่นที่ปรากฏเท่ากับ 230 kg/m^3 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 40 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณห้องเผาไหม้ } (V_r) &= \frac{\dot{m}_{\text{TOT}}}{\rho_{\text{Ap}}} \quad \text{สมการที่ 40} \\ &= \frac{11.74 \text{ kg}}{230 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณห้องเผาไหม้ } (V_r) = 0.05 \text{ m}^3$$

จากผลการคำนวณปริมาณของห้องเผาไหม้ (V_w) และกำหนดให้ห้องเผาไหม้มีความสูง 0.6 m สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_r) ได้จากสมการที่ 41

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D_r)} &= \left(\frac{V_r}{H_r \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} && \text{สมการที่ 41} \\ &= \left(\frac{0.05 \text{ m}^3}{0.5 \text{ m} \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} \end{aligned}$$

$$\text{เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D_r)} = 0.35 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมต่อขนาดของห้องเผาไหม้และปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากหากมีอัตราการป้อนอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้เกิดควันระหว่างการใช้งานได้ โดยในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (V_{air}) ได้ทำการกำหนดค่า Equivalence ratio เท่ากับ 0.30 และค่า Stoichiometric air (A/F) ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 5.10 kg-air/kg-fuel และค่าความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.20 kg/m³ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (V_{air}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 42

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (}\dot{m}_{\text{air}}\text{)} &= \frac{ER \times \dot{m}_{\text{TOT}} \times A/F}{\rho_{\text{air}}} && \text{สมการที่ 42} \\ &= \frac{0.3 \times 14.09 \text{ kg/h} \times 5.10 \text{ kg-air/kg-fuel}}{1.20 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (}\dot{m}_{\text{air}}\text{)} = 17.97 \text{ m}^3/\text{h}$$

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาความเร็วลมของอากาศภายในห้องเผาไหม้

เมื่อทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_r) และปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (V_{air}) ที่เหมาะสมต่อขนาดของเตาชีวมวล สามารถคำนวณความเร็วลมได้จากสมการที่ 43 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ความเร็วลม (} V_{\text{air}} \text{)} &= \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\frac{\pi}{4} D^2} && \text{สมการที่ 43} \\
 &= \frac{17.97 \text{ m}^3/\text{h}}{\frac{\pi}{4} 0.34^2 \text{ m} \times 3600 \text{ s}} \\
 \text{ความเร็วลม (} V_{\text{air}} \text{)} &= 0.05 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 6 การเลือกขนาดพัดลม

จากค่าปริมาณอากาศสามารถนำไปเลือกขนาดของพัดลมที่มีความเหมาะสมกับเตาชีวมวล โดยใช้ข้อมูลจากการคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ข้างต้น ซึ่งได้ทำการเลือกพัดลมขนาด 373 W นำมาใช้งานกับเตาชีวมวลที่มีขนาดห้องเผาไหม้ (V_r) เท่ากับ 0.05 m^3 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D_r) เท่ากับ 0.35 m

จากขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลแบบไร้ควันทั้ง 6 ขั้นตอนข้างต้น สามารถนำมาสรุปผลการออกแบบได้ดังตารางที่ 10 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 10 สรุปขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลไร้ควัน

ลำดับที่	ขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลไร้ควัน		หน่วย
1	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ (Q_b)	10.05	kW
2	ปริมาณการป้อนซังข้าวโพด (\dot{m}_{Fuel})	14.09	kg/h
3	ปริมาณการป้อนซังข้าวโพดต่อครั้ง (\dot{m}_{Fuel})	11.74	kg
4	ปริมาณห้องเผาไหม้ (V_r)	0.05	m^3
5	เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D_r)	0.35	m
6	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (V_{air})	17.97	m^3/h
7	ความเร็วลม	0.05	m/s
8	เลือกขนาดพัดลม 373 W	373	W

การพัฒนาเตาชีวมวลที่ได้จากการออกแบบ

เตาชีวมวลไร้ควันที่ออกแบบสร้างขึ้นมีส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ ตัวเตาชีวมวลและชุดป้อนอากาศ ตัวเตาชีวมวลประกอบด้วยหัวเตาชีวมวล ห้องเผาไหม้และตะแกรงรองชีวมวลหรือถ้ำ ส่วนชุดป้อนอากาศประกอบด้วย พัดลมป้อนอากาศและอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้า รายละเอียดในการออกแบบสร้างเตาชีวมวลไร้ควันมีดังนี้

1. หัวเตาชีวมวล

หัวเตาชีวมวลที่ได้ออกแบบและสร้าง ดังภาพที่ 26 ใช้เหล็กแผ่นขนาด 1.6 mm ตัดเป็นรูปกรวย มีมุมกรวย 7° ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 cm บริเวณตรงกลางมีเหล็กล้อมเพื่อควบคุมเปลวไฟ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 cm ระยะความสูงของเหล็กที่ล้อม 5 cm มีการเจาะรูเพื่อให้ก๊าซออก จำนวน 24 รู แต่ละรูมีขนาด 5 mm หัวเตาชีวมวลจะติดตั้งส่วนบนของเตาชีวมวล

2. ห้องเผาไหม้

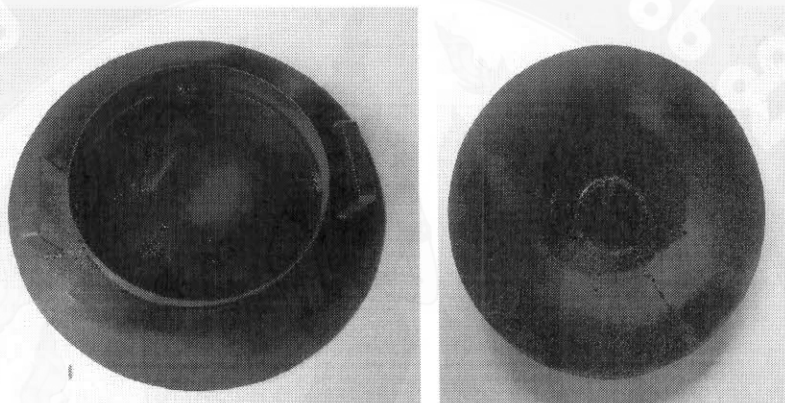
ห้องเผาไหม้ที่ได้ออกแบบและสร้าง ดังภาพที่ 27 ใช้เหล็กแผ่นขนาด 1.6 mm ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและม้วนเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm (คำนวณและพิจารณาเหมาะสมจากการใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด คือ ชังข้าวโพด แกลบและเศษไม้รายละเอียดในภาคผนวก) ขอบล่างและขอบบนใช้เหล็กแบบขนาดกว้าง 2.5 cmหนา 2 mm ม้วนรอบขอบเพื่อเพิ่มความแข็งแรง ส่วนล่างของเตาวัดระยะความสูงจากพื้นมาถึงขอบ 15 cm วางครีบบนในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 40 cm และวงใน 27 cm เชื่อมติดกับผนังของตัวเตา เพื่อรองรับเชื้อเพลิงชีวมวลตรงส่วนล่างของเตาติดตั้งท่อป้อนอากาศขนาด 5 cm ความยาว 30 cm ส่วนกลางหรือส่วนห้องเผาไหม้ปล่อยให้โล่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm และสูง 60 cm ส่วนบนของเตาวัดจากขอบบนสุดลงมา 10 cm ติดตั้งครีบบนในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 40 cm และวงใน 27 cm เพื่อรองรับหัวเตาชีวมวล รอบๆ ส่วนบนของหัวเตาเจาะรูสำหรับให้อากาศเสริมโดยรูมีขนาด 2.5 cm จำนวน 10 รู

2.1 ตะแกรงรองชีวมวล

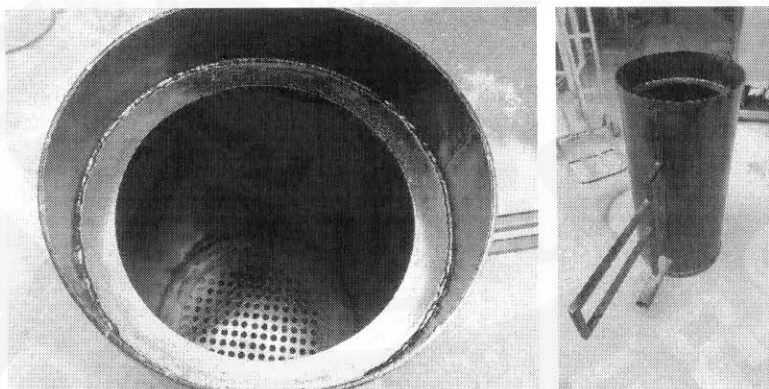
ตะแกรงรองชีวมวลและถ้ำของเตาชีวมวลใช้เหล็กแผ่นขนาด 3 mm ดังภาพที่ 28 ตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm พร้อมกับเจาะรูเพื่อการกระจายอากาศก่อนเข้าห้องเผาไหม้ จำนวน 176 รู โดยแต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 cm อุปกรณ์นี้จะติดตั้งอยู่ด้านล่างสุดของห้องเผาไหม้

2.2 ชุดพัดลมป้อนอากาศ

ชุดพัดลมป้อนอากาศนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ส่วน คือ พัดลมและอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้า ดังภาพที่ 29 พัดลมที่ใช้มีขนาด 373 kW แบบระบบไฟ 3 Phase 380-415 V ท่อดูดและป้อนอากาศมีขนาด 5 cm ติดตั้งกับท่อป้อนอากาศที่อยู่ด้านล่างของห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมการป้อนอัตราการไหลอากาศใช้อินเวอร์เตอร์ของ MITSUBISHI รุ่น D700 ขนาด 4.2 A สร้างอัตราการไหลอากาศได้สูงสุด 1-390 m/s



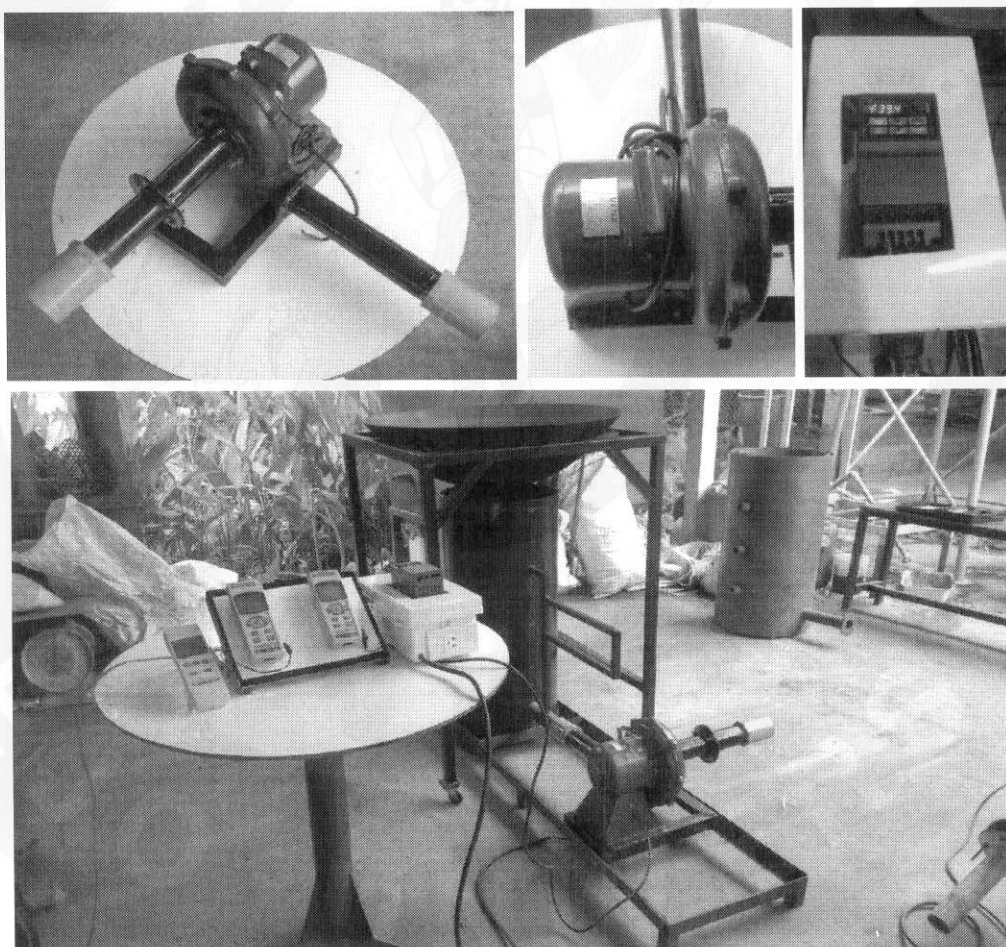
ภาพที่ 26 ลักษณะของหัวเตาชีวมวลไร้ควัน



ภาพที่ 27 ลักษณะของห้องเผาไหม้เตาชีวมวลไร้ควัน



ภาพที่ 28 ตะแกรงรองชีวมวลของเตาชีวมวลไร้ควัน



ภาพที่ 29 ชุดพัฒนป้อนอากาศและการติดตั้งใช้งาน

คุณสมบัติพื้นฐานชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ

ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 3 ชนิด ประกอบด้วย ชังข้าวโพด เศษไม้ลำไย และแกลบ ซึ่งก่อนที่จะนำชีวมวลทั้ง 3 ชนิดนี้ไปทดสอบ ต้องมีการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี กับห้องปฏิบัติการงานวิจัยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยคุณสมบัติที่วิเคราะห์คือ ค่าความชื้น ค่าความร้อน ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว และมีการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของธาตุ คาร์บอน ไนโตรเจน ไฮโดรเจน กำมะถัน และออกซิเจน รายละเอียดของคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 11 จากตารางพบว่า ค่าความชื้นของชีวมวลทั้ง 3 ชนิดจะอยู่ในช่วง 8.50–11.80% โดยค่าความชื้นที่มากที่สุดคือชังข้าวโพดมีค่าความชื้นอยู่ที่ 11.82% ปริมาณสารระเหยจะอยู่ในช่วง 69.00-71.00% ปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 12.80-14.80% ปริมาณเถ้าอยู่ในช่วง 2.60-18.30 % โดยค่าเถ้าที่สูงที่สุดคือ แกลบ 18.25% และค่าความร้อนของทั้ง 3 ชนิดเฉลี่ยเป็น ชังข้าวโพดมีค่าความร้อน 14.26 MJ/kg เศษไม้ลำไย 15.92 MJ/kg และ แกลบมีค่าความร้อน 13.29 MJ/kg ตารางที่ 10 แสดงการวิเคราะห์คุณสมบัติชีวมวลโดยวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติแบบละเอียดโดยพบว่าปริมาณคาร์บอนของเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 39.51-49.37% ออกซิเจนมีค่าอยู่ในช่วง 34.81-41.05% ส่วนค่าไนโตรเจน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์ มีค่าใกล้เคียงกัน ในด้านการวิเคราะห์กายภาพความหนาแน่นของชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ชังข้าวโพด เศษไม้และแกลบ พบว่ามีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 132.6, 384.57 และ 102.11 kg/m³ ตามลำดับ

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์คุณสมบัติโดยการประมาณ

Sample description : ไม้ลำไย Initial moisture content : 11.79 % by weight				
Dry basis	Ash	% by weight	ASTM D7582-10	2.64
	Volatile matter	% by weight	ASTM D7582-10	70.81
	Fixed carbon	% by weight	ASTM D7582-10	14.76
	Sulphur	MJ/Kg	ASTM D4239-12	0.02
	Gross calorific value	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	17.34
	Net calorific value	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	15.92

ตารางที่ 11 (ต่อ)

Sample description : แกลบ Initial moisture content : 8.58 % by weight				
	Ash	% by weight	ASTM D7582-10	18.25
	Volatile matter	% by weight	ASTM D7582-10	58.91
Dry basis	Fixed carbon	% by weight	ASTM D7582-10	14.25
	Sulphur	MJ/Kg	ASTM D4239-12	0.00
	Gross calorific value	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	14.54
	Net calorific value	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	13.29
Sample description : ช้างข้าวโพด Initial moisture content : 11.82 % by weight				
	Ash	% by weight	ASTM D7582-10	5.62
	Volatile matter	% by weight	ASTM D7582-10	69.74
Dry basis	Fixed carbon	% by weight	ASTM D7582-10	12.81
	Sulphur	MJ/Kg	ASTM D4239-12	0.01
	Gross calorific value	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	15.69
	Net calorific value	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	14.26

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์คุณสมบัติโดยการแยกธาตุ

Sample description : ไม้ลำไย				
	Carbon	%	ASTM D5373-08	49.37
	Hydrogen	%t	ASTM D5373-08	6.16
Dry basis	Nitrogen	%	ASTM D5373-08	0.41
	Total Sulphur	%t	ASTM D4239-12	0.02
	Oxygen	%	(plus errors)	41.05
Sample description : แกลบ				
	Carbon	%	ASTM D5373-08	39.51
	Hydrogen	%t	ASTM D5373-08	5.31
Dry basis	Nitrogen	%	ASTM D5373-08	0.40
	Total Sulphur	%t	ASTM D4239-12	0.00
	Oxygen	%	(plus errors)	34.81

ตารางที่ 12 (ต่อ)

Sample description : ชังข้าวโพด				
	Carbon	%	ASTM D5373-08	46.39
	Hydrogen	%t	ASTM D5373-08	6.05
Dry basis	Nitrogen	%	ASTM D5373-08	0.50
	Total Sulphur	%t	ASTM D4239-12	0.01
	Oxygen	%	(plus errors)	40.67

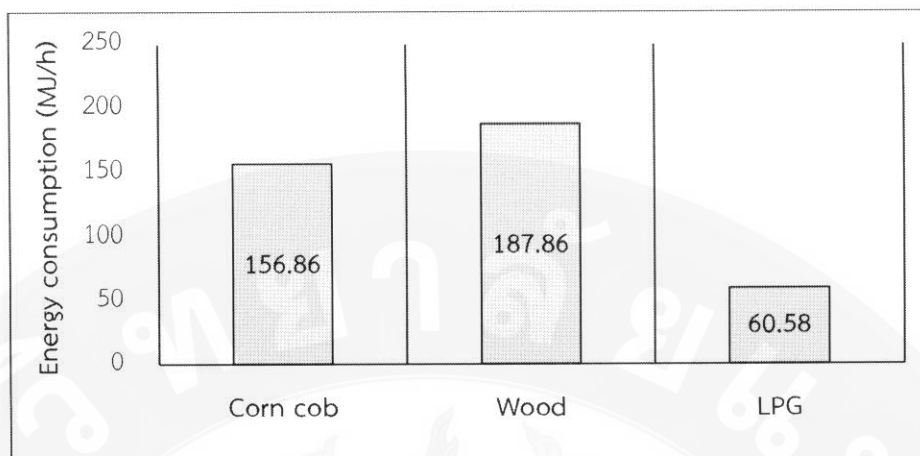
สมรรถนะของเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมกับเตาก๊าซหุงต้ม

1. อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงาน

การทดสอบสมรรถนะของเตาในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของเตาแบบดั้งเดิม โดยมีการทดสอบเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม (ก๊าซหุงต้ม) ซึ่งเตาแบบดั้งเดิมไม่สามารถปรับอัตราการป้อนของอากาศได้ การใช้งานสามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงเพียงชังข้าวโพดและเศษไม้เท่านั้น จากผลการทดสอบพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย 11 kg/h และ 11.8 kg/h ตามลำดับ ดังภาพที่ 30 และคิดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากับ 156.86 MJ/h และ 187.86 MJ/h ตามลำดับ ดังภาพที่ 31 เมื่อเทียบสมรรถนะของเตาแบบดั้งเดิมเทียบกับเตาก๊าซหุงต้มพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานของเตาก๊าซหุงต้มสูงกว่า 66-68% อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบต้นทุนในการผลิตความร้อนเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมมีต้นทุนที่ต่ำกว่า เนื่องจากราคาของเชื้อเพลิงชีวมวลมีราคาถูกกว่าก๊าซหุงต้ม



ภาพที่ 30 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม



ภาพที่ 31 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานของเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม

2. ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมกับเตาก๊าซหุงต้ม

การทดสอบประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมเทียบกับเตาก๊าซหุงต้มทดสอบโดยการต้มน้ำ (water boiling test) ผลของการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมอยู่ในช่วง 13.80-14.20% ในขณะที่ประสิทธิภาพความร้อนของเตาก๊าซหุงต้มสูงสุดเฉลี่ย 50.47% ดังภาพที่ 32 ประสิทธิภาพของเตาชีวมวลมีประสิทธิภาพต่ำกว่าเตาก๊าซหุงต้ม เนื่องจากเตามีการเผาไหม้เชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์เพราะคุณสมบัติของเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่น ค่าความร้อน ค่าความชื้น เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบกับเตาก๊าซหุงต้มที่เป็นการเผาไหม้ในรูปของก๊าซ (Bormam, 1998)



ภาพที่ 32 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาแบบดั้งเดิมเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม

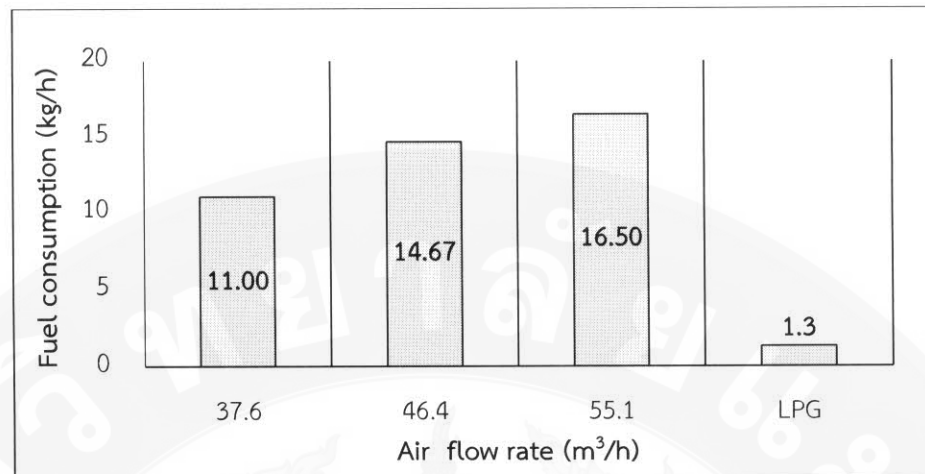
สมรรถนะของเตาชีวมวลแบบไร้ควันกับเตาก๊าซหุงต้ม

การทดสอบสมรรถนะของเตาในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลแบบไร้ควันเทียบกับสมรรถนะกับเตาก๊าซหุงต้ม ได้มีการปรับปรุงลักษณะการกระจายของลมให้มีการปรับอัตราการป้อนของอากาศและการใช้เชื้อเพลิงเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม ซึ่งในการทดสอบสมรรถนะมีการทดสอบ คือ อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน และประสิทธิภาพความร้อน โดยมีการทดสอบคือ การปรับอัตราการป้อนปริมาณอากาศ ผลของการเพิ่มฉนวนของเตาชีวมวล และขนาดของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 2.54, 5.08 และ 10.00 cm รายละเอียดของการทดสอบมีดังนี้

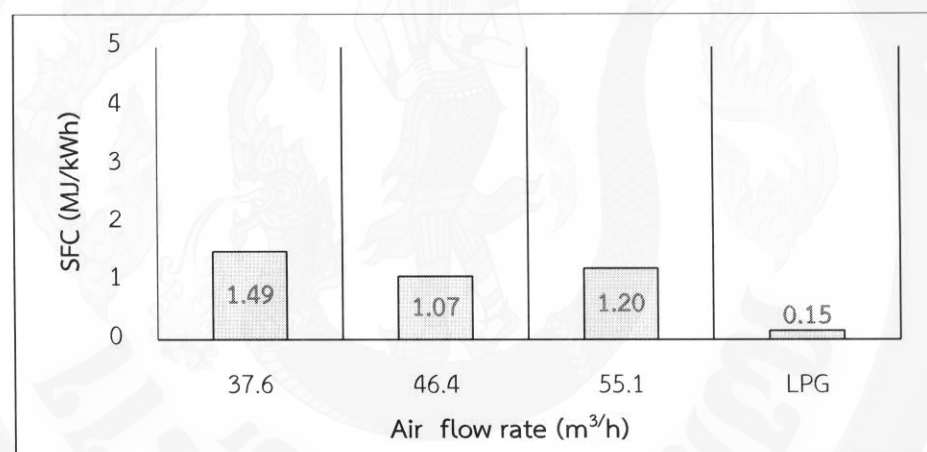
1. ผลของอัตราการป้อนของอากาศที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงาน

