

การศึกษาระบบผลิตแก๊สชีววมวลด้วยเทคโนโลยีฟลูอิดซ์เบด
จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร



พงศธร มณฑิพย์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

การศึกษาระบบผลิตแก๊สชีวมวลด้วยเทคโนโลยีฟลูอิด์เบด
จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร



พงศธร มณฑิพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษาระบบผลิตแก๊สชีววมวลด้วยเทคโนโลยีฟลูอิดซ์เบด
จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

พงศธร มณฑิพย์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การศึกษาระบบผลิตแก๊สชีววมวลด้วยเทคโนโลยีฟลูอิดไคซ์เบตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร
ชื่อผู้เขียน	นายพงศธร มณฑิพย์
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีศักยภาพทางด้านชีววมวลสูง การพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนเชื้อเพลิงชีววมวลเป็นพลังงานจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับประเทศไทย ซึ่งการพัฒนาระบบผลิตแก๊สชีววมวลเป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่แปรรูปเชื้อเพลิงชีววมวลให้เป็นพลังงานได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำชีววมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบต โดยใช้ทราายเป็นวัสดุเบตและเลือกใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงชีววมวลในการทดลอง โดยมีการศึกษาตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบจนถึงการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อน ประกอบด้วยการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของชีววมวล ตัวแปรที่มีผลต่อการการลอยตัว การออกแบบห้องเผาไหม้ การสร้างห้องเผาไหม้ การทดสอบสมรรถนะเตาผลิตแก๊สชีววมวลโดยมีการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 2.56 4.44 และ 5.89 kg/h และอัตราส่วนสมมูลในการทดสอบทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0.3 0.6 และ 0.9 การวิเคราะห์ข้อมูลประกอบด้วยการวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีววมวล ประสิทธิภาพความร้อนระบบผลิตแก๊ส องค์ประกอบแก๊สชีววมวลภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ ประสิทธิภาพความร้อนรวมและต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อน ผลการศึกษาพบว่าคุณสมบัติเคมีของซังข้าวโพดมี ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงที่และปริมาณเถ้า 11.82% 70.81% 14.76% และ 5.62% ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและกำมะถันในซังข้าวโพดมีค่าเฉลี่ย 42.12% 45.11% 6.52% 0.45% และ 0.01% ตามลำดับ ค่าความร้อนเฉลี่ย 14260 kJ/kg การปรับเพิ่มตัวเลขเรย์โนลด์นัมเบอร์ส่งผลให้การลอยตัวชีววมวลเพิ่มสูงขึ้นและการปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหลอากาศส่งผลต่อพฤติกรรมกลายตัวของชีววมวล ขนาดชีววมวลทดสอบที่เหมาะสมเฉลี่ยมีขนาด 3 mm ห้องเผาไหม้ที่ออกแบบได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ความสูงห้องเผาไหม้ 102 cm ความสูงของชั้นเบตที่ใช้ทราয়สูง 4.2 cm การปรับอัตราการป้อนซังข้าวโพดเฉลี่ย 4.44 kg/h ที่การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ให้สมรรถนะการทำงานสูงสุด โดยมีอัตราความร้อนเปลืองพลังงานจำเพาะ 7.56 kJ/kWh และประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวลเฉลี่ย

26.40% การปรับเพิ่มอัตราส่วนสมมูลส่งผลต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีววมวล องค์ประกอบแก๊สที่วัดได้ในสภาวะสมรรถนะสูงสุดประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 19.1% ไฮโดรเจน 8.38% มีเทน 1.95% ออกซิเจน 5.5% คาร์บอนไดออกไซด์ 11% และ ไนโตรเจน 54.07% แก๊สชีววมวลมีค่าความร้อนเฉลี่ย 3899.23 kJ/Nm³ และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของระบบผลิตแก๊ส 77.29% เมื่อนำมาวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนและนำไปเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สหุงต้มส่งผลให้มีต้นทุนที่ต่ำกว่ากับแก๊สหุงต้มนั้นคือ 0.62 baht/kWh

คำสำคัญ : ชังข้าวโพด, ชีวมวล, แก๊สชีววมวล, ฟลูอิดไธเบต, อัตราส่วนสมมูล



Title	STUDY OF A PRODUCER GAS PRODUCTION SYSTEM WITH FLUIDIZED BED TECHNOLOGY FROM AGRICULTURAL WASTE
Author	Mr. Pongsatorn Monthip
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Nigran Homdoun

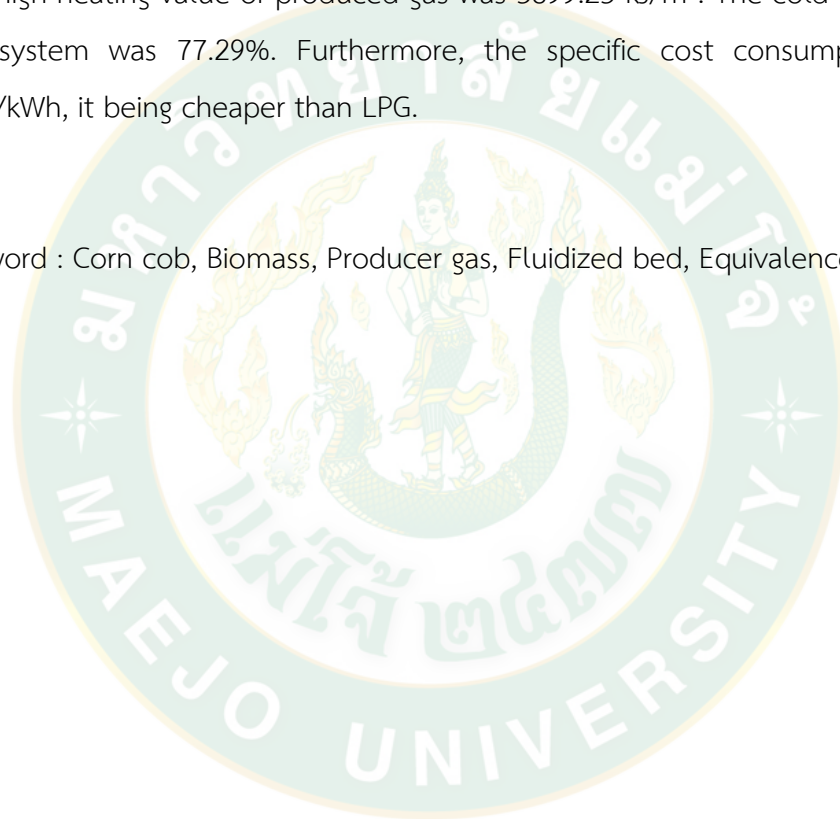
ABSTRACT

Thailand had the biomass potential. Therefore, improving equipment that could change biomass fuel into energy is an important issue for the country. Biomass gasification system, one of the technologies used for transforming biomass fuel into energy, needs to be developed. The purpose of this research was to study fuel production that was produced by agricultural waste using fluidized bed gasification technology. Sand was used as bed material and corncobs was used as agricultural waste. The process of this research was from designing the initial system to analyzing specific cost consumption that included studying biomass chemical properties, parameters affected to floating behavior, designing and constructing combustion chamber and testing performance of the system. Three levels of fuel consumption, 2.56, 4.44 and 5.89 kg/h and three equivalence ratios, 0.3, 0.6 and 0.9 were used for testing. The performance of system was evaluated by analysis of specific energy consumption, specific fuel consumption, thermal efficiency, cold gas efficiency, gas compositions under conditions, and specific cost consumption.

The results indicated that chemical properties of corncobs, moisture content, volatile content, fixed carbon and ash content were 11.82%, 70.81%, 14.76% and 5.62%, respectively. The contents of carbon, oxygen, hydrogen, nitrogen and sulfur in corncobs were 42.12%, 45.11%, 6.52%, 0.45% and 0.01%, respectively. The average heating value was 14260 kJ/kg. Floating was higher when Reynold number increased. Adjusting air flow rate also affected to floating behavior. The proper biomass size was

3 mm. The diameter of consumption chamber was 25 cm and height was 102 cm. The height of bed filled with sand was 4.2 cm. Fuel consumption was 4.44 kg/h. The system performed at it bests with equivalent ratio being 0.6. The specific energy consumption was 7.56 kJ/kWh. The average thermal efficiency was 26.40% and adjustment equivalence ratios were affected by the efficiency. The gas compositions under this condition consisted of carbon monoxide, hydrogen, methane, oxygen carbon dioxide and nitrogen that equaled to 19.1%, 8.38%, 1.95%, 5.5%, 11%, and 54.0%, respectively. The high heating value of produced gas was 3899.23 kJ/m³. The cold gas efficiency of the system was 77.29%. Furthermore, the specific cost consumption was 0.62 baht/kWh, it being cheaper than LPG.

Keyword : Corn cob, Biomass, Producer gas, Fluidized bed, Equivalence ratio



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง ที่ได้รับเป็นประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และกรุณาให้ความรู้คำแนะนำต่าง ๆ รวมถึงคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงสำเร็จไปด้วยดี

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

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริनुช จินดารักษ์ ซึ่งได้ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษาและแนะนำในการแก้ไข ปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ใน “โครงการผลิตและพัฒนาศัภษาบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา” ครั้งนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่าน รวมถึงบุคลากรวิทยาลัยพลังงานทดแทนและศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่พร้อมให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในหลาย ๆ ด้าน จนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2560 ภายใต้กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

ขอขอบคุณพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ทิพย์าวงศ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในการให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบคุณครอบครัว เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน พร้อมทั้งคำแนะนำและเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

พงศธร มณทิพย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาคผนวกภาพ	ฅ
สารบัญภาคผนวกตาราง.....	ฅ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มา.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตการศึกษา.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร	5
2.1 แหล่งที่มาและศักยภาพชีวมวล	5
2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล	9
2.3 หลักการระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันแบบฟิกซ์เบดและฟลูอิดไคซ์เบด.....	11
2.4 การวิเคราะห์สมรรถนะระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	23
การตรวจสอบเอกสาร.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	34

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	34
3.2 วัสดุชีวมวลและการเตรียม	43
3.3 เงื่อนไขการวิจัย	44
3.4 วิธีการทดลอง.....	45
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด	49
4.1 การคำนวณการออกแบบระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	49
4.2 การออกแบบระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด	56
4.3 การสร้างระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	57
บทที่ 5 ผลและอภิปรายผลการทดลอง.....	61
5.1 พฤติกรรมการลอยตัวและขนาดของชีวมวล	61
5.2 การประเมินสมรรถนะระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด	64
5.3 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแก๊สชีวมวลจากระบบผลิตแบบฟลูอิดไคซ์เบด	76
5.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด	77
5.5 การตั้งสมมติฐานและการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อน.....	79
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุปผลการวิจัย.....	83
ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม.....	85
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก แบบเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด.....	87
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณและเงื่อนไขการวิเคราะห์ต้นทุนทางการผลิตความร้อน.....	96
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ชีวมวล.....	102
ภาคผนวก ง การเผยแพร่ผลงานวิจัย	105
ประวัติผู้วิจัย.....	131



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยเดือนมกราคม – มิถุนายน 2559	1
2 แนวทางการนำเอาแก๊สชีววมวลไปใช้ในทางทฤษฎี	2
3 วัฏจักรคาร์บอนแบบปิดของเชื้อเพลิงชีววมวล	5
4 แนวทางการใช้พลังงานชีววมวล.....	6
5 แหล่งที่มาของชีววมวล.....	8
6 การนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันไปใช้งานร่วมกับเครื่องยนต์	12
7 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีววมวล	13
8 เตาผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟิกส์เบด	16
9 ฟลูอิดไคเซชันแบบสองสถานะ	17
10 ลักษณะของเบดในห้องเผาไหม้	18
11 เตาผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคเซชันเบดชนิดพองอากาศ.....	20
12 เตาผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคเซชันเบดชนิดหมุนวน	21
13 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีววมวลโดยใช้เศษไม้ไผ่และเศษวัชพืช	28
14 สมรรถนะการทำงานของเตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคเซชันเบดชนิดหมุนวน	29
15 ไดอะแกรมการศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบ	30
16 ไดอะแกรมการศึกษาเครื่องป้อนอากาศในการผลิตแก๊สโดยใช้ชีววมวล	31
17 การออกแบบเตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคเซชันเบดโดยใช้แกลบเป็นวัตถุดิบ	32
18 ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคเซชันเบด.....	35
19 ชุดทดสอบพฤติกรรมการลอยตัวของชีววมวล	36
20 เครื่องสับย่อยชีววมวลแบบหยาบ	36
21 เครื่องสับย่อยชีววมวลแบบละเอียด.....	37
22 ชุดเก็บตัวอย่างแก๊สชีววมวล.....	38
23 ถังเก็บตัวอย่างแก๊สชีววมวล.....	38
24 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	39
25 เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K 4 แบบ	40
26 เครื่องบันทึกข้อมูล.....	40
27 เครื่องวัดอัตราการป้อนอากาศ	41

ภาพที่	หน้า
28 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส	41
29 เครื่องตรวจวัดกระแสไฟฟ้า	42
30 เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์ CST รุ่น CDR-30	42
31 มานอมิเตอร์	43
32 วัสดุชีวมวล (ซังข้าวโพด)	43
33 ไดอะแกรมการทดสอบพฤติกรรมของการลอยตัวของชีวมวล	45
34 ไดอะแกรมการติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ	46
35 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา	48
36 แบบสามมิติระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด	57
37 ห้องเผาไหม้ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด	58
38 ชุดป้อนชีวมวล	58
39 อุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊ส	59
40 อุปกรณ์ลดอุณหภูมิแก๊สชีวมวล	60
41 หัวเตาเผาแก๊ส	60
42 ขนาดของชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมของการลอยตัว	61
43 ผลกระทบของชนิดชีวมวลที่มีต่อการลอยตัวในห้องเผาไหม้	62
44 ผลการศึกษาเลขเรย์โนลด์ที่ส่งผลต่อการเริ่มลอยตัวของชีวมวล	63
45 การเปรียบเทียบความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้	64
46 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	65
47 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	66
48 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวมวล	67
49 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ 2.56 kg/h	68
50 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ 4.44 kg/h	68
51 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ 5.89 kg/h	69
52 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 2.56 kg/h	70
53 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 4.44 kg/h	70
54 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 5.89 kg/h	71
55 อัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวมวลที่ 2.56 kg/h	72
56 อัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวมวลที่ 4.44 kg/h	72
57 อัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวมวลที่ 5.89 kg/h	73

ภาพที่	หน้า
58 อุณหภูมิการต้มน้ำกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h.....	74
59 อุณหภูมิการต้มน้ำกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h.....	74
60 อุณหภูมิการต้มน้ำกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h.....	75
61 การวิเคราะห์อุณหภูมิเฉลี่ยระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด	76
62 การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการใช้งานระบบ	80
63 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาซังข้าวโพดต่อต้นทุนการผลิตความร้อน.....	81
64 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนเปรียบเทียบกับแก๊สหุงต้ม	82



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ศักยภาพของชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556	8
2	ตัวอย่างการวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณ	10
3	ตัวอย่างการวิเคราะห์ชีวมวลแบบแยกธาตุ	10
4	ตัวอย่างองค์ประกอบของแก๊สชีวมวล	11
5	เปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานและระบบการทำงานของระบบผลิตแก๊สชีวมวล	22
6	ข้อดีและข้อเสียของระบบผลิตแก๊สแต่ละประเภท	22
7	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซังข้าวโพด Proximate Analysis (wt. %)	43
8	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด Ultimate Analysis (wt. %)	44
9	เงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบเตาชีวมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบด	49
10	สรุปผลการออกแบบ	55
11	องค์ประกอบแก๊สของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบด	77
12	ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของระบบ (Cold gas efficiency)	78
13	เงื่อนไขการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนของระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไธซ์เบด	79

สารบัญภาคผนวกภาพ

ภาพผนวกที่	หน้า
1 แบบห้องเผาไหม้	88
2 แบบห้องเผาไหม้ 2 มิติ.....	89
3 แบบแผ่นกระจายลม	90
4 แบบฝาครอบส่วนบนห้องเผาไหม้.....	91
5 แบบฝาครอบส่วนล่างห้องเผาไหม้.....	92
6 แบบอุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สชีวมวล	93
7 แบบอุปกรณ์ลดอุณหภูมิแก๊สชีวมวล	94
8 แบบหัวเตาเผาแก๊ส	95
9 ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของซังข้าวโพด	103
10 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด	104

สารบัญภาคผนวกตาราง

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
1 เงื่อนไขการวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการใช้งานระบบ .	100
2 เงื่อนไขการวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าเชื้อเพลิงชีวมวล	101

สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
LHV	ค่าความร้อนต่ำของชีวมวล	kJ/kg
CO	แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์	
H ₂	แก๊สไฮโดรเจน	
CH ₄	แก๊สมีเทน	
O	แก๊สออกซิเจน	
CO ₂	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	
N ₂	แก๊สไนโตรเจน	
ER	อัตราส่วนสมมูล	
FC _b	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง	kg/h
SFC	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ	kg/kWh
SEC	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ	kJ/kWh
SCC	ต้นทุนทางการผลิตความร้อน	Baht/kWh
M _b	มวลเชื้อเพลิงชีวมวล	kg
T	ระยะเวลาการใช้งานระบบแก๊สชีวมวล	h
\dot{Q}_u	อัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์	kW
m _{w,1}	มวลของน้ำเริ่มต้นทั้งหมด	kg
m _{w,2}	มวลของน้ำที่ระเหย	kg
T _{w,B}	อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ	°C
T _{w,l}	อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น	°C
C _{p,w}	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	kJ/kg °C
h _{fg}	ความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ	kJ/kg
HV _{gas}	ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้	kJ/m ³
Q _{gas}	อัตราการไหลของแก๊สที่ผลิตได้	m ³ /h
η_{CGE}	ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล	%
η_G	ประสิทธิภาพความร้อนแก๊สชีวมวล	%

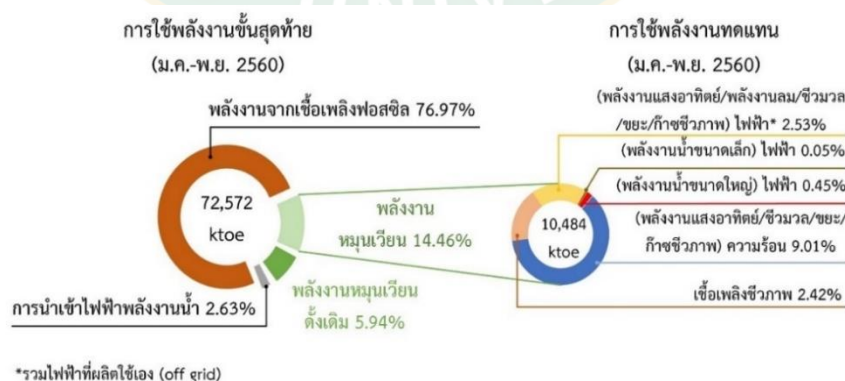
บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มา

ปัจจุบันการใช้พลังงานของมนุษย์ยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตทางเศรษฐกิจไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรม ธุรกิจการค้า การขนส่ง ที่อยู่อาศัย หรือแม้กระทั่งทางด้านการเกษตร พลังงานถือเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของการดำเนินชีวิต อีกทั้งยังสำคัญต่อการพัฒนาชุมชนและประเทศอีกด้วย ที่ผ่านมาพลังงานที่นำมาใช้ส่วนมากมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น และในปัจจุบันเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสวนทางกับการใช้พลังงานของโลกที่มีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน., 2559) และในปัจจุบันประเทศไทยยังคงเชื้อเพลิงฟอสซิล (น้ำมันสำเร็จรูป) เป็นแหล่งพลังงานให้กับประเทศสูงสุดคิดเป็น 76.97% ดังแสดงในภาพที่ 1 (กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน., 2559) ถัดมาก็เป็นกลุ่มของพลังงานหมุนเวียนและพลังงานหมุนเวียนดั้งเดิม ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามรัฐบาลก็มีความพยายามส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นซึ่งจากแผนการพัฒนาพลังงานทดแทน 20 ปี (พ.ศ. 2558 – 2579) พลังงานทดแทนจะถูกนำมาใช้ถึง 30 % ของการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศ จากปริมาณการใช้ทั้งหมดซึ่งผลจากการส่งเสริมการนำเอาพลังงานทดแทนไปใช้ประโยชน์ ชีวมวลยังคงเป็นเชื้อเพลิงอันดับหนึ่งในการนำมาผลิตพลังงานทั้งทางด้านความร้อนและไฟฟ้า ทั้งนี้เป็นผลมาจากสภาพสังคมของประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในแต่ละพื้นที่ค่อนข้างสูง

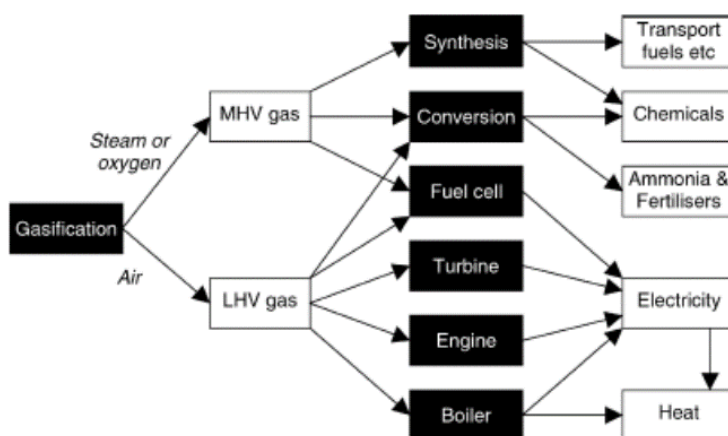


ภาพที่ 1 การใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยเดือนมกราคม – มิถุนายน 2559

ที่มา: กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (2559)

จากศักยภาพปริมาณชีวมวลที่มีอยู่อย่างเพียงพอประกอบกับความต้องการเชื้อเพลิงสำเร็จรูปที่มีอยู่ ถ้าประเทศไทยมีการพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถนำไปใช้แปลงสภาพชีวมวลที่มีอยู่เป็นเชื้อเพลิงและใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลนำเข้าน่าจะช่วยลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงลงได้เป็นอย่างมาก กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบพลูอิดไคซ์เบดเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่มีความน่าสนใจอย่างยิ่งเนื่องจากเทคโนโลยีนี้มีความยืดหยุ่นสูงในเรื่องของการใช้เชื้อเพลิงที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงจากภาคเกษตรกรรม อาทิเช่นกลุ่มของฟางข้าว ต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เศษไม้ หรือแกลบ เป็นต้น ในขณะที่เทคโนโลยีนี้ยังรองรับวัสดุเหลือใช้ทางภาคอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี เช่น ขี้เลื่อยหรือกากของเสีย เป็นต้น เทคโนโลยีนี้มีความเสถียรและมีความต่อเนื่องในการทำงานมากกว่าระบบผลิตแก๊สแบบฟลักซ์เบด อีกทั้งประสิทธิภาพความร้อนของระบบโดยรวมจะสูงกว่าการเผาไหม้โดยตรง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559) ซึ่งปกติกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีประสิทธิภาพความร้อนอยู่ในช่วง 50-80% ในขณะที่การเผาไหม้โดยตรงมีประสิทธิภาพสูงสุดในช่วง 10-20%

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบพลูอิดไคซ์เบดเป็นเทคโนโลยีในการเปลี่ยนรูปชีวมวลหรือของแข็งให้เป็นแก๊สในรูปแบบเทอร์โมเคมีคอล โดยใช้การเผาไหม้แบบจำกัดอากาศ ซึ่งแก๊สที่ได้จากกระบวนการจะ ได้แก่ CO , H_2 และ CH_4 แก๊สกลุ่มนี้เป็นแก๊สที่ติดไฟได้และมีค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ $3\text{-}5 \text{ MJ/Nm}^3$ ซึ่งบางครั้งเรียกว่าแก๊สความร้อนต่ำ (Low heating value) หรือแก๊สความร้อนปานกลาง (Medium heating value) การนำเอาแก๊สนี้ไปใช้งาน สามารถแบ่งได้หลากหลายรูปแบบดังแสดงในภาพที่ 2 (Molino et al., 2016) ไม่ว่าจะเป็นการนำเชื้อเพลิงไปใช้กับเครื่องยนต์ในการผลิตไฟฟ้า ผลิตไอน้ำหรือสารเคมี อีกทั้งถ้าพัฒนาจากค่าความร้อนระดับต่ำให้เป็นค่าความร้อนในระดับปานกลางยังสามารถนำไปผลิตสารเคมีได้อีกทางหนึ่ง



ภาพที่ 2 แนวทางการนำเอาแก๊สชีวมวลไปใช้ในทางทฤษฎี

ที่มา: Molino et al. (2016)

อย่างไรก็ตามประโยชน์ที่ได้จากเทคโนโลยีนี้มีค่อนข้างสูงคือ จะได้แก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนให้กับโรงไฟฟ้าหรือแหล่งพลังงานความร้อนในระดับชุมชนได้ และที่สำคัญการศึกษาและวิจัยภายในประเทศในการผลิตแก๊สจากระบบนี้ยังคงมีไม่มากนัก ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงสนใจในการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สชนิดนี้เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผลิตแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าหรือการศึกษาในอนาคตอื่น ๆ กระบวนการศึกษานี้จะซึ่งจะศึกษาในส่วนของการออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบไปด้วยการศึกษาผลของขนาดของเชื้อเพลิงที่รองรับ อุณหภูมิภายในของระบบ อัตราการป้อนอากาศ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง องค์ประกอบของแก๊ส ประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊ส (Gasifier efficiency) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนถ่ายความร้อน (Thermal conversion efficiency) และต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงของเทคโนโลยี โดยใช้ทราายเป็นวัสดุเบดในการศึกษา ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยจะเป็นแนวทางการเอาเทคโนโลยีชนิดนี้ไปใช้ในอนาคตและเป็นต้นแบบในการเพิ่มสมรรถนะของแก๊สให้สูงขึ้นเป็นลำดับต่อไปในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง
2. เพื่อศึกษาตัวแปรและประเมินสมรรถนะของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด
3. เพื่อศึกษาวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด

ขอบเขตการศึกษา

1. ระบบผลิตแก๊สที่ใช้ทำการวิจัยเป็นแบบฟลูอิดไคซ์เบด
2. ใช้ชีวมวลซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง
3. ใช้ทราายเป็นวัสดุเบดในการศึกษา
4. ขนาดของซังข้าวโพดที่ใช้ในการศึกษามีขนาดอยู่ในช่วง 1-5 mm
5. อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลอยู่ในช่วง 2-6 kg/h
6. ค่าอัตราส่วนสมมูลอยู่ในช่วง 0.3-0.9

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิด์เบดที่รองรับการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร
2. ได้ข้อมูลตัวแปรที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิด์เบด
3. ได้แก๊สชีววมวลที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับระบบผลิตไฟฟ้าแก๊สซิฟิเคชัน
4. ได้ต้นทุนพลังงานความร้อนสำหรับการผลิตความร้อนด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิด์เบด



บทที่ 2

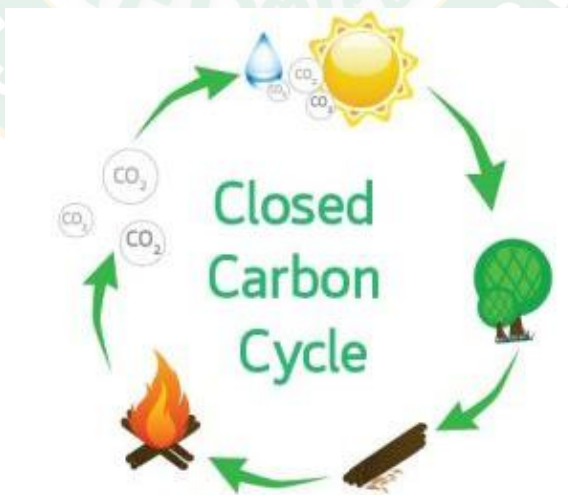
ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับระบบผลิตแก๊สชีววมวลด้วยเทคโนโลยีฟลูอิดไคด์เบดจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ดังนั้นหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะศึกษาเกี่ยวกับความหมายและแหล่งที่มาของชีววมวล กระบวนการฟลูอิดไคด์เซชัน กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคด์เบด ประสิทธิภาพความร้อนของเตาผลิตแก๊สชีววมวล และค่าความร้อนของแก๊สชีววมวล

2.1 แหล่งที่มาและศักยภาพชีววมวล

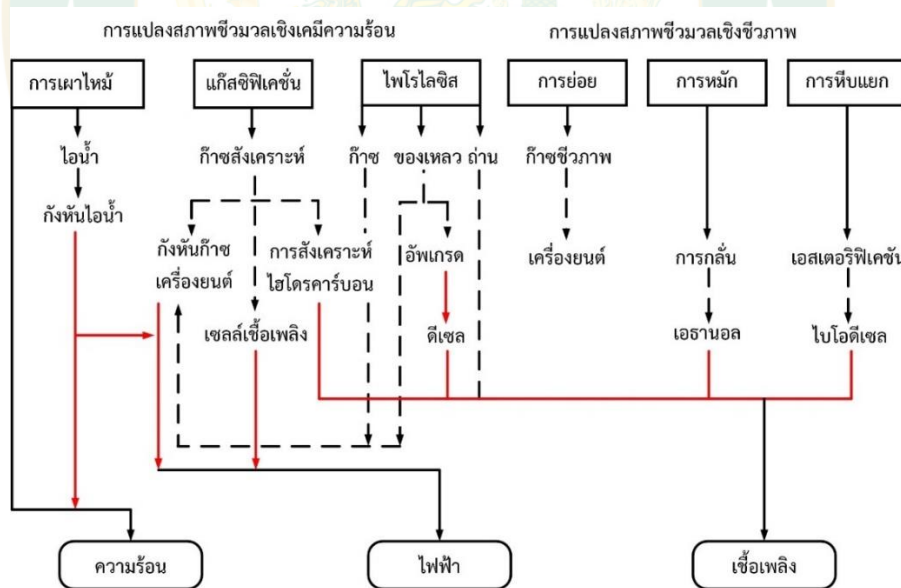
ชีววมวล (Biomass) เป็นแหล่งให้พลังงานที่สำคัญของมนุษย์ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนที่มีแหล่งกำเนิดจากดวงอาทิตย์ โดยจุดเริ่มต้นของพลังงานเริ่มมาจากพืชหรือต้นไม้ได้รับแสงอาทิตย์และนำเอาพลังงานจากแสงอาทิตย์นั้นไปใช้ผ่านระบบการสังเคราะห์แสงของต้นไม้ซึ่งจะเปลี่ยนแสงอาทิตย์ น้ำและก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในอากาศเป็นน้ำตาล หรือ คาร์โบไฮเดรตซึ่งจะสะสมอยู่ในชีววมวลเพื่อที่จะได้ปลดปล่อยออกมา โดยวัฏจักรของเชื้อเพลิงชีววมวลนั้นเป็นวัฏจักรการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาความร้อนระบบปิด ซึ่งการเผาไหม้ชีววมวลทำให้ก๊าซคาร์บอนที่สะสมอยู่ในชีววมวลปลดปล่อยออกมา ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วัฏจักรคาร์บอนแบบปิดของเชื้อเพลิงชีววมวล

ที่ผ่านมาเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่จะถูกทิ้งให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ภายในพื้นที่การเพาะปลูกหรือบางครั้งเกษตรกรจะทำการกำจัดโดยการเผาซึ่งส่งผลให้เกิดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม แต่ในปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานสำคัญของประเทศเกษตรกรรมและประเทศที่กำลังพัฒนา เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ ทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายเชื้อเพลิงชีวมวลให้แก่ผู้ที่ต้องการนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์และเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย เชื้อเพลิงชีวมวลมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดีและให้ค่าพลังงานความร้อนในระดับที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4 (นคร, 2558)

การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน ไอน้ำหรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและลดโอกาสในการสร้างภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคการขนส่งหรือการใช้ถ่านหินในการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า สำหรับในประเทศไทยนั้นนอกเหนือจากพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้วพลังงานชีวมวลจัดได้ว่าเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับการใช้เป็นพลังงานหลักทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล



ภาพที่ 4 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล

แหล่งที่มาชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถหาได้ง่ายโดยมีอยู่ทั่วไปในท้องถิ่นและสามารถเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงมาเป็นพลังงานชีวมวลได้โดยต้นทุนที่ไม่สูง โดยบางงานวิจัยแบ่งประเภทของชีวมวลตาม

ปริมาณความชื้นภายในชีวมวล (Moisture Content) เพื่อสะดวกในการนำเทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวลไปประยุกต์ใช้ ชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูงประมาณ 50% จะเรียกว่า Wet Conversion Process เช่น ชานอ้อยและกากน้ำตาล และชีวมวลที่มีความชื้นต่ำจะเรียกว่า Dry Conversion Process เช่น แกลบและฟางข้าว (Muller, 2009) อย่างไรก็ตามบางงานวิจัยแบ่งประเภทของชีวมวลได้ตามแหล่งกำเนิดของชีวมวล ดังแสดงในภาพที่ 5 (BioEnergyConsult, 2018) ซึ่งรายละเอียดการแบ่งประเภทของชีวมวลสามารถแบ่งได้ดังนี้ (Muller, 2009) (นคร, 2558)

1) ชีวมวลที่เกิดจากการเพาะปลูก ชีวมวลประเภทนี้เกิดขึ้นจากการเพาะปลูกขึ้นและเหลือใช้จากจุดประสงค์หลักของการปลูกเพื่อเป็นอาหารแก่คนหรือสัตว์ ซึ่งส่วนมากเป็นพืชผลทางการเกษตร (Agricultural crops) อาทิเช่น อ้อย ข้าวโพดและมันสำปะหลัง เป็นต้นหรือปลูกขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลและแปรรูปทำเป็นเชื้อเพลิงเหลว นอกจากนี้ยังมีการปลูกพืชทางการเกษตรชนิดอื่น ๆ เพื่อใช้เมล็ดสกัดเป็นน้ำมัน เช่น ปาล์มน้ำมัน สบู่ดำ งา ละหุ่ง หรือพืชตระกูลถั่วต่าง ๆ เพื่อเปลี่ยนน้ำมันจากพืชเป็นไบโอดีเซลเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบได้

2) ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากของเสียทางการเกษตร ชีวมวลประเภทนี้จะเกิดขึ้นระหว่างการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปพืชผลทางการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าวและซังข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทนี้จะมีปริมาณลิกนินต่ำประมาณร้อยละ 0-20

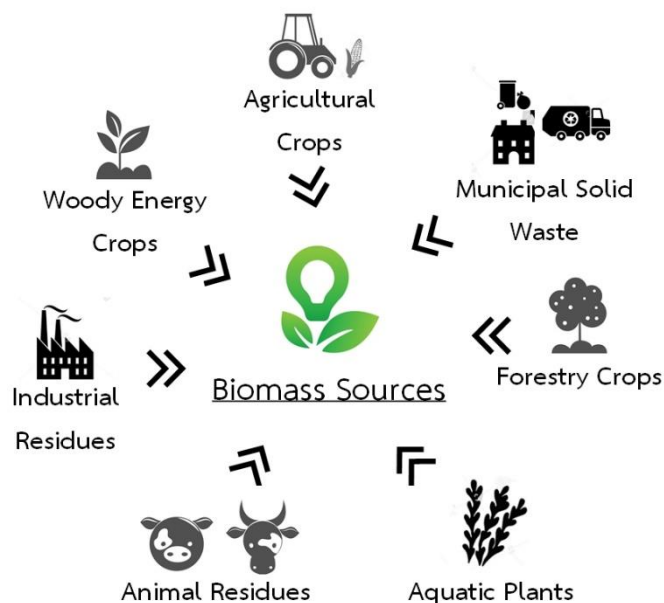
3) ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากไม้ ชีวมวลประเภทนี้เกิดขึ้นเองได้ในป่า เช่น เศษใบไม้ กิ่งไม้ที่หักหรือโคนจากต้นไม้หรือแม้กระทั่งของเสียที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ เช่น ขี้เลื่อยและปิกไม้ เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทนี้จะมีลิกนินอยู่ประมาณร้อยละ 40 และมีความชื้นค่อนข้างต่ำ

4) ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรม ชีวมวลประเภทนี้ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ เชื้อเพลิงที่ได้จากการผลิตน้ำตาล อาทิเช่น ชานอ้อยและกากสับปะรด เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวมวลประเภทนี้จะมีค่าความชื้นค่อนข้างสูง

5) ชีวมวลจากมูลสัตว์ ชีวมวลประเภทนี้เป็นสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ ไม่ว่าจะเป็นการเลี้ยงเองภายในครัวเรือน หรือเลี้ยงเพื่อเป็นสัตว์เศรษฐกิจ เช่น มูลโค มูลสุกรและมูลไก่ เป็นต้น ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลเหล่านี้จะมีความชื้นที่ค่อนข้างสูง

6) ชีวมวลจากแหล่งน้ำ ชีวมวลประเภทนี้เป็นพืชที่เกิดขึ้นภายในน้ำ ได้แก่ ชีวมวลจากน้ำทะเลหรือน้ำจืด เช่น สาหร่ายต่าง ๆ หรือพืชน้ำชนิดอื่น ๆ เป็นต้น

7) ชีวมวลจากของเหลือใช้ของมนุษย์ ชีวมวลประเภทนี้คือขยะหรือของเหลือใช้ของมนุษย์ โดยเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทนี้จะได้แก่ เชื้อเพลิงขยะที่ทิ้งจากเทศบาล เป็นต้น



ภาพที่ 5 แหล่งที่มาของชีวมวล

ปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผลิตภายในประเทศไทยจะขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรภายในประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่าข้าวเป็นผลผลิตที่ให้ปริมาณชีวมวลเหลือใช้สูงสุด ถัดมาเป็นชีวมวลจากอ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมันและซังข้าวโพด ตามลำดับ โดยชีวมวลที่เหลือทิ้งทั้งหมดของประเทศไทยเฉลี่ยอยู่ที่ $59,539 \times 10^3$ ton/year

ตารางที่ 1 ศักยภาพของชีวมวลที่สำคัญในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2556

ชนิด	ผลผลิต ($\text{ton} \times 10^3$)	ชีวมวล	ชีวมวลเหลือทิ้ง ($\text{ton} \times 10^3$)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					($\text{TJ} \times 10^3$)	($\text{ktoe} \times 10^3$)
อ้อย	66,816.4	ชานอ้อย	4,190.8	14.40	60.3	1.4
		ยอดและใบ	13,439.7	17.39	233.7	5.5
ข้าว	31,508.3	แกลบ	3,510.6	14.27	50.1	1.2
		ฟางข้าว	25,646.5	10.24	262.6	6.2
ข้าวโพด	4,616.1	ซัง	584.5	18.04	10.5	0.2
		ลำต้น	2,758.8	18.04	49.8	1.2
		ทะลายเปล่า	1,024.9	17.86	18.3	0.4
ปาล์มน้ำมัน	8,162.4	ใย	163.0	17.62	2.9	0.1
		กะลา	38.9	18.46	0.7	0.02
		ก้าน	2,203.7	9.83	21.8	0.5

ชนิด	ผลผลิต (ton×10 ³)	ชีวมวล	ชีวมวลเหลือทิ้ง (ton×10 ³)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ×10 ³)	(ktoex10 ³)
มันสำปะหลัง	30,088.0	ลำต้น	2,439.2	18.42	44.9	1.1
		เหง้า	1,834.5	18.42	33.8	0.8
		ก้าน	629.0	15.40	9.7	0.2
มะพร้าว	1,381.0	กาบ	464.2	16.23	7.5	0.2
		กะลา	128.9	17.93	2.3	0.1
ไม้ยางพารา	3,090.3	กิ่ง/ก้าน	312.1	14.98	4.7	0.1
รวม	145,853.1		59,539.9		504.3	12.0

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2559)

2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล

2.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณ คือ การวิเคราะห์หาโครงสร้างองค์ประกอบและคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของชีวมวล รวมไปถึงปริมาณคาร์บอนที่สามารถรักษาไว้หลังจากถูกย่อยสลายด้วยความร้อนซึ่งได้แก่

- ปริมาณความชื้น (Moisture) คือ ปริมาณน้ำที่อยู่ภายในชีวมวล ส่วนมากชีวมวลจะมีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งเมื่อพิจารณาความต้องการใช้ในรูปพลังงานโดยวิธีการเผาไหม้จะต้องมีความชื้นไม่เกิน 30-50%

- ปริมาณสารระเหย (Volatile matter) คือ ส่วนประกอบที่สามารถถูกติดและเผาไหม้ได้ง่าย ซึ่งหากชีวมวลมีค่าปริมาณสารระเหยสูง แสดงว่าสามารถติดไฟได้ง่าย

- ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) คือ ส่วนประกอบที่ความร้อน เมื่อมีค่าคาร์บอนคงตัวมาก ค่าความร้อนจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของชีวมวล

- ปริมาณเศษเถ้า (Ash) หรือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ เป็นส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมภายในชีวมวล ที่ถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์ ชีวมวลส่วนใหญ่มีสัดส่วนขี้เถ้าร้อยละ 10-15 ยกเว้นฟางข้าวและแกลบ

โดยการวิเคราะห์แบบประมาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ แบบพื้นฐานที่รับมา (As Received Basis) เป็นค่าที่คำนวณจากตัวอย่างที่มีความชื้นตามสภาพของตัวอย่างที่ห้องปฏิบัติการได้รับโดยไม่ผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างหรือกระบวนการอื่น แบบพื้นฐานแห้ง (Dry Basis) เป็นค่าที่คำนวณจากตัวอย่างที่ไร้ความชื้นและแบบพื้นฐานแห้งและไร้เถ้า (Dry ash free basis) เป็นค่าที่คำนวณจากตัวอย่างที่ปราศจากความชื้นและขี้เถ้า โดยตารางที่ 2 (นคร, 2558) แสดง

ตัวอย่างการวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณของชีวมวล 3 ชนิด คือ ชังข้าวโพด แกลบ และขี้เลื่อย ซึ่งโดยทั่วไปชีวมวลจะมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 14-18 MJ/kg

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ชีวมวลแบบประมาณ

ชนิด	MC (%)	Ash (%)	VM (%)	FC (%)	HV (MJ/kg)
ชังข้าวโพด	13.5	2.2	72.2	12.1	16.30
แกลบ	7.5	16.1	56.1	17.2	14.20
ขี้เลื่อย	34.9	0.7	55.1	9.3	18.00

ที่มา: นคร (2558)

2.2.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนและระบุถึงปริมาณธาตุต่าง ๆ ภายในเชื้อเพลิง ซึ่งปกติแล้วเชื้อเพลิงชีวมวลประกอบไปด้วยธาตุหลัก ๆ คือ คาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ออกซิเจน (Oxygen) ไนโตรเจน (Nitrogen) และกำมะถัน (Sulfur) รวมถึงมีธาตุอื่น ๆ ประกอบอยู่ด้วยอีกเล็กน้อย ซึ่งการวิเคราะห์จะเริ่มจากการหาปริมาณของธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนโดยวิธีการเผา ส่วนธาตุไนโตรเจนและกำมะถันจะใช้กระบวนการทางเคมีที่มีผลกระทบต่อกระบวนการสันดาปในหม้อไอน้ำ ส่วนปริมาณธาตุออกซิเจนจะไม่ทำการวิเคราะห์ แต่จะได้จากการใช้ปริมาณส่วนต่างของส่วนที่เหลือจากการหาธาตุอื่น ๆ โดยมีตัวอย่างการวิเคราะห์ชีวมวลแบบแยกธาตุของชังข้าวโพด แกลบ และขี้เลื่อย ดังแสดงในตารางที่ 3 (นคร, 2558)

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการวิเคราะห์ชีวมวลแบบแยกธาตุ

ชนิด	C (%)	O (%)	H (%)	N (%)	S (%)
ชังข้าวโพด	46.2	4.9	43.2	1.2	0.3
แกลบ	38.0	4.7	50.2	0.4	0.1
ขี้เลื่อย	50.3	5.7	41.1	0.2	2.7

ที่มา: นคร (2558)

2.3 หลักการระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันแบบฟิกซ์เบดและฟลูอิดไชเบด

2.3.1 หลักการแก๊สซิฟิเคชัน

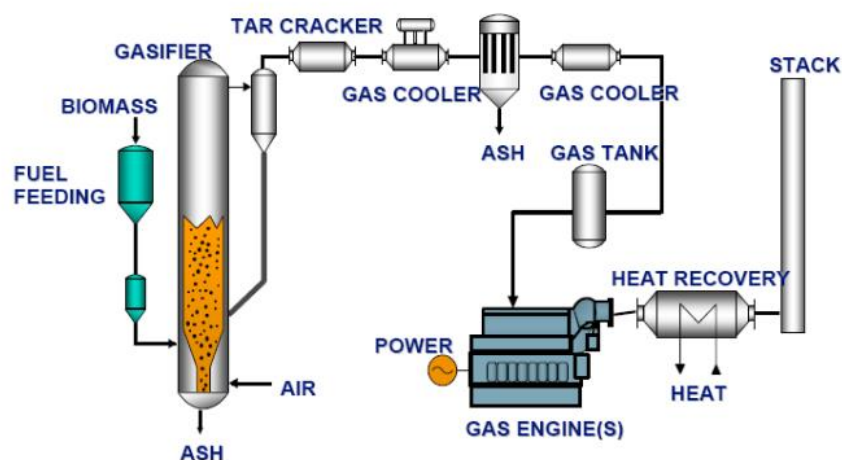
เทคโนโลยีการผลิตแก๊สซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานในรูปแบบแก๊สเชื้อเพลิงโดยอาศัยกระบวนการทางเคมี-ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในสภาวะจำกัดปริมาณอากาศ เมื่อให้ความร้อนแก่ชีวมวลร่วมกับเทคนิคการจำกัดปริมาณอากาศ (air) หรือออกซิเจน (O_2) หรือไอน้ำ (steam) เพื่อให้เกิดสภาวะที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนในสัดส่วนที่ต่ำกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้ชีวมวลเกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon) ในรูปของแก๊ส ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สอื่น ๆ เรียกว่า แก๊สชีวมวล (producer gas) ดังแสดงในตารางที่ 4 (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552)

ตารางที่ 4 ตัวอย่างองค์ประกอบของแก๊สชีวมวล

ส่วนประกอบของแก๊สชีวมวล	ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น (%)
H_2	12 – 20
CO	17 – 22
CO_2	9 – 15
CH_4	2 – 3

ที่มา: นคร (2558)

เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันสามารถรองรับวัตถุดิบได้หลากหลายชนิดและหลากหลายคุณสมบัติ โดยสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมกับเครื่องยนต์หรือแหล่งพลังงานอื่นได้ดังแสดงในภาพที่ 6 (สุนิรัตน์, 2558) นอกจากนี้ชีวมวลประเภทเศษไม้หรือของเหลือทิ้งจากการเกษตร บางกระบวนการได้รับการพัฒนาและปรับปรุงให้สามารถใช้กับกากตะกอนน้ำเสีย (Sewage sludge) และขยะ ส่วนประกอบของระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันสำหรับการผลิตพลังงานประกอบด้วย ส่วนแรกคือเครื่องปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นส่วนที่ผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ส่วนที่สอง คือ ระบบทำความสะอาดและควบคุมอุณหภูมิแก๊ส ระบบนี้ทำหน้าที่ทำความสะอาดและลดอุณหภูมิของแก๊สก่อนนำไปใช้งาน โดยเฉลี่ยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 40-60 °C ส่วนที่สาม คือ ระบบผลิตพลังงาน (Power generation system)

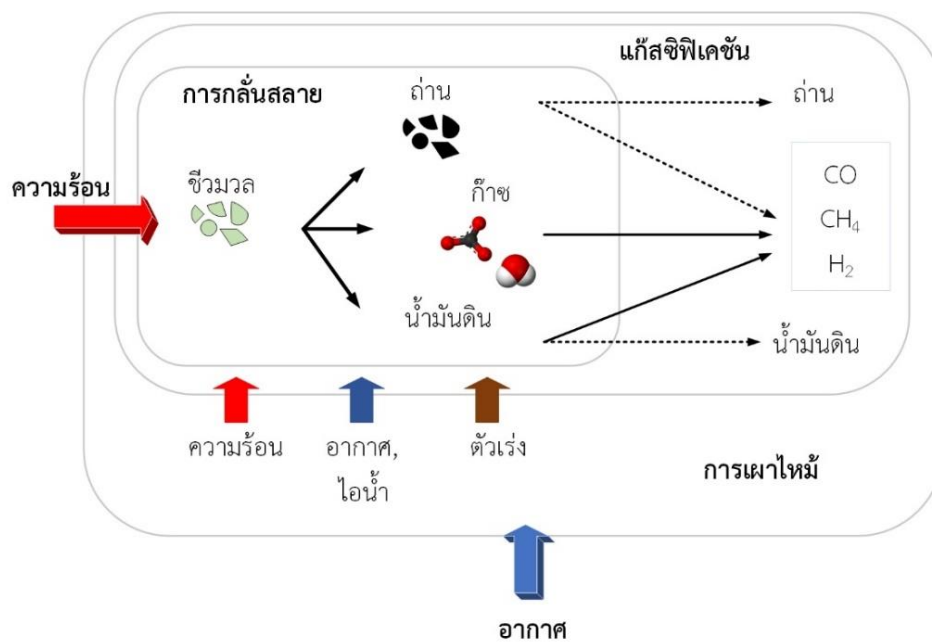


ภาพที่ 6 การนำเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันไปใช้งานร่วมกับเครื่องยนต์

ที่มา: สุวีรัตน์ (2558)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวลเป็นกระบวนการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ดังนั้นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อนและสามารถเกิดผลิตภัณฑ์หรือก๊าซหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของชีวมวลและเทคนิคในการจำกัดปัจจัยต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ไม่ได้มีเพียงแต่ก๊าซเชื้อเพลิงเท่านั้น ยังมีของแข็งและสิ่งเจือปนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หมดได้แก่ ถ่านชาร์ (char) เถ้า (ash) น้ำมันดิน (tar) และไอน้ำ เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 7 (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่, 2552)

ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีเตาแก๊สชีวมวลมีให้เลือกหลากหลายชนิดด้วยกัน ทั้งในด้านประสิทธิภาพการทำงาน คุณภาพแก๊สที่ต้องการ รูปแบบของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ การควบคุมและการบำรุงรักษา ระบบที่มีการใช้งานอย่างง่ายและเป็นที่ยอมรับในภาคอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบหลัก ๆ ได้แก่ ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด และระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟิกซ์เบด โดยในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาระบบเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด

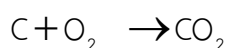


ภาพที่ 7 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล

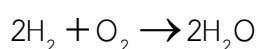
ปฏิกิริยาทางเคมีแก๊สซิฟิเคชัน

ปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นการเปลี่ยนรูปชีวมวลหรือของแข็งให้เป็นแก๊สในรูปแบบเทอร์โมเคมีคอล โดยใช้การเผาไหม้แบบจำกัดอากาศ ซึ่งแก๊สที่ได้จากกระบวนการจะได้แก่ CO, H₂ และ CH₄ แก๊สกลุ่มนี้เป็นแก๊สที่ติดไฟได้และมีค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ 3-5 MJ/m³ การนำเอาแก๊สนี้ไปใช้งาน สามารถแบ่งได้หลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นการนำเชื้อเพลิงไปใช้กับเครื่องยนต์ในการผลิตไฟฟ้า ผลิตไอน้ำหรือสารเคมี อีกทั้งถ้าพัฒนาจากค่าความร้อนระดับต่ำให้เป็นค่าความร้อนในระดับปานกลางยังสามารถนำไปผลิตสารเคมีได้อีกด้วย ซึ่งปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนการอบแห้ง การกลั่นสลาย การเผาไหม้ และกระบวนการรีดักชัน ซึ่งรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการเผาไหม้ (Combustion) เป็นขั้นตอนที่เชื้อเพลิงเผาไหม้ร่วมกับอากาศที่ใส่เข้ามา ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกันระหว่างออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง ดังสมการ



สมการที่ 1



สมการที่ 2

ปฏิกิริยาในสมการเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จะถูกนำไปใช้ใน ปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนในบริเวณรีดักชันและบริเวณการกลั่นสลาย โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้ คือ ความร้อนและถ่าน

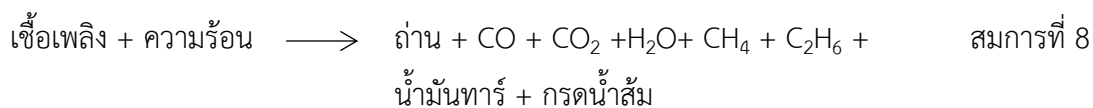
ขั้นตอนรีดักชัน (Reduction) เมื่ออากาศเข้าสู่ขั้นตอนการเผาไหม้และทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและ ไฮโดรเจน ได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแล้ว ก็จะเข้าสู่ขั้นตอนรีดักชัน ปฏิกิริยาหลักในขั้นตอนนี้จะเป็นแบบ Reduction Reaction ดังสมการ



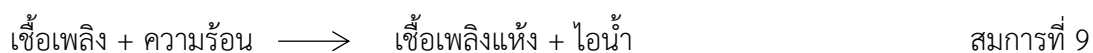
ขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนบางส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ไม่ได้ ให้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ โดยไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ซึ่งจะได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน แก๊สที่ได้เป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สที่ได้จากเตาผลิตแก๊ส

ปฏิกิริยาในสมการที่ 3 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 500-600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนมีมากขึ้น ส่งผลทำให้แก๊สมีค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น สมการที่ 7 เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C ทำให้เกิดแก๊สมีเทนปริมาณเล็กน้อยซึ่งมีผลมาจากปฏิกิริยาเมทาเนชัน (Methanation) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนรีดักชันนี้จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้

ขั้นตอนกลั่นสลาย (Distillation) หรือการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่มี การสลายสารอินทรีย์ในเชื้อเพลิง โดยความร้อนที่ใช้ในขั้นตอนนี้เป็นความร้อนที่ได้จากขั้นตอนรีดักชัน อุณหภูมิในขั้นตอนนี้จะอยู่ระหว่าง 200-300 °C สารระเหยที่ได้จากการสลายสารอินทรีย์นั้นประกอบไปด้วย เมทานอล กรดอะซิติก น้ำมันดิน และแก๊สต่าง ๆ ซึ่งเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน ของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากผ่านขั้นตอนนี้แล้ว คือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยาต่อในขั้นตอนรีดักชันและขั้นตอนการเผาไหม้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณนี้ดังสมการ



ขั้นตอนอบแห้ง (Drying) ในขั้นตอนนี้อุณหภูมิจะไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหยต่าง ๆ โดยความร้อนที่ได้จากขั้นตอนไพโรไลซิสจะระเหยความชื้นที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงให้ออกมาในรูปของไอน้ำ อุณหภูมิในขั้นตอนนี้จะอยู่ระหว่าง 100-200 °C ดังสมการ



2.3.2 ระบบผลิตแก๊สแบบฟิกส์เบด

ระบบเตาแก๊สชีวมวลแบบฟิกส์เบด (fixed bed) ได้รับการพัฒนามาอย่างยาวนานเป็นระบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีหลักการทำงานคือ ชีวมวลจะถูกป้อนจากด้านบนของเตาและเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องเสมือนชีวมวลหรือเบดอยู่นิ่ง อุณหภูมิในการเดินระบบจะอยู่ในช่วง 800-1000 °C และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาที่แบ่งแยกอย่างชัดเจน ระบบฟิกส์เบดสามารถแบ่งออกตามทิศทางการไหลของอากาศได้หลายรูปแบบ ประกอบด้วย ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบเปลวไฟไหลขึ้น แบบเปลวไฟไหลลง และแบบเปลวไฟไหลขวาง รายละเอียดของระบบผลิตแก๊สแบบฟิกส์เบด มีดังต่อไปนี้

ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบเปลวไฟไหลขึ้น (Up-draft Gasifier)

ระบบผลิตแก๊สชีวมวลชนิดนี้มีการใช้งานตั้งแต่เริ่มแรกและเป็นแบบที่ง่ายที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 8-a (McKendry, 2002) เชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตาแก๊สชีวมวล ปริมาณอากาศจะถูกดูดผ่านตะแกรงเข้าสู่ด้านล่าง เมื่ออากาศผ่านเข้าไปในบริเวณการเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาและแก๊สที่ผ่านออกจากบริเวณการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงและเมื่อเข้าไปในบริเวณรีดักชัน ไอน้ำจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนที่มีอยู่ในบริเวณนี้ได้ และหลังจากนั้นแก๊สที่ได้จะไหลสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นชีวมวลและเกิดการกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ ต่อจากนั้นแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงจะไหลเข้าสู่ชั้นชีวมวลขึ้นไประเหยน้ำที่อยู่ในชีวมวล ส่งผลทำให้แก๊สชีวมวลที่ออกจากเตาแก๊สชีวมวลมีอุณหภูมิต่ำ สำหรับระบบนี้ปริมาณน้ำและสารระเหยบางชนิดจะไหลออกไปพร้อมกับแก๊สชีวมวลจึงส่งปัญหาให้กับการนำไปใช้งาน อย่างไรก็ตามระบบผลิตแก๊สแบบนี้จะให้ค่าความร้อนของแก๊สที่ค่อนข้างสูง เมื่อเปรียบเทียบกับระบบผลิตแก๊สแบบฟิกส์เบดชนิดอื่น

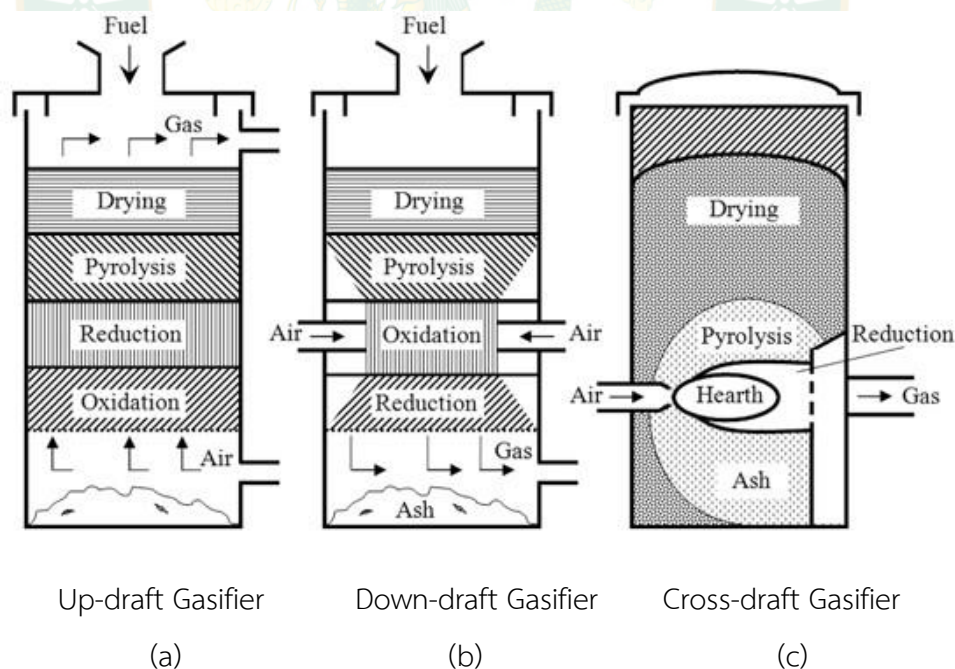
ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบเปลวไฟไหลลง (Down-draft Gasifier)

ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบนี้ถูกออกแบบมาเพื่อขจัดปัญหาน้ำมันดินในแก๊สชีวมวลซึ่งพบมากในระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบเปลวไฟไหลขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 8-b (McKendry, 2002) ลักษณะของแก๊สชีวมวลแบบเปลวไฟไหลลง อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างโดยผ่าน

หัวฉีด (Nozzle) ข้างบริเวณหัวฉีดจะเป็นโซนการเผาไหม้ แก๊สที่ได้บางส่วนจะกำเนิดจากบริเวณนี้ ในขณะที่อากาศไหลลงสู่ด้านล่างผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อยในช่วงเดียวกัน ชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของบริเวณการเผาไหม้จะเกิดการกลั่นสลายและจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส แก๊สที่ผ่านบริเวณการเผาไหม้ในแก๊สชีวมวลแบบเปลวไฟไหลลงจะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและลดลงน้อยกว่า 10% เมื่อเทียบกับแบบเปลวไฟไหลขึ้น ดังนั้นแก๊สชีวมวลที่ได้จึงสะอาดกว่าแก๊สชีวมวลจากแก๊สชีวมวลแบบเปลวไฟไหลขึ้น

ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบเปลวไฟไหลขวาง (Cross-draft Gasifier)

ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบนี้อากาศจะถูกดูดผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบโซน การเผาไหม้จะอยู่ถัดจากหัวฉีดออกไปและส่วนที่อยู่ถัดออกมาจะเป็นบริเวณรีดักชัน แก๊สที่ออกจากบริเวณรีดักชันแล้วจะถูกออกสู่ภายนอกโดยผ่านตะแกรงซึ่งอยู่ในแนวตั้งรอบ ๆ บริเวณการเผาไหม้และบริเวณรีดักชันจะเป็นบริเวณโซนการกลั่นสลายน้ำมันดิบที่ได้จากบริเวณการกลั่นสลาย ซึ่งจะผ่านโซนรีดักชันก่อนที่จะออกสู่ภายนอกทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊สก่อนที่จะออกสู่ภายนอก จึงส่งผลให้แก๊สชีวมวลที่ได้มีปริมาณน้ำมันดินต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 8-c (McKendry, 2002) ซึ่งระบบผลิตแก๊สประเภทนี้นิยมนำไปใช้ติดตั้งร่วมกับยานพาหนะ



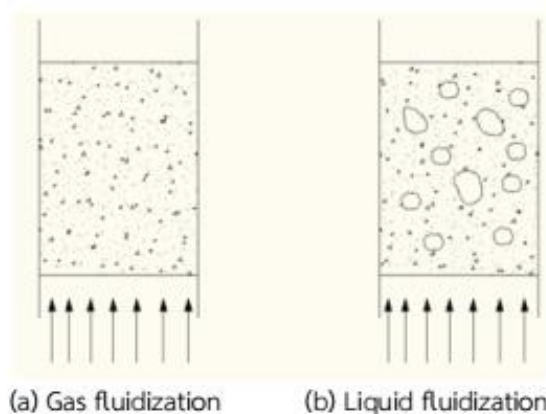
ภาพที่ 8 เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟิกซ์เบด

ที่มา: McKendry (2002)

2.3.3 กระบวนการฟลูอิดิเซชัน (Fluidization)

กระบวนการฟลูอิดิเซชันหรือการก่อกองสภาพของไหลเป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดสัมผัสกับของไหล เม็ดเหล่านี้จะถูกวางไว้บนตะแกรงในห้องเผาไหม้ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอกหรือเป็นท่อเหลี่ยมแนวตั้งโดยมีส่วนที่สัมผัสกับของไหลแล้วอนุภาคของแข็งจะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนในที่สุดอนุภาคของแข็งจะเริ่มเคลื่อนที่ และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ซึ่งอนุภาคของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยกระบวนการฟลูอิดิเซชันแบ่งตามสถานะของไหลได้ 2 ประเภท คือ

1) ฟลูอิดิเซชันสองสถานะ (Two-phase fluidization) หมายถึง ภายในห้องเผาไหม้หรือวัสดุเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยสสารสองสถานะ คือ ของแข็งและของไหล ของไหลนี้อาจเป็นก๊าซหรือของเหลวก็ได้ ฟลูอิดิเซชันสองสถานะจึงแบ่งย่อยได้อีก 2 ประเภท ดังแสดงในภาพที่ 9 คือ ก๊าซฟลูอิดิเซชัน (Gas fluidization) และฟลูอิดิเซชันของเหลว (Liquid fluidization)



ภาพที่ 9 ฟลูอิดิเซชันแบบสองสถานะ

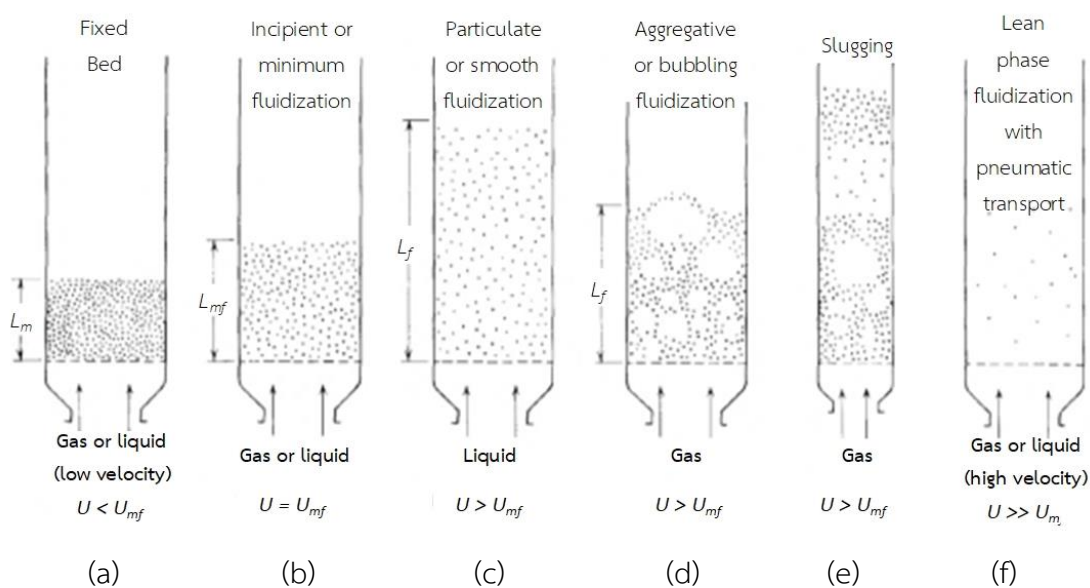
ที่มา: ระวิน สืบคำ และคณะ (2555)

2) ฟลูอิดิเซชันสามสถานะ (Three-phase fluidization) หมายถึง ภายในห้องเผาไหม้หรือหอทดลองจะประกอบด้วยสสารสามสถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งพัฒนามาจากฟลูอิดิเซชันสองสถานะ

ปรากฏการณ์ฟลูอิดิเซชันเริ่มจากการใส่ของแข็งในห้องเผาไหม้หรือหอทดลอง จากนั้นปล่อยให้ของไหลให้ไหลเข้าทางด้านล่างของห้องเผาไหม้ ขณะที่ของไหลยังมีความเร็วต่ำอนุภาคของแข็งจะไม่เกิดการขยับตัว เบดเช่นนี้เรียกว่าเบดนิ่ง (Fixed bed) ดังแสดงในภาพที่ 10-a ทั้งนี้หากความเร็วในการไหลตามผิวมีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชัน (Minimum fluidizing velocity, U_{mf}) ถ้าเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มขยับตัว

และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบเรียกว่า ฟลูอิดเซชันต่ำสุด (Incipient or minimum fluidization) ดังแสดงในภาพที่ 10-b สำหรับฟลูอิดเซชันของเหลว เมื่อเพิ่มความเร็วจนกระทั่งการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและหมุนรอบตัวเองของของแข็งจะเป็นไปอย่างช้า ๆ เรียกว่า เบดสม่ำเสมอ (Particulate or smooth fluidization) ดังแสดงในภาพที่ 10-c หากเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นไปอีก จะไปทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของของไหล เบดลักษณะนี้เกือบจะพาเอาของแข็งออกไปจากห้องเผาไหม้จึงเรียกว่าเบดเจือจาง (Diluted phase fluidized bed) หากเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อย อนุภาคของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากห้องเผาไหม้หรือหลุดลงไปซึ่งในลักษณะนี้จะถือเป็นการขนถ่ายแบบใช้ลม (Pneumatic conveyor) ดังแสดงในภาพที่ 10-f หากส่งถ่ายของแข็งด้วยของเหลวก็จะเรียกว่า การขนถ่ายด้วยของเหลว (Hydraulic transport)

ก๊าซฟลูอิดเซชันจะมีลักษณะเบดที่แตกต่างไปจากของเหลว เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดเซชันแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของอนุภาคของแข็งเหมือนเดิม อีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองก๊าซเกิดขึ้นและจะแทรกตัวขึ้นมายังผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้อนุภาคของแข็งไหลจากส่วนบนของฟองก๊าซลงมายังส่วนล่าง โดยบางส่วนของอนุภาคของแข็งจะลอยติดตามฟองก๊าซไปด้วย ลักษณะดังกล่าวทำให้เบดมีการเคลื่อนที่อย่างขุมนเบดชนิดนี้เรียกว่า เบดขุมน (Aggregative or bubbling bed) ดังแสดงในภาพที่ 10-d และ 10-e โดยฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคของแข็ง และลักษณะของแผ่นกระจายอากาศ



ภาพที่ 10 ลักษณะของเบดในห้องเผาไหม้

ที่มา: Kunii (1991)

โดยในปัจจุบันกระบวนการฟลูอิดไอเซชันสามารถนำมาประยุกต์และปรับใช้กับกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานด้านวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ พลังงานและเทคโนโลยีอื่น ๆ อีกมากมาย อาทิ การอบแห้ง การแช่เยือกแข็ง เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไอซ์เบดและเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอซ์เบด เป็นต้น (ไพโรจน์ จันทร์แก้ว และศิระ อัจฉริยวิริยะ, 2555)

การศึกษาระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอซ์เบดมีความแตกต่างจากระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟิกซ์เบด นั่นคือต้องศึกษาในเรื่องของชั้นวัสดุเบด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีสมการการคำนวณหาความสูงของชั้นวัสดุเบด (Bed Diameter, D_b) ซึ่งมีสมการการคำนวณดังต่อไปนี้

ความสูงของชั้นวัสดุเบด (Bed Diameter, D_b) สามารถคำนวณหาได้จากความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน (Minimum fluidization Velocity, U_{mf}) และความเร็วในการไหลตามผิว (Superficial velocity, U_s) (Asfaw, 2013)

โดยการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันหาได้จากสมการที่ 10 ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน } (U_{mf}) = \left[\frac{d_p^2}{150 \times \mu_g} \right] \times [g \times (\rho_p - \rho_g) \times \frac{(emf)^3}{(1 - emf)}]$$

สมการที่ 10

และความเร็วในการไหลตามผิวหาได้จากสมการที่ 11 ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วในการไหลตามผิว } (U_s) = 2 \times U_{mf} \quad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อทราบความเร็วในการไหลตามผิวแล้ว สามารถคำนวณหาความสูงของชั้นวัสดุเบดได้จากสมการที่ 12 ดังต่อไปนี้

$$m_{air} = \rho_{air} \times \left(\frac{\pi \times D_b^2}{4} \right) \times U_s \quad \text{สมการที่ 12}$$

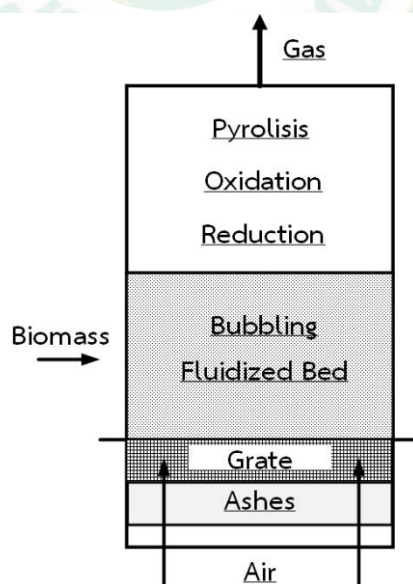
2.3.4 ระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไอซ์เบด

ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอซ์เบด มีส่วนประกอบและโครงสร้างคล้ายคลึงกับเตาเผาเชื้อเพลิงโดยตรงแบบฟลูอิดไอซ์เบด นิยมใช้สำหรับโรงงานขนาดใหญ่เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านหิน ข้อดีของระบบคือ สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเตาให้สม่ำเสมอทั่วกันได้ง่ายกว่าระบบฟิกซ์เบด อุณหภูมิการทำงานจากระบบอยู่ที่ประมาณ 400-800 °C หลักการทำงานของระบบคือ การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาจะอาศัยตัวกลาง เช่น ทราย กรวด วัสดุเซรามิก เป็นต้น ซึ่งตัวกลางที่อยู่บริเวณด้านล่างของเตาแก๊สชีวมวลซึ่งจะถูกทำให้ร้อน เมื่อป้อนชีวมวลเข้าไปในระบบ ชีวมวลจะ

เคลื่อนตัวชนกับตัวกลางที่ร้อนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจนเกิดการเผาไหม้และกลายเป็นแก๊สอย่างรวดเร็วซึ่งขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ การกลั่นสลายและแก๊สซิฟิเคชัน จะเกิดในช่วงเดียวกันไม่มีการแบ่งแยกอย่างชัดเจน จึงทำให้มีน้ำมันดินเจือปนอยู่ในแก๊สเช่นเดียวกับระบบฟลักซ์เบดแบบไหลขึ้น โดยระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิด์เบด แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิด์เบดชนิดฟองอากาศ

ระบบผลิตแก๊สชีวมวลชนิดนี้จะมีการเคลื่อนที่ของวัสดุเบดคล้ายฟองอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 11 (Couto et al., 2013) โดยเมื่อจ่ายอากาศเข้าทางด้านล่างของหัวจ่ายอากาศ (Air distributor) วัสดุเบดจะมีลักษณะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงจนมีลักษณะคล้ายกับฟองอากาศ ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิด์เบดชนิดฟองอากาศประกอบด้วยส่วนที่เป็นบริเวณที่อากาศถูกป้อนเข้ามา ส่วนบนของเบดมีไว้เพื่อให้เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดเล็กเข้ามาเก็บรอบไว้และเข้าไปทำปฏิกิริยาต่อไป ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิด์เบดชนิดฟองอากาศเป็นระบบเผาไหม้ที่ทำให้เชื้อเพลิงแข็งมีขนาดเล็กผสมกับของแข็ง เช่น ทราย แล้วให้ของผสมทำการเลียนแบบการเดือดของของเหลว ด้วยการพ่นลมที่มีการกระจายจากด้านล่างของห้องเผาไหม้ เกิดการเดือดคลุกเคล้าของเชื้อเพลิงแข็งในขณะที่ลุกไหม้อยู่บนวัสดุเบด เชื้อเพลิงแข็งจะเผาไหม้จนหมด กลายเป็นขี้เถ้า อยู่ทางด้านล่างของเบดที่มีช่องเปิดปล่อยทิ้งออกไป อุณหภูมิจะอยู่ที่ 600 – 800 °C ซึ่งควบคุมได้โดยอัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงชีวมวลและอากาศเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกแยกสลายในเบดร้อน ให้กลายเป็นถ่านในลักษณะส่วนประกอบของแก๊ส

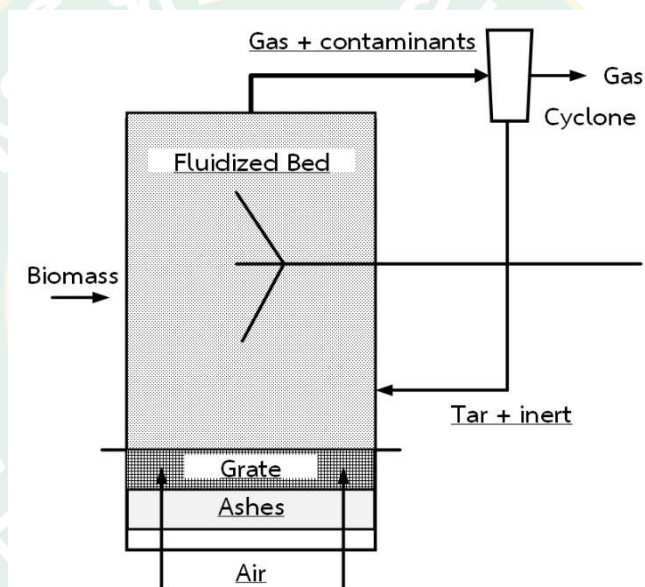


ภาพที่ 11 เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิด์เบดชนิดฟองอากาศ

ที่มา: Couto et al. (2013)

ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบตชนิดหมุนวน

ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบนี้จะจ่ายอากาศเข้าทางด้านล่างของหัวจ่ายอากาศวัสดุเบตจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่บริเวณด้านบนของตัวเตา และถูกอากาศดันให้กลับลงมาด้านล่างทางไซโคลน ดังแสดงภาพที่ 12 (Couto et al., 2013) แก๊สชีววมวลแบบนี้สามารถทำงานโดยรองรับชีววมวลในปริมาณมากได้ดี เช่นใน อุตสาหกรรมกระดาษ โดยเบตจะถูกหมุนอยู่ในห้องเผาไหม้ และอุปกรณ์แยกตัวแบบไซโคลน ซึ่งในไซโคลนนี้จะเป็นส่วนที่ใช้ในการแยกขี้เถ้าออกทางด้านล่าง ส่วนถ่านจะถูกแยกเข้าไปในห้องเผาไหม้อีกครั้งหนึ่ง แก๊สชีววมวลแบบนี้สามารถทำงานได้ภายใต้ความดันสูง ๆ เตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบตชนิดหมุนวนเป็นระบบเผาไหม้ที่นำของแข็งที่หลุดลอยออกจากวัสดุเบตมาแยกออกจากก๊าซร้อนด้วยไซโคลน และนำของแข็งที่ถูกแยกออกมาแล้วเวียนมาป้อนกลับเข้าไป



ภาพที่ 12 เตาผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบตชนิดหมุนวน

ที่มา: Couto et al. (2013)

2.3.5 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีฟิกส์เบตและฟลูอิดไคซ์เบต

จากที่กล่าวไว้ข้างต้นระบบเตาผลิตแก๊สชีววมวลที่มีการใช้งานอย่างง่ายและเป็นที่ยอมรับที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระบบหลัก ซึ่งแต่ละประเภทมีลักษณะพื้นฐานและระบบการทำงานของเตาผลิตแก๊สชีววมวลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5 (นคร, 2558) อีกทั้งระบบเตาผลิตแก๊สชีววมวลทั้ง 2 ประเภท ยังมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 6 (นคร, 2558)

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานและระบบการทำงานของระบบผลิตแก๊สชีววมวล

	แบบฟิสิกซ์เบด		แบบฟลูอิดซ์เบด	
	แบบไหลขึ้น	แบบไหลลง	แบบฟองอากาศ	แบบหมุนวน
- ลักษณะของเชื้อเพลิง	ปานกลาง	เฉพาะชนิด	ยืดหยุ่นได้	ยืดหยุ่นได้
- ขนาดเชื้อเพลิง	ดีมาก	ดี	พอใช้	พอใช้
- ปริมาณความชื้น	ดีมาก	พอใช้	ดี	ดี
- ปริมาณซี้ไถ้	แย่	แย่	ดีมาก	ดีมาก
- อุณหภูมิปฏิกิริยา	1,000 °C	1,000 °C	850 °C	850 °C
- การผสมกันของเชื้อเพลิง	แย่	แย่	ดีมาก	ดีมาก
- ปริมาณน้ำมันดินในก๊าซ	สูงมาก	ต่ำมาก	ปานกลาง	ต่ำ
- การควบคุม	พอใช้	พอใช้	ดีมาก	ดีมาก
- ประสิทธิภาพความร้อน	ดีเยี่ยม	ดีมาก	ดี	ดีมาก
- ค่าความร้อนของก๊าซ	แย่	แย่	แย่	พอใช้

ที่มา: นคร (2558)

ตารางที่ 6 ข้อดีและข้อเสียของระบบผลิตแก๊สแต่ละประเภท

ระบบผลิตแก๊ส	ข้อดี	ข้อเสีย
ระบบผลิตแก๊สฟิสิกซ์เบดแบบไหลลง	- กระบวนการไม่ค่อยมีความซับซ้อนสามารถลดหรือกำจัดปริมาณน้ำมันดินให้เหลืออยู่น้อย	- เชื้อเพลิงมีข้อจำกัดคือเป็นชิ้นที่มีขนาดไม่ใหญ่และไม่ละเอียดจนเกินไป
ระบบผลิตแก๊สฟิสิกซ์เบดแบบไหลขึ้น	- สามารถรองรับเชื้อเพลิงที่มีความหลากหลายทางคุณสมบัติและรองรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้	- แก๊สชีววมวลที่ได้มีปริมาณน้ำมันดินปะปนอยู่ค่อนข้างสูง
ระบบผลิตแก๊สฟิสิกซ์เบดแบบไหลขวาง	- การออกแบบง่ายและมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา	- เชื้อเพลิงที่ใช้ค่อนข้างจำกัด คือต้องเป็นถ่านที่มีคุณภาพสูง
ระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดซ์เบด	- สามารถรองรับเชื้อเพลิงที่มีความหลากหลายทางคุณสมบัติและรองรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงได้ระดับหนึ่ง - การมีวัสดุเบดจะทำให้เกิดการผสมของเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่ตีขึ้น	- ขนาดของเชื้อเพลิงจะต้องไม่ใหญ่หรือไม่เล็กจนเกินไป - มีปริมาณน้ำมันดินปะปนอยู่ค่อนข้างเยอะ

ที่มา: นคร (2558)

2.4 การวิเคราะห์สมรรถนะระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไธเบต

2.4.1 เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)

เลขเรย์โนลด์เป็นเลขดัชนีที่บ่งบอกสภาพปรากฏการณ์การไหลของของไหล (สุทธิพันธ์, 2555) จำนวนเลขเรย์โนลด์จะมีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วการไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และความหนาแน่นของของไหล จำนวนเลขเรย์โนลด์ไม่มีหน่วย และมีความสำคัญอย่างมาก กล่าวคือ จำนวนเลขเรย์โนลด์นี้ใช้เป็นตัวกำหนดรูปแบบการไหลของของไหลว่าเป็นแบบใด สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad \text{สมการที่ 13}$$

เมื่อ	Re	คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ (ไม่มีหน่วย)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m ³
	V	คือ ความหนืดจลน์ของของไหล, m ² /s
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นวัสดุ, m
	μ	คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, Pa·s

2.4.2 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F ratio)

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง คือ สัดส่วนของปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง อัตราส่วนผสมที่ต่ำกว่าทางทฤษฎีเรียกว่า อัตราส่วนผสมหนา ในขณะที่อัตราส่วนผสมที่สูงกว่าทฤษฎีเรียกว่า อัตราส่วนผสมบาง (สุภชิตา, 2551) การคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A/F_{th} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad \text{สมการที่ 14}$$

เมื่อ	\dot{m}_{air}	คือ อัตราการป้อนอากาศ, kg/h
	\dot{m}_{fuel}	คือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง, kg/h

2.4.3 อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, ER)

อัตราส่วนสมมูลเป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนน้ำหนักอากาศต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงแห่งที่ใช้จริงเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักของอากาศต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงทางทฤษฎี ค่าอัตราส่วนสมมูลเป็นค่าอัตราส่วนที่ใช้ประเมินสมรรถนะของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งมีผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล

ค่าอัตราส่วนสมมูลของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันที่เหมาะสมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 – 0.4 ซึ่งเป็นการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Partial combustion) (สุภชิตา, 2551) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$ER = \frac{A/F_{ac}}{A/F_{th}} \quad \text{สมการที่ 15}$$

2.4.4 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (Fuel consumption)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง คือ อัตราส่วนระหว่างชีวมวลที่ป้อนให้กับระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบดเทียบกับเวลา การวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงหาจากสมการ ดังต่อไปนี้ (Sahoo and Ram, 2015)

$$FC_b = \frac{M_b}{T} \quad \text{สมการที่ 16}$$

เมื่อ FC_b คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง, kg/h
 M_b คือ มวลเชื้อเพลิงชีวมวล, kg
 T คือ ระยะเวลาการใช้งานเตาแก๊สชีวมวล, h

2.4.5 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific fuel consumption)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คืออัตราการใช้เชื้อเพลิงเทียบกับอัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ (สุภชิตา, 2551) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$SFC = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{Q}_u} \quad \text{สมการที่ 17}$$

เมื่อ SFC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ, kg/kWh
 \dot{m}_{fuel} คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง, kg/h
 \dot{Q}_u คือ อัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้, kW

2.4.6 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้พลังงานเทียบกับพลังงานที่ระบบแก๊สชีวมวลผลิตได้ (สุภชิตา, 2551) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$SEC = \frac{E}{Q_U} \quad \text{สมการที่ 18}$$

เมื่อ	SEC	คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/kWh
	E	คือ อัตราการใช้พลังงาน, kJ/h
	Q_U	คือ พลังงานที่เตาแก๊สชีวมวลผลิตได้, kW

2.4.7 อัตราการเกิดแก๊สชีวมวล

อัตราการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้จากพื้นที่หน้าตัดของท่อแก๊ส และความเร็วของแก๊สเชื้อเพลิงร้อน จากนั้นนำมาคำนวณอัตราการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้นิยามที่สภาวะปกติที่อุณหภูมิ 25 °C (สุภชิตา, 2551) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q_{gas} = Q_1 \times \frac{T_1}{T_2} \quad \text{สมการที่ 19}$$

เมื่อ	Q_{gas}	คือ อัตราการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงที่ 25 °C, Nm ³ /h
	Q_1	คือ อัตราการเกิดแก๊สเชื้อเพลิงร้อน, m ³ /h
	T_1	คือ อุณหภูมิที่ 25 °C, °C
	T_2	คือ อุณหภูมิแก๊สร้อนออกจากปลายท่อ, °C

2.4.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล (Heating value)

ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลสามารถหาได้จากการนำแก๊สเชื้อเพลิงที่เก็บตัวอย่างได้ไปวิเคราะห์ส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงได้ด้วยเครื่อง Gas Chromatography เพื่อหาปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H₂) มีเทน (CH₄) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกซิเจน (O₂) และไนโตรเจน (N₂) จากนั้นนำไปคำนวณตามสมการที่ 17 (สุภชิตา, 2551) ซึ่งจะได้ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลออกมา รายละเอียดสมการที่ใช้คำนวณ มีดังต่อไปนี้

$$HV_{gas} = \frac{(13.1 \times CO\%) + (13.2 \times H_2\%) + (41.2 \times CH_4\%)}{100} \quad \text{สมการที่ 20}$$

เมื่อ	CO%	คือ	ร้อยละคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้, %
	H ₂ %	คือ	ร้อยละคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้, %
	CH ₄ %	คือ	ร้อยละคาร์บอนมอนอกไซด์ที่วัดได้, %

2.4.9 ประสิทธิภาพความร้อนระบบผลิตแก๊สชีวมวล

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนระบบผลิตแก๊สชีวมวล สามารถวิเคราะห์ได้ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ คือ อัตราส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (Q_{uesful}) เทียบกับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตแก๊สชีวมวล (Q_{input}) โดยสามารถคำนวณได้จากการทดสอบด้วยการต้มน้ำ (Water boiling test) (สุกชิตา, 2551) ผลจกรวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้เพื่อใช้คัดเลือกหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงหรืออัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\eta_G = \frac{[m_{w,1} \times C_{p,w} (T_{w,B} - T_{w,i})] + [m_{w,2} \times h_{fg}]}{m_{\text{fuel}} \times \text{LHV}_{\text{fuel}}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 21}$$

เมื่อ	$m_{w,1}$	คือ มวลของน้ำหนักทั้งหมด (kg)
	$m_{w,2}$	คือ มวลของน้ำที่ระเหย (kg)
	$C_{p,w}$	คือ ความจุความร้อนจะเพาะของน้ำ (4.186 kJ/kg ^o C)
	h_{fg}	คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (2257.2 kJ/kg)
	$T_{w,B}$	คือ อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (°C)
	$T_{w,i}$	คือ อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (°C)
	m_{fuel}	คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg)
	LHV_{fuel}	คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงชีวมวล (kJ/kg)

2.4.10 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล (Cold gas efficiency, CGE)

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล เป็นการวัดหรือทดสอบเพื่อหาสมรรถนะของแก๊สชีวมวล (Ntshengedzeni S. Mamphweli and Meyer, 2010) ซึ่งหาได้สมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{\text{CGE}} = \frac{\text{HV}_{\text{gas}} \times Q_{\text{gas}}}{\text{HV}_{\text{fuel}} \times m_{\text{fuel}}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 22}$$

เมื่อ	η_{CGE}	คือ ประสิทธิภาพเตาแก๊สซีไฟเออร์, %
	HV_{gas}	คือ ค่าความร้อนแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้, kJ/Nm ³
	Q_{gas}	คือ อัตราการไหลแก๊สชีวมวลที่แก๊สซีไฟเออร์ผลิตได้, m ³ /h
	HV_{fuel}	คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงของชีวมวลที่ป้อน, kJ/kg
	m_{fuel}	คือ อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลที่ป้อน, kg/h

2.4.11 ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไธด์เบด (Specific cost consumption)

การวิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวลระบบฟลูอิดไธด์เบด ทำการประเมินจากค่าดำเนินการผลิตเทียบกับค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ผลิตได้ต่อเชื้อเพลิง (จิรพัทธ์, 2556) ซึ่งมีสมการดังต่อไปนี้

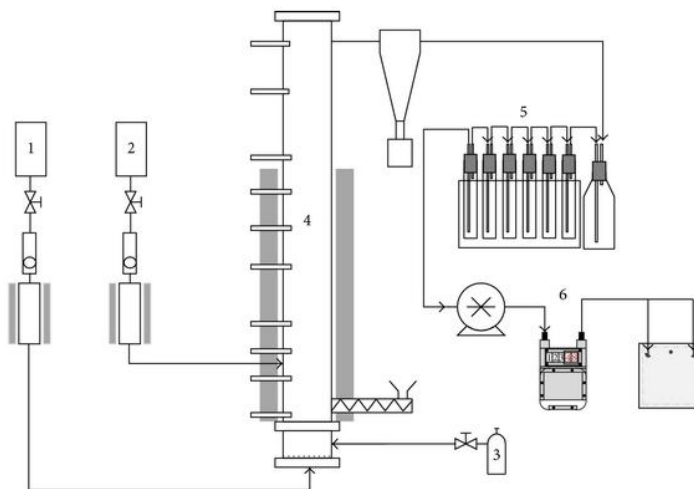
$$SCC = \left(\frac{\dot{m}_{\text{fuel}} \times \text{cost of fuel}}{\dot{Q}_u} \right) + \text{cost of electric} \quad \text{สมการที่ 23}$$

เมื่อ	SCC	คือ	ต้นทุนรวมในการผลิตความร้อน, baht/kWh
	\dot{m}_{fuel}	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิง, kg/h
	\dot{Q}_u	คือ	อัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้, kW
	cost of fuel	คือ	ค่าเชื้อเพลิง, baht/kg
	cost of electric	คือ	ค่าไฟฟ้าที่ใช้การผลิตพลังงานความร้อน, kWh

การตรวจสอบเอกสาร

Perez et al. (2014) ได้ศึกษาการประเมินของไหลแบบไดนามิกส์โดยใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบ และใช้ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไธด์เบดชนิดฟองอากาศ พบว่าก๊าซที่ได้จากชานอ้อยเป็นตัวเลือกที่มีแนวโน้มสำหรับการผลิตในสเกลใหญ่ขึ้น แก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งขนาดของชานอ้อยที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะอยู่ระหว่าง 0.8 และ 1.21 mm และก๊าซที่ผลิตเป็นรูปแบบใช้อากาศโดยเตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไธด์เบดชนิดฟองอากาศ มีค่าความร้อน (LHV) อยู่ที่ประมาณ 4.56 MJ / Nm³

Wongsiriamnuay et al. (2013) ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้เศษไม้ไผ่ และเศษวัชพืช (ไมยราบยักษ์) เป็นเชื้อเพลิงชีววมวลโดยสนใจผลของปัจจัยการทำงาน ได้แก่ อุณหภูมิ ก๊าซตัวกลาง (อากาศและไอน้ำ) และตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ โดยมีการให้ความร้อนจากภายนอกด้วยขดลวด บุนนวม และใช้ทรายเป็นวัสดุเบด ดังแสดงในภาพที่ 13 มีการควบคุมอัตราการไหลอยู่ที่ 15 L/min คุมอัตราส่วนสมมูลที่ประมาณ 0.4 ผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-600 °C และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ H₂ และ CO ลดลงเล็กน้อย ในขณะที่ CO₂ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

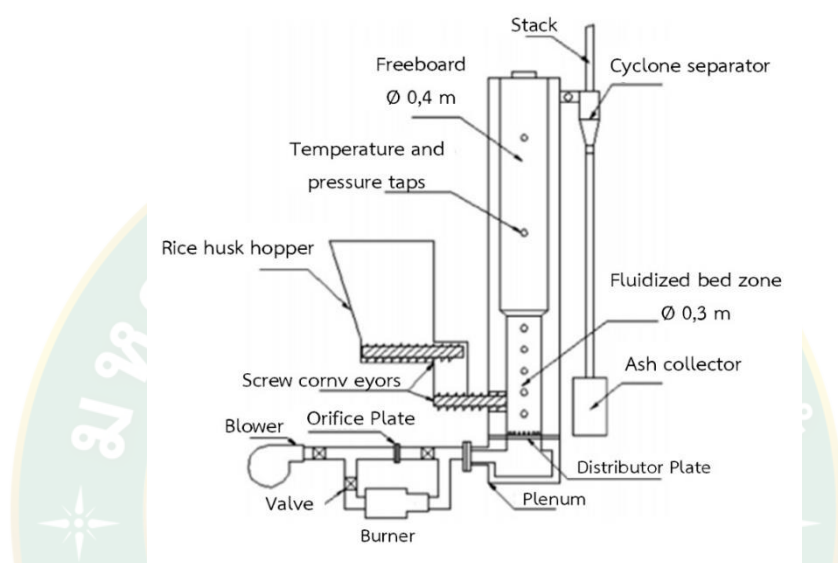


ภาพที่ 13 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลโดยใช้เศษไม้ไผ่และเศษวัชพืช

