

การพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภูวดิต ดิษฐสุภามาศ

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

การพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง



การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ภูวดิพ ดิฐสุภมาศ

การค้นคว้าอิสระนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา

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.

ประธานอาจารย์ประจำหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช พลวงษ์ศรี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกวียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง
ชื่อผู้เขียน	นายภูวดิต ติฐุศุภมาศ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง

บทคัดย่อ

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญและมีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิตมนุษย์ ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศไทยมีอาชีพเกษตรกรรมซึ่งหลังจากฤดูกาลเก็บเกี่ยวจะมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในปริมาณสูง ไม้ลำไยเป็นชีวมวลอีกชนิดหนึ่งที่มีปริมาณค่อนข้างสูงในแถบพื้นที่ทางเหนือของประเทศไทย การนำเอาชีวมวลประเภทนี้มาผลิตเป็นแก๊สชีวมวลและนำไปใช้งานในระดับจึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบ พัฒนา ทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะและเศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง การทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะกับการใช้หัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิมและเตาแก๊สหุงต้ม โดยใช้ถ่านไม้ลำไยและไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิง ถ่านไม้ลำไยที่ใช้ทดสอบมีขนาด 25-30 mm ความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 250-300 kg/m³ ค่าความร้อน 28,000 kJ/kg ส่วนไม้ลำไยมีขนาด 25-30 mm ความหนาแน่นเฉลี่ย 384.57 kg/m³ ค่าความร้อน 14,500 kJ/kg เตาแก๊สชีวมวลที่นำมาปรับปรุง ใช้งานเป็นเตาแก๊สชีวมวลแบบชนิดไหลลง เต็มเชื้อเพลิงชีวมวลได้ต่อเนื่อง ส่วนประกอบของเตาแก๊สชีวมวลมี 3 ส่วน คือ ตัวเตา ชุดทำความสะอาดและลดอุณหภูมิและชุดหัวเตาแก๊ส การทดสอบศึกษาผลการปรับอัตราผสมอากาศต่อแก๊สชีวมวลที่ 1:0.8 1:1.2 และ 1:1.5 วิเคราะห์สมรรถนะด้วยวิธีการต้มน้ำ เตาแก๊สชีวมวลที่ใช้ทดลองได้ปรับปรุงวัสดุของห้องเผาไหม้ ชุดป้อนเชื้อเพลิง ชุดปลอกเสื้อห้องเผาไหม้ ชุดรองซีเมนต์และเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ผลการวิจัยพบว่าหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูงที่ใช้มีการออกแบบพัฒนา 2 ส่วนคือชุดปรับอัตราส่วนผสมอากาศและแก๊สชีวมวลและหัวเตาแก๊สแบบใช้วัสดุเซรามิคช่วยในการส่งถ่ายความร้อน โดยใช้หลักการชักนำอากาศผ่านท่อเวนทูรี ท่อส่งแก๊สชีวมวลใช้งานมีขนาด 5.08 cm คอคอดมีขนาด 3 cm เจาะรูจำนวน 4 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm ปริมาตรของหัวเตาแก๊สมีปริมาตรรวม 1.693 L เตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง มีความสามารถในการใช้งานที่เสถียรและจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง การใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงกับเตาแก๊สชีวมวลให้สมรรถนะที่สูงกว่าการใช้งานหัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิม ได้แก่ อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงพลังงาน ประสิทธิภาพความร้อนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน การใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ลำไยให้สมรรถนะการทำงานที่สูงกว่าการใช้ไม้ลำไย สุดท้ายการปรับอัตราส่วนผสมของแก๊สชีวมวลกับ

อากาศที่ 1:1.2 ให้ประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในกรณีของการใช้ถ่านไม้ลำไยและการใช้ไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิง เตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูงให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 26.49% และ 22.05 % ในกรณีใช้ถ่านและไม้ลำไย ตามลำดับ การใช้ชุดปรับอัตราส่วนผสมให้ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มสูงขึ้น 66.95% และ 71.15% ในกรณีของการใช้ถ่านและไม้ลำไย ในขณะที่การใช้หัวเตาแก๊สแบบใช้เซรามิคให้ ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น 33.05% ในกรณีของการใช้ถ่านไม้ลำไย และ 28.85% ในกรณีของการใช้ไม้ลำไย การใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงกับเตาแก๊สชีวมวลให้ต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำกว่าการใช้หัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิมและแก๊สหุงต้ม โดยต้นทุนการผลิตความร้อนเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ถ่านลำไยและไม้ลำไย 7.65 Baht/kWh และ 0.88 Baht/kWh ในขณะที่การใช้หัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิมให้ต้นทุนเฉลี่ย 8.99 Baht/kWh และ 1.02 Baht/kWh และการใช้แก๊สหุงต้มมีค่าต้นทุนเฉลี่ย 1.77 Baht/kWh การใช้ถ่านไม้ลำไยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงได้ 20,160 Baht/year ขณะที่การใช้ไม้ลำไยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 2,136 Baht/year และการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงให้ระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ย 3 เดือน ในกรณีและถ้าใช้ไม้ลำไยจะมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ย 2 ปี 4 เดือน

คำสำคัญ : หัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง เตาแก๊สชีวมวล ชุดผสมแก๊สชีวมวล-อากาศ ถ่านไม้ลำไย ไม้ลำไย

Title	DEVELOPMENT OF HIGHT EFFICIENCY BIOMASS STOVE BURNER
Author	Mr.Phuvadith Dithsuphamad
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisor Committee Chairperson	Assistant Professor Dr.Nigran Homdounng

ABSTRACT

Energy is important and essential for human living. The majority of Thailand population are farmers and after harvesting season there are agricultural wastes. Longan wood is a biomass of high amount in northern Thailand. The use of this biomass for the production of biomass and use in the community is very interesting. Therefore, the objective of this research was to design, develop, test and analyze the performance and economics of biogas producing stove using high efficiency biomass stove burner. A comparative study was conducted on the use of conventional stove burner and liquid petroleum gas set using longan charcoal and longan wood as fuels. The size of longan charcoal was 25-30 mm with average density of 250-300 kg/m³ and heating value of 28,000 kJ/kg. The size of longan wood was 25-30 mm with average density of 384.57 kg/m³ and heating value of 14,500 kJ/kg. The gas stove used for improvement was downdraft gasifier and continuous biomass feeding. The components of biomass gas stove were 3 parts: the body, the cleaning and cooling set and the gas burner. Experimentation was the adjustment of air/biogas ratio at 1: 0.8, 1: 1.2 and 1: 1.5. The efficiency was analyzed by boiling water and improve the combustion chamber, biomass feeder, jacket of combustion chamber, ash storage and thermometer. It was found that, the high efficiency biomass stove burner has two types of developmental design i.e. air-biogas mixture ratio adjustment set and ceramic gas stove burner for heat transfer. The air-gas mixture was induced through venturi tube with 5.08 cm in diameter, 3 cm of venturi neck with 4 holes of 8 mm in diameter and 1.693 L of the volume of gas stove burner. When high efficiency biomass

stove burner was used, the operation was stable with continuous burning. The use of high efficiency biomass stove burner with biomass gas stove provided higher performance than conventional biomass stove burner i.e. fuel and energy consumption, thermal efficiency and temperature during operation. The use of longan charcoal fuels provided higher performance than that of longan wood. Finally, adjusting the mixture ratio of biomass gas and air at 1:1.2 provided highest efficiency in using both longan charcoal and wood. The maximum thermal efficiency of high efficiency biomass stove burner using longan charcoal and wood of 26.49% and 22.05%, respectively was obtained. The use of mixer ratio regulator increased thermal efficiency by 66.95% and 71.15% when using longan charcoal and wood respectively. The use of ceramic gas stove burner on longan charcoal increased thermal efficiency by 33.05%, while longan wood increase the by 28.85%. The use of longan wood with high efficiency biomass stoves burner provided lower capital cost of heat production than the conventional biomass stove burner and LPG. The cost of heat production using high efficiency biomass stoves burner longan charcoal and wood were 7.65 Baht/kWh and 0.88 Baht/kWh respectively while using conventional biomass stove burner average cost of 8.99 Baht/kWh and 1.02 Baht/kWh which 1.77 Baht/kWh of LPG was obtained. The use of longan charcoal can save 20.160 Baht/year while, the use of longan wood can save 2,136 Baht/year. The payback period for using longan charcoal was about 3 months if longan wood was used the payback period was about 2 years and 4 months.

Keyword: high efficiency biomass stove burner, producer gas stove, air-producer gas mixer, longan wood

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง ที่รับเป็นประธานที่ปรึกษา งานค้นคว้าอิสระและได้กรุณาให้ความรู้คำแนะนำต่าง ๆ และคำปรึกษาตลอดจนให้ความดูแลและเอาใจ ใส่ในงานค้นคว้าอิสระนี้เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงสำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์ ซึ่งให้เกียรติเป็นที่ปรึกษาร่วม ในงานค้นคว้าอิสระให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมถึง ตรวจแก้ไขรูปเล่มงานค้นคว้าอิสระนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านรวมถึงบุคลากรในวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนให้คำแนะนำหลายๆ ด้าน และเป็นกำลังใจจนทำให้สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ภาคส่วนคณาจารย์และบุคลากรบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้โอกาส เผยแพร่บทความวิชาการงานค้นคว้าอิสระ ในงานประชุมวิชาการและประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษา แห่งชาติครั้งที่ 1 “เทิดพระเกียรติวันแม่แห่งชาติ สู่ความมั่นคง มั่งคั่ง ยั่งยืน” ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติเอ็มเพรส โรงแรมเอ็มเพรสเชียงใหม่ ตลอดจนให้คำแนะนำขั้นตอนการประสานงานทางด้านการศึกษาต่างๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณครอบครัว เพื่อน และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมชีวมวลและ เครื่องจักรกลทุกอย่าง ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุน พร้อมทั้งคำแนะนำและเป็นกำลังใจจนทำให้ สำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

ภูวดิต ดิษฐสุภามาศ

พฤษภาคม 2561

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญตารางผนวก.....	ท
สารบัญภาพผนวก.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร.....	4
พลังงานชีวมวล.....	4
เตาแก๊สซีฟไเออร์แบบฟลักซ์เบด.....	8
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชั่น.....	11
ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวมวล.....	14
การวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	19
การตรวจสอบเอกสาร.....	21
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	27
เครื่องมืออุปกรณ์และวัสดุงานวิจัย.....	27

วัสดุชีวมวลทดสอบ.....	32
เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	37
วิธีการทดสอบงานวิจัย.....	38
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิจารณ์.....	42
การปรับปรุงเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง.....	42
การออกแบบพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวล.....	46
การพัฒนาและสร้างหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	49
การวิเคราะห์สมรรถนะเตาและหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	51
การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	59
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	62
สรุปผล.....	62
ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก แบบเตาผลิตโปรตีนไฮดรอลิกหรือแก๊สชีวมวลแบบไหลลง.....	67
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบหัวเตาเผาแก๊ส.....	70
ภาคผนวก ค วิธีการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับเตาแก๊สชีวมวล.....	89
ภาคผนวก ง เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ.....	100
ประวัติผู้วิจัย.....	112

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	พื้นที่เพาะปลูกพืชและผลผลิตของพืชหลักแต่ละชนิด (หน่วย : พันตัน).....	5
2	ศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย.....	6
3	คุณสมบัติชีวมวลแบบประมาณ (Proximate Analysis).....	7
4	คุณสมบัติชีวมวลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis).....	8
5	ส่วนประกอบแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวล.....	11
6	แสดงรายละเอียดผลการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบชนิดใช้วัสดุพูน.....	48
7	ประสิทธิภาพความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ชุดปรับอัตราส่วนผสมและหัวเตาแก๊สชีวมวล ประสิทธิภาพสูง.....	59

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปัญหาการเผาและสุขภาพของประชาชนในชุมชน.....	2
2	เตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลขึ้น	9
3	เตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลขวาง	9
4	เตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลลง	11
5	ลักษณะท่อเวนทิวรี (Venturi tube)	19
6	โครงสร้างภายในของชุดอุปกรณ์หัวเผาแบบใช้แก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา	21
7	โครงสร้างภายในของชุดอุปกรณ์หัวเผาแบบ.....	22
8	ไดอะแกรมการทดสอบผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง	22
9	ไดอะแกรมของระบบผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สในเตาแก๊สซีฟเอร์แบบไหลลง	23
10	แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาแก๊สชีวภาพ	23
11	แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาเผาไหม้วัสดุพอรุน ที่มีการจ่าย อากาศเป็นชั้น.....	24
12	กลไกการถ่ายเทความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพอรุนแบบสองตอน	25
13	ทดสอบหาสมรรถนะของเตาแก๊ส แบบไม่มีวัสดุพอรุน.....	26
14	เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง.....	28
15	หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม	29
16	ชุดปรับอัตราผสมแก๊สชีวมวลกับอากาศ.....	30
17	หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบประสิทธิภาพสูง	30
18	ชุดป้องกันลมขณะทำการทดลอง	31
19	ชุดทดสอบสมรรถนะแก๊สหุงต้ม	32
20	การเตรียมถ่านไม้ลำไย.....	32
21	การเตรียมไม้ลำไย.....	33

22	เครื่องมือใช้วัดอุณหภูมิ	34
23	ชุดควบคุมอัตราการไหลอากาศ	35
24	เครื่องวัดความเร็วลม	35
25	เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล.....	36
26	ขั้นตอนวิธีการดำเนินการทดสอบวิจัย	37
27	การต้มน้ำโดยใช้แก๊สหุงต้ม.....	39
28	การทดสอบหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม.....	40
29	การทดสอบหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง	41
30	ห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงใช้วัสดุเหล็กเหนียว	43
31	ห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงใช้วัสดุเหล็กหล่อ.....	43
32	การปรับปรุงชุดบ่อนเชื้อเพลิงเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง.....	44
33	การปรับปรุงชุดปลอกเชื้อห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง	45
34	การปรับปรุงชุดห้องรองซีไถ้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง.....	45
35	การติดตั้งชุดเครื่องมือวัดตามจุดเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง.....	46
36	ขั้นตอนการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบชนิดใช้วัสดุพูน.....	47
37	ชุดปรับอัตราส่วนผสมอากาศและแก๊สชีวมวล	50
38	หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	51
39	ฉนวนความร้อนและอุปกรณ์ป้องกันลม	51
40	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเตาแก๊สชีวมวล.....	52
41	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเตาแก๊สชีวมวล	53
42	ประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้	53
43	อุณหภูมิการต้มน้ำเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้.....	54
44	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเตาแก๊สชีวมวล.....	55
45	อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเตาแก๊สชีวมวล	55

46	ประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวล.....	56
47	อุณหภูมิการต้มน้ำเตาแก๊สชีวมวล.....	57
48	อุณหภูมิภายในเตาแก๊สชีวมวล	57
49	อุณหภูมิภายในเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม.....	58
50	การวิเคราะห์ปัจจัยชุดปรับอัตราส่วนผสม.....	58
51	ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง	60
52	ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่อปีของหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง	60
53	ระยะเวลาคืนทุนหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง.....	61



สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวกที่		หน้า
1	แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเผา KB5 แก๊ส LPG	71
2	แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาแบบดั้งเดิม.....	71
3	แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F _{Ratio} 1:0.8 (ถ่านไม้ลำไย)	74
4	แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F _{Ratio} 1:1.2 (ถ่านไม้ลำไย)	76
5	แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F _{Ratio} 1:1.5 (ถ่านไม้ลำไย)	79
6	แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F _{Ratio} 1:0.8 (ไม้ลำไย)	81
7	แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F _{Ratio} 1:1.2 (ไม้ลำไย)	84
8	แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F _{Ratio} 1:1.5 (ไม้ลำไย)	86

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวกที่		หน้า
1	แบบเตาผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สหรือแก๊สชีวมวลแบบไหลลง.....	68
2	ชุดอุปกรณ์หัวเตาเผาแก๊สประสิทธิภาพสูง	68
3	ชุดอุปกรณ์ปรับส่วนผสมแก๊สชีวมวลกับอากาศ.....	69



บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มา

จากสถานการณ์พลังงานโลกในปัจจุบันพบว่ามียัตราการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการคาดการณ์ในปี พ.ศ.2563 ทั่วโลกจะมีสัดส่วนการใช้น้ำมันอยู่ที่ร้อยละ 37 ก๊าซธรรมชาติร้อยละ 27 ถ่านหินร้อยละ 25 พลังงานหมุนเวียนร้อยละ 8 และพลังงานนิวเคลียร์ร้อยละ 3 หากทุกประเทศทั่วโลกยังมีอัตราการใช้พลังงานที่สูงเพิ่มขึ้น และถ้าไม่มีการค้นหาแหล่งพลังงานมาเพิ่มเติมก็จะมีน้ำมันใช้ได้อีก 30 ปี แก๊สธรรมชาติ 50 ปี และถ่านหินประมาณ 200 ปี ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานทั่วโลก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและกระทรวงอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558) และในอนาคตประเทศไทยก็คงไม่อาจหลีกเลี่ยงผลกระทบต่อวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงานได้ ดังนั้นกระทรวงพลังงานจึงได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานในประเทศจำนวน 3 ฉบับ คือ แผนพัฒนาการผลิตไฟฟ้า แผนพัฒนาพลังงานทดแทน พลังงานทางเลือก และแผนการจัดการอนุรักษ์พลังงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและกระทรวงอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ซึ่งแผนดังกล่าวจะส่งผลให้ประเทศไทยมีพลังงานใช้อย่างต่อเนื่อง

ประเทศไทยประชากรส่วนใหญ่ก็ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ดังนั้นหลังฤดูเก็บเกี่ยวจึงมีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น แกลบ ชานอ้อย ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว เศษกิ่งไม้ ฟางข้าว ฯลฯ ที่ผ่านมารัฐบาลได้ส่งเสริมให้นำไปใช้ประโยชน์ก่อนข้างต่ำและขาดประสิทธิภาพ ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติที่ด้อยของชีวมวลและมีความยุ่งยากในการนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นการเผาทำลายจึงเป็นวิธีการที่ง่าย และมีต้นทุนกำจัดต่ำสุด สำหรับเกษตรกรหรือชุมชน ผลจากการเผาทำลายก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และสภาวะสิ่งแวดล้อมส่งผลให้คุณภาพชีวิตความเป็นอยู่ และสุขภาพของผู้คนในชุมชนลดลง ดังภาพที่ 1 จากปัญหาที่เกิดขึ้นกับชุมชนถ้ามีการนำเอาวัสดุที่เหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นพลังความร้อน และเอาพลังความร้อนที่ผลิตได้ไปใช้ในชุมชนเชื่อว่าส่งผลให้เกิดข้อดีหลายประการ เช่น การลดการเผาทำลายเศษวัสดุและการลดการใช้แก๊สหุงต้มในชุมชนและเป็นการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนในระดับชุมชน จากการศึกษาพบว่า เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถเข้ามาช่วยแก้ปัญหานี้ได้ เนื่องจากเทคโนโลยีนี้ให้ประสิทธิภาพความร้อนที่สูงมากกว่าการเผาไหม้โดยตรง โดยเฉลี่ยประสิทธิภาพแก๊สซิฟิเคชัน อยู่ที่ 50-75 % ในขณะที่การเผาไหม้ตรงมีค่าสูงสุดไม่เกิน 20 % และเมื่อนำมาใช้ทดแทนก๊าซหุงต้มจะทำให้ต้นทุนลดลง อย่างไรก็ตามการนำเอาโปรตีนเซอร์แก๊สมาใช้ก็ประสบปัญหาในเรื่อง

ค่าความหนาแน่นพลังงานที่ต่ำเกินไปประมาณ 5 MJ/m^3 (องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ, 2541) ในสภาพหัวเตาแก๊สชีวมวลที่ไม่ได้มีการศึกษารายละเอียดพัฒนาหัวเตาแก๊สเมื่อนำไปใช้งานส่งผลให้มีเปลวลุกติดไฟให้ค่าความร้อนไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นการพัฒนาหัวเตาเผาแก๊สชีวมวลให้สามารถมีเปลวลุกติดไฟมีผลให้ค่าความร้อนสูง เชื่อว่าจะส่งผลให้มีการส่งเสริมการใช้งานโปรตีนเซอร์แก๊สหรือแก๊สชีวมวลอย่างกว้างขวาง ซึ่งเป็นการลดการใช้แก๊สหุงต้มซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนได้อีกทางหนึ่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้มีความสนใจในการพัฒนาหัวเตาเผาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยการศึกษาเริ่มตั้งแต่การหาเงื่อนไขการออกแบบหัวเตาเผาแก๊สชีวมวลจากการทดสอบเตาแก๊สหุงต้ม การออกแบบและการทดสอบการใช้งาน โดยสมรรถนะเตาชีวมวลที่ต้องการศึกษา ได้แก่ อัตราการป้อนอากาศ เชื้อเพลิงทั้งในส่วนของโปรตีนเซอร์แก๊สและแก๊สหุงต้ม อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ชนิดเชื้อเพลิง อุณหภูมิของเตา ประสิทธิภาพความร้อน และต้นทุนการผลิตความร้อนเมื่อเทียบกับแก๊สหุงต้มเพียงอย่างเดียว ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษาจะทำให้ชุมชนมีเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานความร้อนและใช้ในชุมชน ลดการใช้แก๊สหุงต้ม ลดภาระค่าใช้จ่ายในครัวเรือน ลดการเผาและรักษาสิ่งแวดล้อมในชุมชน และลดการนำเข้าแก๊สหุงต้มจากต่างประเทศได้



ภาพที่ 1 ปัญหาการเผาและสุขภาพของประชาชนในชุมชน

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวลใช้ร่วมกับเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น
2. เพื่อประเมินสมรรถนะเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงโดยหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบต้นทุนเศรษฐศาสตร์การใช้งานหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลลงประสิทธิภาพสูง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตาแก๊สชีวมวลที่ใช้เป็นแบบไหลลง
2. เปรียบเทียบสมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลลงที่ใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม
3. เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบเป็นถ่านไม้ลำไยและเศษไม้ลำไยจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในท้องถิ่น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลลงประสิทธิภาพสูง
2. ได้ข้อมูลสมรรถนะของหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลลงประสิทธิภาพสูง
3. ได้ข้อมูลทางด้านเศรษฐศาสตร์หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลลงประสิทธิภาพสูง

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร ที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติเชื้อเพลิงชีวมวล ศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล เตาผลิตแก๊สชีวมวล กระบวนการแก๊สซิเคชัน แต่ละชนิด และหัวเตาแก๊สชีวมวล ด้านการตรวจเอกสารจะนำเสนอในส่วนของเนื้อหาเกี่ยวกับเตาผลิตแก๊สชีวมวล แบบไหลลงและการใช้ประโยชน์แก๊สชีวมวลที่หัวเตาแก๊สชีวมวล ในด้านต่างๆ

พลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวล (Biomass Energy) คือแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงและเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลง ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือขบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบและลักษณะเฉพาะแหล่ง ตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกัน เป็นหลายล้านปี นอกจากนี้ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศได้อีกด้วย ข้อดีต่อสิ่งแวดล้อมที่สำคัญคือการใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้า จะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่มีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมุนเวียนนำมาใช้มาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณแก๊สที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆเนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึงการใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่งหรือการใช้ถ่านหินในโรงไฟฟ้า

ปริมาณชีวมวลจะแปรผันระหว่างปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ แสดงในตารางที่ 1 แสดงพื้นที่เพาะปลูกและผลผลิตของพืชหลักแต่ละชนิด ปี 2551 และ 2552 ซึ่งจะส่งผลให้มีปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรภายในประเทศ แหล่งที่มาของชีวมวลมีหลายแหล่ง เช่น อุตสาหกรรมการเกษตร วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและมูลสัตว์ พืชผลทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ผลสับดูดำ ปาล์มน้ำมัน ข้าวโพด แหล่งกลุ่มนี้เป็นแหล่งของแป้ง น้ำตาล และไขมัน แหล่งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรได้แก่ แกลบ ฟางข้าว ชังข้าวโพดและต้นข้าวโพด เป็นต้น แหล่งชีวมวลจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตรและชุมชน เช่น กาบมะพร้าว กะลามะพร้าว ชานอ้อย กากน้ำตาล เศษอาหารและขยะเปียก เป็นต้น แหล่งชีวมวลที่ได้จากสัตว์ได้แก่มูลสัตว์ วัว ควาย หมู ไก่ เป็นต้น การเปลี่ยนรูปชีวมวลมี 3 แบบ ประกอบด้วย การเผาไหม้ตรง การหมัก และกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน การเผาไหม้ตรง คือวิธีการใช้ชีวมวลที่ง่ายที่สุดและอาจถือเป็นวิธีแรก ๆ ที่มนุษย์รู้จักใช้ประโยชน์จากชีวมวลในการผลิตพลังงาน เช่น การใช้ฟืน และถ่าน การเผาไหม้ ทำให้ได้ความร้อน ซึ่งมีประโยชน์ในการหุงต้ม การผลิตไอน้ำเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกล เป็นต้น การหมักคือการนำชีวมวลไปหมักให้เกิดการทำปฏิกิริยาโดยจุลินทรีย์เปลี่ยนรูปเป็นแก๊สชีวภาพที่สามารถใช้ในการหุงต้มแทนแก๊สหุงต้มได้เช่น การหมักขยะเปียก การหมักมูลสัตว์ การหมักกากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันคือกระบวนการเปลี่ยนของแข็งเป็นแก๊สเช่น แก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น อย่างไรก็ตามสำหรับประเทศไทยแล้ว ศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีศักยภาพสูง แสดงในตารางที่ 2 เมื่อคิดเป็นค่าความร้อนของชีวมวลจะเท่ากับ 562,222.83 TJ และเมื่อนำมาทดแทนน้ำมันดิบจะได้ 13,348.12 ktoe

ตารางที่ 1 พื้นที่เพาะปลูกพืชและผลผลิตของพืชหลักแต่ละชนิด (หน่วย : พันตัน)

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

ตารางที่ 2 ศักยภาพชีวมวลแต่ละชนิดในประเทศไทย

พืชผลทางการเกษตร	ปริมาณที่เกิด (ตัน) $\times 10^6$	ปริมาณที่นำไปใช้ ประโยชน์แล้ว (ตัน) $\times 10^6$	ปริมาณคงเหลือ (ตัน) $\times 10^6$	ค่าความร้อน (TJ)	เทียบเท่า น้ำมันดิบ (ktoe)
ฟางข้าว	19.00	8.11	10.89	134,308.56	3,188.71
แกลบ	8.15	8.01	0.14	1,879.09	44.61
ใบและยอดอ้อย	17.02	1.85	15.17	234,843.37	5,575.58
ยอด ใบและลำต้น ข้าวโพด	9.32	0.47	8.85	86,993.76	2,065.38
ซังข้าวโพด	1.22	1.09	0.12	1,163.99	27.64
เหง้ามันสำปะหลัง	6.05	0.16	5.88	32,288.40	766.58
ลำต้นปาล์มน้ำมัน	1.96	-	1.96	14,757.89	350.38
ใบและทางปาล์ม	18.07	1.71	16.36	28,789.29	683.51
ทะลายปาล์มเปล่า	4.10	1.90	2.21	15,985.00	379.51
ใบและลำต้นถั่ว เหลือง เขียว ลิสง	0.07	0.003	0.06	1,002.47	23.8
ตอ รากและกิ่งก้าน ไม้ยางพารา	1.10	0.22	0.88	5,751.98	136.56
จั่นและทะลาย มะพร้าว	0.30	0.057	0.24	3,635.71	86.32
เปลือกและกาบ มะพร้าว	0.33	0.33	0.003	54.11	1.28
กะลามะพร้าว	0.25	0.23	0.022	393.89	9.35
เปลือกมะม่วงหิม พานต์	0.7	0.001	0.069	375.32	8.91
รวม	86.97	24.13	62.84	562,222.83	13,348.12

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและกระทรวงอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2558)

โดยทั่วไปคุณลักษณะของเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ดังนี้

การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) จะแสดงระบุค่าปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัวและปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิงแบ่งออกได้สองแบบพื้นฐาน คือแบบฐานเปียก (Wet Basis) หรือแบบพื้นฐานที่รับมา (As Received Basis) และแบบพื้นฐานแห้ง (Dry Basis) จากการอบวัสดุเชื้อเพลิงให้ร้อนในภาชนะที่ปิดภายใต้บรรยากาศของแก๊สควบคุมเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด (นคร, 2553) การนำเอาเตาชีวมวลไปใช้งานเชิงวิศวกรรม ยกตัวอย่าง เช่น ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติชีวมวลแบบประมาณ ของถ่านไม้ลำไย เศษไม้ลำไยและซังข้าวโพด โดยมีข้อสังเกต คืออัตราส่วนระหว่างสารระเหยต่อคาร์บอนคงตัวอยู่ที่ประมาณ 2.5-3.5 เท่า สำหรับไม้ และ 2.5-5.2 เท่าสำหรับเศษวัสดุทางการเกษตร ปริมาณเถ้าในเศษวัสดุทางการเกษตรมีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวลประเภทไม้ ในส่วนของการวิเคราะห์แบบแยกธาตุนั้น จะแสดงระบุค่าปริมาณธาตุต่างๆในเชื้อเพลิง โดยปกติจะเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน แสดงให้ทราบถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงนั้นมีค่าของปริมาณธาตุต่างๆ ไม่เท่ากันเช่น ถ้าเทียบคาร์บอน ถ่านไม้ลำไยมีปริมาณธาตุสูงกว่า หากเป็นไฮโดรเจน ออกซิเจนและไนโตรเจนเศษไม้ไม่มีปริมาณธาตุสูงกว่า ขณะที่ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงชนิดเดียวที่มีปริมาณซัลเฟอร์สูง ซึ่งคุณสมบัติชีวมวลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ แสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 คุณสมบัติชีวมวลแบบประมาณ (Proximate Analysis)

ชนิดของ เชื้อเพลิง ชีวมวล	VM (%)	FC (%)	ASH (%)	HHV (kJ/kg)	LHV (kJ/kg)
ถ่านไม้ลำไย	26.9	56.7	7.75	28,700	28,000
เศษไม้ลำไย	77.8	16.6	2.50	17,800	14,500
ซังข้าวโพด	72.2	12.1	2.20	22,472	16,300

ที่มา: Homdoun et al. (2015)

ตารางที่ 4 คุณสมบัติชีวมวลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

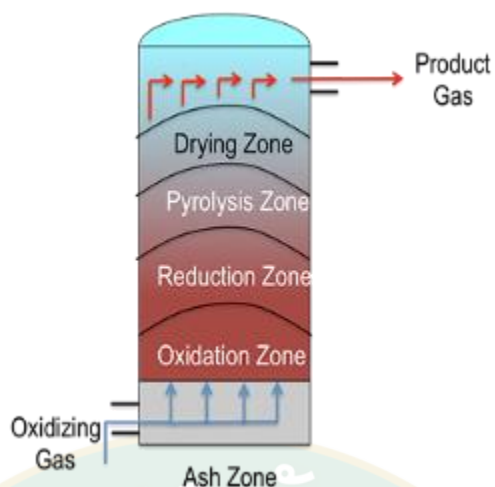
ชนิดของ เชื้อเพลิง	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)
ถ่านไม้ลำไย	79.6	3	13.2	0.29	0
เศษไม้ลำไย	48.8	5.2	44.6	1.4	0
ซังข้าวโพด	46.2	4.9	43.2	1.2	0.3

ที่มา: Homdoun et al. (2015)