1.1 กรณีการใช้ซังข้าวโพด

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานกับอัตราการป้อนอากาศของซังข้าวโพดที่มีความยาวเฉลี่ย 10 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm โดยมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนอากาศ 3 ค่า คือ 37.6, 46.4 และ 55.1 m³/h พบว่าเมื่ออัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้นทำให้อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานสูง ดังภาพที่ 33 และ 34 โดยอัตราการป้อนของอากาศที่ 55.1 m³/h มีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุด 16.50 kg/h และที่อัตราการไหลที่ 37.6 m/s ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำสุด 11.00 kg/h ขณะเดียวกันการป้อนอัตราการไหลอากาศที่ 46.4 m³/h มีการสิ้นเปลืองพลังงานงานต่ำสุด คือ 1.07 MJ/kWh จากงานวิจัยที่มีการศึกษามาแล้วพบว่าการป้อนอัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้นในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาชีวมวลให้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบสมรรถนะการทำงานกับเตาก๊าซหุงต้ม พบว่าการใช้เตาชีวมวลแบบไร้ควันมีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่า 12 เท่า และมีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่าถึง 7 เท่า



ภาพที่ 33 อัตราการสิ้นเปลืองซึ่งข้าวโพดของเตาชีวมวลแบบไร้ควันเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม

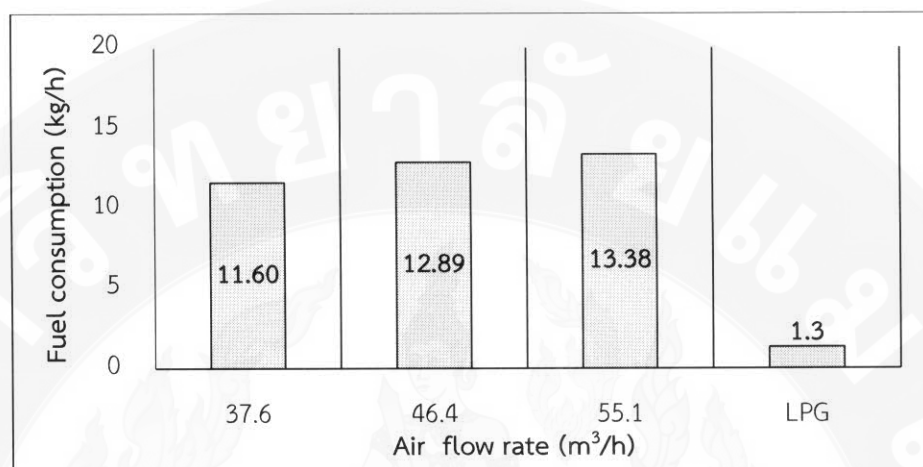


ภาพที่ 34 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเตาชีวมวลแบบไร้ควันเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม

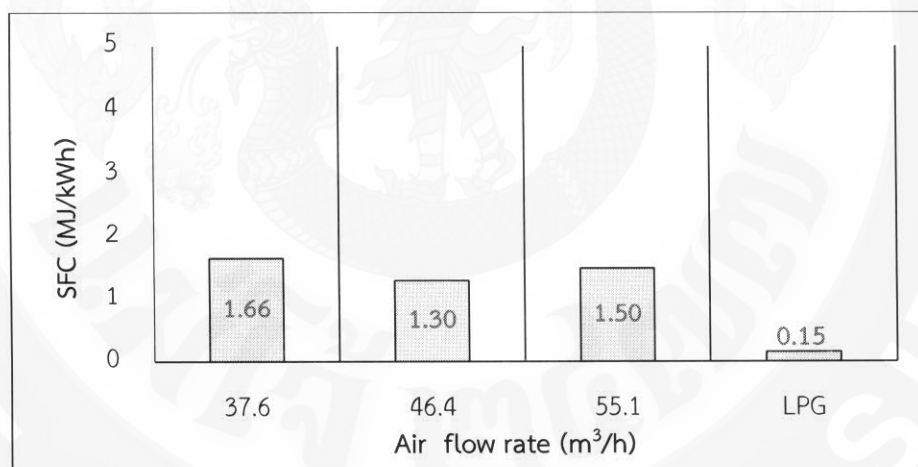
1.2 กรณีการใช้เศษไม้ลำไย

การทดสอบเตาชีวมวลแบบไร้ควันนี้ใช้เศษไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงโดยเลือกใช้ขนาดความยาว 2.54 cm เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.5 cm พบว่าอัตราการป้อนของอากาศที่ 55.1 m³/h มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุด 13.38 kg/h ดังภาพที่ 35 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดคืออัตราการป้อนของอากาศที่ 37.6 m³/h ในขณะเดียวกันอัตราการป้อนของอากาศที่ 37.6 m³/h ก็ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงสุด 1.66 MJ/kWh เช่นกัน ที่อัตราการป้อนอากาศ 46.4 m³/h ให้อัตราความสิ้นเปลืองทางพลังงานต่ำสุด คิดเป็นอัตราสิ้นเปลืองพลังงานเท่ากับ 1.30 MJ/kWh ดังภาพที่ 36 ผลการปรับอัตราการป้อนของอากาศที่เหมาะสมจะส่งผลทำให้ชีวมวลประเภทเศษไม้ปลดปล่อย

พลังงานได้สูงสุดและช่วยในการระเหยของน้ำในการต้มได้สูงสุดและเมื่อเทียบกับการใช้งานเตาแก๊ส
หุงต้ม พบว่าการใช้เตาชีวมวลแบบไร้ควันให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงกว่าถึง 7.5 เท่า



ภาพที่ 35 อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของไม้ลำไย

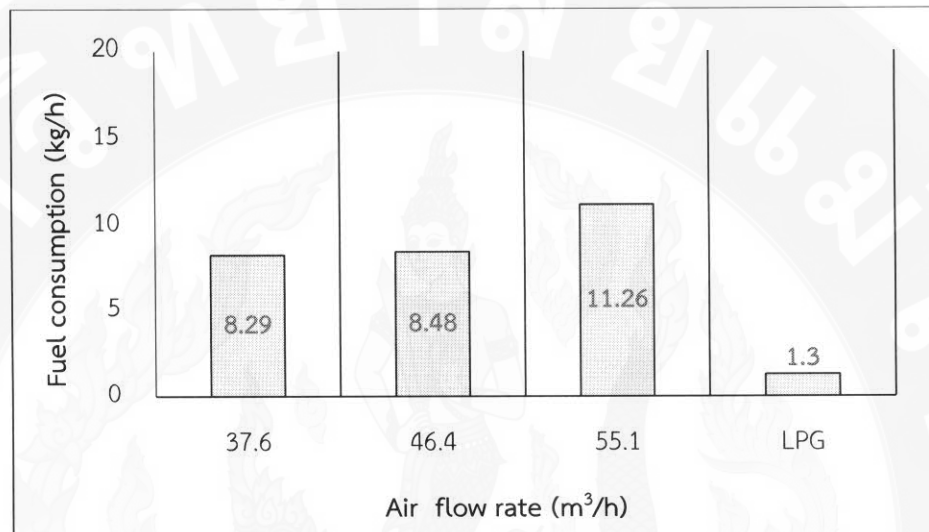


ภาพที่ 36 อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของไม้ลำไย

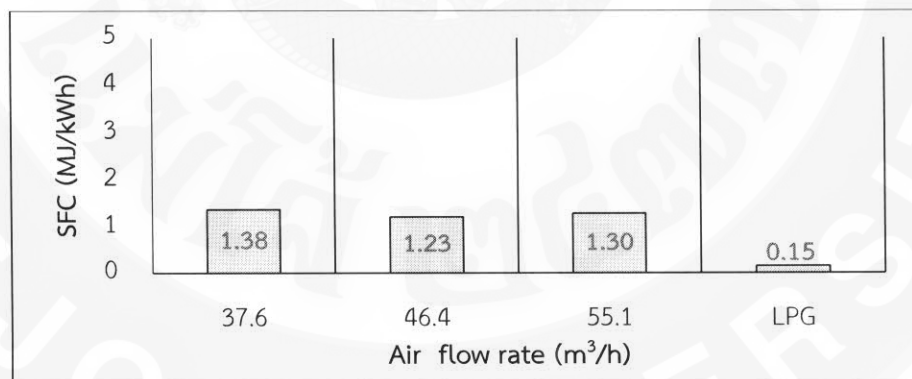
1.3 กรณีการใช้แกลบ

การใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลแบบไร้ควันพบว่าการปรับอัตราการป้อนของ
อากาศเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น ที่อัตราการป้อนอากาศ 55.1 m³/h
มีการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดเป็น 11.26 kg/h ดังภาพที่ 37 รองลงมาได้แก่อัตราการป้อนอากาศ
46.4 m³/h และ 37.6 m³/h ตามลำดับ การเพิ่มอัตราการป้อนของอากาศส่งผลทำให้การลุกไหม้ของ

เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกับเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ อัตราการป้อนอากาศที่ $37.6 \text{ m}^3/\text{h}$ ให้ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงสุด $1.38 \text{ MJ}/\text{kWh}$ ดังภาพที่ 38 ถัดลงมาเป็นอัตราการป้อนอากาศที่ $55.1 \text{ m}^3/\text{h}$ และ $46.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานเทียบกับเตาก๊าซ ก๊าซหุงต้มพบว่าเตาซีมวลแบบไร้ควันให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าถึง 7 เท่า



ภาพที่ 37 อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแก๊ส

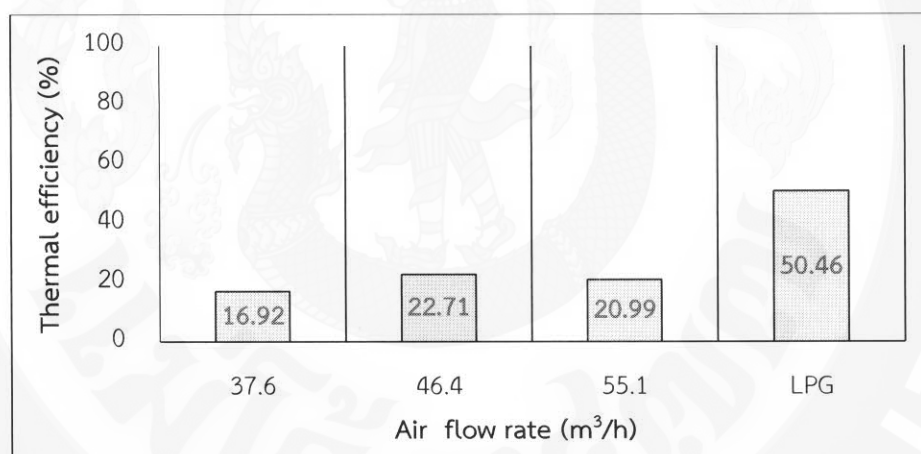


ภาพที่ 38 อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของแก๊ส

2. ผลของอัตราการป้อนอากาศที่มีต่อประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลไร้ควัน

2.1 กรณีการใช้ซังข้าวโพด

ผลของอัตราการป้อนของอากาศที่มีผลกับประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงพบว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่ $46.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ได้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 22.71 ดังภาพที่ 39 และที่อัตราการไหลของอากาศที่ $37.6 \text{ m}^3/\text{h}$ ทำให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำสุดร้อยละ 16.92 ดังนั้นผลของอัตราการป้อนของอากาศที่เหมาะสมสำหรับซังข้าวโพดขนาด 10 cm ที่อัตราการไหล $46.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด และที่อัตราการไหลที่ $37.6 \text{ m}^3/\text{h}$ ให้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.42 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของทฤษฎีของซังข้าวโพดคือ 5.17 ซึ่งการที่อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ำกว่าทฤษฎีส่งผลต่อการเผาไหม้ตามหลักการของก๊าซซิฟิเคชันซึ่งเชื้อเพลิงแข็งจะถูกแปลงสภาพเป็นก๊าซเชื้อเพลิงแล้วเกิดการเผาไหม้ขึ้นอีกครั้งบริเวณหัวเตา จากการสังเกตควันหรือก๊าซที่ได้หลังจากการเผาไหม้ค่อนข้างสะอาดเมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบเผาไหม้โดยตรง

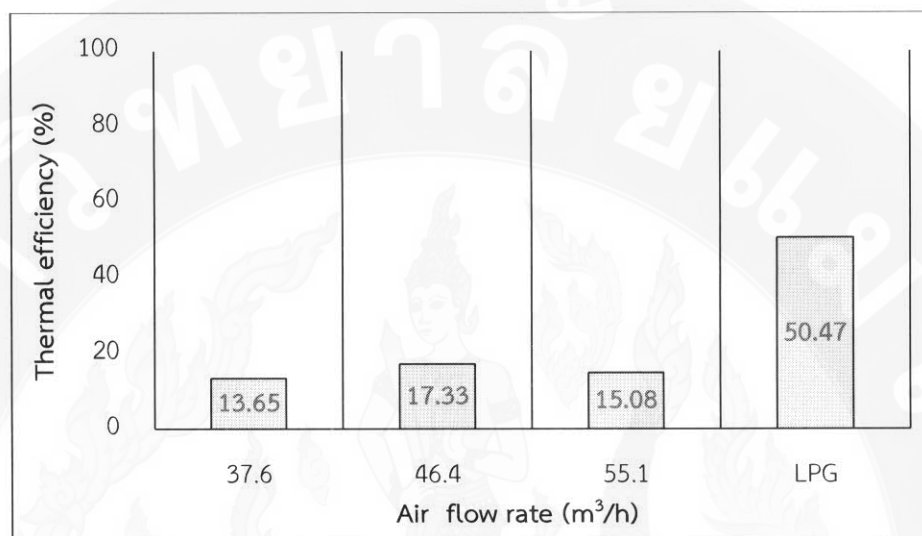


ภาพที่ 39 ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง

2.2 กรณีใช้เศษไม้ลำไย

ในกรณีของประสิทธิภาพของเตาชีวมวลจากเศษไม้ลำไยที่ทำการศึกษานี้ผลของอัตราการป้อนของอากาศที่มีผลกับประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล พบว่าที่อัตราการไหลของอากาศในช่วง $37.6-55.1$ ได้ค่าประสิทธิภาพ 13.65-17.33 ที่อัตราการป้อนอากาศที่ 46.4 ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 17.33 และที่อัตราการไหลของอากาศที่ 37.6 ทำให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำสุดร้อยละ 13.65 ดังภาพที่ 40 ดังนั้นผลของอัตราการป้อนของอากาศที่เหมาะสมสำหรับเศษไม้ลำไยขนาด 2.54 cm . คือที่อัตราการไหล $46.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดและ

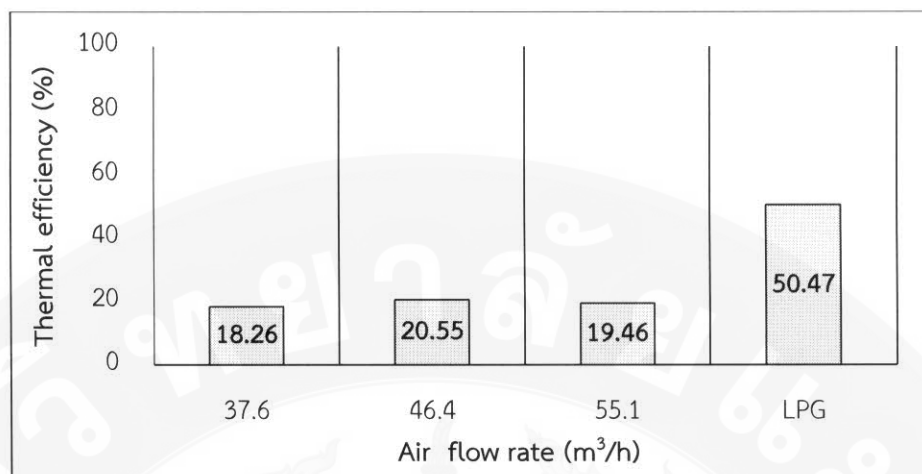
ที่อัตราการไหลที่ 46.4 ให้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ 3.60 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของทฤษฎีที่ซึ่งข้าวโพดคือ 5.17 ซึ่งการที่อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ำกว่าทฤษฎีจะส่งผลดีต่อการเผาไหม้ตามหลักการของกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน



ภาพที่ 40 อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับประสิทธิภาพความร้อน

2.3 กรณีใช้แกลบ

ผลของอัตราการป้อนอากาศให้เตาชีวมวลแบบไร้ควันที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง พบว่าอัตราการป้อนของอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน ที่อัตราการป้อนที่ 46.4 m³/h ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดร้อยละ 20.55 ดังภาพที่ 41 อัตราการป้อนที่ 55.1 m³/h และ 37.6 m³/h ให้ค่าประสิทธิภาพคือ 19.46% และ 18.26% ตามลำดับ การปรับอัตราการป้อนอากาศที่ 46.4 m³/h ให้ค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 5.47 ในขณะที่ในทางทฤษฎีความต้องการอากาศในการเผาไหม้แกลบให้สมบูรณ์จะต้องใช้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเพียง 4.25 เท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงกับเตาชีวมวลไร้ควันจำเป็นต้องใช้อากาศที่มากกว่าจึงจะส่งผลให้เตาชีวมวลมีประสิทธิภาพสูงสุด

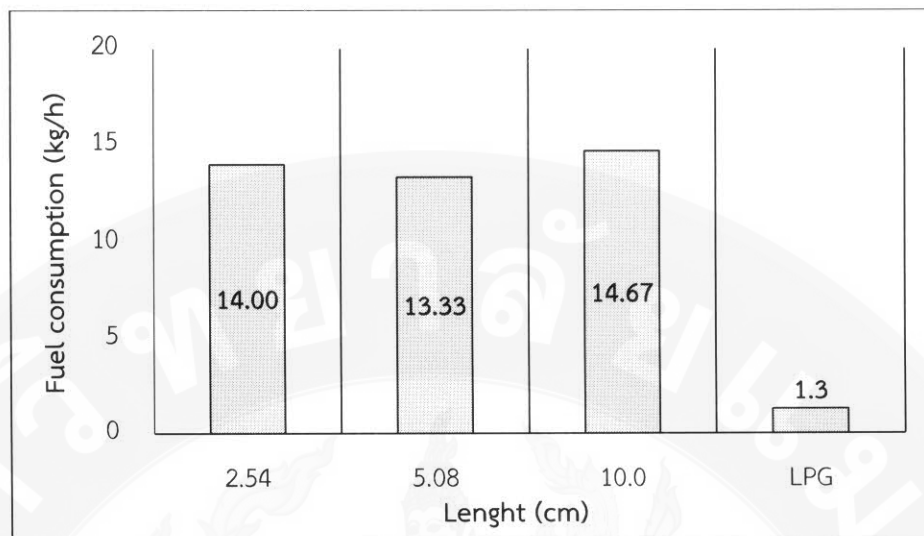


ภาพที่ 41 อัตราการป้อนของอากาศเทียบกับประสิทธิภาพความร้อน

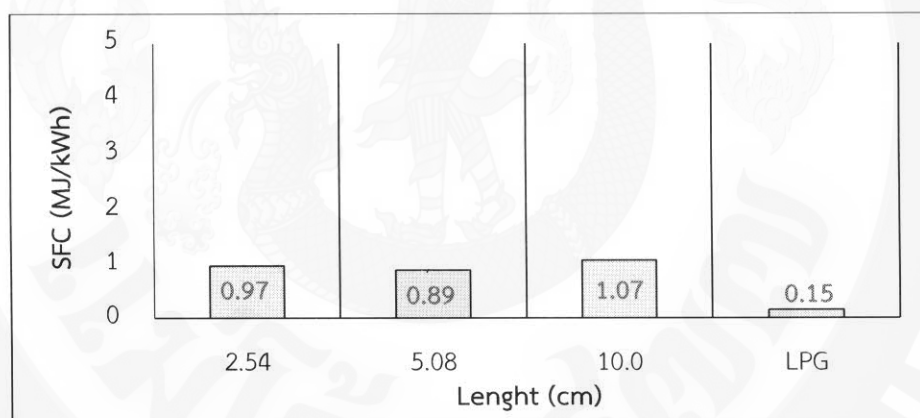
3. ผลของขนาดเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการความร้อนเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงาน

3.1 กรณีใช้ซังข้าวโพด

ผลของการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทซังข้าวโพดที่ขนาดต่างกัน ได้แก่ 2.54, 5.08 และ 10.00 cm ให้แก่เตาชีวมวลแบบไร้ควัน โดยปรับความเร็วลมที่ 5.3 m³/h หรือที่อัตราการไหลอากาศ 46.4 m³/h และขนาดซังข้าวโพดเฉลี่ย 10 cm ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุดถึง 14.67 kg/h ดังภาพที่ 42 รองลงมาคือขนาด 2.54 cm. ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 14.00 Kg/h และที่ขนาดความยาวที่ 5.08 ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำสุดเป็น 13.33 kg/h เช่นเดียวกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานพบว่าที่ความยาวซังข้าวโพด 10 cm ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงสุด รองลงมาที่ขนาด 2.54 และ 5.08 cm ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงคือ 1.07, 0.97 และ 0.89 MJ/kWh ตามลำดับ ดังภาพที่ 41 สาเหตุที่ซังข้าวโพดขนาด 5.08 ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานต่ำสุดนั้น เกิดจากระยะการเผาไหม้จากพื้นผิวส่วนที่ยาวที่สุดไปยังส่วนกลางมีความยาวมากกว่าขนาดเชื้อเพลิงที่ยาว 2.54 cm ส่งผลให้การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น (Orange et al., 2012) ในขณะเดียวกันที่ความยาวที่ 10 cm มีพื้นที่ผิวของวัสดุมากเกินไปทำให้การส่งถ่ายความร้อนของเปลวไฟสามารถถูกล้อมและแพร่กระจายได้มากกว่าเชื้อเพลิงที่มีพื้นที่ผิวน้อย ส่งผลให้มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานสูง ดังภาพที่ 43 (Baldwin, 1987)



ภาพที่ 42 ขนาดของความยาวเชื้อเพลิงที่มีผลกับอัตรา
ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของซังข้าวโพด

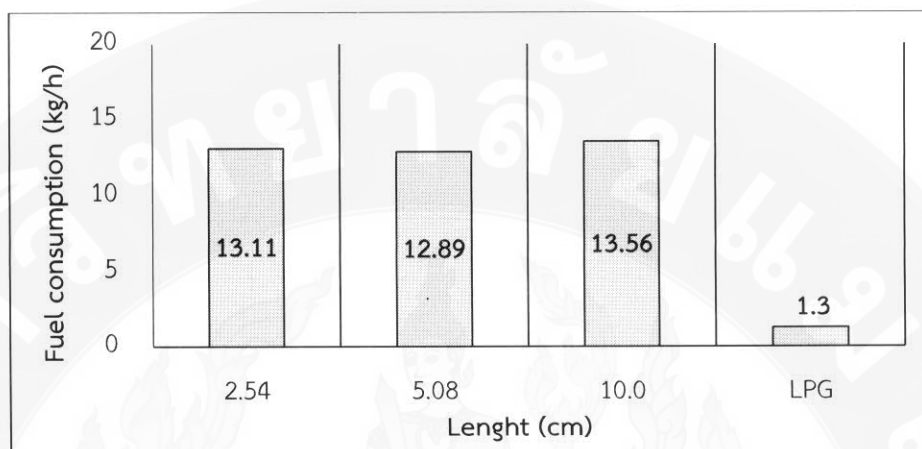


ภาพที่ 43 ขนาดของความยาวเชื้อเพลิงที่มีผลกับอัตรา
ความสิ้นพลังงานของซังข้าวโพด

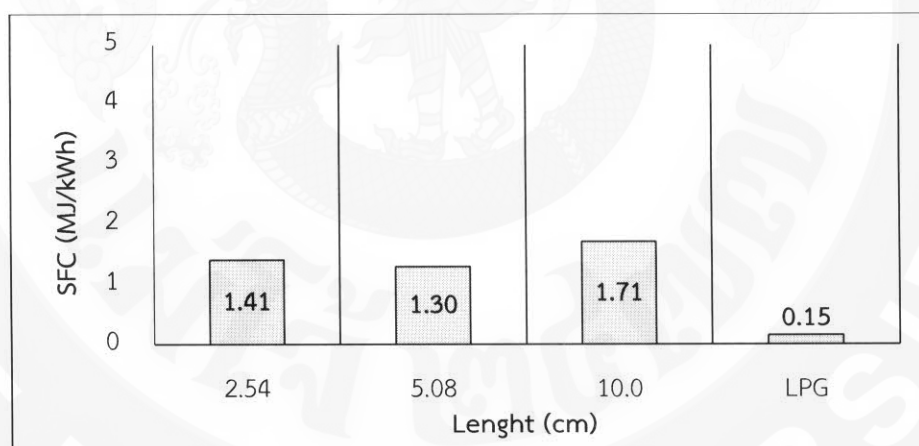
3.2 กรณีใช้ไม้ลำไย

ผลของการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดเศษไม้ลำไยที่ขนาดความยาวที่ต่างกัน ได้แก่ 2.54 5.08 และ 10 cm พบว่าขนาดของไม้ลำไยที่ 10 cm ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงสูงสุด 13.56 kg/h รองลงมาคือขนาดความยาว 2.54 cm และ 5.08 cm ให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 13.11 kg/h และ 12.89 kg/h ตามลำดับ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ขนาดความยาวที่ 10 cm ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานสูงสุด 1.71 MJ/kWh ที่ความยาวขนาด 2.54 cm ให้อัตราการสิ้นเปลือง