Sahoo and Ram. (2015) ได้ศึกษาประสิทธิภาพแก๊สชีวมวล และการวิเคราะห์การใช้พลังงานสำหรับระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไรซ์เบดโดยใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบ พบว่าการทดลองจะดำเนินการเพื่อตรวจสอบผลกระทบของค่าพารามิเตอร์ของระบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิก๊าซที่ใช้ในการเผาไหม้ อัตราส่วนสมมูล อัตราส่วนของไอน้ำชีวมวลและวัสดุเบดที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากชานอ้อย การตรวจสอบพลังงานที่เกิดจากการกระบวนการผลิตก๊าซที่ได้ออกมาก จะได้พลังงานสุทธิคำนวณได้ 5.296 kWh ต่อการป้อนเชื้อเพลิง 1.0 kg โดยผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของก๊าซที่ใช้ในการเผาไหม้อยู่ที่ 700 °C ค่าอัตราส่วนสมมูลอยู่ที่ 0.25 และอัตราส่วนไอน้ำชีวมวลอยู่ที่ 0.5 โดยวัสดุเบดที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ทราแยคผลสมโคลน อัตราส่วน 1: 1 ค่าความร้อนของก๊าซไฮโดรเจนที่ได้รับจากผลิตภัณฑ์ก๊าซที่พบเพื่อให้ตรงกับการส่งออกพลังงานสุทธิคำนวณได้หมายถึงประสิทธิภาพการทำงานที่น่าพอใจของแก๊สซิฟิเคชัน ที่เกี่ยวกับผลผลิตของไฮโดรเจน

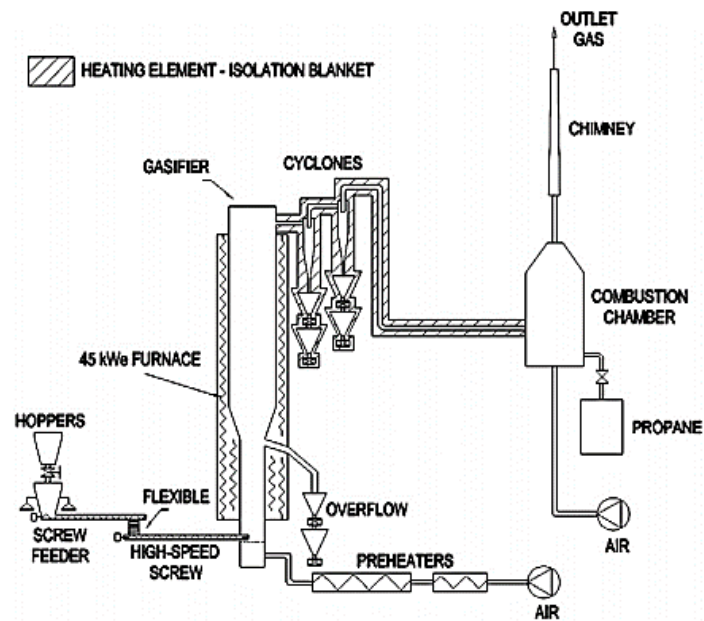
Li et al. (2004) ได้ศึกษาชีวมวลในเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไรซ์เบดชนิดหมุนวน (Circulating fluidized bed) โดยงานวิจัยดังกล่าวเป็นการศึกษาชีวมวลในระดับนำร่อง (6.5-m tall × 0.1-m diameter) โดยเป็นการเปรียบเทียบกับผลการคาดการณ์รูปแบบ อุณหภูมิในการทำงานอยู่ในในช่วง 700-850 °C โดยชีวมวลที่ใช้เป็นวัตถุดิบคือ ชี้เลื่อย และมีอัตราการป้อนชี้เลื่อยแตกต่างกันอยู่ที่ 16-45 kg/h พบว่าองค์ประกอบของการผลิตก๊าซและการเพิ่มของค่าความร้อนในอากาศ จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ O / C และอัตราส่วนของอุณหภูมิที่เกิดการระงับ ค่าความร้อนของแก๊สจะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มการระงับของความหนาแน่น

Jhon Jairo Ramírez Behainne and Martinez. (2014) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของเตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวน โดยใช้แกลบเป็นวัสดุติดบ โดยงานวิจัยดังกล่าวเป็นงานวิจัยเพื่อที่จะนำไปสู่การฟื้นตัวของเศรษฐกิจวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในโคลอมเบียร์โดยใช้เตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดชนิดฟองอากาศ และใช้แกลบเป็นวัสดุติดบ พบว่าค่าความร้อนต่ำอยู่ที่ $3.78 \text{ MJ} / \text{Nm}^3$ และพลังงานก้าชอยู่ที่ 73.82 kW ดังแสดงในภาพที่ 14



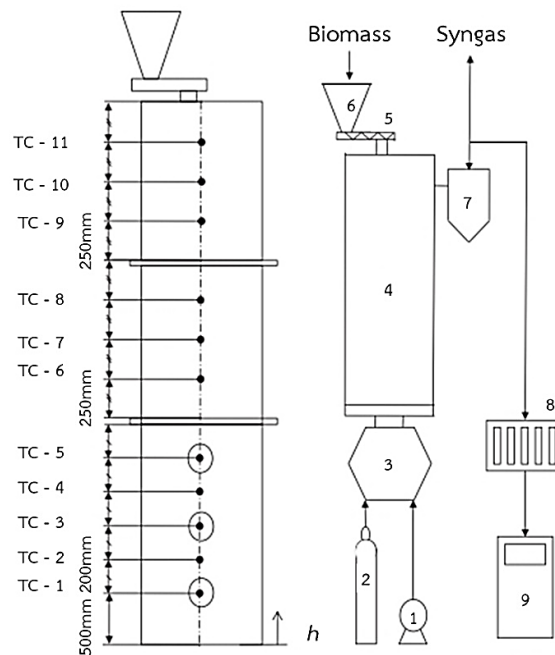
ภาพที่ 14 สมรรถนะการทำงานของเตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดชนิดหมุนวน

Manuel Campoy et al. (2014) ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้เตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดในระดับนาร์อง โดยในโรงงานนาร์องขนาด 100 kWh โดยในการทดสอบใช้ของเสียเป็นชีววมวลทั้งสิ้น 4 ชนิด ได้แก่ ของเสียจากน้ำมันมะกอก เนื้อและกระดูกป่น (MBM) กากตะกอนจากน้ำเสีย (DSS) และปุ๋ยหมักจากขยะมูลฝอยเทศบาล (MSW) อัตราส่วนอากาศ (อัตราส่วนระหว่างอัตราการป้อนอากาศที่เกิดขึ้นจริงและทฤษฎี) ที่ใช้อยู่ระหว่าง 0.23 และ 0.43 อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้อยู่ในช่วง $770\text{-}870 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ผลพบว่าของเสียจากน้ำมันมะกอกเป็นเชื้อเพลิงที่เหมาะสมมากที่สุดสำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ อุณหภูมิเพียงพอที่จะเข้าถึงการแปลงคาร์บอนสูง (สูงกว่า $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ดังแสดงในภาพที่ 15



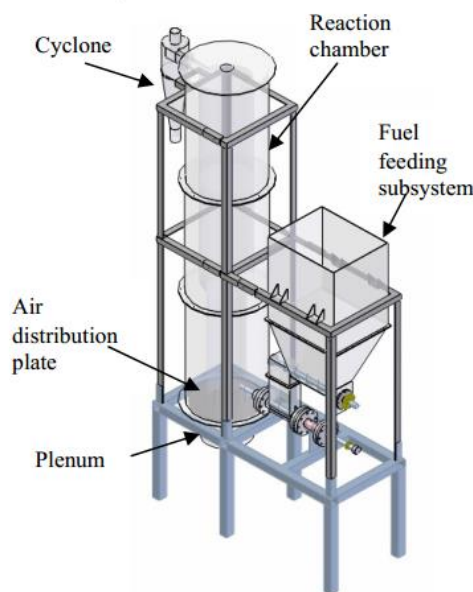
ภาพที่ 15 ไดอะแกรมการศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ของเสียเป็นวัตถุดิบ

Young Doo Kim et al. (2013) ศึกษาเครื่องป้อนอากาศในการผลิตก๊าซโดยใช้ชีวมวลจากไม้และใช้เตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอดีซ์เบดชนิดพองอากาศ โดยการศึกษาเครื่องป้อนอากาศดังกล่าวเป็นการศึกษาเพื่อที่จะควบคุมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ก๊าซ ปริมาณวัตถุดิบและช่วยเปลี่ยนเป็นก๊าซตัวแทนที่ถูกป้อนเข้าแก๊สซิไฟเออร์ซึ่งมีความแตกต่างกัน อีกทั้งเป็นการศึกษาการกระจายอุณหภูมิในแก๊สซิไฟเออร์และองค์ประกอบของแก๊สอีกด้วย ผลการศึกษาพบว่าเครื่องป้อนอากาศส่งผลต่ออัตราการป้อนของชีวมวลซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขภายในการเปลี่ยนแปลงของชีวมวลซึ่งค่าความร้อนของแก๊สอยู่ที่ประมาณ $4.7 \text{ MJ} / \text{Nm}^3$ ดังแสดงในภาพที่ 16



ภาพที่ 16 โต๊ะแถมการศึกษาเครื่องป้อนอากาศในการผลิตแก๊สโดยใช้ชีวมวล

J. J. RAMÍREZ et al. (2007) ได้ศึกษาการออกแบบพื้นฐานของเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้แคลบเป็นวัสดุติดบในระดับนำร่อง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเอื้อต่อการการประเมินค่าพลังงานของของเสียที่อยู่ในรูปของแข็งที่เป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการเกษตรในโคลอมเบียโดยเป็นการออกแบบเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยใช้แคลบเป็นวัสดุติดบ โดยเลือกใช้เตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดชนิดพองอากาศ โดยผู้วิจัยทำการสร้างห้องปฏิบัติการขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.3 m และความสูงโดยรวมประมาณ 3 m โดยทำการออกแบบจากข้อมูลทางทฤษฎีและศึกษาการทดลองที่มีอยู่ในบทความวิจัยและจากประสบการณ์ที่ผ่านมาของกลุ่มวิจัย ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวผู้วิจัยตั้งเป้าหมายการผลิตแก๊สอยู่ที่ประมาณ 70 kW ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 การออกแบบเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดซ์เบดโดยใช้แกลบเป็นวัสดุติด

สุภัทรชัย และคณะ (2554) ได้ศึกษาการเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่มีครีบริบรูปตัววีไว้ภายในห้องเผาไหม้ เพื่อความต้องการที่จะเพิ่มระยะเวลาและการไหลแบบหมุนควง (vortex flow) ของแกลบภายในเตาเผาให้มากขึ้น พบว่าห่อที่มีครีบริบสามเหลี่ยมวางขวางไว้ภายในห่อทดสอบนั้นสามารถทำให้แกลบเกิดการหมุนควงและการกระจายตัวที่ดีกว่าห่อที่ไม่ติดครีบริบ โดยการทดลองจะทำการป้อนเชื้อเพลิงแกลบที่อัตราการป้อนเท่ากับ 8.6 kg/h ซึ่งจะใช้ค่าอัตราการป้อนนี้คงที่ตลอดการทดลอง จากนั้นจะทำการปรับเปลี่ยนปริมาณเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินทั้งหมด 3 ค่าคือ 50% 60% และ 70% ตามลำดับ เงื่อนไขนี้จะถูกใช้ทดสอบทั้งกรณีที่เตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่ติดครีบริบสามเหลี่ยมรูปตัววีไว้ภายในห้องเผาไหม้และในกรณีที่เตาเผาไม่ติดครีบริบสามเหลี่ยมรูปตัววี และเตาเผาที่ติดครีบริบสามเหลี่ยมรูปตัววีไว้ภายในห้องเผาไหม้จะให้ค่าอุณหภูมิไอเสีย อุณหภูมิในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิในเฟรียบอร์ด สูงกว่าเตาเผาที่ไม่ติดครีบริบสามเหลี่ยมรูปตัววี

ประสาน และคณะ (2552) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเบดที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้แกลบและการเผาไหม้แกลบรวมกับถ่านหินบิทูมินัสของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบด งานวิจัยดังกล่าวได้นำเสนอผลกระทบของอุณหภูมิเบดที่มีผลต่อสมรรถนะการเผาไหม้ของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดซ์เบดที่ใช้เผาไหม้แกลบอย่างเดียวและเผาไหม้ถ่านหินบิทูมินัส 25% (ฐานพลังงาน) ร่วมกับแกลบ โดยสมรรถนะเตาที่พิจารณาคือปริมาณแก๊สมลพิษที่ทางออกเตาและประสิทธิภาพการเผาไหม้ (E_c) การทดลองจะควบคุมอุณหภูมิเบดที่ระดับ 0.43 m เหนือแผ่นกระจายอากาศไว้ที่ $800, 850$ และ $900 \text{ }^\circ\text{C}$ ในการเผาไหม้ โดยจะคงปริมาณอากาศส่วนเกินไว้ที่ประมาณ 88 % ผลการศึกษา

สรุปได้ว่าอุณหภูมิเบดที่เหมาะสมต่อการเผาไหม้แกลบอย่างเดียวนั้นคือ 800 °C และ 850 °C สำหรับการเผาไหม้ร่วม

ฐานิตย์ และคณะ (2546) ได้ศึกษาการพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดเบดโดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง อัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการไหลของอากาศในแต่ละสวนที่แตกต่างกันไปในแต่ละการทดลอง พบว่าขณะที่เกิดการเผาไหม้ห้องเผาไหม้ของเตาเผาจะถูกแบ่งออกเป็น 2 สวนตามลักษณะการเผาไหม้คือ บริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่เหนือวงแหวนวอร์เทคขึ้นไปซึ่งมีลักษณะการเผาไหม้แบบวอร์เทค การหมุนวนของอากาศเหนือวงแหวนมีส่วนสำคัญในการช่วยดักจับอนุภาคขนาดใหญ่ที่ยังเผาไหม้ไม่หมดไม่ให้หนีออกไปจากเตาและบริเวณห้องเผาไหม้ที่อยู่บริเวณด้านล่างวงแหวนวอร์เทคลงมาซึ่งเกิดการเผาไหม้แบบฟลูอิดเบดจะเด่นชัดมากโดยมีการกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดเตาซึ่งทำให้ได้ภาวะความร้อนสูงสุดเท่ากับ 0.825 MWth/m³ การเกิดฟลูอิดเซชันภายในเตาไม่จำเป็นผสมวัสดุเฉื่อยผสมลงในเบด และอุณหภูมิของแก๊สร้อนตรงทางออกมีค่าประมาณ 1,060 °C การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาไม่ให้เกินกว่า 1,000 °C โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศสวนที่สามให้เหมาะสม

พิเชฐ (2556) ได้ศึกษาการทดลองเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดเบดที่ใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบด โดยเป็นการศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผาฟลูอิดเบดแบบทรงกรวยที่ใช้สำหรับการเผาไหม้กะลาปาล์ม พบว่าการใช้ทรายซิลิกาสำหรับการเผาไหม้กะลาปาล์มเกิดปัญหาการเกาะตัวกันของเบด ดังนั้นทรายอะลูมินาจึงถูกใช้เป็นวัสดุเบดเพื่อป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของวัสดุเบดในเตาเผาแทนทรายซิลิกา โดยในระหว่างการเผาไหม้มีการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอัตราคงที่ 45 kg/h เพื่อควบคุม ปริมาณความร้อนป้อนเข้าเตาเผาที่ประมาณ 200 kW_{th} และมีการควบคุมอากาศส่วนเกินในช่วง 20–80 % ในทุก ๆ การทดลอง โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาอยู่ที่ประมาณ 99 % นอกจากนี้ยัง พบว่า ไม่เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของทรายอะลูมินาตลอดการทดลอง 30 h

บทที่ 3

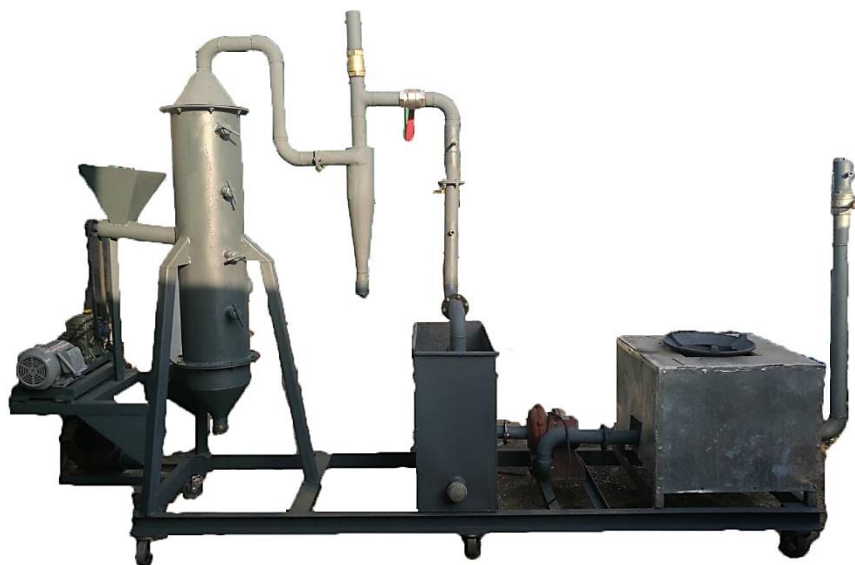
วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบผลิตแก๊สชีววมวลด้วยเทคโนโลยีฟลูอิดไคซ์เบตจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ภายใต้การศึกษาตัวแปรและการประเมินสมรรถนะของระบบ และการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต มีรายละเอียดเครื่องมือ อุปกรณ์ วัสดุและวิธีการดำเนินการวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบต

ระบบผลิตแก๊สที่ใช้ศึกษาเป็นแบบฟลูอิดไคซ์เบตชนิดพองอากาศซึ่งวัสดุเบตจะมีลักษณะเดือดอยู่กับที่โดยมีลักษณะการเคลื่อนที่ขึ้นและลงจนมีลักษณะคล้ายกับพองอากาศ ส่วนประกอบหลักของชุดทดสอบ แบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ชุดผลิตแก๊ส ชุดทำความสะอาดและลดอุณหภูมิแก๊ส และชุดหัวเผา แก๊สสำหรับทดสอบประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สด้วยการต้มน้ำ ชุดผลิตแก๊สประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์ปรับความถี่กระแสไฟฟ้าเพื่อปรับอัตราการป้อนอากาศผ่านวัสดุเบตจากด้านล่าง และบริเวณด้านล่างของวัสดุเบตออกแบบให้มีตะแกรงและชุดกำจัดขี้เถ้า บริเวณด้านข้างของห้องเผาไหม้ออกแบบให้มีช่องป้อนเชื้อเพลิงโดยทำการป้อนชีววมวลผ่านกระพ้อและสายพานลำเลียงนำชีววมวลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของระบบผลิตแก๊สชีววมวล โดยควบคุมความเร็วรอบการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งใช้อินเวอร์เตอร์เป็นผลิตภัณฑ์ของ Schneider Electric รุ่น Ativar 312 ด้านบนของห้องเผาไหม้ออกแบบให้มีท่อลำเลียงแก๊สชีววมวล ขนาด 5.08 cm เชื่อมต่อกับชุดทำความสะอาดแก๊ส ออกแบบให้เป็นไซโคลนซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอกและมีส่วนปลายเป็นโคลน ใช้ในการทำความสะอาดแก๊สและดักจับน้ำมันดิน ซึ่งไซโคลนดังกล่าวเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ลดอุณหภูมิแก๊สชีววมวลทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของแก๊สชีววมวลโดยภายในอุปกรณ์มีท่อวนไปมาและมีน้ำที่นำเอาความร้อนออกจากแก๊สชีววมวลทำให้แก๊สมีอุณหภูมิที่ลดลงและเชื่อมต่อกับหัวเตาเผาแก๊สใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวลด้วยวิธีต้มน้ำ (water boiling test) ซึ่งหัวเตาเผาแก๊สจะถูกต่อเข้ากับท่อลำเลียงแก๊สชีววมวลที่ผ่านการทำความสะอาดและลดอุณหภูมิแล้ว ดังแสดงในภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบด

3.1.2 ชุดทดสอบพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวล

ในการออกแบบสร้างระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไธซ์เบดของงานวิจัยนี้จำเป็นต้องศึกษาปริมาณลมที่ต้องการใช้กับการลอยตัวของชีวมวลขณะเผาไหม้ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ทดลองคือชุดทดสอบพฤติกรรมการลอยตัว ดังแสดงในภาพที่ 19 ชุดทดสอบการลอยตัวของชีวมวลประกอบด้วยห้องเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ความยาว 150 cm ด้านบนห้องเผาไหม้มีวาล์วควบคุมการเปิด-ปิดลมขนาดท่อลม 2 in ชุดป้อนอากาศจะป้อนอากาศทางด้านล่างของห้องเผาไหม้ผ่านตะแกรงละเอียดโดยใช้พัดลมเป่าอากาศ ของ VENZ รุ่น SB-30 มอเตอร์ ½ HP 3 phase ขนาดท่อลมออก 5.08 cm การควบคุมความเร็วลมใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความถี่กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ MITSUBISHI รุ่น FR-D700 1 phase 200 V ขนาด 4.2 A ผนังรอบเป็นพลาสติกใสเพื่อใช้ดูพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวลและเบด ด้านข้างมีตำแหน่งบอกระดับความสูง การทดลองจะมีการป้อนลงก่อน จากนั้นป้อนชีวมวลเข้าสู่ชุดทดสอบ ศึกษาการปรับปริมาณอากาศที่ป้อนพร้อมกับมีการควบคุมวาล์วปิดเปิดซึ่งการปรับความเร็วลมส่งผลให้พฤติกรรมการลอยตัวสูงขึ้น ในขณะที่เปิดวาล์วด้านบนจะต้องมีการควบคุมในระดับที่เหมาะสม (พงศธร และคณะ, 2560)



ภาพที่ 19 ชุดทดสอบพฤติกรรมผลการลอยตัวของชีวมวล

3.1.3 เครื่องสับย่อยชีวมวล

- เครื่องสับย่อยชีวมวลแบบหยาบ

เครื่องสับย่อยชีวมวลแบบหยาบ ใช้สำหรับสับซังข้าวโพดให้มีขนาดเล็ก โดยจะใช้ใบมีดสับผสมกับการตีชีวมวลให้เป็นชิ้นขนาดเล็กภายในมีใบมีดทั้งหมด 4 ใบ รับกำลังมาจากสายพานแบบร่องวี โดยมีต้นกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 1 hp 220 V ตะแกรงในการคัดกรองชีวมวลหลังจากการบดมีขนาด 10 mm การป้อนชีวมวลจะป้อนจากทางด้านบน จากนั้นชีวมวลจะผ่านการสับย่อยและไหลผ่านตะแกรงไหลลงสู่ด้านล่าง ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 เครื่องสับย่อยชีวมวลแบบหยาบ

- เครื่องสับย่อยชีวมวลแบบละเอียด

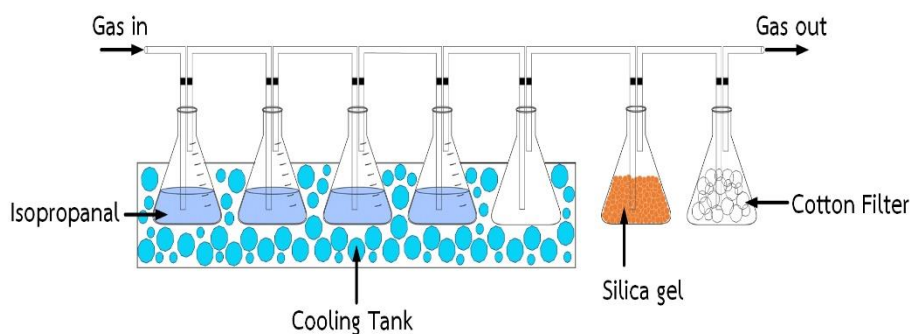
เครื่องสับย่อยชีวมวลแบบละเอียดใช้สับย่อยชีวมวลให้มีขนาดเล็กประมาณ 1-5 mm สับเชื้อเพลิงชีวมวลได้หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นซังข้าวโพด ปาล์ม และแกลบ เป็นต้น ชุดสับของเครื่องรับกำลังมาจากมอเตอร์ขนาด 3 hp (2.2 kW) แรงดันไฟฟ้า 220 V ใช้สายพานส่งกำลังจากมอเตอร์ให้กับชุดบด ด้านในของเครื่องมีชุดตีและสับชีวมวลทั้งหมด 4 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 เครื่องสับย่อยชีวมวลแบบละเอียด

3.1.4 ชุดเก็บตัวอย่างแก๊สชีวมวล

ชุดเก็บตัวอย่างแก๊สชีวมวลเป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บตัวอย่างเพื่อไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส ซึ่งประกอบไปด้วย ขวดทดลองขนาด 250 ml เชื่อมต่อด้วยสายซิลิโคนซึ่งทำหน้าที่ดักจับน้ำมันดินที่ไหลมาพร้อมกับแก๊สชีวมวล โดยในขวดทดลองบรรจุสารไอโซพานอล ปริมาณ 50 ml จำนวน 5 ขวด ดังแสดงในภาพที่ 22 ใช้น้ำแข็งสำหรับลดอุณหภูมิ การทำงานเมื่อแก๊สชีวมวลไหลผ่าน จะเกิดการควบแน่นลงมาผสมกับสารดังกล่าว หลังจากนั้นแก๊สชีวมวลจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สซึ่งแก๊สจะถูกลดความชื้นด้วยซิลิกาเจลอีกครั้ง จากนั้นจะไหลผ่านสำลีที่ใช้ในการกรองสิ่งเจือปนที่อยู่ในแก๊ส เพื่อลำเลียงเข้าสู่ถุงเก็บตัวอย่างแก๊ส ดังแสดงในภาพที่ 23 จากนั้นจึงนำไปส่งตรวจห้องปฏิบัติการวิจัย



ภาพที่ 22 ชุดเก็บตัวอย่างแก๊สชีวมวล



ภาพที่ 23 ถุงเก็บตัวอย่างแก๊สชีวมวล

3.1.5 เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph: GC)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเป็นผลิตภัณฑ์ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-8A จากห้องปฏิบัติการวิจัยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สชีวมวลโดยจะทำการแยกสารที่ระเหยง่ายโดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับซึ่งเรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็น Mobile phase เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่ เครื่องตรวจจับสัญญาณ (Detector) และจะถูกส่งไปบันทึกเป็น (Recorder) ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

3.1.6 เครื่องวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิในการทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดเบด จะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลเป็นแบบ Chromel-Alumel ยี่ห้อ SPL รุ่น T_S/109 หัววัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 22 mm และความยาว 150 mm ดังแสดงในภาพที่ 25-a โดยอุณหภูมิที่ใช้วัดไม่เกิน 800 °C ซึ่งใช้วัดอุณหภูมิห้องเผาไหม้ที่จุด T1-T4 ดังแสดงในภาพที่ 34 เทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 2 รุ่น T_S/102 ชนิด type K ดังแสดงในภาพที่ 25-b ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 5 mm ใช้วัดอุณหภูมิแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาดและลดอุณหภูมิที่จุด T5 และ T8 ดังแสดงในภาพที่ 34 เทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 3 รุ่น T_S/101 ชนิด type K ดังแสดงในภาพที่ 25-c ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิ น้ำที่ใช้ในการต้มน้ำที่หัวเผาแก๊สที่จุด T6 ดังแสดงในภาพที่ 34 และเทอร์โมคัปเปิลแบบที่ 4 ยี่ห้อ FW SYSTEM รุ่น FWK/1A ชนิด type K ดังแสดงในภาพที่ 25-d ใช้วัดอุณหภูมิแวดล้อมที่จุด T7 ดังแสดงในภาพที่ 34



(a) เทอร์โมคัปเปิลใช้วัดอุณหภูมิที่จุด T1-T4 (b) เทอร์โมคัปเปิลใช้วัดอุณหภูมิที่จุด T5,T8



(c) เทอร์โมคัปเปิลใช้วัดอุณหภูมิที่จุด T6 (d) เทอร์โมคัปเปิลใช้วัดอุณหภูมิที่จุด T7

ภาพที่ 25 เทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K 4 แบบ

3.1.7 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

ผลจากการตรวจวัดอุณหภูมิจะแสดงผลโดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และใช้เครื่องบันทึกข้อมูลในการเก็บข้อมูลโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ที่ใช้ยี่ห้อ ADVANTECH รุ่น USB-4718 ดังแสดงในภาพที่ 26 มีช่องสำหรับเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมด 8 ช่อง และสามารถอ่านค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิด Type K อยู่ในช่วง 0-1370 °C โดยมีความแม่นยำอยู่ที่ $\pm 0.1\%$



ภาพที่ 26 เครื่องบันทึกข้อมูล

3.1.8 เครื่องวัดอัตราการป้อนอากาศ

ในการทดสอบจะต้องมีการปรับค่าปริมาณอากาศที่ป้อนให้กับระบบผลิตแก๊ส การวัดปริมาณอากาศในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัดของ BENETECH รุ่น GM8901 สามารถวัดความเร็วลมอยู่ในช่วง 0-45 m/s ความแม่นยำ $\pm 3\%$ ความละเอียด 0.1 m/s ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 เครื่องวัดอัตราการป้อนอากาศ

3.1.9 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส

การวัดอัตราการไหลของแก๊สจะใช้เครื่องวัดแบบใบพัดของ lutrom Electronic รุ่น YK-80 AM แบบใบพัดโลหะสามารถวัดความเร็วของแก๊สอยู่ในช่วง 0.4–35 m/s ความละเอียด 0.1 m/s และมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 2\%$ อุณหภูมิช่วงที่ใช้งานอยู่ที่ 0–60 °C และมีความละเอียด 0.1 °C ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส

3.1.10 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานในการผลิตแก๊สจำเป็นต้องวัดปริมาณไฟฟ้าป้อนเข้าซึ่งการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบผลิตแก๊สชีวมวล จะใช้เครื่องตรวจวัดกำลังไฟฟ้าชนิดดิจิตอลมัลติมิเตอร์ เป็นผลิตภัณฑ์ของ Chauvin Arnoux รุ่น F05 ดังแสดงในภาพที่ 29 สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ความถี่และความต้านทาน โดยวัดแรงดันได้ 600 Vac/dc และวัดกระแสได้ 400 Iac/dc



ภาพที่ 29 เครื่องตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

3.1.11 เครื่องชั่งน้ำหนัก

การชั่งน้ำหนักชีวมวลและน้ำสำหรับการทดสอบต้นไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัลเป็นผลิตภัณฑ์ของ CST รุ่น CDR-30 พิกัดกำลัง 30 kg × 1 g อุณหภูมิใช้งานที่ 5–40 °C ดังแสดงในภาพที่ 30



ภาพที่ 30 เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์ CST รุ่น CDR-30

3.1.12 มานอมิเตอร์

การวัดความดันตกคร่อมและอัตราการไหลของแก๊สในห้องเผาไหม้สำหรับทดสอบพฤติกรรม การลอยตัวของชีวมวลใช้เครื่องวัดความดันเป็นผลิตภัณฑ์ของ CEM รุ่น DT-8920 ความแม่นยำ ±0.3% ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 มานอมิเตอร์

3.2 วัสดุชีวมวลและการเตรียม

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ คือ ชังข้าวโพดที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปในกระบวนการสีข้าวโพด ดังแสดงในภาพที่ 32 ชังความโพดมีความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ 132.6 kg/m^3 มีค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ 14.26 MJ/kg การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการนำตัวอย่างชังข้าวโพดมาลดความชื้นด้วยการตากให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ให้ความชื้นลดลงเหลือประมาณ 10% จากนั้นนำชังข้าวโพดมาลดขนาดโดยการบดหยาบด้วยเครื่องบดหยาบขนาดตะแกรง 10 mm และนำมาชังข้าวโพดที่ได้มาทำการลดขนาดอีกครั้งด้วยการบดละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียดให้ชังข้าวโพดมีขนาดประมาณ 3 mm คุณสมบัติทางเคมีของชังข้าวโพดนำไปทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของกรไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง (Mahawan et al., 2016) โดยผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชังข้าวโพดดังแสดงในตารางที่ 5 และผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุดังแสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 32 วัสดุชีวมวล (ชังข้าวโพด)

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชังข้าวโพด Proximate Analysis (wt. %)

การวิเคราะห์แบบประมาณ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Moisture	ASTM D3302 M-10	11.82
Ash	ASTM D7582-10 ^{E1}	5.62
Volatile matter	ASTM D7582-10 ^{E1}	70.81
Fixed carbon	ASTM D7582-10 ^{E1}	14.76

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด Ultimate Analysis (wt. %)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Carbon	ASTM D5373-08	42.12
Hydrogen	ASTM D5373-08	6.52
Nitrogen	ASTM D5373-08	0.45
Oxygen	(Plus errors)	45.11
Sulphur	ASTM D4239-12	0.01

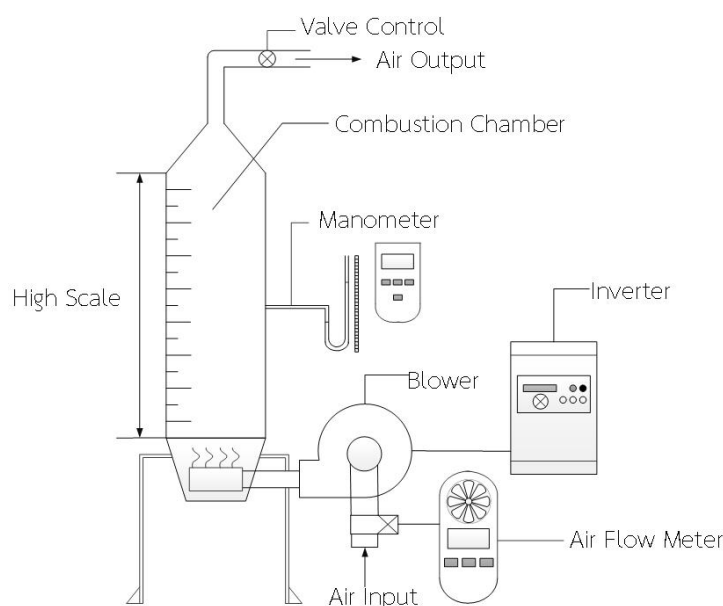
3.3 เงื่อนไขการวิจัย

การทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบระบบผลิตแก๊สชีววมวลโดยเลือกใช้เทคโนโลยีการผลิตแก๊สแบบฟลูอิดซ์เบดและมีการกำหนดเงื่อนไขการวิจัย คือ ใช้เชื้อเพลิงที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรนั้นคือ ซังข้าวโพดซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 282 kg/m^3 เป็นวัสดุที่เหลือใช้จากกระบวนการบดสีข้าวโพด โดยขนาดของซังข้าวโพดที่ใช้อยู่ที่ประมาณ 3 mm ซึ่งผู้วิจัยคัดเลือกขนาดของซังข้าวโพดจากพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวล เนื่องจากซังข้าวโพดขนาดดังกล่าวส่งผลให้เกิดการลอยตัวที่ค่อนข้างสูง มีความสม่ำเสมอและเสถียรกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับขนาดอื่น (พงศธร และคณะ, 2560) และเลือกใช้ทรายละเอียดซึ่งมีความหนาแน่น 2600 kg/m^3 เป็นวัสดุเบด เนื่องจากทรายเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีคุณสมบัติในการดูดความชื้นซึ่งจะส่งผลให้ความร้อนมีความเสถียรไม่ดับง่าย พร้อมทั้งทำการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 2.56 4.44 และ 5.89 kg/h ซึ่งไม่ต่ำและไม่สูงจนเกินไปเนื่องจากถ้าทำการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่สูงหรือต่ำเกินไปจะส่งผลต่อการเผาไหม้ภายในในระบบและกำหนดอัตราส่วนสมมูลที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 0.3 0.6 และ 0.9 เพื่อดูผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบผลิตแก๊สที่เกิดขึ้น

3.4 วิธีกาทดสอบ

3.4.1 การทดสอบพฤติกรรมกาการลยตัวของซึวมวล

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมกาการลยตัวของซึวมวลทำการควบคุมความเร็วลมโดยใช้ อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 25-45 Hz ซึวมวลที่ทำการเปรียบเทียบในการทดสอบ คือ ซังข้าวโพดและ แกลบ นำซึวมวลที่ทำการแยกขนาดใส่ในชุดทดสอบเพื่อเริ่มทำการทดสอบ โดยเริ่มจากซังข้าวโพดขนาด 1 mm 3 mm และ 5 mm ตามด้วยแกลบขนาด 1 mm 3 mm และ 5 mm ตามลำดับ ในการทดสอบแต่ครั้งจะทำการวัดความเร็วลมที่ป้อนเข้าสู่ระบบและความเร็วลมที่ออกจากระบบด้วย Air Flow Meter พร้อมทั้งวัดอัตราการไหลของอากาศภายในระบบด้วย Manometer ในการทดสอบแต่ละรอบจะทำการเปิดวาล์วที่อยู่ด้านบนท่อลมบริเวณทางออกของชุดทดสอบเพื่อควบคุมอัตราการไหลของอากาศเมื่อผ่านห้องเผาไหม้ อีกทั้งยังเป็นการทดสอบเพื่อการควบคุมอัตราการไหลอากาศต่อความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้ โดยทำการควบคุมการเปิดของวาล์วเป็นเปิด สูงสุด 100% 50% และ 25% ตามลำดับ พร้อมทั้งดูระดับการลยตัวของตัวอย่างซึวมวลที่ใช้ในการทดสอบที่ High Scale ที่ทำการบ่งชี้ตำแหน่งบริเวณชุดทดสอบ ซึ่งมีการติดตั้งเครื่องมือดังแสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ไดอะแกรมการทดสอบพฤติกรรมกาการลยตัวของซึวมวล

ที่มา: พงศธร และคณะ (2560)

3.4.2 การทดสอบระบบผลิตแก๊สชีวมวล

การทดสอบระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด มีการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 34 รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการทดสอบมีดังต่อไปนี้

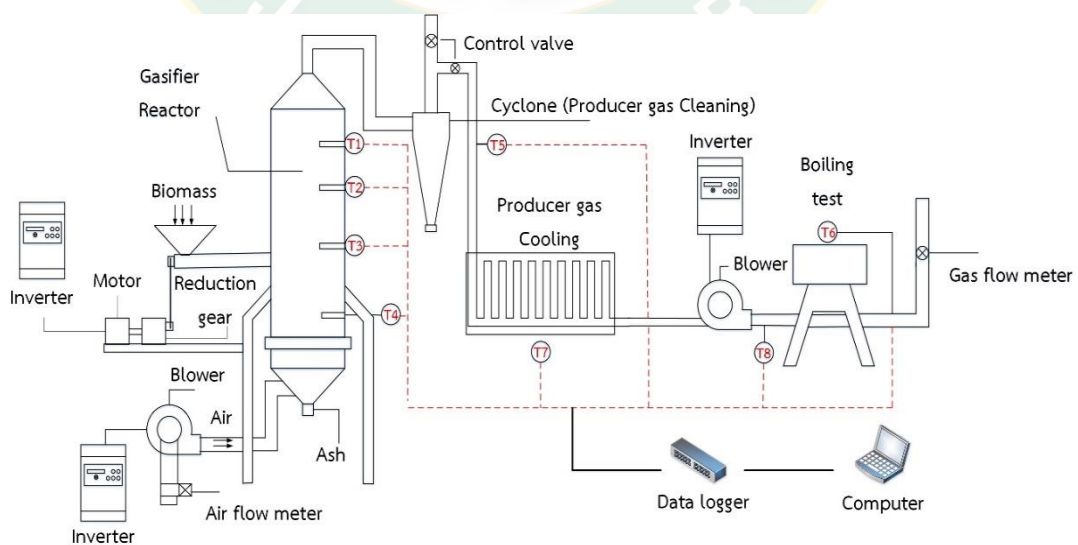
1) ทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักน้ำเริ่มต้นที่ใช้ในการต้มน้ำและชั่งน้ำหนักน้ำที่เหลือเมื่อสิ้นสุดการทดสอบ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีวมวล

2) ก่อนทำการทดสอบระบบทำการป้อนทรายซึ่งเป็นวัสดุเบดเข้าสู่ห้องเผาไหม้ให้อยู่ในระดับที่ทำการออกแบบไว้

3) ในช่วงเริ่มต้นของการทดสอบทำการให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม พร้อมทั้งเปิดพัดลมป้อนอากาศปรับอัตราไหลอากาศเข้าสู่บริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้ ให้วัสดุเบดสัมผัสกับความร้อนเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ได้ดีขึ้น

4) ทำการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ผ่านชุดป้อนชีวมวลอย่างต่อเนื่องและทำการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงโดยจะทำการควบคุมการป้อนโดยใช้อินเวอร์เตอร์กำหนดปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในแต่ละครั้ง เมื่อระบบผลิตแก๊สชีวมวลเกิดการลุกไหม้ติดไฟอย่างต่อเนื่อง จะทำการหยุดการให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม

5) เมื่อระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดเกิดการติดไฟอย่างต่อเนื่อง จะเริ่มการต้มน้ำ (boiling test) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สร่วมกับหัวเตาเผาแก๊ส โดยเมื่อเริ่มทดสอบการต้มน้ำ จะเริ่มจับเวลาและวัดอุณหภูมิ น้ำ อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิ แวดล้อม อุณหภูมิของแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาด และอุณหภูมิของแก๊สที่ผ่านการลดอุณหภูมิ โดยทำการบันทึกค่าทุก ๆ 5 นาที เป็นระยะเวลาประมาณ 60 นาที



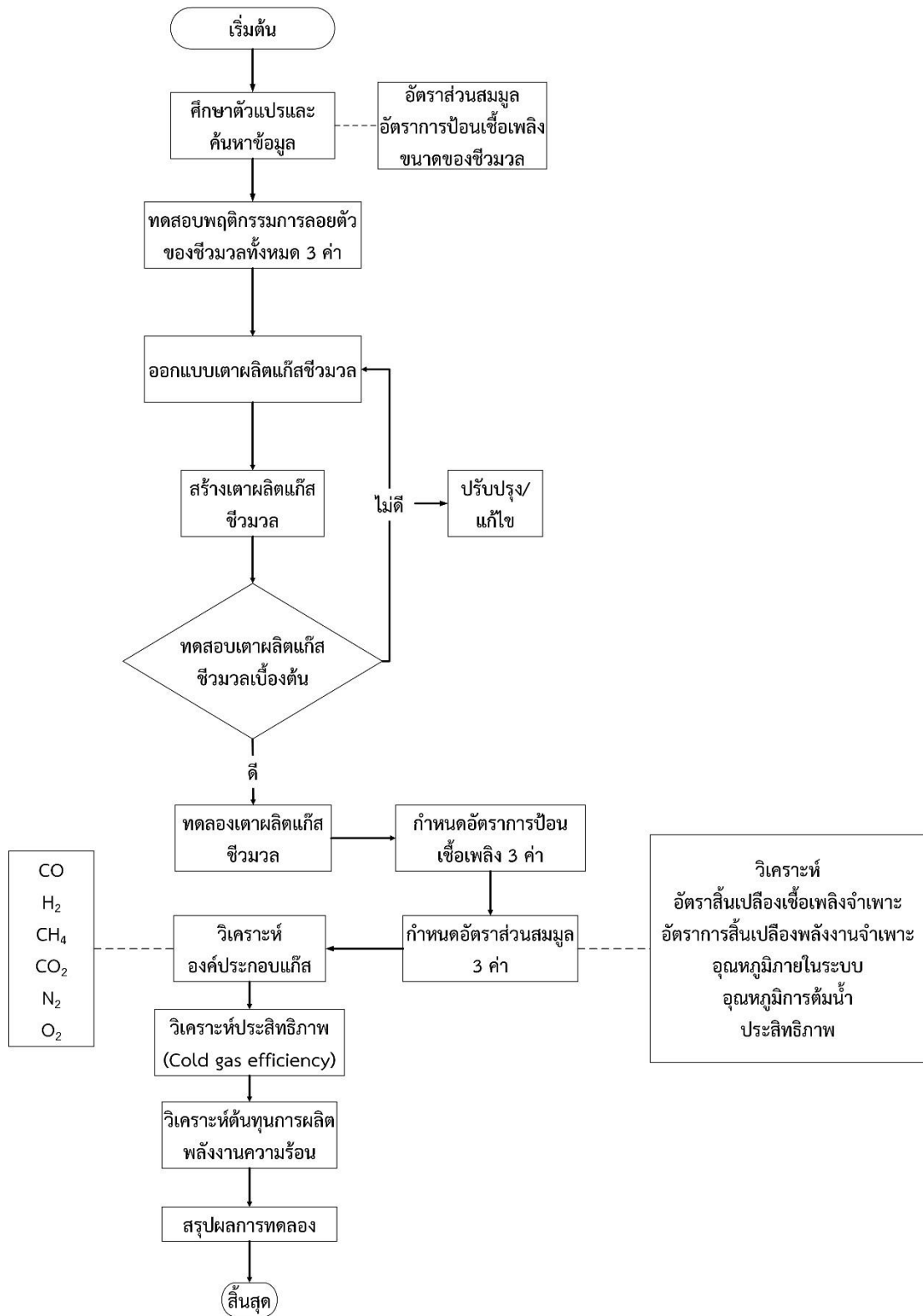
ภาพที่ 34 ไดอะแกรมการติดตั้งเครื่องมือในการทดสอบ

3.4.3 การเก็บตัวอย่างแก๊สชีววมวลและส่งวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแก๊ส