เตาแก๊สชีฟเออร์แบบฟิกซ์เบด

เตาแก๊สชีฟเออร์แบบฟิกซ์เบด (Fixed Bed Gasifier) ที่ใช้ผลิตแก๊สชีวมวลหรือโปรดิวเซอร์แก๊สมีด้วยกัน 3 รูปแบบ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและกระทรวงอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2558) ได้แก่ เตาแก๊สชีฟเออร์แบบไหลขึ้น (Up-draft Gasifier) เตาแก๊สชีฟเออร์แบบไหลขวาง (Cross-draft Gasifier) และเตาแก๊สชีฟเออร์แบบไหลลง (Down-draft Gasifier) โดยคุณลักษณะเตาทั้ง 3 รูปแบบ มีลักษณะรายละเอียดดังนี้

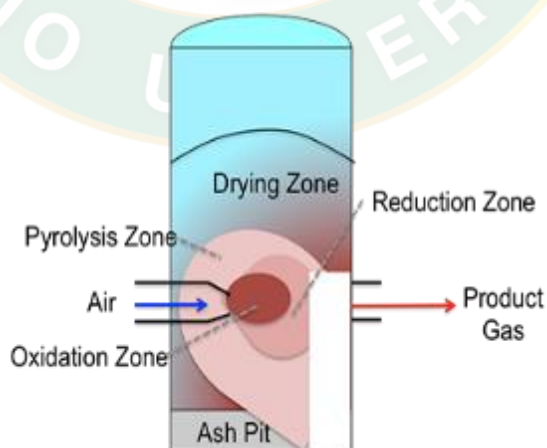
- เตาแก๊สชีฟเออร์แบบไหลขึ้น ลักษณะรูปแบบเตามีการแบ่งโซนเชื้อเพลิงออกเป็น 4 โซน เริ่มจากป้อนเชื้อเพลิงจากด้านบนลงมาด้านล่าง เกิดกระบวนการผลิตแก๊สชีวมวลหรือโปรดิวเซอร์แก๊สแต่ละโซนคือชั้นล่างสุดจะเป็นโซนเผาไหม้ โซนต่อมาเป็นโซนรีดักชัน เป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยาของคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำเกิดเป็นแก๊สชีวมวลหรือโปรดิวเซอร์แก๊ส CO CO₂ และ CH₄ จากนั้นก็เข้าสู่โซนกลั่นสลายเป็นโซนที่อุณหภูมิของแก๊สชีวมวลลดต่ำลงและเกิดการสลายสารระเหยของชีวมวล และเข้าสู่โซนอบแห้งเป็นการกำจัดไอน้ำออกทำให้อุณหภูมิแก๊สชีวมวลต่ำลง ลักษณะการป้อนอากาศเข้าจากด้านล่างส่งผลให้แก๊สชีวมวลที่ผลิตได้จะไหลออกด้านบน เตาแบบนี้จะผลิตแก๊ส ที่มีปัญหาในเรื่อง การกลั่นตัวเป็นน้ำมันดิน จึงไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้งานเท่าไร และยุ่งยาก เมื่อต้องมีการเติมไอน้ำเข้าไปช่วยในการทำปฏิกิริยาที่ Reduction Zone ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขึ้น

ที่มา: Chawdhury and Mahkamov (2011)

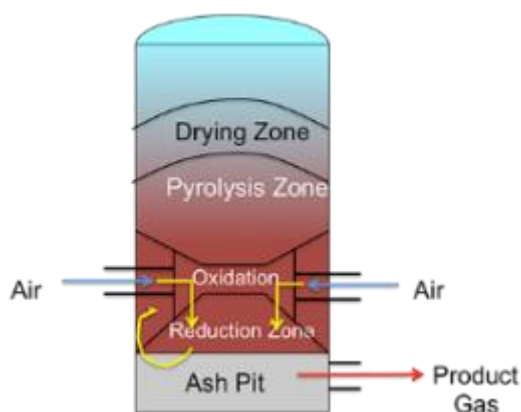
2. เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขวาง ลักษณะรูปแบบเตามีการป้อนอากาศเข้าด้านข้าง ตรงข้ามกันระหว่างอากาศเข้ากับแก๊สซิฟิเคชันที่ผลิตได้ ซึ่งการป้อนอากาศเข้ามานั้นจะมีความเร็วและปริมาณสูงมาก เพื่อให้มีการเผาไหม้ที่โซนเผาไหม้เป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยที่ โซนเผาไหม้ และ โซนรีดักชันและเตาชนิดนี้อุณหภูมิของของแก๊สชีววมวลที่ผลิตได้จะมีอุณหภูมิไม่สูง จะอยู่ช่วงโซนกลางแก๊สซิฟิเคชันมีเชื้อเพลิงที่ยังไม่เผาไหม้ล้อมรอบ จะเป็นผลดีในการป้องกันอุณหภูมิที่ผนังเตาไม่ให้สูงเกินไป ช่วยไม่ให้ผนังเตาเสียหาย ข้อดีอีกอย่างเตาชนิดนี้จะมีขนาดเล็กและเบา ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลขวาง

ที่มา: Chawdhury and Mahkamov (2011)

3. เตาแก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลง ลักษณะรูปแบบเตาผลิตโพรดิวเซอร์แก๊สแบบไหลลง (Downdraft Gasifier) นิกราน และคณะ (2554) ที่ออกแบบขึ้นมาเพื่อจะขจัดน้ำมันดินที่มีอยู่ภายในเชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะ อากาศจะถูกดูดผ่านจากด้านบนสู่ด้านล่างของเตา ผ่านกลุ่มหัวฉีด (Tuyers) บริเวณหัวฉีดจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ แก๊สชีวมวลที่ได้จากโซนนี้จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนอยู่เหนือตะแกรง ในขณะที่เดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ด้านบนของโซนเผาไหม้จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนและไอของน้ำมันดินที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิในช่วงระหว่าง 800-1,000 °C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C ปฏิกิริยาคูดความร้อนจะทำให้เกิดแก๊สที่ได้มีอุณหภูมิต่ำ แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้แก๊สที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น แก๊สที่ผ่านโซนการเผาไหม้จะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมันซึ่งจะมีปริมาณลดลงเหลือน้อยกว่า 10% ของน้ำมันดิน และแก๊สที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้การกรองน้อยลง เตาแบบดังกล่าวจะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำและถ้าจะอยู่บริเวณตะแกรง ดังนั้นจึงมีปริมาณเถ้าที่ผ่านออกมาพร้อมกับแก๊สเชื้อเพลิงน้อยมาก ซึ่งไอดินจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะต้องผ่านโซนเผาไหม้ จึงถูกทำให้สลายตัวทางความร้อน พื้นที่หน้าตัดแคบลง การป้อนอากาศเข้าเหนือจุดพื้นที่หน้าตัดที่แคบที่สุด เรียกว่าคอคอด (Throat) เพื่อกำหนดให้เกิดโซนถ่านร้อนแดงแคบๆ ที่บังคับให้เกิดแก๊สในปฏิกิริยาไพโรไลซิสผ่าน ยิ่งบริเวณคอคอดลดลงมากจะยิ่งทำให้อุณหภูมิบริเวณนี้เพิ่มสูงขึ้นภายในขอบเขตจำกัดระดับหนึ่ง หากคอคอดเล็กเกินไปจะส่งผลให้เกิดความดันตกคร่อมมากและขวางการไหลของก้อนเชื้อเพลิงชีวมวล นอกจากนี้เตาเผาแก๊สชีวมวลแบบแก๊สไหลลงจะไม่เหมาะกับเชื้อเพลิงที่มีเศษเถ้ามาก เพราะสแลกหรือเศษเถ้าหลอมที่เกิดขึ้นจะไหลลงด้านล่างเย็นตัวลงและแข็งตัวเป็นก้อนอย่างรวดเร็ว ทำให้กีดขวางการไหลของแก๊ส จึงมีการออกแบบตะแกรงหมุนและขยับได้ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง

ที่มา: Chawdlhury and Mahkamov (2011)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Biomass Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านไม้ ไม้ แกลบ ชี้เลื่อยและวัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตรที่สามารถติดไฟได้ ให้กลายเป็นแก๊สที่สามารถเผาไหม้ได้โดยการเผาไหม้เชื้อเพลิงในที่ๆ มีออกซิเจนอยู่จำกัด ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวนี้ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) แก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สมีเทน (CH₄) ซึ่งแก๊สที่ผลิตได้นี้เรียกว่า โปรดิวเซอร์แก๊สหรือแก๊สชีวมวล ค่าความร้อนของแก๊สที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 4-5 MJ/Nm³ ประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวมวลขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและการพิจารณาคุณภาพของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการผลิตเป็นลำดับต้นๆ โดยเฉลี่ยเตาผลิตแก๊สโปรดิวเซอร์แก๊ส มีประสิทธิภาพ 50 – 75 % (นิกราน และคณะ, 2554) ส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวล จะมีปริมาณแก๊สเกิดขึ้น แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวล

ส่วนประกอบ แก๊สชีวมวล	H ₂ (%)	CO (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)	Gas calorific Value (MJ/Nm ³)
ปริมาณแก๊ส	12-20	17-22	9-15	2-3	50-54	4-5

ที่มา: นคร (2553)

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน อาศัยปฏิกิริยาอุณหเคมี (Thermo-chemical Reaction) โดยทั่วไปเกิดปฏิกิริยากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันออกเป็น 4 โซน คือ โซนอบแห้ง โซนกลั่นตัว หรือ โซนไฟโรไลซิส โซนเผาไหม้ และ โซนรีดักชัน รายละเอียดปฏิกิริยาอุณหเคมีแต่ละโซนลำดับการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีดังนี้

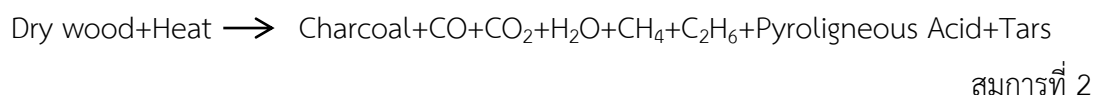
1. Drying Zone

โซนอบแห้ง เป็นโซนที่มีหน้าที่อบแห้งและระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบด้วยความร้อนส่งผลให้เชื้อเพลิงมีน้ำหนักกะขนาดลดลง โดยเฉลี่ยพลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้นจะใช้โดยประมาณ 1.26 Kcal/kg น้ำ หรือ 5.27KJ/Kg น้ำ อุณหภูมิความร้อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ประมาณ 40-200 °C โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้ความชื้นลดลงได้ประมาณ ร้อยละ 5 และค่าความชื้นของวัตถุดิบที่เหมาะสมในการนำมาใช้งาน ควรมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 30 เพื่อให้วัตถุดิบเชื้อเพลิงมีความแห้งและง่ายต่อการติดไฟ มีผลต่อความเสถียรต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงในระบบ ดังสมการที่ 1



2. Distillation Zone or Pyrolysis Zone

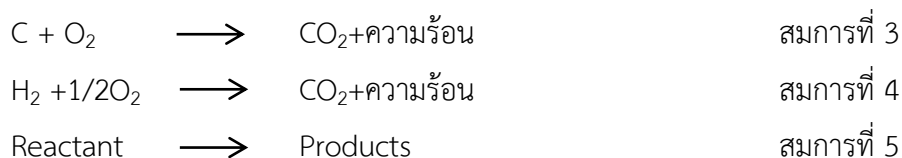
โซนกลั่นตัวหรือโซนไฟโรไลซิส เป็นโซนที่มีหน้าที่ย่อยสลายเชื้อเพลิงแข็งด้วยความร้อนสูง โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 200-600°C ออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบจะไม่มีส่วนร่วมในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เป็นกระบวนการแปรรูปวัตถุดิบด้วยความร้อนได้ผลิตภัณฑ์คือถ่าน แก๊ส และของเหลวในขั้นตอนนี้สารระเหยที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในวัตถุดิบจะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในรูปของแก๊สได้แก่คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน และของเหลว เช่น น้ำ, กรดอะซิติก, กรดฟอร์มิก, อะซิโตน, เมธานอล, เมทิลอะซิเตท และฟีนอล เป็นต้น ซึ่งอาจรวมตัวกันอยู่ในสภาพของเหลวชั้นสีน้ำตาลปนดำเรียกว่า น้ำมันดิน หรือละลายปนอยู่กับน้ำ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นของเหลวใสสีเหลืองอ่อนที่เรียกว่า น้ำส้มควันไม้ ดังสมการที่ 2



3. Combustion Zone, Oxidation Zone หรือ Hearth Zone

โซนเผาไหม้ เป็นโซนที่มีหน้าที่ผลิตความร้อนตามกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในโซนนี้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนและไฮโดรเจนวัตถุดิบหรือถ่าน

คาร์บอนที่เกิดจากไซโนไฟโรไลซิสถูกเผาไหม้ เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 1,100-1,500 °C ดังสมการที่ 3 4 และ 5

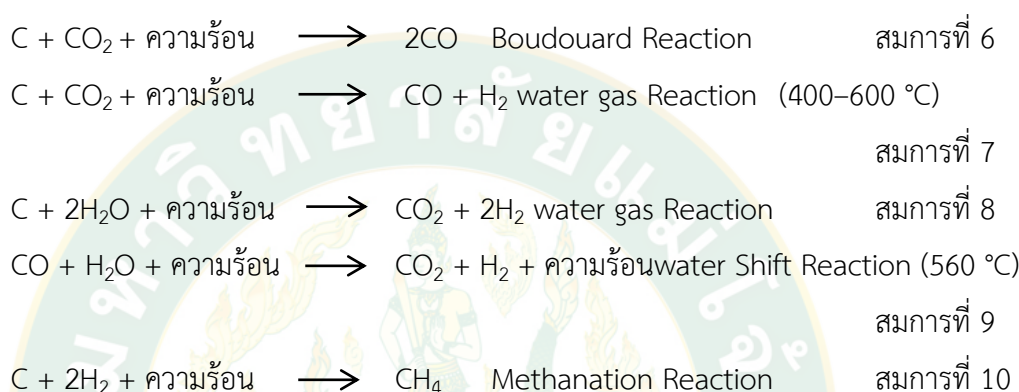


4. Reduction Zone

ไซนรีดักชัน เป็นไซนที่มีหน้าที่ผลิตแก๊สสังเคราะห์หรือแก๊สเชื้อเพลิงที่ติดไฟ ในขณะที่แก๊สร้อนจากไซนไหม้ไหลเคลื่อนเข้าสู่ไซนรีดักชัน จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สลดลง เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ซึ่งประกอบไปด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนและมีเทน เป็นผลิตภัณฑ์หลัก กระบวนการแปรรูปถ่านคาร์บอนให้เป็นแก๊สสังเคราะห์ ปฏิกิริยาจะเกิดในช่วงอุณหภูมิประมาณ 500-900°C มีปฏิกิริยาแฉงดังนี้

ปฏิกิริยาดังสมการที่ 6 เรียกว่า Boundouard Reduction และปฏิกิริยาดังสมการที่ 7 เรียกว่า Water Gas Reduction เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C แก๊สที่ได้จากสมการทั้งสองเป็นแก๊สที่เผาไหม้ได้และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแก๊สหลักที่ต้องการ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สชีวมวลนี้จะขึ้นอยู่กับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ร้อนได้มากน้อยเพียงใดในไซนรีดักชันนี้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วของแก๊สที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงชีวมวล และพื้นที่ผิวสัมผัสของเชื้อเพลิงชีวมวล ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้จะมีผลต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ ทำให้ยากต่อการจุดเผาภายในเตาและจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมากปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวมวลมีค่าต่ำแต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็กก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากยิ่งขึ้นและแก๊สที่ผลิตได้ก็จะมีฝุ่นมากยิ่งขึ้น จากปฏิกิริยาถ้าอุณหภูมิในไซนรีดักชันสูงกว่า 900 °C แล้วแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยน เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,100 °C จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของไซนรีดักชัน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 8 ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 400-600 °C ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเพราะจะทำให้ส่วนผสมของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สชีวมวลมีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้แก๊สมี

ค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้น แต่ถ้าในกระบวนการที่มีไอน้ำมากเกินไปไอน้ำอาจทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการที่ 9 ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water Shift Reduction ทำให้ค่าความร้อนของแก๊สชีวมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไปนอกจากนี้ในกระบวนการรีดักชัน แก๊สไฮโดรเจนบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดแก๊สมีเทนขึ้นได้ อุณหภูมิประมาณ 560 °C ดังสมการที่ 10 ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Methane Production



ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวมวล

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สชีวมวล

1.1 ความชื้นของเชื้อเพลิง (Moisture Content) ความชื้นของเชื้อเพลิงจะช่วยทำให้สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนในแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้น แต่ความชื้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาผลิตแก๊สและค่าความร้อนที่ต้องการลดลง ความชื้นของเชื้อเพลิงชีวมวล แหล่งที่มาและการเตรียมสภาพก่อนนำไปผลิตแก๊สชีวมวลความชื้น (นคร, 2553) แบ่งออกได้ 3 ลักษณะ ดังนี้

- ลักษณะความชื้นภายในเนื้อชีวมวล เป็นส่วนที่สามารถอยู่ในรูเปิดของเซลล์ในชีวมวลได้โดยสมดุลกับบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 96-97%
- ลักษณะความชื้นผิว เป็นส่วนที่ล้นเกินจากความชื้นในรูเปิดของเตาชีวมวล
- ลักษณะความชื้นจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 200-250 °C ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ระเหยความชื้นผิวและความชื้นที่อยู่ภายในเนื้อชีวมวล ถ้าต้องการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน ความชื้นทั้งหมดควรไม่เกิน 50%

1.2 ขนาดของเชื้อเพลิง (Fuel Size) ขนาดของเชื้อเพลิงหากมีขนาดไม่เหมาะสม เชื้อเพลิงจะไหลลงไม่สะดวกและไม่ทันกับการเผาไหม้ ทำให้ปริมาณแก๊สไม่ต่อเนื่องและหากมีอากาศเข้ามาผสมในอัตราส่วนต่อเชื้อเพลิงสูงจะส่งผลให้อุณหภูมิในห้องเผาไหม้ของเตาผลิตแก๊สชีวมวลสูงขึ้น จะ

ทำให้เกิดการเหนียวนำเกิดฝ้าหลอมในเชื้อเพลิงได้ ขนาดความเหมาะสมของเชื้อเพลิง ต้องตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1-2 Cm จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น

1.3 การกระจายขนาด (Size Distribution) เชื้อเพลิงที่ไม่สร้างปัญหาให้กับเตาเผาชีวมวล ต้องมีขนาดสม่ำเสมอ ไม่แตกต่างกันมากเพราะขนาดแตกต่างกันมาก อากาศและแก๊สชีวมวลจะไหลผ่านตามช่องว่างที่เกิดจากเชื้อเพลิงขนาดใหญ่และเล็กเกยอัดกัน ทำให้บางบริเวณจะมีการลุกไหม้ที่รุนแรงและบางบริเวณเย็นตัวลงและอาจสลับกันในเวลาต่อมา ทำให้เกิดการหลอมกันก้อน

1.4 สารระเหยในเชื้อเพลิง (Volatile Matter) สารระเหยที่ปล่อยออกมาระหว่างปฏิกิริยาสามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิ 100-500 °C ซึ่งจะก่อตัวเป็นน้ำมันดินและน้ำมันที่กลั่นตัวต่างๆ ถ้าเชื้อเพลิงมีสารระเหยมากอาจจะสร้างปัญหาได้ เนื่องจากน้ำมันดินและไอน้ำอุณหภูมิควบแน่น 120-150 °C จะเกาะฝังตัวบนผนังจึงต้องแยกออกก่อนนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์

1.5 ขี้เถ้า (Ash) เกิดจากสารแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบในเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนขณะการเผาไหม้ในความเป็นจริงอาจจะมีถ่านชาร์ค้ำอยู่ด้วย สัดส่วนของขี้เถ้าในเชื้อเพลิงจะมีผลต่อการทำงานของเตาเผาชีวมวล ถ้าสัดส่วนขี้เถ้าในเชื้อเพลิงมีค่าสูงก็จะทำให้พลังงานของแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวลลดลง และเตาผลิตแก๊สชีวมวล ต้องมีเนื้อที่เก็บขี้เถ้ามากขึ้นหากเกิดขี้เถ้าหลอมตัว จะเกิดปัญหาในการเผาไหม้และกำจัด

1.6 ความหนาของชั้นเชื้อเพลิง (Bed Thickness) ความหนาของชั้นเชื้อเพลิงจะมีผลต่อปฏิกิริยาของเคมีที่เกิดขึ้นในเตาผลิตแก๊สชีวมวล ในกรณีที่มีความหนาแน่นของชั้นเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันมีช่วงกว้างมากขึ้น ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิของเตาลดลง

2. การประเมินสมรรถนะเตาผลิตแก๊สชีวมวล

เตาแก๊สชีวมวลในโครงการวิจัยเป็นเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงมีการปรับอัตราส่วน ต่อเชื้อเพลิงในระหว่างการทดสอบ ซึ่งสมการคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี สามารถหาได้ ดังสมการที่ 11

$$A/F_{th} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \quad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อ A/F_{th} คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทฤษฎี
 \dot{m}_{air} คือ อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
 \dot{m}_{fuel} คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง (kg/s)

อัตราการสิ้นเปลืองใช้เชื้อเพลิงชีวมวลหาได้จากปริมาณการเทียบกับช่วงเวลาในการใช้งาน ซึ่งมีหน่วยเป็นมวลต่อเวลา สมการที่ใช้หาอัตราการสิ้นเปลืองชีวมวลหาได้ดังต่อไปนี้ ดังสมการ 12

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad \text{สมการที่ 12}$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/h)
 m คือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด (kg)
 t คือ ระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิง (h)

ค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สสามารถหาได้จากการนำส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่วัดได้นำไปทำการคำนวณ ซึ่งในการทดลองจะสามารถวิเคราะห์ส่วนประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแก๊ส เพื่อหาปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน เป็นร้อยละ ค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊สหาได้ ดังสมการ 13

$$HV_{\text{gas}} = \frac{(13.1 \times \text{CO}\%) + (13.2 \times \text{H}_2\%) + (41.2 \times \text{CH}_4\%)}{100} \quad \text{สมการที่ 13}$$

เมื่อ HV_{gas} คือ ค่าความร้อนของโปรตีนเซอร์แก๊ส (MJ/Nm^3)
 CO คือ ร้อยละของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊ส (%) ค่าความร้อนจำเพาะของ CO เท่ากับ $12.63 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$
 H_2 คือ ร้อยละของปริมาณไฮโดรเจนในแก๊ส (%) ค่าความร้อนจำเพาะของ H_2 เท่ากับ $13.2 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$
 CH_4 คือ ร้อยละของปริมาณมีเทนในแก๊ส (%) ค่าความร้อนจำเพาะของ CH_4 เท่ากับ $41.2 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$

ประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สซีไฟเออร์ คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่หาอัตราแก๊สที่ผลิตได้ส่วนพลังงานชีวมวลที่ป้อนให้กับเครื่องผลิตแก๊ส สมการประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สซีไฟเออร์ ดังสมการ 14

$$\eta_{\text{th}} = \frac{HV_{\text{gas}} \times \dot{m}_{\text{gas}}}{HV_{\text{fuel}} \times \dot{m}_{\text{fuel}}} \times 100\% \quad \text{สมการที่ 14}$$

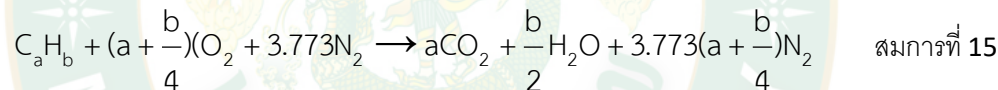
เมื่อ	η_{th}	คือ	ประสิทธิภาพความร้อนของเตาแก๊สซีฟิเออร์ (%)
	HV_{gas}	คือ	ค่าความร้อนต่ำของแก๊สเชื้อเพลิง (MJ/Nm ³)
	HV_{fuel}	คือ	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงแข็งแต่ละชนิด (MJ/kg)
	\dot{m}_{fuel}	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิงแข็งแต่ละชนิด (kg/s)
	\dot{m}_{gas}	คือ	อัตราการไหลของโปรดิวเซอร์แก๊ส (m ³ /s)

3. การประเมินสมรรถนะหัวเตาแก๊สชีวมวล

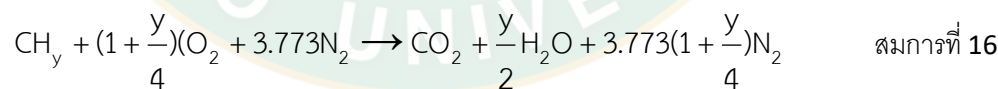
การประเมินสมรรถนะหัวเตาแก๊สชีวมวล ในงานวิจัยนี้จะประเมินสมรรถนะดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์อัตราส่วนผสมแก๊สชีวมวลกับอากาศ

การเผาไหม้เกิดจากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างเชื้อเพลิงกับสารออกซิไดซ์ (ออกซิเจน) ผลจากการทำปฏิกิริยาได้น้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ การเผาไหม้ที่สมบูรณ์หรือการเผาไหม้ทางทฤษฎี (Theoretical combustion) ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีที่มีออกซิเจนเพียงพอที่จะออกซิไดซ์คาร์บอนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิไดซ์ไฮโดรเจนให้เป็นน้ำทั้งหมด ซึ่งเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนใดๆ ใช้สูตร C_aH_b สามารถเขียนเป็นสมการเคมีสำหรับการเผาไหม้ ดังสมการที่ 15



อัตราส่วนโดยโมลของสารทำปฏิกิริยาและสารการเผาไหม้ มีส่วนประกอบของเชื้อเพลิง CH_y โดย $y=b/a$ ดังสมการที่ 16



ซึ่งสามารถหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง หรือ เชื้อเพลิงต่ออากาศได้ ดังสมการที่ 17

$$\left(\frac{A}{F}\right)_s = \left(\frac{F}{A}\right)_s^{-1} = \frac{\left(1 + \frac{y}{4}\right)(32 + 3.773 \times 28.96)}{12.011 + 1.008y} \quad \text{สมการที่ 17}$$

ซึ่งสารที่มีส่วนประกอบจากการเผาไหม้ในสารผสมบางและสารผสมหนาต่างกันไป และอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ พอดีขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเชื้อเพลิง ดังนั้นจึงการกำหนดส่วนประกอบของสารผสมในรูปของ อัตราส่วนสมมูลของเชื้อเพลิงต่ออากาศ (Fuel/air equivalence ratio) (ϕ) ดังสมการที่ 18

$$\phi = \frac{(F/A)_{actual}}{(A/F)_s} = \frac{(m_f/m_a)_{actual}}{(m_f/m_a)_s} \quad \text{สมการที่ 18}$$

โดยมวลของอากาศจริงสามารถประมาณค่าได้จากปริมาตรระจัดกระจายของแก๊สและความหนาแน่น ดังสมการที่ 19 และ 20

$$m_{a,actual} = \rho V_d = \rho \frac{\pi}{4} d^2 l \quad \text{สมการที่ 19}$$

$$m_{f,actual} = \phi \cdot \left(\frac{m_f}{m_a} \right)_s \cdot m_{a,actual} \quad \text{สมการที่ 20}$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง

l คือ ความยาวกระบอกกระยะชัก

ρ คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ 1.2 kg/m^3

โดยมีอัตราส่วนอากาศส่วนเชื้อเพลิงสัมพัทธ์ (Relative air/fuel ratio, λ) ดังสมการที่ 21

$$\lambda = \phi^{-1} = \left(\frac{\left(\frac{A}{F} \right)_{actual}}{\left(\frac{A}{F} \right)_s} \right) \quad \text{สมการที่ 21}$$

ในการเผาไหม้สารผสมกับอากาศจะแยกออกเป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

ลักษณะส่วนผสมการเผาไหม้บาง (Fuel-lean mixture) เป็นส่วนผสมที่มีค่า $\phi < 1$ หรือ $\lambda > 1$ คือมีอัตราเชื้อเพลิงน้อยหรืออากาศมากเกินไปกว่าค่าพอดี

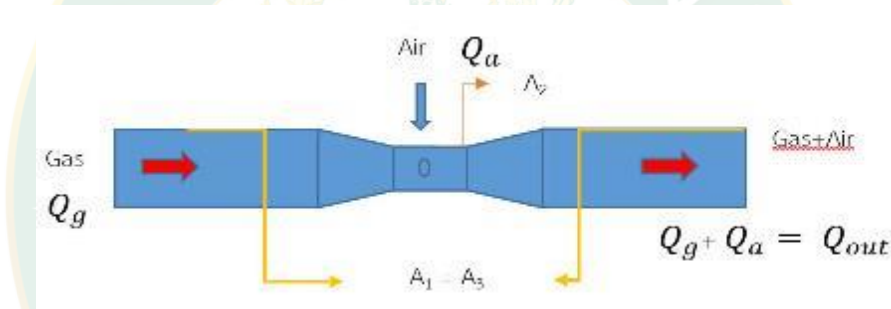
ลักษณะส่วนผสมการเผาไหม้พอดี (Stoichiometric mixture) เป็นส่วนผสมที่มีค่า $\phi = 1$ หรือ $\lambda = 1$ คือมีอัตราเชื้อเพลิงพอดีที่จะถูกออกซิไดซ์ โดยออกซิเจนในอากาศได้หมด

ลักษณะส่วนผสมการเผาไหม้หนา (Fuel-rich mixture) เป็นส่วนผสมที่มีค่า $\phi > 1$ หรือ $\lambda < 1$ คือมีอัตราเชื้อเพลิงมากเกินไปหรือมีอากาศน้อยเกินไปที่จะออกซิไดซ์ เชื้อเพลิงหมด

3.2 การวิเคราะห์อัตราการไหลของแก๊สชีวมวล

สมการความต่อเนื่องและการวัดอัตราการไหล

การทฤษฎี Venturi (Giovanni Venturi) หรืออุปกรณ์ผสมแก๊สกับอากาศ ดังภาพที่ 5 ใช้ทฤษฎีการไหลของเบอร์นูลลี (Bernoulli's theorem) โดยอาศัยหลักการเติมอากาศ บังคับให้ใช้ความเร็วของลมแก๊สไหลผ่านเคลื่อนที่คอคอด ที่มีการเจาะรูเล็กๆ ไว้ หากมีความเร็วของลมแก๊สไหลผ่านบริเวณคอคอดที่ได้ทำการเจาะรูไว้จะทำให้บริเวณนั้นเกิดสภาวะสุญญากาศ ทำให้อากาศภายนอกถูกดูดเข้าไปผสมกับแก๊ส แก๊สที่มีอัตราการไหลในท่อจึงขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดท่อและความเร็วในการไหลของแก๊สนั้นๆ ดังสมการที่ 22



ภาพที่ 5 ลักษณะท่อเวนทิวรี (Venturi tube)

อัตราการไหลทางทฤษฎี

$$Q = AV$$

สมการที่ 22

- เมื่อ Q คือ อัตราการไหลของแก๊ส (m^3/s)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อที่มีแก๊สไหลผ่าน (m^2)
 V คือ ความเร็วเฉลี่ย (m/s)

การวิเคราะห์เปรียบเทียบต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในการใช้งานหัวเตาเผาแก๊สชีวมวลที่ใช้กับเตาเผาแบบไหลลง มีหัวข้อตามหลักการวิเคราะห์มูลค่าทางเศรษฐศาสตร์ดังนี้