พลังงาน 1.41 MJ/kWh และที่ความยาวขนาด 5.08 cm ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานที่ต่ำที่สุดคือ 1.30 MJ/kWh ดังภาพที่ 44 และ 45



ภาพที่ 44 ผลของขนาดความยาวของเชื้อเพลิง
ที่มีผลกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

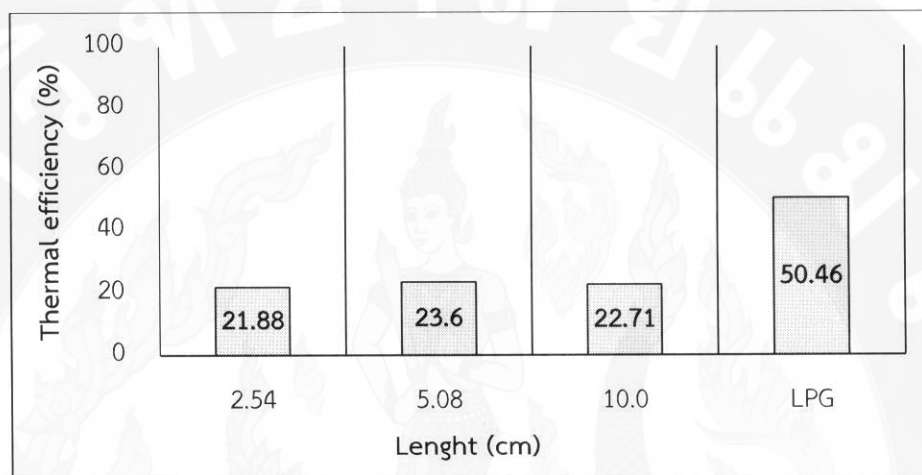


ภาพที่ 45 ผลของขนาดความยาวของเชื้อเพลิง
ที่มีผลกับอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน

4. ผลของขนาดเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลแบบไร้ควัน

4.1 กรณีใช้ซังข้าวโพด

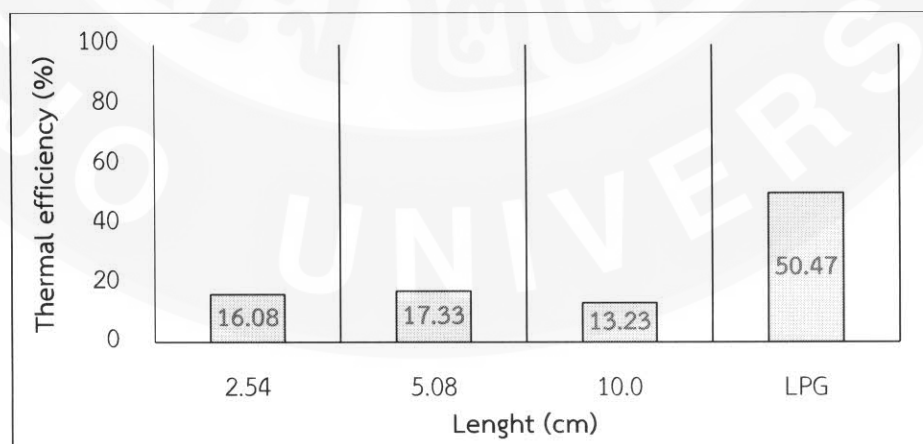
ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลแบบไร้ควันเมื่อป้อนซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง พบว่าขนาดของไม้ลำไย 10 cm ให้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 23.60 ในขณะที่การใช้ไม้ลำไยขนาด 2.54 และ 5.08 cm ประสิทธิภาพคือ 21.88% และ 22.71% ตามลำดับ ดังภาพที่ 46



ภาพที่ 46 ขนาดความยาวซังข้าวโพดมีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน

4.2 กรณีใช้เศษไม้ลำไย

ประสิทธิภาพความร้อนของชีวมวลแบบไร้ควันที่ใช้เศษไม้ลำไยที่มีขนาดต่างกัน พบว่าที่ขนาดเชื้อเพลิง 5.08 cm. ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 17.33% ดังภาพที่ 47 รองลงมาเป็นขนาด 2.54 และ 10 cm ให้ประสิทธิภาพเป็น 16.08% และ 13.23% ตามลำดับ



ภาพที่ 47 ขนาดความยาวของเศษไม้ลำไยที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อน

5. การวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีววมวลจากเตาก๊าซชีววมวลไร้ควัน

องค์ประกอบของโปรตีนเซอร์ก๊าซมีความสำคัญต่อค่าความร้อนของก๊าซที่จะนำไปใช้งานสำหรับเตาก๊าซชีววมวลแบบไร้ควัน องค์ประกอบก๊าซจะมีผลต่อปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ องค์ประกอบก๊าซที่วัดได้จากการทดสอบเตาที่อัตราการป้อนอากาศ 46.4 m/s และที่ขนาดความยาวของช่องข้าวโพดและเศษไม้ลำไย 5.08 cm พบว่าองค์ประกอบก๊าซชีววมวลประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และก๊าซมีเทน (CH₄) โดยการใช้ช่องข้าวโพดมีองค์ประกอบ คาร์บอนมอนอกไซด์ 9.55% ไฮโดรเจน 3.29% และมีเทน 0.31% ส่วนการใช้เศษไม้มีองค์ประกอบ คาร์บอนมอนอกไซด์ 6.96% ไฮโดรเจน 5.95% และมีเทน 1.11% สุดท้ายการใช้แกลบมีองค์ประกอบ คาร์บอนมอนอกไซด์ 11.07% ไฮโดรเจน 7.44% และมีเทน 1.01% ดังตารางที่ 13 ส่วนไนโตรเจน ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ของชีววมวลทั้ง 3 ชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 63.38-69.82% 8.75-12.10% และ 8.11-8.37% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับระบบผลิตก๊าซชีววมวลทั่วไป เตาก๊าซชีววมวลแบบไร้ควันจะให้ความเข้มข้นองค์ประกอบก๊าซชีววมวลที่ต่ำกว่าเตาก๊าซชีววมวล (เตาก๊าซซิฟเฟอร์) ทั่วไปมากกว่า 50% อย่างไรก็ตามเนื่องจากเตาชนิดนี้จะเป็นเตาที่เน้นในด้านการผลิตความร้อนในการต้มน้ำการใช้ค่าความร้อนจากก๊าซเพียงอย่างเดียวจะไม่เพียงพอต่อการผลิตร้อน ดังนั้นความร้อนส่วนหนึ่งที่ได้จากเตาชนิดนี้จะเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ตรงร่วมอยู่ด้วย

ตารางที่ 13 องค์ประกอบก๊าซชีววมวลจากเตาก๊าซชีววมวลไร้ควัน

องค์ประกอบก๊าซ	ผลการทดสอบ (% Vol)			อ้างอิง* เศษไม้
	ช่องข้าวโพด	ไม้ลำไย	แกลบ	
carbon monoxide(CO)	9.55	6.96	11.07	18
Hydrogen(H ₂)	3.29	5.95	7.44	18
methane (CH ₄)	0.31	1.11	1.01	2
carbon dioxide(CO ₂)	8.93	12.10	8.75	10
oxygen (O ₂)	8.11	8.37	8.35	2
Nitrogen(N ₂)	69.82	65.52	63.38	50
Total	100.00	100.00	100.00	100
ความร้อนก๊าซชีววมวล (MJ/Nm ³)	1.60	1.90	2.51	5.5

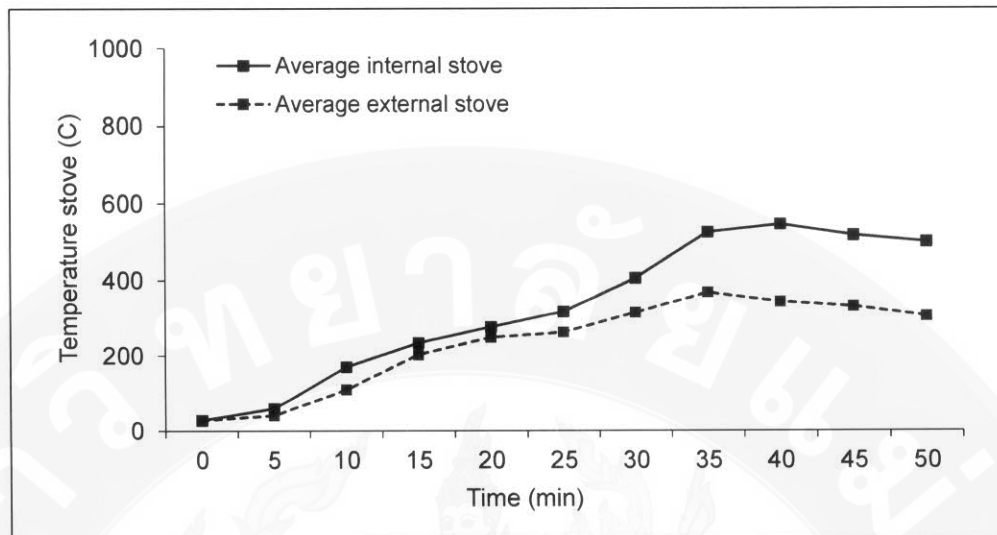
ที่มา: FAO (1986)

6. การวิเคราะห์อุณหภูมิเตาชีวมวลไร่ควัน

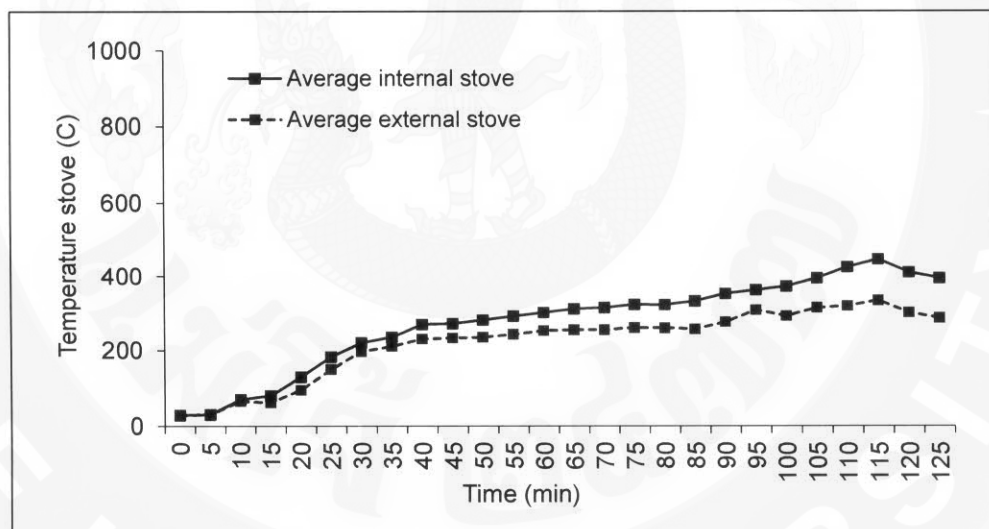
การวิเคราะห์อุณหภูมิเฉลี่ยการทำงานของเตาชีวมวลไร่ควันแยกการวิเคราะห์ออกเป็นชีวมวลแต่ละชนิดซึ่งประกอบด้วย ช้างข้าวโพด เศษไม้และแกลบ การวัดอุณหภูมิได้วัดทั้งหมด 6 จุด คือภายใน 3 จุด และภายนอก 3 จุด ภายในเอาอุณหภูมิทั้งหมดในแต่ละช่วงเวลามาเฉลี่ยกัน รายละเอียดผลการทดสอบวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 46-48 ซึ่งผลการศึกษาของการใช้เตาชีวมวลกับช้างข้าวโพดพบว่าเตาชีวมวลไร่ควันมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 545°C ที่เวลาการเผาไหม้ที่ 40 min ดังภาพที่ 48 อย่างไรก็ตามถ้าวัดอุณหภูมิสูงสุด ณ บริเวณที่ชีวมวลเกิดเผาไหม้อุณหภูมิของเตานี้กับการใช้ช้างข้าวโพดมีอุณหภูมิสูงประมาณ $900-1,000^{\circ}\text{C}$ โดยเป็นการเกิดขึ้นในช่วงท้ายของเวลาเผาซึ่งก็คือช่วงด้านล่างของเตาชีวมวล ในขณะที่ช่วงบนและกลางเตาชีวมวลมีอุณหภูมิช่วง $536-635^{\circ}\text{C}$ และถ้าเปรียบเทียบการสูญเสียความร้อนของอุณหภูมิภายในและภายนอกเตา เตาประเภทนี้มีอุณหภูมิแตกต่างภายในและภายนอกอยู่ในช่วง $19-202^{\circ}\text{C}$ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งเป็นผลมาจากประเภทของวัสดุและความหนาของผนังเตา อย่างไรก็ตามเมื่อมีการหุ้มฉนวนให้กับเตาก็พบว่าการสูญเสียความร้อนไปกับผนังมีแนวโน้มลดลง

ในส่วนของอุณหภูมิเตาชีวมวลเมื่อใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิงพบว่ามีลักษณะเส้นกราฟ อุณหภูมิคล้ายกับกรณีใช้ช้างข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงดังภาพที่ 48 อุณหภูมิภายในและภายนอกของเตาชีวมวลไร่ควันแบบไม่มีฉนวนมีอุณหภูมิแตกต่างกันเล็กน้อย ภายในเตามีอุณหภูมิเฉลี่ย 470°C โดยเกิดขึ้นในช่วงด้านล่างของเตาชีวมวล อุณหภูมิสูงสุดของการใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิเฉลี่ย 900°C การเพิ่มฉนวนเตาชีวมวลส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาเพิ่มสูงขึ้นขณะเดียวกันอุณหภูมิภายนอกก็มีการลดลงและมีแนวโน้มใกล้เคียงเสถียรเมื่อเทียบกับการไม่มีฉนวน

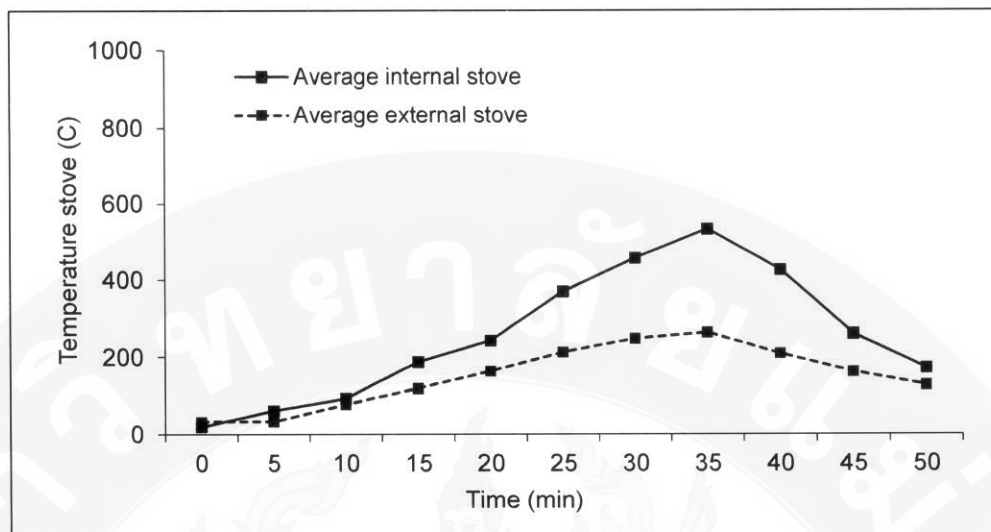
ในส่วนของการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาสูงสุดประมาณ 532°C โดยเกิดขึ้นที่เวลา 35 min ดังภาพที่ 50 อัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิภายในเตาเทียบกับเวลาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง การใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงอุณหภูมิช่วงด้านล่างเตาเมื่อใช้งานเกิน 35 min อุณหภูมิภายในเตาจะลดลงอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นผลมาจากแกลบมีอัตราการเผาไหม้ที่สูง อุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณชีวมวลเกิดเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงประมาณ $700-800^{\circ}\text{C}$ การไม่หุ้มฉนวนส่งผลให้อุณหภูมิภายในและภายนอกเตาแตกต่างกันเฉลี่ยอยู่ในช่วง $28-268^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 48 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในและภายนอกเตาชีวมวลไร้ควัน
เมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 49 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในและภายนอกเตาชีวมวลไร้ควัน
เมื่อใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 50 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในและภายนอกเตาชีวมวลไร่คว้น
เมื่อใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง

7. สรุปสมรรถนะของเตาชีวมวลไร่คว้นสำหรับวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์

การพัฒนาเตาก๊าซชีวมวลไร่คว้นสำหรับวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ ได้มีการศึกษา ออกแบบ และปรับปรุงโดยการติดตั้งชุดป้อนอากาศเข้าไปในตัวเตาชีวมวล ซึ่งทำให้สามารถปรับอัตราการป้อนอากาศ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเตาชีวมวลได้ดีเมื่อเทียบกับเตาชีวมวลแบบดั้งเดิม ส่งผลทำให้ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานลดต่ำลง สามารถเพิ่มระยะเวลาที่ใช้งานได้เพิ่มขึ้นและเมื่อนำเตาชีวมวลที่พัฒนามาเปรียบเทียบกับเตาก๊าซหุงต้มจะเห็นได้ว่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และพลังงานของเตาก๊าซหุงต้มมีค่าต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามถ้าแนวโน้มราคาของก๊าซหุงต้มในอนาคต จะมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและเชื้อเพลิงจากฟอสซิลกำลังจะหมดไป ในอนาคตจะต้องมีการนำเตา ไร่คว้นชีวมวลมาใช้อย่างจริงจังเพิ่มขึ้น เตาชีวมวลไร่คว้นนี้สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงได้หลากหลาย ชนิด เช่น เศษกิ่งไม้ ชังข้าวโพดหรือชีวมวลอื่นๆ ที่เหลือใช้จากการเกษตรตามท้องถิ่นทั่วไป ตารางที่ 14 แสดงผลสรุปสมรรถนะโดยรวมของเตาก๊าซชีวมวลไร่คว้นเมื่อเทียบกับเตาชีวมวลแบบดั้งเดิม เตาก๊าซหุงต้ม เมื่อใช้ชังข้าวโพด ไม้ลำไยและแกลบกับการทดสอบภายใต้หลักการต้มน้ำร้อนที่สอดคล้องกับการต้มน้ำร้อนของเตาในโรงฆ่าสัตว์ของวิสาหกิจชุมชน ผลสรุปสมรรถนะเตาชีวมวลไร่คว้นเมื่อใช้ชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ที่อัตราการป้อนอากาศ $46.4 \text{ m}^3/\text{h}$ และใช้เชื้อเพลิงชีวมวลขนาดความยาว 5.08 cm (พารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด) พบว่าการใช้ชังข้าวโพดจะให้อัตราความสิ้นเปลืองชีวมวลและประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 14.67 kg/h และ 22.71% ตามลำดับ ในส่วนของไม้ลำไยจะให้อัตราความสิ้นเปลืองชีวมวลและประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 12.89 kg/h และ 17.33% ตามลำดับ และ ถ้าเป็นแกลบเตาชีวมวลไร่คว้นให้อัตราความสิ้นเปลืองชีวมวลและประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 8.84

kg/h และ 19.46% ตามลำดับ การใช้ซังข้าวโพดให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 22.71% ซึ่งสูงกว่าการใช้งานเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมและต่ำกว่าการใช้ก๊าซหุงต้ม

ตารางที่ 14 การวิเคราะห์สมรรถนะของเตาชีวมวลไร้ควันสำหรับการใช้งานในวิสาหกิจชุมชน

คุณลักษณะ	เตาก๊าซ	เตาชีวมวล	เตาชีวมวลไร้ควัน		
	หุงต้ม	แบบดั้งเดิม	ซังข้าวโพด	ไม้ลำไย	แกลบ
ระยะเวลาในการใช้งาน (min)	120	45	45	135	55
เชื้อเพลิงที่ใช้	ก๊าซหุงต้ม	ซังข้าวโพด	ซังข้าวโพด	ไม้ลำไย	แกลบ
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)	2.6	9.99	9.99	28.99	7.70
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)	1.3	11	14.67	12.89	8.48
ค่าความร้อนต่ำ(MJ/kg)	46.6	14.26	14.26	15.92	14.61
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน (MJ/h)	60.58	156.86	209.19	205.2	123.89
ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kJ)	8.49	6.06	13.19	9.88	6.70
ปริมาณความร้อนจากเชื้อเพลิง (kJ)	16.82	43.57	58.10	57.00	34.41
ประสิทธิภาพความร้อน (%)	50.46	13.89	23.6	17.33	19.46

หมายเหตุ เตาชีวมวลไร้ควัน ใช้อัตราการป้อนอากาศ 46.4 m/s และใช้เชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 5.08 cm
เตาชีวมวลแบบดั้งเดิม ใช้อัตราการป้อนอากาศ 46.4 m/s และใช้เชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 10 cm

ด้านการเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาชีวมวลไร้ควันสำหรับการใช้งานในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ที่เปรียบเทียบกับขนาดเชื้อเพลิงชีวมวลภายใต้การปรับอัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมคือ 46.4 m³/h พบว่าการใช้ซังข้าวโพดและเศษไม้ที่ขนาด 5.08 cm ให้สมรรถนะเตาชีวมวลไร้ควันสูงสุดทั้งในด้านอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง พลังงานและประสิทธิภาพความร้อน รายละเอียดผลสรุปของสมรรถนะเตาชีวมวลไร้ควันสำหรับการใช้งานในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานกับขนาดเชื้อเพลิงทั้ง 3 ขนาดแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบชนิดและขนาดของชีวมวลที่ต่างกันสำหรับการใช้งานในวิสาหกิจชุมชน

ลักษณะเฉพาะ	ซังข้าวโพด			ไม้ลำไย			แกลบ
	2.54	5.08	10	2.54	5.08	10	
ระยะเวลาในการใช้งาน (min)	60	45	40	150	135	130	55
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)	14	13.33	14.67	13.11	12.89	13.56	8.48
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน (MJ/h)	199.64	190.09	209.19	208.71	205.21	215.88	123.89
ความร้อนจากเชื้อเพลิง (MJ)	55.46	52.80	58.11	57.98	57.00	59.97	34.41
ประสิทธิภาพความร้อน (%)	21.88	23.6	22.71	16.08	17.33	13.23	19.46
ความเร็วลม (m/s)	4.3	5.3	6.3	4.3	5.3	6.3	4.3
A/F	3.42	3.16	3.34	3.24	3.6	4.12	5.47

หมายเหตุ ทดสอบที่ใช้อัตราการป้อนอากาศ 46.4 m/s

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์เตาชีวมวลไร้ควัน สำหรับการใช้งานในวิสาหกิจโรงฆ่าสัตว์

1. การตั้งสมมติฐานและการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลไร้ควัน