แก๊สชีววมวลที่ได้จากการผลิตในงานวิจัยนี้จะนำไปทดสอบและวิเคราะห์ห้องค์ประกอบที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยการเก็บตัวอย่างแก๊สชีววมวลจะเริ่มต้นจากการติดตั้งชุดเก็บตัวอย่างแก๊สชีววมวล ป้อนดูดและถุงเก็บแก๊ส การเก็บตัวอย่างเริ่มจากการทดสอบระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบตไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อรอให้อัตราการเกิดแก๊สมีความเสถียรและมีอุณหภูมิความร้อนคงที่ เมื่อครบ 30 นาที เปิดสวิตซ์ปั้มเพื่อให้ปั้มทำงานโดยดูดแก๊สเพื่อมาล้าเลียงเข้าสู่ถุงเก็บแก๊ส ในเบื้องต้นให้ปล่อยแก๊สชีววมวลและอากาศในท่อทิ้งก่อนประมาณ 2 นาที จากนั้นจึงต่อท่อบรรจุเข้าสู่ถุงเก็บแก๊สจนกระทั่งได้แก๊สชีววมวลเต็มถุงจึงทำการปิดถุงและซีลถุงด้วยพาราฟิน

3.4.4 การวิเคราะห์ผล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นจะแบ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลสมรรถนะของแก๊สชีววมวล วิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊ส และทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งการวิเคราะห์สมรรถนะของแก๊สชีววมวล จะทำการวิเคราะห์โดยกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราส่วนสมมูลที่ส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ อุณหภูมิภายในระบบ อุณหภูมิในการทดสอบการต้มน้ำ ประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวล และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีววมวล ในส่วนการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ จะทำการวิเคราะห์ถึงต้นทุนทางการผลิตความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบต จากขั้นตอนการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปการดำเนินการการศึกษา ดังแสดงในภาพที่ 35



ภาพที่ 35 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษา

บทที่ 4

การออกแบบและสร้างระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด

4.1 การคำนวณการออกแบบระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด

ระบบผลิตแก๊สชีววมวลนี้มีการออกแบบขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับการศึกษาสมรรถนะของระบบแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งเทคโนโลยีนี้ข้อดีในด้านความยืดหยุ่นสำหรับการใช้เชื้อเพลิงที่หลากหลาย (สุนีรัตน์, 2558) เหมาะสมกับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่ในประเทศไทย เช่น ชังข้าวโพด แกลบ และขี้เถ้าจากกระบวนการอุตสาหกรรม เป็นต้น การออกแบบใช้ภาวะไหลดัดสอบในการศึกษานี้ด้วยการเอาไปใช้ในการต้มน้ำ (water boiling test) การออกแบบที่ดีนั้นระบบผลิตแก๊สจะต้องให้พลังงานออกมาสูงสุดโดยเฉพาะองค์ประกอบแก๊ส (Asfaw, 2013) ควรที่จะต้องมีสัดส่วนแก๊สที่เผาไหม้ได้สูงสุด ซึ่งโดยทั่วไปค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลจากระบบฟลูอิดไคซ์เบดจะอยู่ที่ $3000-5000 \text{ kJ/Nm}^3$ (Couto et al., 2013) ในด้านประสิทธิภาพความร้อนโดยรวมของระบบผลิตแก๊สควรจะต้องสูงโดยทั่วไปประสิทธิภาพความร้อนการผลิตแก๊ส (Cold gas efficiency) จะอยู่ในช่วง 50-70% (นิกราน และคณะ, 2554) ขณะเดียวกันในการใช้ระบบ พลังงานในการป้อนแก๊สต้องต่ำที่สุดท้ายต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนจะต้องต่ำที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบดประกอบด้วย ลักษณะของห้องเผาไหม้ เส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงห้องเผาไหม้และความสูงของชั้นวัสดุเบด รายละเอียดเงื่อนไขการออกแบบดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบเตาชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่	หน่วย
m_w	มวลน้ำเริ่มต้น	8	L
t_{TOT}	เวลาในการต้มน้ำต่อครั้ง	1	h
$C_{p,w}$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	4.186	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$
η_{th}	ประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีววมวล	80	%
LHV_{feut}	ค่าความร้อนของชังข้าวโพด	14,260	kJ/kg
T_{wi}	อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น	30	$^\circ\text{C}$
T_{wb}	อุณหภูมิน้ำสุดท้าย	98-100	$^\circ\text{C}$

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่	หน่วย
ρ_{Ap}	ความหนาแน่นของซังข้าวโพด	282	kg/m^3
ER	Equivalence ratio	0.60	-
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ	1.20	kg/m^3
d_p	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย	0.414	mm
emf	สัดส่วนช่องว่างของฟลูอิดเซชัน	0.5	-
ρ_p	ความหนาแน่นของทราย	2600	kg/m^3
ρ_g	ความหนาแน่นของแก๊ส	1.052	kg/m^3

ในการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบตมีขั้นตอนในการออกแบบทั้งหมด 6 ขั้นตอน ประกอบด้วย

1. ปริมาณแก๊สชีวมวลที่จำเป็นต้องใช้
2. ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวมวล
3. ขนาดห้องเผาไหม้
4. ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้
5. ความสูงของชั้นวัสดุเบต
6. การเลือกขนาดพัดลม

รายละเอียดการคำนวณเพื่อการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบตมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาปริมาณแก๊สชีวมวลที่จำเป็นต้องใช้

ขั้นตอนการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีวมวล เริ่มต้นจากการคำนวณหาปริมาณแก๊สชีวมวลที่จำเป็นต้องใช้ โดยในเบื้องต้นได้กำหนดค่าความร้อนของแก๊สไว้ที่ 4500 kJ/Nm^3 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 24 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ (} Q_b \text{)} &= \frac{m_w \times C_{pw} \times \Delta T}{t_b} && \text{สมการที่ 24} \\ &= \frac{8 \text{ kg} \times 4.186 \text{ kJ/kg}^\circ \text{C} \times (100 - 30^\circ \text{C})}{3600 \text{ s}} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการต้มน้ำ (} Q_b \text{)} = 0.65 \text{ kW}$$

ปริมาณของแก๊สชีวมวลที่จำเป็นต้องใช้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 25 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{จาก } Q &= \dot{m}_g \times C_{v\text{gas}} && \text{สมการที่ 25} \\ \text{ดังนั้น } \dot{m}_g &= \frac{Q}{C_{v\text{gas}}} \\ &= \frac{0.65}{4500} \\ &= 0.003 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิง

เมื่อทราบถึงปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มน้ำจากขั้นตอนที่ 1 เสร็จสิ้นแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ได้จาก ปริมาณความร้อนของแก๊ส (Q_{gas}) ค่าความร้อนของซังข้าวโพด (LHV_{fuel}) และประสิทธิภาพของเตาชีวมวล (η_{th}) โดยกำหนดให้เตาชีวมวลมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80% และซังข้าวโพดมีค่าความร้อนเท่ากับ $14,260 \text{ kJ/kg}^\circ \text{C}$ การคำนวณหาปริมาณการป้อนซังข้าวโพดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 26

$$\text{ปริมาณการป้อนซังข้าวโพด (} \dot{m}_{\text{Fuel}} \text{)} = \frac{HV_{\text{gas}} \times Q_{\text{gas}}}{\text{LHV}_{\text{fuel}} \times \eta_{\text{th}}} \quad \text{สมการที่ 26}$$

$$= \frac{4,500 \text{ kJ/Nm}^3 \times 0.003 \text{ m}^3 / \text{s}}{14,260 \text{ kJ/kg} \cdot \text{C} \times 0.8}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด} \quad (\dot{m}_{\text{Fuel}}) &= 0.0011 \text{ kg/s} \\ &= 3.96 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดในระยะเวลา 1 h เสร็จสิ้นแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดต่อการใช้งาน 1 ครั้ง ได้จากปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด (\dot{m}_{Fuel}) และระยะเวลาในการต้มข้าวโพด (t_{TOT}) ซึ่งจากความต้องการของการต้มข้าวโพด มีความต้องการในการต้มข้าวโพด 60 min ต่อครั้ง โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 27 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดต่อครั้ง} \quad (\dot{m}_{\text{TOT}}) &= \dot{m}_{\text{Fuel}} \times t_{\text{TOT}} && \text{สมการที่ 27} \\ &= \frac{2.73 \text{ kg/h} \times 60 \text{ min}}{60 \text{ min/h}} \\ \text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด} \quad (\dot{m}_{\text{TOT}}) &= 3.96 \text{ kg} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำไปใช้ในการต้มข้าวโพดและปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดเพื่อให้ได้ค่าปริมาณพลังงานความร้อนตามที่ต้องการแล้ว สามารถคำนวณหาขนาดของห้องเผาไหม้ได้จากปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด (\dot{m}_{TOT}), และความหนาแน่นที่ปรากฏ (ρ_{Ap}) โดยกำหนดให้ความหนาแน่นที่ปรากฏเท่ากับ 230 kg/m^3 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 28 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรห้องเผาไหม้} \quad (V_f) &= \frac{\dot{m}_{\text{TOT}}}{\rho_{\text{Ap}}} && \text{สมการที่ 28} \\ &= \frac{3.96 \text{ kg}}{230 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาตรห้องเผาไหม้} \quad (V_f) = 0.05 \text{ m}^3$$

จากผลการคำนวณปริมาตรของห้องเผาไหม้ (V_f) และเบื้องต้นกำหนดให้ห้องเผาไหม้มีความสูง (H_f) 1 m สามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_f) ได้จากสมการที่ 29

$$\begin{aligned} \text{เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D}_r) &= \left(\frac{V_r}{H_r \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} && \text{สมการที่ 29} \\ &= \left(\frac{0.05}{1 \times \frac{\pi}{4}} \right)^{0.5} \end{aligned}$$

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

จากผลการคำนวณปริมาตรของห้องเผาไหม้ (V_r) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_r) สามารถคำนวณหาความสูงห้องเผาไหม้ (H_r) ได้จากสมการที่ 30

$$\begin{aligned} \text{ความสูงห้องเผาไหม้ (H}_r) &= \left(\frac{V_r \times 4}{D_r^2 \times \pi} \right) && \text{สมการที่ 30} \\ &= \left(\frac{0.05 \times 4}{0.25^2 \times \pi} \right) \\ &= 1.02 \text{ m} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมต่อขนาดของห้องเผาไหม้และปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากหากมีอัตราการป้อนอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดควันระหว่างการใช้งานได้ โดยในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (V_{air}) ได้ทำการกำหนดค่า Equivalence ratio เท่ากับ 0.60 และค่า Stoichiometric air (A/F) ที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 5.12 kg-air/kg-fuel และค่าความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.20 kg/m³ ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (V_{air}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 31

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (}\dot{m}_{\text{air}}) &= \frac{\text{ER} \times \dot{m}_{\text{TOT}} \times \text{A/F}}{\rho_{\text{air}}} && \text{สมการที่ 31} \\ &= \frac{0.6 \times 3.96 \text{ kg/h} \times 5.12 \text{ kg air/kg fuel}}{1.20 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (\dot{m}_{air}) = 10.13 m³/h

เมื่อทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ (D_r) และปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (V_{air}) ที่เหมาะสมต่อขนาดของเตาชีวมวล สามารถคำนวณความเร็วลมได้จากสมการที่ 32 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วลม (} V_{\text{air}} \text{)} &= \frac{\dot{m}_{\text{air}}}{\frac{\pi D^2}{4}} && \text{สมการที่ 32} \\ &= \frac{10.13 \text{ m}^3/\text{h}}{\frac{\pi \cdot 0.25^2 \text{ m} \times 3600 \text{ s}}{4}} \end{aligned}$$

$$\text{ความเร็วลม (} V_{\text{air}} \text{)} = 0.06 \text{ m/s}$$

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาความสูงของชั้นวัสดุเบด

ความสูงของชั้นวัสดุเบด (Bed Diameter, D_b) สามารถคำนวณหาได้จากความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเดเซชัน (Minimum fluidization Velocity, U_{mf}) และความเร็วในการไหลตามผิว (Superficial velocity, U_s) (Asfaw, 2013)

โดยการคำนวณหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเดเซชันหาได้จากสมการที่ 33 ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเดเซชัน (} U_{mf} \text{)} &= \left[\frac{d_p^2}{150 \times \mu_g} \right] \times [g \times (\rho_p - \rho_g)] \times \frac{(emf)^3}{(1 - emf)} && \text{สมการที่ 33} \\ &= \left[\frac{0.414^2}{(150 \times 41.23 \times 10^{-6})} \right] \times [9.81 \times (2600 - 1.052)] \times \frac{(0.5^3)}{(1 - 0.5)} \\ &= 0.25 \text{ m/s} \end{aligned}$$

และเมื่อทราบความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเดเซชัน สามารถคำนวณหาความเร็วในการไหลตามผิวหาได้จากสมการที่ 34 ดังต่อไปนี้

$$\text{ความเร็วในการไหลตามผิว (} U_s \text{)} = 2 \times U_{mf} \quad \text{สมการที่ 34}$$

$$= 2 \times 0.25$$

$$= 0.5 \text{ m/s}$$

และความสูงของชั้นวัสดุเบตหาได้จากสมการที่ 35 ดังต่อไปนี้

$$m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \times \left(\frac{\pi \times D_s^2}{4} \right) \times U_s \quad \text{สมการที่ 35}$$

$$\text{ดังนั้น ความสูงของชั้นวัสดุเบต (D}_s\text{)} = 0.042 \text{ m}$$

ขั้นตอนที่ 6 การเลือกขนาดพัดลม

จากค่าปริมาณอากาศสามารถนำไปเลือกขนาดของพัดลมที่มีความเหมาะสมกับ ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบต โดยใช้ข้อมูลจากการคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ข้างต้น ซึ่งได้ทำการเลือกพัดลมขนาด 0.37 kW นำมาใช้ร่วมกับระบบผลิตแก๊สชีววมวลที่มีขนาดห้องเผาไหม้ (V_r) เท่ากับ 0.05 m^3 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (D_r) เท่ากับ 0.25 m

ผลจากการคำนวณการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบตสามารถสรุปได้โดยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สรุปผลการออกแบบ

ส่วนที่	รายละเอียด	ขนาดออกแบบ
1	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้	0.25 m
2	ความสูงห้องเผาไหม้	1.02 m
3	ปริมาณการป้อนซังข้าวโพด	3.96 kg/h
4	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้	10.13 m ³ /h
5	ความสูงของชั้นวัสดุเบต	0.042 m
6	ขนาดพัดลมที่ใช้ป้อนอากาศและดูดแก๊ส	0.37 kW
7	มอเตอร์ที่ใช้ป้อนเชื้อเพลิง	0.75 kW

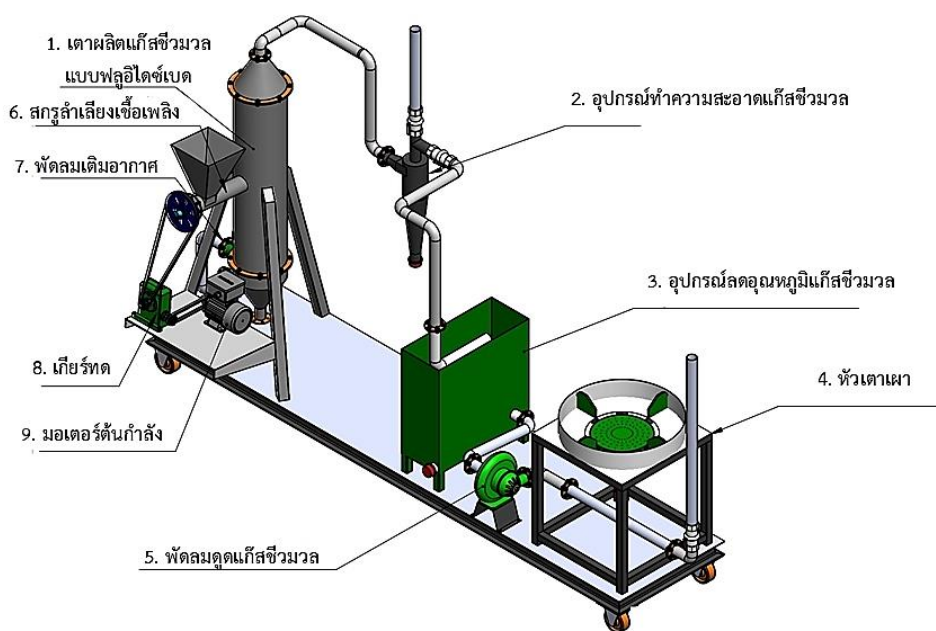
4.2 การออกแบบระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบต

ผลการคำนวณเมื่อหาขนาดของห้องเผาไหม้ได้แล้ว หลังจากนั้นมีการออกแบบนำเอาระบบต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนเครื่องผลิตแก๊สชีววมวล ส่วนชุดทำความสะอาดและลดอุณหภูมิแก๊สชีววมวล และส่วนสุดท้ายเป็นชุดหัวเผาแก๊สสำหรับการทดสอบระบบด้วยการต้มน้ำ แบบแปลนของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบ 2 มิติ แสดงในภาคผนวกที่ 1-7 และการออกแบบระบบในภาพรวมดังแสดงในภาพที่ 36 ซึ่งรายละเอียดการออกแบบระบบอธิบายดังต่อไปนี้ ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบต ระบบนี้จะใช้สกรูลำเลียงชีววมวลป้อนทางด้านข้างโดยใช้มอเตอร์ สายพาน และเกียร์ทดเป็นต้นกำลังและส่งกำลัง มอเตอร์ที่ใช้เป็น 3 phase ขนาด 0.75 kW ส่วนเกียร์ทดที่ใช้เป็นผลิตภัณฑ์ของ KIMPO รุ่น KB 60 อัตราทด 1:40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสกรูลำเลียง 8 cm ด้านล่างของเตาจะเป็นในส่วนของชุดป้อนอากาศ โดยมีแผ่นกระจายลมวางอยู่ด้านล่าง มีช่องลมขนาด 2.5 mm จำนวน 107 รู ท่อป้อนอากาศเข้าใช้ท่อขนาด 5.08 cm ใช้โบลเวอร์ขนาด 0.75 kW ป้อนเชื้อเพลิงและใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ โดยเฉลี่ยอัตราการป้อนอากาศของพัดลมอยู่ในช่วง 3 ถึง 20 m³/h ด้านบนของเตาทำเป็นกรวยเพื่อใช้รวบรวมการกระจายตัวของแก๊สก่อนออกจากห้องเผาไหม้ ฐานของห้องเผาไหม้ใช้เหล็กกล่องขนาด 3 in เป็นเสายึดและวางอยู่บนชุดล้อ สามารถเคลื่อนย้ายได้ ท่อออกของแก๊สจะต่อจากห้องเผาไหม้เข้าสู่ไซโคลนโดยไซโคลนที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 10 cm ความยาว 60 cm ความสามารถในการดักฝุ่นและน้ำมันดินมีประสิทธิภาพที่ดี (เชิดชูเกียรติ ผาคำ, 2560) ด้านล่างไซโคลนมีฝาปิดเพื่อไว้ปล่อยฝุ่นหรือเศษน้ำมันดินหลังจากการใช้งานและถัดจากไซโคลนแล้วจะมีวาล์วขนาด 2 in ควบคุมการปิดและเปิดก่อนไปสู่หัวเตาแก๊สชีววมวล ด้านบนของไซโคลนออกแบบให้เป็นท่อทดสอบแก๊ส (Gas fired) ก่อนปล่อยเข้าสู่หัวเตาแก๊สชีววมวล

หลังจากที่แก๊สชีววมวลออกจากไซโคลนแล้ว แก๊สจะถูกนำมาระบายความร้อนก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งชุดระบายความร้อนจะใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำโดยท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมีพื้นที่รวม 0.37 m² น้ำที่ใช้ระบายความร้อนมีปริมาณ 90 L บริเวณด้านล่างของท่อแก๊สที่ผ่านน้ำจะมีฝาสำหรับเปิดเอาน้ำที่ควบแน่นออกได้ โดยอุณหภูมิที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างการผลิตแก๊สชีววมวลอยู่ที่ 35-50 °C ในส่วนของการลำเลียงแก๊สชีววมวลได้เลือกใช้โบลเวอร์ของ VENZ รุ่น SB-30 ขนาด 0.37 kW ด้านในของโบลเวอร์ได้ตัดแปลงปิดไม่ให้อากาศหรือแก๊สรั่วออกได้ โดยด้านเข้าของแก๊สใช้ท่อขนาด 5.08 cm และด้านออกของใช้ท่อขนาด 5.08 cm การทำงานของโบลเวอร์ถูกควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ขนาด 3.7 kW ปรับอัตราการไหลของแก๊สได้อยู่ในช่วงเฉลี่ย 7 ถึง 17 m³/h

สุดท้ายจะเป็นส่วนของหัวเตาแก๊สซึ่งจะต่อจากชุดลำเลียงแก๊ส หัวเตาแก๊สที่ใช้มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกตรงหัวแก๊สได้เจาะรูเพื่อนำแก๊สออกจำนวน 50 รู ขนาดรู 0.75 mm บริเวณด้านล่างของ

หัวเตาแก๊สมีวาล์วควบคุมอัตราการไหลแก๊สชีวมวล 1 ตัว ด้านบนหัวเตาเป็นชุดรองหม้อใช้สำหรับวางหม้อเพื่อทดสอบการต้ม น้ำัดแปลงมาจากหัวเตาแก๊สหุงต้มมีความหนาขนาด 5 mm ด้านล่างของชุดหัวเตาใช้แผ่นสังกะสีคลุมเพื่อป้องกันความร้อนและกระเบื้องของลมขณะการทดลอง โดยบริเวณทางออกอีกด้านของหัวเตาแก๊สจะมีท่อตรวจสอบแก๊สชีวมวลเพื่อเช็คความพร้อมของแก๊สก่อนการทดสอบการต้ม



ภาพที่ 36 แบบสามมิติระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดซ์เบด

4.3 การสร้างระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดซ์เบด

การสร้างระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดซ์เบด แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ประกอบด้วยเครื่องผลิตแก๊สชีวมวล อุปกรณ์ทำความสะอาดและลดอุณหภูมิแก๊สชีวมวล และหัวเตาเผาแก๊ส รายละเอียดการสร้างมีดังต่อไปนี้

เครื่องผลิตแก๊สชีวมวล

ห้องเผาไหม้ของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดซ์เบดใช้ท่อเหล็กซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 25.4 cm ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกับการออกแบบ ความยาว 100 cm ป้อนอากาศจากด้านล่างของเตาด้วยพัดลมเป่าอากาศผ่านฝาครอบส่วนล่างห้องเผาไหม้โดยมีแผ่นกระจายลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23.7 cm ซึ่งเป็นตะแกรงละเอียด โดยใช้พัดลมเป่าอากาศ ของ VENZ รุ่น SB-30 มอเตอร์ 1/2 HP 3 phase ขนาดท่อลมออก 5.08 cm การควบคุมความเร็วลมใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความถี่กระแสไฟฟ้าซึ่งเพื่อปรับอัตราการป้อนอากาศ ด้านล่างของห้องเผาไหม้ออกแบบให้มีชุด

กำจัดซีเมนต์ ด้านบนออกแบบให้มีท่อลำเลียงแก๊สชีววมวล ขนาด 5.08 cm ผ่านฝาครอบส่วนบนห้องเผาไหม้ ดังแสดงในภาพที่ 37

อุปกรณ์ป้อนชีววมวล

ด้านข้างของเตาออกแบบให้มีช่องป้อนเชื้อเพลิงโดยการป้อนชีววมวลใช้กระพ้อและสายพานลำเลียงนำชีววมวลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของระบบผลิตแก๊สชีววมวลซึ่งมีขนาดมอเตอร์ 1 hp เป็นผลิตภัณฑ์ของ Mitsubishi รุ่น SF-JR สายพานเป็นผลิตภัณฑ์ของ Mitsubishi เบอร์ 44 และเกียร์ทดเป็นผลิตภัณฑ์ของ KIMPO รุ่น KB 60 อัตราทด 1:40 ควบคุมความเร็วรอบการป้อนเชื้อเพลิงใช้อินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ Schneider Electric รุ่น Ativar 312 ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 37 ห้องเผาไหม้ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดซ์เบด



ภาพที่ 38 ชุดป้อนชีววมวล

อุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สและลดอุณหภูมิ

อุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สใช้ในการทำความสะอาดแก๊สและดักจับน้ำมันดิน ออกแบบให้เป็นไซโคลนซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอกและมีส่วนปลายเป็นรูปโคลน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm ความยาวไซโคลน 60 cm ความหนาของแผ่นเหล็ก 2 mm สามารถเปิดทำความสะอาดไซโคลนได้โดยเกลียวด้านล่างไซโคลน ดังแสดงในภาพที่ 39



ภาพที่ 39 อุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊ส

อุปกรณ์ลดอุณหภูมิแก๊สชีวมวล

ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของแก๊สชีวมวล ประกอบด้วยถังบรรจุน้ำหล่อเย็นสำหรับลดอุณหภูมิของแก๊สชีวมวล ออกแบบเป็นถังโลหะรูปทรงสี่เหลี่ยม ความหนา 3 mm กว้าง 30 cm ยาว 63 cm สูง 61 cm โดยภายในถังโลหะมีท่อวนไปมา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.08 cm มีความยาวของท่อรวมประมาณ 2.2 m บริเวณด้านล่างของท่อมียาปิดเพื่อสำหรับการทำความสะอาดฝุ่นหรือน้ำมันดิบที่เกิดขึ้นหลังจากการใช้งาน ดังแสดงในภาพที่ 40



ภาพที่ 40 อุปกรณ์ลดอุณหภูมิแก๊สชีวมวล

หัวเตาเผาแก๊ส

หัวเตาเผาแก๊สที่ใช้เป็นการดัดแปลงผสมผสานระหว่างหัวเตาแก๊สชีวมวลกับหัวเตาแก๊สหุงต้ม โดยจุดที่แก๊สออกมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 cm และมีความสูง 8 cm ส่วนชุดวางหม้อต้มน้ำเป็นการดัดแปลงมาจากเตาแก๊สหุงต้มซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 cm และภายนอก 35.5 cm สามารถใช้ได้กับหม้อต้มขนาด 32 in ถึง 36 in ดังแสดงในภาพที่ 41



ภาพที่ 41 หัวเตาเผาแก๊ส

บทที่ 5

ผลและอภิปรายผลการทดลอง

5.1 พฤติกรรมการลอยตัวและขนาดของชีวมวล

ในการศึกษาการผลิตแก๊สชีวมวลของระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไบโอดีมีความจำเป็นต้องศึกษาลักษณะการลอยตัวของชีวมวล ซึ่งผลการลอยตัวที่ดีของชีวมวลจะช่วยให้การกระจายความร้อนในห้องเผาไหม้ให้เป็นไปอย่างดีและช่วยทำให้เกิดความต่อเนื่องในการผลิตแก๊สชีวมวล (สุนิรัตน์, 2558) การควบคุมอัตราการป้อนอากาศและการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สมีผลต่อการลอยตัวของชีวมวล ซึ่งผลการศึกษาที่มีรายละเอียดดังแสดงในหัวข้อที่ 5.1.1-5.1.3

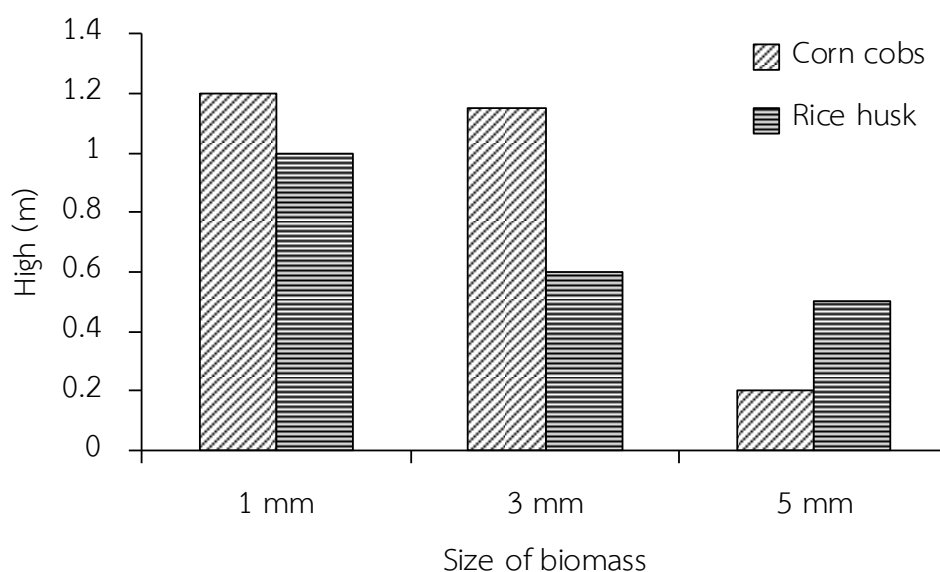
5.1.1 ผลและขนาดของชีวมวลต่อการลอยตัวในห้องเผาไหม้

ภาพที่ 43 เป็นการวิเคราะห์การลอยตัวของซังข้าวโพดที่ใช้ทดสอบกับแกลบ ในการศึกษาพบว่าการใช้ซังข้าวโพดให้การลอยตัวสูงกว่าการใช้แกลบ ในกรณีที่ขนาดชีวมวลประมาณ 1 mm และ 3 mm ในขณะที่การใช้ซังข้าวโพดที่มีขนาดประมาณ 5 mm มีการลอยตัวที่ต่ำกว่าการใช้แกลบ สาเหตุที่ซังข้าวโพดมีการลอยตัวสูงกว่าแกลบ เนื่องจากลักษณะและรูปร่างพื้นที่ผิวของซังข้าวโพดมีค่าสูงกว่าแกลบ (กฤษกร และคณะ, 2554) ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ขนาดของชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมการลอยตัว

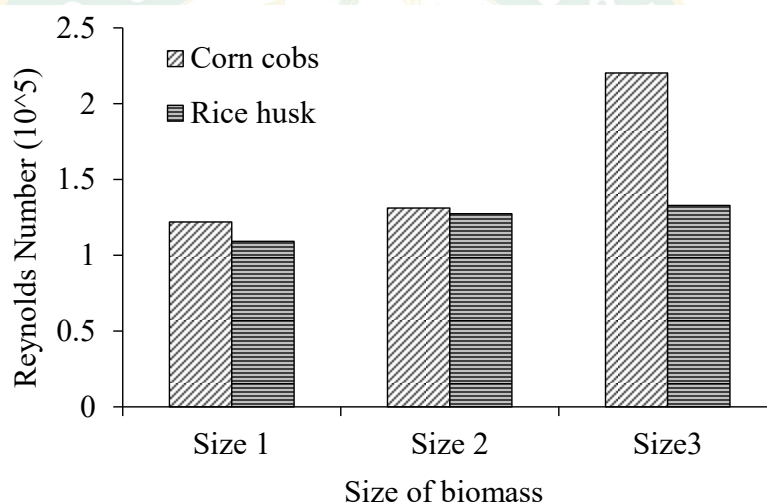
เมื่อมีลมมาปะทะจึงทำให้เกิดแรงยกหรือการลอยตัวได้ดีกว่าการใช้แกลบในการทดลอง ขณะเดียวกันเมื่อเปลี่ยนขนาดของชีวมวลทั้ง 2 ชนิดให้มีรูปร่างที่ใหญ่ขึ้น ขนาดพื้นที่ผิวของแกลบเพิ่มสูงขึ้นประกอบกับความหนาแน่นที่ต่ำอยู่แล้วโดยเฉลี่ย 96-106 kg/m³ (Zhang et al., 2012) ในขณะที่ซังข้าวโพดมีความหนาแน่น 282 kg/m³ (Kumar et al., 2013) จึงทำให้แกลบสามารถลอยตัวได้สูงกว่า การใช้ซังข้าวโพดที่มีขนาดต่ำกว่า 1 mm และ 3 mm สามารถลอยตัวสูงกว่าแกลบ โดยเฉลี่ย 17-47% ความแตกต่างของขนาดเมื่อใช้ซังข้าวโพดแตกต่างกันค่อนข้างต่ำแต่ในส่วนของแกลบมีความแตกต่างกันค่อนข้างสูงถึง 40% ส่วนของการใช้ชีวมวลที่มีขนาดต่ำกว่า 5 mm ให้การลอยตัวแตกต่างกับขนาดชีวมวลต่ำกว่า 1 mm ค่อนข้างสูงผลจากการทดสอบและคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปออกแบบเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบด สรุปได้ว่าขนาดชีวมวลที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงขนาด 3 mm เนื่องจากให้การลอยตัวที่ค่อนข้างสูง มีความสม่ำเสมอและเสถียรมากกว่า การใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่เกินไปส่งผลให้การเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ช้าหรือไม่เกิดการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ (Couto et al., 2013) ในขณะที่การใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่รวดเร็วและทำให้การเผาไหม้ใกล้เข้าสู่การเผาไหม้สมบูรณ์ (Couto et al., 2013)



ภาพที่ 43 ผลกระทบของชนิดชีวมวลที่มีต่อการลอยตัวในห้องเผาไหม้

5.1.2 ผลของเลขเรย์โนลด์ต่อการเริ่มลอยตัวชีวมวล

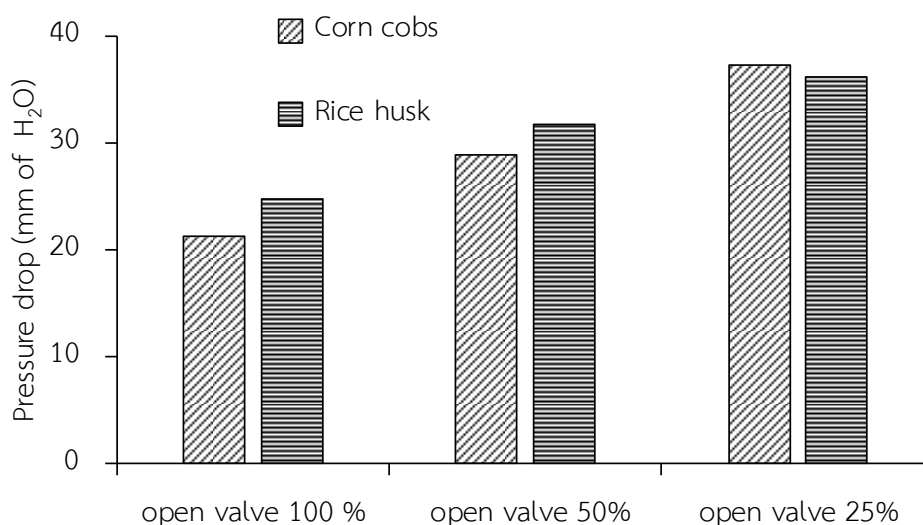
ตัวเลขเรย์โนลด์เป็นตัวเลขไร้หน่วยที่สามารถนำไปใช้งานได้ถึงแม้ขนาด ความเร็วอากาศจะถูกเปลี่ยนไป ผลต่อการลอยตัวของชีวมวลทั้ง 3 ขนาดที่ได้ทำการเปรียบเทียบโดยการทดสอบเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลสูงสุดโดยศึกษาถึงความเร็วลมต่ำสุดในค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ทำให้ชีวมวลแต่ละขนาดเกิดการลอยตัวพบว่าการใช้เกลบขนาด ต่ำกว่า 1-5 mm ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าใกล้เคียงกัน คิดเป็นค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.09×10^5 - 1.33×10^5 คิดเป็นความเร็วลมที่ป้อนมีค่าเฉลี่ย 6-7.3 m/s และมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ซังข้าวโพดขนาดต่ำกว่า 1-3 mm ดังแสดงในภาพที่ 44 อย่างไรก็ตามในส่วน of ซังข้าวโพดที่มีขนาดต่ำกว่า 5 mm ยังคงต้องใช้ปริมาณลมป้อนในอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับขนาดของชีวมวลที่มีขนาดต่ำกว่า 3 mm เนื่องจากพื้นที่ผิวของชีวมวลสูง ทำให้ต้องใช้ความเร็วลมที่สูงในการทำให้ซังข้าวโพดเกิดการลอยตัว



ภาพที่ 44 ผลการศึกษาเลขเรย์โนลด์ที่ส่งผลต่อการเริ่มลอยตัวชีวมวล

5.1.3 ผลการควบคุมอัตราการไหลต่อความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้

การควบคุมอัตราการไหลอากาศส่งผลต่อความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้ การเปิดวาล์วควบคุมที่ 25 % และ 50% ส่งผลให้ความดันในห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 45 เนื่องจากอากาศไม่สามารถไหลออกได้อย่างสะดวก บางส่วนมีการไหลย้อนกลับซึ่งจะส่งผลให้เกิดความดันและชีวมวลไม่สามารถไหลขึ้นได้สูงสุด การปรับวาล์วที่ 100 % ให้ความดันภายในห้องเผาไหม้ลดต่ำลง และลักษณะการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ไหลได้สะดวกโดยความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง 21-25 mmH₂O การปรับวาล์วที่ 50 % มีความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง 28-32 mmH₂O และการปรับวาล์วที่ 25 % มีความดันที่เกิดขึ้นในห้องเผาไหม้อยู่ในช่วง 36-38 mmH₂O



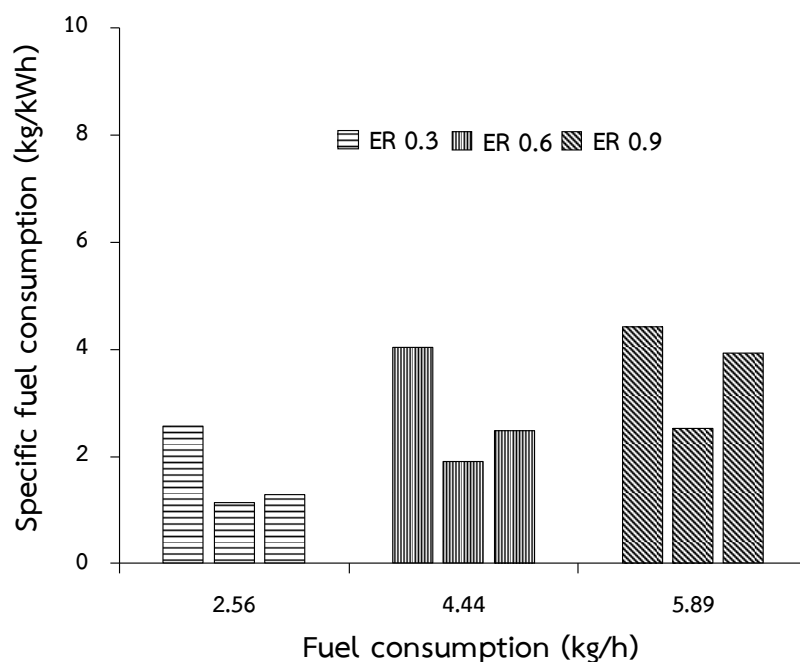
ภาพที่ 45 การเปรียบเทียบความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้

สรุปผลการศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวลและขนาดของชีวมวลสรุปได้ว่าขนาดของชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบมีขนาดเฉลี่ย 3 mm การปรับวาล์วควบคุมใช้การเปิดวาล์วที่ 100% เนื่องจากต้องการให้ความดันตกคร่อมภายในห้องเผาไหม้ต่ำสุด

5.2 การประเมินสมรรถนะระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไธด์เบด

5.2.1 ผลกระทบอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

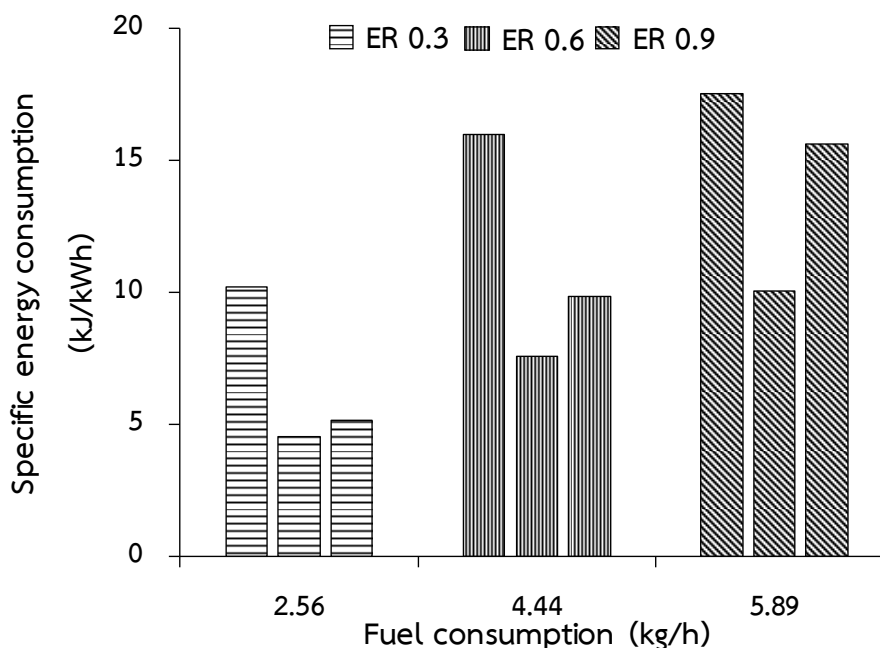
ภาพที่ 46 แสดงผลกระทบของการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงมีต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะอยู่ในช่วงระหว่าง 1-3 kg/kWh อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะอยู่ในช่วง 2-4 kg/kWh และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะอยู่ในช่วง 3-5 kg/kWh ตามลำดับ ซึ่งอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด ในขณะที่เมื่อกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะสูงสุด สาเหตุเกิดจากการเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงส่งผลให้การลุกไหม้เชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น (Mahawan et al., 2016)



ภาพที่ 46 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

5.2.2 ผลกระทบอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

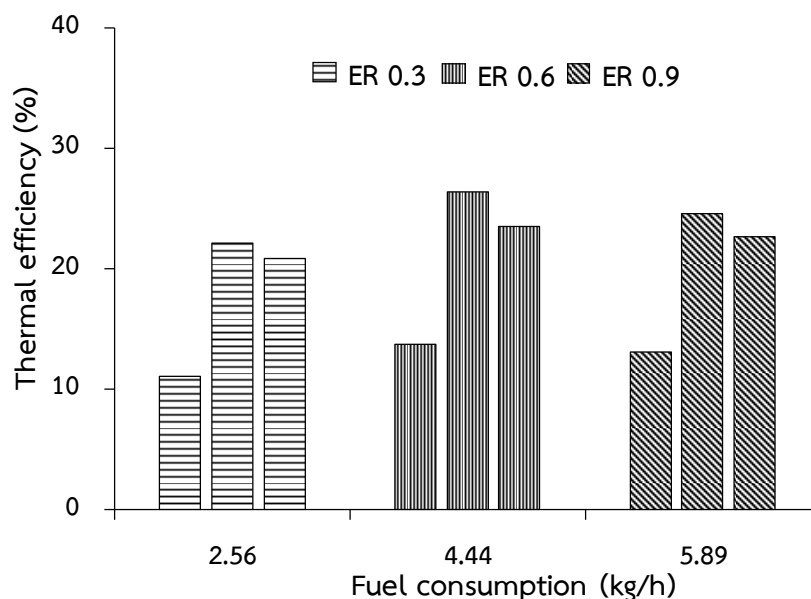
ภาพที่ 47 แสดงผลกระทบของการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอดีซ์เบด พบว่าการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแปรผันตรงกับค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ โดยอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 4-10 kJ/kWh อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 7-15 kJ/kWh และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ในช่วง 10-17 kJ/kWh ซึ่งการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด ในขณะที่การกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุด การเพิ่มของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการผลิตแก๊สชีวมวลส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบและต้นทุนการผลิตความร้อน โดยเฉลี่ยทั่วไปการป้อนอัตราการป้อนซึ่งช้าวโปกดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.5-6 kg/h อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจะอยู่ในช่วง 4-17 kJ/kWh (ปัญญาพร, 2560)



ภาพที่ 47 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

5.2.3 ผลกระทบอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพความร้อนระบบผลิตแก๊สชีววมวล

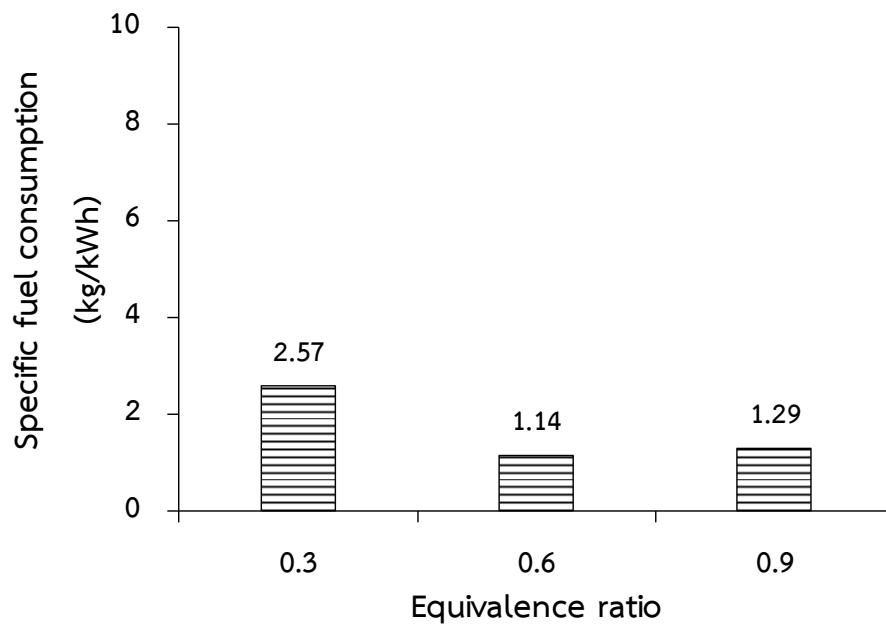
ภาพที่ 48 แสดงผลกระทบของการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบด พบว่าการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h ส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนอยู่ในช่วงระหว่าง 11-22% อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h ส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนอยู่ในช่วง 13-26% และอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h ส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนอยู่ในช่วง 13-24% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h จะทำให้มีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด รองลงมาคือ 5.89 kg/h และ 2.56 kg/h ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพนี้เป็นการวิเคราะห์โดยการต้มน้ำ ซึ่งการเผาไหม้ของหัวเผาแก๊สมีการสูญเสียความร้อนสูงดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามถ้าวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแก๊สชีววมวลจากองค์ประกอบและค่าความร้อนของแก๊ส (cold gas efficiency) ประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สจะอยู่ในช่วงประมาณ 50-70% (นิกรานและคณะ, 2554)