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value) หรือ NPV ความหมายคือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลการประหยัดต้นทุน พลังงานจากมาตรการในรูปแบบตัวเงินที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละปี ตลอดอายุของโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไปภายใต้โครงการพิจารณา ณ อัตราลดค่า (Discount Rate) หรือค่าของทุน (Cost of Capital) ด้วยค่านิยามข้างต้น วิเคราะห์ตามหลักมูลค่า เศรษฐศาสตร์ มูลค่าปัจจุบันสุทธิได้ ดังสมการที่ 23

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad \text{สมการที่ 23}$$

เมื่อ ES_t คือ ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (Energy Cost Saving) รายปีตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n
 I_0 คือ เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (Total Investment)
 i คือ อัตราลดค่า (Discount Rate)
 n คือ อายุของโครงการ

วิเคราะห์ผลภายใน (Internal Rate of Return) หรือ IRR ความหมายคืออัตราลดค่า (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะต้องจ่ายในการลงทุน เท่ากับ มูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสด ที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินการประหยัดพลังงานตลอดอายุของโครงการ ด้วยค่านิยามข้างต้น วิเคราะห์ตามหลักมูลค่า เศรษฐศาสตร์ วิเคราะห์ผลภายใน ได้ดังสมการที่ 24

$$-I_0 = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+IRR)^t} = 0 \quad \text{สมการที่ 24}$$

เมื่อ ES_t คือ ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (Energy Cost Saving) รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง n
 I_0 คือ เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (Total Investment)
 N คือ อายุของโครงการ
 IRR คือ อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return)

งวดเวลาคืนทุน (Payback Period) หรือ PB ความหมายคือระยะเวลา (เป็นจำนวนปี/เดือน หรือวัน) ที่กระแสเงินสดรับจากโครงการสามารถชดเชยกระแสเงินสดจ่ายลงทุนสุทธิตอนเริ่มโครงการพอดีเนื่องจากโครงการที่ขอรับการสนับสนุนจะมีลักษณะการลงทุนเพียงครั้งเดียวในปีแรกและจะให้

ผลตอบแทนที่เท่ากันทุกปี ด้วยค่านิยามข้างต้น วิเคราะห์ตามหลักมูลค่าเศรษฐศาสตร์ค่าวงเวลาคืนทุนสามารถกระทำได้ 2 วิธีดังนี้

วิธี Static Method จะให้ค่าวงเวลาคืนทุนเร็วได้ ดังสมการที่ 25

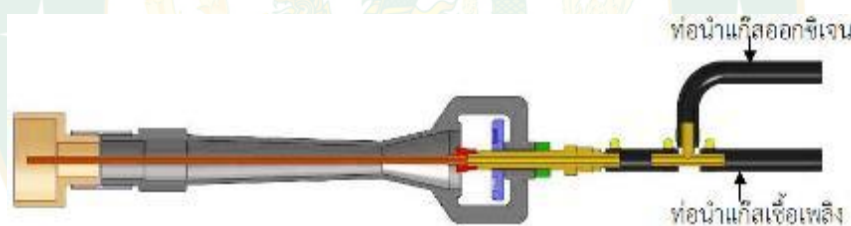
วงเวลาคืนทุน = เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ (Total Investment)/ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ต่อปี (Annual Energy Cost Saving) สมการที่ 25

วิธี Dynamic Method ดังแสดงได้ ดังสมการที่ 26

วงเวลาคืนทุน = จำนวนปีที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์หรือมากกว่าศูนย์ สมการที่ 26

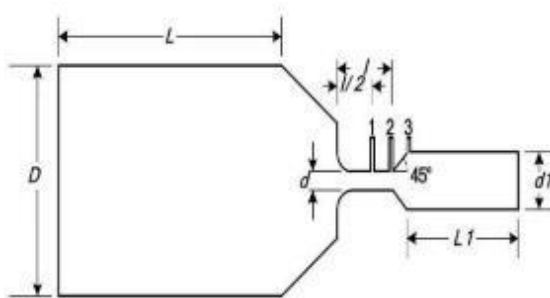
การตรวจสอบเอกสาร

ยุทธพงษ์ (2560) ได้ศึกษาเรื่องการประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวนจูรีในเตาเผาเซรามิกซ์ โดยใช้ชุดอุปกรณ์เวนจูรีควบคุมอัตราการไหลแก๊สปิโตเลียมเหลวก่อนนำไปเผาในห้อง 1 m^3 ที่อุณหภูมิ $1,220 \text{ }^\circ\text{C}$ ผลวิจัยพบว่า ชุดอุปกรณ์เวนจูรีช่วยประหยัดเวลาการเผาไหม้ 4 h คิดเป็นร้อยละ 28.57 ประหยัดเชื้อเพลิงได้ 8.9 kg คิดเป็น 26.10% ดังแสดงภาพที่ 6



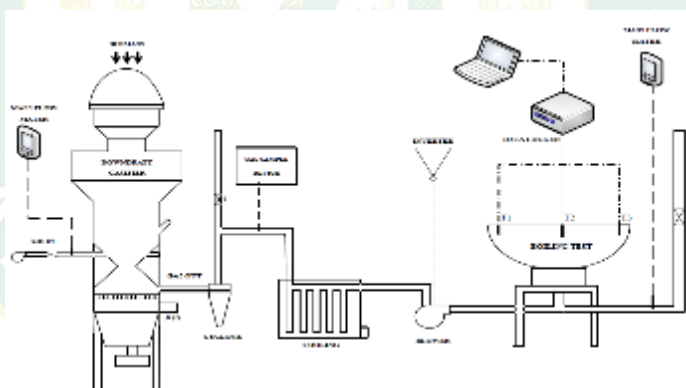
ภาพที่ 6 โครงสร้างภายในของชุดอุปกรณ์หัวเผาแบบใช้แก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา

ลອງ และ ทวีเดช (2557) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนพื้นที่คอคอดและตำแหน่งรูอากาศ ต่ออัตราการดูดอากาศของหัวฉีดเติมอากาศแบบเหนี่ยวนำ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีการผสมน้ำและอากาศเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยอาศัยหลักการเวนจูรีอัตราส่วนของขนาดพื้นที่หน้าตัดคอคอดต่อขนาดความยาวคอคอด และตำแหน่งของรูอากาศต่ออัตราการดูดอากาศ โดยการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรม (Computational Fluid Dynamics, CFD) ใช้อัตราส่วนพื้นที่หน้าตัด 3 ขนาด คือ 0.25 0.30 และ 0.35 และกำหนดตำแหน่งรูอากาศ ณ บริเวณต้น กลาง ปลายคอคอด และต้น diffuser โดยที่คอคอดมีความยาว 10 mm เท่ากันหมด พบว่า ตำแหน่งของรูอากาศที่ให้อัตราการดูดของอากาศสูงสุดคือบริเวณต้น diffuser อัตรา การดูดอากาศสูงสุดเกิดขึ้นกับหัวฉีดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด 0.25 ดังแสดงภาพที่ 7



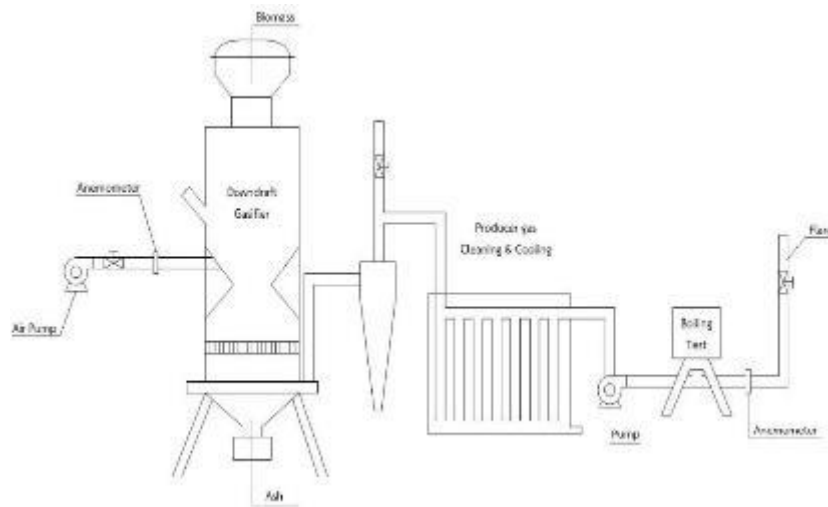
ภาพที่ 7 โครงสร้างภายในของชุดอุปกรณ์หัวเผาแบบ
ใช้แก๊สออกซิเจนร่วมในการเผา

เชิดชูเกียรติ และคณะ (2559) ได้ศึกษาหาขนาดที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อนำไปใช้กับเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง โดยใช้เชื้อเพลิง 3 ชนิด คือ ไม้ลำไย ชังข้าวโพดและถ่านลำไย ขนาด 25 50 และ 75 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25-40 mm จากการศึกษาพบว่าค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดให้ค่าความร้อน 3.43 4.57 และ 3.80 MJ/Nm² ขนาดเชื้อเพลิงที่เหมาะสม มีขนาดความยาว 25 mm ประสิทธิภาพความร้อนเตาผลิตแก๊สชีวมวลสูงสุด 86.57% ดังแสดงภาพที่ 8



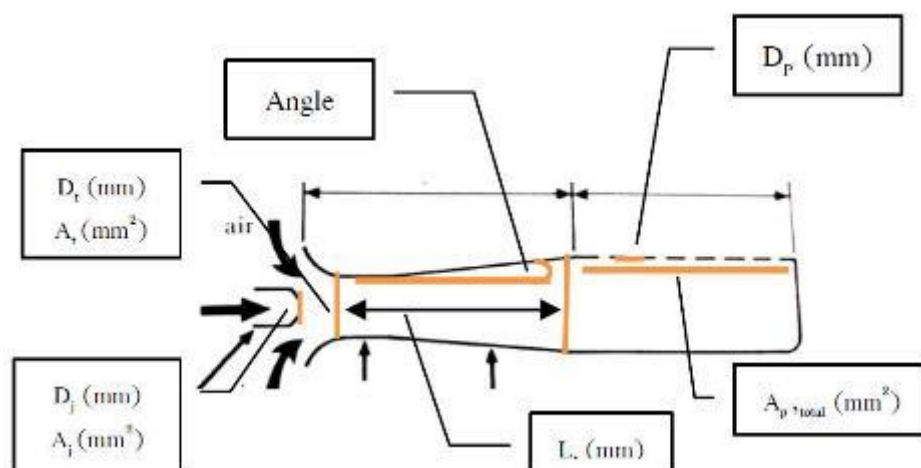
ภาพที่ 8 ไดอะแกรมการทดสอบผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

ปัญญาพร และคณะ (2558) ได้ศึกษาติดตั้งชุดทำความสะอาดและชุดลดอุณหภูมิแก๊สใช้ร่วมกับเตาแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลง โดยใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิด โดยใช้อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิง 2.88 3.43 และ 3.84 กับปาล์มอัดแท่ง ใช้อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิง 2.88 3.50 และ 4.03 กับไม้ลำไย มี จากการศึกษาพบว่าระบบมีประสิทธิภาพมีค่าความร้อนสูงสุด 63.80 % ที่อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.43 ของปาล์มอัดแท่ง และ 84.42% ที่อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.50% ของไม้ลำไย เชื้อเพลิงละชนิดให้ค่าความร้อน 4.40 และ 3.44 MJ/Nm² ดังแสดงภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ไดอะแกรมของระบบผลิตโปรดิวเซอร์แก๊สในเตาแก๊สชีวภาพแบบไหลลง

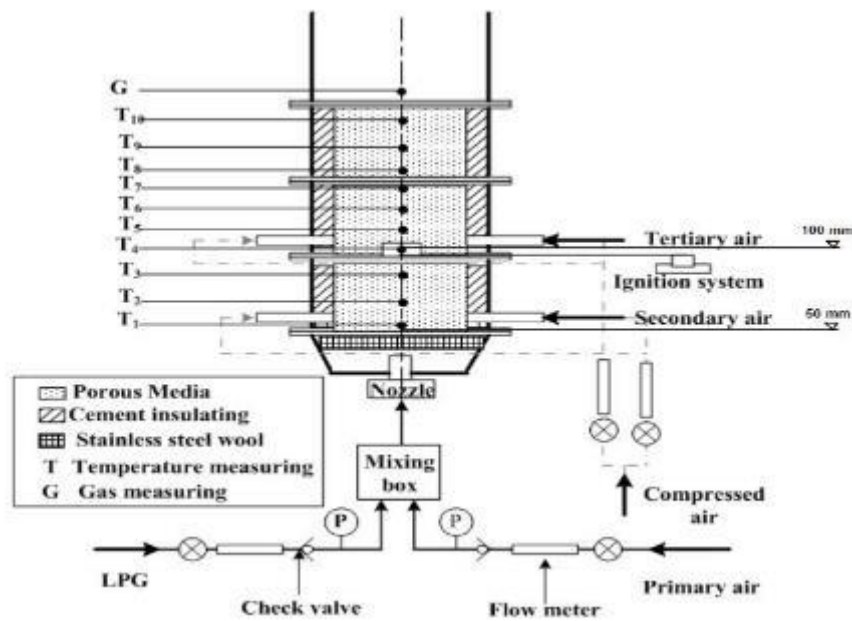
สหสวรรค์ และ รัชพล (2557) ได้ศึกษาออกแบบเตาหุงต้มที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนอากาศเชื้อเพลิงเท่ากับ 6.44:1 การพัฒนาเตาแก๊สชีวภาพได้ใช้เตาแก๊สหุงต้มที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด โดยมีขนาดความยาว 109 cm คอคอดเป็นทรงกรวยทำมุม 5 องศา ขนาดพื้นที่หน้าตัดรูดรวม 400 cm จำนวน 135 รู ทดสอบหาค่าประสิทธิภาพของเตาโดยวิธีการต้มน้ำ โดยเปรียบเทียบกับเตาแบบดั้งเดิม พบว่าเตาหุงต้มที่พัฒนาใหม่สำหรับใช้แก๊สชีวภาพ มีประสิทธิภาพเท่ากับ 72.59% ดีกว่าเตาแบบดั้งเดิม 5.46% ดังแสดงภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบหัวเผาแก๊สชีวภาพ

ที่มา: สหสวรรค์ และ รัชพล (2557)

อาวุธ และ อาวุธ (2551) ได้ศึกษาพฤติกรรมสมรรถนะการเผาไหม้ของแก๊สหุงต้ม ที่เกิดขึ้นภายในหัวสตูพรุนโดยการทดลองควบคุมอัตราส่วนผสมอากาศ จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่ามากกว่า 99% และอุณหภูมิภายในหัวเผาหัวสตูพรุนมีค่ามากกว่า 1,000 °C การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นค่อนข้างเสถียร ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ออกจากไอเสียมีค่าต่ำ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากการอุ่นอากาศและเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ ทำให้มีอุณหภูมิสูงซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 720-950 °C หัวเผาหัวสตูพรุนมีพฤติกรรมการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิเปลวไฟต่ำ อยู่ในช่วง 1,050-1,100 °C ส่งผลให้ปริมาณ NO_x ไนโตรเจนออกไซด์ ที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณต่ำซึ่งอยู่ในช่วง 35-55 ppm และช่วงของการเผาไหม้มีความยาวของเปลวไฟประมาณ 100 mm จึงส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณต่ำอยู่ในช่วง 30-150 ppm ดังแสดงภาพที่ 11

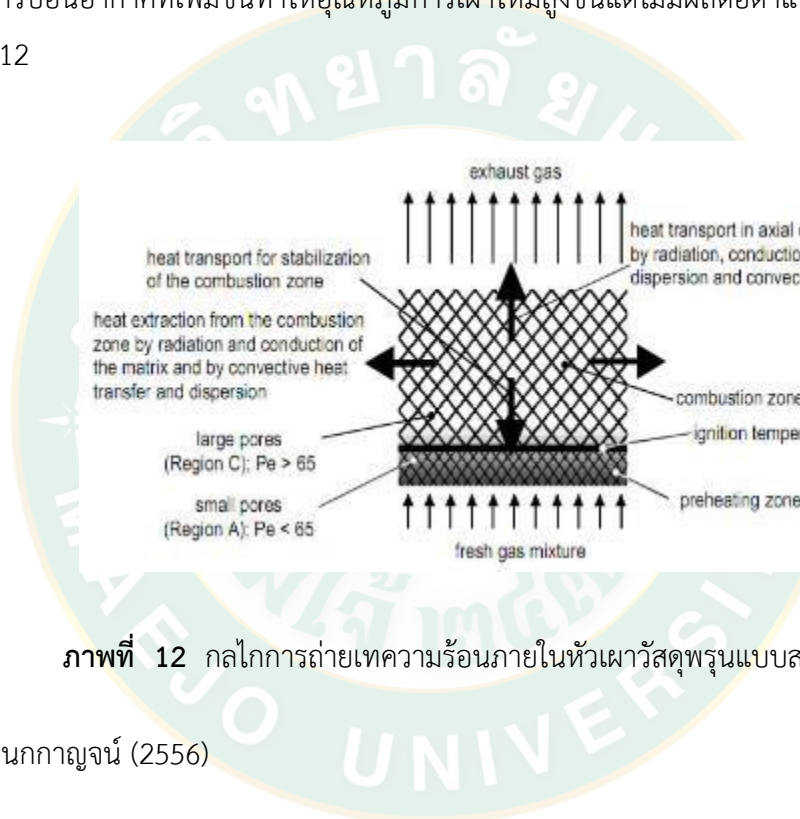


ภาพที่ 11 แสดงชุดทดสอบพฤติกรรมการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาเผาไหม้หัวสตูพรุนที่มีการจ่ายอากาศเป็นชั้น

ที่มา: อาวุธ และ จารุวัตร (2551)

กนกกาญจน์ (2556) ได้ศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมระหว่างแก๊สชีววมวลกับแก๊สหุงต้มในหัวเผาหัวสตูพรุน การทดสอบใช้แก๊สซิฟิเออร์แบบอากาศไหลลง และหัวเผาหัวสตูพรุนแบบสองชั้น แก๊สซิฟิเออร์ถูกออกแบบให้มีการป้อนเชื้อเพลิงชีววมวลอย่างต่อเนื่องด้วยสกรู และใช้ไม้ก้ามปูเป็น

เชื้อเพลิงโดยออกแบบให้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่รีแอกเตอร์ 600-700 °C ในส่วนของหัวเผาวัสดุ
 พอร์ซุสถูกออกแบบให้เป็นสองชั้น โดยวัสดุพอร์ซุสทางด้าน upstream จะถูกออกแบบให้มีขนาดของ
 ช่องว่างเล็ก ($Pe < 65$) ทำหน้าที่เป็นตัวกันไม่ให้เกิดการย้อนกลับของเปลวไฟ ในขณะที่วัสดุพอร์ซุสที่ติด
 ตั้งอยู่ทางด้าน downstream จะมีขนาดของช่องว่างที่ใหญ่กว่า ($Pe > 65$) เพื่อทำหน้าที่เป็นบริเวณ
 เผาไหม้ โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของเชื้อเพลิง สัดส่วนระหว่างแก๊สชีวมวลกับแก๊สหุงต้มและ
 อัตราการป้อนอากาศ ผลทดสอบพบว่า การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมระหว่างแก๊สชีวมวลกับแก๊สหุง
 ต้ม และแก๊สชีวมวลเพียงชนิดเดียว สามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีเสถียรภาพภายในหัวเผาวัสดุพอร์ซุส โดย
 อัตราการป้อนอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้นแต่ไม่มีผลต่อตำแหน่งเปลวไฟดังแสดง
 ภาพที่ 12

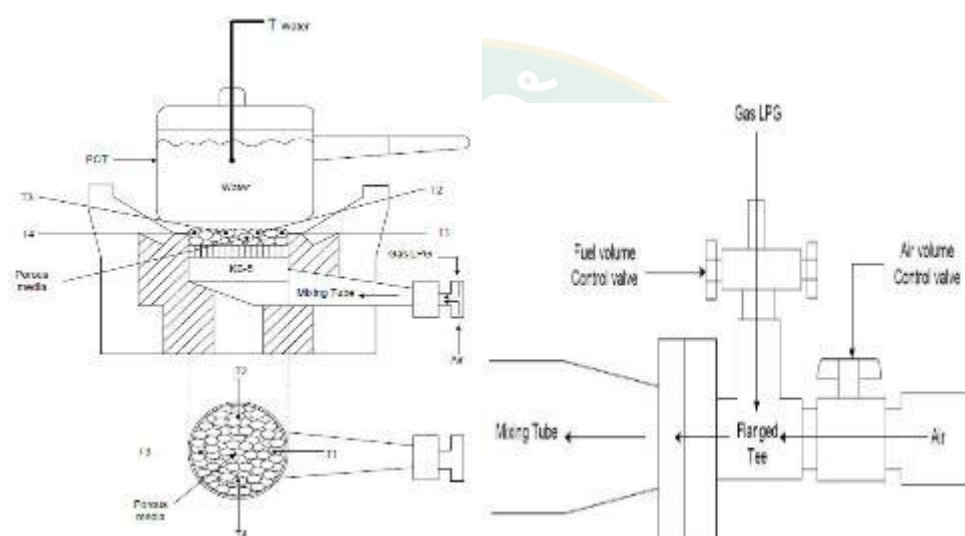


ภาพที่ 12 กลไกการถ่ายเทความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพอร์ซุสแบบสองตอน

ที่มา: กนกกาญจน์ (2556)

Chawdhury and Mahkamov (2011); มกร และ ชลภัทร (2553) ได้ศึกษาทดสอบหา
 สมรรถนะของเตาแก๊ส แบบไม่มีวัสดุพอร์ซุสและมีชั้นวัสดุพอร์ซุสขอบเขต นำหลักการเผาไหม้วัสดุพอร์ซุสมา
 ประยุกต์ใช้กับเตาแก๊สที่ใช้ในครัวเรือนวัสดุพอร์ซุส 3 ชนิดคือ หินสีดำ ขาว และเศษโลหะ ซึ่งทั้งหมดมี
 ค่าความพอร์ซุส เท่ากับ 0.5 การเผาไหม้เป็นแบบเชื้อเพลิงผสมอากาศกันก่อนเผาไหม้และใช้ LPG เป็น
 เชื้อเพลิง ทดสอบอัตราส่วนผสม ϕ ตั้งแต่ 0.65–1.64 กำหนดมีภาระความร้อนเท่ากับ 211 kJ จาก
 การทดสอบพบว่าอุณหภูมิเปลวไฟ เฉลี่ยของการเผาไหม้วัสดุพอร์ซุสหินสีดำและสีขาวสูงกว่าการเผาไหม้
 ปกติคิดเป็นร้อยละ 24 และ 16 ตามลำดับ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 980°C สำหรับวัสดุพอร์ซุสหินสีดำ
 ขยายค่า ϕ ได้ถึง 0.16 – 0.65 คิดเป็นร้อยละ 50 ของช่วงทดสอบ ในช่วงค่า ϕ การเผาไหม้แบบ

ปกติไม่สามารถติดไฟได้สามารถผลิตอัตราความร้อนออกมาได้เฉลี่ยประมาณ 0.5 kW และมีอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง จำเพาะต่ำกว่าการเผาไหม้แบบปกติคิดเป็นร้อยละ 42 โดยเฉลี่ย ซึ่งมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.16 kg/kWh ที่ ϕ เท่ากับ 0.16 ส่วนประสิทธิภาพทางความร้อนนั้นเพิ่มสูงขึ้นประมาณร้อยละ 12 โดยการเผาไหม้วัสดุพูนชนิดหินสี ดำและสีขาวมีค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 50 ที่ ϕ เท่ากับ 0.16 แต่เมื่อเทียบที่ค่า ϕ ในช่วง 0.65 – 1.64 การเผาไหม้แบบปกติมีสมรรถนะดีกว่าแบบมีวัสดุพูนเล็กน้อย ดังแสดงภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ทดสอบหาสมรรถนะของเตาแก๊ส แบบไม่มีวัสดุพูน และมีชั้นวัสดุพูนขอบเขต

ที่มา: มกร และ ชลภัทร (2553)

Belonio (2005) ได้ทำการศึกษาออกแบบพัฒนาหัวเผาเตาแก๊สชีวมวล สำหรับอุตสาหกรรมและครัวเรือน โดยสร้างเพิ่มหัวเผา 2 หัวเผา กับเตาแก๊สชีวมวล ใช้เชื้อเพลิงแกลบ 2 kg และใช้ไม้เนื้อแข็งเสริม 0.8 kg อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตามีค่าเฉลี่ย 2.6 kg/h แก๊สที่ติดไฟได้ผลิตใน 5 ถึง 10 min ทดสอบป้อนเชื้อเพลิงโดยการต้มน้ำ 14 ถึง 20 min แต่ละหัวเผา มีการการเปิดวาล์วควบคุมแก๊สที่เตาให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยก๊าซออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์เป็น 185 °C อุณหภูมิที่ด้านล่างของหม้อเฉลี่ยอยู่ที่ 420 °C ขึ้น พบว่าประสิทธิภาพความร้อนโดยรวมมีส่งออกพลังงานความร้อนของเตาทั้งสองเตาเป็น 2,028 kcal/h และ 1,014 kcal/h ประสิทธิภาพการผลิตค่าความร้อน 26 %

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การพัฒนาหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูงมีวิธีการดำเนินการวิจัยทั้งหมดอยู่ 3 ส่วนหลักคือส่วนการจัดเตรียมอุปกรณ์ วัสดุ เครื่องมือวัด ส่วนของการวิเคราะห์ เงื่อนไขการทดลอง และส่วนของวิธีการทดลองในแต่ละเงื่อนไข ซึ่งรายละเอียดของวิธีดำเนินการมีดังนี้

เครื่องมืออุปกรณ์และวัสดุงานวิจัย

1. เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

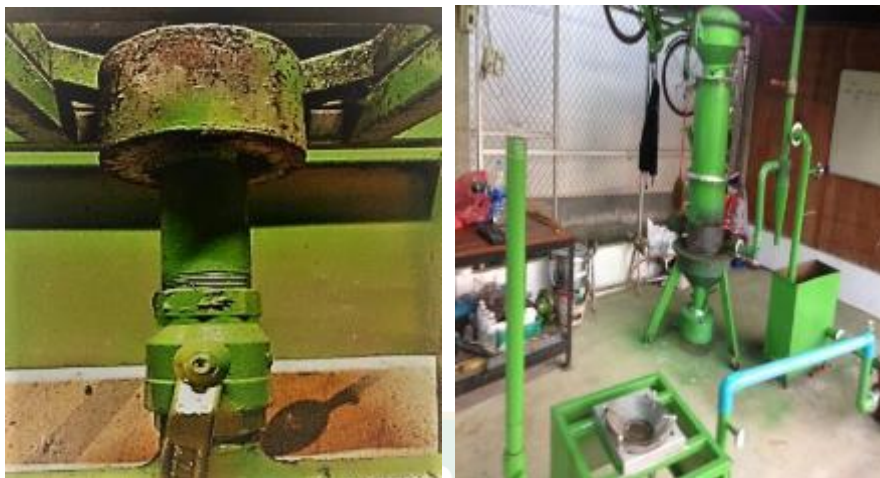
เตาแก๊สชีวมวลที่ใช้ทดสอบเป็นเตาแก๊สแบบไหลลง ออกแบบพัฒนา สำหรับการใช้ความสมบูรณ์ของแก๊สชีวมวลของเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลลงแสดงดังภาพที่ 14 ใช้ถ่านหรือไม้เป็นเชื้อเพลิง และเติมเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง มีห้องเผาไหม้เป็นรูปกรวย โดยคอคอดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 cm ความสูงของหัวฉีดยึดเมื่อเทียบกับระนาบคอคอด 12.61 cm หัวฉีดยึดมีจำนวน 5 หัว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดยึด 15 mm ที่เติมเชื้อเพลิงพร้อมฝาปิด ด้านขอบของที่เติมใช้น้ำป้องกันแก๊สรั่วออกสู่ภายนอกตัวเตา บรรจุถ่านได้ทั้งหมด 30 kg ประสิทธิภาพแก๊สซิไฟเออร์เฉลี่ยประมาณ 60 - 75% (นคร, 2553) ตรงท่อลำเลียงแก๊สทางออกเชื่อมต่อ ไชโคลนดักฝุ่น ชุดลดอุณหภูมิแก๊สชีวมวลเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแก๊สและน้ำติดตั้งบนถังน้ำขนาด 90 L ใช้หมุนเวียนน้ำ ชุดลำเลียงแก๊สใช้โบว์เวอร์ โดยต่อเชื่อมระหว่างอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนกับหัวเตา ตรงทางออกของแก๊สชีวมวลมีท่อจุดเช็ค



ภาพที่ 14 เตาผลิตแก๊สชีววมวลแบบไหลลง

2. หัวเตาแก๊สชีววมวลแบบดั้งเดิม

ชนิดหัวเตาแก๊สชีววมวลแบบดั้งเดิม ถูกออกแบบมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการหุงต้มหรือทำอาหารในระดับชุมชน อุปกรณ์หลักของเตามี 2 ส่วน คือ วาล์วควบคุมอัตราการไหลของแก๊สและหัวเตาแก๊ส วาล์วควบคุมที่ใช้ปรับอัตราการไหลแก๊สเป็นแบบบรอนซ์วาล์วขนาด 2 นิ้ว หัวเตาแก๊สมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 mm รูปทรงกระบอก สูง 75 mm ช่องทางเข้ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และตรงทางออกมีการเจาะรูเป็นวงรอบ จำนวน 3 วงรอบ นับจำนวนรูได้ทั้งหมด 32 รู ดังภาพที่ 15 ในแต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 mm ด้านบนของหัวเตายังมีชุดวางกันหม้อต้มน้ำซึ่งนำเอาชุดวางหม้อต้มน้ำของแก๊สหุงต้มมาดัดแปลงติดตั้ง สามารถรับหม้อต้มน้ำที่มีขนาด 16 - 50 mm วัตตความสูงของหัวเตาแก๊สจนถึงกันหม้ออยู่ในช่วง 10 - 15 mm



ภาพที่ 15 หัวเตาแก๊สซีวมวลแบบดั้งเดิม

3. หัวเตาแก๊สซีวมวลแบบประสิทธิภาพสูง

หัวเตาแก๊สซีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ออกแบบและพัฒนาขึ้น มีส่วนประกอบหลักทั้งหมดอยู่ 2 ส่วนคือชุดปรับอัตราการผสมอากาศและแก๊สซีวมวล และชุดหัวเตาแก๊สเซรามิก รายละเอียดของหัวเตาแก๊สซีวมวลประสิทธิภาพสูงมีดังนี้

3.1 อุปกรณ์ชุดปรับผสมอากาศ

ชุดปรับอัตราการผสมอากาศและแก๊สซีวมวล (Air/gas Mixer) โดยมีหลักการทำงานภายใต้ทฤษฎีเวนทูรี คือ ให้แก๊สซีวมวลไหลผ่านท่อและซึ่งนำอากาศเข้ามาผสม ซึ่งทางทฤษฎีการผสมของแก๊สซีวมวลกับอากาศเท่ากับ 1:1.2 (ละออง และ ทวีเดช, 2557) ชุดปรับอัตราการผสมอากาศและแก๊สซีวมวลทำมาจากสแตนเลส มีวาล์วขึ้นรูปเป็นกระบอกทรงกลม ซ้อนกันสองชั้นเชื่อมติดสามทางตรงกลางทำเกลียวใส่วาล์วหมุนปิดเปิด ท่อครอบชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 cm ยาว 50 cm ทำรูปทรงกรวยเชื่อมติดสองข้างรับกับท่อสแตนเลส ตรงปลายท่อทั้งสองข้าง เข้าและออก ติดตั้งควบคุมอัตราการไหลของแก๊สขณะเดียวกันตรงกลางท่ออากาศเข้าก็จะติดตั้งวาล์วควบคุมเช่นกัน ลักษณะท่อแนวภายในจะเป็นท่อทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 cm และลดท่อตรงกลางด้วยท่อขนาด 25.4 cm ยาว 25.4 cm ลักษณะเป็นท่อคอคอด รูปแบบเดียวกับการทำเวนทูรี ปลายท่อทั้งสองข้างทำเกลียวด้านท่อทางเข้าใส่วาล์วหมุนปิดเปิด ด้านท่อทางออกใส่บอลวาล์วปิดเปิด วางแนวท่อให้แขนรับน้ำหนัก เชื่อมท่อแยกสามทาง ท่อแยกมีความยาว 110 cm เพื่อใช้ระบายแก๊สช่วงจุดใหม่ แนวท่ออีกทางขนาดยาว 22 cm เชื่อมต่อกับหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูงในตู้กำบังลม ดังภาพที่