ในหัวข้อนี้เป็นการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เตาชีวมวลไร้ควันที่มีการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ ซังข้าวโพด ไม้ลำไยและแกลบ โดยเปรียบเทียบกับการใช้งานก๊าซหุงต้มในการต้มเนื้อของวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ผลการศึกษาพบว่า เตาชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ซังข้าวโพด ไม้ลำไยและแกลบเป็นเชื้อเพลิงจะมีค่าใช้จ่ายรวม 9,772.10 Baht/y, 12,406.05 Baht/y และ 5,872.40 Baht/y ตามลำดับ และในการประเมินราคาการผลิตเตาชีวมวลไร้ควันที่ราคา 12,400 Baht/unit ในการใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ที่ระยะเวลาการใช้งานวันละ 4 ชั่วโมง จะมีระยะเวลาคืนทุน 2.3 year, 5.20 year และ 1.27 year ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พอจะเห็นได้ว่าตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวล เมื่อนำไปใช้งานกับวิสาหกิจชุมชนคือชนิดเชื้อเพลิงซึ่ง ถ้าราคาของเชื้อเพลิงแปรผันเพิ่มสูงขึ้น จะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตและระยะเวลาการคืนทุนเพิ่มสูงขึ้น ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เตาก๊าซชีววมวลไร้ควันสำหรับการใช้งานวิสาหกิจโรงฆ่าสัตว์

ค่าใช้จ่าย	หน่วย	ซังข้าวโพด	ไม้ลำไย	แกลบ
เตาก๊าซชีววมวลไร้ควัน	Baht	12,400	12,400	12,400
อายุการใช้งาน	year	5	5	5
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้	kg/times	11	29	8
ระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิง	h/day	4	4	4
ระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิง	day/year	315	315	315
ราคาเชื้อเพลิง	Baht/kg	0.5	0.75	0.5
ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง	Baht/year	9,242.1	12,406.05	5,342.4
ค่าไฟฟ้า	Baht/year	530	530	530
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด	Baht/year	9,772.10	12,936.05	5,872.40
ระยะเวลาคืนทุน	year	2.3	5.20	1.27

2. การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (ซังข้าวโพด)

ตารางที่ 17 แสดงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงราคาชีววมวลพบว่า ถ้าราคาซังข้าวโพดมีราคาสูงกว่ากิโลกรัมละ 0.75 Baht ค่ารายได้จะมีราคาติดลบ ซึ่งแสดงถึงการขาดทุนไม่คุ้มค่าแก่การลงทุนและที่ราคาเชื้อเพลิงเป็นกิโลกรัมละ 0.75 Baht นั้นมีค่ารายได้เป็น 699.77 Baht ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนเป็น 17.72 Year ซึ่งเกินอายุของเตาก๊าซชีววมวลไร้ควัน ไม่คุ้มค่าแก่การลงทุน ราคาของเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ที่มีระยะเวลาคืนทุนภายในอายุการใช้งานของเตาก๊าซชีววมวลไร้ควันคือ 0.50 Baht/kg ราคาของเชื้อเพลิงที่เป็นไปได้เมื่อเทียบกับค่าก๊าซหุงต้มในปัจจุบัน คือ 0.65 Baht ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนที่ 5 year ดังตารางที่ 16 ซึ่งมีค่าเท่ากับอายุการใช้งานของเตาก๊าซชีววมวลไร้ควัน ถ้าราคาของเชื้อเพลิงที่มากกว่า 0.65 Baht จะมีระยะเวลาคืนทุนที่เกินอายุการใช้งานของเตาดังนั้นจึงไม่เหมาะสมในการลงทุน

ตารางที่ 17 การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (ซังข้าวโพด)

ค่าใช้จ่าย	ราคาซังข้าวโพด (หน่วย:Baht)				
	0.5	0.75	1.00	1.25	1.50
ค่าใช้จ่ายชีวมวล	9,242.1	13,863.15	18484.2	23105.25	27726.3
ค่าไฟฟ้า	530	530	530	530	530
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด	9,772.1	14,393.15	19,014.2	23,635.25	28,256.3
ค่าใช้จ่ายก๊าซหุงต้ม	15,092.92	15,092.92	15,092.92	15,092.92	15,092.92
การวิเคราะห์รายได้	5320.82	699.77			
ค่าต้นทุนเครื่อง	12,400	12,400	12,400	12,400	12,400
ระยะเวลาคืนทุน (year)	2.33	17.72			

3. การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (ไม้ลำไย)

ตารางที่ 18 แสดงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงราคาชีวมวลพบว่าถ้าราคาไม้ลำไยมีราคา กิโลกรัมละ 0.75 Baht มีค่ารายได้เป็น 2,381.87 Baht ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนเป็น 5.20 year ซึ่งเกินอายุของเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน ไม่คุ้มค่าแก่การลงทุน แต่ถ้าราคาของไม้ลำไยมีค่าลดลงเหลือ กิโลกรัมละ 0.50 Baht จะมีค่ารายได้เป็น 6,442.22 Baht ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนเป็น 1.92 year อยู่ในช่วงอายุการใช้งานของเตาชีวมวลไร้ควัน แต่ถ้าราคาไม้ลำไยมีราคาสูงกว่ากิโลกรัมละ 0.75 Baht ค่ารายได้จะมีราคาติดลบ ซึ่งแสดงถึงความขาดทุนไม่คุ้มค่าแก่การลงทุน ดังนั้นราคาของเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ที่มีระยะเวลาคืนทุนภายในอายุการใช้งานของเตาก๊าซชีวมวลไร้ควันคือ 50 Baht/kg หรือ 0.5 baht/kg และไม่ควรมากเกิน 74 Baht เมื่อเทียบกับราคาก๊าซหุงต้มในปัจจุบัน ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนที่ 5 year ซึ่งมีค่าเท่ากับอายุการใช้งานของเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน ถ้าราคาของเชื้อเพลิงที่มากกว่า 0.75 Baht จะมีระยะเวลาคืนทุนที่เกินอายุการใช้งานของเตาดังนั้นจึงไม่เหมาะสมในการลงทุน

ตารางที่ 18 การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (ไม้ลำไย)

ค่าใช้จ่าย	ราคาไม้ลำไย (หน่วย:บาท)				
	0.5	0.75	1.00	1.25	1.50
ค่าใช้จ่ายชีวมวล (บาท)	8120.7	12181.05	16241.4	20301.75	24362.1
ค่าไฟฟ้า (บาท)	530	530	530	530	530
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	8650.7	12711.05	16771.4	20831.75	24892.1
ค่าใช้จ่ายก๊าซหุงต้ม (บาท)	15,092.92	15,092.92	15,092.92	15,092.92	15,092.92
การวิเคราะห์รายได้ (บาท)	6442.22	2381.87			
ค่าต้นทุนเครื่อง (บาท)	12,400	12,400	12,400	12,400	12,400
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	1.92	5.20			

4. การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (แก๊ส)

จากตารางผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงพบว่าถ้าราคาแก๊สมีราคาสูงกว่า กิโลกรัมละ 1.25 Baht ค่ารายได้จะมีราคาติดลบ ซึ่งแสดงถึงการขาดทุนและความไม่คุ้มค่าแก่การลงทุน ที่ราคาเชื้อเพลิงเป็นกิโลกรัมละ 1.25 Baht นั้น มีค่ารายได้เป็น 1,206.92 Baht ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนเป็น 10.27 Baht ซึ่งเกินอายุของเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน ไม่คุ้มค่าแก่การลงทุน ราคาของเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่มีระยะเวลาคืนทุนภายในอายุการใช้งานของเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน คือ 1.34-1 Baht/kg และราคาของเชื้อเพลิงที่เป็นไปได้เมื่อเทียบกับค่าก๊าซหุงต้ม ในปัจจุบัน คือ 1.13 Baht ซึ่งจะมีระยะเวลาคืนทุนที่ 5 year (ตารางที่ 19) ซึ่งมีค่าเท่ากับอายุการใช้งานของเตาก๊าซชีวมวลไร้ควัน ถ้าราคาของเชื้อเพลิงที่มากกว่า 1.13 Baht จะมีระยะเวลาคืนทุนที่เกินอายุการใช้งานของเตา ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมในการลงทุน

ตารางที่ 19 การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง (แก๊ส)

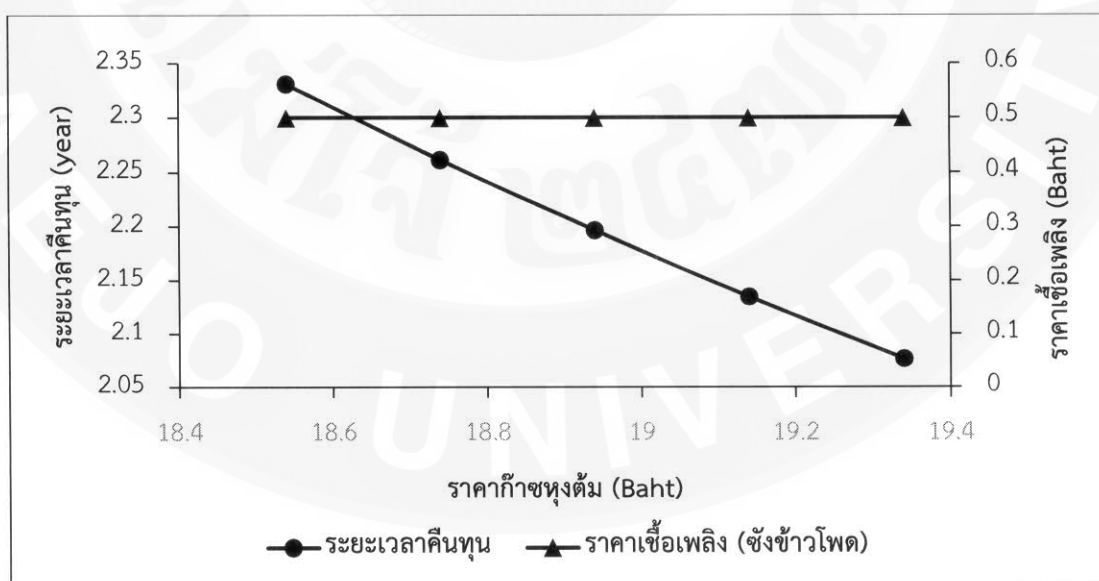
ค่าใช้จ่าย	ราคาไม้ลำไย (หน่วย:บาท)				
	0.5	0.75	1.00	1.25	1.50
ค่าใช้จ่ายชีวมวล (บาท)	5,342.4	8,013.6	10,684.8	13,356	1,6027.2
ค่าไฟฟ้า (บาท)	530	530	530	530	530
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	5,872.4	8,543.6	11,214.8	13,886	16,557.2

ตารางที่ 19 (ต่อ)

ค่าใช้จ่าย	ราคาไม้ลำไย (หน่วย: Baht)				
	0.5	0.75	1.00	1.25	1.50
ค่าใช้จ่ายก๊าซหุงต้ม (บาท)	15,092.92	15,092.92	15,092.92	15,092.92	15,092.92
การวิเคราะห์รายได้	9,220.52	6,549.32	3,878.12	1,206.92	
ค่าต้นทุนเครื่อง	12,400	12,400	12,400	12,400	12,400
ระยะเวลาคืนทุน (year)	1.34	1.89	3.19	10.27	

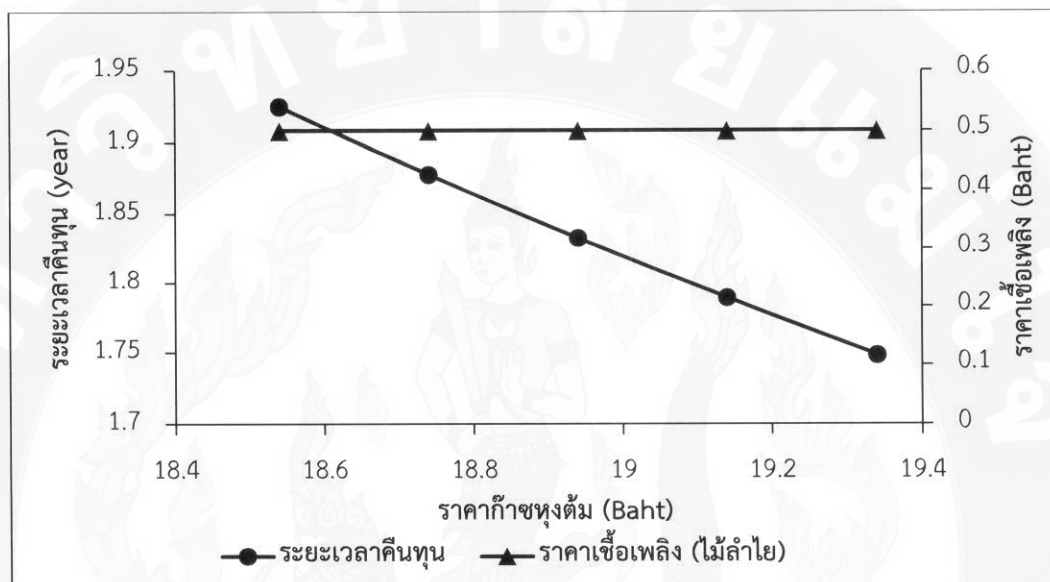
5. การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาของก๊าซหุงต้ม

ราคาก๊าซหุงต้มในปัจจุบันมีราคา 885 Baht/unit (48 kg/unit) ซึ่งจะมีราคา กิโลกรัมละ 18.45 Baht/kg ถ้าในอนาคตก๊าซ ก๊าซหุงต้ม มีราคาผันผวน มีค่าเพิ่มขึ้น กิโลกรัมละ 0.20 Baht ซึ่งจะมีผลกระทบต่อระยะเวลาคืนทุนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดดังภาพที่ 51 จากการวิเคราะห์กราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อราคาของเชื้อเพลิงชีวมวล (ซังข้าวโพด) มีราคาคงที่คือ กิโลกรัมละ 0.50 Baht เมื่อเทียบกับราคาก๊าซหุงต้มในปัจจุบัน จะให้ผลตอบแทนในระยะเวลา 2.33 year ถ้าในอนาคตก๊าซหุงต้มมีราคาเปลี่ยนแปลงไป กิโลกรัมละ 0.20 Baht แต่ราคาของเชื้อเพลิงมีค่าคงที่จะให้ผลตอบแทนในระยะเวลาที่สั้นลง



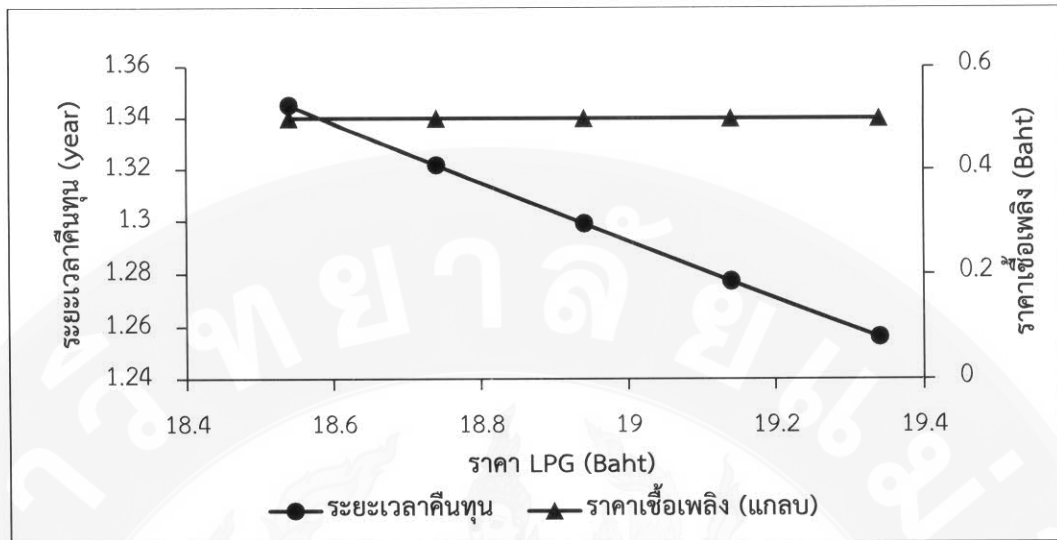
ภาพที่ 51 การเปลี่ยนแปลงราคาก๊าซหุงต้มเทียบกับ
ราคาซังข้าวโพดและระยะเวลาคืนทุน

ในส่วนของการใช้ไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงแสดงในภาพที่ 52 จะเห็นว่าเมื่อราคาของไม้ลำไยมีราคา กิโลกรัมละ 0.50 Baht เมื่อเทียบกับราคา ก๊าซหุงต้มในปัจจุบันจะให้ผลตอบแทนในระยะเวลา 1.92 year ถ้าในอนาคตราคา ก๊าซหุงต้มเปลี่ยนแปลงไป กิโลกรัมละ 0.20 Baht แต่ราคาของเชื้อเพลิง ไม้ลำไยที่มีค่าคงที่จะให้ผลตอบแทนในระยะเวลาที่สั้นลงเช่นเดียวกับการใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง



ภาพที่ 52 การเปลี่ยนแปลงราคา ก๊าซหุงต้มเทียบกับ
ราคาไม้ลำไยและระยะเวลาคืนทุน

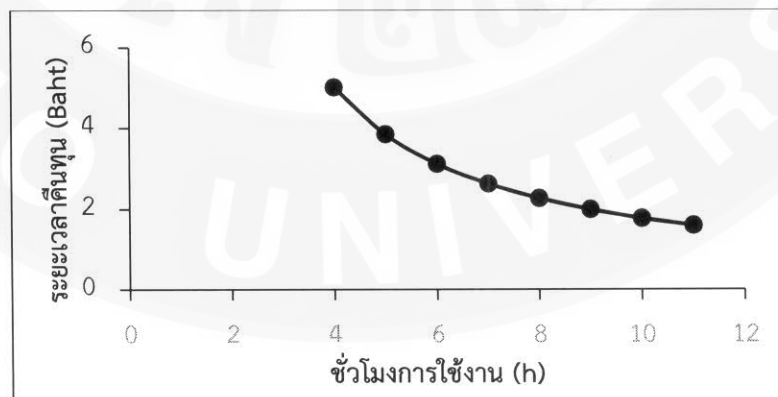
ในส่วนของการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงจะเห็นว่าเมื่อราคาของแกลบมีราคา กิโลกรัมละ 0.50 Baht เมื่อเทียบกับราคา ก๊าซหุงต้มในปัจจุบันจะให้ผลตอบแทนในระยะเวลา 1.34 year ถ้าในอนาคต ก๊าซหุงต้มมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น กิโลกรัมละ 0.20 Baht ในขณะที่ราคาของซังมวลแกลบมีค่าคงที่ จะให้ผลตอบแทนในระยะเวลาที่สั้นลงเหมือนกับการใช้ซังข้าวโพดแต่ละไม้ลำไยดังภาพที่ 53



ภาพที่ 53 การเปลี่ยนแปลงราคาแก๊ซหุงต้มเทียบกับ
ราคาแกลบและระยะเวลาคืนทุน

6. การวิเคราะห์ชั่วโมงการใช้งานที่มีผลต่อระยะเวลาคืนทุน

การวิเคราะห์ชั่วโมงการใช้งานของเตาชีวมวลแบบไร้ควันที่ใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้ลำไย ถ้าใช้เตาชีวมวลแบบไร้ควันแทนการใช้แก๊ซหุงต้มเป็นระยะเวลา 4 h และใช้ราคาของไม้ลำไยเป็น กิโลกรัมละ 75 สตางค์ จะมีระยะการคืนทุนที่เกินอายุการใช้งานของเตา (ระยะเวลาคืนทุน 5 year 2 month 13 day) แต่ถ้ามีการใช้งานของไม้ลำไยที่มีระยะเวลาชั่วโมงการใช้งานที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อระยะเวลาการคืนทุนลดลง สามารถคืนทุนได้เร็วขึ้นหรือสามารถคืนทุนได้ภายในอายุการใช้งานของเตาชีวมวลไร้ควันดังภาพที่ 54



ภาพที่ 54 การวิเคราะห์ชั่วโมงการใช้งานที่มีผลต่อระยะเวลาคืนทุน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. เต่าชีวมวลแบบไร้ควันสำหรับการนำเอาไปใช้ในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ ที่ออกแบบสร้างมี 2 ส่วน คือส่วนของตัวเต่าชีวมวลไร้ควัน ซึ่งประกอบด้วย หัวเต่าชีวมวล ห้องเผาไหม้ และตะแกรงรองชีวมวลหรือถ้ำ โดยห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 cm และสูง 60 cm ชุดป้อนอากาศประกอบด้วย พัดลมป้อนอากาศและอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมกระแสไฟฟ้า การใช้เต่าชีวมวลแบบดั้งเดิมให้อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 11 kg/h และ 11.8 kg/h เมื่อใช้ ชังข้าวโพดและเศษไม้เป็นเชื้อเพลิง คิดเป็นความสิ้นเปลืองทางพลังงานเป็น 156.86 MJ/h และ 187.85 MJ/h ตามลำดับ การใช้ชังข้าวโพดและเศษไม้เป็นเชื้อเพลิงกับเตาชนิดนี้ให้ประสิทธิภาพ ความร้อนสูงสุด 13.8% – 14.2% ในขณะที่การใช้เต่าก๊าซหุงต้มให้ความร้อนสูงสุดเฉลี่ย 50.46%
2. อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมที่สุดของการใช้เต่าชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ ชังข้าวโพด เศษ ไม้และแกลบมีค่าเท่ากับ 46.4 m³/h โดยที่อัตราการป้อนอากาศดังกล่าวกับเชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ส่งผลให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดและประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด
3. การเลือกใช้ชังข้าวโพดและเศษไม้ขนาดความยาว 5.08 cm ให้สมรรถนะเต่าเต่าชีวมวลไร้ ควันสูงสุด ทั้งในด้าน ประสิทธิภาพความร้อน อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงาน เมื่อเทียบ กับการเลือกใช้เชื้อเพลิงชีวมวลขนาด 2.54 cm และ 10 cm
4. การใช้ชังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงให้กับเต่าชีวมวลไร้ควันให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเมื่อ เทียบการใช้เศษไม้และแกลบเป็นเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดของเต่าชีวมวลไร้ควันที่ เงื่อนไขการป้อนอากาศ 46.4 m³/h และความยาวเชื้อเพลิงชีวมวล 5.08 cm เมื่อใช้ชังข้าวโพดเป็น เชื้อเพลิงเท่ากับ 23.6% ในขณะที่การใช้เศษไม้และแกลบให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเท่ากับ 17.33% และ 19.46% ตามลำดับ
5. การประเมินเศรษฐศาสตร์การผลิตความร้อนของเต่าชีวมวลไร้ควันให้กับวิสาหกิจชุมชน โรงฆ่าสัตว์เมื่อใช้ชังข้าวโพด ไม้ลำไยและแกลบเป็นเชื้อเพลิงจะมีค่าใช้จ่ายรวม 9,772.10 Baht/y 12,406.05 Baht/y และ 5,872.40 Baht/y ตามลำดับ และในการประเมินราคาการผลิตเต่าชีวมวล ไร้ควันที่ราคา 12,400 baht/Unit ในการใช้เชื้อเพลิงทั้ง 3 ชนิด ที่ระยะเวลาการใช้งานวันละ 4 hr จะมีระยะเวลาคืนทุน 2.3 year 5.20 year และ 1.27 year ตามลำดับ
6. ราคาต้นทุนของเชื้อเพลิงชีวมวล ราคาก๊าซหุงต้มและชั่วโมงการทำงานของเต่าชีวมวลไร้ ควันมีผลต่อรายได้ของการใช้งานเต่าชีวมวล (ผลประโยชน์) และระยะเวลาการคืนทุนของการใช้งาน

เตาชีวมวลไร้ควัน การเพิ่มขึ้นของราคาเชื้อเพลิงชีวมวล ก๊าซหุงต้มและการลดชั่วโมงการทำงานส่งผลให้ต้นทุนการใช้เตาชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. เตาชีวมวลไร้ควันในโครงการวิจัยนี้ถือว่าเป็นการพัฒนาเตาต่อยอดในช่วงที่ 2 ของการวิจัย ซึ่งถือว่าได้ประสบผลความสำเร็จในการวิจัยเพิ่มขึ้นระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามถ้าต้องการให้สามารถเพิ่มขีดความสามารถการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดควรปรับปรุงรูปแบบของการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลให้สามารถเติมเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่องในอัตราการป้อนที่คงที่ ซึ่งสุดท้ายจะสามารถควบคุมอัตราส่วนของอากาศ/เชื้อเพลิงได้ดีเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนของเตาเพิ่มสูงขึ้น
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมกับการใช้เชื้อเพลิงคุณภาพสูง เช่นเชื้อเพลิงอัดเม็ดหรืออัดแท่ง เป็นต้น เนื่องจากเชื้อเพลิงประเภทนี้มีขนาดรูปร่างที่แน่นอน มีขนาดเล็ก ดังนั้นความสามารถในการคลุกเคล้าและการผสมกับอากาศจะดีขึ้นกว่าเชื้อเพลิงที่มีรูปร่างไม่แน่นอน สมรรถนะโดยรวมของเตาชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้เชื้อเพลิงประเภทนี้จะเพิ่มขึ้นได้อีกอย่างแน่นอน

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2555. **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 10**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.dede.go.th/dede/images/stories/dede_aedp_2012_2021.pdf (15 สิงหาคม 2557).
- _____. 2556ก. **ชีวมวล**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html (28 เมษายน 2560).
- _____. 2556ข. **สถิติพลังงานของประเทศไทย**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www4.dede.go.th/download/thailandenergystatistics_2013.pdf (18 สิงหาคม 2557).
- _____. 2559. **คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทนแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล (ส่วนทฤษฎี)**. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- จิตรารภรณ์ วงศ์จีนา และ อุตราวดี ชื่นทิม. 2555. **การพัฒนาและการเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลเชื้อเพลิงแกลบสำหรับชุมชน**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ชนธกานต์ ไสยง และ จักรกฤต ไคร์โห่ง. 2555. **การพัฒนาและการเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลสำหรับครัวเรือน**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ไชยวัฒน์ จวงทอง. 2553. **การออกแบบเตาปฏิกรณ์ผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากไบอ้อยโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ฐิติกร บุญชูวงศ์. 2551. **การผลิตโปรตีนเคซีนโดยใช้เศษผักเป็นเชื้อเพลิงเพื่อนำความร้อนทิ้งจากการเผาของเสียทางเคมีไปใช้ผลิตเครื่องปั้นดินเผา**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ณัฐวุฒิ ดุษฎี, อภิชาติ สวนคำกอง, ชูรัตน์ ธารารักษ์ และ นิกราน ทอมดวง. 2551. **รายงานการศึกษาการใช้ชีวมวลในภาคเศรษฐกิจต่างๆ และชีวมวลที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์ (ภาคเหนือ)**. เชียงใหม่: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อมร่วมกับศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธเนศ ไชยชนะ. 2547. **การวิเคราะห์พลังงานเพื่อการผลิตข้าวในภาคเหนือของประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นคร ทิพย์วงศ์. 2553. **เทคโนโลยีการเปลี่ยนสภาพชีวมวล**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).