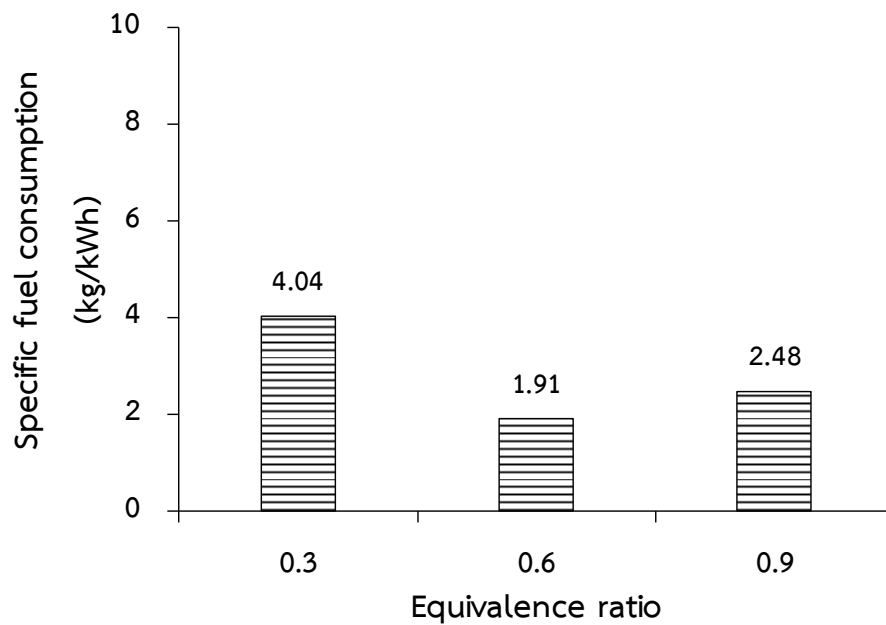
ภาพที่ 48 อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่มีต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีววมวล

5.2.4 ผลกระทบอัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

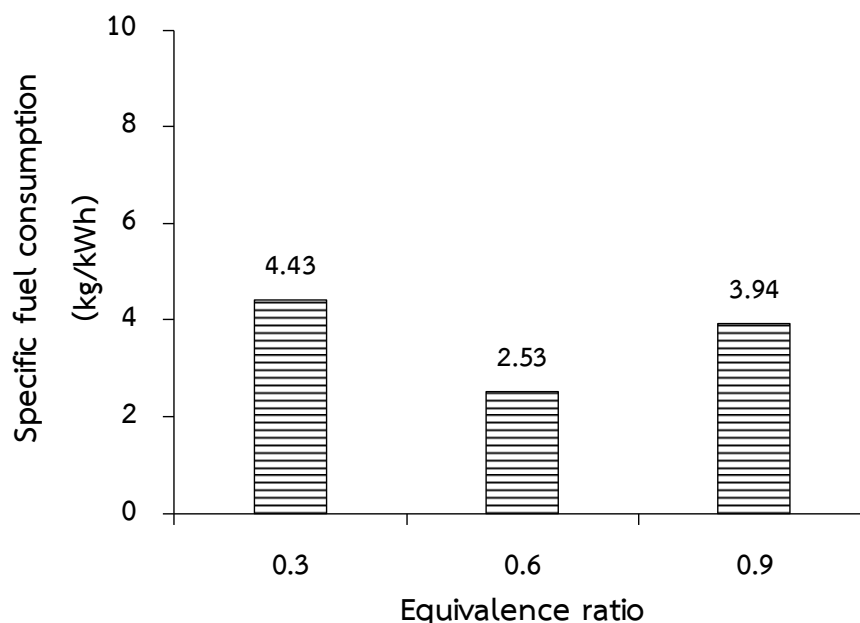
การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำสุด ซึ่งการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำหรือสูงกว่า 0.6 ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเพิ่มขึ้น การปรับอัตราส่วนสมมูลที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.56 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเฉลี่ย 2.57 1.14 และ 1.29 kg/kWh เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.3 0.6 และ 0.9 ตามลำดับ ขณะเดียวกันเมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4.44 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะอยู่ที่ 4.04 1.91 และ 2.48 kg/kWh สุดท้ายเมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะอยู่ที่ 4.43 2.53 และ 3.94 kg/kWh ภาพที่ 49 50 และ 51 แสดงผลการปรับอัตราส่วนสมมูลที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.56 4.44 และ 5.89 kg/h โดยพบว่าการปรับอัตราส่วนสมมูลจะส่งผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง (McKendry, 2002) ทำให้ส่งผลต่อพลังงานความร้อนและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะโดยตรง



ภาพที่ 49 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ 2.56 kg/h



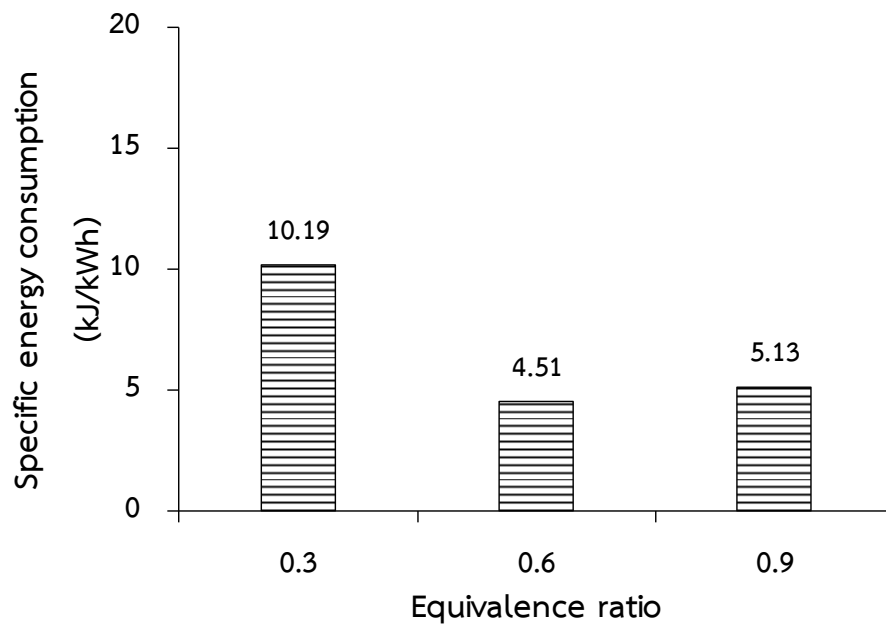
ภาพที่ 50 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ 4.44 kg/h



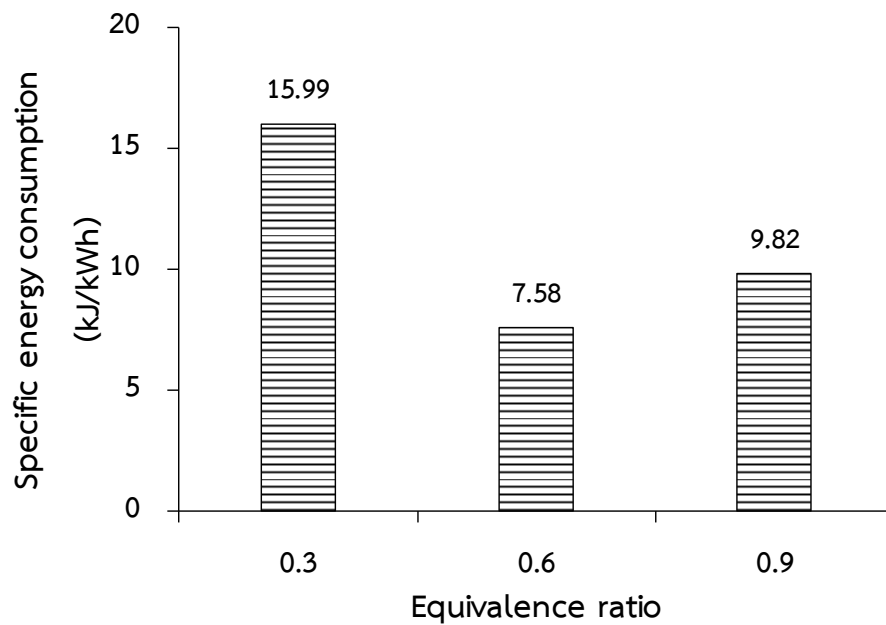
ภาพที่ 51 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะที่ 5.89 kg/h

5.2.5 ผลกระทบของการกำหนดอัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

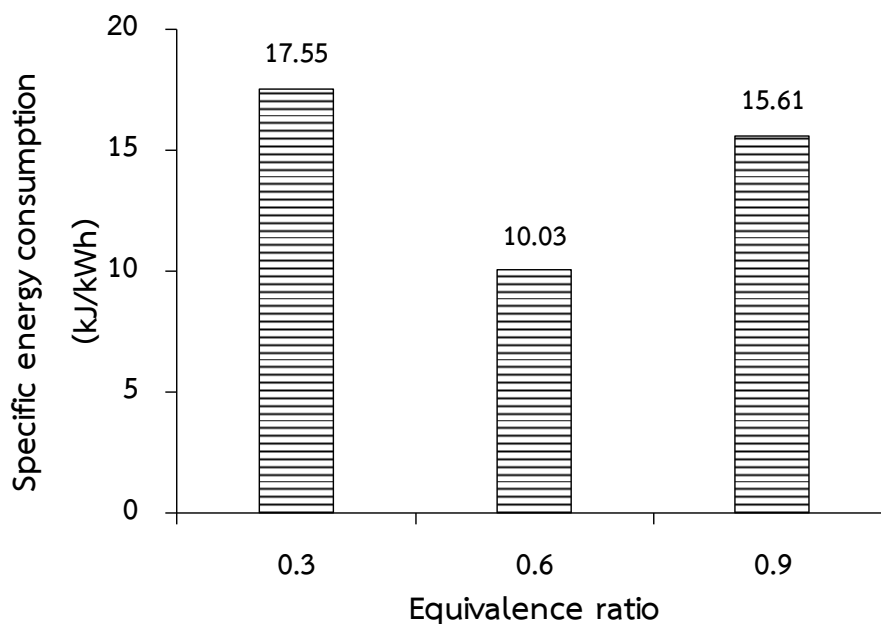
การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด ซึ่งการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำหรือสูงกว่า 0.6 ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น การปรับอัตราส่วนสมมูลที่เหมาะสมจะส่งผลให้เชื้อเพลิงสามารถปลดปล่อยพลังงานได้สูงสุด และนำไปสู่ความสามารถในการผลิตพลังงานในการต้มน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน (Molino et al., 2016) เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลในกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 4.51 5.13 และ 10.19 kJ/kWh ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 52 เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลในกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 7.58 9.82 และ 15.99 kJ/kWh ดังแสดงในภาพที่ 53 และเมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลในกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะอยู่ที่ 10.03 15.61 และ 17.55 kJ/kWh ดังแสดงในภาพที่ 54



ภาพที่ 52 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 2.56 kg/h



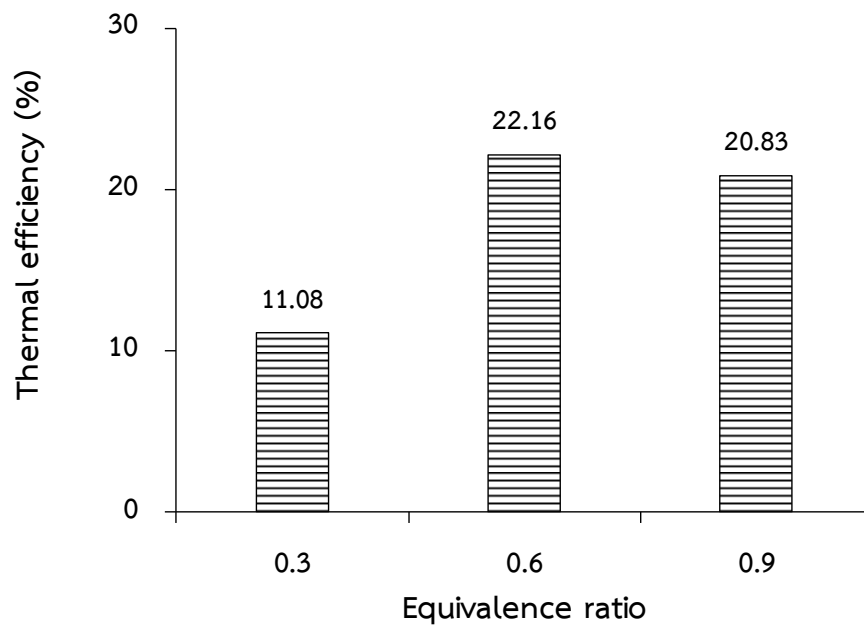
ภาพที่ 53 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 4.44 kg/h



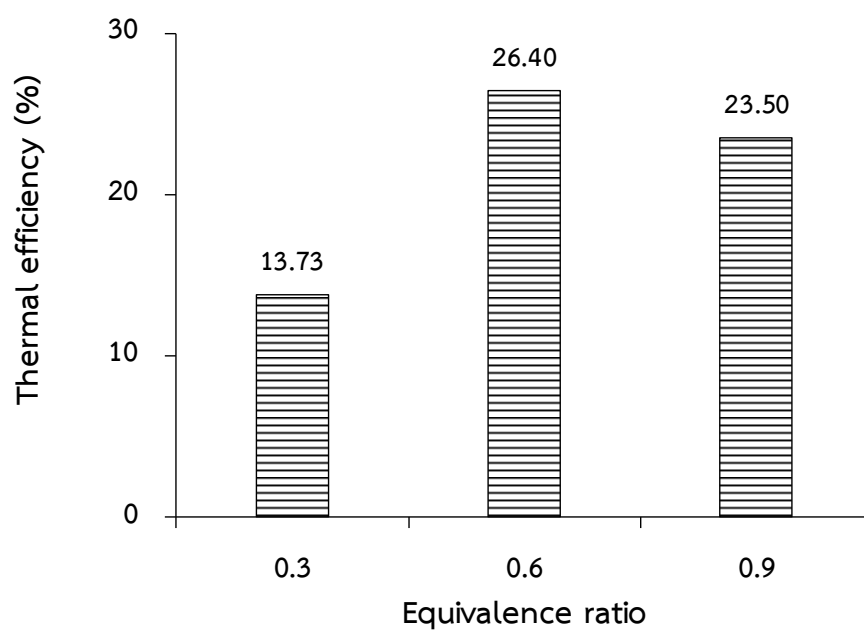
ภาพที่ 54 อัตราส่วนสมมูลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ 5.89 kg/h

5.2.6 อัตราส่วนสมมูลที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีวมวล

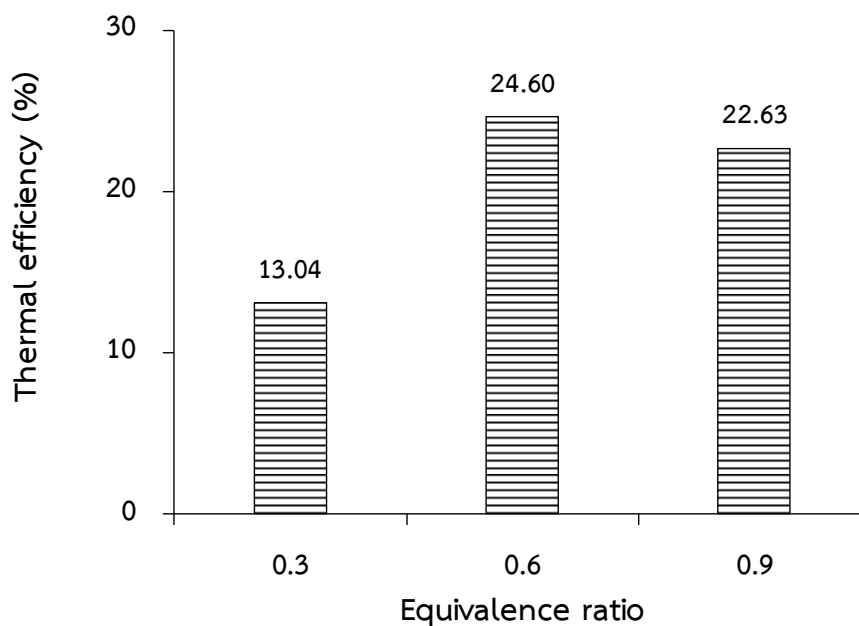
การวิเคราะห์ผลกระทบของการกำหนดอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวมวล พบว่าการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดรองลงมาคือ 0.9 และ 0.3 ตามลำดับ โดยเมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลในกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h ส่งผลให้ประสิทธิภาพอยู่ที่ 22.16% ถัดมาอยู่ที่ 20.83% และ 11.08% ดังแสดงในภาพที่ 55 กรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h ส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดของระบบซึ่งอยู่ที่ 26.40% ถัดมาคือ 23.50% และ 13.73% ดังแสดงในภาพที่ 56 และในกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h ส่งผลให้ประสิทธิภาพอยู่ที่ 24.6% ถัดมาประสิทธิภาพอยู่ที่ 22.63% และ 13.04% ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 57 การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำเกิดจากปริมาณอากาศในห้องเผาไหม้น้อยซึ่งทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ภายในห้องเผาไหม้ค่อนข้างต่ำจึงส่งผลให้ค่าความร้อนและประสิทธิภาพความร้อนต่ำลง (Molino et al., 2016) ผลจากการเปรียบเทียบของภาพที่ 55 56 และ 57 การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4.44 kg/h ส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนเกิดขึ้นสูงสุด



ภาพที่ 55 อัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวมวลที่ 2.56 kg/h



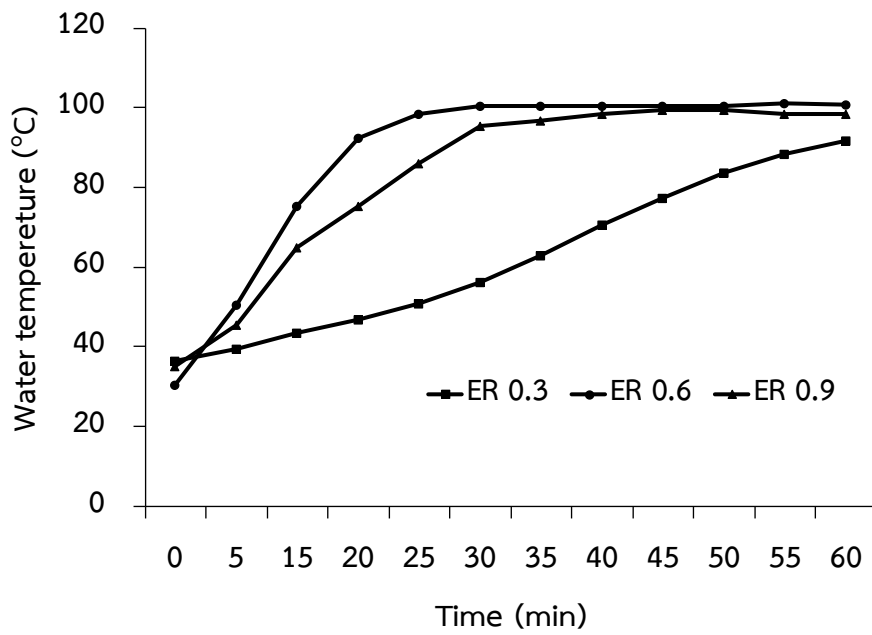
ภาพที่ 56 อัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีวมวลที่ 4.44 kg/h



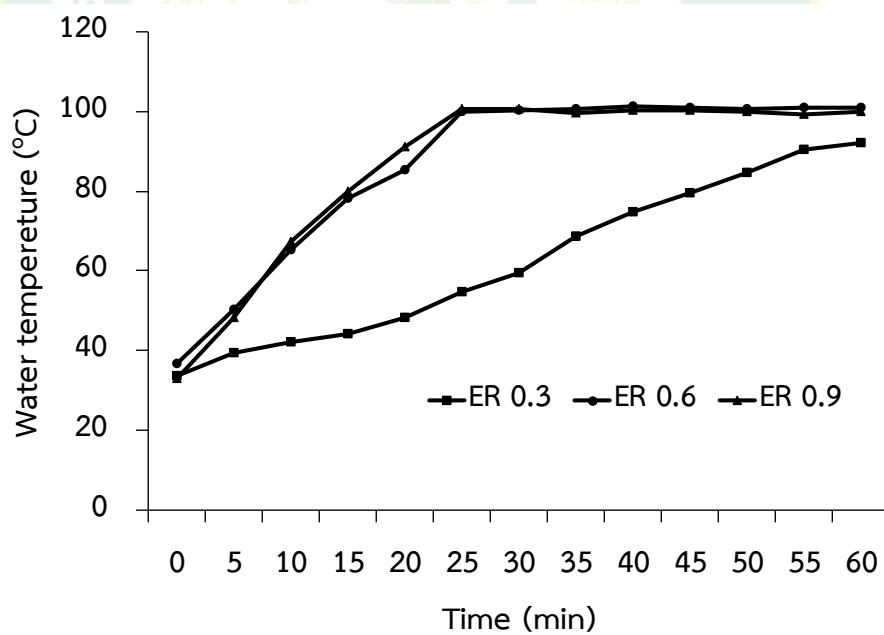
ภาพที่ 57 อัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีววมวลที่ 5.89 kg/h

5.2.7 การวิเคราะห์พลังงานความร้อนและอุณหภูมิการต้มน้ำระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดซ์เบด

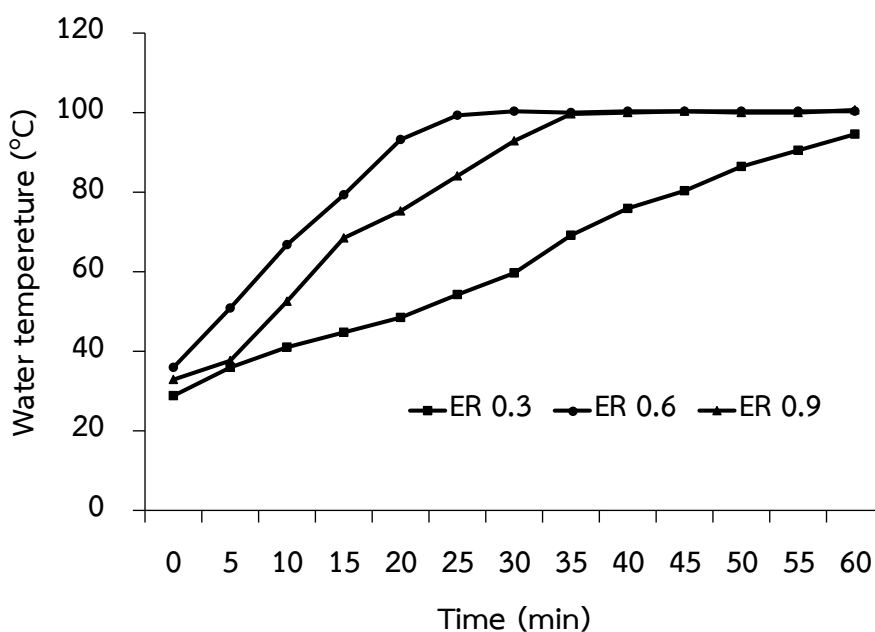
ภาพที่ 58 59 และ 60 แสดงการพิจารณาอุณหภูมิการต้มน้ำในขณะที่ทำการทดสอบระบบผลิตแก๊สชีววมวล เมื่อกำหนดอัตราส่วนสมมูลอยู่ที่ 0.3 0.6 และ 0.9 และกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ที่ 2.56 4.44 และ 5.89 kg/h ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำทั้ง 3 ภาพ พบว่าการใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h ให้อุณหภูมิการต้มน้ำเฉลี่ยสูงสุด โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในช่วง 97-98 °C ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 ในขณะที่อัตราส่วนสมมูล 0.9 ต่ำกว่าเล็กน้อย การใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h ให้อุณหภูมิการต้มน้ำเฉลี่ย 94-96 °C ในขณะที่การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h ให้อุณหภูมิเฉลี่ย 96-97 °C การใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h ให้อุณหภูมิการต้มน้ำสูงสุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับการออกแบบไว้ที่ 3.96 หรือ 4 kg/h ในด้านการปรับอัตราส่วนสมมูลทั้ง 3 ค่า พบว่าการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ให้อุณหภูมิการต้มน้ำสูงสุดของการป้อนเชื้อเพลิงทั้ง 3 ค่า การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.3 ให้อุณหภูมิการต้มน้ำต่ำมากซึ่งจะใช้เวลาเดือดค่อนข้างนานโดยเฉลี่ยอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นเดือดที่เวลา 50 min ขึ้นไป การเดือดที่ช้าของน้ำยังเกิดจากแก๊สมีค่าความร้อนที่ต่ำส่งผลให้การส่งถ่ายความร้อนให้กับน้ำต่ำ (Ramirez et al., 2007) ผลการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำส่งผลทำให้ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้มีอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปและส่งผลต่อปฏิบัติการการผลิตแก๊สของระบบ



ภาพที่ 58 อุณหภูมิการต้มน้ำกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 2.56 kg/h



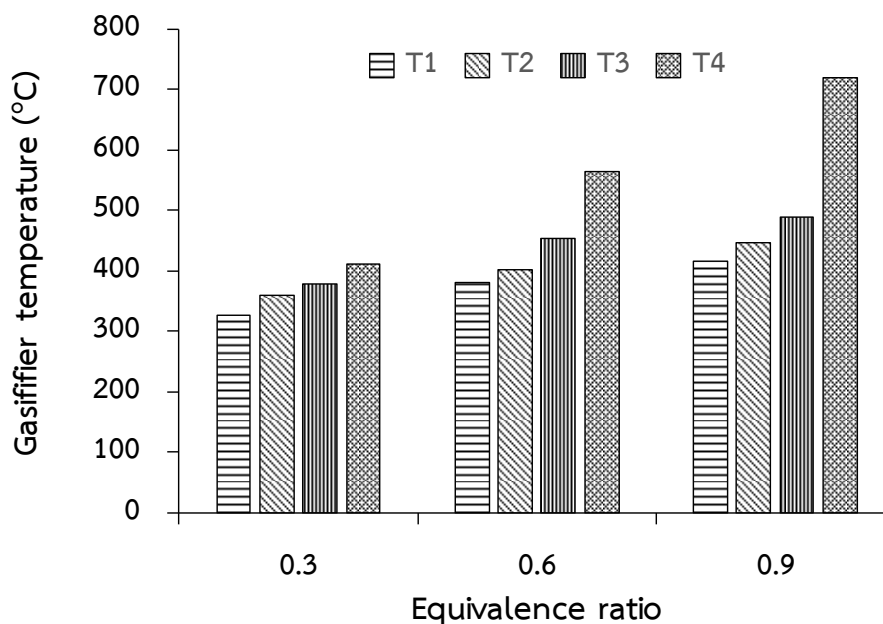
ภาพที่ 59 อุณหภูมิการต้มน้ำกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h



ภาพที่ 60 อุณหภูมิการต้มน้ำกรณีปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 kg/h

5.2.8 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในเฉลี่ยระบบแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดซ์เบด

ภาพที่ 61 แสดงอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของระบบแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดซ์เบดโดย T4 หมายถึงอุณหภูมิใกล้บริเวณชั้นเบด โดยห่างจากชั้นเบด 17 cm T3 ห่างจากชั้นเบด 28 cm T2 ห่างจากชั้นเบด 54 cm และ T1 ห่างจากชั้นเบด 86 cm ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิพบว่าอุณหภูมิของ T4 อุณหภูมิใกล้เบดมากที่สุดให้อุณหภูมิสูงสุด ถัดมาเป็นอุณหภูมิซึ่งอยู่ใกล้ชั้นเบดถัดไป การปรับอัตราส่วนสมมูลที่สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้โดยรวมเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณอากาศมากเพียงพอและเข้าใกล้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ตามทฤษฎี (McKendry, 2002) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของนักวิจัยที่ผ่านมา (Wongsiriamnuay et al., 2013) พบว่าอุณหภูมิของห้องเผาไหม้มีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันโดยอยู่ในช่วง 400-600 °C ซึ่งถ้าต้องการให้อุณหภูมิห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มฉนวนที่หนามากขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นได้เช่นกัน (Muller, 2009)



ภาพที่ 61 การวิเคราะห์อุณหภูมิเฉลี่ยระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด

5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สชีววมวลจากระบบผลิตแบบฟลูอิดไคซ์เบด

องค์ประกอบแก๊สของแก๊สชีววมวลมีความสำคัญต่อค่าความร้อนของแก๊สที่จะนำไปใช้งาน (นคร, 2558) สำหรับระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยองค์ประกอบแก๊สจะมีผลต่อปริมาณความร้อนที่ผลิตได้ ซึ่งองค์ประกอบแก๊สที่วัดได้จากการทดสอบระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 2.56-5.89 kg/h และการปรับอัตราสมมูล 0.3-0.9 พบว่าการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราส่วนสมมูลส่งผลต่อองค์ประกอบแก๊สชีววมวลที่ผลิตได้โดยการปรับอัตราส่วนสมมูลที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.56-5.89 kg/h ให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) อยู่ในช่วง 9.21-10.75% ในขณะที่การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 อัตราการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ อยู่ในช่วง 17.2-19.1% การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำเกินไปจะส่งผลให้อุณหภูมิการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ต่ำ ปฏิกริยาการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะลดลง (Wongsiriamnuay et al., 2013) ในส่วนของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำจะให้ค่าไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 1.98-2.42% ในขณะที่การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.9 ให้แก๊สไฮโดรเจน 5.06-7.12% การปรับอัตราส่วนสมมูลที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4.44 kg/h ให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสูงสุด นั่นคือ 8.38% ในส่วนของแก๊สมีเทน (CH_4) พบว่าการปรับอัตราส่วนสมมูลจะส่งผลต่อการเกิดแก๊สมีเทนในแก๊สชีววมวล โดยการใช้อัตราส่วนสมมูลที่มีค่าสูงเกินไปจะส่งผลให้ปริมาณแก๊สมีเทนในองค์ประกอบแก๊สลดต่ำลง ผลจากการวิเคราะห์ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวล การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h และอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ให้ค่าความร้อนแก๊สสูงสุด 3899.23 kJ/Nm³

ในขณะที่การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.9 ค่าความร้อนลดลงและเหลือเพียง 3385.75 kJ/Nm³ การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 ภายใต้อัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 เมื่อเทียบกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.56 และ 5.89 kg/h พบว่ามีค่าความร้อนสูงกว่า 11.56% และ 8.52% ตามลำดับ

ตารางที่ 11 องค์ประกอบแก๊สของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด

FC (kg/h)	ER	องค์ประกอบแก๊ส (%Vol)						Total	HV _{gas} (kJ/Nm ³)
		CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂		
2.56	0.3	9.21	1.98	0.69	16.32	9.3	62.5	100	1548.24
2.56	0.6	17.2	6.25	2.0	12.35	7.1	55.1	100	3448.66
2.56	0.9	16.23	5.06	1.6	12.71	7.6	56.8	100	3051.73
4.44	0.3	9.81	2.07	0.8	16.2	9.02	62.1	100	1668.23
4.44	0.6	19.1	8.38	1.95	11	5.5	54.07	100	3899.23
4.44	0.9	16.69	7.12	1.71	12	6.3	56.18	100	3385.75
5.89	0.3	10.75	2.42	0.89	15.44	9.1	61.4	100	1850.66
5.89	0.6	17.72	7.06	1.9	11.52	7.5	54.3	100	3567.09
5.89	0.9	16.49	6.33	1.64	12.4	6.74	56.4	100	3244.8

5.4 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด

ตารางที่ 12 แสดงประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด วิเคราะห์ได้จากพลังงานความร้อนที่ได้จากการผลิตแก๊สเทียบกับพลังงานจากซังข้าวโพดที่ป้อนเข้า ผลการศึกษาพบว่าที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4.44 kg/h ประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีววมวลสูงสุดซึ่งอยู่ในช่วง 33.59-77.29% การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 5.89 และ 2.56 kg/h ให้ประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สสูงถัดมา การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ให้ประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.3 และ 0.9 การปรับอัตราส่วนสมมูลจะมีผลต่อความร้อนของแก๊สที่ผลิตได้ซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตแก๊สชีววมวล (McKendry, 2002) อย่างไรก็ตามผลจากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นจะพบว่าระบบผลิตแก๊สชีววมวล

แบบฟลูอิดไต์เบดจะมีประสิทธิภาพการผลิตแก๊สอยู่ในช่วง 50-80% (Wongsiriamnuay et al., 2013)

ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของระบบ (Cold gas efficiency)

FC (kg/h)	ER	Cold gas efficiency (%)
2.56	0.3	33.29
2.56	0.6	71.06
2.56	0.9	66.23
4.44	0.3	33.59
4.44	0.6	77.29
4.44	0.9	67.38
5.89	0.3	39.11
5.89	0.6	74.75
5.89	0.9	68.19

5.5 การตั้งสมมติฐานและการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อน

5.5.1 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนของระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด

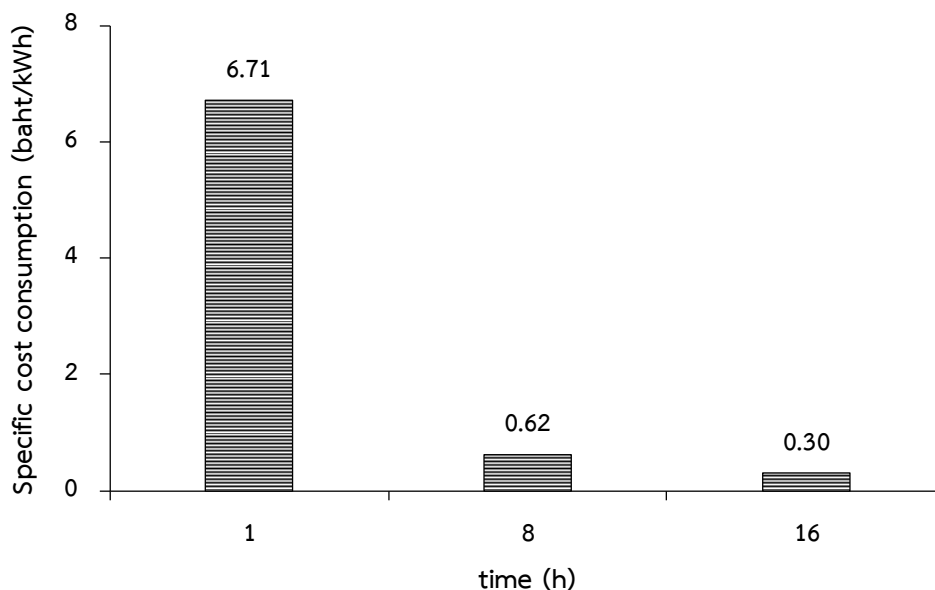
ในการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนใช้ชีวมวลซึ่งข้าวโพดที่มีคุณสมบัติความแน่น 282 kg/m³ และมีค่าความชื้นไม่เกิน 10% รายละเอียดเงื่อนไขของการวิเคราะห์ต้นทุนแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 เงื่อนไขการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนของระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด

เงื่อนไข	รายละเอียด
- ค่าต้นทุนซึ่งข้าวโพด	1 baht/kg
- ค่าแก๊สหุงต้มเฉลี่ยต่อถัง	363 baht/unit
- ต้นทุนแก๊สต่อกิโลกรัม	24.2 baht/kg
- ค่าไฟฟ้า	4.5 baht
- ระยะเวลาการใช้งานระบบ	1, 8, 16 h/day
- อัตราการป้อนเชื้อเพลิง	4.44 kg/h
- อัตราส่วนสมมูล	0.6
- ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวมวล	77.29%
- ประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊ส	24.60%

5.5.2 การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการใช้งานระบบ

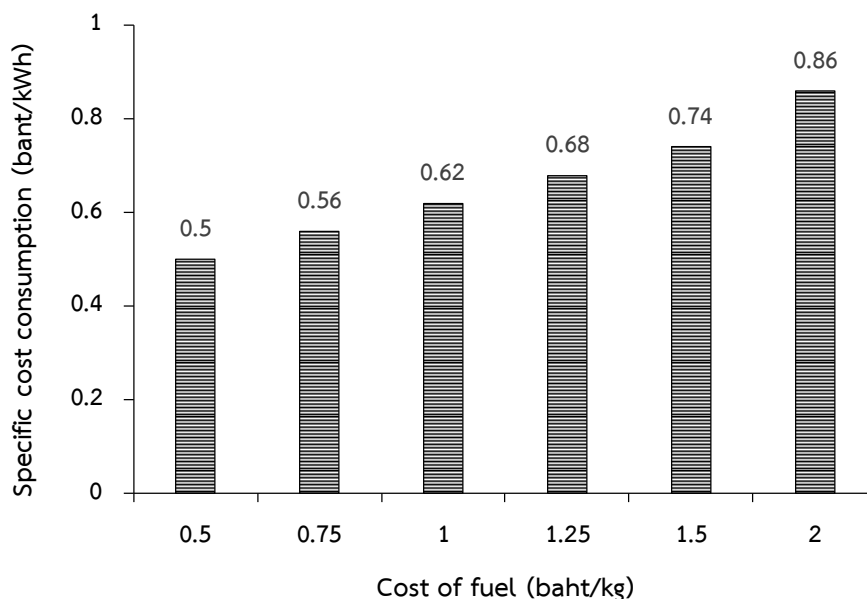
ภาพที่ 62 แสดงต้นทุนการผลิตความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดในสภาวะการทำงานเหมาะสมที่สุด โดยเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ 3 ค่า คือ 1 h 8 h และ 16 h ผลการวิเคราะห์พบว่าต้นทุนการผลิตทางพลังงานความร้อนสูงสุดนั้นคือ 6.71 baht/kWh และเมื่อทำการกำหนดระยะเวลาการใช้งานระบบที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ต้นทุนการผลิตทางพลังงานความร้อนลดต่ำลง เนื่องจากมีต้นทุนค่าใช้จ่ายรวมซึ่งประกอบด้วยค่าเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ต่อครั้ง ค่าแก๊สหุงต้มที่ใช้งานต่อครั้งและค่าไฟฟ้าที่ลดลงและขณะเดียวกันในด้านอัตราการผลิตมีอัตราการผลิตความร้อนที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 1 โดยเมื่อกำหนดระยะเวลาที่ใช้งานระบบที่ 8 h ให้ต้นทุนการผลิตทางพลังงานความร้อน 0.62 baht/kWh และเมื่อกำหนดระยะเวลาที่ใช้งานระบบที่ 16 h ให้ต้นทุนการผลิตทางพลังงานความร้อน 0.30 baht/kWh ตามลำดับ



ภาพที่ 62 การวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการใช้งานระบบ

5.5.3 ผลกระทบราคาซังข้าวโพดที่มีต่อต้นทุนการผลิตความร้อน

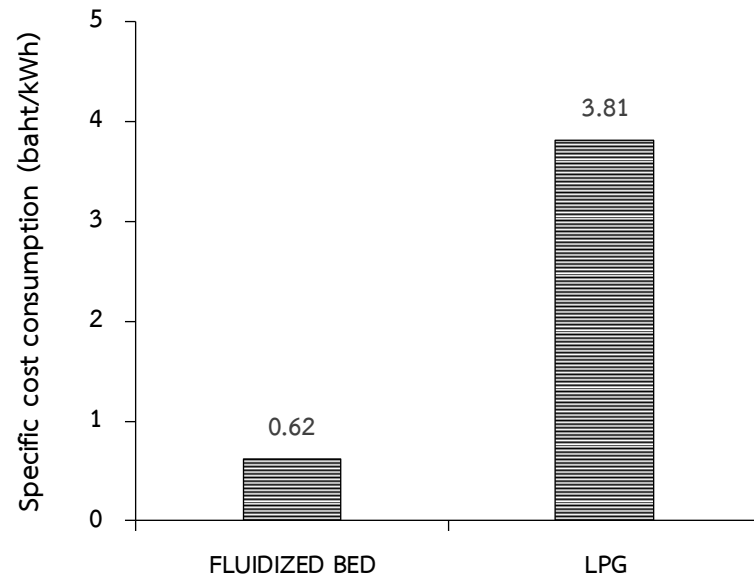
ภาพที่ 63 แสดงการเปลี่ยนแปลงราคาซังข้าวโพดที่มีต่อต้นทุนการผลิตความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบด โดยต้นทุนซังข้าวโพดอยู่ในช่วง 0.5-2 baht/kg เมื่อใช้เวลาในการทำงาน 8 h พบว่าต้นทุนการผลิตทางพลังงานความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของราคาเชื้อเพลิง รายละเอียดดังแสดงในตารางภาคผนวกที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อราคาของซังข้าวโพดเพิ่มขึ้นทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายรวมของระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและในขณะเดียวกันจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยเมื่อกำหนดราคาเชื้อเพลิงที่ 0.5-2 baht/kg ราคาต้นทุนการผลิตความร้อนจะอยู่ที่ 0.5-0.86 baht/kWh ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับ



ภาพที่ 63 ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงราคาซังข้าวโพดต่อต้นทุนการผลิตความร้อน

5.5.4 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนเปรียบเทียบกับแก๊สหุงต้ม

ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดโดยเลือกเอาผลของการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราส่วนสมมูลที่ดีที่สุด การวิเคราะห์ใช้หลักการเปรียบเทียบกับทดสอบเตาแก๊สหุงต้มในสภาวะเดียวกัน (ภูวติท, 2561) ผลการศึกษาพบว่าการใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h และอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 โดยมีค่าเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1 baht/kg และมีระยะเวลาการใช้งานวันละ 8 ชั่วโมง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตความร้อนที่ได้ต่ำกว่าการใช้แก๊สหุงต้มซึ่งอยู่ที่ 0.62 baht/kWh อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์เทียบกับการใช้แก๊สหุงต้ม (ภูวติท, 2561) พบว่าการใช้ระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดให้ต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำกว่าการทดสอบเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง (ภูวติท ดิฐศุภมาศ, 2561) ดังแสดงในภาพที่ 64 ซึ่งจะเห็นได้ว่าจากการนำเอาชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนพลังงานฟอสซิลเนื่องจากประเทศไทยมีฐานการผลิตที่เป็นประเทศเกษตรกรรม เพราะฉะนั้นการผลิตที่ต่อยอดด้วยนวัตกรรมใหม่ ๆ เพื่อนำเอาเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปให้เป็นพลังงานหรืออาจจะแปรรูปแล้วได้พลังงานมากกว่าที่ใช้อยู่เดิมนอกจากจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่ายังส่งผลให้ต้นทุนทางการผลิตความร้อนที่ได้ต่ำกว่าอีกด้วย อย่างไรก็ตามเป็นที่ยอมรับในเรื่องของการเปรียบเทียบต้นทุนการใช้ชีวมวลซึ่งการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลจะให้ต้นทุนการผลิตความร้อนที่ต่ำเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่น (ชนากานต์, 2538) (หทัยชนก และศิรินุช, 2560)



ภาพที่ 64 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตความร้อนเปรียบเทียบกับแก๊สหุงต้ม



บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

1. ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่ทำการศึกษาค้นคว้าได้ทำการออกแบบและสร้างทั้งหมด 3 ส่วนหลัก ประกอบด้วย เครื่องผลิตแก๊สชีววมวล อุปกรณ์ทำความสะอาดและลดอุณหภูมิแก๊สชีววมวลและหัวเตาเผา โดยห้องเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 25 cm ความสูงของห้องเผาไหม้ 102 cm ความสูงของชั้นเบดที่ใช้ทรายสูง 4.2 cm ป้อนอากาศจากด้านล่างของเตาด้วยพัดลมเป่าอากาศผ่านฝาครอบส่วนล่างห้องเผาไหม้โดยมีแผ่นกระจายลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23.7 cm ชุดป้อนเชื้อเพลิงอยู่ทางด้านข้างซึ่งใช้มอเตอร์ขนาด 0.75 kW ด้านล่างเป็นชุดป้อนอากาศซึ่งมีขนาดท่อ 5.08 cm ตะแกรงแผ่นกระจายลมเจาะรูทั้งหมด 107 รู การออกแบบเลือกใช้ซี่งข้าวโพดขนาด 3 mm เป็นชีววมวลในการทดสอบ

2. การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h ที่อัตราส่วนสมมูล 0.6 ให้สมรรถนะของระบบผลิตแก๊สชีววมวลสูงสุด

3. การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ให้สมรรถนะของระบบผลิตแก๊สชีววมวลได้สูงสุด ภายใต้การปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.56 4.44 และ 5.89 kg/h

4. อุณหภูมิการต้มน้ำของการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h และอัตราส่วนสมมูล 0.6 ให้อุณหภูมิสูงสุด 98 °C และมีระยะเวลาเริ่มต้นเดือดต่ำสุดที่ เวลา 25 min

5. อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4.44 kg/h และอัตราส่วนสมมูล 0.6 มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 583 °C ในขณะที่การใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5.89 kg/h ให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 621 °C และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 2.56 kg/h ให้อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 425 °C

6. องค์ประกอบแก๊สที่ได้จากการทดสอบในสภาวะการปรับอัตราส่วนสมมูล 0.6 ให้ความร้อนของแก๊สชีววมวลสูงสุด โดยการปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง 4.44 5.89 และ 2.56 kg/h ให้ค่าความร้อน 3,899.23 kJ/Nm³ 3,567.09 kJ/Nm³ และ 3,488.66 kJ/Nm³ ตามลำดับ

7. ผลจากการออกแบบสร้างทดสอบและวิเคราะห์ระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด ค่าอัตราการป้อนซี่งข้าวโพดขนาด 3 mm ที่เหมาะสมคือ 4.44 kg/h ภายใต้การปรับอัตราส่วนสมมูล 0.6 ซึ่งประสิทธิภาพระบบผลิตแก๊สชีววมวลจากการต้มน้ำสูงสุด 26.04% และประสิทธิภาพความร้อนระบบผลิตแก๊สชีววมวลเฉลี่ย 77.29%

8. ต้นทุนการผลิตความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบดที่สภาวะเหมาะสม โดยมีค่าเชื้อเพลิงอยู่ที่ 1 baht/kg และมีระยะเวลาการใช้งานระบบอยู่ที่ 8 h/day มีต้นทุนการผลิตความร้อนเท่ากับ 0.62 baht/kWh ซึ่งมีต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำกว่าการใช้งานเตาแก๊สหุงต้ม

ข้อเสนอแนะ

1. ระบบผลิตแก๊สชีววมวลดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาาระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบดที่ใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนั้นคือ ชังข้าวโพด ดังนั้นในการทดสอบและพัฒนาในอนาคตควรนำเอาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรชนิดอื่นหรือเชื้อเพลิงคุณภาพสูง อาทิ เชื้อเพลิงชีววมวลอัดเม็ด เชื้อเพลิงทอร์รีไฟด์ มาปรับใช้ให้เหมาะสมกับการใช้งานชีววมวลในประเทศ

2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเพิ่มค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เช่น การใช้ไอน้ำหรือออกซิเจน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความร้อนของแก๊สชีววมวลที่ได้เพิ่มขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและสมรรถนะของระบบ

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2559. **คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติด้านพลังงานทดแทน แก๊สซิฟิเคชันจากชีวมวล**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/BibA11106คู่มือแก๊สซิฟิเคชัน59.pdf> (23 มิถุนายน 2560).
- กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่. 2552. **เทคโนโลยีการผลิตพลังงาน/เชื้อเพลิงจากเศษไม้ โครงการส่งเสริมการใช้เทคโนโลยีการนำวัสดุเหลือใช้และกากของเสียมาใช้ประโยชน์**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.dpim.go.th/service/download?articleid=3502 (14 มีนาคม 2559).
- กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน. 2559. **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564)** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.enconfund.go.th/pdf/index/aedp25.pdf (24 มีนาคม 2559).
- กุญชร ศรีพินิจ, ญาณิศา เกี้ยวพันธ์ และรัตติกาล มหาเจริญ. 2554. **ชุดสาคิธัตถการไหลของของไหล**. ปรินญาณินพนธ์ ปรินญาตริ. มหาวิทยาลัยบูรพา.
- จิรพัทธ์ ชูโชติถาวร. 2556. **การวิเคราะห์พลังงานและเศรษฐศาสตร์ของการผลิตความร้อนจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน**. วิทยานิพนธ์ ปรินญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ชนากานต์ อาษาสุจริต. 2538. **การอบแห้งพริกโดยใช้พลังงานความร้อนจากก๊าซชีวมวล**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปรินญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- เชิดชูเกียรติ ฝากา. 2560. **พัฒนาและประเมินสมรรถนะของเตาชีวมวลแบบไหลลงและศึกษาขนาดที่เหมาะสมของเชื้อเพลิง**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ปรินญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ฐานิตย์ เมธิยานนท์, นิวัติ พิริยะรุ่งโรจน์, อติศักดิ์ นาถกรณกุล & สมชาติ โสภณรณฤทธิ์. 2546. **การพัฒนาเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับเชื้อเพลิงแกลบ**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 ปราชินบุรี: สมาคมวิศวกรเครื่องกลไทย
- นคร ทิพยาวงศ์. 2558. **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- นิกราน หอมดวง, ณัฐวุฒิ ดุษฎี และกิตติกร สาสุจิตต์. 2554. สมรรถนะเครื่องยนต์สูบน้ำการเกษตร
เมื่อใช้พลังงานชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง. **การประชุมวิชาการการถ่ายเทพลังงาน ความร้อนและ
มวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2554** ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- บริษัท เอนเนอร์ยี คิวลิตี้ เซอร์วิส จำกัด. 2558. **วัฏจักรคาร์บอนแบบปิดของเชื้อเพลิงชีวมวล.**
[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://ienergyguru.com/2015/08/ชีวมวล-biomass/> (3
มีนาคม 2560).
- ประสาน สติภัยเรืองศักดิ์ , ฐานิตย์ เมธิยานนท์ และสมชาติ โสภณธณฤทธิ์. 2552. ผลกระทบของ
อุณหภูมิเบตที่มีต่อสมรรถนะการเผาไหม้แกลบและการเผาไหม้แกลบรวมกับถ่านหินบิทูมินัส
ของเตาเผาไหม้วอร์เทค-ฟลูอิดไธซ์เบต **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง
ประเทศไทย ครั้งที่ 23 4 – 7 พฤศจิกายน 2552** จังหวัดเชียงใหม่.
- ปัญจพร ขนาดคำ. 2560. **การเพิ่มค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สที่ผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิ
เคชันโดยใช้ไอน้ำ.** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- พงศธร มณฑิพย์, นิกราน หอมดวง, ณัฐวุฒิ ดุษฎี และชूरรัตน์ ธารารักษ์. 2560. การทดสอบพฤติกรรม
การลอยตัวของชีวมวลสำหรับการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบต. **การ
ประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 18 วันที่ 7-9
กันยายน 2560.** สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.
- พิเชษฐ นิลดวงดี. 2556. **การศึกษาเชิงทดลองเผาไหม้กะลาปาล์มในเตาเผาฟลูอิดไธซ์เบตที่ใช้ทราย
อะลูมิน่าเป็นวัสดุเบต.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา
mis.pbru.ac.th/research/files/docfiles/2559R055-59160629142336.pdf
(5 สิงหาคม 2559).
- ไพโรจน์ จันทร์แก้ว และศิวะ อัจฉริยวิริยะ. 2555. บทวิเคราะห์การอบแห้งธัญพืชโดยประยุกต์ใช้
เทคนิคฟลูอิดไธซ์เบต. **การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่
13 วันที่ 4-5 ตุลาคม 2555.** สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย.
- ภูวดิทธิ ติษฐศุภมาศ. 2561. **การพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง.** การค้นคว้าอิสระวิศวกรรม
ศาสตรมหาบัณฑิต ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ระวิน สืบคำ, ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนาจ และสุนทร สืบคำ. 2555. ที่มาของสมการ Ergun เพื่อการ
คำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไธซ์สำหรับอนุภาคของแข็ง. **Journal of the Thai
Society of Agricultural Engineering, 18(1), 24-33.**
- สุทธิพันธ์ กีฬาแปง. 2555. **การศึกษาการอัดขึ้นรูปขี้ข้าวโพดด้วยระบบไฮดรอลิก.** วิทยานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.