ภาพที่ 16 ชุดปรับอัตราผสมแก๊สชีวมวลกับอากาศ

3.2 หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบประสิทธิภาพสูง

มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกกลมหน้าตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 mm มีขอบความสูง 100 mm ทำจากแผ่นเหล็กม้วนบางน้ำหนัก 2 kg หน้าตัดทั้งหมดทำจากเซรามิกมีรูพรุน ใช้ปลอกแหวนช่วยรัดครอบและมีแท่งเหล็กตั้งรับสัมผัสผิวหม้อต้มสูงจากหน้าตัดแผ่นเซรามิก 15 mm สามารถถอดเปลี่ยนได้ เชื่อมต่อท่อวางเป็นแนวนอนลำเลียงแก๊สชีวมวลเข้าด้านข้าง ใช้ฉนวนเป็นดินเหนียวเผาให้สุกกลวงครอบบนหัวเตาแก๊สชีวมวลเพื่อลดการสูญเสียความร้อนระหว่างการใช้งาน อย่างไรก็ตามด้วยสถานะการทดสอบภายใต้บรรยากาศเปิดหรือไม่ได้เพราะจุดแก๊สเกิดดับระหว่างการทดสอบได้ติดตั้งชุดป้องกันลมเพิ่มมาอีก 1 ชุดด้วย ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบประสิทธิภาพสูง

3.3 ชุดป้องกันลม

มีลักษณะโดยทั่วไปเป็นอุปกรณ์ที่มีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 60 cm ยาว 60 cm สูง 70 cm มีโครงเหล็กกล่องขนาด 25.4 cm เชื่อมรับน้ำหนัก ด้านบนทำเฉลียงครอบทำมุม 45 องศา สูง 25 cm มีปล่องรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสระบายความร้อน ขนาดกว้าง 10 cm ยาว 10 cm สูง 30 cm ด้านล่างเชื่อมเหล็กกล่องขนาด 25.4 cm เป็นขาตั้ง 4 ขาสูงจากพื้น 55 cm ปิดด้วยแผ่นเหล็กเพื่อกันลมพัดเข้ามา มีฝาปิดเปิดตู้เพื่อความสะดวกในการยกหม้อต้มเข้าออก ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 ชุดป้องกันลมขณะทำการทดลอง

3.4 เตาแก๊สหุงต้ม

เตาแก๊สหุงต้มที่นำมาใช้ในงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาแก๊สประสิทธิภาพสูงและเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมโดยหัวเตาเผาแก๊สของแก๊สหุงต้มที่ใช้เป็นรุ่น KB-5 ลักษณะโดยทั่วไป ทำจากเหล็กหล่อ หัวเตามีขนาด 127 mm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระเพาะเตา 280 mm มีเกลียวปรับหัวส่วนผสมแก๊สกับอากาศ ใช้การผสมอากาศออกด้านล่างหัวเตา ผสมกับแก๊สในระหว่างการเผาไหม้ติดตั้งวางบนแท่นเผาที่มีขนาดกว้าง 45 cm ยาว 45 cm สูง 90 cm แก๊สหุงต้มที่ใช้ทดสอบเป็นแก๊สของบริษัทก๊าซหุงต้ม จำกัด (ต้นพะยอม) เลขที่ 244/1 ถนนแก้วนบุรี ตำบลวัดเกต อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ ใบอนุญาตเลขที่ ชม 1610003 (แบบ รก.ก.2) ได้รับแต่งตั้งเป็นตัวแทนจำหน่ายของบริษัท ปตท จำกัด (มหาชน) ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2559 ถึง 31 ธันวาคม 2561 มีค่าความร้อนของแก๊ส 49,700 kJ/kg ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ชุดทดสอบสมรรถนะแก๊สหุงต้ม

วัสดุชีวมวลทดสอบ

วัสดุชีวมวลใช้ในการทดสอบงานวิจัย ประกอบด้วยถ่านไม้ลำไยและเศษไม้ลำไย ทั้งถ่านไม้ลำไยและเศษไม้ลำไยเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ได้จากการตัดแต่งกิ่งไม้ลำไย ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของทางภาคเหนือของประเทศไทย รายละเอียดของวัสดุที่ใช้ทดลองมีดังนี้

1. ถ่านไม้ลำไย (Longan Charcoal)

ถ่านไม้ลำไยที่นำมาจากไม้ลำไยในชุมชน โดยใช้เทคโนโลยีคาร์บอนเซชันในการแปรสภาพเป็นถ่านไม้ลำไย นำมาตากแห้งคัดเลือก และผงถ่านออก ลดขนาดถ่านให้เล็กลงให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-30 mm ซึ่งคุณสมบัติ ถ่านไม้ลำไยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 250-300 kg/m³ มีค่าความร้อนของเชื้อเพลิง 28,000 kJ/kg และไม่เกิน 8% (นิกราน และคณะ, 2554) ภาพถ่ายของถ่านไม้ลำไย ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 การเตรียมถ่านไม้ลำไย

2. เศษไม้ลำไย (Longan)

เศษไม้ลำไย นำมาจากการประกอบอาชีพเกษตรกรรมสวนลำไยในชุมชนวิถีชาวบ้าน หลังฤดูเก็บเกี่ยวผลผลิตและทำการตกแต่งกิ่ง ก่อนบำรุงปุ๋ยธาตุอาหารของต้นลำไย ซึ่งกิ่งไม้ที่เป็นเศษเหลือทิ้ง ขว้างทางการเกษตรที่ถูกลำมาเผาทิ้งก่อมลภาวะควันและฝุ่นละอองทางอากาศและส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจและสภาพแวดล้อมของชุมชน เอาจากองตากแห้งแล้วใช้เลื่อยตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25-30 mm ซึ่งคุณสมบัติลักษณะโดยทั่วไป ไม้ลำไยจะค่าความหนาแน่น 384.57 kg/m^3 และมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (LHV) $14,500 \text{ kJ/kg}$ (นิกราน และคณะ, 2554) ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 การเตรียมไม้ลำไย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยจะเกี่ยวข้องในด้านการวัดค่าอุณหภูมิ อัตราการไหล น้ำหนัก และเครื่องมือช่างตรวจซ่อมและแก้ไขหรืออุปกรณ์เครื่องมือทั่วไปทั่วไปกับเตาผลิตโปรตีนเซอร์แก๊ส โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Temperature Tool)

1.1 เทอร์โมคัพเพิล

เกี่ยวข้องเป็นเครื่องมือวัดในการทดสอบและอ่านค่าอุณหภูมิ ประกอบไปด้วย เทอร์โมคัพเพิล รุ่น JB-35 แบบแยกสาย สำหรับวัดอุณหภูมิใน เตาเผา มีไส้ (ELEMENT) เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 mm. ความยาวของปลอกป้องกันได้ตั้งแต่ 200~1,500 mm อุณหภูมิใช้งานสูงสุด $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เทอร์โมคัพเพิล รุ่น JR-35(K) แบบแยกสายอุณหภูมิการใช้งาน $1,400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ มีไส้ Ceramic เครื่องวัด

อุณหภูมิ INFRARED THERMOMETER รุ่น GM300 ยี่ห้อ BENETECH สำหรับวัดอุณหภูมิระหว่าง - 50 °C ถึง 420 °C ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล Thermometer TM-947SD ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 เครื่องมือใช้วัดอุณหภูมิ

2. เครื่องควบคุมอัตราการไหลและความเร็วการไหล

เกี่ยวข้องเป็นเครื่องมือที่ใช้ควบคุมอัตราการไหล ความเร็วการไหลตัวของแก๊สชีววมลภายในกระบวนการผลิตแก๊สชีววมล อัตราส่วนผสมแก๊สชีววมลกับอากาศ และความเร็ว มีรายละเอียดดังนี้

2.1 เครื่องอินเวอร์เตอร์ควบคุมอัตราการป้อนอากาศ

เครื่องอินเวอร์เตอร์ควบคุมอัตราการป้อนอากาศ มีรายละเอียดเป็นชุดมอเตอร์พัดลม ยี่ห้อ VENZ ELECTRIC BLOWER Model SB 30 ขนาด 0.5 HP 50 Hz Size 3 Inch กระแสไฟฟ้า 0.5 Amp ความเร็วรอบ 2,950 RPM ปรับอัตราการไหล 1-7 m³/h กระแสไฟฟ้า 3 เฟส 380-415 v ยึดติดกับท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm และชุดควบคุมอัตราการไหลของอากาศใช้ INVERTER ยี่ห้อ MITSUBISHI Model D700 กระแสไฟ 4.2 A ปรับอัตราการไหล 1-390 m³/h ดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ชุดควบคุมอัตราการไหลอากาศ

2.2 เครื่องวัดความเร็วลม

เครื่องวัดความเร็วลม ลักษณะโดยทั่วไปมีความละเอียดในการแสดงผล 0.1 m/s วัดความเร็วลมได้สูงถึง 0.4 – 30 m/s 1.4 -90 km/h 0.9-mph 0.8-48.8 knots และ 0-70 °C ขนาดน้ำหนัก 160 g หน่วยการวัดความเร็วลมปรับค่าเป็นเป็นระยะการเคลื่อนที่ต่อเวลาที่เคลื่อนที่ของของไหล (m/s) ซึ่งจะใช้วัดความเร็วในไหลของแก๊สชีวมวล ที่ลำเลียงแก๊สมาเข้าหัวเตาแก๊สชีวมวลดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 เครื่องวัดความเร็วลม

3. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอล

เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล ที่นำมาใช้งานในการชั่งจะมีความแม่นยำและความละเอียดลักษณะโดยทั่วไป มีรายละเอียดดังนี้คือใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิทัล (Digital) รุ่น DS-530 มีรายละเอียดตั้งทศนิยมได้ 2 ตำแหน่ง มีความละเอียด 0.01 g รองรับน้ำหนักได้สูงสุด 60 Kg และต่ำสุด 0.4 Kg ซึ่งมีความคาดเคลื่อน 20 g ดังภาพที่ 25

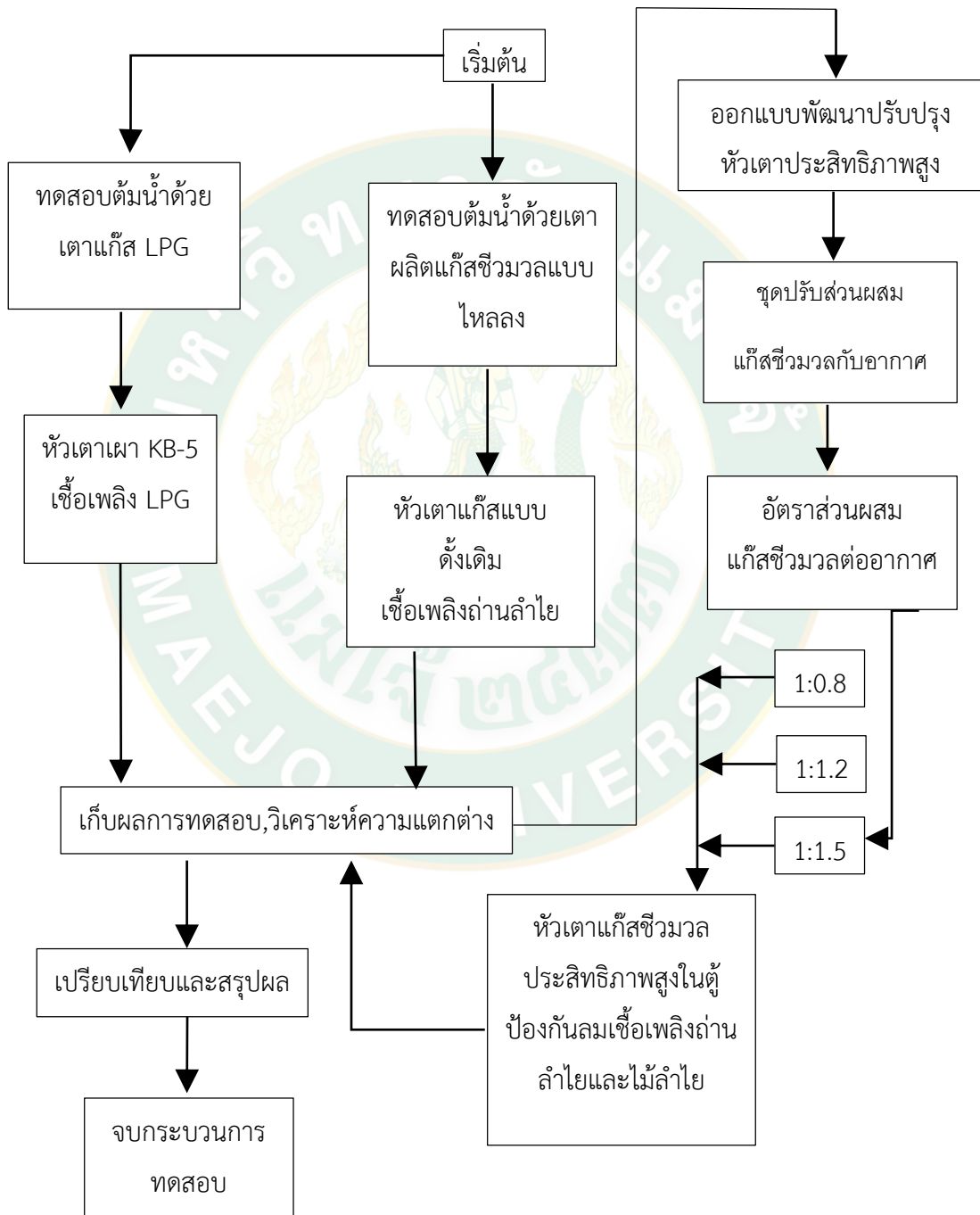


ภาพที่ 25 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล



ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาวิจัย จะทำการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยใช้ร่วมกับเตาผลิตแก๊สชีวมวลโดยสามารถแสดงวิธีการขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 ขั้นตอนวิธีการดำเนินการทดสอบวิจัย

โดยมีเงื่อนไขและขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้

1. เงื่อนไขในการทดลองวิจัย

1.1 การออกแบบและพัฒนาเพื่อปรับปรุงหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมที่มีการจุดติดลุกไหม้ทั่วไปเป็นฐานข้อมูล และพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงโดยมีชุดผสมอัตราส่วนระหว่างแก๊สชีวมวลกับอากาศ ที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกันไป ในอัตราส่วนผสมแก๊สชีวมวลต่ออากาศ (Oxygen) ที่ 1:0.8 1:1.2 และ 1:1.5

1.2 การทดสอบบัติของวัสดุเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนกับหัวเตาแก๊สชีวมวล ภายใต้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบป้อนอากาศไหลลง

1.3 ประเมินสมรรถนะของหัวเตาเผาแก๊สชีวมวล

1.4 ประเมินมูลค่าความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์

วิธีการทดสอบงานวิจัย

รายละเอียดวิธีปฏิบัติการทดสอบงานวิจัย แบ่งออกได้ดังนี้

1. ทดสอบโดยหาประสิทธิภาพหัวเตาแก๊สหุงต้ม

การทดสอบเตาแก๊ส LPG ใช้ร่วมหัวเตาเผาแก๊ส บีโตรีเลียมเหลว LPG แบบ KB-5 ปรับเร่งด้วยอัตราผสมแก๊สกับอากาศเพิ่มประสิทธิภาพ จะนำมาเปรียบเทียบเป็นต้นแบบสำหรับนำไปใช้พัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยทำด้วยมาตรฐานของการต้มน้ำ (boiling test) ทดสอบโดยนำน้ำน้ำหนัก 10 kg ผ่านการชั่งน้ำหนักจากเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ขนาด 60 kg DS-530 เทน้ำใส่หม้อหุงต้มสแตนเลส ติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัพเพิล JR-35, 12 (K) เก็บข้อมูลอุณหภูมิของน้ำตั้งแต่ก่อนต้มจนถึงอุณหภูมิน้ำเดือดสูงสุดเก็บข้อมูลทุกๆ 5 min เป็นระยะเวลา 60 min และทำการชั่งน้ำหนักอัตราน้ำหนักการสิ้นเปลืองของแก๊สบีโตรีเลียมเหลว (LPG) ตามระยะเวลาที่เก็บข้อมูลพร้อมใช้ INFRARED THERMOMETER GM300 ยิงเลเซอร์เก็บอุณหภูมิกันหม้อหุงต้ม และเก็บค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เมื่อครบระยะเวลาทดสอบก็ทำการปิดฝาหม้อหุงต้มสแตนเลส จากนั้นนำน้ำที่เหลือไปชั่งน้ำหนักบันทึกผล ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การต้มน้ำโดยใช้แก๊สหุงต้ม

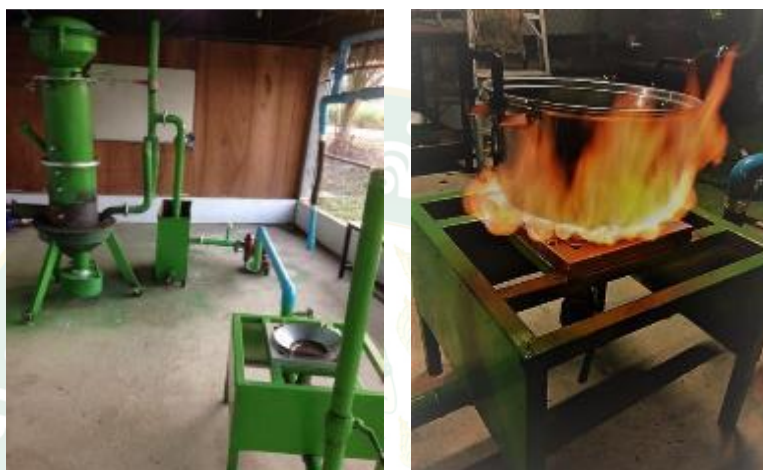
2. ทดสอบหาประสิทธิภาพหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

การทดสอบหัวเตาแก๊สชีวมวลสำหรับงานวิจัยแบบดั้งเดิม (เชิดชูเกียรติ และคณะ, 2559) พบว่าเตาผลิตแก๊สชีวมวล ใช้แบบ Fixer Bed Gasifier หรือ Pack Bed Gasifier มีลักษณะการไหลของแก๊สชีวมวลแบบไหลลง มีประสิทธิภาพ 71.25% ใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ลำไย ขนาด 25-30 mm. น้ำหนัก 30 kg มีสัดส่วนผลิตแก๊สชีวมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) 24% ไฮโดรเจน (H₂) 12% มีเทน (CH₄) 1.1% ที่ความเร็วลม 3 m/s เวลาเดินเครื่อง 330 นาที ค่าความร้อนสูงสุด (HV_{gas} = 4.580 MJ/kg ทำการควบคุมการผลิตแก๊สชีวมวล 4 กระบวนการ คือ

1. กระบวนการ Drying Zone ที่อุณหภูมิ 100-135 °C
2. กระบวนการ Pyrolysis Zone ที่อุณหภูมิ 200-600 °C
3. กระบวนการ Combustion Zone ที่อุณหภูมิ 1,100-1,500 °C
4. กระบวนการ Reduction Zone ที่อุณหภูมิ 500-900 °C

โดยใช้เครื่องวัดเทอร์โมคัพเปิ้ล (JB-35,12 ,JB-35C,10X & JR-35,12 K) การทดสอบต้องมีการใส่เชื้อเพลิงที่จุดติดไฟจากภายนอก ทุกครั้งต้องมีการรองเชื้อเพลิงถ่านลำไยในเตาเผา ก่อนประมาณ 1 kg จากนั้นให้ทำการเติมเชื้อเพลิงให้เต็มเตาเผา และเติมน้ำตรงครอบฝาปิด ป้องกันแก๊สรั่วออกทางฝาปิด แล้วปิดฝาตรงช่องใส่เชื้อเพลิง แล้วทำการเปิดพัดลมเพื่อให้มีการลุกติดไฟเป็นการเติมอากาศตามทฤษฎีการลุกไหม้ จากนั้นรอให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิง 10-15 นาที โดยเปิดวาล์วหลังจากผ่านการไซโคลนดักฝุ่นผงคาร์บอนตรวจสอบปริมาณแก๊ส เมื่อมีการลุกติดของแก๊สเชื้อเพลิงให้ปิดวาล์ว และให้เปิดชุดพัดลม Lutron electronic YK-80AM ที่อัตราเร็วลม 3 m³/s ในการลำเลียงแก๊สเชื้อเพลิงผ่านการ Cooling เพื่อลดอุณหภูมิแก๊สชีวมวลและป้องกันทำ ความเสียหายต่ออุปกรณ์แล้ว

ส่งไปจุดติดไฟที่หัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิม มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 mm เพื่อทำการต้มน้ำ ทดสอบโดยทำตามมาตรฐานของการต้มน้ำ (boiling test) แบบเดียวกับทดสอบการสิ้นเปลืองของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) เก็บข้อมูล บันทึกผล ตลอดเวลาต้องทำการสังเกตการณ์และจะต้องคอยควบคุมผลกระทบ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม กระบวนการป้อนเชื้อเพลิงให้เป็นไปตามกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เก็บค่าบันทึกผลทดสอบและคำนวณหาประสิทธิภาพ ดังภาพที่ 28



ภาพที่ 28 การทดสอบหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

3. ทดสอบหาประสิทธิภาพหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

การทดสอบหัวเตาแก๊สชีวมวลสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง มีขั้นตอนทดสอบขั้นต้นเหมือนการทำในหัวข้อ 1 และข้อ 2 ทดสอบโดยหาประสิทธิภาพหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง โดยออกแบบช่วงการลำเลียงแก๊สชีวมวลก่อนไปจุดติดไฟจะทำการติดตั้งชุดปรับผสมระหว่างอากาศกับแก๊สชีวมวล ในอัตราส่วน 1:0.8 1:1.2 และ 1:1.5 ให้ลำเลียงแก๊สที่ผสมอากาศไหลไปตามท่อที่เชื่อมเข้าด้านข้างหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูงทำจากเซรามิต จุดติดไฟลูกใหม่ที่หัวเตาแก๊สที่ทำจากเซรามิต มีขนาดหัวเตาแก๊สเส้นผ่านศูนย์กลาง 140 mm เภาไหม้ต้มน้ำในห้องสี่เหลี่ยมแผ่นเหล็กสังกะสีป้องกันลมเข้ารอบด้านมีขาแท่งเหล็ก รับน้ำหนัก ขนาดกว้าง 60 cm ยาว 60 cm สูงตามแนวปล่องคว้น 140 cm หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงมี แท่งขาเหล็กตั้งเพื่อรองรับน้ำหนักหม้อต้มน้ำโดยมีระยะช่องว่างระหว่างผิวกันหม้อกับหน้าแปลนหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง 5 mm ทำผนังอิฐทรงกลมป้องกันเปลวไฟออกด้านข้าง เพื่อวิเคราะห์และประมวลผลค่าความร้อน เวลาในการต้มน้ำ เก็บค่าบันทึกผล ดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 การทดสอบหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวล ให้มีความสามารถนำไปใช้ในงานเชิงวิสาหกิจและเชิงพาณิชย์ รายละเอียดผลการศึกษามีทั้งหมดแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อหลัก ประกอบด้วย การปรับปรุงเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง การออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง การพัฒนาและสร้างหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง การวิเคราะห์สมรรถนะเตาและหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงและการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์การใช้งานหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง รายละเอียดผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

การปรับปรุงเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

เตาแก๊สชีวมวลที่นำมาใช้เป็นแบบไหลลงปัจจุบันเตานี้ติดตั้งอยู่ที่ศูนย์วิจัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ผ่านมามีข้อจำกัดในเรื่องของอายุการใช้งานที่ต่ำ เนื่องจากการใช้วัสดุคุณภาพเกรดต่ำ อย่างไรก็ตามก่อนทำการวิจัยในหัวข้อวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงพยายามนำเอาเตาแก๊สชีวมวลมาเริ่มต้นด้วยการปรับปรุง เพื่อให้เตาแก๊สชีวมวลมีสมรรถนะการทำงานสูงสุด รายละเอียดการปรับปรุงเตาแก๊สชีวมวลแบบไหลลง ประกอบด้วยการปรับปรุงในห้องเผาไหม้ ส่วนประกอบพื้นฐานจุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล ปลอกเสื้อห้องเผาไหม้และชุดรองซี่เก้่า ซึ่งรายละเอียดผลการวิจัยในการปรับปรุงมีดังนี้

1. การปรับปรุงห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

ห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงเดิม มีเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณคอคอด 15 cm โดยปกติแล้วห้องเผาไหม้ชนิดนี้ถ้าใช้งานอย่างต่อเนื่องเฉลี่ยประมาณ 700 ชั่วโมง หรือประมาณ 3 เดือน บริเวณคอคอดของเตามักประสบปัญหาเรื่องการสึกกร่อนส่งผลให้สมรรถนะและการทำงานประสิทธิภาพลดต่ำลง ซึ่งบางครั้งอาจจุดไม่ติดเลย ดังนั้นปัญหาหลักของเตานี้คือการเลือกใช้วัสดุทำห้องเผาไหม้ ที่ไม่สามารถทนต่อความร้อนเกิน 1,000 °C ดังภาพที่ 30 ดังนั้นการแก้ปัญหาทางานเพื่อให้เตาสามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องและมีอายุงานมากกว่า 5 เท่า ขึ้นไปผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการปรับปรุงและเปลี่ยนห้องเผาไหม้ใหม่โดยเลือกใช้แบบเหล็กหล่อซึ่งมีความหนาเฉลี่ย 15 mm ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับห้องเผาไหม้เดิมจะใช้เหล็กเหนียวทั่วไปที่มีความหนาเพียง 3 mm ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติโลหะทั้ง 2 ประเภท เหล็กหล่อจะสามารถทนอุณหภูมิได้สูงกว่าเหล็กเหนียวและมีการใช้งานที่ยาวนานกว่า (เชิดชูเกียรติ และคณะ, 2559) ภาพถ่ายห้องเผาไหม้แบบใช้เหล็กเหนียวแสดงดัง

ภาพที่ 30 ในขณะที่ห้องเผาไหม้แบบใช้เหล็กหล่อแสดงดังภาพที่ 31 ส่วนรายละเอียด อื่นๆ เช่น คอคอด ระยะความสูงคอคอด จำนวนรูหัวฉีดและขนาดรูหัวฉีดใช้ขนาดเท่าเดิมทุกประการ ทั้งนี้เพื่อ ป้องกันคุณภาพและองค์ประกอบของแก๊สที่จะเปลี่ยนไป



ภาพที่ 30 ห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงใช้วัสดุเหล็กเหนียว



ภาพที่ 31 ห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงใช้วัสดุเหล็กหล่อ

2. การปรับปรุงส่วนประกอบพื้นฐานของเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

การปรับปรุงองค์ประกอบพื้นฐานของเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง ประกอบด้วย การปรับปรุง ชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล ชุดปลอกเสื้อห้องเผาไหม้ ชุดห้องรองซีไถ้ และการติดตั้งชุดเครื่องมือวัด ร่วมกับเครื่องมืออุปกรณ์ตามจุดต่างๆ เพื่อควบคุมอุณหภูมิขณะใช้งาน โดยมีรายละเอียดการปรับปรุง ดังนี้

ชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวล

ภาพที่ 32 แสดงชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนวัสดุใหม่ทั้งหมด สาเหตุของการเปลี่ยนเนื่องจากชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลเก่ามีสภาพผุกร่อน ตามสภาพอายุการใช้งาน ผนังมีความหนาลดลง บางจุดมีการรั่วของน้ำและแก๊สในขณะที่ใช้งาน ผลการปรับปรุงชุดป้อนเชื้อเพลิงชีวมวลของเตานี้เลือกใช้วัสดุที่มีความหนาเพิ่มขึ้นอีก 1 mm เพื่อลดการสูญเสียอุณหภูมิและยืดอายุการใช้งานที่ยาวนานเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 32 การปรับปรุงชุดป้อนเชื้อเพลิงเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

ชุดปลอกเสื้อห้องเผาไหม้

ภาพที่ 33 แสดงการดำเนินการปรับปรุงชุดปลอกเสื้อห้องเผาไหม้การปรับปรุงนี้มีวัตถุประสงค์ทั้งหมดสามอย่างคือ ยืดอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น ลดการสูญเสียความร้อนและแก้ไขปัญหาชีวมวลเกิดเป็นโคลงขณะใช้งาน การปรับปรุงชุดปลอกเสื้อห้องเผาไหม้เลือกใช้วัสดุเป็นเหล็กเหนียวที่มีความหนาเพิ่มขึ้นอีก 1 mm เป็นความหนารวม 3 mm ความสูงของห้องเก็บเชื้อเพลิงปรับให้สูงเพิ่มขึ้น ซึ่งแต่เดิมความสูงของห้องห้องเผาไหม้มีความสูง 60 cm แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความสูงเพิ่มขึ้นเป็น 90 cm ทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่แรงกดทับของเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีลักษณะที่เบาให้เพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม ซึ่งสุดท้ายจะเป็นการช่วยแก้ปัญหาเรื่องของเชื้อเพลิงที่เป็นโพรงขณะใช้งาน การเป็นโพรงของชีวมวลเมื่อใช้งานจะมีผลทำให้องค์ประกอบแก๊สเปลี่ยนและค่าความร้อนของแก๊สเปลี่ยนไป สุดท้ายจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยรวมของลดลงในที่สุด



ภาพที่ 33 การปรับปรุงชุดปลอกเสื่อห้องเผาไหม้เตาผลิตแก๊สชีววมวลแบบไหลลง

ชุดห้องรองซีเถ้า

ในส่วนของชุดห้องรองซีเถ้าได้ดำเนินการปรับเปลี่ยนชุดรองซีเถ้าใหม่ ซึ่งชุดเดิมมีปัญหาการผูก ร่อน ตะแกรงมีการอุดตันและมีการรั่วไหลของแก๊สชีววมวล ตามสภาพอายุการใช้งาน งานวิจัยนี้ได้ ศึกษาปรับเปลี่ยนชุดห้องรองซีเถ้าใหม่ จากเหล็กความหนา 1.5 mm เป็น 3 mm และเพิ่มชุดล้อ ลากเพื่อง่ายต่อการเคลื่อนย้าย การปรับปรุงทั้งหมด คาดว่าจะมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้นและช่วย ลดการสูญเสียความร้อนลงได้อีกระดับหนึ่ง รายละเอียดผลการปรับปรุงแสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การปรับปรุงชุดห้องรองซีเถ้าเตาผลิตแก๊สชีววมวลแบบไหลลง

การติดตั้งชุดเครื่องมือวัดตามวัสดุอุปกรณ์ตามจุดเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

ภาพที่ 35 แสดงผลการดำเนินการปรับปรุง ติดตั้งช่องรูวัดอุณหภูมิเพื่อใช้ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิขณะใช้งาน ประโยชน์ที่ได้จากการติดตั้ง สามารถทำให้ทราบและอ่านค่าอุณหภูมิขณะใช้งานของเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง ผลการติดตั้งส่งผลให้สามารถควบคุมการทำงานของเตาให้มีประสิทธิภาพการใช้งานได้สูงสุด