- นิมิต นิพัทธ์ธรรมกุล. 2553. การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากตะกอนน้ำเสียของนิคมอุตสาหกรรมเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- นิมิต บุญภิรมย์ และคณะ. 2553. โครงการ “การจัดการมาตรฐานคุณภาพโลจิสติกส์ถ่านหิน” The Quality Management of the Caol Logistical Standard. รายงานฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: สำนักกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว).
- ปรัชญา กรีส. 2555. การทดสอบระบบผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยโดยเทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชันแบบไหลลง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2554. ผลงานมูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อมประจำปี พ.ศ. 2554-2555. กรุงเทพฯ: มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม.
- วรารณ ทุมชาติ. 2557. การผลิตโปรติวเซอร์แก๊สจากเตาแบบ Inverted Downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยลำปาง, 7(1), 26-39.
- สมมาส แก้วล้วน, ดำรงค์ศักดิ์ จันทสิทธิ์, สุรัชย์ จันทสิทธิ์ และ เวคิน ปิยรัตน์. 2556. การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 8(1), 24-33.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2559. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2559. กรุงเทพฯ: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
- สุธินี หิรัญประเสริฐศรี และ สุเทพ บุตรดี. 2557. การศึกษาสภาวะเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝังกลบโดยผ่านกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 9(1), 16-27.
- Ashrafi, O., Bedard, S., Bakhtiari, B. & Poulin, B. 2015. Heat recovery and heat pumping opportunities in a slaughterhouse. *Energy*, 89, 1-13
- Belonio, A. T. 2005. *Rice Husk Stove Handbook*. Iloilo City, Philippine: Appropriate Technology Center, Department of Agricultural Engineering and Environmental Management.
- FAO Corporate document repository. 1986. **Wood gas as engine fuel**. [Online]. Available www.fao.org/DOCREP/T0512E/Contents. (23 June 2016).

- Ojolo, S. J., Ismail, S. O., Orisaleye, J. I. & Odutayo, A. F. 2012. Development of an inverted downdraft biomass gasifier cookstove. **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences**, 3(3), 513-513.
- Panwar, N. L. & Rathore, N. S. 2008. Design and performance evaluation of a 5 kW producer gas stove. **Biomass And Bioenergy**, 32, 1349– 1352.
- Pitaksa Suvarnakuta & Prapaporn Suwannakuta. 2006. Biomass Cooking Stove for Sustainable Energy and Environment. **The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)**, 2, 1-5.
- Vyas, D. K., Dipak, T., Viral, M. & Akbari, S. H. 2014. Design and Development of Inverted Down Draft Gasifier for Cooking Purpose. **Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)**, 2(2A), 113-122.

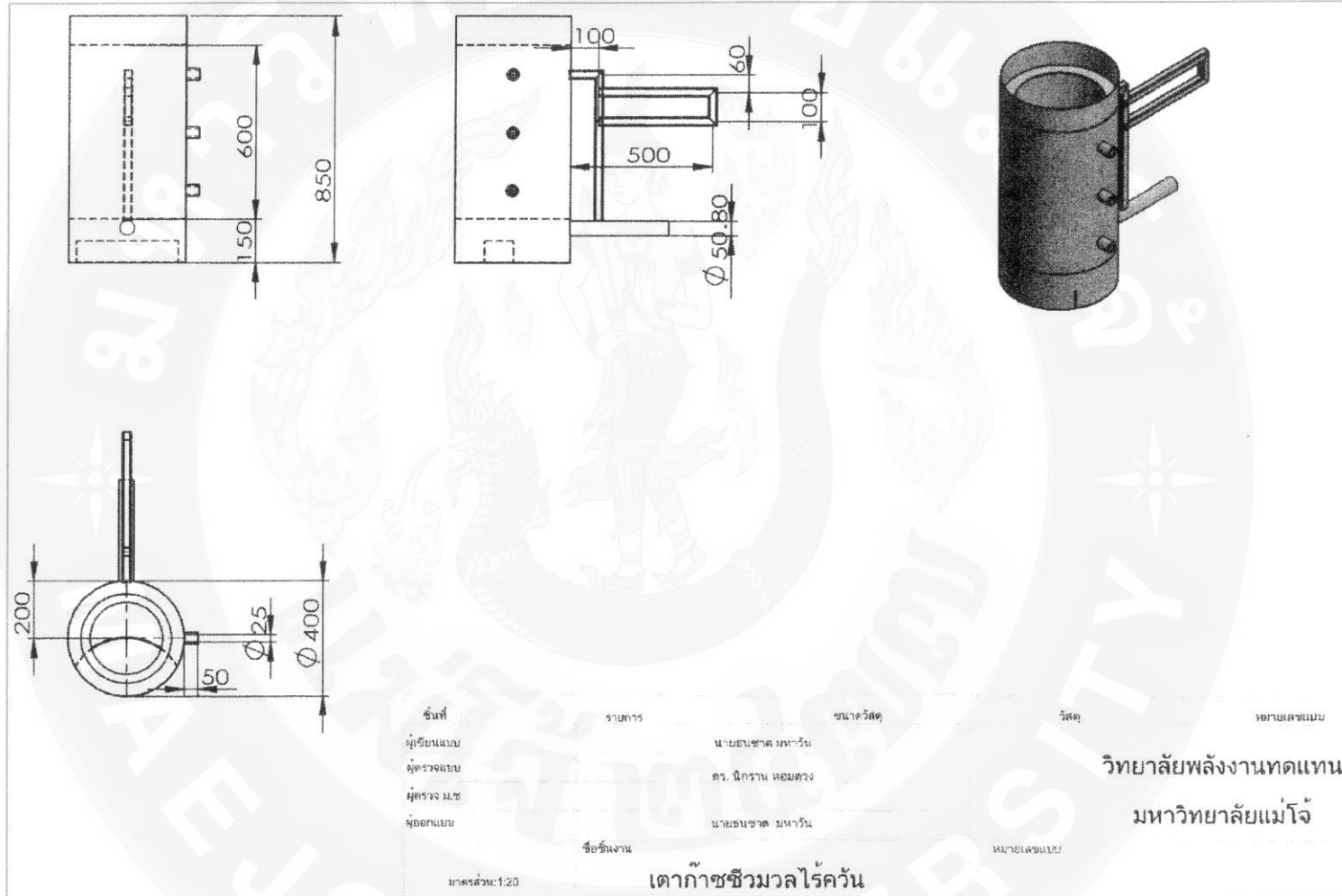


ภาคผนวก

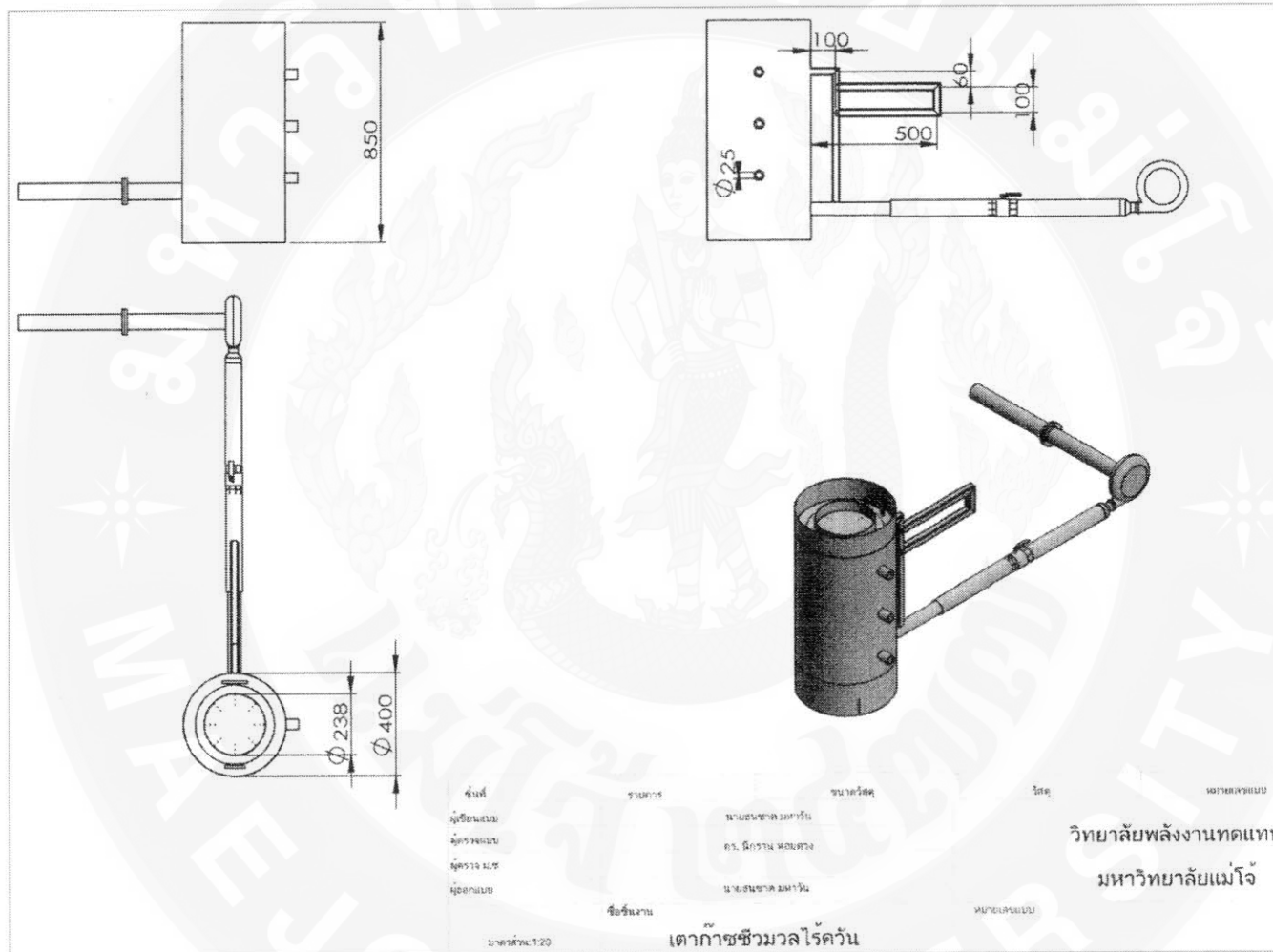


ภาคผนวก ก

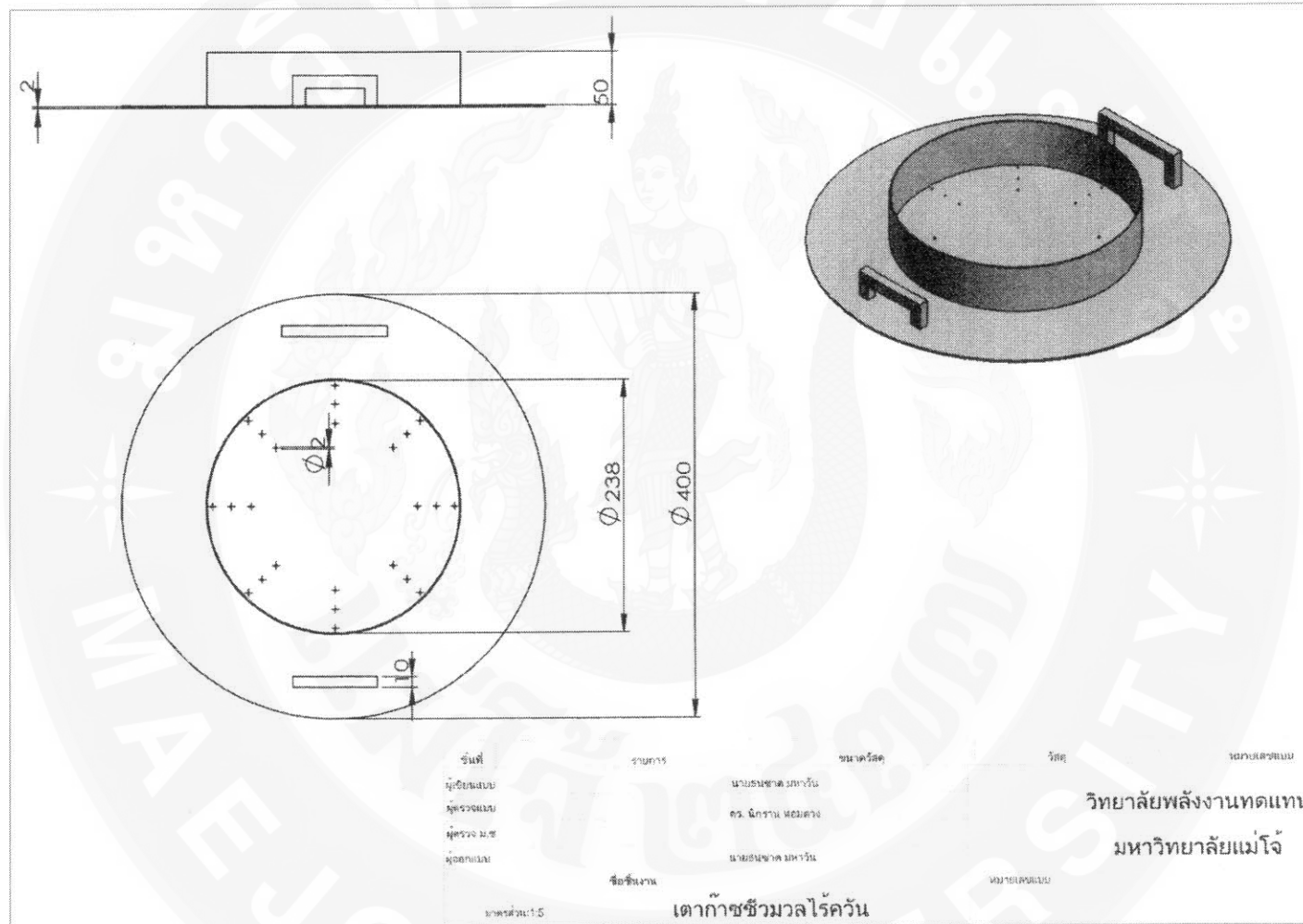
แบบเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น



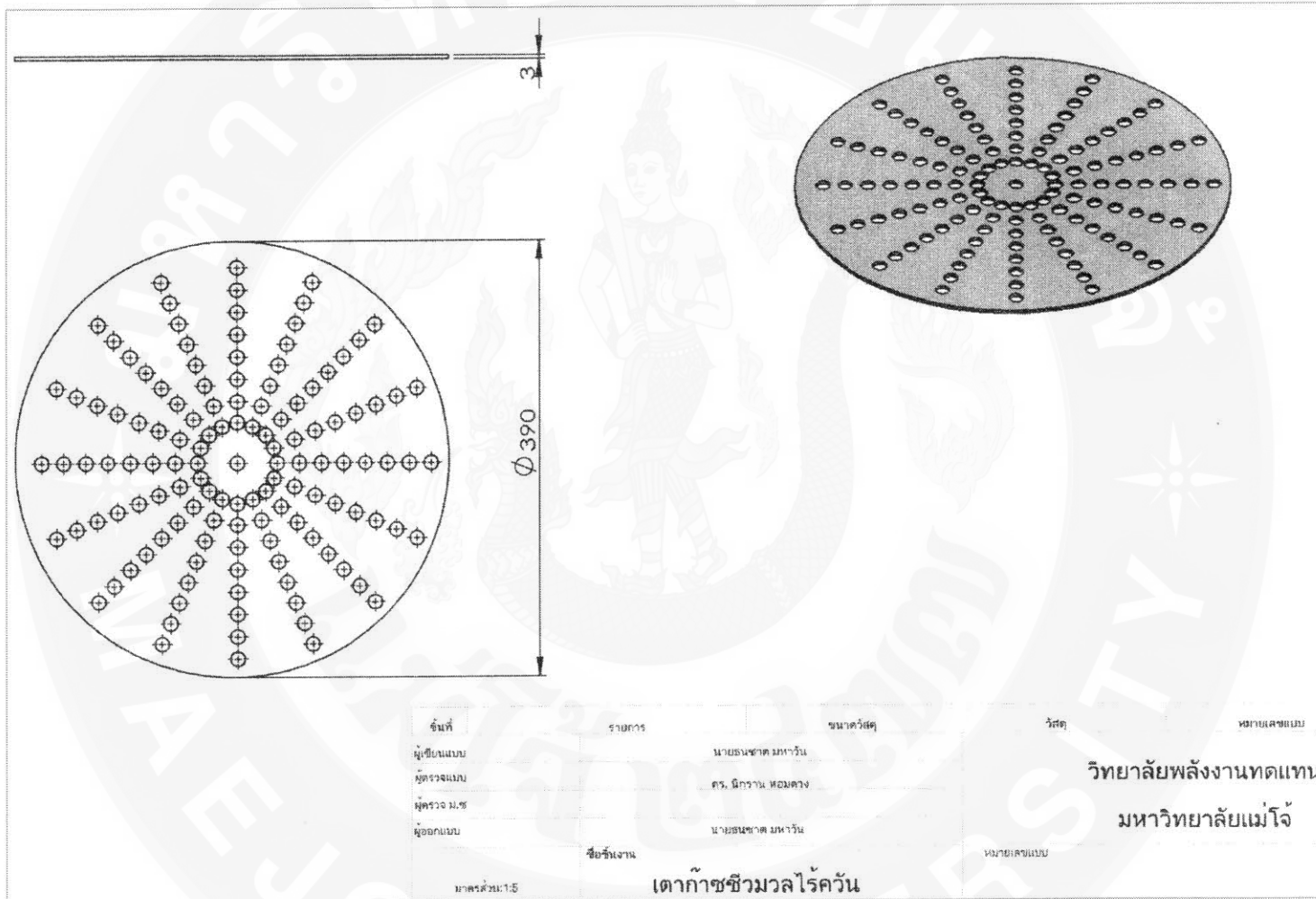
ภาพผนวกที่ 1 แบบเตาแก๊สชีวมวลไร้ควัน



ภาพผนวกที่ 2 แบบเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้นและชุดป้อนอากาศ



ภาพผนวกที่ 3 แบบหัวเตาแก๊สของเตาแก๊สชีววมวลไร่ควีน



ภาพผนวกที่ 4 แบบตะแกรงรองซี่ไถ่ของเตาแก๊สชีวมวลไร้ควัน



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบเตาแก๊สชีวมวลไร่ควน

ตารางผนวกที่ 1 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาแก๊สซีวมวลไร่ควัน โดยใช้เชื้อเพลิงไม้ลำไย
ขนาด 1 inch

Time (min)	อุณหภูมิภายนอกเตา (°C)					ลม (m/s)	อุณหภูมิภายในเตา (°C)		
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄ (น้ำ)	T ₅ (อากาศ)		T ₁	T ₂	T ₃
0	30.0	29.2	15.0	32.0	30.5	5.4	27.5	25.5	25
5	30.0	29.1	16.0	31.9	30.5	5.4	118.5	35.5	30.5
10	29.8	29.2	16.0	31.8	30.2	5.4	120	35.5	30.5
15	29.7	29.2	20.0	31.6	30.3	5.4	251	41	31.5
20	29.6	29.3	20.0	31.8	30.5	5.4	412.5	46.5	34.5
25	29.4	29.5	20.0	31.7	30.5	5.7	298	55	37.5
30	29.2	29.6	20.0	31.1	30.2	5.7	475.5	113	42
35	29.1	29.6	20.0	31.0	30.2	5.7	449	102	42
40	29.1	29.52	20.0	30.7	30.4	5.7	460	166	44.5
45	29.0	29.7	21.0	29.9	30.5	5.4	462	258	54.5
50	28.9	29.8	22.0	29.3	30.3	5.4	460	409	67
60	28.8	29.9	21.0	27.8	30.2	5.4	394	410.5	58.5
65	29.0	30.0	23.0	26.4	30.1	5.4	385.5	447.5	83.5
70	29.5	30.1	21.0	24.6	30.2	5.4	347	441	109
75	30.5	30.2	22.0	21.9	30.4	5.5	332.5	383.5	207
80	32.0	29.9	21.0	18.9	30.2	5.5	334	335.4	367
85	34.9	30.3	21.0	17.0	30.4	5.5	312	342.5	384.5
90	40.3	30.6	23.0	11.8	30.8	5.5	313	329.5	468.5
95	52.7	30.7	25.0	49.0	30.7	5.4	281.5	306.5	370
100	79.7.	31.0	27.0	56.7	31.0	5.4	290	300	462.5
105	129.2	31.4	34.0	55.3	31.0	5.4	419.5	443.5	450
110	202.3	32.0	120	60.5	31.1	5.4	249.5	269.5	314.5

- หมายเหตุ T1 คือ อุณหภูมิส่วนบนของเตาแก๊สซีวมวลไร่ควัน
T2 คือ อุณหภูมิส่วนกลางของเตาแก๊สซีวมวลไร่ควัน
T3 คือ อุณหภูมิส่วนล่างของเตาแก๊สซีวมวลไร่ควัน
T4 คือ อุณหภูมิน้ำ
T5 คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม

ตารางผนวกที่ 2 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น โดยใช้เชื้อเพลิงไม้ลำไย
ขนาด 2 inch