- สุนิรัตน์ พุกตะ. 2558. **เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบฟลูอิดซ์เบด การอบรมเชิงปฏิบัติการ “เทคโนโลยีผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลสำหรับภาคอุตสาหกรรม”**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา www.jgsee.kmutt.ac.th/ (14 มีนาคม 2560).
- สุภชิตา เกริกโกวัล. 2551. **แก๊สสังเคราะห์จากแก๊สซิฟิเคชันด้วยไอน้ำของทะเลสาบปาล์มน้ำมัน**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภัทรชัย สุวรรณพันธุ์, ชินรัชย์ เรียรพงษ์ และพงษ์เจต พรหมวงศ์. 2554. การเผาไหม้ชีวมวลในเตาเผาฟลูอิดซ์เบดที่มีครีบริบรูปร่างตัววี. **การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปี 2554 “การพัฒนาอนาคตชนบทไทย : ฐานรากที่มั่นคงเพื่อการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน”** 27-29 มกราคม 2554.
- หทัยชนก เนตรคำ และศิรินุช จินดารักษ์. 2560. การพัฒนาเครื่องอบแห้งธัญพืชขนาดเล็กยกยางพาราแผ่นโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับเตาเผาชีวมวล. **Rajabhat Journal of Sciences, Humanities and Social Sciences** 18(2), 367-377.
- Asfaw, A. A. 2013. **DESIGN OF FLUIDIZED BED BAGASSE GASIFIER**. Master thesis. Addis Ababa University.
- BioEnergyConsult. 2018. **Biomass Energy and Sustainability**. [Online]. Available <https://www.bioenergyconsult.com/biomass-energy-sustainability/> (22 กันยายน 2018).
- Couto, N., Rouboa, A., Silvaa, V., Monteiro, E. & Bouziane, K. 2013. Influence of the biomass gasification processes on the final composition of syngas. **Energy Procedia**, 36(2013), 596 – 606.
- J. J. RAMÍREZ, J.D. MARTÍNEZ & PETRO, S. L. 2007. BASIC DESIGN OF A FLUIDIZED BED GASIFIER FOR RICE HUSK ON A PILOT SCALE. **Latin American Applied Research**, 37(299-306).
- Jhon Jairo Ramírez Behainne & Martinez, J. D. 2014. Performance analysis of an air-blown pilot fluidized bed gasifier for rice husk. **Energy for Sustainable Development**, 18(2014), 75-82.
- Kumar, S., Sangwan, P., Dhankhar, R. M. V. & Bidra, S. 2013. Utilization of rice husk and their ash: A review. **Res. J. Chem. Env. Sci**, 1(5), 126-129.
- Kunii, D. 1991. **Fluidization Engineering**. Japan: Oregon State University.

- Li, X. T., Grace, J. R., Lim, C. J., Watkinson, A. P., Chen, H. P. & Kim, J. R. 2004. Biomass gasification in a circulating fluidized bed. **Biomass and Bioenergy**, 26(2), 171-193.
- Mahawan, T., Homdoug, N., Dussadee, N., Taralax, C. & Ramaraj, R. 2016. Application of gasification technology for design household, smokeless biomass stove. p. 28-32. In **the 23rd Tri-U international Joint Seminar and Symposium**. Bogor Agricultural University.
- Manuel Campoy, Alberto Gómez-Barea, Pedro Ollero & Nilsson, S. 2014. Gasification of wastes in a pilot fluidized bed gasifier. **Fuel Processing Technology**, 121(2014), 63-69.
- McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. **Bioresource Technology**, 83(2002), 55-63.
- Molino, A., Chianese, S. & Musmarra, D. 2016. Biomass gasification technology: The state of the art overview. **Journal of Energy Chemistry**, 25(2016), 10-25.
- Muller, A. 2009. Sustainable agriculture and the production of biomass for energy use. **Climatic Change**, 94(3-4), 319-331.
- Ntshengedzeni S. Mamphweli & Meyer, E. L. 2010. Evaluation of the conversion efficiency of the 180 Nm³/h **ENERGY AND ENVIRONMENT**, 1(1), 113-120.
- Perez, N. P., Machin, E. B., Pedroso, D. T., Antunes, J. S. & Silveira, J. L. 2014. Fluid-dynamic assessment of sugarcane bagasse to use as feedstock in bubbling fluidized bed gasifiers. **Applied Thermal Engineering**, 73(2014), 238-244.
- Ramirez, J., Martinez, J. & Petro, S. 2007. Basic design of a fluidized bed gasifier for rice husk on a pilot scale. **Latin American applied research**, 37(4), 299-306.
- Sahoo, A. & Ram, D. K. 2015. Gasifier performance and energy analysis for fluidized bed gasification of sugarcane bagasse. **Energy**, 90(2015), 1420-1425.
- Wongsiriamnuay, T., Kannang, N. & Tippayawong, N. 2013. Effect of Operating Conditions on Catalytic Gasification of Bamboo in a Fluidized Bed. **International Journal of Chemical Engineering**, 2013(
- Young Doo Kim, Chang Won Yang, Beom Jong Kimb, Kwang Su Kim, Jeung Woo Lee, Ji Hong Moon, Won Yang, Tae U Yua & Lee, U. D. 2013. Air-blown gasification of

woody biomass in a bubbling fluidized bed gasifier. **Applied Energy**, 112(414-420).

Zhang, Y., Ghaly, A. E. & Li, B. 2012. Physical Properties of Corn Residues. **American Journal of Biochemistry and Biotechnology**, 8(2), 44-53.

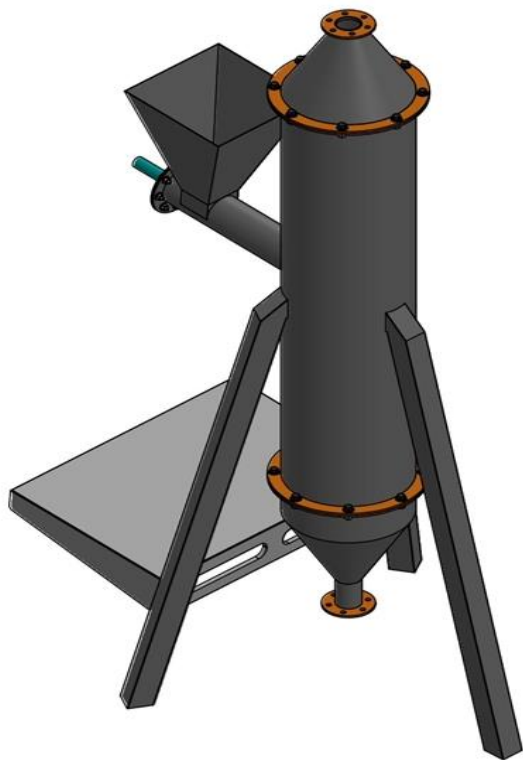




ภาคผนวก

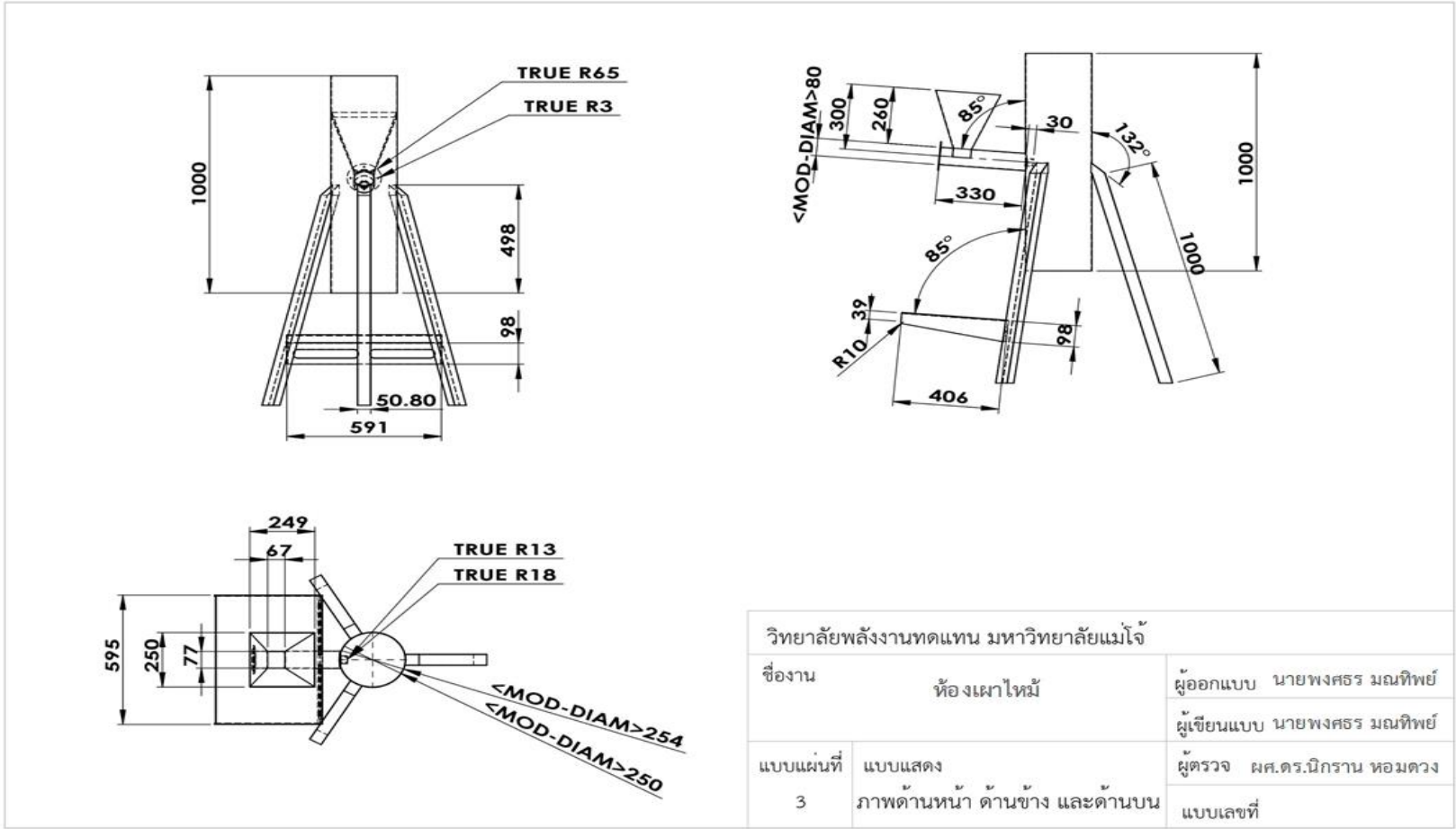


ภาคผนวก ก
แบบตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไธซ์เบต



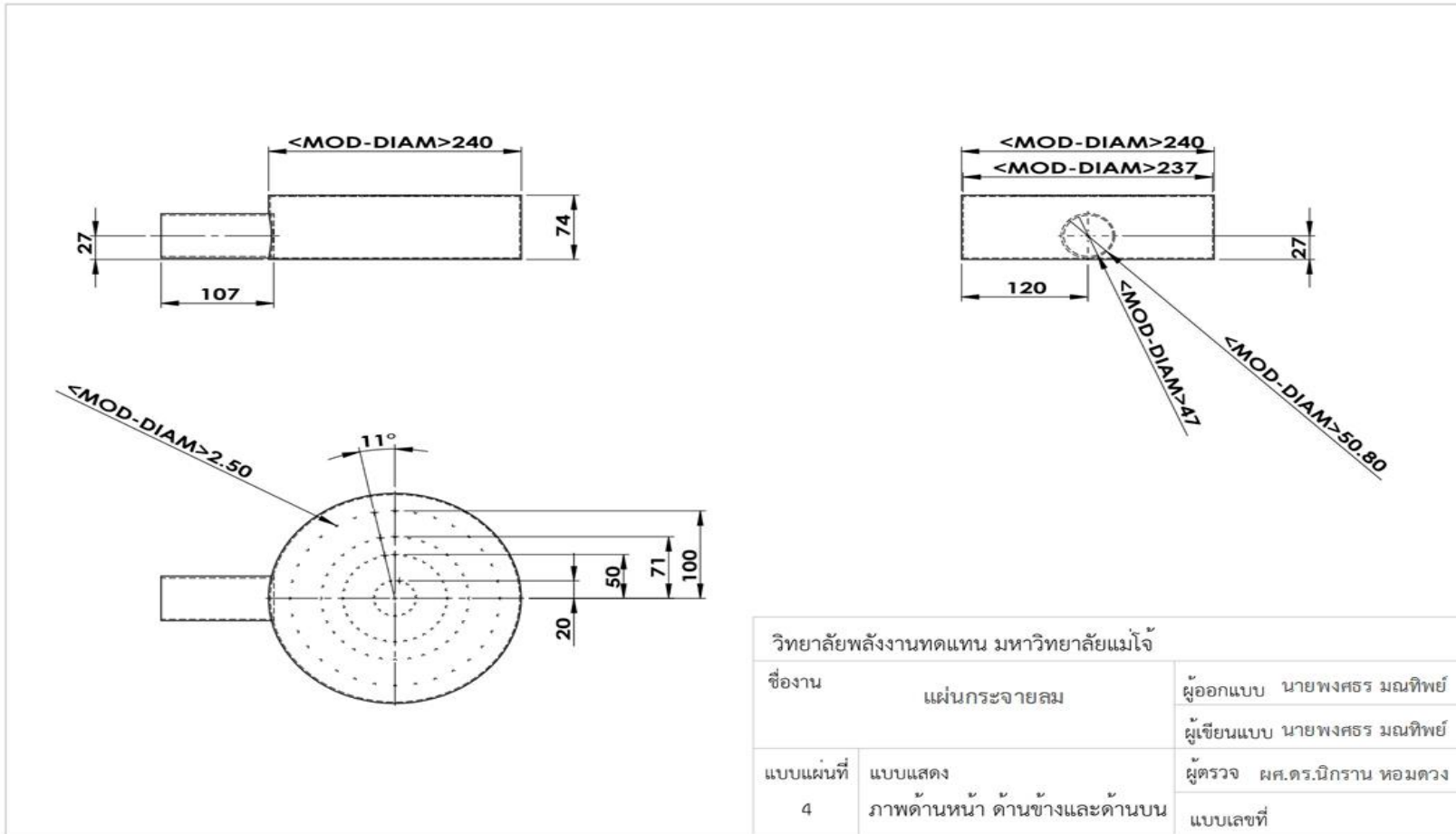
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้		
ชื่องาน	ห้องเผาไหม้	ผู้ออกแบบ นายพงศธร มณฑิพย์
		ผู้เขียนแบบ นายพงศธร มณฑิพย์
แบบแผ่นที่	แบบแสดง	ผู้ตรวจ ผศ.ดร.นิกราน หอมดวง
2	ภาพ Isometric ห้องเผาไหม้	แบบเลขที่

ภาพผนวกที่ 1 แบบห้องเผาไหม้

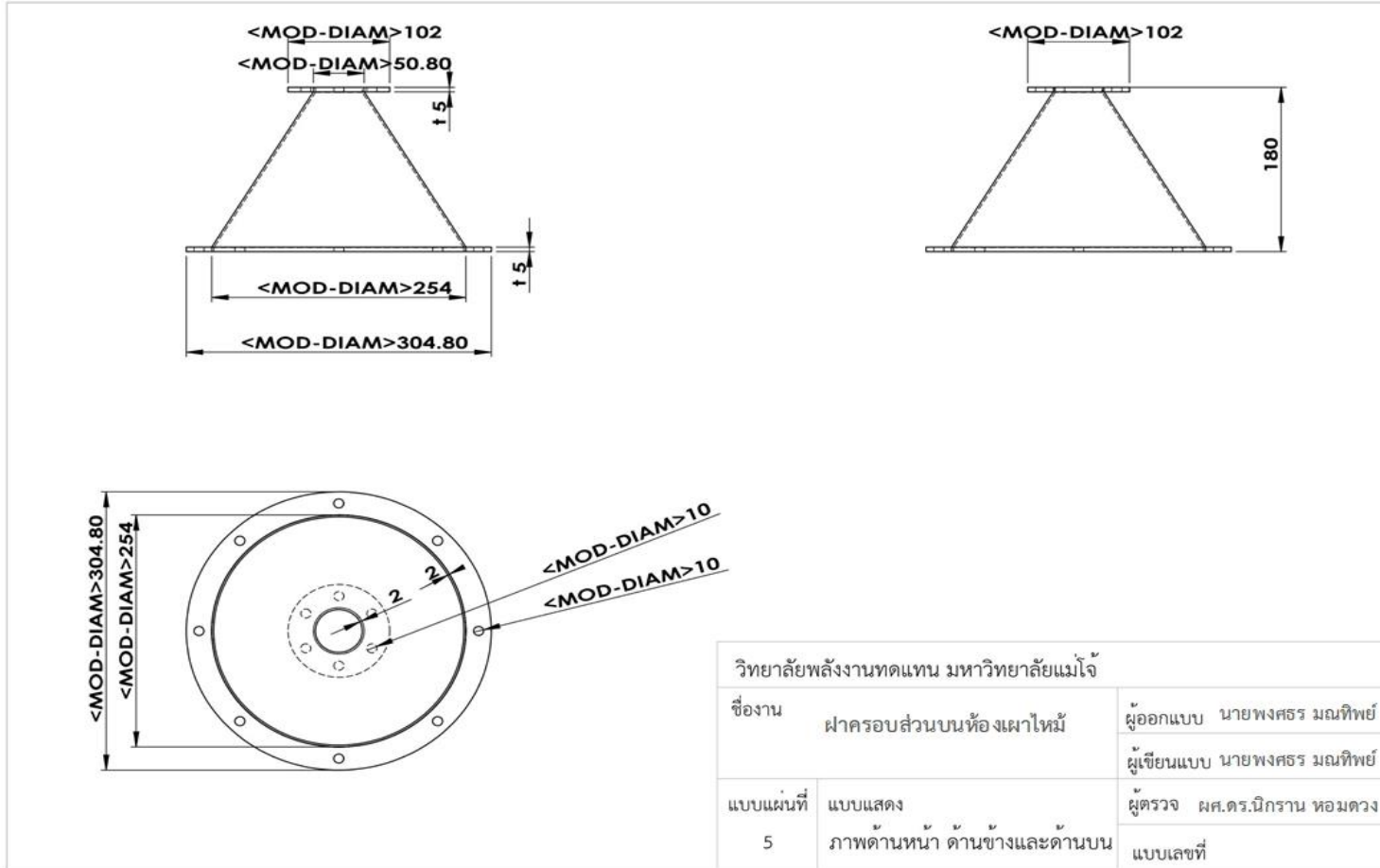


วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้		
ชื่องาน	ห้องเผาไหม้	ผู้ออกแบบ นายพงศธร มณทิพย์
		ผู้เขียนแบบ นายพงศธร มณทิพย์
แบบแผ่นที่	แบบแสดง	ผู้ตรวจ ผศ.ดร.นิกราน หอมดวง
3	ภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบน	แบบเลขที่

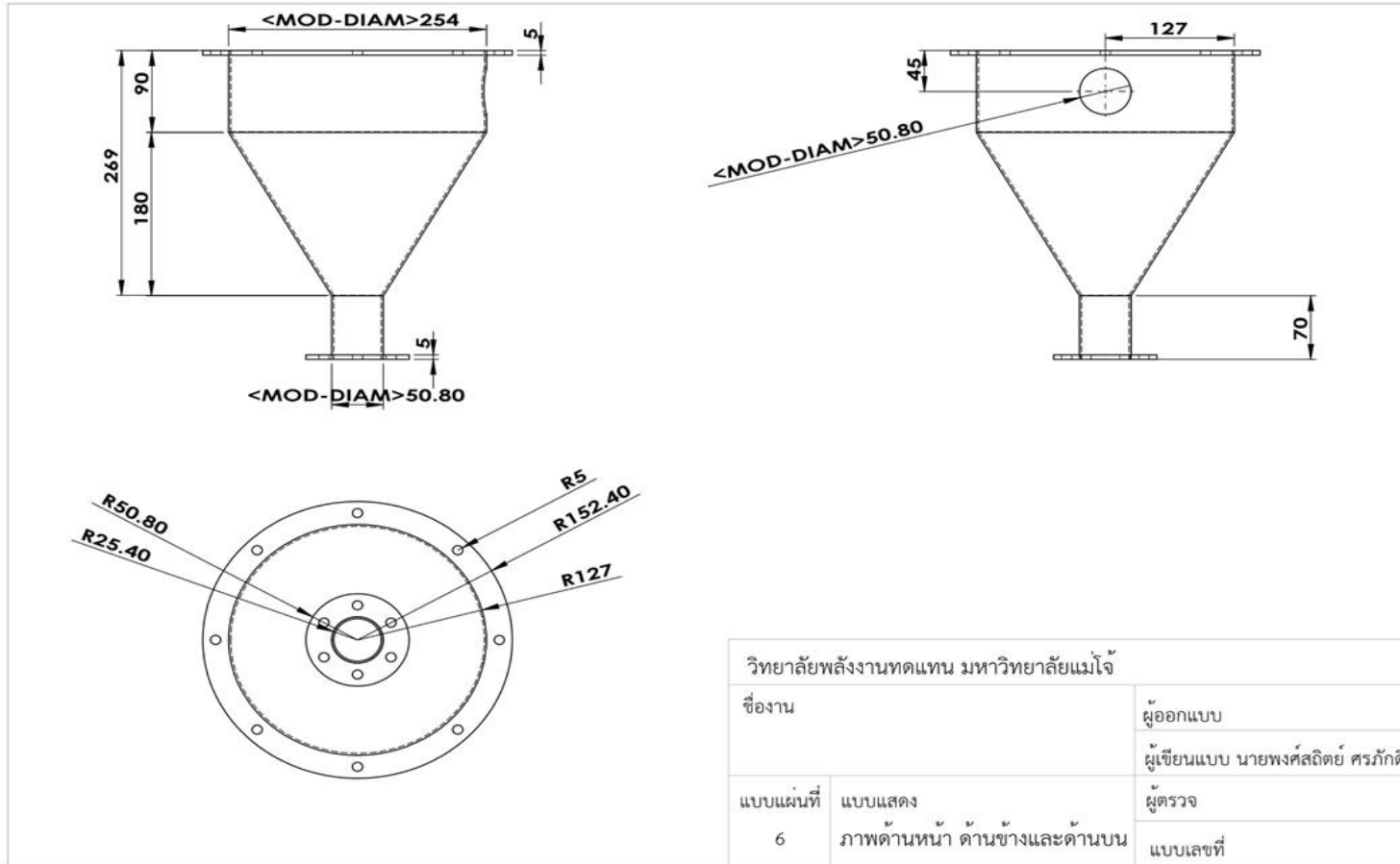
ภาพผนวกที่ 2 แบบห้องเผาไหม้ 2 มิติ



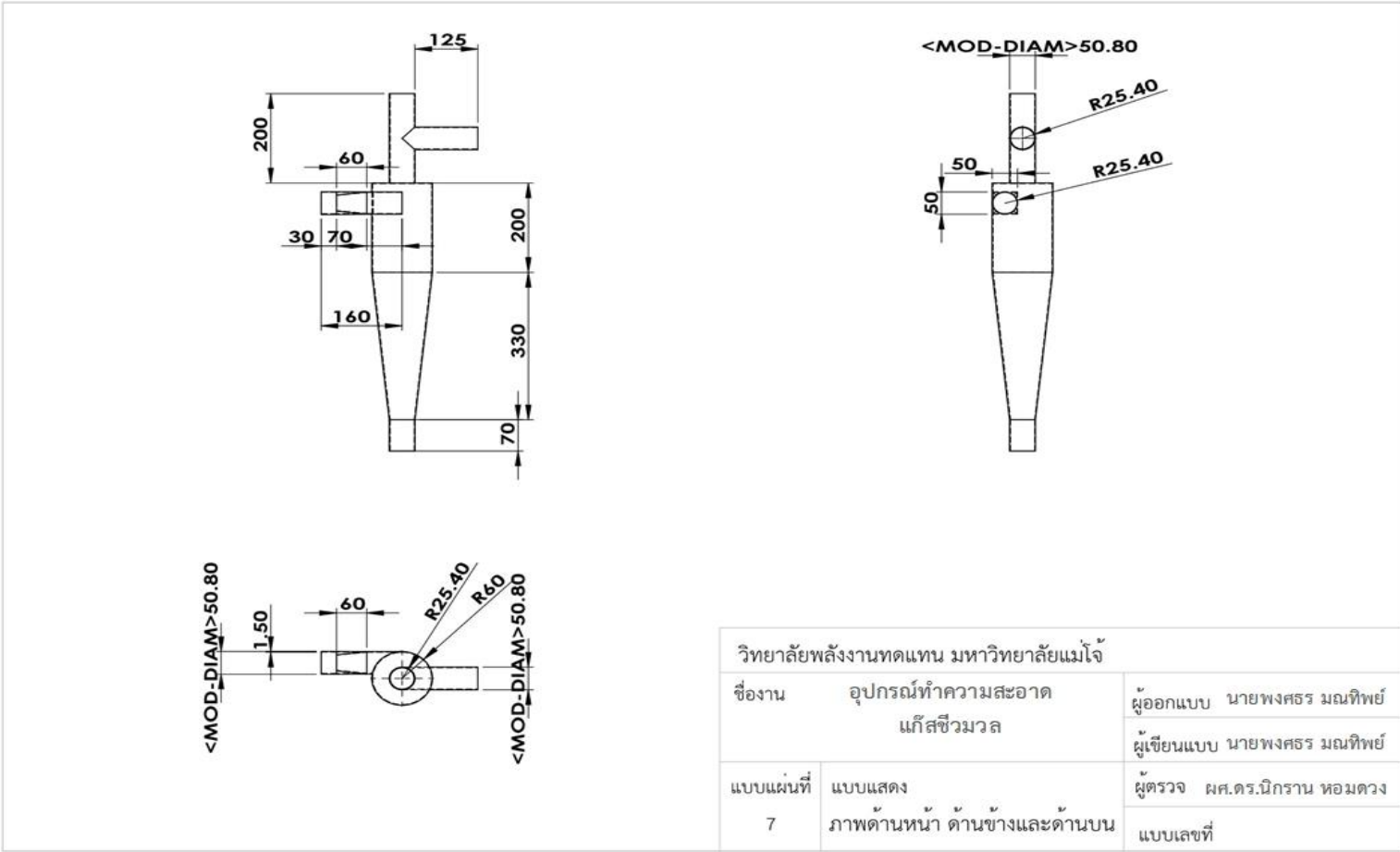
ภาพผนวกที่ 3 แบบแผ่นกระจายลม



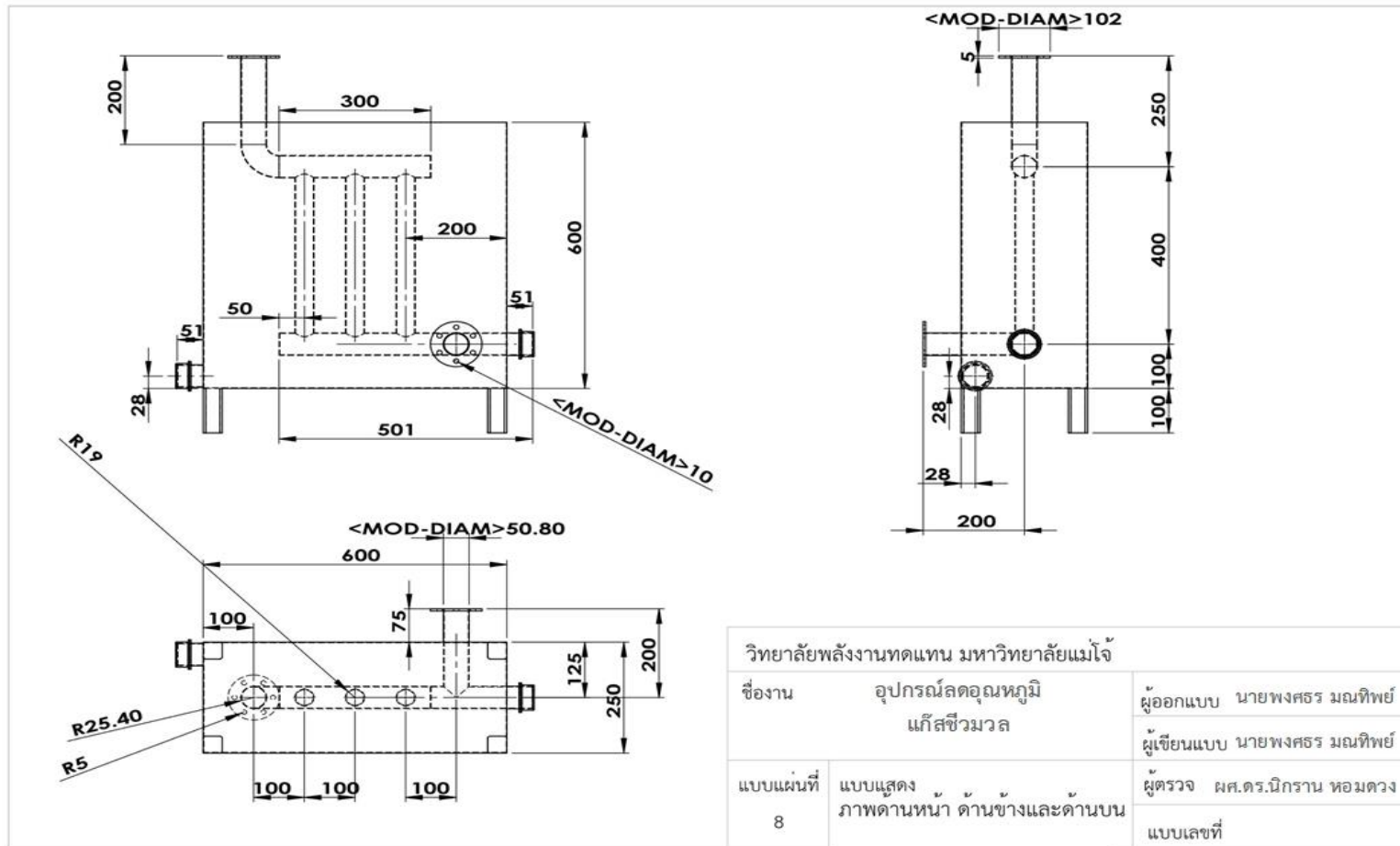
ภาพผนวกที่ 4 แบบฝาครอบส่วนบนห้องเผาไหม้



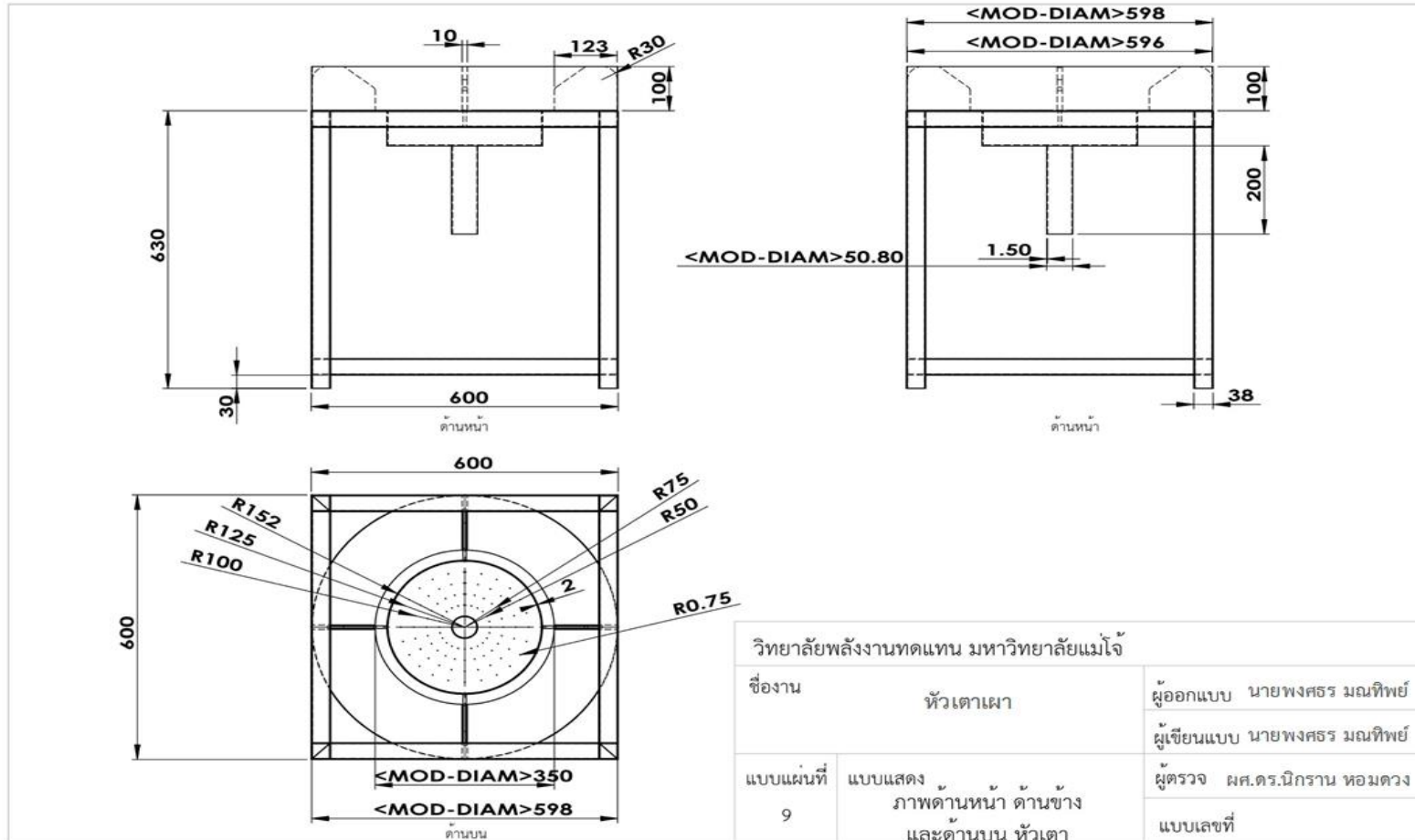
ภาพผนวกที่ 5 แบบฝาครอบส่วนล่างห้องเผาไหม้



ภาพผนวกที่ 6 แบบอุปกรณ์ทำความสะอาดแก๊สชีววมวล



ภาพผนวกที่ 7 แบบอุปกรณ์ลดอุณหภูมิแก๊สชีววมวล



ภาพผนวกที่ 8 แบบหัวเตาเผาแก๊ส



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณและเงื่อนไขการวิเคราะห์ต้นทุนทางการผลิตความร้อน

กรณี กำหนดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ 4.44 kg/h และอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6

โดยที่	มวลน้ำก่อนการทดสอบ	= 8.097 kg
	มวลน้ำที่ระเหย	= 2.627 kg
	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ	= 4.186 kJ/kg ^o C
	ค่าความร้อนแฝงของการระเหยของน้ำ	= 2257.2 kJ/kg
	อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ	= 101.07 °C
	อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น	= 30.22 °C
	ค่าความร้อนของซังข้าวโพด	= 14260 kJ/kg
	อุณหภูมิแก๊สชีวมวลออกจากปลายท่อ	= 84 °C
	อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล	= 12.55 m ³ /h
	แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	= 19.1 %Vol.
	แก๊สไฮโดรเจน (H ₂)	= 8.38 %Vol.
	แก๊สมีเทน (CH ₄)	= 1.95 %Vol.
	แก๊สออกซิเจน (O ₂)	= 54.07 %Vol.
	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	= 11 %Vol.
	แก๊สไนโตรเจน (N ₂)	= 5.5 %Vol.

1. การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการ} \quad \text{SFC} &= \frac{\dot{m}_{\text{fuel}}}{\dot{Q}_u} \\
 \text{จะได้ว่า} \quad &= \frac{\dot{m}_{\text{fuel}}}{[m_{w,1} \times C_{p,w} (T_{w,B} - T_{w,i})] + [m_{w,2} \times h_{fg}]} \\
 &= \frac{4.44}{[8.097 \times 4.186 \times (101.07 - 30.22)] + [2.637 \times 2257.2]} \\
 &= \frac{4.44}{8353.87} = 1.91 \text{ kg/kWh} \\
 &= \frac{4.44}{3600}
 \end{aligned}$$

2. การคำนวณอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

จากสมการ
$$SEC = \frac{E}{Q_U}$$

จะได้ว่า
$$= \frac{4.44 \times 14260}{[8.097 \times 4.186 \times (101.07 - 30.22)] + [2.637 \times 2257.2]}$$

$$= 7.58 \text{ kJ/kWh}$$

3. การคำนวณประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีวมวล

จากสมการ
$$\eta_G = \frac{[m_{w,1} \times C_{p,w} (T_{w,B} - T_{w,i})] + [m_{w,2} \times h_{fg}]}{m_{fuel} \times LHV_{fuel}} \times 100$$

จะได้ว่า
$$= \frac{[8.097 \times 4.186 \times (101.07 - 30.22)] + [2.637 \times 2257.2]}{4.44 \times 14260} \times 100$$

$$= 26.40 \%$$

4. การคำนวณหาค่าความร้อนของแก๊สชีวมวล

จากสมการ
$$HV_{gas} = \frac{(13.1 \times CO\%) + (13.2 \times H_2\%) + (41.2 \times CH_4\%)}{100}$$

จะได้ว่า
$$= \frac{(13.1 \times 19.1) + (13.2 \times 8.38) + (41.2 \times 1.95)}{100}$$

$$= 3.89 \text{ MJ/Nm}^3 = 3899.23 \text{ kJ/Nm}^3$$

5. การคำนวณอัตราการเกิดแก๊สชีวมวลโดยใช้นิยามที่สภาวะปกติที่อุณหภูมิ 25 °C

จากสมการ
$$Q_{gas} = Q_1 \times \frac{T_1}{T_2}$$

จะได้ว่า
$$= 12.55 \times \frac{(25 + 273)}{(84 + 273)}$$

$$= 10.48 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

6. การคำนวณหาประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีววมวล

จากสมการ
$$\eta_{\text{CGE}} = \frac{HV_{\text{gas}} \times Q_{\text{gas}}}{HV_{\text{fuel}} \times m_{\text{fuel}}} \times 100$$

จะได้ว่า
$$= \frac{3899.23 \times 10.43}{14260 \times 4.44} \times 100$$

$= 77.29 \%$



เงื่อนไขการวิเคราะห์ต้นทุนทางการผลิตความร้อน

ตารางภาคผนวกที่ 1 เงื่อนไขการวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาการใช้งานระบบ

รายละเอียด	ระยะเวลาการทำงาน (h/day)		
	1 h	8 h	16 h
ค่าเชื้อเพลิงชีวมวล (baht/kg)	1	1	1
ค่าแก๊สหุงต้ม (baht/unit)	363.48	363.48	363.48
ค่าแก๊สหุงต้ม (baht/kg)	24.23	24.23	24.23
ค่าไฟฟ้า (baht/kWh)	4.5	4.5	4.5
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)	4.44	4.44	4.44
อัตราการใช้แก๊สหุงต้มต่อครั้ง (kg/time)	0.19	0.19	0.19
กำลังอุปกรณ์ไฟฟ้า (kW)	1.45	1.45	1.45
ค่าเชื้อเพลิงชีวมวล (baht/day)	4.44	35.52	71.04
ค่าแก๊สหุงต้ม (baht/day)	4.60	4.60	4.60
ค่าไฟฟ้า (baht/day)	6.53	52.20	104.40
รวมต้นทุนค่าใช้จ่าย (baht/day)	15.57	92.32	180.04
รวมต้นทุนค่าใช้จ่าย (baht/h)	15.57	11.54	11.25
อัตราการผลิตความร้อน (kW)	2.32	2.32	2.32
รวมการผลิตความร้อนได้ (kW)	2.32	11.56	37.12
ต้นทุนการผลิตความร้อน (baht/kWh)	6.71	0.62	0.30

ตารางภาคผนวกที่ 2 เงื่อนไขการวิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงค่าเชื้อเพลิงชีวมวล

รายละเอียด	ค่าเชื้อเพลิงชีวมวล (baht/kg)					
	0.5	0.75	1	1.25	1.5	2
ค่าแก๊สหุงต้ม (baht/unit)	363.48	363.48	363.48	363.48	363.48	363.48
ค่าแก๊สหุงต้ม (baht/kg)	24.23	24.23	24.23	24.23	24.23	24.23
ค่าไฟฟ้า (baht/kWh)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (kg/h)	4.44	4.44	4.44	4.44	4.44	4.44
อัตราการใช้แก๊สหุงต้มต่อครั้ง (kg/time)	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
กำลังอุปกรณ์ไฟฟ้า (kW)	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
ระยะเวลาการใช้งานระบบ (h/day)	8	8	8	8	8	8
ค่าเชื้อเพลิงชีวมวล (baht/day)	17.76	26.64	35.52	44.40	52.28	71.04
ค่าแก๊สหุงต้ม (baht/day)	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60
ค่าไฟฟ้า (baht/day)	52.20	52.20	52.20	52.20	52.20	52.20
รวมต้นทุนค่าใช้จ่าย (baht/day)	75.56	83.44	92.32	101.20	110.08	127.84
รวมต้นทุนค่าใช้จ่าย (baht/h)	9.32	10.43	11.54	12.65	13.76	15.98
อัตราการผลิตความร้อน (kW)	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32	2.32
รวมการผลิตความร้อนได้ (kW)	18.56	18.56	18.56	18.56	18.56	18.56
ต้นทุนการผลิตความร้อน (baht/kWh)	0.5	0.56	0.62	0.68	0.74	0.86



ภาคผนวก ค
ผลการวิเคราะห์ชีวมวล

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	ซังข้าวโพด		ANALYSED DATE	17 - 25/8/2016
SAMPLE CONDITION	Normal			
	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS DETERMINED (AIR DRY) BASIS	MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-10*	9.20
	ASH	%	ASTM D7582-10*	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*	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
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 10 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด



TSAE 2017

การประชุมวิชาการ
สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ระดับชาติ ครั้งที่ 18 และระดับนานาชาติ ครั้งที่ 10
ประจำปี 2560
The 18th TSAE National Conference and
The 10th TSAE International Conference
(TSAE 2017)

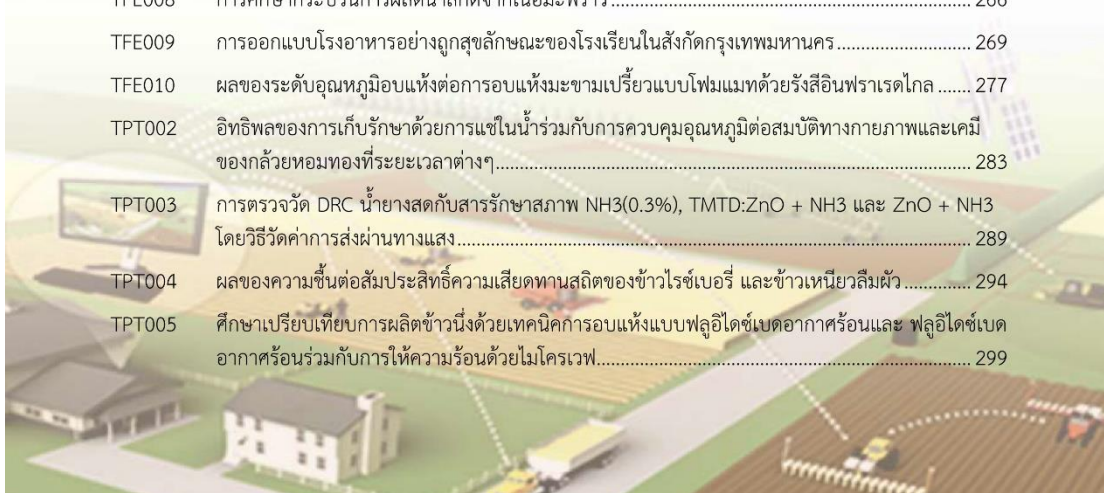
ณ อิมแพค เมืองทองธานี
กรุงเทพมหานคร
7-9 กันยายน 2560

จัดโดย สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ร่วมกับ กรมส่งเสริมการเกษตร





TAM017	ทดสอบ และพัฒนาเครื่องมือเก็บเกี่ยวผลกาแฟโดยวิธีรูดของเวียดนามเพื่อใช้เก็บเกี่ยวผลกาแฟพันธุ์โรบัสต้า	180
TAM018	การศึกษาชุดควบคุมแรงดันของเครื่องกลั่นน้ำมันหอมระเหยแบบท่อชุด	184
TAM019	การออกแบบและพัฒนาเครื่องหยอดเมล็ดข้าวแบบงานแนวตั้ง	187
TEA001	การจำแนกสิ่งปกคลุมดินจากภาพถ่ายดาวเทียมในพื้นที่ลุ่มน้ำล้าภาชีด้วยวิธี Decision Tree	192
TEA003	การออกแบบและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยแบบแม่นยำในไร่อ้อยโดยเทคนิคการประมวลผลภาพ	198
TEA004	การประเมินศักยภาพไม้โตเร็วบนพื้นที่ดินเค็ม สำหรับการผลิตไฟฟ้าในประเทศไทยด้วยระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS)	204
TEA005	การจำลองสถานการณ์เพื่อหาการระบายอากาศที่เหมาะสมที่สุดในโรงเรือนเปิดดอกเห็ดหลินจือที่มุ่งหลังคาแบบจั่วสองชั้นโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	213
TEA006	การวิจัยอากาศยานไร้คนขับ (Drone) สำหรับเกษตรอินทรีย์	219
TEE001	การทดสอบพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวลสำหรับการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดไช้เบด	224
TEE002	ศึกษาสมบัติกายภาพ-เคมีและโทรโพลีของน้ำมันไฮดรอลิกพื้นฐานจากน้ำมันพืชเก่าใช้แล้ว	229
TFE001	สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเคตดินจากกระเจียบเขียว	237
TFE002	ผลของอุณหภูมิการทำแห้ง โมลโตเด็กซ์ตรินและกัมอะราบิกต่อลักษณะทางเคมีกายภาพของฟักข้าวผงที่ผลิต โดยวิธีการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้งคู่	243
TFE003	กระบวนการผลิตกระดุกไก่แห้ง	250
TFE004	การสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ผลของตำแหน่งเซนเซอร์และหัวบรรจุน้ำสมุนไพรรักษาตา	255
TFE005	การศึกษาความแข็งแรงดินที่เหมาะสมต่อการผ่านข้าวโพดขนาดเล็กสำหรับการทำนํ้ามันข้าวโพด	256
TFE006	การศึกษาความเป็นไปได้ในการตรวจติดตามคุณภาพนมเปรี้ยวในกระบวนการหมักโดยใช้ FT-NIRs และ ไฟเบอร์ออปติกโพรบ	261
TFE008	การศึกษากระบวนการผลิตน้ำสกัดจากเนื้อมะพร้าว	266
TFE009	การออกแบบโรงอาหารอย่างถูกสุขลักษณะของโรงเรียนในสังกัดกรุงเทพมหานคร	269
TFE010	ผลของระดับอุณหภูมิอบแห้งต่อการอบแห้งมะขามเปรี้ยวแบบโฟมเมทด้วยรังสีอินฟราเรดไกล	277
TPT002	อิทธิพลของการเก็บรักษาด้วยการแช่น้ำร่วมกับการควบคุมอุณหภูมิต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของกล้วยหอมทองที่ระยะเวลาต่างๆ	283
TPT003	การตรวจวัด DRC น้ำยางสดกับสารรักษาสภาพ NH ₃ (0.3%), TMTD:ZnO + NH ₃ และ ZnO + NH ₃ โดยวิธีวัดค่าการส่งผ่านทางแสง	289
TPT004	ผลของความชื้นต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตของข้าวไรซ์เบอร์รี่ และข้าวเหนียวลิ้มผิว	294
TPT005	ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตข้าวหนึ่งด้วยเทคนิคการอบแห้งแบบฟลูอิดไช้เบดอากาศร้อนและ ฟลูอิดไช้เบดอากาศร้อนร่วมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ	299





การทดสอบพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวลสำหรับการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีววมวล แบบฟลูอิดิเซชัน

พงศธร มณฑิพย์¹, นิกราน หอมดวง^{1*}, ณัฐวุฒิ ดุษฎี¹, ชูรัตน์ ธารารักษ์¹

¹วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 63 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

ผู้เขียนติดต่อ: นิกราน หอมดวง Email: nigranghd@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวลสำหรับข้าวโพดและกลบในห้องเผาไหม้จำลองของเตาแก๊สชีววมวลแบบฟลูอิดิเซชันสำหรับเป็นแนวทางในการออกแบบอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงและขนาดห้องเผาไหม้ที่เหมาะสมที่สุด เตาแก๊สชีววมวลที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวเป็นเตาแบบทรงกระบอก มีช่องสำหรับกรวัดความสูงและการมองพฤติกรรมการลอยตัว ห้องเผาไหม้มีขนาดพื้นที่ 400 cm² ความสูง 150 cm ท่อลมป้อนและท่อลมออกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ใช้พัดลมขนาดมอเตอร์ 1.5 HP 3 phase ร่วมกับชุดอินเวอร์เตอร์สำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์และอัตราการป้อนอากาศ ความเร็วลมทดสอบอยู่ในช่วง 5-15 m/s ท่อลมออกทดสอบปรับวาล์ว 3 ระดับ คือ 25% 50% และ 100% ชีวมวลทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ขนาด คือ < 1 mm < 3 mm และ < 5 mm ผลการทดสอบพบว่า ชีวมวลข้าวโพดให้การลอยตัวสูงกว่ากลบเมื่อชีวมวลทั้ง 2 ชนิด มีขนาดต่ำกว่า 1 mm และ 3 mm ความเร็วลมที่ใช้ป้อนแปรผันตรงกับขนาดของชีวมวล โดยชีวมวลที่มีขนาดต่ำกว่า 1 mm ถึง 5 mm ใช้ความเร็วลมอยู่ในช่วง 6-12 m/s ความสูงของชีวมวลโดยเฉลี่ยเรียงตามขนาดต่ำกว่า 1 mm ถึง 5 mm อยู่ในช่วง 1-1.2 m 0.6-1.15 m และ 0.2-0.5 m ตามลำดับ การเปิดวาล์วอากาศทางออกสูงสุดส่งผลให้พฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวลและความดันในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเปิดวาล์ว 25%

คำสำคัญ: ชีวมวลข้าวโพด กลบ การลอยตัว เตาแก๊สชีววมวล

Experimental investigation Floating behavior of biomass for design fluidized bed Gasifier

Pongsatom Monthip¹, Nigran Homdoun^{1*}, Nutthawud Dussadee¹, Churat Thararux¹

Corresponding author: Nigran Homdoun. Email: nigranghd@gmail.com

Abstract

Research work was to study the floating behavior of corn cob and rice husk on the prototype combustion of fluidized bed gasifier for optimal design of air-fuel ratio and combustion chamber size. The gasifier was a cylindrical, channels for measuring the height and looking at floating behavior. The area combustion chamber was about 400 cm² and 150 cm of height, the diameter of air inlet and outlet pipes was 5 cm, 1.5 HP 3 phase of blower operate with the inverter for controlled motor speed and air feed rate. The air velocity was tested between 5-15 m/s and adjusting air outlet valve was 3 levels are 25% 50% and 100%. Biomass testing is divided into 3 sizes are < 1 mm < 3 mm and < 5 mm. It was found that, the floating of corn cob is higher than the husk when both biomass was less than 1mm and 3mm. The air velocity inlet varies with the size of the biomass which that less than 1 mm to 5 mm was used air velocity in a range of 6-12 m/s. The height floating of both biomass between 1-1.2 m, 0.6-1.15 m and 0.2-0.5 m respectively with sorted by biomass size. Opening up the maximum outlet air valve was resulted in better biomass buoyancy and pressure in the combustion chamber with compared to opening the valve at 25%.

Keywords: corn cob, rice husk, floating, gasifier.

1. บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานของมนุษย์ยังคงเพิ่มขึ้นตามการเติบโตทางเศรษฐกิจไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรม ธุรกิจการค้า การขนส่ง ที่อยู่อาศัยหรือแม้กระทั่งทางด้านการเกษตร พลังงานถือเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของการดำเนินชีวิต อีกทั้งยังสำคัญต่อการ

พัฒนาชุมชนและประเทศอีกด้วย ซึ่งศักยภาพปริมาณชีวมวลที่มีอยู่อย่างเพียงพอและความต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงสำเร็จรูปที่มีอยู่ จึงทำให้ประเทศไทยได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถนำไปใช้แปลงสภาพชีวมวลที่มีอยู่เป็นเชื้อเพลิงและใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลที่นำเข้าได้ โดยส่งผลต่อการลดการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงลงได้เป็นอย่างดีมาก



กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไอซ์เบดเป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากเทคโนโลยีนี้มีความยืดหยุ่นสูงในเรื่องของการใช้เชื้อเพลิงที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงจากวัสดุภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมได้เป็นอย่างดี ประโยชน์ที่ได้จากเทคโนโลยีนี้จะได้แก๊สเชื้อเพลิงที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงป้อนให้กับโรงไฟฟ้าหรือแหล่งพลังงานความร้อนในระดับชุมชนได้ และที่สำคัญการศึกษาวจัยด้านการผลิตแก๊สด้วยวิธีนี้ภายในประเทศยังคงมีการศึกษาไม่มากนัก การพัฒนาเตาแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไอซ์เบดจะเริ่มต้นด้วยการศึกษานิตชีวมวลที่ใช้ การออกแบบและการสร้างเตาแก๊สซิฟิเคชัน อย่างไรก็ตามในเบื้องต้นของการคัดเลือกชีวมวลที่ใช้สำหรับป้อนให้กับเตาชีวมวลควรที่จะต้องมีการศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวลก่อน การลอยตัวของชีวมวลที่ดีจะส่งผลให้การเผาไหม้ในสถานะแก๊สซิฟิเคชันเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะเป็นแนวทางการนำไปสู่การคำนวณหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงและอัตราการป้อนอากาศที่มีความเหมาะสมสูงสุดสุดท้ายที่จะทำให้ได้แก๊สเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนที่สูง ปริมาณน้ำมันดินต่ำซึ่งเหมาะแก่การนำไปป้อนให้กับเครื่องยนต์ต้นกำลังสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาพฤติกรรมการลอยตัวของชีวมวลเพื่อใช้เป็นแนวทาง ในการพัฒนาออกแบบระบบผลิตแก๊สชนิดนี้ การศึกษาวจัยประกอบด้วยการศึกษาลักษณะของประเภทชีวมวลต่อการลอยตัว ผลของความเร็วลมที่ป้อนเข้าต่ำสุดต่อขนาดชีวมวล ผลกระทบของความเร็วลมเฉลี่ยต่อการลอยตัว ผลของการเปิดวาล์วต่อการลอยตัวของชีวมวล และผลของการเปิดวาล์วต่อความดันที่เกิดขึ้นในระบบ

การศึกษาวจัยข้อมูลเอกสารที่เกี่ยวข้องพบว่า Bemgba Bevan Nyakuma et al. (2012) [1] ทำการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอซ์เบดชนิดฟองอากาศ (BFBG) เพื่อผลิตแก๊สจากทะเลสาบปาล์มโดยภายในระบบประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การป้อนเชื้อเพลิง การผลิตแก๊ส และการกำจัดของเสียบริเวณที่แก๊สผลิตได้ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความเร็วในการทำฟลูอิดไอซ์ ได้แก่อัตราสูงของการลอยตัวเบด และความดันตกคร่อมภายในระบบ เมื่อทำการป้อนเชื้อเพลิง 1.25-1.40 kg จะส่งผลให้ความดันตกคร่อมภายในระบบเหมาะสมที่สุด ทำให้ความเร็วในการทำฟลูอิดไอซ์ดีขึ้น A. Johari et al. (2014) [2] ทำการออกแบบระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอซ์เบดชนิดฟองอากาศ (BFBG) จากทะเลสาบปาล์มโดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน โดยภายในระบบประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การป้อนเชื้อเพลิง การผลิตแก๊ส และการกำจัดของเสียบริเวณที่แก๊สผลิตได้เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Bemgba Bevan Nyakuma ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า สิ่งที่ส่งผลต่อการป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล ได้แก่ความหนาแน่นของชีวมวล และขนาดของชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ Nestor Proenza Perez et al. (2014) [3] ได้ศึกษาการประเมินของไหลแบบไดนามิกส์โดยใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบและใช้เตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอซ์เบดชนิดฟองอากาศโดยทำการประเมินของไหลแบบไดนามิกส์และอุณหภูมิ

ผลศาสตร์ของการใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบสำหรับเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอซ์เบดชนิดฟองอากาศ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวพบว่าขนาดของชานอ้อยที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการผลิตแก๊ส ซึ่งขนาดของชานอ้อยที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 0.8 และ 1.21 mm Young Doo Kim et al. (2013) [4] ศึกษาเครื่องป้อนอากาศที่ใช้ในการผลิตก๊าซของเชื้อเพลิงชีวมวลประเภทไม้โดยใช้เตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไอซ์เบดชนิดฟองอากาศ โดยการศึกษาเครื่องป้อนอากาศดังกล่าวเป็นการศึกษาเพื่อที่จะควบคุมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นวัตถุดิบก็ทั้งยังเป็นการศึกษาการกระจายอุณหภูมิใน gasifier และองค์ประกอบของ syngas อีกด้วย ผลการศึกษาปรากฏว่าเครื่องป้อนอากาศส่งผลต่ออัตราการป้อนของชีวมวลซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขภายในการเปลี่ยนแปลงของชีวมวล

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมตัวอย่างการทดสอบ

ชีวมวลที่นำมาทดสอบพฤติกรรมการลอยตัวในห้องเผาไหม้แบบฟลูอิดไอซ์เบด ได้แก่ ช้างข้าวโพดและแกลบ การเตรียมตัวอย่าง เริ่มจากการนำตัวอย่างชีวมวลทั้ง 2 ชนิด มาลดความชื้นด้วยการตากให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ให้ความชื้นลดลงต่ำลงประมาณ 15% จากนั้นนำช้างข้าวโพดและแกลบมาลดขนาดโดยการบดหยาบด้วยเครื่องบดหยาบขนาดตะแกรง 10 mm ทำการร่อนด้วยตะแกรงเพื่อแยกขนาดชีวมวลออกเป็น 3 ขนาดได้แก่ ขนาดต่ำกว่า 1 mm ขนาดต่ำกว่า 3 mm และขนาดต่ำกว่า 5 mm ดังรูปที่ 1 จากนั้นทำการบดย่อยละเอียดอีกครั้งด้วยเครื่องบดหยาบขนาด 1 mm เพื่อลดขนาดชีวมวลที่มีขนาดต่ำกว่า 1 mm ตัวอย่างชีวมวลที่นำมาใช้ตัวอย่างละประมาณ 200 g โดยลักษณะทางกายภาพ ของตัวอย่างชีวมวลแสดงในตารางที่ 1



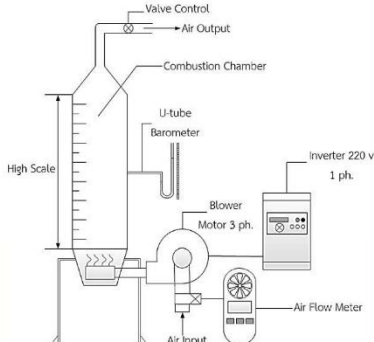
รูปที่ 1 การเตรียมตัวอย่างชีวมวลก่อนการทดสอบ ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของชีวมวลทดสอบ [5-8]

ลักษณะทางกายภาพ	ช้างข้าวโพด	แกลบ
ความหนาแน่น (kg/m ³)	282	90-106
ความชื้น (%)	6	8-9
ค่าความร้อน (MJ/kg)	18.04	14.27



2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

ชุดทดสอบการลอยตัวของชีวมวลประกอบด้วยห้องเผาไหม้ชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ความยาว 150 cm ด้านบนห้องเผาไหม้มีวาล์วควบคุมการเปิด-ปิดลมขนาดท่อลม 2 inch ชุดป้อนอากาศจะป้อนอากาศทางด้านล่างของห้องเผาไหม้ผ่านตะแกรงละเอียดโดยใช้พัดลมเป่าอากาศ ของ VENZ รุ่น SB-30 มอเตอร์ ½ HP 3 phase ขนาดท่อลมออก 2 inch การควบคุมความเร็วลมใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความเร็วกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ MITSUBISHI รุ่น FR-D700 1 phase 200 V ขนาด 4.2 A ดังแสดงในรูปที่ 2 เครื่องมือวัดประกอบด้วย เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัดใช้วัดความเร็วลมที่ป้อนเข้าและความเร็วลมที่ออกจากห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ BENETECH รุ่น GM8901 สามารถวัดความเร็วลมอยู่ในช่วง 0-45 m/s ความแม่นยำ ±3% ความละเอียด 0.1 m/s ในส่วนของการวัดความดันตกคร่อมของห้องเผาไหม้ใช้เครื่องวัดความดันบานอมิเตอร์แบบ U-tube ใช้น้ำเป็นสารตัวกลางในการอ่านค่า



รูปที่ 2 โดอะแกรมการทดสอบพฤติกรรมกรลอยตัวของชีวมวล

2.3 วิธีการวิจัย

การทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมกรลอยตัวของชีวมวลทำการควบคุมความเร็วลมโดยใช้อินเวอร์เตอร์ที่ความถี่ 25-45 Hz และแบ่งการทดสอบตามชนิดของชีวมวล โดยชีวมวลที่ทำการเปรียบเทียบในการทดสอบ ได้แก่ ช้างข้าวโพดและแกลบ ทำการแบ่งขนาดของชีวมวลตามขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างการทดสอบในหัวข้อ 2.1 หลังจากทำการเตรียมตัวอย่างดังกล่าวเรียบร้อยแล้ว นำชีวมวลที่ทำการแยกขนาดใส่ในชุดทดสอบเพื่อเริ่มทำการทดสอบ โดยเริ่มจากช้างข้าวโพดขนาด <1 mm <3 mm และ <5 mm ตามด้วยแกลบขนาด <1 mm <3 mm และ <5 mm ตามลำดับ ในการทดสอบแต่ครั้งจะทำการวัดความเร็วลมที่ป้อนเข้าสู่ระบบและความเร็วลมที่ออกจากระบบด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลอากาศและความดันที่เกิดขึ้นในระบบด้วยบานอมิเตอร์แบบตัว ในกาทดสอบแต่ละรอบจะทำการเปิดวาล์วที่อยู่ด้านบนท่อลมบริเวณทางออกของชุดทดสอบเพื่อควบคุมอัตราการ

ไหลของอากาศเมื่อผ่านห้องเผาไหม้ อีกทั้งยังเป็นการทดสอบเพื่อการควบคุมอัตราการไหลอากาศต่อความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้ โดยทำการควบคุมการเปิดของวาล์วเป็นเปิด สูงสุด 100% 50% และ 25% ตามลำดับ พร้อมทั้งดูระดับการลอยตัวของตัวอย่างชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบที่เส้นระดับการวัดตำแหน่งบริเวณด้านข้างชุดทดสอบ ในการทดสอบความเร็วลมที่ใช้ป้อนเป็นความเร็วที่ได้จากการออกแบบเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนให้กับเตาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$Q_{gas, aver} = \frac{1}{2} \times \left[Q_{in} \times \left(\frac{T_0 + 273}{273} \right) + Q_{ex} \times \left(\frac{T_0 + 273}{273} \right) \right] \quad (1)$$

- เมื่อ $Q_{gas, aver}$ คือ อัตราการไหลเฉลี่ยแก๊สรวม (m^3/s)
- Q_{air} คือ อัตราการไหลอากาศ (m^3/s)
- Q_{gas} คือ อัตราการไหลโปรโตวเซอร์แก๊ส (m^3/s)
- T_b คือ อุณหภูมิผิววัสดุเบด ($^{\circ}C$)
- T_0 คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^{\circ}C$)

เลขเรย์โนลด์เป็นเลขดัชนีที่ใช้ออกสภาพปรากฏการณ์การไหลของไหล จำนวนเลขเรย์โนลด์มีค่าขึ้นอยู่กับความเร็วการไหล ความหนืด ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อและความหนาแน่นของของไหล [10] การวิเคราะห์เลขเรย์โนลด์ของอากาศที่ไหลผ่านห้องเผาไหม้ของเตาแก๊สชีวมวลแสดงในสมการที่ 2

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2)$$

- เมื่อ Re คือ เลขเรย์โนลด์
- ρ คือ ความหนาแน่นอากาศ (kg/m^3)
- V คือ ความเร็วเฉลี่ยอากาศ (m/s)
- D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางห้องเผาไหม้ (m)
- μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์อากาศ ($Pa \cdot s$)

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

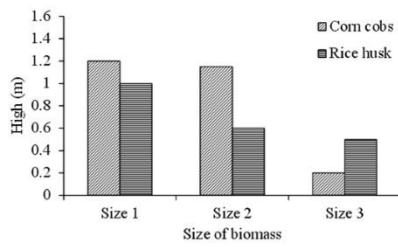
3.1 ผลกระทบชนิดและขนาดของชีวมวลต่อการลอยตัว

การทดลองการลอยตัวของช้างข้าวโพดและแกลบ พบว่าการใช้ช้างข้าวโพดให้การลอยตัวสูงกว่าการใช้แกลบ ในกรณีที่ขนาดชีวมวลต่ำกว่า 1 mm และ 3 mm ดังรูปที่ 3 ในขณะที่การใช้ช้างข้าวโพดที่มีขนาดต่ำกว่า 5 mm มีการลอยตัวที่ต่ำกว่าการใช้แกลบ สาเหตุที่ช้างข้าวโพดมีการลอยตัวสูงกว่าแกลบ เนื่องจากลักษณะและรูปร่างพื้นที่ผิวของช้างข้าวโพดมีสูงกว่าแกลบ [11] ดังรูปที่ 1 ซึ่งเมื่อมีลมมาปะทะจึงทำให้เกิดแรงยกหรือการลอยตัวได้ดีกว่าการใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ขณะเดียวกันเมื่อเปลี่ยนขนาดของชีวมวลทั้ง 2 ชนิดให้มีรูปร่างที่ใหญ่ขึ้น (size 3) ขนาดพื้นที่ผิวของแกลบเพิ่มสูงขึ้นประกอกับความหนาแน่นที่ต่ำอยู่แล้วโดยเฉลี่ย 96-106 kg/m^3 [5] ในขณะที่ช้างข้าวโพดมีความหนาแน่น 282 kg/m^3 [6] จึงทำให้แกลบสามารถ





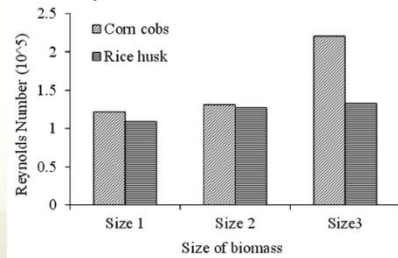
ลอยตัวได้สูงกว่า การใช้ซังข้าวโพดที่มีขนาดต่ำกว่า 1 mm และ 3 mm สามารถลอยตัวสูงกว่ากลบโดยเฉลี่ย 17-47% ความแตกต่างของขนาดเมื่อใช้ซังข้าวโพดแตกต่างกันค่อนข้างต่ำ แต่ในส่วนของการกลบมีความแตกต่างกันค่อนข้างสูงถึง 40% ส่วนของการใช้ชีวมวลที่มีขนาดต่ำกว่า 5 mm ให้การลอยตัวแตกต่างกับขนาดชีวมวลต่ำกว่า 1 mm ค่อนข้างสูง



รูปที่ 3 ผลกระทบของชนิดชีวมวลต่อการลอยตัว

3.2 ผลของเรย์โนลด์ต่ำสุดต่อการเริ่มลอยตัวชีวมวล

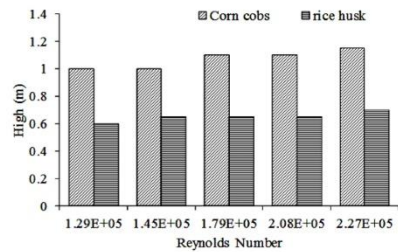
การทดสอบนี้เปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศเมื่อผ่านห้องเผาไหม้ด้วยการควบคุมการเปิดของวาล์วเป็น เปิด สูงสุด 100% 50% และ 25% ผลการทดสอบพบว่า การเปิดวาล์วสูงสุด 100% ส่งผลให้การลอยตัวของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น ทุกขนาดเชื้อเพลิงและชนิดเชื้อเพลิง ยกเว้นการใช้กลบที่มีขนาดต่ำกว่า 5 mm ดังแสดงผลในรูปที่ 6 การใช้ซังข้าวโพดที่มีขนาดต่ำกว่า 1-3 mm ให้อัตราการลอยตัวสูงกว่าการใช้กลบ การเปิดวาล์วควบคุมที่ 25% และ 50% ส่งผลต่อการลอยตัวซังข้าวโพดมีการลอยตัวต่ำสุด ในส่วนของกลบที่ขนาดต่ำกว่า 3-5 mm ให้ ความสูงการลอยตัวที่ใกล้เคียงกันเมื่อมีการเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศทั้ง 3 ระดับ



รูปที่ 4 ผลของเรย์โนลด์ต่ำสุดต่อการเริ่มลอยตัวชีวมวล

3.3 ผลกระทบของความเร็วมลต่อการลอยตัว

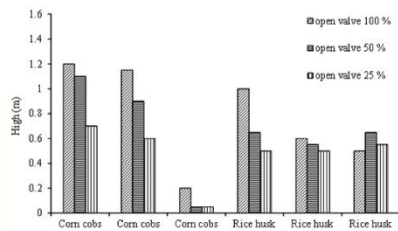
ผลการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการลอยตัวของชีวมวลพบว่าผลกระทบของความเร็วมลที่ป้อนต่อการลอยตัวของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด โดยการใช้ซังข้าวโพดให้ความสูงการลอยตัวอยู่ในช่วง 1-1.5 m ขณะเดียวกันในการใช้กลบจะมีความสูงของการลอยตัวอยู่ในช่วง 0.6-0.7 m ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความเร็วมลต่อการลอยตัว

3.4 ผลการเปิดวาล์วต่อการลอยตัวของชีวมวล

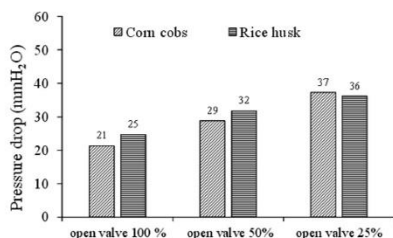
การทดสอบการควบคุมอัตราการไหลของอากาศเมื่อผ่านห้องเผาไหม้ด้วยการควบคุมการเปิดของวาล์วเป็น เปิด สูงสุด 100% 50% และ 25% ผลการทดสอบพบว่า การเปิดวาล์วสูงสุด 100% ส่งผลให้การลอยตัวของชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น ทุกขนาดเชื้อเพลิงและชนิดเชื้อเพลิง ยกเว้นการใช้กลบที่มีขนาดต่ำกว่า 5 mm ดังแสดงผลในรูปที่ 6 การใช้ซังข้าวโพดที่มีขนาดต่ำกว่า 1-3 mm ให้อัตราการลอยตัวสูงกว่าการใช้กลบ การเปิดวาล์วควบคุมที่ 25% และ 50% ส่งผลต่อการลอยตัวซังข้าวโพดมีการลอยตัวต่ำสุด ในส่วนของกลบที่ขนาดต่ำกว่า 3-5 mm ให้ ความสูงการลอยตัวที่ใกล้เคียงกันเมื่อมีการเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศทั้ง 3 ระดับ



รูปที่ 6 ผลการควบคุมการเปิดวาล์วต่อการลอยตัวของชีวมวล

3.5 ผลการควบคุมอัตราการไหลต่อความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้

การควบคุมอัตราการไหลของอากาศต่อความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้ การเปิดวาล์วควบคุมที่ 25% และ 50% ส่งผลให้ความดันในห้องเผาไหม้เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 เนื่องจากอากาศไม่สามารถไหลออกได้อย่างสะดวก บางส่วนมีการไหลย้อนกลับส่งผลให้เกิดความดันและชีวมวลไม่สามารถไหลขึ้นได้สูงสุด การปรับวาล์วที่ 100% มีความดันเกิดขึ้นในระบบอยู่ในช่วง 21-25 mmH₂O การปรับวาล์วที่ 50% มีความดันเกิดขึ้นในระบบอยู่ในช่วง 28-32 mmH₂O และการปรับวาล์วที่ 25% มีความดันเกิดขึ้นในระบบอยู่ในช่วง 36-38 mmH₂O



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบ

3.6 ขนาดชีวมวล ความเร็วลมและการเปิดวาล์วที่เหมาะสม

ผลจากการทดสอบและคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการนำไปออกแบบเตาแก๊สชีวมวลแบบฟลูอิดซ์เบดสรุปได้ว่าขนาดชีวมวลที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงขนาดต่ำกว่า 1-3 mm เนื่องจากให้การลอยตัวที่ค่อนข้างสูงและเสถียร สามารถใช้ได้ทั้งขี้ข้าวโพดและแกลบ ส่วนตัวเลขเรย์โนลด์ที่ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปออกแบบควรจะอยู่ในช่วง $1 \times 10^5 - 1.3 \times 10^6$ หรือคิดเป็นความเร็วลมที่ใช้ป้อนจะอยู่ในช่วง 6-7.3 m/s สำหรับการควบคุมอัตราการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้การเปิดวาล์วสูงสุดที่ 100% มีความเหมาะสมสูงสุดเนื่องจากให้แรงลอยตัวชีวมวลสูงสุดและความดันที่ตกคร่อมในระบบต่ำสุด

4. สรุป

- การใช้ชีวมวลที่มีขนาดต่ำกว่า 1-3 mm ให้อัตราการลอยตัวสูงกว่าการใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดต่ำกว่า 5 mm และการใช้ขี้ข้าวโพดให้การลอยตัวของเชื้อเพลิงสูงกว่าแกลบ
- ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้ขี้ข้าวโพดและแกลบเป็นเชื้อเพลิงที่มีขนาดอยู่ในช่วงที่ต่ำกว่า 1-3 mm มีค่าอยู่ในช่วง $1.09 \times 10^5 - 1.33 \times 10^6$
- การเปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้สูงสุด 100% ส่งผลให้ความดันตกคร่อมในห้องเผาไหม้ต่ำสุดโดยขี้ข้าวโพดและแกลบลอยตัวได้ดีกว่าการเปิดวาล์วที่ 25% และ 50%

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณการสนับสนุนทุนวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่ม ประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา และขอขอบคุณวิทยาลัย พลังงานทดแทนและศูนย์วิจัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษาครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

Bemgba Bevan Nyakuma, Anwar Johari, Arshad Ahmad, Tuan A. T. Abdullah, Mojtaba Mazangi. 2012. Design of a Bubbling Fluidized Bed Gasifier for the gasification of palm waste. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) 58, 85-88.

A. Johari, B. B. Nyakuma, A. Ali et al. 2014. Design of a Bubbling Fluidized Bed Gasifier for the thermochemical conversion of Oil Palm Empty Fruit Bunch Briquette. Applied Mechanics and Materials 493, 3-8.

Nestor Proenza Perez et al. (2014). Fluid-dynamic assessment of sugarcane bagasse to use as feedstock in bubbling fluidized bed gasifiers. Applied Thermal Engineering 73, 238-244

Young Doo Kim, Beom Jong Kim, Ji Hong Moon et al. 2013. Air-blown gasification of woody biomass in a bubbling fluidized bed gasifier. Applied Energy 112, 414-420.

Yaning Zhang, A.E. Ghaly, Bingxi Li. 2012. Physical properties of corn residues. Journal of Biochemistry and Biotechnology 8(2), 44-53.

Kumar S., Sangwan P., Dhankhar R. Mor V., Bidra S. 2013. Utilization of rice husk and their ash:A Review. Journal of Chemical and Environmental Sciences, 126-129.

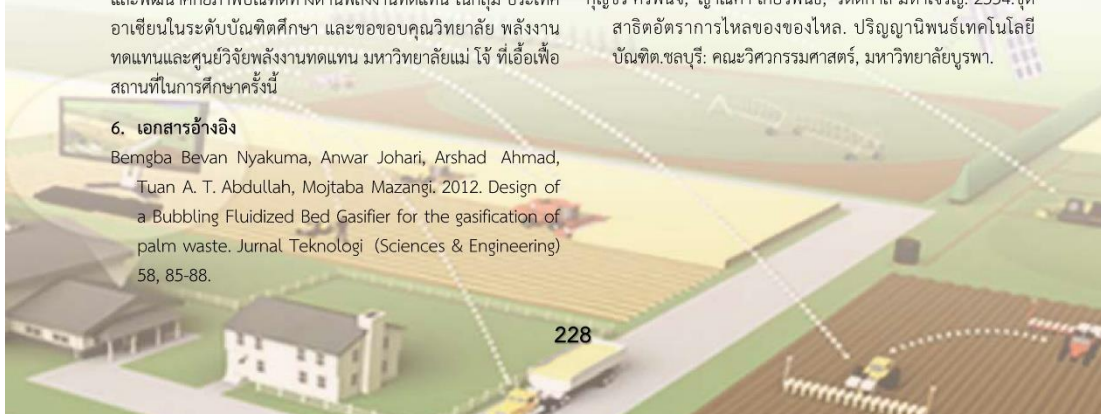
M.Doorvasan, S.Sathiyamurthy, S.Jayabal, K.Chidambaram. 2014. Moisture Content of Rice Husk Particulated Natural Fiber Polymer Composites Journal of Mechanical and Civil Engineering, 17-21.

วิชาชา ภูจินดา. 2557. ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและผลตอบแทนทางสังคมของการใช้พลังงานชีวมวลในระดับชุมชนและระดับครัวเรือน. กรุงเทพมหานคร: สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

สุนทร สืบคำ, ประพัฒน์ ทองจันทร์. 2555. การออกแบบและพัฒนาเครื่องวัดและคัดแยกเมล็ดพันธุ์ฝักซีฟรุ้ง. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สุทธิพันธ์ ก็ฬาแปง 2555. การศึกษาการอัดขึ้นรูปขี้ข้าวโพดด้วยระบบไฮดรอลิก. ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์.

กฤษกร ศรีทินิจ, ญาติินา เกี่ยวพันธ์, รัตติกาล มหาเจริญ. 2554. ชุดสาธิตอัตราการไหลของของไหล. ปริญญานิพนธ์เทคโนโลยีบัณฑิต.ชลบุรี: คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.



ISBN 978-974-474-059-5



การประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10

พลังงานยุคเปลี่ยนผ่าน

เล่าขานวิถีพอเพียง หล่อเลี้ยงชุมชนยั่งยืน

New Era of Community Energy



ณ หอประชุมเฉลิมพระเกียรติ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

ร่วมจัดโดย





สารบัญ

FC - 015	การสีทหรือของชิ้นงานที่ใช้น้ำมันหล่อลื่นชีวภาพสังเคราะห์เปรียบเทียบกับน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานปิโตรเลียม นางสาวรัชฎาภรณ์ อินเกิด	109
FC - 016	การวิเคราะห์คุณสมบัติและต้นทุนการผลิตด้านชีวภาพ โดยใช้กระบวนการโฟโรไลซิส นางสาวประภัสสร รัตนไพฑูลย์	120
FC - 017	การศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลของสัตว์ด้วยแหล่งน้ำที่แตกต่างกัน นางสาวศิริพร ศรีไตรรัตน์	128
FC - 018	สมรรถนะแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิดเบดเมื่อใช้ขี้ขี้วัวโตนเป็นเชื้อเพลิง นายพงศธร มณฑิพย์	134
FC - 019	การปรับปรุงเสถียรภาพของอิมัลชันชนิดน้ำในน้ำมันด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิคชนิดโรบ นายณรงค์ อินทรหม	143
FC - 020	สมรรถนะเตาชีวมวลเมื่อใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร นางสาวโสภารักษ์ รัตนะ	152
FC - 021	การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ชุมชนด้วยอากาศร้อนแบบสลับทิศทาง ที่ผลิตจากเตาชีวมวลประสิทธิภาพสูง นายภาสพงศ์ภัสส์ บัญรัตน์	158
FC - 023	การประเมินเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลไร้ควัน สำหรับการผลิตความร้อน ในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์ นายธนชาติ มหาวิน	166

Session : สิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชน

NC- 001	การใช้กระบวนการวิจัยเชิงปฏิบัติการแบบมีส่วนร่วมสู่วัฒนธรรม “การดูแลคุณภาพน้ำชุมชน” เพื่อการบริหารจัดการน้ำอย่างยั่งยืน นางสาวเดือนดา ราห์มาน	174
NC- 002	การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในการผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพจากระบบยูเอเอสบีขนาดเล็ก นายสุรเชษฐ์ กล้านรงค์	185
NC- 003	การศึกษาภาวะการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการปลูกข้าวโตนเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่ราบจังหวัดแพร่ นายศุภชัย เพชรธราวัต	191
NC- 004	การเพาะเลี้ยงสาหร่ายขนาดเล็กเพื่อผลิตก๊าซมีเทน มุ่งสู่การจัดการสิ่งแวดล้อม ในฟาร์มสุกรอย่างยั่งยืน: กรณีศึกษาจังหวัดเชียงใหม่ นางสาวรุ่งนภา เขียววิจิตร	199
NC- 005	การพัฒนา และติดตั้งกรีนรูฟเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากหลังคาสู่ภายในบ้าน นายวรัช พงษ์พรศรี	207
NC- 007	กรรมวิธีการผลิตไฟเบอร์ซีเมนต์ด้วยผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินเพื่อเป็นวัสดุสำหรับอาคาร นายสันต์ เกื้อหนู	214
NC- 008	การบริหารจัดการขยะในสถานศึกษาผ่านการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสม นายเด่นศักดิ์ หอมหวล	221
NC- 009	การศึกษาการเจริญเติบโตของต้นข้าว โดยการใช้แหล่งน้ำที่แตกต่างกัน นายณัฐภูมิ ขาวสะอาด	228



สมรรถนะแก๊สซิฟิเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง
Performance of Fluidized bed gasifier with using corn cobs as fueled.