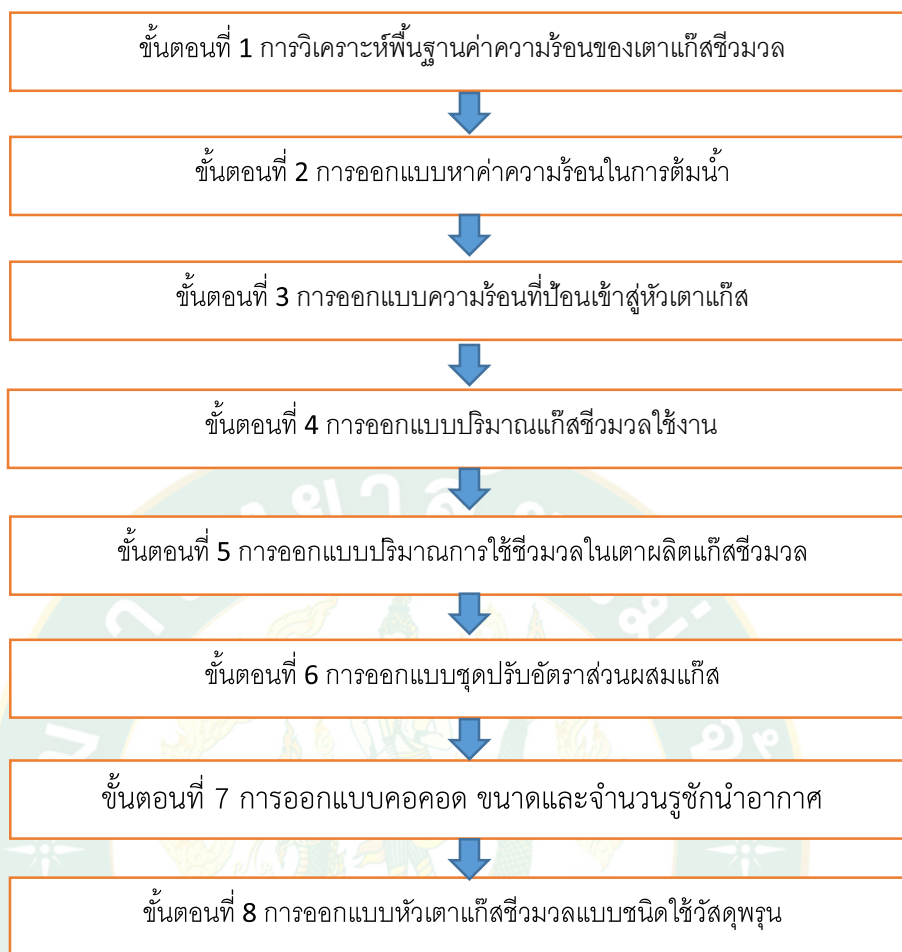


ภาพที่ 35 การติดตั้งชุดเครื่องมือวัดตามจุดเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

การออกแบบพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวล

ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาการเพิ่มสมรรถนะหัวเตาแก๊สชีวมวลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยมีการศึกษาเริ่มต้นจากการวิเคราะห์หาค่าความร้อนของเตาแก๊สชีวมวล การออกแบบหาค่าความร้อนในการต้มน้ำหรือใช้งาน การออกแบบความร้อนที่ป้อนเข้าสู่หัวเตาแก๊ส ออกแบบปริมาณแก๊สชีวมวลใช้งาน ออกแบบปริมาณการใช้ชีวมวลในเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง การออกแบบชุดปรับอัตราส่วนผสมแก๊สและการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบชนิดใช้วัสดุพูน รายละเอียดการคำนวณออกแบบมีดังนี้

ในการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวล มีแนวคิดในการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปกว่าหัวเตาแบบดั้งเดิม โดยเดิมที่หัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิมเมื่อนำมาทดสอบใช้งานมีประสิทธิภาพความร้อนรวมโดยเฉลี่ย 14% ดังนั้นในการออกแบบใหม่นี้ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานให้หัวเตาใหม่มีประสิทธิภาพความร้อนในการใช้งานสูงสุด 25% โดยจะใช้ลักษณะโหลดการต้มน้ำเป็นตัววัดประสิทธิภาพ ซึ่งน้ำที่ใช้ในการทดสอบการต้มเฉลี่ยอยู่ที่ 10 ลิตร หรือมีขนาด 10 kg สามารถแสดงเป็นไดอะแกรมในการออกแบบได้ดังนี้



ภาพที่ 36 ขั้นตอนการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบชนิดใช้วัสดุพูน

ผลการออกแบบแสดงในตารางที่ 6 พบว่าการการวิเคราะห์พื้นฐานพลังงานความร้อนของเตาแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ในกรณีการใช้ถ่านไม้ลำไยและไม้ลำไยเตาแก๊สชีวมวลมีปริมาณพลังงานความร้อนที่ผลิตได้ 24.72-39.86 kW ค่าความร้อนที่ออกแบบไว้สำหรับการต้มน้ำมี 6.31 kW คิดเป็นค่าพลังงานความร้อนจากแก๊สชีวมวลที่ต้องป้อนเข้าไปสู่หัวเตาแก๊สเป็น 25.27 kW คำนวณหาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวลที่ต้องใช้ซึ่งได้แก๊สชีวมวลใช้งานในอัตราการไหล 0.0063 m³/s หรือ 22.75 m³/h ขณะเดียวกันในส่วนของการใช้ถ่านชีวมวลที่ต้องป้อนในการออกแบบคำนวณปริมาณถ่านไม้ลำไยที่ต้องใช้ 0.0011 kg/s หรือ 4.06 kg/h ในส่วนของการออกแบบชุดปรับอัตราส่วนผสมอากาศ-แก๊สชีวมวล ปริมาณแก๊ส 0.0063 m³/s หรือ 22.75 m³/h โดยอัตราอากาศต่อเชื้อเพลิง 1.2:1 จะได้อัตราส่วนอากาศที่ต้องการ 27.30 m³/h เมื่อคำนวณคอคอดของเวนทูรีได้ขนาดท่อเวนทูรี < 4.45 cm อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ขนาดท่อคอคอด 3 cm เมื่อคำนวณหาขนาดรูอากาศที่ป้อนผสมกับแก๊สชีวมวลจะต้องเจาะรูป้อนอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm จำนวน 4 รู ในส่วนของ

การออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลได้เลือกใช้วัสดุพูนชนิดเซรามิต เป็นตัวเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนของเตา

ตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดผลการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบชนิดใช้วัสดุพูน

ขั้นตอน	รายละเอียดและสมการออกแบบ	ผลการออกแบบ
ขั้นตอนที่ 1	การวิเคราะห์พื้นฐานพลังงานความร้อนของเตาแก๊สชีวมวลที่ผลิตได้ $Q_{in} = m_s \times LHV_{charcoal}$ $Q_{in} = m_s \times LHV_{longan}$	39.86-47.83 kW 24.72-29.66 kW
ขั้นตอนที่ 2	การออกแบบหาค่าความร้อนในการต้มน้ำ (ถ่านไม้) $Q_U = m_w \times C_{p_w} \times \Delta T$	6.31 kW
ขั้นตอนที่ 3	การออกแบบความร้อนที่ป้อนเข้าสู่หัวเตาแก๊ส เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 25% $\eta_{th} = \frac{Q_U}{Q_{in}}$	25.27 kW
ขั้นตอนที่ 4	การออกแบบปริมาณแก๊สชีวมวลใช้งาน $Q_{gas} = \dot{m}_{gas} \times C_{v_{gas}}$	0.0063 m ³ /s 22.75 m ³ /h
ขั้นตอนที่ 5	การออกแบบปริมาณการใช้ชีวมวลในเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง เมื่อกำหนดให้ประสิทธิภาพเตา 70% $\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_{gas} \times C_{v_{gas}}}{\eta_{th} \times LHV_{Charcoal}}$	0.0011 kg/s หรือ 4.06 kg/h
ขั้นตอนที่ 6	การออกแบบชุดปรับอัตราส่วนผสมแก๊ส จากเงื่อนไขของปริมาณแก๊สที่ต้องใช้ 0.00513 m ³ /s หรือ 18.50 m ³ /h A/F = 1.2:1 ปริมาณอากาศที่ต้องใช้ผสมในการเผาไหม้สมบูรณ์สูงสุด	27.30 m ³ /h

ตารางที่ 6 (ต่อ)

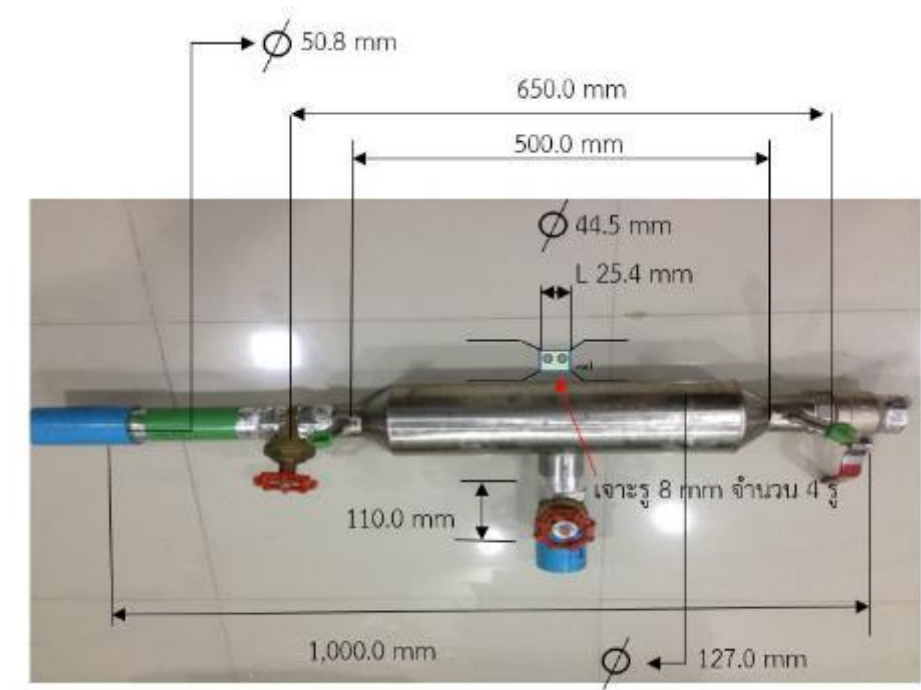
ขั้นตอน	รายละเอียดและสมการออกแบบ	ผลการออกแบบ
ขั้นตอนที่ 7	การออกแบบคอคอด ขนาดและจำนวนรูชักนำอากาศ $d = \sqrt{\frac{Q_2}{\left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \times 2\right) + \frac{Q_1^2}{A_1^2}}} \times \frac{4}{\pi}$ $A = \frac{Q_{Air}}{V_{Air}}$	$d_{ventury} = 4.45$ cm $d_{air} = 8$ mm $n_{dair} = 4$ รู
ขั้นตอนที่ 8	การออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบชนิดใช้วัสดุพอรุน ปริมาตรหัวเตาแก๊ส	ใช้วัสดุเซรามิต $V_{burner} = 1.693$ L

การพัฒนาและสร้างหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

หลังจากการคำนวณ ออกแบบ รูปแบบและลักษณะการใช้งานหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบชุดปรับอัตราส่วนผสมแก๊สชีวมวลกับอากาศ และหัวเตาแก๊สชีวมวล รายละเอียดผลการสร้างมีดังนี้

1. ชุดปรับอัตราส่วนผสมแก๊สชีวมวลและอากาศ

การสร้างชุดปรับอัตราส่วนผสมอากาศมีลักษณะเป็น 3 ทาง ประกอบด้วยด้านเข้าแก๊ส ชีวมวล ด้านออกแก๊สชีวมวลและด้านเข้าของอากาศผสม ท่อแก๊สกลางใช้ท่อเหล็กสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm ความยาวรวม 650 mm ภายในท่อติดตั้งชุดเวนทูรีมีสำหรับผสมแก๊ส ชีวมวลและอากาศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44.5 mm มุมลาดเอียงของท่อเวนทูรี 45 องศา ตรงกลางท่อเวนทูรีเจาะทำรูชักนำอากาศ ขนาด 8 mm จำนวน 4 รู โดยมีแผ่นสแตนเลสม้วนครอบด้านนอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อนอก 127 mm ยาว 500 mm เชื่อมลาดเอียง 45 องศาปิดหัวท้ายตรงทางเข้าและทางออกของชุดปรับอัตราส่วนผสมอากาศและทำการติดตั้งวาล์วควบคุมแก๊สชีวมวลขนาด 50.8 mm เพื่อใช้สำหรับปรับแต่งอัตราส่วนผสม รายละเอียดการสร้างชุดปรับอัตราส่วนผสมแก๊ส ชีวมวลกับอากาศ แสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ชุดปรับอัตราส่วนผสมอากาศและแก๊สชีวมวล

2. หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบประสิทธิภาพสูง

หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ หัวเตาแก๊สและชุดป้องกันการสูญเสียความร้อน ดังภาพที่ 38 และ 39 โดยหัวเตาแก๊สที่ได้ออกแบบสร้างมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเจาะรูด้านข้างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50.8 mm ตัวเสื้อหัวเตามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 mm สูง 110 mm ด้านบนเตาติดตั้งชุดเซรามิต (แผ่นอินฟราเรด) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 140 ความหนา 20 mm ผนังด้านข้างหัวเตาติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการสูญเสียความร้อนใช้ดินเผาตัดแปลงสวมบนหัวเตา ดังรูปที่ 39 ความหนาของฉนวนเฉลี่ย 2.54 cm ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของฉนวนประมาณ 33 cm และเนื่องจากระหว่างการทดสอบมีความเร็วลมเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ประสิทธิภาพความร้อนลดลง ดังนั้นจึงได้ติดตั้งชุดบังลมเพิ่มขึ้นอีกชุด โดยมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 60x60x70 cm ทำเกลียงครอบ 4 ด้าน สูง 25 cm มีปล่องระบายควัน ขนาด 20x20 cm สูง 30 cm ขาตั้งสี่ด้านรับน้ำหนัก สูงจากพื้นดิน 55 cm มีประตูเปิด - ปิด



ภาพที่ 38 หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 39 ฉนวนความร้อนและอุปกรณ์ป้องกันลม

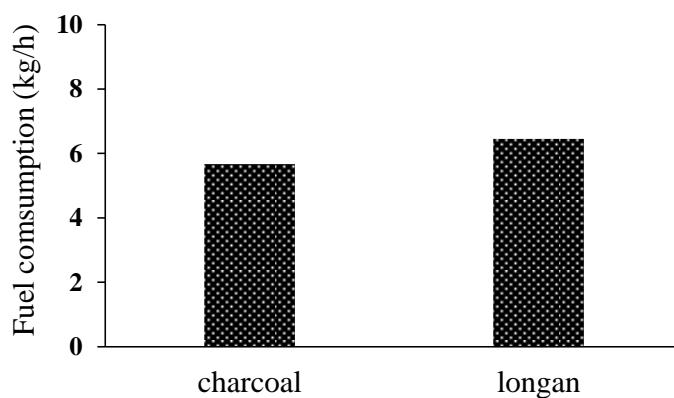
การวิเคราะห์สมรรถนะเตาและหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

การวิเคราะห์สมรรถนะเตาและหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง ในงานวิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์สมรรถนะประกอบด้วยการวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน อุณหภูมิการต้ม น้ำอุณหภูมิเตาชีวมวลและประสิทธิภาพความร้อน โดยเปรียบเทียบเตาผลิตความร้อนคือ เตาก๊าซหุงต้ม เตาก๊าซชีวมวลดั้งเดิมและเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

1. การวิเคราะห์สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

1. การวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

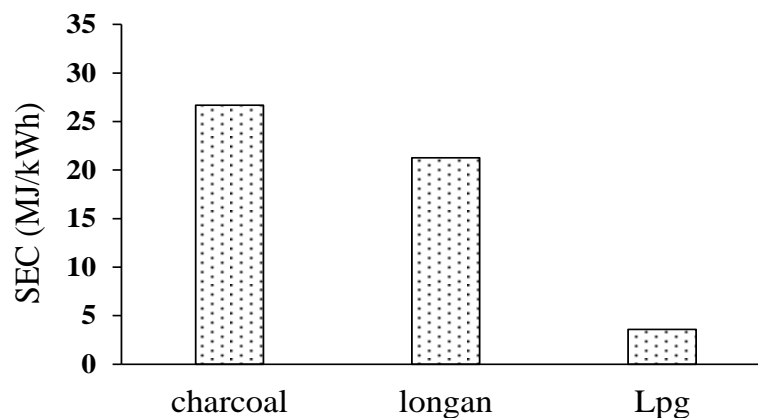
ภาพที่ 40 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิม โดยใช้ถ่านไม้ลำไยและไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงและมีการปรับอัตราส่วนผสมอากาศต่อแก๊สชีวมวลเหมาะสมที่สุด ผลการศึกษพบว่าการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมกับเตาชีวมวลมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย 5.67 kg/h เมื่อใช้ถ่านไม้ลำไยและ 6.45 kg/h เมื่อใช้ไม้ลำไย การใช้ไม้ลำไยให้อัตราความสิ้นเปลืองสูงกว่าเนื่องจาก การเผาไม้ลำไยส่วนหนึ่งมีความชื้นและสารระเหยในชีวมวล ดังนั้นเมื่อเผาไหม้ในสภาวะจำกัดอากาศส่งผลให้ออกประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ติดไฟต่ำกว่าและทำให้เกิดความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูง



ภาพที่ 40 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเตาแก๊สชีวมวล
เมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

2. การวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

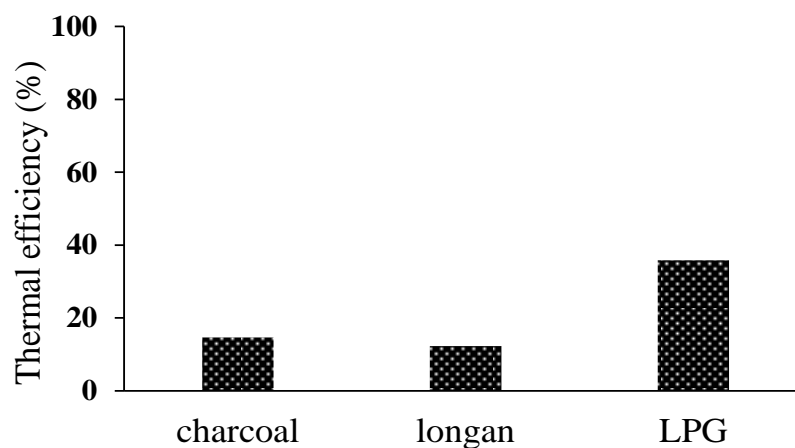
ภาพที่ 41 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม พบว่า การใช้หัวเตาเผาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมกับเตาแก๊สชีวมวลมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่ค่อนข้างสูง การใช้ถ่านไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุด 26.68 MJ/kWh ในขณะที่การใช้ไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 21.26 MJ/kWh อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานแก๊สหุงต้ม การใช้หัวเตาเผาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมกับเตาแก๊สชีวมวลมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าการใช้เตาแก๊สหุงต้มอย่างชัดเจน โดยทั่วไปอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาแก๊สหุงต้มเฉลี่ย 3.58 MJ/kWh



ภาพที่ 41 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเตาแก๊สชีวมวล
เมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

3. วิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของหัวเตาเผาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

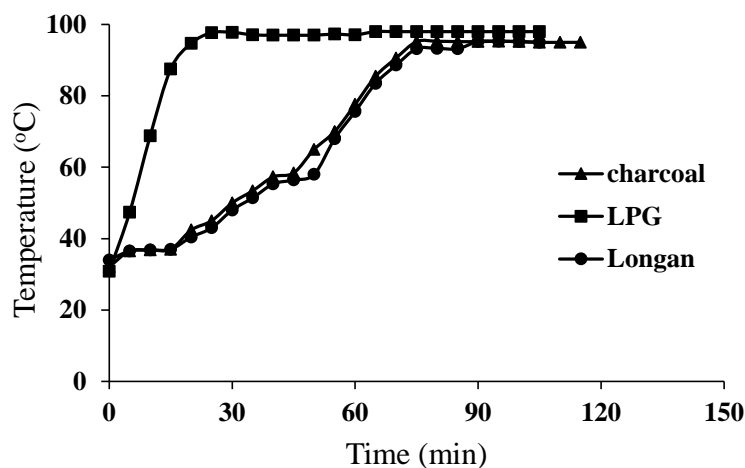
ภาพที่ 42 แสดงประสิทธิภาพความร้อนของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมพบว่าการใช้เตาแก๊สชีวมวลให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดอยู่ในช่วง 12.31-14.60% โดยการใช้ถ่านไม้ลำไยให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่าการใช้ไม้ลำไย อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เตาแก๊สหุงต้ม หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำกว่า 59-65% โดยเตาแก๊สหุงต้มมีประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 35.85%



ภาพที่ 42 ประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้
หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

4. การวิเคราะห์อุณหภูมิการต้มน้ำของหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

ภาพที่ 43 แสดงอุณหภูมิการต้มน้ำของหัวเตาเผาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมพบว่าหัวเตาเผาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมเมื่อใช้ถ่านไม้ลำไย ไม้ลำไยและหัวเตาแก๊สหุงต้มมีอุณหภูมิน้ำเดือดสูงสุดอยู่ที่ 95-98 °C โดยใช้อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่ที่ 26-38 °C สำหรับระยะเวลาในการทำให้น้ำเดือดหัวเตาเผาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมจะใช้ระยะเวลา 70 นาที ในขณะที่หัวเตาแก๊สหุงต้มใช้เวลาเพียง 20 นาที อีกทั้งระยะเวลาในการเดือดของหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมก็มีระยะเวลาเดือดสั้นกว่าหัวเตาแก๊สหุงต้มเฉลี่ย 50 นาที ผลจากการใช้งานจะเห็นได้ว่าการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมมีความสามารถในการต้มน้ำที่ต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบหัวเตาเพื่อให้เตาแก๊สชีวมวลใช้ได้สามารถใช้งานได้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

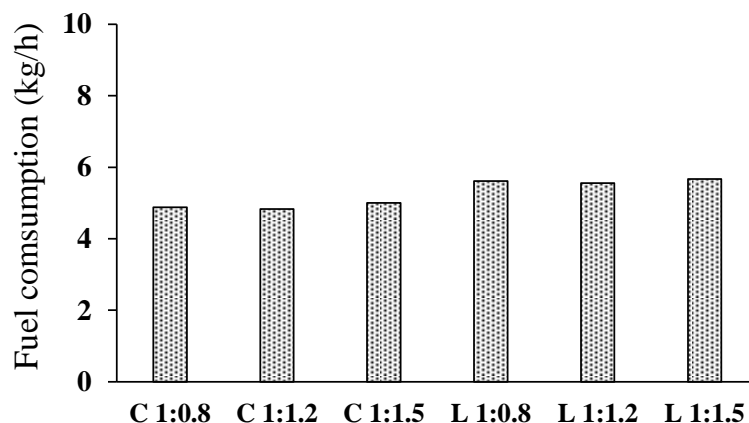


ภาพที่ 43 อุณหภูมิการต้มน้ำเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

2. วิเคราะห์สมรรถนะเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

1. การวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

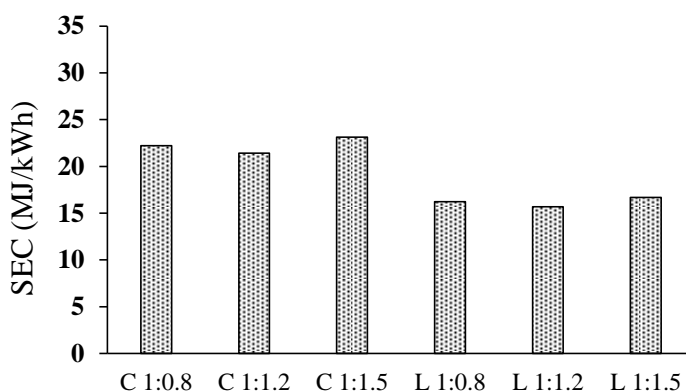
ภาพที่ 44 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง พบว่าการใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ลำไยกับหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำกว่าการใช้ไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิง ทุกๆ การปรับอัตราส่วนแก๊สชีวมวลต่ออากาศ การใช้ถ่านไม้ลำไยต่ออากาศที่ 1:0.8 1:1.2 และ 1:1.5 มีค่าอัตราการสิ้นเปลืองถ่านไม้ลำไยเฉลี่ย 4.88 kg/h 4.83 kg/h และ 5 kg/h ตามลำดับ ในขณะที่การใช้ไม้ลำไยที่มีอัตราส่วนการผสมอากาศ 1:0.8 1:1.2 และ 1:1.5 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงคือ 5.61 kg/h 5.56 kg/h และ 5.67 kg/h



ภาพที่ 44 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเตาแก๊สชีวมวล
เมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

2. การวิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

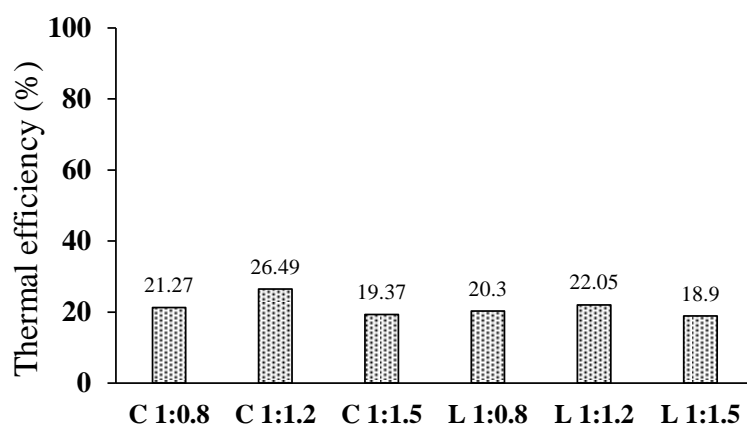
ภาพที่ 45 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง พบว่าที่อัตราส่วน 1:0.8 1:1.2 และ 1:1.5 ของการใช้ถ่านไม้ลำไยให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 22.22 MJ/kWh 21.43 MJ/kWh และ 23.14 MJ/kWh ตามลำดับ ส่วนการใช้ไม้ลำไยให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ 16.24 MJ/kWh 15.68 MJ/kWh และ 16.68 MJ/kWh ตามลำดับ การปรับอัตราส่วนแก๊สชีวมวลต่ออากาศที่ 1:1.2 ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุด ทั้งการใช้ถ่านและไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิง ส่วนการใช้ชีวมวลการใช้เศษไม้ ให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าการใช้ถ่าน แต่อย่างไรก็ตามอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของชีวมวลยังคงสูงกว่าการใช้งานเตาแก๊สหุงต้ม



ภาพที่ 45 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเตาแก๊สชีวมวล
เมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

3. วิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ภาพที่ 46 แสดงประสิทธิภาพความร้อนของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง พบว่าการปรับอัตราส่วนแก๊สชีวมวลต่ออากาศส่งผลต่อประสิทธิภาพความร้อน โดยการปรับที่ 1:1.2 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด โดยถ้าใช้ถ่านไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิงได้ประสิทธิภาพความร้อน 26.49% ในขณะที่การใช้ไม้ลำไยให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 22.05% อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้งานกับแก๊สหุงต้มเตาแก๊สชีวมวลยังคงให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำกว่า

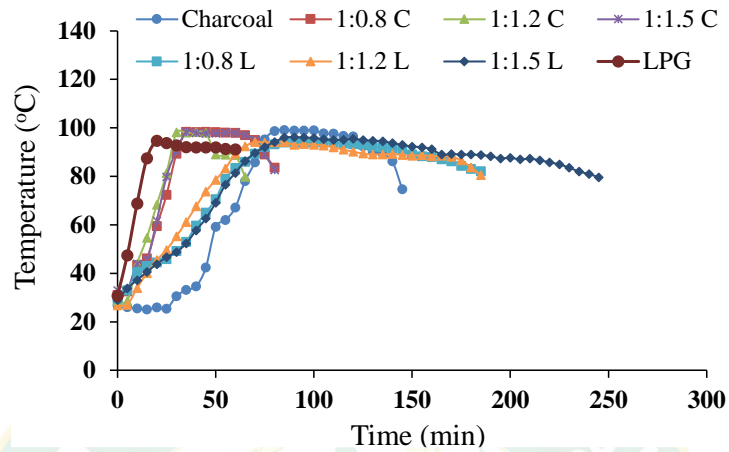


ภาพที่ 46 ประสิทธิภาพความร้อนเตาแก๊สชีวมวล
เมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

4. การวิเคราะห์อุณหภูมิการต้มน้ำของเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

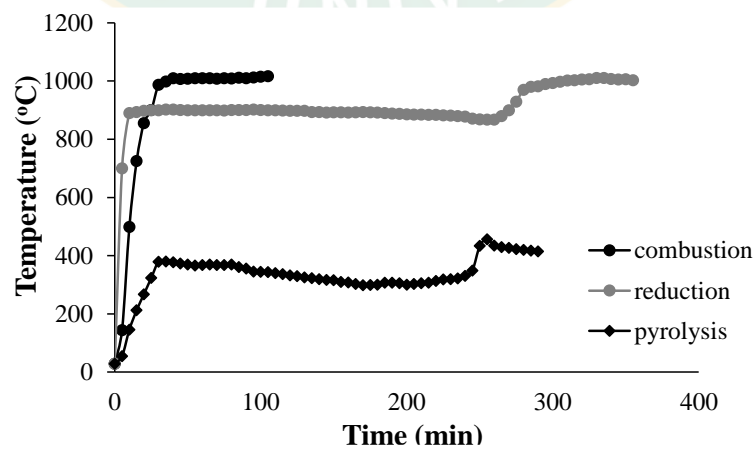
ภาพที่ 47 แสดงอุณหภูมิการต้มน้ำของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง พบว่าการใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ลำไยกับหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงใช้ระยะเวลาในการทำให้น้ำเดือดนานที่สุดคือ 75 นาที ในขณะที่อัตราส่วนของถ่านไม้ลำไยต่ออากาศ 1:0.8 1:1.2 และ 1:1.5 ใช้ระยะเวลาในการทำให้น้ำเดือด 35 30 และ 30 นาที ตามลำดับ สำหรับการใส่ไม้ลำไยมีระยะเวลาในการทำให้น้ำเดือดนานกว่าคือ 75 60 และ 70 นาที ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับระยะเวลาของหัวเตาแก๊สหุงต้ม การใช้ถ่านลำไยมีอุณหภูมิน้ำเดือดสูงสุดคือ 99 98.3 98.2 และ 98.3 °C ตามลำดับ ระยะเวลาในการเดือดคือ 45 40 20 และ 50 นาที ในการใส่ไม้ลำไยมีอุณหภูมิน้ำเดือดสูงสุดคือ 94 94.2 และ 96 °C ระยะเวลาในการเดือดคือ 75 60 และ 90 นาที เมื่อมาเปรียบเทียบกับหัวเตาเผาแก๊สหุงต้มพบว่าถ่านไม้ลำไยมีอุณหภูมิการเดือดสูงกว่า โดยหัวเตาแก๊สหุงต้มมีอุณหภูมิเดือดสูงสุดคือ 94.7 °C ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้ไม้

ลำไย เมื่อนำมาเปรียบเทียบเทียบเวลาในการเดือดของน้ำพบว่าหัวเตาแก๊สหุงต้มมีระยะเวลาในการเดือดของน้ำ 60 นาที ซึ่งสั้นกว่าไม้ลำไยแต่นานกว่าถ่านไม้ลำไยเพียงเล็กน้อย