Time (min)	อุณหภูมิภายนอกเตา (°C)					ลม (m/s)	อุณหภูมิภายในเตา (°C)		
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄ (น้ำ)	T ₅ (อากาศ)		T ₁	T ₂	T ₃
0	25.4	25.4	16	24	24.3	6.43	27.5	25.5	25
5	44.7	25.8	188	36.4	24.6	5.79	118.5	35.5	30.5
10	88.1	25.5	29	44.8	24.7	5.82	120	35.5	30.5
15	284.9	24	20	60.7	25.6	6.39	251	41	31.5
20	565.3	22.8	22	75.7	26.2	6	412.5	46.5	34.5
25	792	21.7	16	92.2	26.1	5.4	298	55	37.5
30	804.2	18.2	21	98.1	27	5.7	475.5	113	42
35	752.4	11.6	22	100	27.5	5.61	449	102	42
40	592.6	34	21	101.4	28.9	4.5	460	166	44.5
45	461.5	353.5	19	99	29	4.5	462	258	54.5
50	393.7	735	17	98.5	29.5	7.8	460	409	67
55	313.6	748.4	20	98.4	29.6	6.6	394	410.5	58.5
60	293.5	699	14	99.3	29.2	6.68	385.5	447.5	83.5
65	269.5	577.6	30	98.1	29.5	6.44	347	441	109
70	251.1	483.7	296	98	29.9	6.36	332.5	383.5	207
75	237	397	879	98.4	29.3	6.15	334	335.4	367
80	245.6	344.3	1038	98.8	28.5	6.06	312	342.5	384.5
85	237.9	309	940	103.6	28.4	5.95	313	329.5	468.5
90	216.3	280	924	104.5	29.7	6.06	281.5	306.5	370
95	224.8	279.4	1056	94.3	27.4	6.95	290	300	462.5
100	400	404.7	1060	92.1	92.2	7.18	419.5	443	450
105	310	330.5	572	90.1	27	7.89	249.5	269.5	314.5

- หมายเหตุ T₁ คือ อุณหภูมิส่วนบนของเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น
T₂ คือ อุณหภูมิส่วนกลางของเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น
T₃ คือ อุณหภูมิส่วนล่างของเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น
T₄ คือ อุณหภูมิน้ำ
T₅ คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม

ตารางผนวกที่ 3 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น โดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด
ขนาด 1 inch

Time (Min)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T _a (°C)	T _{AVERAGE} (°C)
0	25.6	27.1	25.0	26.4
5	32.5	31.2	33.4	31.9
10	55.5	55.0	25.9	55.3
15	72.2	71.8	25.7	72.0
20	88.6	88.6	24.5	88.6
25	95.9	95.4	27.5	95.7
30	97.0	97.0	24.7	97.0
35	97.3	97.2	24.9	97.3
40	97.4	97.4	23.8	97.4
45	96.5	96.9	23.9	96.7
50	90.4	96.0	23.9	93.2
55	97.3	97.4	23.9	97.4
60	94.8	95.1	23.9	95.0
65	96.8	96.9	23.9	96.9
70	96.5	96.7	23.9	96.9
75	96.5	96.6	23.9	96.6
80	96.8	93.0	23.9	94.9
85	96.8	88.0	24.0	92.4
90	96.8	83.0	24.0	89.9

หมายเหตุ T₁ คือ อุณหภูมิส่วนบนของเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น
T₂ คือ อุณหภูมิส่วนกลางของเตาแก๊สชีวมวลไร่คว้น
T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม

ตารางผนวกที่ 4 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาแก๊สซีวมวลไร่ควัน โดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด
ขนาด 2 inch

Time (Min)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T _a (°C)	T _{AVERAGE} (°C)
0	22.7	22.7	23.7	22.7
5	36.4	36.1	23.7	36.3
10	50.9	50.4	23.6	50.7
15	68.4	66.8	23.5	67.6
20	79.3	78.6	23.4	79.0
25	89.0	89.4	23.6	89.2
30	95.3	93.7	24.0	94.5
35	95.7	95.0	23.6	95.4
40	93.9	93.8	23.7	93.9
45	96.6	95.5	23.5	96.1
50	91.4	91.2	23.3	91.3
55	95.5	95.3	23.7	95.4
60	95.9	94.0	23.4	95.0
65	94.4	93.0	23.2	93.7
70	93.4	92.7	23.3	93.1
75	91.8	90.5	23.2	91.2
80	89.9	89.7	23.1	89.8
85	92.4	91.7	23.1	92.1
90	93.0	92.1	23.1	92.6
95	84.9	84.8	23.3	84.9
96	83.3	83.0	23.4	83.2

หมายเหตุ T₁ คือ อุณหภูมิส่วนบนของเตาแก๊สซีวมวลไร่ควัน
T₂ คือ อุณหภูมิส่วนกลางของเตาแก๊สซีวมวลไร่ควัน
T_a คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม

ตารางผนวกที่ 5 แสดงผลการทดสอบอุณหภูมิเตาแก๊สซีวมวลไร่ควัน โดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด
ขนาด 3 inch

Time (Min)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T _a (°C)	T _{AVERAGE} (°C)
0	26.0	26.8	26.6	26.4
5	33.8	34.5	26.5	34.2
10	47.5	47.3	26.5	47.4
15	59.7	58.6	26.2	59.2
20	72.7	71.6	26.3	72.2
25	87.1	85.8	26.0	86.5
30	93.8	93.4	25.8	93.6
35	91.3	91.1	25.8	91.2
40	93.8	93.4	25.1	93.6
45	97.2	96.7	25.1	97.0
50	95.5	95.7	24.8	95.6
55	94.4	94.9	24.6	94.7
60	97.6	97.4	24.6	97.5
65	94.2	92.8	24.6	93.5
70	94.8	94.2	24.8	94.5
75	94.3	94.1	24.5	94.2
80	92.6	92.8	24.4	92.7
85	91.1	90.5	24.2	90.8
90	84.6	84.8	24.0	84.7
95	79.3	79.1	24.0	79.2
96	78.3	78.4	24.0	78.4
97	77.4	77.4	24.0	77.4
98	76.6	76.6	24.2	76.6



ERDI - Nakornping
Energy Research and Development Institute-Nakornping,
Chiang Mai University

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University

หมายเลขรายงาน : ERDI 50/1099
วันที่รายงาน : 2560

ใบรายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน ERDI 50/1099 : หน้า 1/1

ชื่อผู้รับบริการ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (นายธนาชิต มหาวัน)

ที่อยู่ : 63 หมู่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

รายละเอียดตัวอย่าง : ไม้ลำไย / ตัวอย่างวันที่ 25 สิงหาคม 2560

ลักษณะ/สภาพตัวอย่าง : เก็บใส่ถุงเก็บก๊าซ สภาพตัวอย่างปกติ

วันที่รับตัวอย่าง : 25 สิงหาคม 2560 (รหัสตัวอย่าง 80/8/25 3128)

วันที่ทดสอบ : 25 - 28 สิงหาคม 2560

ผลการทดสอบ :

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ / เทคนิคที่ใช้
1. Methane (CH ₄)	1.1	% mole	*part 2720 C. **part D 1945
2. Carbon monoxide (CO)	6.9	% mole	
3. Carbon dioxide (CO ₂)	12	% mole	
4. Oxygen (O ₂)	8.3	% mole	
5. Nitrogen (N ₂)	65	% mole	
6. Hydrogen (H ₂)	5.9	% mole	

หมายเหตุ : * In house methods based on Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22nd edition, 2012
** In house methods based on American Society for Testing and Materials (ASTM), Volume 05.06 2015

ลงชื่อ จิรญา มณีศิริ
(นางจิรญา มณีศิริ)
ผู้จัดการวิชาการ

ลงชื่อ รณภพ ธีระ
(นางสาวพรสวรรค์ ธีระยศ)
หัวหน้างานห้องปฏิบัติการ

วันที่รายงาน (28 สิงหาคม 2560)

รายงานฉบับนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยไม่มีการรับรองใดๆ จากสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 239 ถนนพหลโยธิน ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University
 239 Huay Kaw Rd., Suthep, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand
 Tel: 053-942007-9 Fax: 053-903760, 053-903763 http://erdi.cmu.ac.th

ภาพผนวกที่ 5 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แก๊สชีววมวลไม้ลำไย



ERDI - Nakornping
Energy Research and Development Institute-Nakornping
Chiang Mai University
ศูนย์วิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University

หมายเลขใบรายงาน : 60/1100
วันที่ออกใบรายงาน : 28 สิงหาคม 2560

ใบรายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน ERDI 60/1100 : หน้า 1/1

ชื่อผู้รับบริการ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (นายอนชาติ มหาวัน)
 ที่อยู่ : 63 หมู่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ. เชียงใหม่ 50290
 รายละเอียดตัวอย่าง : แกลบ / ตัวอย่างวันที่ 25 สิงหาคม 2560
 ลักษณะ/สภาพตัวอย่าง : เก็บใส่ถุงเก็บก๊าซ สภาพตัวอย่างปกติ
 วันที่รับตัวอย่าง : 25 สิงหาคม 2560 (รหัสตัวอย่าง 60/8/25 3129)
 วันที่ทดสอบ : 25 - 28 สิงหาคม 2560
 ผลการทดสอบ :

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ / เทคนิคที่ใช้
1. Methane (CH ₄)	1.0	% mole	*part 2720 C. **part D 1945
2. Carbon monoxide (CO)	11	% mole	
3. Carbon dioxide (CO ₂)	8.7	% mole	
4. Oxygen (O ₂)	8.3	% mole	
5. Nitrogen (N ₂)	63	% mole	
6. Hydrogen (H ₂)	7.4	% mole	

หมายเหตุ : * In house methods based on Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22nd edition, 2012
 ** In house methods based on American Society for Testing and Materials (ASTM), Volume 06.06 2015.


ลงชื่อ จิราภรณ์ มณีศิริ
(นางจิราภรณ์ มณีศิริ)
ผู้จัดการวิชาการ

ลงชื่อ นางสาวพรสวรรค์ ชัยยศ
(นางสาวพรสวรรค์ ชัยยศ)
หัวหน้างานห้องปฏิบัติการ

วันที่รายงาน (.....28 สิงหาคม 2560.....)

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถนนเอราวัณ ต.สุเทพ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50200
Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Rd., Suthep, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand
Tel: 053-942007-9 Fax: 053-903760, 053-903763 <http://erdi.cmu.ac.th>

ภาพผนวกที่ 6 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แก๊สชีววมวลแกลบ



ERDI - Nakornping
Energy Research and Development Institute-Nakornping
Chiang Mai University
สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University

ERDI-001 Rev. 08
 2555

ใบรายงานผลการทดสอบ

เลขที่รายงาน ERDI 60/1101 : หน้า 1/1

ชื่อผู้รับบริการ : มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (นายธนาชาติ มหาวรณ)

ที่อยู่ : 63 หมู่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ. เชียงใหม่ 50290

รายละเอียดตัวอย่าง : ซังข้าวโพด / ตัวอย่างวันที่ 25 สิงหาคม 2560

ลักษณะ/สภาพตัวอย่าง : เก็บใส่ถุงเก็บก๊าซ สภาพตัวอย่างปกติ

วันที่รับตัวอย่าง : 25 สิงหาคม 2560 (รหัสตัวอย่าง 60/8/25 3130)

วันที่ทดสอบ : 25 - 28 สิงหาคม 2560

ผลการทดสอบ :

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีทดสอบ / เทคนิคที่ใช้
1. Methane (CH ₄)	0.3	% mole	*part 2720 C. **part D 1945
2. Carbon monoxide (CO)	9.3	% mole	
3. Carbon dioxide (CO ₂)	8.7	% mole	
4. Oxygen (O ₂)	7.9	% mole	
5. Nitrogen (N ₂)	88	% mole	
6. Hydrogen (H ₂)	3.2	% mole	

หมายเหตุ : * in house methods based on Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, AWWA & WEF, 22nd edition, 2012

 ** in house methods based on American Society for Testing and Materials (ASTM), Volume 05.06 2015

ลงชื่อ จิรัชญา มณีศิริ

(นางจิรัชญา มณีศิริ)

ผู้จัดการวิชาการ

ลงชื่อ พวงแก้ว ใจดี

(นางสาวพวงแก้ว ใจดี)

หัวหน้างานห้องปฏิบัติการ

วันที่รายงาน (28 สิงหาคม 2560)

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50200
Energy Research and Development Institute-Nakornping, Chiang Mai University
239 Huay Kaew Rd., Suthep, Muang, Chiang Mai 50200, Thailand
Tel: 053-942007-9 Fax: 053-903760, 053-903763 http://erdi.cmu.ac.th

ภาพผนวกที่ 7 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แก๊สชีววมวลซังข้าวโพด

CF-017

Report No. 590707

Page 1 of 3

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND
TEST REPORT SOLID FUEL ANALYSIS
FOR PROXIMATE ANALYSIS**

CUSTOMER : วิทยาลัยสงฆ์รัตนพัฒน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
63 หมู่ที่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

LAB NO.	590707-01	SAMPLE DATE	10/08/2016
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	10/08/2016
SAMPLE DESCRIPTION	ไม้ลำไย	ANALYSED DATE	5 - 30/8/2016
SAMPLE CONDITION	Normal		

	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302 M-10	11.79
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	2.64
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	70.81
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	14.76
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.02
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	17.37
	* NET CALORIFIC VALUE	Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	4152
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	2.99
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	80.28
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	16.73
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.02
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	19.70
	* NET CALORIFIC VALUE	Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	4707
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	18.37
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10*	8.96
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	2.73
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	73.09
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	15.23
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.02
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	17.93
	* NET CALORIFIC VALUE	Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	4285
	* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Approved By :

(Dr.Kanitta Wongyai)
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By :

(Miss Nucharin Whangdeeniran)
SCIENTIST LEVEL 6

ภาพผนวกที่ 8 ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของไม้ลำไย

CF-017

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND
TEST REPORT SOLID FUEL ANALYSIS
FOR PROXIMATE ANALYSIS**

Report No. 590707

Page 2 of 3

CUSTOMER : วิทยาลัยสงฆ์งานเหมือง มหาวิทยาลัยแม่โจ้
63 หมู่ที่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

LAB NO	590707-02	SAMPLE DATE	10/08/2016
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	10/08/2016
SAMPLE DESCRIPTION	เมล็ด	ANALYSED DATE	5 - 30/8/2016
SAMPLE CONDITION	Normal		

	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302 M-10	8.58
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	18.25
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	58.91
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	14.25
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.00
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	14.54
		Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3475
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	13.29
	Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3176	
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	19.97
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	64.44
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	15.59
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.00
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	15.90
		Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3801
* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	14.76	
	Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3528	
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10*	8.15
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	18.34
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	59.19
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	14.32
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.00
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	14.61
		Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3492
* RELATIVE DENSITY			AS 1038.21.1.1-2002	-

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Approved By :

(Dr.Kanitta Wongyal)
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By :

(Miss Nucharin Whangdeeniran)
SCIENTIST LEVEL 6

CF-017		ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND		
Report No. 590707		TEST REPORT SOLID FUEL ANALYSIS		
Page 3 of 3		FOR PROXIMATE ANALYSIS		
CUSTOMER : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้				
63 หมู่ที่ 4 ถนนพหลโยธิน ตำบลหนองทราย อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 50290				
LAB NO.	590707-03	SAMPLE DATE	10/08/2016	
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	10/08/2016	
SAMPLE DESCRIPTION	ขี้เถ้าข้าวโพด	ANALYSED DATE	5 - 30/8/2016	
SAMPLE CONDITION	Normal			
	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302 M-10	11.82
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	5.62
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	69.74
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	12.81
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.01
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	15.69
		Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3750
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	14.26
		Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3407
DRY BASIS	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	6.38
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	79.09
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	14.53
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.01
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	17.79
		Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	4253
	* NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	16.49
		Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3941
AIR DRY BASIS	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10*	9.20
	ASH	% by weight	ASTM D7582-10*	5.79
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-10*	71.82
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-10*	13.20
	SULPHUR	% by weight	ASTM D4239-12	0.01
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-11a	16.16
		Kcal/Kg	ASTM D5865-11a	3862
	* RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Approved By : (Dr. Kanitta Wongyai)
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : (Miss Nucharin Whangdeeniran)
SCIENTIST LEVEL 6

Laboratory Section, Geology Department, Mae Moh Mine Planning and Administration Division, EGAT
801 M.6 T.Mae Moh, A.Mae Moh, Lampang, 52220 Tel: 66-054-254136, 66-054-254037 Fax: 66-054-254037

Rev.00 29/02/59

ภาพผนวกที่ 10 ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของขี้ข้าวโพด

CF-018		ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND TEST REPORT SOLID FUEL ANALYSIS FOR ULTIMATE ANALYSIS		
Report No. 590707				
Page 1 of 3				
CUSTOMER :		วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี 63 หมู่ที่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290		
LAB NO.	590707-01	SAMPLE DATE	10/08/2016	
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	10/08/2016	
SAMPLE DESCRIPTION	ไม้ลำโต	ANALYSED DATE	17 - 25/8/2016	
SAMPLE CONDITION	Normal			
	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS DETERMINED (AIR DRY) BASIS	MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10*	8.96
	ASH	%	ASTM D7582-10*	2.73
	CARBON	%	ASTM D5373-08	44.95
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.61
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.37
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.02
	OXYGEN	%	(plus errors)	45.32
DRY BASIS	ASH	%	ASTM D7582-10*	2.99
	CARBON	%	ASTM D5373-08	49.37
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.16
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.41
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.02
	OXYGEN	%	(plus errors)	41.05
DRY ASH-FREE BASIS	CARBON	%	ASTM D5373-08	50.89
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.35
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.42
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.02
	OXYGEN	%	(plus errors)	42.32

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Approved By :
(Dr.Kanitta Wongyal)
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By :
(Miss Nucharin Whangdeemirak)
SCIENTIST LEVEL 6

Laboratory Section, Geology Department, Mae Moh Mine Planning and Administration Division, EGAT
801 M.6 T.Mae Moh, A.Mae Moh, Lampang, 51220 Tel. 66-054-254136, 66-054-254037 Fax. 66-054-254037

Rev.00 29/02/59

ภาพผนวกที่ 11 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของไม้ลำโต

CF-018

ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND
TEST REPORT SOLID FUEL ANALYSIS
FOR ULTIMATE ANALYSIS

Report No. 590707

Page 2 of 3

CUSTOMER : บริษัทพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
63 หมู่ที่ 4 ตำบลหนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

LAB NO	590707-02	SAMPLE DATE	10/08/2016
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	10/08/2016
SAMPLE DESCRIPTION	แกลบ	ANALYSED DATE	17 - 25/8/2016
SAMPLE CONDITION	Normal		

	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS DETERMINED (AIR DRY) BASIS	MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10*	8.15
	ASH	%	ASTM D7582-10*	18.34
	CARBON	%	ASTM D5373-08	36.29
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	5.79
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.37
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.00
	OXYGEN	%	(plus errors)	39.21
DRY BASIS	ASH	%	ASTM D7582-10*	19.97
	CARBON	%	ASTM D5373-08	39.51
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	5.31
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.40
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.00
	OXYGEN	%	(plus errors)	34.81
DRY ASH-FREE BASIS	CARBON	%	ASTM D5373-08	49.37
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.63
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.50
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.00
	OXYGEN	%	(plus errors)	43.49

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Approved By : _____

(Dr.Kanitta Wongyai)
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : _____

(Miss Nucharin Whangdeenan)
SCIENTIST LEVEL 6

ภาพผนวกที่ 12 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของแกลบ

CF-018

ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND
TEST REPORT SOLID FUEL ANALYSIS
FOR ULTIMATE ANALYSIS

Report No. 590707

Page 3 of 3

CUSTOMER : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
63 หมู่ที่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

LAB NO.	590707-03	SAMPLE DATE	10/08/2016
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	10/08/2016
SAMPLE DESCRIPTION	ขี้ังข้าวโพด	ANALYSED DATE	17-25/8/2016
SAMPLE CONDITION	Normal		

	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS DETERMINED (AIR DRY) BASIS	MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10 ^a	9.20
	ASH	%	ASTM D7582-10 ^a	5.79
	CARBON	%	ASTM D5373-08	42.12
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.52
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.45
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.01
	OXYGEN	%	(plus errors)	45.11
DRY BASIS	ASH	%	ASTM D7582-10 ^a	6.38
	CARBON	%	ASTM D5373-08	46.39
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.05
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.50
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.01
	OXYGEN	%	(plus errors)	40.67
DRY ASH-FREE BASIS	CARBON	%	ASTM D5373-08	49.55
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-08	6.46
	NITROGEN	%	ASTM D5373-08	0.53
	TOTAL SULPHUR	%	ASTM D4239-12	0.01
	OXYGEN	%	(plus errors)	43.44

Remark : The results relate only to the sample(s) tested. This document shall not be reproduced except in full.

Approved By : _____
(Dr.Kanitta Wongyai)
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : _____
(Miss Nucharin Whangdeeniran)
SCIENTIST LEVEL 6

ภาพผนวกที่ 13 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของขี้ังข้าวโพด



ภาคผนวก ค

เผยแพร่ผลงานวิจัย

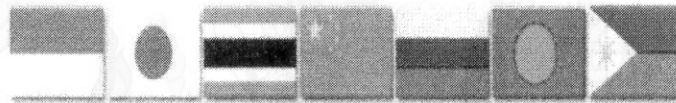
การเผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

1. เผยแพร่งานวิจัยหัวข้อเรื่อง Application of Gasification Technology for Design Household Smokeless Biomass Stove ในการประชุมวิชาการ Tri-U International Joint Seminar & Symposium ครั้งที่ 23 ระหว่างวันที่ 23-28 ตุลาคม 2559 ณ Bogor Agricultural University (IPB) ประเทศอินโดนีเซีย
2. เผยแพร่งานวิจัยหัวข้อเรื่อง สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ขังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง ในงานประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 ระหว่างวันที่ 8-20 มิถุนายน 2559 ณ โรงแรมวังจันทร์วิเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก

PROCEEDING

The 23rd Tri-U

International Joint Seminar & Symposium



Asian Contribution to the Sustainable Development Goals



23-28 October 2016

Organized and hosted by
Bogor Agricultural University (IPB), Indonesia



ISBN 978-602-71190-7-9



ISBN 978-602-71190-7-9

THEME C-ENERGY

Paper Number	Name/ University	Paper Title	Page
C-01	Xinchen Zhou/ Jiangsu University	Study of the Air Resistance Abatement and the Driving Range Improvement on Electric Vehicle by Setting an Airduct in the Front Cabin	1-4
C-02	Jiantian Sun/ Jiangsu University	Study on Handling Stability Control for Two Wheel Motors Electric Vehicles	5-9
C-03	Supakrit Thiangtham/ Suranaree University of Technology	Properties and Emissions Characteristics of a Compression Ignition Engine Fueled with Biodiesel and DEE Blends	10-13
C-04	Rui Cao/ Jiangsu University	Multi-objective Optimization on Hydraulic Design of Non-Overload Centrifugal Pumps with High Efficiency and Low Noise	14-18
C-05	Panisa Ondokmai/ Maejo University	Performance of Paddy Greenhouse Solar Dryer Operated with Hybrid Gasification Technology	19-23
C-06	Xiaocong Zhao/ Jiangsu University	Study on Enhancing Adaptability and Practicality of Thermoelectric Generator for Reusing Energy in Vehicle Exhaust	24-27
C-07	Thanachat Mahawan/ Maejo University	Application of Gasification Technology for Design Household Smokeless Biomass Stove	28-32
C-08	Pongsatit Sonpakdee/ Maejo University	Evaluation the Efficacy of a Must Flow Paddy Dryer by Biomass for the Small Community	33-37
C-09	Hendi Okta Kurniawan/ Bogor Agricultural University	Design of Wholksalk Type of Sugarcane Harvester using Hydraulic Transmission	38-41
C-10	Jenjira Uttareun/ Maejo University	Investigation Potential Energy of Agricultural Waste from Torrefaction Process	42-46
C-11	Xia Zhang/	A Study on Energy Saving of High	47-51

C-07

APPLICATION OF GASIFICATION TECHNOLOGY FOR DESIGN HOUSEHOLD SMOKELESS BIOMASS STOVE

**Thanachat Mahawan
Nigran Homdoung
Natthawud Dussadee
Churat Taralux
Rameshprabu Ramaraj**

School of Renewable Energy,
Maejo University, Chiang Mai 50290,
Thailand,
Corresponding author E-mail:
nigranghd@gmail.com

ABSTRACT

Biomass constitutes are the biggest source of energy in Thailand. On the contrary, its placement in the domestic sector is generally inefficient and producing environmental problems including pollution creations. The biomass stove is particularly needed for Thai society, at the same time the mostly biomass stove applications are low thermal efficiency and producing more smoke. The purpose of this research is to examine the objectives for the development of smokeless biomass stoves with using gasification process for heat applications in the community. The design of biomass stove is downdraft gasifier; and used rice husk as fuels, the air feed to stove with blower and filled the biomass has continued for investigation. The diameter and height of combustion chamber were 60 cm and 25 cm respectively; along with air fuel ratios were adjusted. A load of boiling water was of 5 liters/time. It was found that, the adjusting of air fuel ratio was effected on energy and fuel consumption rate, thermal efficiency, hot water temperature, and cost of heat production. The cost of heat production was similar with LPG stove and low smoke on operation. Therefore, smokeless biomass stoves can be used to replace an existing biomass stove.