พงศธร มนต์ทิพย์¹ นิกราน หอมดวง^{1*} ณัฐวุฒิ คุชฎี ชูรัตน์ ธารารักษ์¹ และเสริมสุข บัวเจริญ¹
¹ สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมรรถนะของระบบผลิตแก๊สซิฟิเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้ซังข้าวโพดซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง โดยมีการเลือกอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 2.5-2.7 ซึ่งเป็นอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีประมาณ 25-60% ซึ่งค่า A/F ทางทฤษฎีของซังข้าวโพดโดยเฉลี่ยการทดลองนี้เท่ากับ 5.12:1 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.6 และ 2.5 อุณหภูมิไอน้ำเดือดที่ใช้ในทดสอบประสิทธิภาพความร้อนด้วยการต้มน้ำ (Boiling test) อยู่ที่ประมาณ 95-98 °C และเมื่อปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.7 อุณหภูมิของน้ำไม่เกิดการเดือดโดยมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 85 °C การใช้อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.6 ส่งผลให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุดและมีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด โดยมีค่า 7.5 MJ/kWh และ 13.34% ตามลำดับ

คำสำคัญ: แก๊สซิฟิเออร์ ฟลูอิดไคซ์เบด ซังข้าวโพด วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

*Corresponding author: Tel.: 084-177-3632. E-mail address: nigranghd@gmail.com



บทนำ

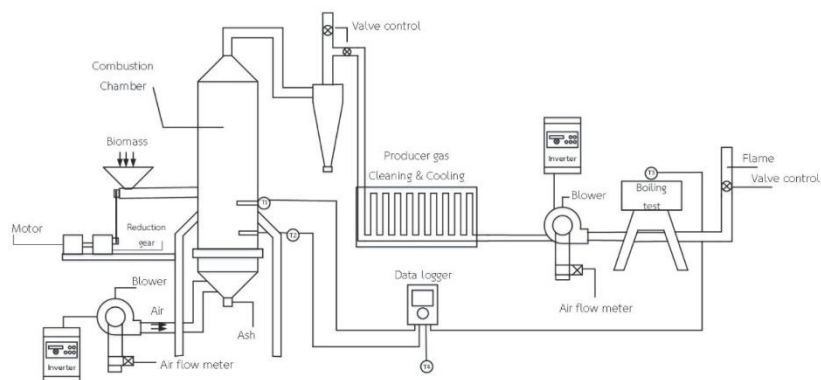
ในกระบวนการเปลี่ยนรูปทางเคมีความร้อน การเผาไหม้หรือการเปลี่ยนรูปด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดเมื่อเทียบกับการเผาไหม้โดยตรง อย่างไรก็ตามเนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในปริมาณสูง การนำเอาระบบเผาไหม้นี้ไปใช้ให้มีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีอยู่ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นแก๊สโดยใช้การเผาไหม้แบบจำกัดอากาศ ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ในช่วง 4-6 MJ/m³ [1] องค์ประกอบแก๊สที่ได้ ประกอบด้วย CO, H₂, CH₄, N₂, CO₂ และ O₂ โดย CO, H₂ และ CH₄ เป็นแก๊สที่ติดไฟได้ ดังนั้นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน งานวิจัยนี้จึงสนใจในการศึกษา วิจัย และประเมินสมรรถนะของระบบผลิตแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบดเมื่อใช้ขี้ข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง

วิธีการวิจัย

อุปกรณ์ วัสดุและเครื่องมือวัด

เตาแก๊สชีวมวล

การทดสอบเตาแก๊สชีวมวล ใช้หลักการเผาไหม้ด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันแบบฟลูอิดไคซ์เบด การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาจะอาศัยตัวกลางหรือวัสดุเบด ซึ่งตัวกลางที่อยู่บริเวณด้านล่างของเตาแก๊สชีวมวลจะถูกทำให้ร้อน เมื่อบ้อนชีวมวลเข้าไปในระบบ ชีวมวลจะเคลื่อนตัวชนกับตัวกลางที่ร้อนและเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนจนเกิดการเผาไหม้และกลายเป็นก๊าซอย่างรวดเร็วซึ่งขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ไพโรไลซิส และแก๊สซิฟิเคชัน จะเกิดในช่วงเดียวกัน ไม่มีการแบ่งแยกอย่างชัดเจน จึงทำให้มีน้ำมันดินเจือปนอยู่ในก๊าซเช่นเดียวกับระบบฟลักซ์เบดแบบไหลขึ้น [2] เตานี้เดิมเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่องและใช้ทรายเป็นวัสดุเบด ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 25.4 cm ความยาว 100 cm บ้อนอากาศด้านล่างของเตาด้วยพัดลมผ่านตะแกรงละเอียดโดยใช้พัดลมเป่าอากาศ ของ VENZ รุ่น SB-30 มอเตอร์ ½ HP 3 phase ขนาดท่อลมออก 2 inch การควบคุมความเร็วลมใช้อินเวอร์เตอร์ปรับความถี่กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ MITSUBISHI รุ่น FR-D700 1 phase 200 V ขนาด 4.2 A ด้านข้างมีช่องบ้อนเชื้อเพลิง การบ้อนชีวมวลใช้กระท้อและสายพานลำเลียงนำชีวมวลเข้าสู่เตาแก๊สชีวมวล ด้านล่างของเตาออกแบบให้มีตะแกรงและชุดกำจัดขี้เถ้า ด้านบนออกแบบให้มีท่อลำเลียงโปรติวเซอร์แก๊ส ขนาด 2 inch ชุดทำความสะอาดแก๊สประกอบด้วย ไชโคลนและเครื่องดักจับทาร์แบบใช้พื้นที่ผิวสัมผัส พร้อมชุดลดอุณหภูมิของโปรติวเซอร์แก๊สและชุดทดสอบประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวล (Water boiling test) ดังแสดงในรูปที่ 1

FC
018

รูปที่ 1 โดอะแกรมการทดสอบระบบผลิตแก๊ส

เครื่องมือวัดในการวิจัย

การวัดน้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนป้อนให้กับระบบผลิตโปรดีวเซอร์แก๊ส ใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัลของ DIGI รุ่น DS-530 ซึ่งน้ำหนักได้สูงสุด 60 kg ต่ำสุด 0.4 kg และมีความละเอียด 0.01 g การวัดอัตราการไหลอากาศใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัดใช้วัดความเร็วลมที่ป้อนเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ BENETECH รุ่น GM8901 สามารถวัดความเร็วลมอยู่ในช่วง 0-45 m/s ความแม่นยำ $\pm 3\%$ ความละเอียด 0.1 m/s การวัดความร้อนเตาแก๊สชีวมวลใช้วิธีการวัดแบบไม่สัมผัส โดยใช้อุปกรณ์วัดแบบอินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ของ CENTER รุ่น CENTER 350 วัดอุณหภูมิแบบใช้รังสีอินฟราเรดในช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง $-20-500\text{ }^{\circ}\text{C}$ เครื่องบันทึกอุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิแวดล้อมใช้ผลิตภัณฑ์ LITRON รุ่น TM-9478SD สามารถวัดอุณหภูมิได้พร้อมกัน 4 ช่อง ช่วงอุณหภูมิในการวัด $100-1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้คู่กับเทอร์โมคัปเปิลของ SPL รุ่น T_S/101 ชนิด TYPE K อุณหภูมิใช้งานสูงสุด $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ และเทอร์โมคัปเปิล รุ่น JB-35 อุณหภูมิใช้งานสูงสุด $800-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

วัสดุเชื้อเพลิงชีวมวลทดสอบ

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการวิจัยคือ ชังข้าวโพดที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการแปรรูปในการสีข้าวโพด โดยนำมาลดความชื้นด้วยการตากแห้งให้ความชื้นลดต่ำลงประมาณ 15% จากนั้นนำชังข้าวโพดมาลดขนาดโดยการบดหยาบด้วยเครื่องบดหยาบขนาดตะแกรง 10 mm และนำมาลดขนาดอีกครั้งโดยการบดละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียดขนาดตะแกรง 3 mm เพื่อให้ได้ชังข้าวโพดขนาดประมาณ 3 mm มาใช้ในการวิจัย ความหนาแน่นของชังข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 282 kg/m^3 [3] และมีค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ 18.04 MJ/kg [4] คุณสมบัติทางเคมีของชังข้าวโพดได้นำไปทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอมะนัง จังหวัดลำปาง [5] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของชีวมวลที่ใช้วิจัย

Proximate Analysis (wt. %)					Ultimate Analysis (wt. %)					LHV (MJ/kg)
Corn	Moisture	Ash	VM	FC	C	H	N	O	S	
cob	11.82	5.62	70.81	14.76	42.12	6.52	0.45	45.11	0.01	14.26

วิธีการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล

การทดสอบสมรรถนะของเตาแก๊สชีวมวล ใช้ซึ่งข้าวโพดเป็นชีวมวล การทดสอบปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทั้งหมด 3 ค่า ได้แก่ 2.5 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ ระยะเวลาในการทดสอบโดยการป้อนชีวมวลอย่างต่อเนื่องเฉลี่ยต่อครั้งประมาณ 90 min ใช้วิธีการต้มน้ำเป็นวิธีวัดประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวล โดยในช่วงเริ่มต้นทำการให้ความร้อนด้วยก๊าซ LPG พร้อมทั้งเปิดพัดลมป้อนอากาศปรับอัตราไหลอากาศเข้าสู่เตา ให้วัสดุเบดสัมผัสกับความร้อนเพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ได้ดีขึ้น แล้วทำการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาแก๊สชีวมวล เมื่อเตาแก๊สชีวมวลเกิดการติดไฟได้ดี จะทำการหยุดการให้ความร้อนด้วยก๊าซ LPG แล้วนำน้ำเข้ามาทดสอบการต้มน้ำ เริ่มจับเวลาและวัดอุณหภูมิ น้ำ อุณหภูมิผนังเตา อุณหภูมิเตา และอุณหภูมิแวดล้อม โดยทำการบันทึกค่าทุกๆ 5 min เป็นระยะเวลาประมาณ 60 min

การทดสอบระบบผลิตแก๊สชีวมวลแบบพลูอิโคซ์เบดจะทำการทดสอบเพื่อหาอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวล ซึ่งอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงคืออัตราส่วนระหว่างชีวมวลที่ป้อนให้กับระบบเทียบกับเวลา [5] ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$FC_b = \frac{M_b}{T} \quad (4)$$

เมื่อ FC_b คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h) M_b คือ มวลเชื้อเพลิงชีวมวล (kg) และ T คือ ระยะเวลาการใช้งานเตาแก๊สชีวมวล (h)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คืออัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้พลังงานเทียบกับพลังงานที่ระบบแก๊สชีวมวลผลิตได้ [5] ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$SEC = \frac{E}{Q_u} \quad (5)$$

เมื่อ SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kWh) E คือ อัตราการใช้พลังงาน (kJ/h) และ Q_u คือ พลังงานที่เตาแก๊สชีวมวลผลิตได้ (kW)

ประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีววมวล คืออัตราส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (Q_{useful}) เทียบกับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตแก๊สชีววมวล (Q_{input}) คำนวณได้จากการทดลองโดยการต้มน้ำ (Water boiling test) [5] และวิเคราะห์ที่ได้จากสมการดังต่อไปนี้

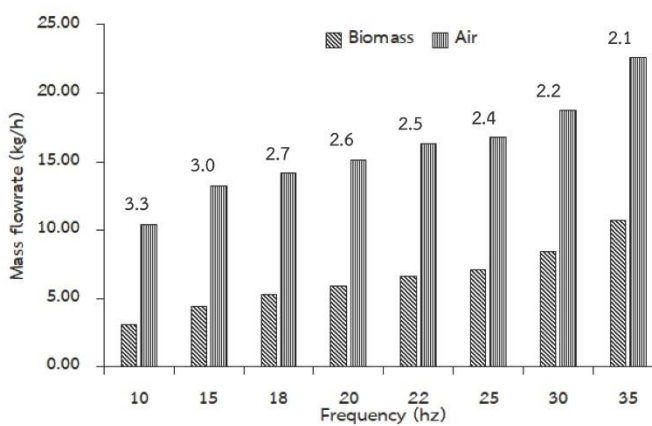
$$\eta_g = \frac{[m_{w,1} \times C_{p,w} (T_{w,2} - T_{w,1})] + [m_{w,2} \times h_{fg}]}{m_{\text{fuel}} \times \text{LHV}_U} \quad (6)$$

เมื่อ $m_{w,1}$ คือ มวลของน้ำหนักทั้งหมด (kg) $m_{w,2}$ คือ มวลของน้ำที่ระเหย (kg) $C_{p,w}$ คือ ความจุความร้อนเฉพาะของน้ำ (kJ/kg K) h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ (kJ/kg) $T_{w,2}$ คือ อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (°C) $T_{w,1}$ คือ อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น (°C) m_{fuel} คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg) และ LHV คือ ค่าความร้อนเชื้อเพลิงชีววมวล (kJ/kg)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิง

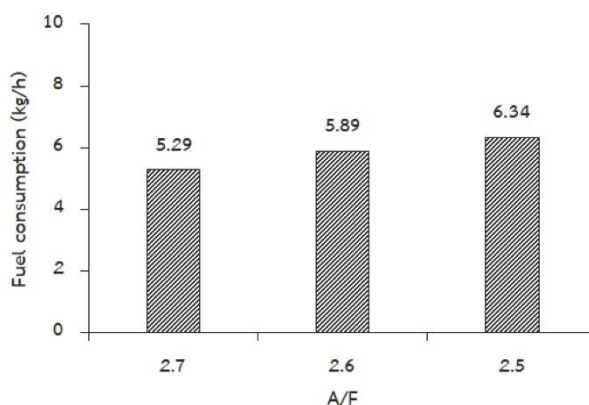
การวิเคราะห์อัตราการป้อนอากาศต่ออัตราการป้อนซังข้าวโพด การปรับความถี่กระแสไฟฟ้าส่งผลให้อัตราการป้อนอากาศและอัตราการป้อนชีววมวลเพิ่มสูงขึ้น ที่ความถี่ 10-35 Hz ดังแสดงในรูปที่ 2 ค่า A/F Ratio เท่ากับ 3.3 3.0 2.7 2.6 2.5 2.4 2.2 และ 2.1 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามในการเลือก A/F สำหรับการทดลองระบบผลิตแก๊สแบบพลูอิดซ์เบด ค่า A/F ที่เลือกจะต้องต่ำกว่าค่า A/F ทางทฤษฎี 25-60% [6] ซึ่ง A/F ทางทฤษฎีของซังข้าวโพดโดยเฉลี่ยการทดลองนี้เท่ากับ 5.12:1 [7] ดังนั้นในการเลือกค่าทดลองจึงเลือก A/F ที่ 2.5-2.7 เป็นตัวอย่างในการทดลองซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับทางทฤษฎี



รูปที่ 2 อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิง

2. การวิเคราะห์อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล

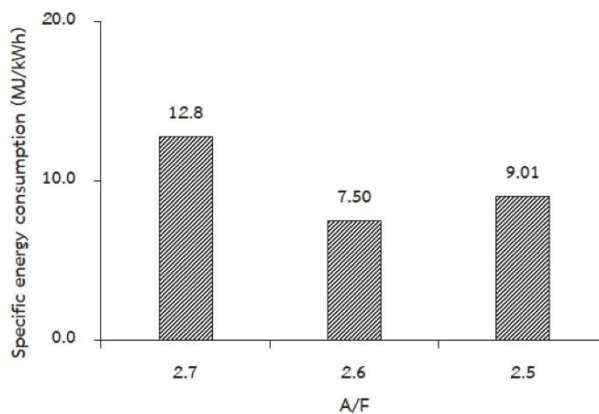
จากการเปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อกำหนดอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ที่ 2.7 2.6 และ 2.5 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.5 ให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมากที่สุดอยู่ที่ 6.34 kg/h เนื่องจากมีการเพิ่มปริมาณอากาศส่งผลให้ความเร็วของเปลวไฟและอัตราการเผาไหม้ชีวมวลเพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลมากที่สุด รองลงมาคือปรับอัตราส่วนอากาศต่อชีวมวลที่ 2.6 และ 2.7 ให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล 5.89 kg/h และ 5.29 kg/h ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล

3. การวิเคราะห์อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

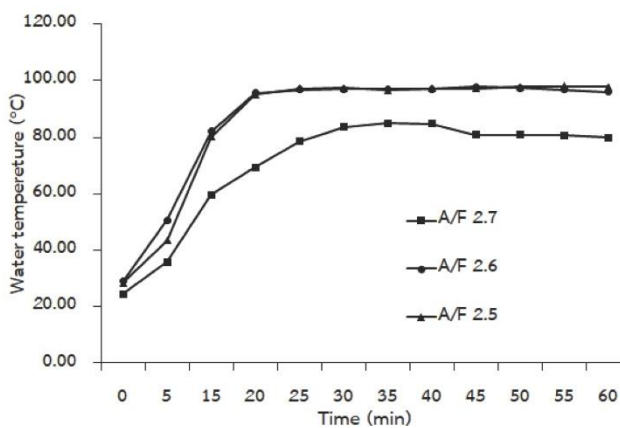
การใช้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.6 ส่งผลให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด การใช้ A/F ต่ำกว่า 2.6 หรือสูงกว่า 2.6 ส่งผลให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเกิดจากอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อหน่วยเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ลดลง [1] จึงส่งผลต่อค่าความร้อนของแก๊สที่ผลิตได้ อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดและต่ำสุดของขังข้าวโพดที่ A/F 2.5-2.7 เฉลี่ย 7.5 และ 12.8 MJ/kWh ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

4. อุณหภูมิการเดือดของน้ำจากระบบผลิตแก๊สชีววมวล

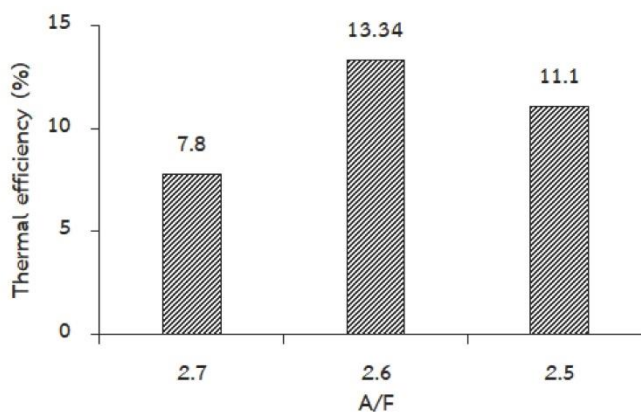
การพิจารณาอุณหภูมิการเดือดของน้ำในขณะที่ทำการทดสอบระบบผลิตแก๊สชีววมวล เมื่อกำหนดอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงอยู่ที่ 2.7 2.6 และ 2.5 ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลการศึกษาพบว่า การใช้อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.6 และ 2.5 อุณหภูมิที่น้ำเดือดอยู่ที่ประมาณ 95-98 °C ในขณะที่ปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.7 อุณหภูมิของน้ำไม่เกิดการเดือดโดยมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 85 °C สาเหตุที่การปรับ A/F 2.7 ไม่เกิดการเดือดของน้ำ เกิดจากความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สมีค่าต่ำเกินไป เมื่อนำไปใช้ในการต้มน้ำจึงส่งผลให้อุณหภูมิไม่เกิดการเดือด



รูปที่ 5 อุณหภูมิการเดือดของน้ำจากระบบผลิตแก๊สชีววมวล

5. ประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวล

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวล พบว่าการปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.6 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 13.34% ถัดมาเป็น 2.5 และ 2.7 โดยมีประสิทธิภาพ 11.11% และ 7.8% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 อย่างไรก็ตามเนื่องจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพนั้นเป็นการวิเคราะห์โดยการต้มน้ำ ดังนั้นประสิทธิภาพจึงเกิดจากเตาผลิตแก๊สชีววมวลกับหัวเตารวมกัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามถ้าวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแก๊สซิไฟเออร์ ด้วยวิธีการ cold gasification ซึ่งเป็นการนำเอาไปรคิวเซอร์แก๊สไปวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของแก๊สซิไฟเออร์จะอยู่ในช่วง 40-45% [8]



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สชีววมวล

สรุปผลการวิจัย

- อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ทำการทดลองคือ 2.7 2.6 และ 2.5 ซึ่งต่ำกว่าค่า A/F ทางทฤษฎี 25-60%
- อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 5-7 kg/h
- การใช้อัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.6 ส่งผลให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุดและมีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด โดยมีค่า 7.5 MJ/kWh และ 13.34% ตามลำดับ
- การปรับอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.6 และ 2.7 ให้อุณหภูมิน้ำเดือดที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพความร้อนด้วยการต้มน้ำ (Boiling test) อยู่ที่ประมาณ 95-98 °C และเมื่อปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 2.5 อุณหภูมิของน้ำไม่เกิดการเดือดโดยมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 85 °C



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการวิจัยความร่วมมือไทย-จีน ที่เอื้อเพื่อเชื้อเพลิงชีวมวลพร้อมทั้งอุปกรณ์สำหรับการวิจัย และขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน และศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Food and Agriculture Organization (FAO). (1986). Wood gas as engine fuel. Mechanical Wood Products Branch Forest. Italy.
- [2] Jhon Jairo Ramirez Behainne. (2014). Performance analysis of an air-blown pilot fluidized bed gasifier for rice husk. **Energy for Sustainable Development**. 18, 75–82.
- [3] Yaning Zhang, A.E. Ghaly, Bingxi Li. (2012). Physical properties of corn residues. **Journal of Biochemistry and Biotechnology**. 8(2), 44-53.
- [4] วิชาสา กุจินดา. (2557). “ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและผลตอบแทนทางสังคมของการใช้พลังงานชีวมวลในระดับชุมชนและระดับครัวเรือน”. กรุงเทพมหานคร: สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- [5] นิกราน หอมดวงและคณะ (2560). “สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลแบบป้อนต่อเนื่องและป้อนเป็นช่วงเมื่อใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง” , ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ประจำปี 2560, วันที่ 31 พฤศจิกายน - 2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส จังหวัดเชียงใหม่.
- [6] Reed, T.B. and A. Das. (1988). Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. Superintendent of Documents U.S. Government Printing Office. Washington.
- [7] Thanachat Mahawan, Nigran Homdoun et al. (2016). “Application of gasification technology for design household, smokeless biomass stove”, **proceeding of 23rd Tri-U international Joint Seminar and Symposium**, 23-28 October 2016. Bogor Agricultural University, Indonesia
- [8] นิกราน หอมดวงและคณะ (2554). “สมรรถนะเครื่องยนต์สูบน้ำการเกษตรเมื่อใช้พลังงานชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง” , ใน การประชุมวิชาการการถ่ายทอดพลังงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2554, วันที่ 11-12 มีนาคม 2554 ณ โรงแรมเชียงใหม่แกรนด์วิว จังหวัดเชียงใหม่.



14th Conference on Energy Network of Thailand
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

13 - 15 มิถุนายน 2561 ณ โนโวเทล ระยอง

Proceeding



การผลิตชิ้นแก้วด้วยเทคโนโลยีแก๊สซีพีเคชั่นสำหรับเครื่องยนต์ขนาดเล็กเพื่อผลิตไฟฟ้า	634
การประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากผักตบชวาและแกลบ	642
Preliminary Prediction of Small Wind Turbines Power Output in a Building-Obstructed Wind-Flow Area Using Anemometer Measuring Technique	646
การศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของการผลิตเอทานอลจากชานอ้อย	653
กระบวนการสอบเทียบเพื่อหาค่าการตอบสนองและคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องวัดรังสีรวมภาคสนาม	661
ผลของอัตราส่วนของเปลือกทุเรียนโดยหมักร่วมกับมูลนกกระทาเพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพ	665
การศึกษาสมรรถนะของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาโดมที่ติดตั้งอุปกรณ์เก็บสะสมพลังงานความร้อนแบบ ใช้สารเปลี่ยนเฟส	671
การปรับปรุงคุณภาพแก๊สชีวภาพจากมูลโคโดยการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	676
การศึกษาความคุ้มค่าของการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากหลายปาล์มเปล่า	683
การผลิตแก๊สโดยเตาแก๊สซีพีเออร์แบบบดหุ้ดหนึ่งอากาศไหลลง ขนาด 10 kW จากวัสดุเหลือทิ้งจากต้นตาลโดนด	689
ศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากซีลื้ออัดเม็ด	695
การผลิตถ่านอัดแท่งจากวงตาลโดนผสมแกลบโดยมีกากน้ำตาลเป็นตัวประสาน	703
การทดสอบประสิทธิภาพพลังงานในเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผลิตจากอ้อยและฟางข้าว	707
การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของใบพัดชนิดกึ่งหันลมแบบดาร์ริอัสที่ใช้ NACA0021 โปรไฟล์	712
การประเมินค่าความร้อนของกระบวนการทอรีแพคชั่นจากวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ	718
การเพิ่มประสิทธิภาพระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์โดยวัสดุกลิ้งความร้อน	724
สมรรถนะเตาชีวมวลระดับครัวเรือนเมื่อใช้ชีวมวลอัดเม็ดและอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง	729
กระบวนการทอรีไฟด์วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยเทคนิคคลื่นไมโครเวฟ	734
การปลดปล่อยก๊าซเสียและอัตราการสิ้นเปลืองของเชื้อเพลิงอิมัลชัน (ดีเซล-น้ำ-ไบโอดีเซล) ในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร	740
การลดมลพิษจากเครื่องยนต์อัตรเบ็ดโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลปาล์มผสมกับสารเติมแต่งนาโนซิงค์ออกไซด์	745
ผลการปรับอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบฟลูอิดเบตแก๊สซีพีเออร์	751
การใช้สารลดแรงตึงผิวร่วมในการผลิตเชื้อเพลิงอิมัลชันเพื่อทดสอบในเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร	756
สมรรถนะเครื่องยนต์และมลพิษของเชื้อเพลิงทดแทนจากกระบวนการอิมัลชันของน้ำมันพืชพลาสติกและเอทานอลความบริสุทธิ์ต่ำ ..	762
คุณสมบัติเชื้อเพลิงอัดเม็ดผลิตจากกากตะกอนพลาสติกผสมชีวมวล	769
การศึกษาเปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากน้ำอ้อยและกากน้ำตาล	773
การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร โดยใช้ตัวกลางประเภทในลอน	779
ผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาทอรีแพคชั่นที่มีต่อคุณสมบัติวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	785
การสร้างชั้น Local Back Surface Field (LBSF) ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนโดยวิธีการประทับลายด้วย Flash foam	791
การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำมันสัตว์โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	795
การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิธินัจจากเถ้าแกลบข้าวร่วมกับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์	800

ผลการปรับอัตราส่วนสมมูลที่มีต่อสมรรถนะการทำงานของระบบฟลูอิดเบดแก๊สซิไฟเออร์
Effect of Equivalence Ratio on Fluidized Bed Gasifier Performance.

พงศธร มนต์พิทย¹, ชูรัตน์ อารารักษ์¹, เสริมสุข บัวเจริญ¹, ณัฐภูมิ คุชฎี¹ และ นิกราน หอมดวง¹

¹ วิทยาลัยพลังงานทดแทน

*ผู้ติดต่อ: E-mail: nigranghd@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ 084-177-3632, เบอร์โทรสาร 053-878333

บทคัดย่อ

RE-01-109

ประเทศไทยมีศักยภาพทางด้านชีวมวลที่สูง ดังนั้นการนำวัสดุชีวมวลมาผลิตเป็นพลังงานจึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากำหนดชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นแก๊สเชื้อเพลิง โดยเป็นการใช้เทคโนโลยีแก๊สซิไฟเออร์มาเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนรูปพลังงาน งานวิจัยนี้เน้นการทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดเบดโดยใช้ขี้ข้าวโพดจากวัสดุเหลือทิ้งในการแปรรูปจากกระบวนการสัชชาวัต การทดสอบทำการปรับอัตราส่วนสมมูลทั้งหมด 3 ค่า คือ 0.3 0.6 และ 0.9 ผลการศึกษาพบว่าการปรับอัตราส่วนสมมูลจะมีผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบฟลูอิดเบดแก๊สซิไฟเออร์โดยการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 และ 0.9 อุณหภูมิของน้ำที่เกิดจากการเดือดโดยมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 91 °C การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ส่งผลให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมีค่าต่ำสุดโดยมีค่า 4.51 MJ/kWh ในขณะที่มีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดของระบบมีค่าเท่ากับ 22.16%

คำหลัก: อัตราส่วนสมมูล แก๊สซิไฟเออร์ ฟลูอิดเบด ขี้ข้าวโพด

Abstract

Thailand was high potential the biomass. The use of biomass in to energy was high suitable. The objective of this research was to study and provide agricultural wastes produce to the producer gas with using gasification technology was energy conversion. This research was focus on experiment and analyzed the performance of the fluidized bed gasifier. The biomass was used corn cob from corn cob mill and adjusted equivalence ratio were of 0.3, 0.6 and 0.9. The results were found that, adjusting of equivalence ratio was affected on the performance of the fluidized bed gasifier which adjusted at 0.6 and 0.9 was leading to boil water between 98-100 °C while adjusted at 0.3 the temperature of water was average of 91 °C. The adjusting equivalence ratio were of 0.6 was lower specific energy consumption was about 4.51 MJ/kWh while the higher thermal efficiency was about of 22.16%.

Keywords: Equivalence ratio, Gasifier, Fluidized bed, corn cob

1. บทนำ

พลังงานถือเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์และมีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศในปัจจุบัน ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทยมีปริมาณที่สูงซึ่งมีมากกว่า 62 ล้านตันต่อปี [1] ที่ผ่านมามีการนำเอาชีวมวลมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล มีปริมาณและประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เป็นผลจากลักษณะและคุณสมบัติชีวมวลที่มีข้อจำกัดทั้งในด้านความหนาแน่น รูปร่าง และค่าความร้อนที่ต่ำ การพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลโดยใช้เทคโนโลยีเพิ่มความหนาแน่นจำเป็นต้องใช้พลังงานในปริมาณที่สูงและก่อให้เกิดการใช้ดินทุนค่อนข้างสูง ขณะเดียวกันการนำชีวมวลไปใช้ในการเผาไหม้โดยตรงก็ประสบปัญหาในเรื่องมีประสิทธิภาพความร้อนที่ต่ำโดยเฉลี่ยต่ำกว่า 20% การแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงแก๊สโดยการใช้นิวเคลียร์แก๊สซิไฟเออร์เป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีความน่าสนใจและให้ประสิทธิภาพความร้อนค่อนข้างสูงโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 40-70% [2] ในอดีตการนำเอาชีวมวลไปใช้ในรูปแบบแก๊สมีการศึกษาในระบบฟิชเชอร์เบดเป็นส่วนใหญ่ซึ่งได้แก่ระบบผลิตแก๊สแบบไหลลง ไหลขึ้น และไหลขวาง ชีวมวลที่นำมาใช้จะต้องมีการสร้างให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-3 cm ไม่สามารถใช้เชื้อเพลิงที่เป็นผง เช่น ขี้เลื่อยหรือเศษวัสดุอื่นได้ถ้าไม่ขึ้นรูปให้เป็นแท่งหรือเม็ด ด้วยลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีอยู่ การนำเอาเทคโนโลยีแก๊สซิไฟเออร์แบบฟลูอิด

เบดมาใช้จึงมีความน่าสนใจและมีความเป็นไปได้ เนื่องจากสามารถเผาได้ทั้งเศษวัสดุที่เป็นผงและมีความยืดหยุ่นเชื้อเพลิงสูง [3] ส่วนในด้านการศึกษาเทคโนโลยีในปัจจุบันยังไม่แพร่หลายในเชิงวิชาการ งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการพัฒนา ศึกษาและทดสอบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดเบดที่ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง (ขี้ข้าวโพด) โดยเน้นการทดสอบและวิเคราะห์ผลของสมรรถนะระบบผลิตแก๊ส ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในเชิงวิชาการและเป็นแนวทางในการจัดการเชื้อเพลิงชีวมวลหรือการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมในอนาคตของไทย

2. วิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์ วัสดุและเครื่องมือวัด

ระบบผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สแบบฟลูอิดเบด

ชุดผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สแบบฟลูอิดเบดมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ชุดผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ชุดลดอุณหภูมิและความสะอาด และสุดท้ายชุดหัวเผาแก๊สร้อน

เตาผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สออกแบบให้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ 25.4 cm ความยาว 100 cm ป้อนอากาศจากด้านล่างของตัวเตาด้วยเครื่องป้อนอากาศผ่านตะแกรงละเอียด โดยใช้เครื่องป้อนอากาศของ VENZ รุ่น SB-30 มอเตอร์ ½ HP 3 phase ขนาดท่อลมออก 2 inch การควบคุมความเร็วลมใช้

อินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ MITSUBISHI รุ่น FR-D700 1 phase 200 V ขนาด 4.2 A ปรับความถี่กระแสไฟฟ้า

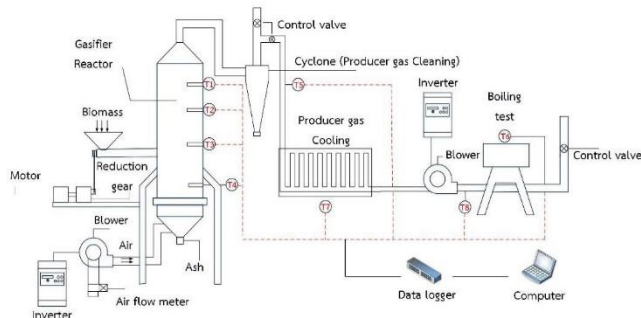
ชุดลดอุณหภูมิใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สให้กับน้ำ โดยท่อที่ใช้แลกเปลี่ยนเป็นท่อขนาด 2 inch ติดตั้งในถังน้ำที่มีขนาดน้ำบรรจุ 20 ลิตร ทำความสะอาดติดตั้งไฮโคลน เพื่อดักจับฝุ่นและน้ำมันดิน

การทำงานของระบบผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส โดยใช้หลักการเผาไหม้แบบจำกัดอากาศด้วยเทคโนโลยีแก๊สซีพีเคชั้นแบบฟลูอิดไอส์วัสดุเบดที่ใช้คือ ทราย จะทำหน้าที่กระจายอุณหภูมิภายในเตา การควบคุมความเร็วรอบการป้อนเชื้อเพลิงใช้อินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของ Schneider Electric รุ่น Ativar 312 ด้านล่างของเตาออกแบบให้มีช่องสำหรับกำจัดขี้เถ้า ด้านบนออกแบบให้มีท่อสำลียงโปรตีนเซอร์แก๊ส ขนาด 2 inch ใช้ในการสำลียงโปรตีนเซอร์แก๊สเข้าสู่หัวเผาแก๊สร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1

เครื่องมือวัดในการวิจัย

การวัดน้ำหนักเชื้อเพลิงสำหรับการทดสอบระบบผลิตแก๊สใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลของ CST รุ่น CDR-30 ชั่งน้ำหนัก

ได้สูงสุด 60 kg ต่ำสุด 0.4 kg และมีความละเอียด 0.01 g การวัดอัตราการไหลของอากาศและแก๊สใช้เครื่องวัดของ Lutrom Electronic รุ่น YK-80 AM แบบใบพัดโลหะสามารถวัดความเร็วอยู่ในช่วง 0.4–35 m/s ความละเอียด 0.1 m/s ค่าความคลาดเคลื่อน ±2% อุณหภูมิช่วงที่สามารถใช้งานอยู่ที่ 0–60 °C ความละเอียด 0.1 °C การวัดความร้อนตามผลิตภัณฑ์แก๊สชีวมวล อุณหภูมิน้ำร้อนและอุณหภูมิแวดล้อมใช้ เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ ADVANTECH รุ่น USB-4718 สามารถวัดอุณหภูมิได้พร้อมกัน 8 ช่อง และใช้ควคูปกับเทอร์โมคัปเปิลแบบ Chromel-Alumel ยี่ห้อ SPL รุ่น T_S/109 type K ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 22 mm และความยาว 150 mm เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 800 °C โดยใช้วัดอุณหภูมิที่จุด T1-T4 เทอร์โมคัปเปิล ยี่ห้อ SPL รุ่น T_S/102 type K ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 5 mm ใช้วัดอุณหภูมิที่จุด T5 และ T8 เทอร์โมคัปเปิล ยี่ห้อ SPL รุ่น T_S/101 type K ใช้วัดอุณหภูมิที่จุด T6 และเทอร์โมคัปเปิล ยี่ห้อ FW SYSTEM รุ่น FWK/1A type K ใช้วัดอุณหภูมิที่จุด T7 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างการทดลองระบบผลิตแก๊สชีวมวล

วัสดุเชื้อเพลิงชีวมวลทดสอบ

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษาวิจัยคือ ช้างข้าวโพด โดยก่อนทำการทดสอบนำเมล็ดความชื้น ด้วยการตากแห้งให้ความชื้นลดลงประมาณ 10% จากนั้นนำช้างข้าวโพดมาลดขนาดโดยการบดหยาบด้วยเครื่องบดหยาบขนาดตะแกรง 10 mm และทำการร่อนเพื่อลดขนาด เพื่อให้ได้ขนาดประมาณ 3-5 mm ความหนาแน่นของช้างข้าวโพดมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 132.6 kg/m³ [4] และมีค่าความร้อนอยู่ที่ประมาณ 14.26 MJ/kg [4] คุณสมบัติทางเคมีของช้างข้าวโพดนำไปทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอน้ำแม่จาง จังหวัดลำปาง [5] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของช้างข้าวโพด

Proximate Analysis	
Moisture	11.82 %
Ash	5.62 %
VM	70.81 %
FC	14.76 %
Ultimate Analysis	
C	41.12 %
H	6.52 %
N	0.45 %
O	45.11 %
S	0.01 %
LHV	14.26 MJ/kg

2.2 วิธีการทดลอง

การทดสอบสมรรถนะของระบบผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส ใช้ช้างข้าวโพดเป็นชีวมวล โดยการทดสอบปรับอัตราส่วนสมมูล 3 ค่า ได้แก่ 0.3 0.6 และ 0.9 ตามลำดับ ระยะเวลาในการทดสอบโดยการป้อนชีวมวลอย่างต่อเนื่องเฉลี่ยต่อครั้งประมาณ 90 min ใช้

วิธีการต้มน้ำ (Water boiling test) เป็นวิธีวัดประสิทธิภาพความร้อนเตาผลิตไพรตวเซอร์แก๊ส

ในช่วงเริ่มต้นทำให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม พร้อมทั้งเปิดพัดลมป้อนอากาศปรับอัตราไหลอากาศเข้าสู่เตาเพื่อให้วัสดุเบดลัมผัสกับความร้อนช่วยให้เกิดการเผาไหม้ได้ดีขึ้น แล้วทำการป้อนซึ่งข้าวโพดเข้าสู่เตาผลิตไพรตวเซอร์แก๊สอย่างต่อเนื่อง เมื่อเตาผลิตไพรตวเซอร์แก๊สเกิดการติดไฟได้ดี จะทำการหยุดการให้ความร้อนด้วยก๊าซหุงต้ม จากนั้นนำน้ำเข้ามาทดสอบการต้มน้ำ เริ่มจับเวลาและวัดอุณหภูมิที่จุด T6 อุณหภูมิเตาที่จุด T1-T4 อุณหภูมิของแก๊สที่ผ่านการทำความสะอาด้วยชุดทำความสะอาที่จุด T5 อุณหภูมิของแก๊สที่ผ่านการลดอุณหภูมิด้วยชุดลดอุณหภูมิที่จุด T6 และอุณหภูมิแวดล้อมที่จุด T7 โดยทำการบันทึกค่าทุก ๆ 5 min เป็นระยะเวลาประมาณ 60 min

2.3 การประเมินสมรรถนะระบบ

การประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไพรตวเซอร์แก๊สแบบฟลูอิดไคเบต ประกอบด้วย อัตราการสิ้นเปลืองชีวมวล อัตราส่วนสมมูล อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะและประสิทธิภาพความร้อนระบบผลิตไพรตวเซอร์แก๊ส รายละเอียดของสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

อัตราการสิ้นเปลืองชีวมวลคืออัตราส่วนระหว่างซึ่งข้าวโพดที่ป้อนให้กับระบบผลิตไพรตวเซอร์แก๊สเทียบกับระยะเวลาในการทดสอบ [6] ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 1

$$FC_{corn} = \frac{M_{corn}}{t} \tag{1}$$

เมื่อ FC_{corn} คือ อัตราการสิ้นเปลืองชีวมวล, kg/h
 M_{corn} คือ มวลเชื้อเพลิงชีวมวล, kg
 t คือ ระยะเวลาการใช้งานเตาผลิตไพรตวเซอร์แก๊ส, h

อัตราส่วนสมมูลเป็นค่าที่แสดงอัตราส่วนน้ำหนักอากาศต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงที่แท้จริงเปรียบเทียบกับอัตราส่วนน้ำหนักของอากาศต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงตามทฤษฎี ค่าอัตราส่วนสมมูลเป็นค่าอัตราส่วนที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งมีผลต่อองค์ประกอบและค่าความร้อนของไพรตวเซอร์แก๊ส ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 2 [6]

$$ER = \frac{A/F_{ac}}{A/F_{th}} \tag{2}$$

เมื่อ A/F_{ac} คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักอากาศต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงที่ใช้จริง
 A/F_{th} คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักอากาศต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงตามทฤษฎี
 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะคืออัตราส่วนระหว่างอัตราการใช้พลังงานเปรียบเทียบกับพลังงานที่ระบบผลิตไพรตวเซอร์แก๊สผลิตได้ [6] ซึ่งวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 3

$$SEC = \frac{E}{Q_{corn}} \tag{3}$$

เมื่อ SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ, MJ/KWh
 E คือ อัตราการใช้พลังงาน, kJ/h

Q_{corn} คือ พลังงานที่ระบบผลิตได้, kW

ประสิทธิภาพความร้อนระบบผลิตไพรตวเซอร์แก๊สคืออัตราส่วนของพลังงานที่นำไปใช้ประโยชน์ (Q_{useful}) เทียบกับพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตแก๊สชีวมวล (Q_{input}) คำนวณได้จากการทดสอบโดยการต้มน้ำ (Water boiling test) [7] และวิเคราะห์ได้จากสมการที่ 4

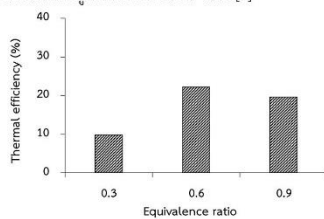
$$\eta_G = \frac{[m_{L,1} \times C_{p,w} (T_{L,b} - T_{L,i})] + [m_{L,2} \times h_{fg}]}{m_{corn} \times LHV_{corn}} \tag{4}$$

เมื่อ $m_{L,1}$ คือ มวลของของเหลวทั้งหมด, kg
 $m_{L,2}$ คือ มวลของของเหลวที่ระเหย, kg
 $C_{p,w}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ, มีค่า 4.186 kJ/kg °C
 h_{fg} คือ ความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ, มีค่า 2,257 kJ/kg
 $T_{L,b}$ คือ อุณหภูมิจุดเดือดของเหลว, °C
 $T_{L,i}$ คือ อุณหภูมิของของเหลวเริ่มต้น, °C
 m_{corn} คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด, kg
 LHV_{corn} คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล, kJ/kg

3. ผลการทดลอง

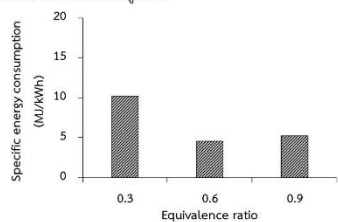
3.1 ประสิทธิภาพความร้อน

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตไพรตวเซอร์แก๊ส พบว่าการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 22.16% ถัดมาเป็น 0.9 และ 0.3 โดยมีประสิทธิภาพ 19.59 และ 9.82% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามเนื่องจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเป็นการวิเคราะห์โดยการต้มน้ำ ดังนั้นประสิทธิภาพจึงเกิดจากเตาผลิตไพรตวเซอร์แก๊สร่วมกับหัวเผาแก๊ส ส่งผลให้ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามถ้าวิเคราะห์ประสิทธิภาพของแก๊สซิฟิเออร์ ด้วยวิธีการ cold gas efficiency ซึ่งเป็นกรนำเอาไพรตวเซอร์แก๊สไปวิเคราะห์องค์ประกอบแก๊สประสิทธิภาพของระบบแก๊สซิฟิเออร์ ประสิทธิภาพจะอยู่ในช่วงประมาณ 50-70% [8]



รูปที่ 2 ประสิทธิภาพความร้อนของแก๊สซิฟิเออร์
3.2 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

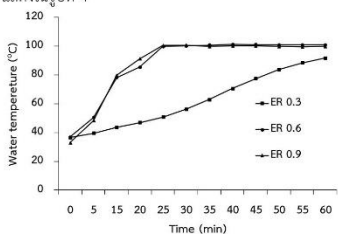
การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ต่ำหรือสูงกว่า 0.6 ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเกิดจากอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อหน่วยเพิ่มขึ้น เนื่องจากองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ลดลง [9] จึงส่งผลต่อความร้อนของปฏิกิริยาเทอร์โมเคมีที่เกิดขึ้นได้ เมื่อปรับอัตราส่วนสมมูลส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะอยู่ที่ 4.51 5.21 และ 10.8 MJ/kWh ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

3.3 อุณหภูมิการเดือดของน้ำ

การพิจารณาอุณหภูมิการเดือดของน้ำในขณะทำการทดสอบระบบผลิตปฏิกิริยาเทอร์โมเคมี เมื่อกำหนดอัตราส่วนสมมูลอยู่ที่ 0.3 0.6 และ 0.9 ผลการศึกษาพบว่าเมื่อทำการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.3 อุณหภูมิของน้ำไม่เกิดการเดือดโดยมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 91 °C และการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 และ 0.9 อุณหภูมิที่เดือดอยู่ที่ประมาณ 98-100 °C สาเหตุที่การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.3 ไม่เกิดการเดือดของน้ำเกิดจากความร้อนของแก๊สที่ผลิตได้มีค่าต่ำเกินไป ส่งผลมาจากอัตราการป้อนอากาศที่ต่ำเกินไป เมื่อนำไปใช้ในการต้มน้ำจึงทำให้น้ำไม่เกิดการเดือด ดังแสดงในรูปที่ 4

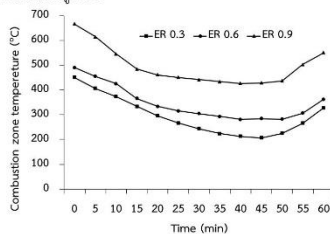


รูปที่ 4 อุณหภูมิการเดือดของน้ำจากระบบผลิตแก๊สชีววมวล

3.4 การวิเคราะห์อุณหภูมิโซนเผาไหม้

การปรับอัตราส่วนสมมูลส่งผลต่ออุณหภูมิในการเผาไหม้ของระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคด์ การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 ให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 300 °C ถึง 500 °C ในขณะที่การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.9 จะอยู่ในช่วง 400 °C ถึง 700 °C อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่าเมื่อถึงช่วงกลางของการทดสอบอุณหภูมิจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความร้อนบางส่วนภายในระบบผลิตปฏิกิริยาเทอร์โมเคมีถูกดึงไปกับมวลแก๊สในการเผาไหม้ส่งผลทำให้อุณหภูมิลดลง ซึ่งการปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.9 ให้ความร้อนสูงเนื่องจากในท้องถิ่นเผาไหม้มีการป้อนอากาศสูงจึงทำให้การเผา

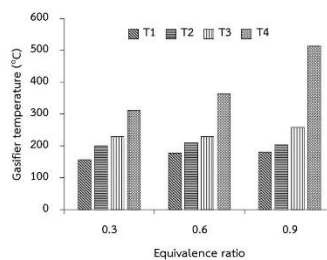
ไหม้ใกล้เคียงกับการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังนั้นอุณหภูมิของระบบจึงสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การวิเคราะห์อุณหภูมิโซนเผาไหม้

3.5 การวิเคราะห์อุณหภูมิระบบแก๊สซีไฟเออร์

การวิเคราะห์ภาพรวมของอุณหภูมิภายในระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคด์ พบว่าอุณหภูมิภายในระบบผลิตแก๊สอยู่ที่ 1, 2 และ 3 ในแต่ละการปรับอัตราส่วนสมมูลมีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นในส่วนอุณหภูมิโซนการเผาไหม้ของระบบในจุดที่ 4 อย่างไรก็ตามถ้าเปรียบเทียบกับภาพรวมของอุณหภูมิระบบแก๊สซีไฟเออร์แบบฟลูอิดไคด์ [10] อุณหภูมิจะมีค่าเฉลี่ยในช่วง 400 °C ถึง 600 °C



รูปที่ 6 การวิเคราะห์อุณหภูมิระบบแก๊สซีไฟเออร์

4. สรุปผลการทดลอง

- การปรับอัตราส่วนสมมูลส่งผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบในด้านของประสิทธิภาพความร้อน อุณหภูมิเตา และพลังงานความร้อนที่ผลิตได้

- ประสิทธิภาพความร้อนของระบบผลิตแก๊สแบบฟลูอิดไคด์สูงสุดที่ 22.16% ที่การปรับอัตราส่วนสมมูลที่ 0.6 โดยที่สภาวะดังกล่าวจะส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด

- อุณหภูมิของระบบผลิตแก๊สแปรผันตามการปรับอัตราส่วนสมมูล โดยเฉลี่ยอุณหภูมิของระบบเมื่อทำงานจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 200 °C ถึง 600 °C

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนวิจัยจากโครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับบัณฑิตศึกษา ทุนอุดหนุนการวิจัยแก่นักศึกษาระดับอุดมศึกษาประจำปีงบประมาณ 2560 กองทุนเพื่อส่งเสริม

การอนุรักษ์พลังงานและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ภายใต้โครงการวิจัยความร่วมมือไทย-จีน ที่เอื้อเพื่อเชื้อเพลิง ชีวมวลพร้อมทั้งอุปกรณ์สำหรับการวิจัย และขอขอบคุณวิทยาลัย พลังงานทดแทนและศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ที่ เอื้อเพื่อสถานที่ในการศึกษาครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2556). *ศักยภาพพลังงานชีวมวลแต่ละชนิด*, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html, เข้า ดูเมื่อวันที่ 10/04/2561.
- [2] M. Bharath, Vasudevan Raghavan, B.V.S.S.S. Prasad, S.R. Chakravarthy. (2018). Co-gasification of Indian rice husk and Indian coal with high-ash in bubbling fluidized bed gasification reactor, *Applied Thermal Engineering*, vol. 137, pp. 608-615.
- [3] M.K. Karmakar, J. Mandal, S. Haldar, P.K. Chatterjee (2013). Investigation of fuel gas generation in a pilot scale fluidized bed auto thermal gasifier using rice husk, *Fuel*, vol. 111, pp. 584-591.
- [4] นิกราน หอมดวงและคณะ (2559). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2559, โครงการพัฒนาเตาแก๊สชีวมวลไร้ควัน สำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชน วิทยาลัยพลังงาน ทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
- [5] Thanachat Mahawan, Nigran Homdoun et al. (2016). Application of gasification technology for design household, smokeless biomass stove, paper presented in the 23rd Tri-U international Joint Seminar and Symposium, 23-28 October 2016. Bogor Agricultural University, Indonesia
- [6] ธนศ โยษชนะและคณะ (2556). การศึกษาประสิทธิภาพเชิง ความร้อนของเตาทุ้งระดับครัวเรือน, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 28 ตุลาคม 2556, หน้า 626-630.
- [7] นิกราน หอมดวงและคณะ (2560). สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวล แบบป้อนต่อเนื่องและป้อนเป็นช่วงเมื่อใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง, *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 ประจำปี 2560* โรงแรมดิเอ็มเพลส จังหวัด เชียงใหม่.
- [8] นิกราน หอมดวงและคณะ (2554). สมรรถนะเครื่องยนต์สูบน้ำ การเกษตรเมื่อใช้พลังงานชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง, *การประชุมวิชาการ การถ่ายทอดพลังงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 10 ประจำปี 2554* โรงแรมเชียงใหม่แกรนด์วิว จังหวัดเชียงใหม่.
- [9] Food and Agriculture Organization (FAO). (1986). Wood gas as engine fuel, Mechanical Wood Products Branch Forest. Italy.
- [10] Thanasit Wongsiriamnuay, Nattakarn Kannang, Nakorn Tippayawong. (2013). Effect of Operating

Conditions on Catalytic Gasification of Bamboo in a Fluidized Bed, *International Journal of Chemical Engineering*.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายพงศธร มณฑิพย์
 เกิดเมื่อ 15 ธันวาคม 2534
 ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2557 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต
 วิทยาลัยพลังงานทดแทน
 มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่
 พ.ศ.2552 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
 โรงเรียนศรีวิทย อำเภอมือง
 จังหวัดชุมพร