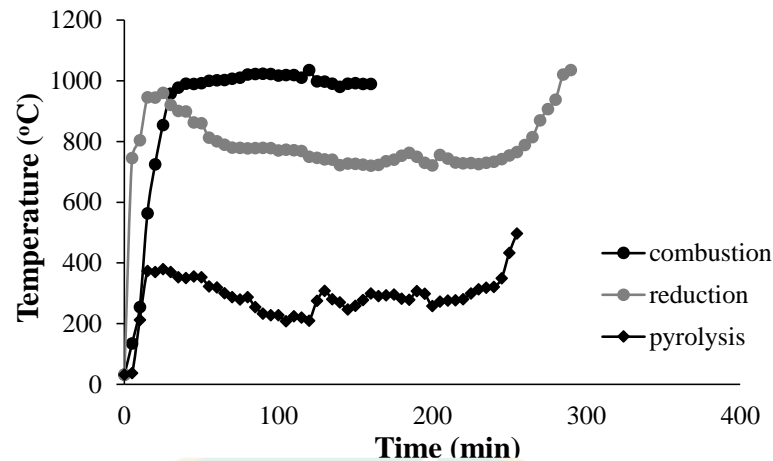


ภาพที่ 47 อุณหภูมิการต้มน้ำเตาแก๊สชีวมวล
เมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

5. การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง ภาพที่ 48 และ 49 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงและใช้หัวเตาแบบดั้งเดิมเมื่อใช้ถ่านไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิง ผลการศึกษาพบว่าการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงและหัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม อุณหภูมิภายในเตาโดยเฉพาะในส่วนของโซนเผาไหม้มีอุณหภูมิที่สูงมากกว่า $1,000^{\circ}\text{C}$ ส่วนชั้นรีดักชันมีอุณหภูมิล้อมอยู่ในช่วง $800-900^{\circ}\text{C}$ และชั้นกลั่นสลายมีอุณหภูมิล้อมอยู่ในช่วง $200-450^{\circ}\text{C}$ จากการสังเกตการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมอุณหภูมิการเผาไหม้และอุณหภูมิชั้นกลั่นสลายจะมีความเสถียรของอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ



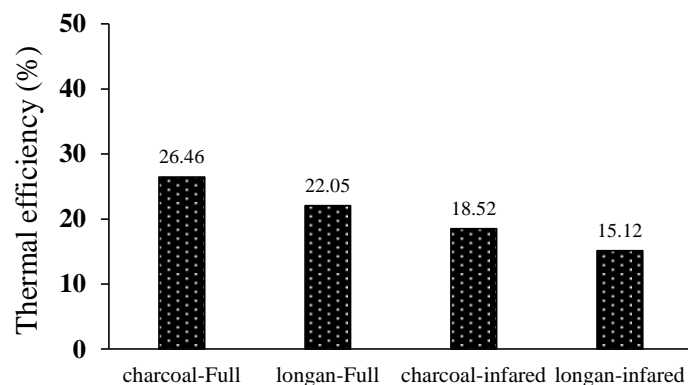
ภาพที่ 48 อุณหภูมิภายในเตาแก๊สชีวมวล
เมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง



ภาพที่ 49 อุณหภูมิภายในเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม

3. ปัจจัยชุดปรับอัตราส่วนผสมและหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงต่อประสิทธิภาพความร้อน

ภาพที่ 50 แสดงผลการวิเคราะห์ปัจจัยชุดปรับอัตราส่วนผสมและหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงต่อประสิทธิภาพความร้อน ผลการศึกษาพบว่าถ้าใช้เตาแก๊สชีวมวลแบบไม่ใช้ชุดปรับอัตราส่วนผสมอากาศต่อแก๊สชีวมวล แต่ใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง ประสิทธิภาพความร้อนของเตาแก๊สชีวมวลสูงสุด 18.52% และ 15.12% ในกรณีของการใช้ถ่านไม้ลำไยและไม้ลำไยตามลำดับ การใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงให้ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น 33.05% ในกรณีของการใช้ถ่านไม้ลำไย และ 28.85% ในกรณีของการใช้ไม้ลำไย ดังตารางที่ 7 อย่างไรก็ตาม การใช้ชุดปรับอัตราส่วนผสมอากาศต่อแก๊สชีวมวลจะมีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพความร้อนของเตาแก๊สชีวมวลเพิ่มขึ้น 66.95% และ 71.15% ในกรณีของการใช้ถ่านและไม้ลำไยตามลำดับ



ภาพที่ 50 การวิเคราะห์ปัจจัยชุดปรับอัตราส่วนผสมและหัวเตาที่มีผลประสิทธิภาพการเผาไหม้

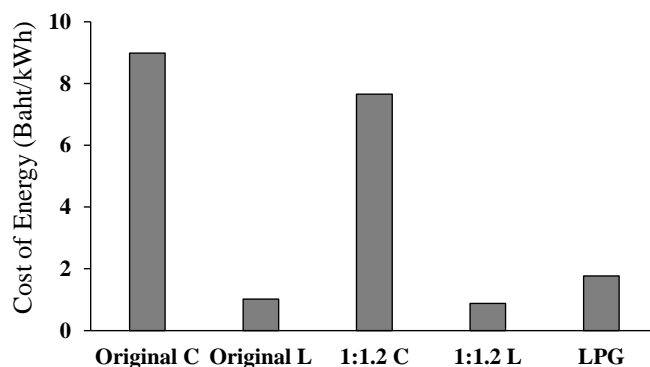
ตารางที่ 7 ประสิทธิภาพความร้อนที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ชุดปรับอัตราส่วนผสมและหัวเตาแก๊สชีวมวล ประสิทธิภาพสูง

ปัจจัยเทคโนโลยี	Infrared (%)	Air/gas mixer (%)
การเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนจากการใช้ถ่านไม้ลำไย	33.05	66.95
การเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนจากการใช้ไม้ลำไย	28.85	71.15

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เตาแก๊สชีวมวลเมื่อ ใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

1. การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อน

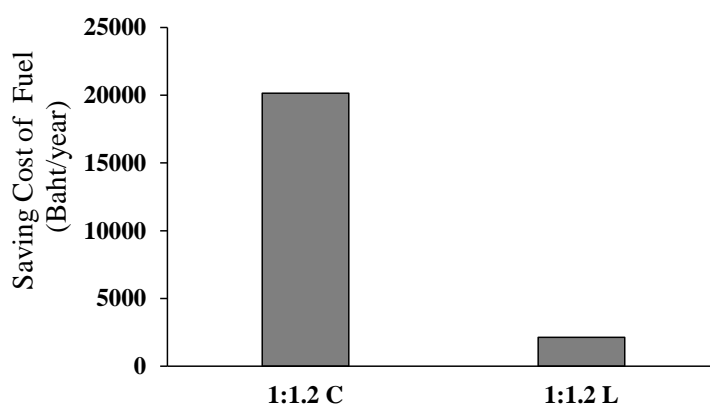
ภาพที่ 51 แสดงต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนของเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิมหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงและแก๊สหุงต้ม เมื่อใช้ถ่านและไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิง ในสภาวะอัตราส่วนอากาศต่อแก๊สชีวมวลเหมาะสมสูงสุด ซึ่งพบว่าการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงให้ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนต่ำกว่าการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลแบบดั้งเดิม การใช้เชื้อเพลิงไม้ลำไยให้ต้นทุนต่ำสุดเมื่อเทียบกับการใช้ถ่านไม้ลำไยหรือแม้กระทั่งแก๊สหุงต้ม ต้นทุนการใช้ไม้ลำไยที่ต่ำเกิดจากราคาของไม้ลำไยมีราคาต่ำกว่าประมาณ 10 เท่า ส่วนด้านหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ให้ต้นทุนต่ำเนื่องจากมีประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่า ต้นทุนการผลิตความร้อนของหัวเตาชีวมวลแบบดั้งเดิมเมื่อใช้ถ่านลำไยและไม้ลำไยมีค่าเฉลี่ย 8.99 Baht/kWh และ 1.02 Baht/kWh ต้นทุนการผลิตความร้อนของหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง เมื่อใช้ถ่านลำไยและไม้ลำไยมีค่าเฉลี่ย 7.65 Baht/kWh และ 0.88 Baht/kWh และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สหุงต้มมีค่าต้นทุนเฉลี่ย 1.77 Baht/kWh



ภาพที่ 51 ต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

2. การวิเคราะห์ผลการประหยัดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิง

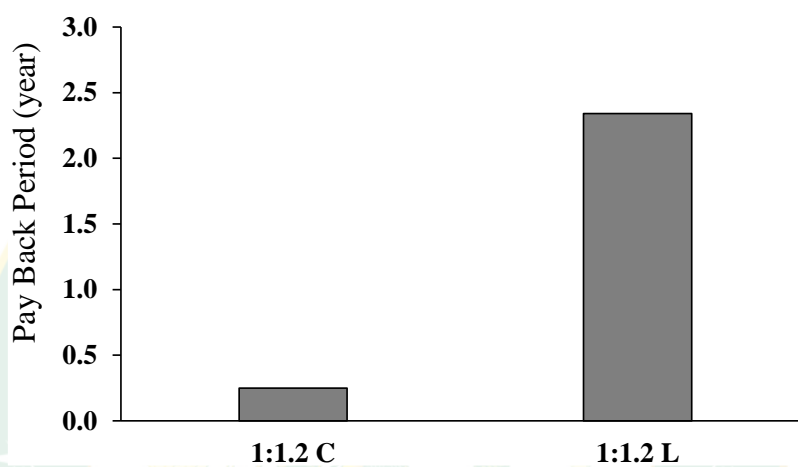
ภาพที่ 52 แสดงค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่อปีของหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง จากภาพจะเห็นว่าหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้ถ่านไม้ลำไยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงได้ 20,160 Baht/year ในขณะที่หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้ไม้ลำไยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 2,136 Baht/year ซึ่งน้อยกว่าการใช้ถ่านไม้ลำไย เนื่องจากไม้ลำไยที่ใช้มีราคาถูกกว่าถ่านไม้ลำไย โดยถ่านไม้ลำไยมีต้นทุนอยู่ที่ 10 Baht/kg ในขณะที่ไม้ลำไยมีต้นทุนอยู่ที่ 1 Baht/kg จึงส่งผลให้การใช้ไม้ลำไยกับหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูงมีค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 52 ค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงต่อปีของหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

3. การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน

ภาพที่ 53 แสดงระยะเวลาคืนทุนของหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงพบว่าหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้ถ่านไม้ลำไยมีระยะเวลาคืนทุน 3 เดือน ในขณะที่หัวเตาเผาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงที่ใช้กับไม้ลำไยมีระยะเวลาคืนทุนนานกว่าการใช้ถ่านไม้ลำไย 2 ปี 4 เดือน เนื่องจากการใช้ไม้ลำไยกับหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงมีผลการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ต่ำกว่าการใช้ถ่านไม้ลำไย จึงส่งผลให้มีระยะเวลาคืนทุนที่นานกว่าการใช้ถ่านไม้ลำไย



ภาพที่ 53 ระยะเวลาคืนทุนหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผล

สรุปผลการดำเนินงานวิจัยเรื่องการพัฒนาหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง แบ่งเป็นการสรุปออกเป็นทั้งหมด 4 หัวข้อ ประกอบด้วย หัวข้อการปรับปรุงเตาแก๊สชีวมวล การออกแบบพัฒนาและสร้างหัวเตาแก๊สชีวมวล การทดสอบสมรรถนะและการวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง รายละเอียดสรุปผลการวิจัยมีดังนี้

1. การปรับปรุงเตาผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลง

การปรับปรุงผลิตแก๊สชีวมวลแบบไหลลงได้ดำเนินการเปลี่ยนวัสดุห้องเผาไหม้จากเหล็กเหนียวเป็นเหล็กหล่อ ที่มีความหนา 15 mm และได้มีการปรับปรุงโครงสร้างเตาส่วนอื่นๆ ควบคุมประกอบด้วย ชุดป้อนเชื้อเพลิง ชุดปลอกเสื้อห้องเผาไหม้ ชุดรองซีเมนต์และได้เจาะรูติดตั้งเครื่องมือวัดใหม่

2. การออกแบบ พัฒนาและสร้างหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ในด้านการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวลได้ออกแบบพัฒนาเป็น 2 ส่วน คือ ชุดปรับอัตราส่วนผสมและหัวเตาแก๊สชีวมวล โดยชุดปรับอัตราส่วนผสมมีลักษณะเป็นท่อแบบสามทาง ใช้หลักการท่อเวนจูรีใช้แก๊สในการดูดชักนำอากาศผสมกับแก๊สชีวมวลในอัตราส่วน 1:1.2 โดยใช้รูดชักนำอากาศบริเวณคอคอด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm จำนวน 4 รู คอคอดมีขนาด 3 cm และในส่วนหัวเตาแก๊สได้ทดสอบและเลือกเอาวัสดุประเภทเซรามิกมาช่วยในการส่งถ่ายความร้อนให้กับเตาแก๊สมีสมรรถนะที่สูงขึ้นโดยปริมาตรของหัวเตามีปริมาตรรวม 1.693 L

3. การวิเคราะห์สมรรถนะเตาและหัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

ผลการทดสอบการทำงานเตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง มีความสามารถในการใช้งานที่เสถียรและจุดติดไฟได้อย่างต่อเนื่อง การใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงกับเตาแก๊สชีวมวลให้สมรรถนะที่สูงกว่าการใช้งานหัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิม ได้แก่ อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง พลังงาน ประสิทธิภาพความร้อนและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน การใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ลำไยให้สมรรถนะการทำงานที่สูงกว่าการใช้ไม้ลำไย สุดท้ายการปรับอัตราส่วนผสมของแก๊สชีวมวลกับอากาศที่ 1:1.2 ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดในกรณีของการใช้ถ่านไม้ลำไยและการใช้ไม้ลำไยเป็นเชื้อเพลิง เตาผลิตแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูงให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 26.49% และ 22.05% ในกรณีใช้ถ่านและไม้ลำไย ตามลำดับ การใช้ชุดปรับอัตราส่วนผสมให้ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มสูงขึ้น 66.95% และ 71.15% ในกรณีของการใช้ถ่านและไม้

ลำไย ในขณะที่การใช้หัวเตาแก๊สแบบใช้เซรามิกให้ ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น 33.05% ในกรณีของการใช้ถ่านไม้ลำไยและ 28.85% ในกรณีของการใช้ไม้ลำไย

4. การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์เตาแก๊สชีวมวลเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูง

การใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงกับเตาแก๊สชีวมวลให้ต้นทุนการผลิตความร้อนต่ำกว่าการใช้หัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิมและแก๊สหุงต้ม โดยต้นทุนการผลิตความร้อนเมื่อใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้ถ่านลำไยและไม้ลำไย 7.65 Baht/kWh และ 0.88 Baht/kWh ในขณะที่การใช้หัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิมให้ต้นทุนเฉลี่ย 8.99 Baht/kWh และ 1.02 Baht/kWh และการใช้แก๊สหุงต้มมีค่าต้นทุนเฉลี่ย 1.77 Baht/kWh การใช้ ถ่านไม้ลำไยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงได้ 20,160 Baht/year ขณะที่การใช้ไม้ลำไยสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 2,136 Baht/year และการใช้หัวเตาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงให้ระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ย 3 เดือน ในกรณีและถ้าใช้ไม้ลำไยจะมีระยะเวลาคืนทุนเฉลี่ย 2 ปี 4 เดือน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษา ทดลองและวิเคราะห์รายละเอียดในเรื่องการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นกับหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้วัสดุพอรุนประเภทเซรามิกหรือวัสดุอื่นๆ เมื่อใช้งานกับแก๊สชีวมวล
2. ควรมีการศึกษาวิจัยด้านการการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นกับหัวเตาแก๊สเพิ่มเติมทั้งใน ด้าน การสูญเสียความร้อนจากเปลวไฟ การถ่ายเทมวลและพลังงานตลอดจนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กับเตาและหัวเตาแก๊สชีวมวลประเภทนี้

บรรณานุกรม

- กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร. 2556. หัวเผาวัสดุพูนสมรรถนะสูง. *Princess of Naradhiwas University Journal*, 5(1), 109-123.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและกระทรวงอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2556. **ยุทธศาสตร์ กระทรวงพลังงาน พ.ศ. 2557-2561**. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- _____. 2558. **เอกสารเผยแพร่ โครงการส่งเสริมการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพและชีวมวล**. กรุงเทพฯ: กระทรวงพลังงาน.
- เชิดชูเกียรติ ผาคำ, ชูรัตน์ ธารารักษ์ และ นิกราน หอมดวง. 2559. การทดสอบเตาผลิตแก๊สชีวมวล แบบไหลลงเพื่อหาขนาดที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงชีวมวล. ใน **การประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม ครั้งที่ 2**. อุบลราชธานี: 19 ตุลาคม 2559 ศูนย์ ศิลวัฒนธรรมกาญจนาภิเษก มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี.
- นคร ทิพยาวงศ์. 2553. **พลังงานหมุนเวียนจากการแปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมีความร้อน**. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นิกราน หอมดวง และคณะ. 2554. การทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์สูบน้ำการเกษตรเมื่อใช้พลังงาน ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง. ใน **การประชุมวิชาการถ่ายทอดพลังงาน ความร้อนและมวลในอุปกรณ์ ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 10**. 11-12 มีนาคม 2554 โรงแรมเชียงใหม่แกรนด์วิว จังหวัดเชียงใหม่.
- ปัญจพร หนาดคำ, นิกราน หอมดวง, กิตติกร สาสุจิตต์ และ อัครินทร์ อินทนิเวศน์. 2558. การประเมินสมรรถนะของแก๊สซิไฟเออร์แบบไหลลงเมื่อใช้เชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้จาก การเกษตร. ใน **การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8**. ปทุมธานี: 4-6 พฤศจิกายน 2558 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- มกร ลักษณะ และ ชลภัทร ต้นประดิษฐ์. 2553. การศึกษาความเป็นไปได้ของการนำหลักการเผาไหม้ วัสดุพูนมาประยุกต์ใช้กับเตาแก๊สที่ใช้ในครัวเรือน. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24**. อุบลราชธานี: 20 - 22 ตุลาคม 2553 ศูนย์แกรนด์ไฮเทลแอนด์คอนเวนชั่นเซ็นเตอร์ จังหวัดอุบลราชธานี.
- ยุทธพงษ์ นาคโสภณ. 2560. การประยุกต์ใช้ชุดอุปกรณ์เติมแก๊สออกซิเจนหัวเผาเวเนจูรี ในเตาเผา ผลิตภัณฑ์ชุมชนรามิก. **วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏ ลำปาง**, 10(2), 75-84.

- ล่อง ฝิโลดม และ ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์. 2557. การศึกษาผลของอัตราส่วนพื้นที่คอคอดและตำแหน่งรูอากาศ ต่ออัตราการดูดอากาศของหัวฉีดเติมอากาศแบบเหนี่ยวนำ. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28**.
 ขอนแก่น: 15-17 ตุลาคม 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สหสวรรค์ ภูจรีระ และ รชพัล สันตวิรากร. 2557. การออกแบบเตาหมักสำหรับก๊าซชีวภาพจากมูลคนร่วมกับเศษอาหารชุมชน. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28**. ขอนแก่น: 15-17 ตุลาคม 2557 มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ. 2541. **การสนับสนุนพร้อมสำหรับการต่อสู้ความหิวและขาดสารอาหารและการป้องกันทรัพยากรธรรมชาติ**. ม.ป.พ.: องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ.
- อาวุธ ลภีรัตนากุล และ จารุวัตร เจริญสุข. 2551. เตาเผาไหม้วัสดุพืชน Part 2: อิทธิพลของอากาศส่วนเกิน. ใน **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22**. กรุงเทพฯ: 15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- Belonio, A. T. 2005. **Rice Husk Gas Stove Handbook**. Iloilo City, Philippines: Appropriate Technology Center, Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University.
- Chawdhury, M. A. & Mahkamov, K. 2011. Development of a Small Downdraft Biomass Gasifier for Developing Countries. **Journal of Scientific Research**, 3(1), 51-64.
- Homdoug, Tipayawong & Dussadee. 2015. Performance and emissions of a modified small engine operated on producer gas. **Energy Conversion and Management**, 94, 286-292.

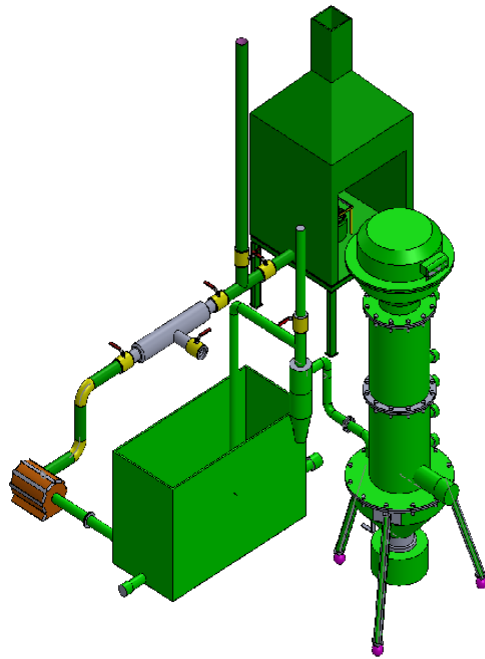


ภาคผนวก

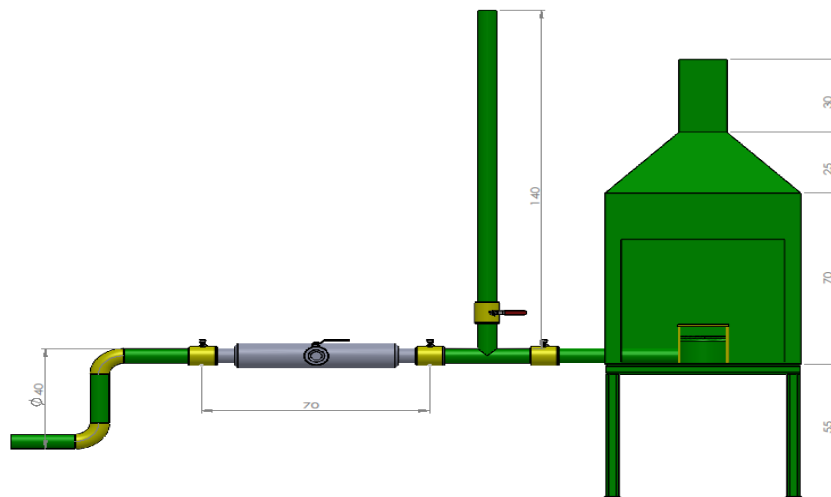


ภาคผนวก ก

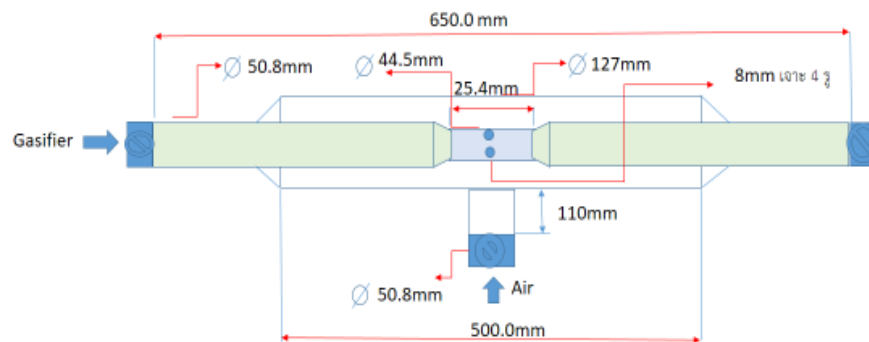
แบบเตาผลิตโปรตีนเซอร์แก๊สหรือแก๊สชีวมวลแบบไหลลง



ภาพผนวกที่ 1 แบบเตาผลิตโปรติวเซอร์แก๊สหรือแก๊สชีวมวลแบบไหลลง



ภาพผนวกที่ 2 ชุดอุปกรณ์หัวเตาเผาแก๊สประสิทธิภาพสูง



อัตราส่วนผสม

Gasifier	:	Air
1	:	0.80
1	:	1.20
1	:	1.50

ภาพผนวกที่ 3 ชุดอุปกรณ์ปรับส่วนผสมแก๊สชีววมวลกับอากาศ





ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบหัวเตาเผาแก๊ส

ตารางผนวกที่ 1 แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเผา KB5 แก๊ส LPG

TIME	T น้ำต้ม	T ก้นหม้อต้ม	Tบรรยากาศ	ปริมาณใช้ LPG
0	30.80	32.30	30.20	31.34
5	47.40	94.30	29.40	31.30
10	68.80	132.70	29.30	31.26
15	87.50	139.50	29.00	31.22
20	94.70	142.00	29.30	31.18
25	93.70	138.40	29.30	31.14
30	92.80	144.90	29.20	31.10
35	92.10	154.00	29.20	31.06
40	92.00	153.70	29.20	31.02
45	92.00	153.60	29.20	30.98
50	92.00	153.00	29.30	30.94
55	91.30	153.00	29.40	30.90
60	91.10	151.20	29.30	30.86

ตารางผนวกที่ 2 แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาแบบดั้งเดิม

เวลา (นาที)	Td1	Tp1	Tc1	Tg1	Tcl1	Tw1	Ts1	T-amb1
0	32.00	32.00	32.10	32.10	32.10	32.10	32.30	32.30
5	45.80	37.80	134.60	745.60	102.40	36.50	39.80	38.10
10	40.10	212.70	254.50	804.30	102.40	36.80	38.80	38.00
15	37.30	373.30	563.70	945.70	101.90	37.00	39.20	38.00
20	34.30	370.40	724.30	944.60	102.50	42.40	132.10	38.20
25	31.40	379.80	853.70	959.90	102.60	45.00	145.30	38.20
30	29.80	370.00	957.20	920.30	104.00	50.00	177.80	37.20
35	31.40	353.00	977.10	900.10	105.10	53.40	192.00	37.20
40	30.20	350.00	989.90	899.10	102.20	57.30	200.10	36.90
45	29.30	355.40	989.70	862.20	101.40	58.40	220.00	36.50
50	28.70	353.20	992.30	859.80	101.40	60.00	239.00	36.70

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td1	Tp1	Tc1	Tg1	Tcl1	Tw1	Ts1	T-amb1
55	26.30	322.70	1000.00	812.30	100.20	63.40	245.70	36.90
60	28.70	319.20	1001.00	800.10	100.40	77.60	252.00	35.90
65	29.30	300.60	1002.00	789.60	101.40	85.50	258.00	33.90
70	27.30	287.90	1007.00	780.00	101.20	90.60	260.20	33.70
75	26.80	280.10	1010.00	779.00	102.30	95.20	280.90	33.90
80	27.30	287.90	1020.00	777.30	102.10	95.30	288.40	33.80
85	28.20	255.10	1022.00	778.00	102.10	95.20	294.70	33.50
90	28.90	233.20	1023.00	779.00	102.10	95.20	297.60	33.00
95	31.00	228.30	1022.00	778.00	102.40	95.30	298.30	32.90
100	32.40	228.30	1017.00	770.00	103.70	95.20	298.30	33.00
105	33.70	208.30	1019.00	772.80	106.10	95.00	300.00	32.90
110	40.10	224.50	1019.00	771.60	107.10	85.70	298.70	32.70
115	41.20	220.10	1010.00	769.00	105.20	83.20	300.20	32.60
120	43.30	210.30	1035.00	750.00	107.40	77.20	300.70	32.60
125	45.80	275.00	998.20	745.80	103.30	73.40	315.00	30.80
130	44.70	308.00	997.10	741.20	102.90	71.60	315.00	29.80
135	36.90	280.90	989.80	740.10	102.90	68.90	313.00	31.90
140	31.50	270.40	980.20	721.80	104.90	53.90	315.00	32.30
145	31.00	246.70	990.10	727.00	104.70	50.60	325.00	33.10
150	32.00	259.30	992.10	726.00	107.70	50.20	320.00	28.90
155	57.50	278.20	989.30	724.00	104.80	49.00	313.00	28.10
160	55.50	299.70	989.70	720.00	106.00	0.00	285.00	27.90
165	38.70	290.90	975.20	722.60	107.80	0.00	285.00	27.50
170	36.00	293.50	972.90	735.10	108.00	0.00	275.00	27.30
175	35.00	296.40	970.20	740.00	107.00	0.00	285.00	27.50
180	69.70	282.10	969.00	753.00	107.60	0.00	265.00	27.20
185	70.30	279.20	960.20	762.80	108.10	0.00	260.00	26.90
190	72.50	307.30	969.90	750.00	108.70	0.00	275.00	26.90
195	88.20	298.40	960.20	729.40	105.90	0.00	290.00	26.70

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td1	Tp1	Tc1	Tg1	Tcl1	Tw1	Ts1	T-amb1
200	93.10	258.30	953.70	721.30	104.20	0.00	280.00	27.00
205	97.30	273.20	940.80	755.80	107.00	0.00	270.00	27.70
210	101.40	276.10	946.90	743.20	105.90	0.00	300.00	26.90
215	117.90	276.70	930.20	730.50	105.90	0.00	310.00	25.80
220	120.20	280.40	930.10	728.30	106.00	0.00	315.00	27.10
225	125.30	299.60	898.70	728.60	105.80	0.00	300.00	28.10
230	137.20	313.10	890.60	725.50	106.00	0.00	298.00	28.20
235	146.70	318.90	883.90	730.10	105.80	0.00	287.00	27.70
240	200.00	320.90	880.60	733.00	104.80	0.00	269.00	27.60
245	200.00	349.20	800.10	741.50	104.50	0.00	257.90	27.20
250	210.00	433.60	776.20	753.80	107.20	0.00	250.30	26.20
255	225.00	496.90	751.10	765.40	107.50	0.00	248.20	27.10
260	230.00	456.50	717.40	788.80	108.00	0.00	242.30	27.20
265	245.00	409.00	684.70	814.50	77.90	0.00	200.90	28.20
270	322.50	368.80	651.70	869.60	66.00	0.00	0.00	31.00
275	200.00	322.00	623.50	906.60	64.90	0.00	0.00	31.20
280	165.00	322.00	600.20	937.40	68.10	0.00	0.00	31.00
285	162.00	298.20	565.70	1020.00	72.70	0.00	0.00	31.40
290	160.00	275.00	512.50	1035.00	72.70	0.00	0.00	31.20
295	160.00	266.40	473.20	1024.00	79.10	0.00	0.00	31.40
300	155.00	257.90	406.50	1010.00	80.20	0.00	0.00	31.40
305.0	153.00	212.30	316.70	985.30	79.30	0.00	0.00	32.00
310.0	153.00	200.10	313.00	912.40	78.60	0.00	0.00	31.80
315.0	152.00	185.30	272.30	877.20	77.00	0.00	0.00	32.00
320.0	150.00	177.30	212.40	802.40	76.30	0.00	0.00	32.00
325.0	145.00	169.20	173.20	765.20	75.30	0.00	0.00	31.90