Keyword: smokeless biomass stove, gasification, downdraft gasifier, thermal efficiency

1. INTRODUCTION

At present, energy sources from fossil fuel have decreased continuously while the price of that increase with effect on customer necessarily. However, Thailand government was attempted promote the renewable energy to the community which is suggested from Alternative Energy Development Plan (AEDP: 2015-2036) [1]. Thailand country was high liquid petroleum gas (LPG) consumption and there are a lot of imports from the oversea of 16500 ton/month [2]. Reducing the use of LPG can be use in two ways including switching to renewable energy and energy conservation in the gas stove. The use of biomass energy in high-performance biomass stove will providesimilar performance to liquid petroleum gas stove and energy conservation was a delay or prolongs the use of gas for longer. Therefore, development the smokeless biomass stove was interested for current situation and reduces the use of LPG in the future. The advantage of use

technology was low fuel cost, smoke less, reduce burning in the outdoors and carbon dioxide emissions. Thus, in this study was to evaluate the performance biomass stoves compared with LPG stove also calculated the energy consumption, boiling temperature, thermal efficiency and cost of fuel on use in the community.

2. GASIFICATION PROCESS

Gasification is a process that converts organic or fossil fuel based carbonaceous materials into carbon monoxide, hydrogen and carbon dioxide. This is achieved by reacting the material at high temperatures (>700 °C), without combustion, also with a controlled amount of oxygen or steam. The resulting gas mixture is called syngas or producer gas and the heating value of gas was of 5 MJ/m³ [3]. The reactions of biomass gasification in fixed bed gasifier consist of four processes: drying, pyrolysis, combustion, and reduction. The details are as follows.

The drying zone is for taking the water/moisture content out of the biomass materials. The temperature in this zone was in a range of 100-135°C. In the pyrolysis zone (or distillation zone) the biomass is decomposed with high heat in limited oxygen. The reaction is exothermic. The heat produced causes the biomass to release all of volatile constituent parts to boil off forming a volatile gas and leaving a pure carbon residue. The temperature in this zone having between of 200-600 °C. Oxidation zone or combustion zone is appears where oxygen re-acts with carbon and hydrogen. In the complete combustion process, the carbon is converted into carbon dioxide; simultaneously hydrogen is converted into water. The combustion reaction is exothermic and temperature of this zone between 1100-1500 °C.



Reaction zone, carbon dioxide, water and incombustible gas from pyrolysis zone are push through a red hot charcoal bed and converting products of the previous zone into carbon monoxide, hydrogen and methane. The gas temperature is reducing and between 800-1000°C.



3. EVALUATE OF SMOKELESS STOVE

The fuel consumption rate of biomass stove is the ratio of biomass with duration time; the equation following:

$$FCR = \frac{W_{biomass}}{T_0} \quad (8)$$

when FCR is fuel consumption rate (kg/h) $W_{biomass}$ is a mass of biomass (kg), T_0 is duration time (h) and specific fuel consumption is the ratio of biomass energy on duration time. Thermal efficiency of the biomass stove can find on the boiling test, the equation for calculating is the ratio of available heat with heat of biomass fuel.

$$\eta_{th} = \frac{Q_U}{Q_{Fuel}} \quad (9)$$

when η_{th} is biomass stove thermal efficiency (%),

Q_U is available heat, Q_{Fuel} is the heat of biomass fuel.

The available heat is calculated from the heat used to evaporate water and warm.

$$Q_U = [m_{w1}C_{wb}(T_{wb} - T_{wi})] + [m_{w2}h_{fg}] \quad (10)$$

when m_{w1} and m_{w2} is initial and evaporate mass of water (kg), C_{wb} is the specific heat of water is 4.186 kJ/kg °C, h_{fg} is latent heat of vaporization is 2,257 kJ/kg. The heat input from biomass is calculated as follow

$$Q_{Fuel} = m_{Fuel} \times LHV_{bio} \quad (11)$$

when m_{Fuel} is biomass input in the stove (kg) and LHV_{bio} is the low heating value of biomass (kJ/kg)

4. MATERIAL AND METHOD

The smokeless biomass stove was tested as biomass downdraft gasification, that stove was developed to continuousfeed the biomass. The combustion of the stove was pure gasification process which can show the differences on previously developed smokeless biomass stove. The diameter of the stove was 20 cm and 70 cm of height combustion chamber, fill biomass in the hopper and set on the top of the combustion chamber. The bottom of the chamber was a chimney, gas storage and take out ash system. The gas burner was installingon gas storage and oppositethe combustion chamber. The feeding of air was used three phase blower, adjusting and controlling the speed of rotation with electrical inverter and blow air from the top of combustion chamber, the detail of experiment set up was shown in Fig.1.

The biomass used for "smokeless biomass stove" fueled consumptionfrom the rice husk which is agricultural waste in the north of Thailand. In the analysis, the bulk density of rice husk was of 127 kg/m³ and 13.55 MJ/kg of low heating value and the detail of chemical analysis are shown in Table 1.

The instrument for the research was used 372 W of the blower to feed the air into the combustion chamber, controlling with 4.2 A MITSUBISHI D700 of

the inverter. The air flow rate was measured with anemometer by YK-180 AM of LUTRON, 4-240m³/h of maximum range measurement. The temperature of water and combustion chamber were used type K and type R thermocouples with data logger by DX 220 of YOKOGAWA. The weight of biomass and water measured by digital weight scale by DS-530 of DIGI.

Biomass stove tests were carried out varying air/fuel ratio range of 5.25, 6.96 and 8.15. The combustion chamber temperature was measured at the top, medium and bottom with internal and external of biomass stove. Duration time of tests was 120 min. The data was analyzed specific energy consumption, water temperature, thermal efficiency, heat transfer and cost of heat production.

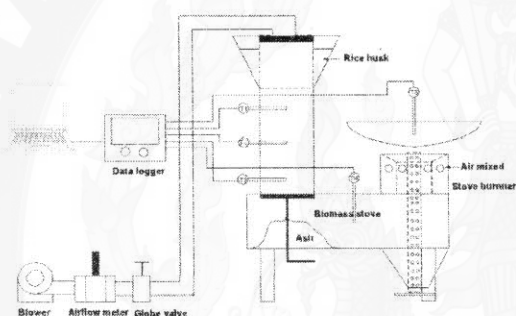


Fig.1 Schematic of the experimental setup

Table 1 physical and chemical analysis of rice husk

Proximate analysis	Moisture content (%)	10.427
	Volatile matter (%)	61.982
	Fixed carbon (%)	15.368
	Ash (%)	12.223
Ultimate analysis	Carbon (%)	39.84
	Hydrogen (%)	5.03
	Oxygen (%)	28.4
	Nitrogen (%)	0.56
	Sulfur (%)	0.11
Bulk density (kg/m ³)		127.4
Low heating value (MJ/kg)		13.55

5. RESULT AND DISCUSSION

5.1. Specific energy consumption

Fig. 2 demonstrated that the energy consumption of smokeless biomass stove with and LPG stove. Adjusting air/fuel ratio at 5.25 was lower energy consumption with compare both remain air/fuel ratio and LPG operation. The reduction was caused lower than oxygen utilized for combustion in gasification process and effect on the time it takes to burn up [4]. The

minimum energy and fuel consumption was 37.4 MJ/h and 2.67 kg/h, respectively. The use air/fuel ratio was 6.96 with maximum energy consumption and similar the LPG energy consumption. Generally, the direct burning or gasification process mixed direct burning, the energy consumption of biomass stove was low than the using of LPG [5].

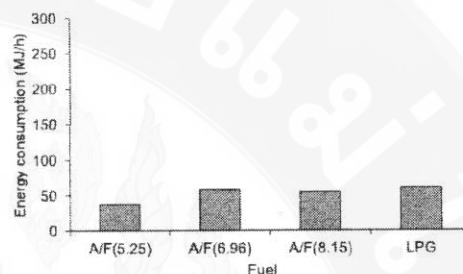


Fig. 2 the energy consumption of use smokeless biomass stove

5.2. The temperature of boiling water

Fig. 3 illustrates the temperature of water from the boiling test. The boiling temperature of biomass stove at 8.15 of air/fuel ratio was similar the use of LPG. The adjusting at low air/fuel ratio was the effect on low boiling temperature. Reduction of water temperature was caused low energy density of producer gas and compares the energy density of both fuels, the higher calorific value of LPG was 94 MJ/m³ or 26.1 kWh/m³ [6] which having 18 times of more than producer gas.

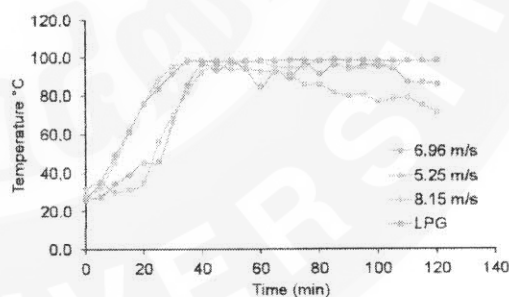


Fig. 3 comparing water temperature boiling

5.3. Thermal efficiency

Fig. 4 shows the thermal efficiency of smokeless biomass stove with LPG stove. The maximum thermal efficiency was 5.27% with adjusting 8.15 of air/fuel ratio. The minimum thermal efficiency was of 4% when to adjust at lower air/fuel ratio. Comparing with LPG stove, the use of biomass gasification stove was thermal efficiency lower than LPG stove. However, the

experiment was interested in the characteristic combustion of solid fuel on the biomass stove. It was found that the use of producer gas only to burn in the stove was impossible and unsuitable for burn in the stove. However, for the gas engine, the producer gas was suitable for working or use in low energy resource [7].

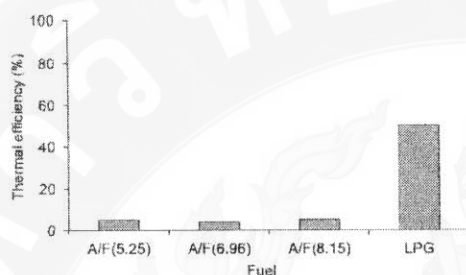


Fig. 4 thermal efficiency of biomass stove and LPG stove

5.4. Cost of heat production

Fig. 5 shows the cost heat production of smokeless biomass stove with LPG stove. The use of smokeless biomass stove was similar cost heat production with LPG stove, except 5.25 and 6.96 of the air/fuel ratio. The minimum cost heat production of biomass stove was of 4.88 baht/kWh and 4.46 baht/kWh of LPG stove, the calculate biomass price condition of 1 baht/kg and 25-27 baht/kg of LPG price [8]. The use of gasification process mixed direct burning was likely better, observed from the performance and cost of heat production. Therefore, the use of producer gas only for heat production, it would be inappropriate for this work. However, for producer gas utilization, it is suitable for using in gas engines over or the use LPG to support for increase energy density in heat production case.

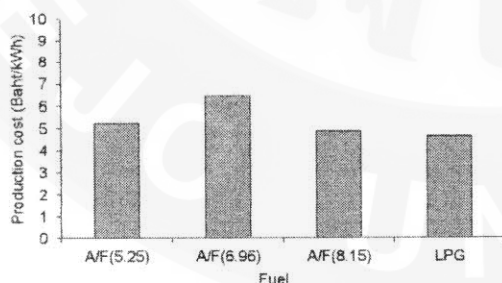


Fig. 5 the cost of heat production of biomass stove

6. CONCLUSION

The energy consumption and thermal efficiency of smokeless biomass stove were lower than LPG stove. The use of smokeless biomass stove had low water

temperature and caused from lower energy density of producer gas. The cost of heat production of smokeless biomass stove was similar the LPG stove. Therefore, smokeless biomass stove can be used to replace an existing biomass stove. The use of gasification process mixed direct burning would be more appropriate or use in gas engine.

7. ACKNOWLEDGMENTS

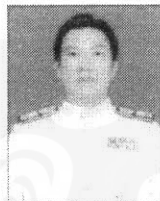
The authors would like to thank the Office of The Higher Education Commission and Graduate Scholarship program production and development of renewable energy in ASEAN graduate of Maejo University, also for financial support from research under project in "Development of smokeless producer gas stove for heat production in community enterprises" and Energy Research Center, Maejo University for providing test facilities.

8. REFERENCES

- [1] Ministry of Energy, (2015), Alternative Energy Development Plan: AEDP2015, http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf.
- [2] Department of Energy Business, Ministry of Energy. http://www.dede.go.th/dede/Fileadmin/usr/bers/biodiesel/quality_FAME_2552.pdf.
- [3] Food and Agriculture Organization (FAO) (1986), Wood Gas as Engine fuel, Mechanical Wood Products Branch Forest, Italy.
- [4] Nakorn Tippayawong, (2004) Fundamental of combustion, Documentation for the study, Faculty of Engineering. Chiang Mai University.
- [5] Tanachat Mahawan, Churat Taralux, Natthawud Dussadee, Kittikom Sasujit, Nigran Homdoug, (2015) Performance of Smokeless Producer gas Stove with using Corn Cob Fueled, 12th Conference on Energy Network of Thailand.
- [6] Niaz Bahar Chowdhury, Md. Iqbal Hossain, (2012) Study of Liquefied Petroleum Gas Heating Value A Thermodynamics Approach, Advances in Pure and Applied Chemistry (APAC) Vol. 2, 102-105.
- [7] Reed, T.B. and Agua Das, (1988). "Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems" Superintendent of Documents U.S. Government Printing Office, Washington, (1988).
- [8] Ministry of Energy, (2016), LPG price, www.eppo.go.th. <http://27.254.37.81/eppoite/index.php/th/petroleum/lpg/price-lpg>.



Mr. Thanachat Mahawan
Date of birth : 26/11/1985
- Candidate in Master of Engineering
(Renewable Energy Engineering)
- Biomass technology
- Electrical technic
- Agricultural Extension



Dr.
Churat Thararux,

Dr. Churat Thararux,
Assistant Professor,
School of Renewable Energy, Maejo
University
Professional:
1. Gasification and Pyrolysis Process
2. Biomass Conversion Technology
(Briquette fuel, Biofuel, Biomass Stove)
3. Internal Combustion Engine (Producer
gas and Biogas Engine, Diesel and spark
ignition engine)
4. Biomass Power Plant Engineering
5. Combustion Engineering
6. Biohydraulic oil



Dr.
Nigran Homdoug

Dr. Nigran Homdoug
Date of birth : 09/04/1974
Doctor of Engineering (Mechanical
Engineering)
Professional:
1. Gasification and Pyrolysis Process
2. Biomass Conversion Technology
(Briquette fuel, Biofuel, Biomass Stove)
3. Internal Combustion Engine (Producer
gas and Biogas Engine)
4. Biomass Power Plant Engineering
5. Combustion Engineering



Dr.
Rameshprabu Ramara
j

Dr. Rameshprabu Ramaraj, M.Eng.,
M.Sc., M.Phil., Ph.D., Lecturer, School
of Renewable Energy, Maejo University,
**Professional in scientific and
engineering field:**
biology (animal, plant &
microbes), aquatic insects, medical
entomology, ecology and environmental
science, biochemical and water quality
analysis, sustainable resource
engineering, environment and ecological
engineering, bio-statistical analysis and
related software applications, biofuels
and solid fuels.



Dr. Natthawud
Dussadec

Dr. Natthawud Dussadec
Assistant Professor & Director,
School of Renewable Energy, Maejo
University
Professional:
1. Agricultural Processes (Drying of
Foods and Cereal Grains),
2. Energy Conservation (Energy
Conservation in building and Industry),
3. Solar energy and Thermal Process
(Solar Heating, Heat exchanger),
4. Renewable Energy (Wind, Hydro,
Biomass, Biofuel).

การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย

Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT)

ครั้งที่
12
12th



วันที่ 8-10 มิถุนายน 2559
ณ โรงแรมวงจันทน์รเวอร์วิว จังหวัดพิษณุโลก



ดำเนินการจัดประชุมโดย
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

อุตสาหกรรม  พลังงาน เพื่ออนาคตประเทศไทย

ENETT12-BT-75	การพัฒนาคุณภาพของเชื้อเพลิงแข็งอัดแห้งจากเศษวัสดุเหลือทิ้งจากกิจกรรมเพาะเห็ดหอม หมู่บ้านปางมะโอตำบลวังเงินอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง.....	559
ENETT12-BT-90	อิทธิพลที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากขี้ข้าวโพดที่เตรียมจากการกระตุ้น ร่วมกับความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ.....	565
ENETT12-BT-102	การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการสตรีมรีฟอร์มมิ่ง.....	569
ENETT12-BT-129	การพัฒนาและประเมินสมรรถนะเครื่องลดความชื้นข้าวเปลือกแบบไหลพร้อมกัน โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวล.....	574
ENETT12-BT-140	การวิเคราะห์วัฏจักรชีวิตสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงอัดแข็งจากพืชพลังงาน.....	583
ENETT12-BT-153	การศึกษาถ่านอัดแห้งจากเศษวัสดุเหลือทิ้งของปาล์มน้ำมัน.....	592
ENETT12-BT-154	การศึกษาการผลิตถ่านอัดแห้งจากไมยราบยักษ์.....	598
ENETT12-BT-179	สมบัติทางกายภาพของไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชเหลือทิ้งโดยใช้ NaOH และ KOH เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	602
ENETT12-BT-193	การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอัดแห้งที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเข็นจากวัสดุเหลือทิ้ง ทางการเกษตรประเภทกะลามะพร้าว.....	610
ENETT12-BT-194	สมรรถนะรถกระบะขนาดกลางเมื่อใช้ก๊าซชีวภาพอัดเป็นเชื้อเพลิง.....	619
ENETT12-BT-198	สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ขี้ข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง.....	626
ENETT12-BT-208	การศึกษาเตาเผาถ่านไร้ควันด้วยการติดตั้งครีบน้ำความชื้นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนและประหยัดพลังงาน.....	632
ENETT12-BT-229	ผลกระทบของสารดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟต่อกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ของขยะชุมชนอัดแห้งที่มีความชื้นสูง.....	638
ENETT12-BT-241	การผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากเศษหญ้าและใบไม้สำหรับเตาหุงต้มก๊าซชีวมวล.....	645
ENETT12-BT-252	การออกแบบและพัฒนาหม้อกลั่นเอทานอลไฟฟ้าด้วยเทคนิคปั๊มฟอง.....	651
ENETT12-BT-255	การวิเคราะห์ต้นทุนของกระบวนการสกัดสารโพลีโคซานอลจากไข้อยู่ระดับน้ำตาล.....	656
ENETT12-BT-282	การจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากพืชปาล์มน้ำมันเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับกระบวนการ ผลิตก๊าซไพรอวเซอร์.....	663
ENETT12-BT-307	การดื้อออกซิเจนชั้น น้ำมันชีวมวล ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo/Al ₂ O ₃ เพื่อผลิตน้ำมันดีเซล: ศึกษาผลของสารเติม.....	671

สาขาเชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuels: BF)

ENETT12-BF-31	The Utilization of Sugarcane Molasses as a Substrate for Polyhydroxybutyrate and its Application.....	680
ENETT12-BF-33	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และพัฒนาศักยภาพการใช้พลังงานทดแทนก๊าซชีวภาพ จากฟาร์มเลี้ยงสัตว์สุกรและพืชผลทางการเกษตรปาล์มน้ำมัน-ยางพาราเพื่อผลิตไฟฟ้าชุมชน กรณีศึกษาชุมชนหมู่บ้านท่าข้าม.....	686
ENETT12-BF-54	การประมาณค่าจุดวาบไฟสำหรับไบโอดีเซลจากกรดไขมันเมทิลเอสเทอร์.....	696



ENETT12-BT-198

สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันเมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง Performance of Smokeless Producer gas Stove with using Corn Cob Fueled

ธนชาติ มหาวิน¹ ชูรัตน์ ธารารักษ์¹ ณัฐวุฒิ ดุษฎี¹ กิตติกร สาสุจิตต์ และนิกราน หอมดวง^{1,*}

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน 63 หมู่ 4 ถนนเชียงใหม่-พร้าว ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

*E-mail: nigranghd@gmail.com, โทรศัพท์ 084-1773632, 053-878333

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะและต้นทุนของเตาแก๊สชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนโดยเปรียบเทียบกับเตาแก๊สหุงต้ม เตาชีวมวลที่ใช้ทดสอบเป็นเตาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 cm และสูง 85 cm หัวเตาเป็นแบบชนิดถอดออกได้ บรรจุซังข้าวโพดได้สูงสุด 11-12 kg ป้อนอากาศด้วยพัดลมเป่าอากาศและปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทดสอบเป็น 3.12 3.30 และ 3.36 โดยมีภาระโหลดในการต้มน้ำต่อครั้งจำนวน 80 ลิตร ผลการศึกษาพบว่า การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมีผลกระทบต่ออัตราความสิ้นเปลืองพลังงานและเชื้อเพลิง อุณหภูมิ น้ำร้อน อุณหภูมิภายในเตา ระยะเวลาให้ความร้อน ประสิทธิภาพความร้อนและต้นทุนการผลิตความร้อน การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.12 เตาแก๊สชีวมวลมีความเหมาะสมในการใช้งาน โดยให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 21.5 % อุณหภูมิภายในเตามีค่าเฉลี่ย 517 °C และให้ใช้ระยะเวลาในการทำให้น้ำเดือดต่ำสุด โดยมีต้นทุนเฉลี่ยในการผลิตความร้อนต่ำสุด 0.94 บาท/kWh ซึ่งต่ำกว่าการใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงประมาณ 3.5 เท่า

คำสำคัญ: เตาแก๊สชีวมวล ซังข้าวโพด แก๊สซิฟิเคชัน ประสิทธิภาพความร้อน

Abstract

The objective of this study was evaluated smokeless producer gas stove performance and cost of heat production with compared liquid petroleum gas stove (LPG stove). The diameter and height of producer gas stoves was of 40 cm and 85 cm, the burner was removed and 11-12 kg of corn cob containment. The air feed to stove with blower and 3.12, 3.30 3.36 air fuel ratio was adjusted. The load of boiling water was of 80 liter/time. It was found that, the adjusting of air fuel ratio was effected on energy and fuel consumption rate, hot water temperature, internal stove temperature, duration of heat input, thermal efficiency and cost of heat production. The 3.12 of air fuel ratio adjusting was suitable for operation with 21% of highest thermal efficiency, the average internal stove temperature was of 517 °C with the period of the lowest water boils and lowest cost of heat production was 0.94 baht/kWh with lower than liquid petroleum gas stove operation about 3.5 times

Keywords: Biomass stove, Corn cob, Gasification, Thermal efficiency.