ตารางผนวกที่ 3 แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F_{Ratio} 1:0.8 (ถ่านไม
ลำไย)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-a	V ปีมลมดูด	V อากาศ mix
0	30.1	30.1	31	31	31	31.1	31.3	31.6		
5	33.6	88.7	135.6	412	102.1	32.5	29.2	32.3		
10	40.1	133.2	567.3	890	104	43.4	119	32.3	3.0	0.4
15	43.2	176.3	726.3	895.1	103.2	46.2	167	32.3		
20	44.5	217.4	855.9	898.6	105.6	59.5	178	32		
25	46	298.8	901.2	900	104.5	72.4	180	32.3		
30	48.8	344.8	987.3	900.1	104	89.3	212	32.3		
35	57.5	380.3	998.8	900	104	98.3	246.2	32.3	3.0	0.4
40	59	380.9	1009.1	902	104.8	98.2	252.7	32.3		
45	60.2	377.8	1008.6	901.3	105.6	98.3	250.4	32.3		
50	60.7	378.3	1008	900	105.9	98.2	250	32.3		
55	61.3	376	1009.3	900.1	105.6	98	249	32.2		
60	62.1	373.1	1008.9	900.2	105.9	97.9	247.5	32.3	3.0	0.4
65	62.8	370	1009.3	900.1	105.3	97	247	32.2		
70	63.1	368	1008.6	900.2	105.3	95	245	32.3		
75	64	368	1009.7	899.3	106.6	89	243.4	32.6		
80	65.2	370.1	1010.2	898.5	107.1	83.6	232.1	32.6		
85	66.9	360.8	1010	900.7	108	78.1	215.5	32.6	3.0	0.4
90	67.2	355.2	1010.3	900	106.5	69.2	212.5	32.6		
95	68	345.2	1009.6	902.2	108	53.9	213	32.6		
100	68.6	345	1008.6	900.3	109.1	49.8	212.7	32.6		
105	70.3	345.2	1008	900	110.3	46.2	212.5	32.6		
110	71.4	340	1007.6	900.2	109.2	0	0	32.6	3.0	0.4
115	72.1	337.2	1007.6	899.3	112.5	0	0	32.6		
120	73	332.1	1008	898.3	110.1	0	0	32.6		
125	74.1	330.1	1009	898.2	107	0	0	32.6		
130	75	325.7	1000	898.2	104.7	0	0	32.6		
135	76	323.3	998.3	893.7	104	0	0	32.6		
140	76.9	319.7	997.1	893.5	104	0	0	32.6		
145	77.7	317.3	996.6	892.3	104.6	0	0	32.6		
150	78.6	316	980.5	893.1	104.5	0	0	32.6		

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-a	V ปริมาณจุด	V อากาศ mix
155	79.3	309.6	980.6	893.1	104.5	0	0	33		
160	80.5	308	977.7	892.3	105	0	0	33		
165	80.6	303	979.6	893	105	0	0	33		
170	81.9	298.7	980.4	893.5	104.6	0	0	33		
175	83	299.3	979.1	892.7	104.3	0	0	33		
180	84	300.1	977.6	892	104	0	0	33		
185	85	307.2	975.3	890.6	104.1	0	0	33		
190	86	307.7	970.1	888.2	104.2	0	0	33		
195	87.6	305.2	969.2	888	104	0	0	33		
200	90	300.1	960.2	886	103.9	0	0	33		
205	93.1	303.2	953.8	885.4	104	0	0	33		
210	117.9	305.7	950.1	885	104.1	0	0	33		
215	120.2	307.7	948.9	884.3	104.4	0	0	33		
220	125.3	313.1	946.9	884	104.3	0	0	33		
225	127.2	318.7	930.2	882.1	104.2	0	0	33		
230	146.2	319.9	930.1	882	104	0	0	33		
235	155.6	322.4	918.1	880.2	104	0	0	33		
240	177.1	330.6	898.7	878.1	103.7	0	0	33		
245	179.2	349.2	890.6	871.2	104	0	0	33		
250	183.2	433.6	887.2	868.4	104.2	0	0	33		
255	185.6	456.5	885.6	868	103.6	0	0	33		
260	188	434.9	883.9	867.8	103.3	0	0	33		
265	200	430	883.9	880.2	103.3	0	0	33		
270	210	427.3	880.1	900.1	103.3	0	0	33		
275	225	422.3	878.2	929.3	103.3	0	0	33		
280	235	420.1	878	970.2	103.3	0	0	33		
285	245	417.3	877.2	980.2	103.3	0	0	33		
290	250	415.3	816.2	982.3	103.3	0	0	33		
295	235	409	809.2	990.2	103.3	0	0	33		
300	220	386.3	798.6	993.2	103.3	0	0	32.6		
305	210	360.4	790.1	997.5	103.3	0	0	32.6		
310	200	322	776.2	100.2	103.3	0	0	32.6		

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-a	V ปัสสาวะ	V อากาศ mix
315	165	322	776	1003.4	103.3	0	0	32.6		
320	160	298	692	1005.2	103.3	0	0	32.6		
325	165	275	650.7	1006.7	103.3	0	0	32.6		
330	153	266	600.6	1010.6	103.3	0	0	32.5		
335	150	255	600	1010.6	103.3	0	0	32.5		
340	143	250	586.8	1007.3	103	0	0	32.5		
345	140	234	553.5	1006	102.9	0	0	32.5		
350	137	230.1	520.2	1006.2	102.9	0	0	32.5		
355	132	197.1	510.9	1002.6	102	0	0	32.5		
360	130	177.2	466.7	1001.1	103	0	0	32.5		
365	122	153.2	402.3	977	104	0	0	32.5		
370	121	142.1	356.9	932	104	0	0	32.5		
375	113	135.5	296.8	900	104	0	0	32.5		

ตารางผนวกที่ 4 แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F_{Ratio} 1:1.2 (ถ่านไม้
ลำไย)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปัสสาวะ	V อากาศ mix
0	28.6	28.6	28.9	28.6	28.6	28.6	28.6	28.3		
5	36.2	54.5	144.7	700.6	101.2	28.6	29.2	28.3		
10	40.8	145.7	498.7	890	104	43.9	119	28.2	3.0	0.6
15	42.4	212.6	725.3	894.1	103.2	54.7	167	28		
20	44.6	267.8	855.7	898	105.6	68.3	178	28.3		
25	46.3	323.8	900.6	900	104.5	81.4	180	25.5		
30	49.8	379.6	987.6	900.1	104	98.1	225	28.6		
35	53.6	380.3	999.1	902	104	98	225.8	29	3.0	0.6
40	55.5	377.6	1010.2	902.2	104.3	98.2	226	29.3		
45	55.5	373.4	1007.5	900.9	104	98	227	29.2		
50	55.5	370	1008.6	900	105	89	216	29.2		
55	57.6	366	1010.3	900.1	105.4	88.9	215	29.3		

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปัดลมดูด	V อากาศ mix
60	58.7	368	1010.3	900.2	105.9	88.8	215	29.1	3.0	0.6
65	59	370	1009.7	900.1	105.3	79.8	215	29.3		
70	58.7	368	1008.6	900.2	105.3	67.2	216	29.4		
75	57.9	368	1009.7	899.3	104	54.2	214	29.6		
80	58.5	369.6	1009.2	900.5	104	46.7	212	29.4		
85	59	361	1012.1	900.7	105	0	0	28.3	3.0	0.6
90	60.2	356	1010.3	901	105.7	0	0	29		
95	61.3	345.2	1012.3	902.2	106.4	0	0	29.1		
100	59.8	345	1015.5	900.3	107.3	0	0	29		
105	60.2	343.7	1017.3	900	110.3	0	0	28.7		
110	60.7	340	1015.3	900.2	109.2	0	0	29	3.0	0.6
115	62.1	337.2	1022.1	899.3	112.5	0	0	28.8		
120	62.9	332.1	1017.3	898.3	110.1	0	0	28.3		
125	62.8	330.1	1009.5	898.2	107	0	0	28.5		
130	63.1	325.7	1000	898.2	104.7	0	0	28.7		
135	64	323.3	998.3	893.7	104	0	0	29		
140	65.2	319.7	997.1	893.5	104	0	0	29.3		
145	66.9	317.3	996.6	892.3	104.6	0	0	29.2		
150	67.7	316	980.5	893.1	104.5	0	0	28.7		
155	68.3	309.6	980.6	893.1	104.5	0	0	28.5		
160	69	308	977.7	892.3	105	0	0	28.3		
165	69.5	303	979.6	893	105	0	0	28.3		
170	69.7	298.7	980.4	893.5	104.6	0	0	28.1		
175	69.7	299.3	979.1	892.7	104.3	0	0	28		
180	70.3	300.1	977.6	892	104	0	0	28.1		
185	72.7	307.2	975.3	890.6	104.1	0	0	28.1		
190	75.6	307.7	970.1	888.2	104.2	0	0	28.3		
195	80.2	305.2	969.2	888	104	0	0	28.2		
200	87.6	300.1	960.2	886	103.9	0	0	27.9		
205	93.1	303.2	953.8	885.4	104	0	0	28		
210	117.9	305.7	950.1	885	104.1	0	0	28.2		
215	120.2	307.7	948.9	884.3	104.4	0	0	28.3		

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปมลมจุด	V อากาศ mix
220	125.3	313.1	946.9	884	104.3	0	0	28.5		
225	127.2	318.7	930.2	882.1	104.2	0	0	28.3		
230	146.2	319.9	930.1	882	104	0	0	28.1		
235	155.6	322.4	918.1	880.2	104	0	0	28.2		
240	177.1	330.6	898.7	878.1	103.7	0	0	28		
245	179.2	349.2	890.6	871.2	104	0	0	28		
250	183.2	433.6	887.2	868.4	104.2	0	0	27.9		
255	185.6	456.5	885.6	868	103.6	0	0	28		
260	188	434.9	883.9	867.8	103.3	0	0	28.2		
265	200	430	883.9	880.2	103.3	0	0	27.9		
270	210	427.3	880.1	900.1	103.3	0	0	27.6		
275	225	422.3	878.2	929.3	103.3	0	0	27.3		
280	235	420.1	878	970.2	103.3	0	0	27.5		
285	245	417.3	877.2	980.2	103.3	0	0	27.7		
290	250	415.3	816.2	982.3	103.3	0	0	27.9		
295	235	409	809.2	990.2	103.3	0	0	26.4		
300	220	386.3	798.6	993.2	103.3	0	0	26.3		
305	210	360.4	790.1	997.5	103.3	0	0	26.5		
310	200	322	776.2	1002.2	103.3	0	0	26.7		
315	165	322	776	1003.4	103.3	0	0	26.4		
320	160	298	692	1005.2	103.3	0	0	26.3		
325	165	275	656.8	1006.7	103.3	0	0	26.3		
330	153	266	610.4	1010.6	103.3	0	0	26.3		
335	150	255	576.9	1010.6	104	0	0			
340	143	250	523	1007.3	104	0	0			
345	140	234	498.9	1006	104	0	0			
350	137	230.1	453.9	1006.2	104	0	0			
355	132	197.1	401.6	1002.6	103.7	0	0			
360	130	177.2	376.9	1001.1	104	0	0			
365	122	153.2	325.6	977	103.8	0	0			
370	121	142.1	300.3	932	103.2	0	0			
375	110	133.2	277.7	893.2	103.3	0	0			

ตารางผนวกที่ 5 แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง AV_{Ratio} 1:1.5 (ถ่านไม้
ลำไย)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปีมลมดูด	V อากาศ
0	33	33	33	33	33	33	33.2	33.2		
5	49	76.3	212.2	432	102.1	33.2	33.1	32.3		
10	52.3	124.3	412.3	888	103	44	119	32.3	3.0	0.8
15	55.7	166.7	515.7	891	103.2	45.6	167	32.3		
20	60.2	211.5	625.7	898	104.2	61.7	178	32		
25	63.7	373.2	715.3	900	104.5	79.8	180	32.3		
30	48.8	380	818.5	900.1	104.5	90.6	212	32.3		
35	57.5	380.3	969.8	902	104.7	98.3	225	32.3	3.0	0.8
40	58.8	372	990.1	902.2	104.8	97.9	230	32.3		
45	59.3	371	1000.2	900.9	105.6	97.7	236.1	32.3		
50	60.4	370	1000.7	900	105.9	97.7	240	32.3		
55	60.7	366	1010	900.1	105.6	98	245	32.2		
60	60.9	368	1010.3	900.2	105.9	97.9	243.2	32.3	3.0	0.8
65	60.9	370	1009.7	900.1	105.3	97	243	32.2		
70	61.7	368	1008.6	900.2	105.3	95	239.7	32.3		
75	61.9	368	1009.7	899.3	106.6	89	233.2	31.6		
80	61.9	369	1010.2	898.5	107.1	82.6	228	31.6		
85	62	360.8	1011	900.7	108	77.8	228	31.6	3.0	0.8
90	60.2	355.2	1010.3	900	106.5	68.9	227.6	31.6		
95	61.3	345.2	1012.3	902.2	108	53.9	228	31.6		
100	62.5	345	1015.5	900.3	109.1	50.6	227.7	31.6		
105	62.7	343.7	1017.3	900	110.3	49.3	227.8	31.6		
110	63	340	1015.3	900.2	109.2	47.6	228	31.6	3.0	0.8
115	63.3	337.2	1017.3	989.8	110.7	45.1	227	31.6		
120	63.9	332.1	1017.3	898.3	110.1	0	0	31.6		
125	64	330.1	1009.5	898.2	107	0	0	32.3		
130	64.5	325.7	1000	898.2	104.7	0	0	32.3		
135	65	323.3	998.3	893.7	104	0	0	32.3	3.0	0.8
140	65.9	319.7	997.1	893.5	104	0	0	32.3		
145	66.9	317.3	996.6	892.3	104.6	0	0	32.3		
150	67.7	316	980.5	893.1	104.5	0	0	32.3		

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปมลมจุด	V อากาศ
155	68.3	309.6	980.6	893.1	104.5	0	0	32.3		
160	69	308	977.7	892.3	105	0	0	32.3		
165	69.5	303	979.6	893	105	0	0	32.3		
170	69.7	298.7	980.4	893.5	104.6	0	0	32.3		
175	69.7	299.3	979.1	892.7	104.3	0	0	32.3		
180	70.3	300.1	977.6	892	104	0	0	32.3		
185	72.7	307.2	975.3	890.6	104.1	0	0	32.3		
190	75.6	307.7	970.1	888.2	104.2	0	0	32.3		
195	80.2	305.2	969.2	888	104	0	0	32.3		
200	87.6	300.1	960.2	886	103.9	0	0	32.3		
205	93.1	303.2	953.8	885.4	104	0	0	32.3		
210	117.9	305.7	950.1	885	104.1	0	0	32.3		
215	120.2	307.7	948.9	884.3	104.4	0	0	32.3		
220	125.3	313.1	946.9	884	104.3	0	0	32.3		
225	127.2	318.7	930.2	882.1	104.2	0	0	32.3		
230	146.2	319.9	930.1	882	104	0	0	32.3		
235	155.6	322.4	918.1	880.2	104	0	0	32.3		
240	177.1	330.6	898.7	878.1	103.7	0	0	32.3		
245	179.2	349.2	890.6	871.2	104	0	0	32.3		
250	183.2	433.6	887.2	868.4	104.2	0	0	32.3		
255	185.6	456.5	885.6	868	103.6	0	0	32.3		
260	188	434.9	883.9	867.8	103.3	0	0	32.3		
265	200	430	883.9	880.2	103.3	0	0	32.3		
270	210	427.3	880.1	900.1	103.3	0	0	32.3		
275	225	422.3	878.2	929.3	103.3	0	0	32.6		
280	235	420.1	878	970.2	103.3	0	0	32.6		
285	245	417.3	877.2	980.2	103.3	0	0	32.6		
290	250	415.3	816.2	982.3	103.3	0	0	32.6		
295	235	409	809.2	990.2	103.3	0	0	32.6		
300	220	386.3	798.6	993.2	103.3	0	0	32.6		
305	210	360.4	790.1	997.5	103.3	0	0	32.6		
310	200	322	776.2	100.2	103.3	0	0	32.6		

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปมลมดูด	V อากาศ
315	165	322	776	1003.4	103.3	0	0	32.6		
320	160	298	692	1005.2	103.3	0	0	32.6		
325	165	275	650.7	1006.7	103.3	0	0	32.6		
330	153	266	600.6	1010.6	103.3	0	0	32.5		
335	150	255	600	1010.6	103.3	0	0	32.5		
340	143	250	586.8	1007.3	103	0	0	32.5		
345	140	234	553.5	1006	103	0	0	32.5		
350	137	230.1	520.2	1006.2	103	0	0	32.5		
355	132	197.1	510.9	1002.6	102.8	0	0	32.5		
360	130	177.2	466.7	1001.1	102.9	0	0	32.5		
365	122	153.2	402.3	977	102	0	0	32.5		
370	121	142.1	356.9	932	102	0	0	32.5		
375	113	135.5	296.8	900	102	0	0	32.5		

ตารางผนวกที่ 6 แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F_{Ratio} 1:0.8 (ไม่ลำไย)

เวลา (นาทีก)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปมลมดูด	V อากาศ mix
0	29	29.2	29.2	29	30	29.6	30	30		
5	33.2	89.5	112.3	450.7	102.1	33	33	30.3		
10	37.8	134.6	345.6	603.5	104	40.5	119	31.6	3.0	0.6
15	40.6	167.3	567.8	701.1	103.2	43	167	31.6		
20	42.1	212	768.9	834.7	105.6	44.5	178	31.6		
25	44.7	376	883.6	899.1	104.5	45.9	180	31.6		
30	48.8	379.6	987.6	900.1	104	49.2	212	31.6		
35	57.5	380.3	987	902	104.7	53	215.5	31.6	3.0	0.6
40	56.6	370.8	986.7	902.2	104.8	59.7	215	31.6		
45	56.3	370.1	987	900.9	105.6	65	217	31.6		
50	57	370	986.2	900	105.9	70.6	216	31.6		
55	57.6	371	986.5	900.1	105.6	79	215	31.6		
60	58.7	370	987	900.2	105.9	83.5	215	31.6	3.0	0.6

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปีมลมดูด	V อากาศ mix
65	59	370	987.6	900.1	105.3	86	215	31.6		
70	58.7	368	988.2	900.2	105.3	89.3	216	31.6		
75	58	368	988.7	899.3	106.6	92.2	214	31.6		
80	58.2	370.1	990	898.5	107.1	93.2	212	31.6		
85	58.9	372	990.6	900	108	94	213	31.6	3.0	0.6
90	60.2	374.3	990.9	900	106.5	93.8	215	30.6		
95	61.3	377.1	991	902.2	108	93.7	215	31.6		
100	59.8	376	992	900.3	109.1	93.9	215	31.6		
105	60.2	370	993.3	900	110.3	94	215	31.6		
110	60.7	366	994.6	900.2	109.2	94	210	31.6	3.0	0.6
115	62.1	356	995.8	899.3	112.5	93.5	205	31.6		
120	62.9	356	996.8	898.3	110.1	93.2	200	31.6		
125	62.8	355	998	898.2	107	93	200	32.3		
130	63.1	340	998.7	898.2	104.7	92.3	200	32.3		
135	64	340	998.3	893.7	104	92	205	32.3	3.0	0.6
140	65.2	339.2	997.1	893.5	104	91.4	207	32.3		
145	66.9	332.7	996.6	892.3	104.6	91	207	32.3		
150	67.7	325.6	980.5	893.1	104.5	89	205	32.3		
155	68.3	325	980.6	893.1	104.5	88.3	207	32.3		
160	69	320	977.7	892.3	105	88	198	32.3	3.0	0.6
165	69.5	317	979.6	893	105	87	190	32.3		
170	69.7	315	980.4	893.5	104.6	86.2	188	32.3		
175	69.7	310	979.1	892.7	104.3	84.3	186	32.3		
180	70.3	309	977.6	892	104	83	183	32.3		
185	72.7	307.2	975.3	890.6	104.1	82.1	187	32.3	3.0	0.6
190	75.6	307.7	970.1	888.2	104.2	77	185	32.3		
195	80.2	305.2	969.2	888	104	72	185	32.3		
200	87.6	300.1	960.2	886	103.9	70	183	32.3		
205	93.1	303.2	953.8	885.4	104	68.7	180	32.3		
210	117.9	305.7	950.1	885	104.1	67	179	32.3	3.0	0.6
215	120.2	307.7	948.9	884.3	104.4	66.2	177	32.3		

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปีมลมตูด	V อากาศ mix
220	125.3	313.1	946.9	884	104.3	63.2	179	32.3		
225	127.2	318.7	930.2	882.1	104.2	60	180	32.3		
230	146.2	319.9	930.1	882	104	58.6	182	32.3		
235	155.6	322.4	918.1	880.2	104	55	181	32.3	3.0	0.6
240	177.1	330.6	898.7	878.1	103.7	50	180	32.3		
245	179.2	349.2	890.6	871.2	104	45.8	179	32.3		
250	183.2	433.6	887.2	868.4	104.2	0	179	32.3		
255	185.6	456.5	885.6	868	103.6	0	179	32.3		
260	188	434.9	883.9	867.8	103.3	0	177	32.3	3.0	0.6
265	200	430	883.9	880.2	103.2	0	165	32.3		
270	210	427.3	880.1	900.1	103	0	163	32.3		
275	225	422.3	878.2	929.3	103.1	0	160	32.6		
280	235	420.1	878	970.2	103.2	0	158	32.6		
285	245	417.3	877.2	980.2	102.8	0	156	32.6		
290	250	415.3	816.2	982.3	102.5	0	150	32.6		
295	235	409	809.2	990.2	102.3	0	146	32.6		
300	220	386.3	798.6	993.2	102.3	0	139	32.6		
305	210	360.4	790.1	997.5	102.6	0	139	32.6		
310	200	322	776.2	100.2	102.3	0	139	32.6		
315	165	322	776	1003.4	102.1	0	139	32.6		
320	160	298	692	1005.2	102.2	0	139	32.6		
325	165	275	650.7	1006.7	101.9	0	139	32.6		
330	153	266	600.6	1010.6	101.5	0	139	32.5		
335	150	255	600	1010.6	101.2	0	139	32.5		
340	143	250	586.8	1007.3	101.3	0	139	32.5		
345	140	234	553.5	1006	101.2	0	139	32.5		
350	137	230.1	520.2	1006.2	101	0	139	32.5		
355	132	197.1	510.9	1002.6	101.3	0	139	32.5		
360	130	177.2	466.7	1001.1	101.1	0	139	32.5		
365	122	153.2	402.3	977	100.8	0	139	32.5		
370	121	142.1	356.9	932	100.5	0	139	32.5		
375	113	135.5	296.8	900	100	0	139	32.5		

ตารางผนวกที่ 7 แสดงผลการทดสอบการต้มน้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F_{Ratio} 1:1.2 (ไม่ลำไย)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปีมลมดูด	V อากาศ mix
0	26	26	26	26	26	26.8	27	27		
5	33.9	87.9	134.6	289	102.1	27	27	27		
10	40.1	122.3	473.8	401.5	104	33.9	119	29	3.0	0.8
15	42.8	176.4	733.8	698.6	103.2	40.1	167	29		
20	45.6	232.1	855.7	898	105.6	45.5	178	29		
25	46.3	301.8	900.6	900	104.5	49.6	180	29		
30	48.8	379.6	987.6	900.1	104	55.3	212	29		
35	53.5	380.3	999.1	902	104.7	61.2	215.5	29	3.0	0.8
40	55.5	370.8	998.8	902.2	104.8	67.6	215	29		
45	56	370.1	998.6	900.9	105.6	73.7	217	29		
50	56.3	370	998.3	900	105.9	78.5	216	29		
55	57.6	366	998.7	900.1	105.6	83.3	215	29		
60	58.7	368	998	900.2	105.9	89.3	215	29	3.0	0.8
65	59	370	997.7	900.1	105.3	92.4	215	29		
70	58.7	368	997	900.2	105.3	94.2	216	30		
75	57.9	368	998	899.3	106.6	94	214	30		
80	58.2	370.1	998.4	898.5	107.1	94.1	212	30		
85	59	360.8	998.3	900.7	108	94.2	213	30	3.0	0.8
90	60.2	355.2	998	900	106.5	93	215	30		
95	61.3	345.2	997.6	902.2	108	93.3	215	30		
100	60.2	345	997	900.3	109.1	93	215	30		
105	60.2	343.7	997	900	110.3	92.7	215	30		
110	60.7	340	996.8	900.2	109.2	92	210	30	3.0	0.8
115	62.1	337.2	997.1	899.3	112.5	91	205	30		
120	62.9	332.1	997	898.3	110.1	90.2	200	30		
125	62.8	330.1	996.3	898.2	107	89.4	200	30		
130	63.1	325.7	997.4	898.2	104.7	89	200	29		
135	64	323.3	998.3	893.7	104	89	205	29	3.0	0.8
140	65.2	319.7	997.1	893.5	104	89.2	207	29		
145	66.9	317.3	996.6	892.3	104.6	88.8	207	29		
150	67.7	316	980.5	893.1	104.5	88.5	205	29		

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปมลมดูด	V อากาศ mix
155	68.3	309.6	980.6	893.1	104.5	88.7	207	29		
160	69	308	977.7	892.3	105	88.3	198	29	3.0	0.8
165	69.5	303	979.6	893	105	88.5	190	29		
170	69.7	298.7	980.4	893.5	104.6	88.1	188	29		
175	69.7	299.3	979.1	892.7	104.3	86.6	186	29		
180	70.3	300.1	977.6	892	104	83.7	183	29		
185	72.7	307.2	975.3	890.6	104.1	80.5	187	29	3.0	0.8
190	75.6	307.7	970.1	888.2	104.2	78	185	29		
195	80.2	305.2	969.2	888	104	75.1	185	29		
200	87.6	300.1	960.2	886	103.9	73.3	183	29		
205	93.1	303.2	953.8	885.4	104	67	180	29		
210	117.9	305.7	950.1	885	104.1	61	179	29	3.0	0.8
215	120.2	307.7	948.9	884.3	104.4	55.1	177	29		
220	125.3	313.1	946.9	884	104.3	45.3	179	29		
225	127.2	318.7	930.2	882.1	104.2	0	180	29		
230	146.2	319.9	930.1	882	104	0	182	29		
235	155.6	322.4	918.1	880.2	104	0	181	29	3.0	0.8
240	177.1	330.6	898.7	878.1	103.7	0	180	29		
245	179.2	349.2	890.6	871.2	104	0	179	29		
250	183.2	433.6	887.2	868.4	104.2	0	179	29		
255	185.6	456.5	885.6	868	103.6	0	179	29		
260	188	434.9	883.9	867.8	103.3	0	177	29		
265	200	430	883.9	880.2	103.3	0	165	29		
270	210	427.3	880.1	900.1	103.3	0	163	29		
275	225	422.3	878.2	929.3	103.3	0	160	29		
280	235	420.1	878	970.2	103.3	0	158	29		
285	245	417.3	877.2	980.2	103.3	0	156	29		
290	250	415.3	816.2	982.3	103.3	0	150	32.6		
295	235	409	809.2	990.2	103.3	0	146	29		
300	220	386.3	798.6	993.2	103.3	0	139	29		
305	210	360.4	790.1	997.5	103.3	0	139	29		

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปีมลมดูด	V อากาศ mix
310	200	322	776.2	100.2	103.3	0	139	29		
315	165	322	776	1003.4	103.3	0	139	29		
320	160	298	692	1005.2	103.3	0	139	29		
325	165	275	650.7	1006.7	103.3	0	139	29		
330	153	266	600.6	1010.6	103.3	0	139	29		
335	150	255	600	1010.6	103.3	0	139	29		
340	143	250	586.8	1007.3	104	0	139	29		
345	140	234	553.5	1006	104	0	139	29		
350	137	230.1	520.2	1006.2	104	0	139	29		
355	132	197.1	510.9	1002.6	104	0	139	29		
360	130	177.2	466.7	1001.1	104	0	139	29		
365	122	153.2	402.3	977	104	0	139	29		
370	121	142.1	356.9	932	104	0	139	29		
375	113	135.5	296.8	900	104	0	139	29		

ตารางผนวกที่ 8 แสดงผลการทดสอบการต้ม้ำหัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง A/F_{Ratio} 1:1.5 (ไม่ลำไย)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปีมลมดูด	V อากาศ
0	28.2	28.2	28.6	28.3	29	29	29	29		
5	42.7	88.7	134.6	533	102.1	33.8	29.2	32.3		
10	44.9	129.7	563.7	900	104	37.2	119	32.3	3.0	0.9
15	44.3	167.3	725.3	898.6	103.2	40.6	167	32.3		
20	44.5	210.6	855.7	898	105.6	43.8	178	32		
25	45	373.9	900.6	900	104.5	46.7	180	32.3		
30	48.8	379.6	987.6	900.1	104	48.8	212	32.3		
35	53.2	380.3	988.2	902	104.7	52.3	215.5	32.3	3.0	0.9
40	55.5	370.8	989.3	902.2	104.8	57.7	215	32.3		
45	55.8	370.1	987.7	900.9	105.6	62.6	217	32.3		
50	56	370	988	900	105.9	69.1	216	32.3		
55	57.6	366	988.6	900.1	105.6	76.6	215	32.2		

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

เวลา (นาที)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปีมลมดูด	V อากาศ
60	58.7	368	988.3	900.2	105.9	81.4	215	32.3	3.0	0.9
65	59	370	987.4	900.1	105.3	86.3	215	32.2		
70	58.7	368	987.2	900.2	105.3	89.7	216	32.3		
75	57.9	368	987.5	899.3	106.6	92.1	214	31.6		
80	58.2	370.1	987.2	898.5	107.1	94.2	212	31.6		
85	59	360.8	988	900.7	108	96	213	31.6	3.0	0.9
90	60.2	355.2	987.2	900	106.5	96.2	215	31.6		
95	61.3	345.2	986.7	902.2	108	96	215	31.6		
100	60.3	345	986.9	900.3	109.1	95.8	215	31.6		
105	60.2	343.7	987	900	110.3	95.3	215	31.6		
110	60.7	340	986.6	900.2	109.2	95	210	31.6	3.0	0.9
115	62.1	337.2	986	899.3	112.5	95.1	205	31.6		
120	62.9	332.1	985.8	898.3	110.1	95.5	200	31.6		
125	62.8	330.1	986	898.2	107	95	200	32.3		
130	63.1	325.7	986.5	898.2	104.7	94.7	200	32.3		
135	64	323.3	987	893.7	104	94.5	205	32.3	3.0	0.9
140	64.8	319.7	987.3	893.5	104	93.7	207	32.3		
145	65.9	317.3	987.6	892.3	104.6	93	207	32.3		
150	67.7	316	988.1	893.1	104.5	92.3	205	32.3		
155	68.3	309.6	987.6	893.1	104.5	92	207	32.3		
160	69	308	983.5	892.3	105	91.2	198	32.3	3.0	0.9
165	69.5	303	979.6	893	105	89	190	32.3		
170	69.7	298.7	980.4	893.5	104.6	89.2	188	32.3		
175	69.7	299.3	979.1	892.7	104.3	89	186	32.3		
180	70.3	300.1	977.6	892	104	89	183	32.3		
185	72.7	307.2	975.3	890.6	104.1	88.8	187	32.3	3.0	0.9
190	75.6	307.7	970.1	888.2	104.2	88.3	185	32.3		
195	80.2	305.2	969.2	888	104	87.4	185	32.3		
200	87.6	300.1	960.2	886	103.9	87.7	183	32.3		
205	93.1	303.2	953.8	885.4	104	87	180	32.3		
210	117.9	305.7	950.1	885	104.1	87.3	179	32.3	3.0	0.9
215	120.2	307.7	948.9	884.3	104.4	86.6	177	32.3		