1. บทนำ

ปัจจุบันแหล่งพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งสวนทางกับราคาเชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากวิกฤติการณ์พลังงานดังกล่าวจึงส่งผลกระทบต่อผู้ใช้เชื้อเพลิงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อย่างไรก็ตามรัฐบาลก็พยายามหามาตรการส่งเสริมการใช้ชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีจำนวนมากมาผลิตใช้เป็นพลังงานทดแทนซึ่งจะเห็นได้จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือกของประเทศ [1] แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงจาก

ฟอสซิลอีกชนิดที่มีการใช้งานในปริมาณที่สูงและมีบางส่วนต้องนำเข้าจากต่างประเทศในปริมาณถึง 165,000 ตัน/เดือน [2] แนวทางการลดใช้แก๊สหุงต้มสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงชีวมวลทดแทนและการอนุรักษ์พลังงานในเตาแก๊สหุงต้ม การเปลี่ยนเชื้อเพลิงมาใช้ชีวมวลจำเป็นต้องมีการพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลให้มีสมรรถนะใกล้เคียงกับเตาแก๊สหุงต้มซึ่งถ้าพัฒนาได้จะสามารถลดการใช้แก๊สหุงต้มได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ส่วนการอนุรักษ์พลังงานในเตาแก๊ส



หุงต้มจะช่วยชลอหรือยืดระยะเวลาการใช้แก๊สให้ยาวนานยิ่งขึ้นเท่านั้น

การพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันเพื่อนำเอาเชื้อเพลิงชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ด้านการผลิตพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในชุมชนเป็นอีกแนวทางที่มีความน่าสนใจในการลดการใช้แก๊สหุงต้มได้ ข้อดีของการใช้เทคโนโลยีนี้ คือต้นทุนเชื้อเพลิงมีราคาถูก หาได้ง่าย ควันน้อย ลดการเผาในที่โล่งและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาโลกร้อน จากข้อดีของการใช้เทคโนโลยีโครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการประเมินหาสมรรถนะของเตาแก๊สชีวมวล โดยเปรียบเทียบการใช้แก๊สหุงต้มปกติ โดยศึกษาอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงพลังงาน ประสิทธิภาพความร้อนความสามารถในการใช้งานและต้นทุนการผลิตความร้อน ผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นทางเลือกในการใช้พลังงานทดแทนในชุมชน ลดการใช้แก๊สหุงต้ม ลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนและรักษาสสิ่งแวดล้อมในชุมชนได้ในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

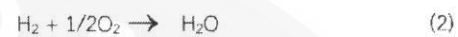
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหินและวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรให้กลายเป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยการจำกัดออกซิเจน แก๊สที่ได้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) คาร์บอนไดออกไซด์ ออกซิเจนและไนโตรเจน เรียกว่าแก๊สชีวมวลหรือโปรดิวเซอร์แก๊สมีค่าความร้อนเฉลี่ย 5 MJ/m³ [3] ปฏิกิริยาเคมีในแต่ละโซนของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันคือ โซนอบแห้ง ไพโรไลซิส การเผาไหม้และรีดักชัน รายละเอียดปฏิกิริยาเคมีในแต่ละโซนมีดังนี้

โซนอบแห้งมีพลังงานส่วนหนึ่งจะใช้ในการระเหยความชื้นจากเชื้อเพลิงเมื่อกระบวนการนี้เริ่มขึ้นน้ำหนักของเชื้อเพลิงจะลดลงขนาดและสีของเชื้อเพลิงจะเปลี่ยนไปโดยมีสีเข้มขึ้นอุณหภูมิในโซนนี้อยู่ในช่วง 100-200 °C

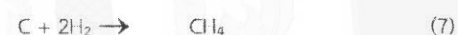
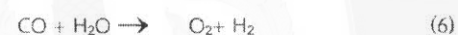
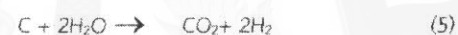
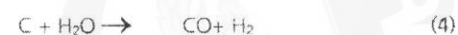
โซนไพโรไลซิสเชื้อเพลิงแข็งจะถูกย่อยสลายด้วยความร้อนที่สูงที่ไม่มีออกซิเจนอยู่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการดูดความร้อนโดยรับความร้อนจากชั้นรีดักชันเพื่อเปลี่ยนแปลงสารออกแก๊สในเชื้อเพลิงให้ได้สารระเหยแก๊สที่เผาไหม้ได้และไม่ได้ อุณหภูมิในชั้นนี้จะอยู่ในช่วง 200-600 °C ของแข็งที่เหลือในชั้นนี้คือคาร์บอนที่อยู่ในรูปถ่านซึ่งจะทำปฏิกิริยาในชั้นรีดักชันและการเผาไหม้

โซนเผาไหม้อากาศจะถูกส่งผ่านเข้ามาบริเวณนี้เป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงกับอากาศสัมผัสกันเป็นจุดแรกทำให้

เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างออกซิเจนกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงซึ่งทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อุณหภูมิในโซนนี้จะอยู่ในช่วง 1,100 °C – 1,500 °C



โซนรีดักชันคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่ได้จากชั้นการเผาไหม้จะไหลเข้าสู่ชั้นรีดักชันซึ่งในปฏิกิริยาชั้นนี้จะเปลี่ยนแบบดูดความร้อนโดยเปลี่ยนก๊าซที่เผาไหม้ไม่ได้คือคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำบางส่วนให้มาเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ โดยที่คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่เกิดขึ้นในชั้นการเผาไหม้จะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนร้อนคือ ชั้นรีดักชันจะได้ออกคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนดังสมการที่ 2.4 และอุณหภูมิในโซนนี้จะอยู่ในช่วง 500-900 °C



2.2 อัตราความสิ้นเปลืองชีวมวลและพลังงาน

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลของเตาแก๊สชีวมวลคืออัตราส่วนของมวลเชื้อเพลิงต่อระยะเวลาการใช้งานเตาได้จากสมการดังนี้ [4]

$$FCR = \frac{W_{biomass}}{T_0} \quad (8)$$

เมื่อ FCR คืออัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)

$W_{biomass}$ คือมวลของชีวมวล (kg)

T_0 คือระยะเวลาการใช้งาน

2.3 ประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวล

การทดสอบหาประสิทธิภาพเตาแก๊สชีวมวลจะใช้วิธีการทดสอบโดยการต้มน้ำ (Boiling test) จากพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำต่อพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง [4]

$$\eta_{th} = \frac{Q_U}{Q_{Fuel}} \quad (9)$$



เมื่อ η_{th} คือประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวล (%)

Q_U คือปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kJ)

Q_{Fuel} คือปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (kJ)

ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์หาได้ความร้อนที่ใช้ในการอุ่นและระเหยน้ำ [4]

$$Q_U = [m_w C_{wb} (T_{wb} - T_{wi})] + [m_{w2} h_{fg}] \quad (10)$$

เมื่อ m_{w1} คือมวลน้ำเริ่มต้น (kg)

m_{w2} คือมวลน้ำระเหย (kg)

C_{pw} คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ

มีค่า 4.186 kJ/kg °C

h_{fg} คือค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ

2,257 kJ/kg

ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงหาได้ตามสมการ [4]

$$Q_{Fuel} = m_{Fuel} \times LHV_{bio} \quad (11)$$

เมื่อ m_{Fuel} คือมวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg)

LHV_{bio} คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

3. วิธีการทดลอง

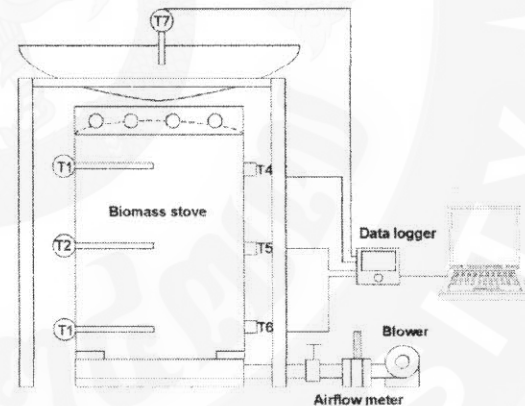
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

เตาแก๊สชีวมวลที่ใช้ทดสอบเป็นเตาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 cm และสูง 85 cm สามารถบรรจุข้าวโพดได้สูงสุด 11-12 kg ดังรูปที่ 1 ด้านบนหัวเตาแก๊สแบบถอดเข้าออกได้ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูแก๊ส 5 mm จำนวนทั้งหมด 30 รู ขอบด้านบนเตาเจาะรูเพื่อให้อากาศผสมกับแก๊สเชื้อเพลิงขณะเผาไหม้ จำนวน 8 รู ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5 cm ด้านล่างเตามีตะแกรงรองรับเชื้อเพลิง ด้านล่างตะแกรงเป็นห้องเก็บขี้เถ้า ด้านข้างห้องเก็บขี้เถ้าเจาะฝักห่อขนาด 5 cm ต่อร่วมกับพัดลมเป่าอากาศรุ่น VENZ ขนาด 372 W เพื่อใช้ป้อนอากาศเพื่อเผาไหม้ชีวมวล ความเร็วรอบพัดลมควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์รุ่น MITSUBISHI D700 ขนาด 4.2 A สร้างอัตราการไหลอากาศได้สูงสุด 1-390 m³/h ปริมาณอากาศที่ป้อนเข้าเตาวัดได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลอากาศ Lutron รุ่น YK-180 AM วัดค่าอัตราการไหลอากาศสูงสุด 4-240 m³/h การวัดอุณหภูมิภายในเตา ภายนอกเตา น้ำร้อนและอากาศแวดล้อมใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบ Type K ร่วมกับ Type R ต่อร่วมและอ่าน

ค่าจากเครื่องบันทึกข้อมูลรุ่น YOGOGAWA รุ่น DX 220-1-2 น้ำหนักของเชื้อเพลิงและน้ำวัดได้จากเครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล ของ DIGI รุ่น DS-530 ชั่งน้ำหนักได้สูงสุด 60 kg ต่ำสุด 0.4 kg

3.2 วิธีการทดลอง

เชื้อเพลิงหรือวัสดุเหลือใช้ในการเกษตรที่ใช้ทดสอบเป็นซังข้าวโพดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 2-2.5 cm ความยาวซังข้าวโพดอยู่ในช่วง 5-10 cm มีค่าความชื้นเฉลี่ยต่ำกว่า 10% ความหนาแน่นเฉลี่ย 285 kg/m³ และมีค่าความร้อนเฉลี่ย 17.7 MJ/kg ในการทดลองได้ทดสอบปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทั้งหมด 3 ค่า คือ 3.12 3.30 และ 3.36 โดยค่าทั้ง 3 ค่า เป็นค่าที่อยู่ในช่วงของการเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [3] โดยทุกๆ การทดลองจะทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง การวัดอุณหภูมิเตาแก๊สชีวมวลวัดทั้งหมด 8 จุด ได้แก่ อุณหภูมิภายในเตาด้านบน ตรงกลางและด้านล่าง อุณหภูมิภายนอกเตาด้านบน ตรงกลางและด้านล่าง อุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิอากาศแวดล้อม ระยะเวลาการทดสอบโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 40-60 min โดยประเมินอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงพลังงาน อุณหภูมิการเดือดของน้ำ ประสิทธิภาพความร้อน การถ่ายเทความร้อนของเตาและต้นทุนการผลิตความร้อน



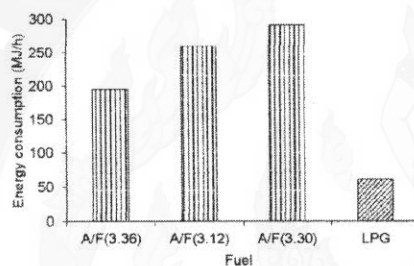
รูปที่ 1 โดอะแกรมการทดสอบเตาแก๊สชีวมวลไร้ควัน

4. ผลการทดลอง

4.1 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานและเชื้อเพลิง

รูปที่ 2 แสดงอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงเทียบกับการใช้เตาแก๊สหุงต้ม ผลการศึกษาพบว่า การปรับค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.36 ให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดเมื่อเทียบกับการปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.12 และ 3.30 ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้มีปริมาณต่ำเกินไปไม่เพียงพอต่อการเผาไหม้ ส่งผลให้ระยะเวลา

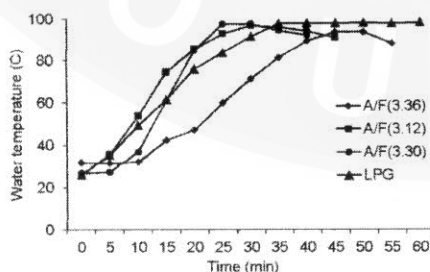
ที่ใช้ในการเผาไหม้หรือลุกไหม้เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงลดลง [5] การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.36 ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานและเชื้อเพลิงต่ำสุด 195 MJ/h และ 11 kg/h ตามลำดับ ในขณะที่การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.30 ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานและเชื้อเพลิงสูงสุด 292 MJ/h และ 16.5 kg/h ตามลำดับ อย่างไรก็ตามถ้าเทียบอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานกับเตาแก๊สหุงต้มก็พบว่าเตาแก๊สหุงต้มให้อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าเตาชีวมวลหลายเท่าตัวซึ่งมีผลเกิดจาก ชนิดหรือสถานะของเชื้อเพลิงที่เป็นเชื้อเพลิงแข็ง ค่าความร้อน ความชื้น ความสามารถในการผสมอากาศเมื่อเกิดการเผาไหม้ [5] เป็นต้น



รูปที่ 2 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน

4.2 อุณหภูมิการเดือดของน้ำ

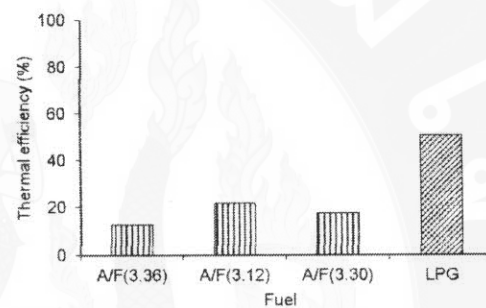
การศึกษาอุณหภูมิการเดือดของน้ำภายใต้การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงดังรูปที่ 3 พบว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.12 อุณหภูมิน้ำจะเพิ่มขึ้นได้เร็วกว่าการปรับอัตราส่วนอากาศที่ 3.36 และ 3.30 ทั้งนี้มีสาเหตุเกิดจากอัตราส่วนผสมของอากาศกับซังข้าวโพดในสภาวะนั้นมีความเหมาะสม ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เกิดสูงสุด อุณหภูมิน้ำสูงสุดที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.30 และ 3.12 เท่ากับ 97°C - 98°C ตามลำดับ โดยน้ำมีพฤติกรรมการเดือด ในขณะที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.36 อุณหภูมิน้ำสูงสุด 94°C ซึ่งจะอยู่ระหว่างกำลังจะเดือด ถ้าเทียบการใช้งานกับแก๊สหุงต้มพบว่า ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.12 จะทำให้น้ำเดือดเร็วกว่าและมีอุณหภูมิสูงกว่าการใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงเล็กน้อย



รูปที่ 3 อุณหภูมิการเดือดของน้ำ

4.3 ประสิทธิภาพความร้อน

รูปที่ 4 แสดงประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวลแบบใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงเทียบกับประสิทธิภาพความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มโดยพบว่า การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.12 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 21.5 % ถัดมาเป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.30 ให้ประสิทธิภาพความร้อน 17.2 % และถ้าเทียบกับประสิทธิภาพความร้อนกับเตาแก๊สหุงต้มพบว่าเตาแก๊สหุงต้มให้ประสิทธิภาพสูงเกือบถึง 50 % อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับเตาชีวมวลชนิดอื่นโดยเฉลี่ยมีประสิทธิภาพความร้อน 16-24 % [6]



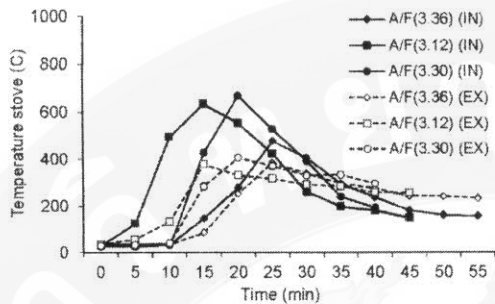
รูปที่ 4 ประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวลเทียบกับแก๊สหุงต้ม

4.4 อุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน

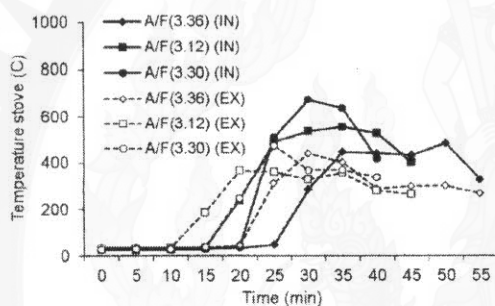
รูปที่ 5 และ 6 แสดงอุณหภูมิภายในและนอก ส่วนบน ส่วนกลางและส่วนล่างของเตาแก๊สชีวมวลภายใต้การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทั้งหมด 3 ค่า โดยพบว่า การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.12 จะมีผลให้อุณหภูมิภายในเตาเพิ่มสูงขึ้นมากกว่าการปรับอัตราส่วนอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับที่อัตราส่วนดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ได้ดีที่สุด อุณหภูมิภายในเตาจะเริ่มเพิ่มขึ้นมากกว่า 100°C ตั้งแต่ประมาณ 0-5 นาทีแรกของการเริ่มต้นจุดเตาจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยการเผาไหม้ซังข้าวโพดจะถูกล้อมจากด้านบนของเตาไปสู่ด้านล่างของเตาโดยอุณหภูมิสุดท้ายของเตาที่ด้านล่างมีอุณหภูมิสูงสุดมากกว่า 1000°C และเมื่อคิดอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาตั้งแต่การเริ่มต้นทำงานภายในเตามีอุณหภูมิเฉลี่ย 517°C

ในส่วนของการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนออกสู่ภายนอกเตาในสภาวะการปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมที่สุดผลต่างอุณหภูมิระหว่างภายในภายนอกเตาจะอยู่ระหว่าง 35-52% ซึ่งนั่นหมายถึงเตาชีวมวลมีการสูญเสียความร้อนที่สูง ซึ่งถ้ามีการเพิ่มความหนาของผนังหรือฉนวนของเตาจะส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนของเตาเพิ่มสูงขึ้นมาก

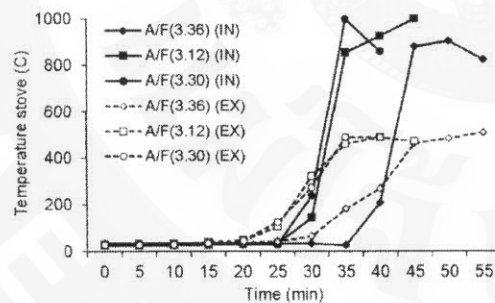
กว่าเดิม [7] หรืออาจมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับเตาแก๊สหุงต้มได้



รูปที่ 5 อุณหภูมิภายในและนอกส่วนบนเตาแก๊สชีวมวล



รูปที่ 6 อุณหภูมิภายในและนอกส่วนกลางเตาแก๊สชีวมวล



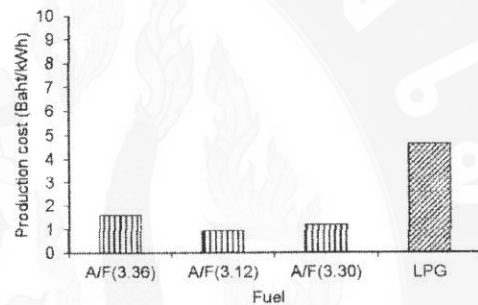
รูปที่ 7 อุณหภูมิภายในและนอกส่วนล่างเตาแก๊สชีวมวล

4.5 ต้นทุนการผลิตความร้อน

รูปที่ 7 แสดงต้นทุนการผลิตความร้อนของเตาชีวมวลเปรียบเทียบกับเตาแก๊สหุงต้มผลการวิเคราะห์พบว่า การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.12 ให้ต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำสุดโดยมีราคาอยู่ที่ 0.94 บาท/kWh ถัดมาเป็นการปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.30 โดยมีราคาอยู่ที่ 1.18 บาท/kWh และเมื่อเปรียบเทียบราคาดันทุนกับการใช้แก๊สหุงต้มพบว่าเตาชีวมวลให้ต้นทุนต่ำกว่าถึง 3.5 เท่า โดยการใช้อัตรา

ตัวมีต้นทุนเฉลี่ย 4.64 บาท/kWh ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบเตาแก๊สหุงต้มในสภาวะราคาแก๊สหุงต้มลอยตัว [8]

ผลจากการวิเคราะห์สมรรถนะของเตาชีวมวลที่ใช้ซึ่งข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงหลายๆ ด้านแสดงให้เห็นว่าเตาชีวมวลมีศักยภาพในด้านสมรรถนะและราคาต้นทุนการผลิตความร้อน อย่างไรก็ตามถ้ามีการศึกษาในส่วนของความหนาของผนังหรือฉนวนรวมไปจนถึงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงแล้วน่าจะส่งผลให้เตามีสมรรถนะที่สูงขึ้นและมีต้นทุนที่ต่ำกว่านี้ สุดท้ายเมื่อนำไปส่งเสริมให้กับชุมชนน่าจะเกิดประโยชน์ในเรื่องของการลดการใช้แก๊สหุงต้มและลดการเผาทำลายเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของเกษตรกรลงได้



รูปที่ 7 ต้นทุนการผลิตความร้อน

5. สรุปผลการทดลอง

- การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจะมีผลกระทบต่ออัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อุณหภูมิน้ำร้อน อุณหภูมิภายในเตา ระยะเวลาให้ความร้อน ประสิทธิภาพความร้อนและต้นทุนการผลิตความร้อน
- การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.36 ให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานและเชื้อเพลิงต่ำสุดคิดเป็น 195 MJ/h และ 11 kg/h ตามลำดับ
- การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.12 อุณหภูมิน้ำจะเพิ่มขึ้นและเดือดได้เร็วกว่าและมีอุณหภูมิสูงกว่าการปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.30 และ 3.36 โดยอุณหภูมิน้ำเริ่มเดือดตั้งแต่ 20 นาที หลังการจุดเตาชีวมวล
- อุณหภูมิภายในเตาจะเริ่มเพิ่มขึ้นมากกว่า 100 °C ตั้งแต่ประมาณ 0-5 นาที มีอุณหภูมิสูงสุดมากกว่า 1000 °C อุณหภูมิภายในเตาตลอดการใช้งานเฉลี่ย 517 °C
- เตาชีวมวลมีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 21.5% และมีต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำสุด 0.94 บาท/kWh โดยเกิดขึ้นที่การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.12
- เพื่อให้เตามีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นและต้นทุนที่ต่ำกว่าเดิมจำเป็นต้องมีการศึกษาในส่วนของการหาอัตราส่วน



อากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสม ความหนาแน่นหรืออุณหภูมิเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนของเตาชีวมวล

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจาก

- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปี 2559 ภายใต้โครงการการพัฒนาเตาก๊าซชีวมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชน

- ทุนอุดหนุนโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

- ศูนย์วิจัยพลังงานในการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือวัด และสถานที่ในการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf เข้าดูเมื่อวันที่ 7/05/2559
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน 2554 เอกสารประกอบองค์ความรู้เรื่องนโยบายการปรับโครงสร้างราคาก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) <http://www.eppo.go.th/admin/KM-lpg.pdf> เข้าดูเมื่อวันที่ 7/05/2559
- [3] Food and Agriculture Organization (FAO), Wood Gas as Engine fuel, Mechanical Wood Products Branch Forest, Italy, 1986.
- [4] ณัฐวุฒิ ดุษฎี กิตติกร สาสุจิตต์ นิกราน หอมดวง อภิชาติ สอนคำทอง เสรี กังวานกิจ (2551). การประชุมวิชาการ

ประจำปี สำนักวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

[5] นคร ทิพย์วาศ์ (2547) พื้นฐานการเผาไหม้ เอกสารประกอบการสอนคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

[6] ธเนศ ไชยชนะ, ทมะกรือชม อาลี, มัลยา หลงสมัน (2555) การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มระดับครัวเรือนวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับที่ 32 หน้า 626-630

[7] ชูพงษ์ ทองคำสมุทร (2556) อิทธิพลของอุณหภูมิและความร้อนและการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติต่อการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุผนังอาคารวารสารวิชาการคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น หน้า 100-111

[8] สมมาส แก้วลวน ตารังศักดิ์ จันโหลสี สุรัชย์ จันทรศรี เวศินปัยรัตน์ (2556) การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับที่ 1 หน้า 24-33





ภาคผนวก ง

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายธนาชาติ มหาวັນ
 เกิดเมื่อ 26 พฤศจิกายน 2528
 ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2551 ปริญญาตรี คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 จังหวัดเชียงใหม่
 อีเมล taex2012@gmail.com

ประวัติผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

- 1) ธนาชาติ มหาวັນ, ชูรัตน์ ธารารักษ์, ณัฐวดี ดุษฎี, กิตติกร สาสุจิตต์ และ นิกราน หอมดวง. 2559. สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลไร่ควั่นเมื่อใช้ขังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง. น. 626-631. ใน การประชุมวิชาการ เครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12 ระหว่างวันที่ 8 - 10 มิถุนายน 2559 ณ โรงแรมวังจันทร์ ริเวอร์วิว จ.พิษณุโลก.
- 2) ธนาชาติ มหาวัน, ชูรัตน์ ธารารักษ์, ณัฐวดี ดุษฎี, กิตติกร สาสุจิตต์ และ นิกราน หอมดวง. 2559. Application of Gasification Technology for Design Household Smokeless Biomass Stove. น. C28-C32. ใน การประชุมวิชาการ TRI-UNIVERSITY INTERNATIONAL JOINT SEMINAR & SYMPOSIUM ครั้งที่ 23 ระหว่างวันที่ 22-28 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ณ Bogor Agricultural University ประเทศอินโดนีเซีย.