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

เวลา (นาทีก)	Td2	Tp2	Tc2	Tg2	Tcl2	Tw2	Ts2	T-amb	V ปีมลมจุด	V อากาศ
220	125.3	313.1	946.9	884	104.3	85.8	179	32.3		
225	127.2	318.7	930.2	882.1	104.2	84.9	180	32.3		
230	146.2	319.9	930.1	882	104	83.6	182	32.3		
235	155.6	322.4	918.1	880.2	104	82	181	32.3	3.0	0.9
240	177.1	330.6	898.7	878.1	103.7	81	180	32.3		
245	179.2	349.2	890.6	871.2	104	79.6	179	32.3		
250	183.2	433.6	887.2	868.4	104.2	68.3	179	32.3		
255	185.6	456.5	885.6	868	103.6	60	179	32.3		
260	188	434.9	883.9	867.8	103.3	55.1	177	32.3	3.0	0.9
265	200	430	883.9	880.2	103.3	49.3	165	32.3		
270	210	427.3	880.1	900.1	103.3	45.6	163	32.3		
275	225	422.3	878.2	929.3	103	43.2	160	32.6		
280	235	420.1	878	970.2	102.7	0	0	32.6		
285	245	417.3	877.2	980.2	103	0	0	32.6	3.0	0.9
290	250	415.3	816.2	982.3	102.5	0	0	32.6		
295	239.8	409	809.2	990.2	103.2	0	0	32.6		
300	221.1	386.3	798.6	993.2	103.3	0	0	32.6		
305	210	360.4	790.1	997.5	103.3	0	0	32.6		
310	200	322	776.2	996.7	103.6	0	0	32.6		
315	165	322	776	998	104	0	0	32.6		
320	160	298	692	998.9	104	0	0	32.6		
325	165	275	650.7	998.3	104	0	0	32.6		
330	153	266	600.6	990	103	0	0	32.5		
335	150	255	600	988.8	102.4	0	0	32.5		
340	143	250	586.8	983.7	102	0	0	32.5		
345	140	234	553.5	980	102	0	0	32.5		
350	137	230.1	520.2	977	102	0	0	32.5		
355	132	197.1	510.9	977.3	102	0	0	32.5		
360	130	177.2	466.7	972	101.8	0	0	32.5		
365	122	153.2	402.3	961	100.9	0	0	32.5		
370	121	142.1	356.9	892	100	0	0	32.5		
375	112.7	134.5	339.4	800	100	0	0	32.5		



ภาคผนวก ค

วิธีการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับเตาแก๊สชีวมวล

แนวคิดในการออกแบบหัวเตาแก๊สชีวมวล เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าหัวเตาแบบดั้งเดิม

ขั้นตอนที่ 1 ค่าความร้อนที่ได้ออกมาแทนค่าด้วย Q_U

$$Q_U = m_w \times C_{p_w} \times \Delta T$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} &= \frac{10 \text{ kg} \times 4.186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \times (100 - 32) \text{ K}}{60 \text{ min} \times 3600} \\ &= 0.790 \text{ kW} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 25% เป็นประสิทธิภาพต้องการให้เพิ่มสูงขึ้น

จากสมการ

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

แทนค่า

$$Q_{in} = \frac{0.790}{0.25}$$

เพราะฉะนั้นความร้อนที่จะป้อนเข้าสู่ระบบ

$$= 3.162 \text{ kW}$$

ขั้นตอนที่ 3 การหาอัตราการไหลของแก๊สชีวมวล

จากสมการ

$$Q_{gas} = \dot{m}_{gas} \times C_{v_{gas}}$$

$$\dot{m}_{gas} = \frac{Q_{gas}}{C_{v_{gas}}}$$

$$\text{กำหนด } C_{v_{gas}} = 4,000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad \dot{m}_{gas} &= \frac{3.162 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{4,000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}} \\ &= 0.000790 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \end{aligned}$$

$$= 2.846 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

ขั้นตอนที่ 4 การหาอัตราการใช้ถ่าน กำหนดประสิทธิภาพเตา 70%
จากสมการ

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{m}_{\text{gas}} \times \text{CV}_{\text{gas}}}{\eta_{\text{th}} \times \text{LHV}_{\text{Charcoal}}}$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \dot{m}_s &= \frac{0.000790 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 4,000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}}{0.70 \times 28,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \\ &= 0.00016 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

การออกแบบชุดปรับอัตราส่วนผสมแก๊สชีววมลกับอากาศ

จากเงื่อนไขของปริมาณแก๊สที่ต้องใช้ $0.00513 \text{ m}^3/\text{s}$ หรือ $18.50 \text{ m}^3/\text{hr}$

1. คำนวณปริมาณอากาศที่ต้องใช้

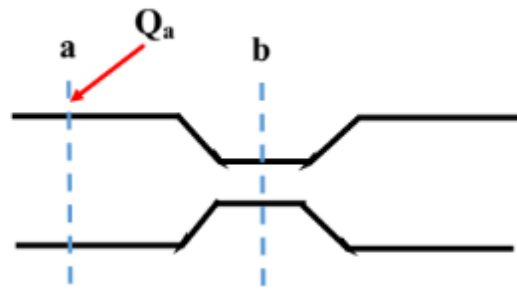
$$A/F = 1.2:1$$

$$\frac{A}{F} = 1.2$$

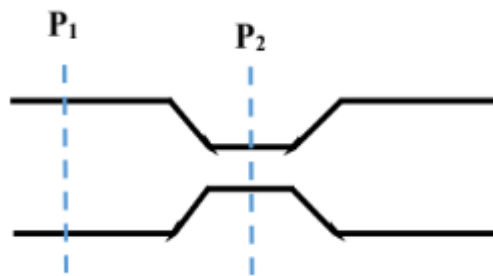
$$A = F \times 1.2$$

$$= 0.00513 \text{ m}^3/\text{s} \times 1.2$$

$$A = 0.0061 \text{ m}^3/\text{s} = 22.16 \text{ m}^3/\text{hr}$$



เมื่อ $Q_a = Q_b$



มาตรฐานการออกแบบ
 = 12-18 in Hg
 = 29.92 in H₂

แรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.81 m/s^2

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 25.4 cm

$$P_{\text{atm}} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

เพราะฉะนั้นแรงดันแต่ละจุด หาจากสมการ

$$P = \rho h$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} P &= 13,600 \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 29.92 \times \frac{2.54}{100} \\ &= 101,391.89 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

$$P = 13,600 \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 18 \times \frac{2.54}{100}$$

$$p = 60,997.79 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$P = 13,600 \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 12 \times \frac{2.54}{100}$$

$$P_1 = 40,665.19 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

จากสมการเบอร์นูลลี

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_1^2)$$

$$(V_2^2 - V_1^2) = \left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right) \times 2$$

$$V_2^2 = \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right] \times 2 + V_1^2$$

$$Q = AV$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V_2 = \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right] \times 2 + \frac{Q_1^2}{A_1^2}$$

$$\frac{Q_2}{A_2} = \sqrt{\left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right) \times 2 + \frac{Q_1^2}{A_1^2}}$$

$$A_2 = \frac{Q_2}{\sqrt{\left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right) \times 2 + \frac{Q_1^2}{A_1^2}}}; A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{Q_2}{\sqrt{\left(\frac{P_1 - P_2}{\rho} \right) \times 2 + \frac{Q_1^2}{A_1^2}}} \times \frac{4}{\pi}$$

แทนค่า

$$d = \sqrt{\frac{0.00513 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\sqrt{\frac{101391 - 40665 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}}{1.15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2} + \frac{0.00513^2}{0.00196^2}}}} \times \frac{4}{\pi}$$

$$d = \sqrt{\frac{0.00513}{324097} \times \frac{4}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{0.02052}{1020.9}}$$

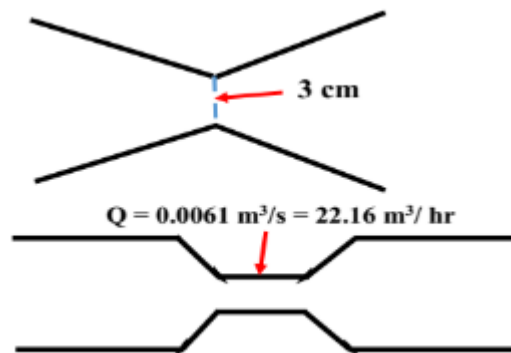
$$d = \sqrt{0.000024}$$

$$d = 0.00445 \text{ m}$$

$$d = 4.45 \text{ cm}$$

$$d_{\text{thour}} < 4.45$$

เพราะฉะนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณคอคอด จึงเลือก 3 cm หรือพิจารณา ท่อเหล็ก ขนาด 25.4 cm เพื่อสะดวกในการจัดสร้าง



เมื่อ $Q_{\text{air}} = 0.0061 \text{ m}^3/\text{s} = 22.16 \text{ m}^3/\text{hr}$

หา V_2 จาก

$$Q_2 = A_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A_2}$$

$$V_2 = \frac{0.00513}{\frac{\pi(0.03)^2}{4}}$$

4

$$V_2 = 7.25 \text{ m/s}$$

เมื่อต้องการให้มีการผสมได้ดี สูงสุดความเร็วของอากาศควรมากกว่า 7.25 m/s

ดังนั้นจึงเลือกกำหนดค่าความเร็วของอากาศ $V = 15 \text{ m/s}$

เพราะฉะนั้น

$$A = \frac{Q_{\text{Air}}}{V_{\text{Air}}}$$

$$= \frac{0.0061 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{15 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

แทนค่า

$$= \frac{0.0061 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{15 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.00040 \text{ m}^2$$

ต้องการเจาะรูทั้งหมด 4 รู พื้นที่ของรู คือ 0.00005 m^2

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

แทนค่า

$$d = \sqrt{\frac{0.00005 \times 4}{\pi}}$$

$$d = 7.97 \text{ mm} \text{ หรือเท่ากับ } 8 \text{ mm}$$

เพราะฉะนั้นต้องเจาะรูป้อนอากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm จำนวน 4 รู

คุณสมบัติเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

Chemical Property	ไม้ลำไย Longan	ถ่านไม้ลำไย Charcoal
Moisture (%)	3.50	6.3
Volatile (%)	77.40	70.7
Fixed carbon (%)	16.60	19.4
Ash (%)	2.50	3.6
C (%)	48.8	79.6
H (%)	5.20	3.0
O (%)	44.60	13.2
N (%)	1.4	0.29
HHV (MJ/kg)	17.8	28.7

ที่มา: Homdoun et al. (2015)

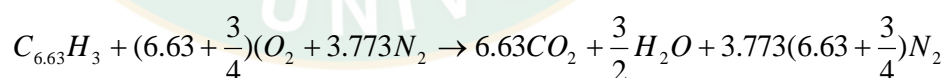
**เทียบผลการปฏิกิริยาขององค์ประกอบของแก๊สชีววมวลจากการเผาไหม้ ปริมาณสัมพันธ์
การเผาไหม้แสดงได้ดังนี้**

จากนิยามน้ำหนักโมเลกุลจากเชื้อเพลิงที่ได้ CH_4 แยกเชื้อเพลิง 2 ชนิด

ถ่านไม้ลำไย (Charcoal)

$$C = 79.6 = 6.63 \text{ gmol} , H = 3 = 3 \text{ gmol}$$

ปฏิกิริยาสัมพันธ์การเผาไหม้ ดังนี้



$$1 \text{ โมล Air} = 7.38 \text{ โมล}$$

$$0.083 \text{ kg fuel} \quad 1.02 \text{ kg Air} \quad 1.10 \text{ kg product}$$

ปริมาณอากาศทางทฤษฎี Air-Fuel ratio (A/F ratio)

$$A/F = 1.02/0.083$$

$$A/F = 12.29 \text{ โดยน้ำหนัก}$$

ปริมาณอากาศเชื้อเพลิงแข็งหรือเหลว

$$A/F = 0.083 / 1.02$$

$$A/F = 0.080 \text{ โดยน้ำหนัก}$$

ไม้ลำไย (Longan)

$$C = 48.8 = 4.06 \text{ gmol} , \quad H = 5.20 = 5.20 \text{ gmol}$$

ปฏิกิริยาสัมพันธ์การเผาไหม้ ดังนี้

$$1 \text{ โมล Air} = 53.92 \text{ โมล}$$

$$0.054 \text{ kg fuel} \quad 0.738 \text{ kg Air} \quad 0.792 \text{ kg product}$$

ปริมาณอากาศทางทฤษฎี Air-Fuel ratio (A/F ratio)

$$A/F = 0.054/0.738$$

$$A/F = 0.07 \text{ โดยน้ำหนัก}$$

ปริมาณอากาศเชื้อเพลิงแข็งหรือเหลว

$$A/F = 0.738/0.054$$

$$A/F = 13.67 \text{ โดยน้ำหนัก}$$

จากปริมาณสัมพันธ์การเผาไหม้ ออกซิเจนเป็นตัวช่วยในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ขณะเดียวกันอัตราส่วนไฮโดรเจนและคาร์บอน ก็ช่วยส่งผลให้ปริมาณอากาศส่วนปริมาณเชื้อเพลิง สูงขึ้นไปด้วย

กรณีเชื้อเพลิงถ่านไม้ลำไยมีปริมาณสัมพันธ์การเผาไหม้กับออกซิเจนน้อยทำให้เข้าลักษณะ ส่วนผสมการเผาไหม้บาง (Fuel-lean mixture) เป็นส่วนผสมที่มีค่า $\phi < 1$ หรือ $\lambda > 1$ คือมีอัตรา เชื้อเพลิงน้อยหรืออากาศมากเกินไปกว่าค่าพอดี แสดงได้ค่า $A/F = 0.080$ โดยน้ำหนัก

กรณีของเชื้อเพลิงที่เป็นไม้ลำไยมีปริมาณสัมพันธ์การเผาไหม้กับออกซิเจนมากลักษณะ ส่วนผสมการเผาไหม้หนา (Fuel-rich mixture) เป็นส่วนผสมที่มีค่า $\phi > 1$ หรือ $\lambda < 1$ คือมีอัตรา เชื้อเพลิงมากเกินไปหรือมีอากาศน้อยเกินไปที่จะออกซิไดส์เชื้อเพลิงหมด แสดงได้ค่า $A/F = 13.67$ โดยน้ำหนัก

จากปริมาณสัมพันธ์การเผาไหม้ที่ไม่พอดี ทำให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำไปด้วย จึงมีการ ออกแบบอุปกรณ์ปรับ เพิ่ม/ลด ปริมาณอากาศ แสดงไว้เพื่อนำไปเป็นองค์ประกอบการออกแบบหัว เตาเผาแก๊สชีวมวลประสิทธิภาพสูงต่อไป

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์การใช้หัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง

ต้นทุนที่ใช้ปรับปรุงหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง ดังนี้

อุปกรณ์ต่างๆ ชุดผสมแก๊สชีวมวลกับอากาศ	2,500.00 บาท
อุปกรณ์กันลมเข้า และหัวเตาเซรามิก	2,500.00 บาท
ค่าแรงงานเชื่อม และอุปกรณ์	500.00 บาท
รวมทั้งสิ้น	5,500.00 บาท

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงหัวเตาแก๊สแบบดั้งเดิม	
ระยะเวลาใช้เวลาดำน้ำ 10 kg	140 นาที
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ถ่านไม้ลำไย)	5.67 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ถ่านไม้ลำไย)ต่อ140นาที	13.23 กิโลกรัม

การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง	
ระยะเวลาที่ใช้ดำน้ำ 10 kg ให้แห้ง	70 นาที
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ถ่านไม้ลำไย)	4.83 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (ถ่านไม้ลำไย)ต่อ70นาที	5.64 กิโลกรัม

ราคาถ่านไม้ลำไย (ท้องตลาด)	11.54 บาท/กิโลกรัม
----------------------------	--------------------

เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง

หัวเตาแบบดั้งเดิม	มีค่าใช้จ่าย	$13.23 \times 11.54 = 152.67$ บาท
-------------------	--------------	-----------------------------------

หัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง	มีค่าใช้จ่าย	$5.64 \times 11.54 = 65.09$ บาท
--------------------------	--------------	---------------------------------

ค่าใช้จ่ายลดลง หัวเตาแบบดั้งเดิม - หัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง = 152.67-65.09 บาท
= 87.58 บาท

1 เดือนประหยัดค่าใช้จ่ายไป 2,627.40 บาท

จุดคุ้มทุนด้านการใช้เชื้อเพลิงของหัวเตาแก๊สประสิทธิภาพสูง = $5,500.00 / 2,627.40$

ระยะเวลาคืนทุนด้านเชื้อเพลิง 2 เดือน





ภาคผนวก ง

เผยแพร่ผลงานทางวิชาการ



บทความฉบับสมบูรณ์ใบรายงานการประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการ และประกวด
นวัตกรรมบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 1

“เกิดพระเกียรติวันแม่แห่งชาติ ผู้ความมั่นคง มั่งคั่ง ยั่งยืน”

1st National Graduate Research Conference and
Creative Innovation Competition



วันที่ 17-18 สิงหาคม 2560

ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติดิเอ็มเพรส โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่



บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ชั้น 1 อาคารเกษตรศาสตร์ถิตย์
63 หมู่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

โทร 0-5387-5520 Fax 0-5349-8133 E-mail : GCIC.MJU@gmail.com



การประเมินสมรรถนะแก๊สซิไฟเออร์เมื่อใช้หัวเตาเผาประสิทธิภาพสูง
Performance Evaluation of Gasifier with High Efficiency Furnace Burner

ภูวสิทธิ์ ธีรสุภานนท์, นิพนธ์ สมสงคร, ณัฐวุฒิ คูบุญดี และ สุวิวัฒน์ ธาตุทิพย์
P. Ditsuphannont, N. Homdoun, N. Dusaddee and C. Thararux

School of Renewable Energy, Mae Fah Luang University (Chiangrai), 65, Tumual Nong 5, San Amphoe, Sangkhari, Chiang Mai

*Corresponding author, e-mail: thangkha@fku.ac.th, Tel: 0-533-8194, Fax: 0-533-3184

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพหัวเตาเผา แก๊สซิไฟเออร์ ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การทดสอบประสิทธิภาพหัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ใช้อัตราส่วนอากาศต่อแก๊สซิไฟเออร์ในอัตราส่วน 1:1.2 โดยศึกษาเปรียบเทียบกับ หัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบ คังเพลิงและแบบโลหะ หัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นหัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบวัสดุหุพรุนใช้หลักการ การแผ่รังสีความร้อนเพิ่ม ให้กับหัวเตาเผา แก๊สซิไฟเออร์ โดย เตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบอากาศไหลลงใช้ประสิทธิภาพความร้อน 71.25% ที่ความเร็วลม 8 m/s ใช้ถ่านไม้ดำ ขนาด 25-30 มม. ค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 250-300 kg/m³ และค่าความร้อนสุทธิเพียง 28,000 kJ/kg ผลการศึกษพบว่าการใช้หัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบวัสดุหุพรุน ใช้ตัวกลางรังสีเพิ่ม ประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าหัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบคังเพลิงและแบบโลหะ คิดเป็น 13.93% และ 13.01% โดยหัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบวัสดุหุพรุนมีประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดที่ 22.44% โดยหัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์แบบคังเพลิงและแบบโลหะมีประสิทธิภาพความร้อน 14.63% และ 15.51%
คำสำคัญ: หัวเตาเผา แก๊สซิไฟเออร์ ประสิทธิภาพความร้อน ถ่านไม้ดำ

Abstract

This research aims to study the improvement of the efficiency of gas-fired biomass boiler. To be more effective Performance testing of gas-fired biomass furnaces has a 1:1.2 ratio of gas to biomass gas compared to conventional gas and biomass gas furnaces. The biomass gasifier is developed as a porous gas-fired biomass burner. Radiant heat is added to the biomass gasifier at 71.25% who speed is 8 m/s using 25-30 mm black charcoal. The average density is 250-300 kg/m³ and the heating value is 28,000 kJ/kg. The results showed that the use of porous gas biomass furnace Utilization rate of the rainy season was 13.93% and 13.01% respectively. Traditional and metallurgical gas has a thermal efficiency of 14.63% and 15.51% by the furnace gas biomass a porous material with a thermal efficiency of up to 22.44%.

Keywords: Burner, Gasifier, Thermal Efficiency, Longan Charcoal

บทนำ

จากสถานการณ์ของผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นได้แก่ผลกระทบทางอากาศและสิ่งแวดล้อม ซึ่งผลกระทบทางด้านสังคมและเศรษฐกิจ รวมถึงสุขภาพการคมนาคมทางท้องที่อย่าง ตัวอย่างที่บริเวณเมืองเชียงใหม่เป็นเมืองท่องเที่ยวระดับโลกและมีประชากรนับล้าน การพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืน จึงมีการรณรงค์ปลูกต้นไม้และขยายผลการอนุรักษ์สภาพแวดล้อม การส่งเสริมให้เกษตรกรในโลมีเข้ามาช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว แก๊สซิไฟเออร์ขึ้นเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพทางด้านความยั่งยืนสูงเป็นจำนวนมากเข้าสู่ระบบการผลิตไฟฟ้า และพลังงานจำนวนมากใช้จากแหล่งพลังงานที่สะอาดซึ่งช่วยลดการปล่อยในครัวเรือนลง อย่างไรก็ตามการนำเอาไปใช้ยังประสบกับข้อจำกัดหรือแก๊สซิไฟเออร์มาใช้ที่ประสบปัญหาในเรื่องราคาความหนาแน่น ค่างโดยแก๊สซิไฟเออร์ ชนิดคัง, 20550 พบจากตั้งงานที่ต่ำเกินไปประมาณ 5 kWh ในสภาพหัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์ที่ไม่ได้มีการศึกษาการลดปริมาณหัวเตาเผาแก๊สซิไฟเออร์มาใช้ปริมาณส่งผลให้ต้นทุนลดลงทำให้ใช้ค่าความยั่งยืนได้

ประสิทธิภาพ และต้นทุนการเลี้ยงสัตว์จะเพิ่มขึ้นตามกิโลกรัมของอาหารที่นำมาใช้ในไร่ ซึ่งเหมาะสมได้ผลลง Down draft Goster โดยต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเลี้ยงสัตว์ให้เกษตรกรได้มีอาหารจุกจิกสะดวกขึ้นในระยะเวลาที่สั้นและให้มีค่าความชื้นสูงขึ้น โดยจะพัฒนาชุดปรับแต่งอัตราส่วนผสมอาหารกับเมล็ด มีผลนำออกแบบหัวเคาน์ตามกิโลกรัมของผลผลิตของชุดปรับแต่งสูงเหนือสิ่งมาตรฐานความชื้น และอาหารที่ผสมเข้าไว้ ใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในรวมมูลสัตว์รวมโดยหัวเคาน์ที่ผสมนี้ไปใช้เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการที่มุ่งผลผลิตทางการเกษตร อ่างไร้อย่างไร หนานค้า และคณร, 2556) กล่าวว่าเป็นการส่งเสริมให้ตั้งต้นด้วยหัวเชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อให้มีการเผาไหม้แบบสมบูรณ์กว่า

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือวัสดุอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยมีประกอบด้วยไม้ตั้งรูปทรงทรงแปดเหลี่ยม 5 ส่วนได้แก่ เครื่องสูบลมไฟฟ้าซีเมนต์ 2 ลูก 2 ลูกสูบลมไฟฟ้าซีเมนต์ หัวเคาน์รวม หัวเคาน์รวม หัวเคาน์รวม หัวเคาน์รวม โดยรายละเอียดมีดังนี้

1.1 เครื่องสูบลมไฟฟ้าซีเมนต์

เครื่องสูบลมไฟฟ้าซีเมนต์ของยี่ห้อโซลาร์ (รวมหัว และคณร, 2554) ขนาดแบบชนิดไดรลง Down-draft Goster มีขนาดความยาว 1.7 เมตรได้ลำโง ด้านข้างเครื่องมีท่ออย่างท่อเหล็ก มีช่องเข้าไฟมีไฟสูง 6 เมตร โดยเครื่องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 cm ความสูงของหัวซีเมนต์เมื่อเทียบกับระบบของคณร 12.61 cm หัวซีเมนต์มีจำนวน 5 หัว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหัวซีเมนต์ 15 mm ด้านบนหัวเครื่องสูบลมไฟฟ้าซีเมนต์มีถังบรรจุน้ำมันดีเซลทั้งหมด 30 kg ประสิทธิภาพหัวซีเมนต์ 25% มีจุดตั้งของหัวเครื่องสูบลมไฟฟ้าซีเมนต์ที่สร้างขึ้นมาจากเหล็ก มีแกนเชื่อมความชื้นของหัวซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้ท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 cm เพื่อถ่ายโอนโคลนหัวซีเมนต์



ภาพ 1. เครื่องสูบลมไฟฟ้าซีเมนต์ของยี่ห้อโซลาร์ (Down-draft Goster)

1.2 ชุดหัวเคาน์สำหรับการทดลอง

หัวเคาน์ที่ใช้ทดลองมีทั้งหมด 4 ชนิด คือ หัวเคาน์ตามกิโลกรัมของเมล็ดสูงตั้ง หัวเคาน์ตามกิโลกรัมของเมล็ด ตั้งเดิม หัวเคาน์ตามกิโลกรัมของเมล็ดสูง และหัวเคาน์ตามกิโลกรัมของเมล็ด สูงสุดรวม ทั้งหมดความยาว 2.1 เมตรและหัวเคาน์ของหัวเคาน์ตามกิโลกรัม 4 ชนิด มีดังนี้

ชนิดหัวเคาน์ตามกิโลกรัมสูงตั้ง XB-5 หัวซีเมนต์ตามกิโลกรัมสูงตั้ง ยี่ห้อคณร (โซลาร์ และคณร, 2556) พบว่า ส่วนของโลหะหัวซีเมนต์ ยี่ห้อคณร หัวเคาน์ความยาว 12.7 cm มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกรวยหัวซีเมนต์ 27.94 cm มีผลต่อการปรับอัตราส่วนผสมเชื้อเพลิงในภาชนะหัวซีเมนต์ 4 kg หัวเคาน์สูงของหัวซีเมนต์รวม

ชนิดหัวเคาน์ตามกิโลกรัมของเมล็ดตั้งเดิม หัวเคาน์ตามกิโลกรัมไปทำจากเหล็ก หัวเคาน์ตามกิโลกรัมตามกิโลกรัม 14 cm รูปทรงกระบอก สูง 7.5 cm เหนือจากตรงกลาง 1 รูปร่างเป็น 4 รูปร่างจำนวน 6 รู 32 รู และ 32 รู โดยใช้เหล็กขนาดความหนา 0.25 mm เหนือหัวเคาน์ตามกิโลกรัมของเมล็ดตั้งเดิม การจุดติดไฟใช้จากหลอดไฟจากหัวเคาน์

ชนิดหัวเคาน์ตามกิโลกรัมของเมล็ดสูง หัวเคาน์ตามกิโลกรัมไปทำจาก ทองเหลือง หัวเคาน์ตามกิโลกรัมตามกิโลกรัม 12 cm พื้นผิวหัว เคาน์รูปทรงทรงแปดเหลี่ยม สูง 22 cm เหนือหัวเคาน์ตามกิโลกรัมของเมล็ด 3 รูรอบ หัวซีเมนต์ 6 รู 6 รู และ

30 กรัม โดยใช้ส่วนผสมมวล 0.25 กรัม เติมน้ำ วางในเครื่องอบแห้งที่อุณหภูมิในหม้อต้มไอน้ำในแบบตั้ง มีวาล์วปรับใช้ตามผลจากการศึกษาแล้ว อัตรา 1:1.2 ถอนเสี้ยนนำไปจุดตัดด้วยมีดตัด

ชนิดหัวขนาดเล็กแบบใช้เข็มกลัดแบบวีลคู่จุด ซึ่งใช้จากวัสดุ สแตนเลส และทอง (2550) พบว่าลักษณะโดยทั่วไปที่จาก เซรามิกมีรูปร่างเป็นวงรี มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 cm รูปทรงกระบอกทำจากเหล็ก สูง 10 cm หัวเสี้ยนแบบทองในในแบริลลอน มีวาล์วที่ใช้ใช้ลักษณะคล้ายกับมีด อัตรา 1:1.2 ถอนเสี้ยนนำไปจุดตัดโดยใช้มีดที่หัวท้ายที่หัวรูปร่างคล้ายหัวเข็มกลัดมีขนาดกว้าง 60 cm ยาว 60 cm สูง 70 cm มีปล่องระบายความร้อน



(A) หัวขนาดเล็กแบบวีลคู่จุด



(B) หัวขนาดเล็กแบบวีลคู่จุด



(C) หัวขนาดเล็กแบบวีลคู่จุด



(D) หัวขนาดเล็กแบบวีลคู่จุด

ภาพ 2 แสดงแบบหัวขนาดเล็ก

1.5 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบ

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย เครื่องไมโครเทอร์มัล (รุ่น BK-35) แบบพกพา สำหรับวัดอุณหภูมิในเตาเผา มีได้ (ELEMENT) เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 ซม. ความยาวของปลอกป้องกันได้ตั้งแต่ 200-1500 ซม. จุดจุดวัดใช้ตามจุดสูง 500 °C , 900 °C เครื่องไมโครเทอร์มัล (รุ่น BK-35) แบบพกพาจุดจุดอุณหภูมิใช้งาน 400 °C มีใช้ Ceramic เครื่องวัดอุณหภูมิ INFRARED THERMOMETER รุ่น GM3000 รุ่น BOMETECH สำหรับวัดอุณหภูมิระหว่าง -50 °C ถึง 420 °C เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล ขนาด 60 kg รุ่น DS-650 รุ่น MITSUBISHI ใช้กระแสไฟฟ้า 220 v

1.4 เชื้อเพลิงทดสอบ

เชื้อเพลิงชีวมวล (Homburg et al., 2015) แสดงให้เห็นว่า ถ่านไม้มีค่าเอนทัลปีผ่านศูนย์กลาง 25-30 ซม. จำนวน 30 kg ต่อชั่วโมงทดสอบ ค่าความหนาแน่น 250-300 kg/m³ ค่าความชื้นแฉะเฉลี่ย 20-25% (DM) 28,000 kJ/kg

2. วิธีดำเนินการทดสอบ

2.1 ทดสอบโดยหาประสิทธิภาพของเครื่องที่ใช้คือเครื่อง (PC) การทดสอบแบบที่ส่งต่อ ใช้หัวขนาดเล็ก KR-5 เพื่อจำแนกเปรียบเทียบและเปรียบเทียบเป็นต้นแบบสำหรับนำไปใช้พัฒนาเครื่องประเภทหัวขนาดเล็กที่ส่งต่อให้ดูรูปใน โดยใช้วิธีการทดสอบด้วยการต้ม (soiling test) การทดสอบใช้ปริมาณน้ำ 10 kg ซึ่งได้มาจากเครื่องชั่งน้ำหนัก 0.01 กรัม ขนาด 60 kg รุ่น DS-650 ใช้ได้มีข้อมูลทั้งหมด ติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิล (K-35, 12 K เซ็นเซอร์)

ซึ่งจุดจุดของรูมีรอบน้ำตั้งแต่เริ่มต้ม น้ำจวนถึงจุดเดือดที่น้ำเดือด โดยเก็บ ปริมาณของรูมีทุกๆ 5 นาที เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นทำการปิดภาชนะที่หมักหมมไว้ข้างเดิม เก็บเอาไว้ที่อุณหภูมิห้องและคำนวณประสิทธิภาพ

2.2 ทดสอบโดยหาประสิทธิภาพหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพแบบตั้งใหม่

ทำการทดสอบหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพโครงการสำหรับงานวิจัย แบบตั้ง ใหม่ ซึ่งโดย(ใช้ชุดอุปกรณ์ ผ่าตัด และ ครอบ, 2559) พบว่าสามารถผลิตไอร้อนหรือแก๊สได้แบบ ใช้แบบ Fixer Bed Gasifier หรือ Pack Bed Gasifier สามารถแบ่งออกตามลักษณะการไหลของไอร้อนหรือแก๊สได้แก่ ลักษณะไหลของDown-draft Gasifier แบบเป็นอากาศแบบไหลลง ประสิทธิภาพ 71.25% ใช้เชื้อเพลิงถ่านไม้ลำไย ขนาด 25-30 มม. น้ำหนัก 30 กรัม มีสัดส่วนแก๊สชีวภาพชีวภาพของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) 24% ไนโตรเจน(N₂) 12% มีเทน(CH₄) 1.1% ที่อุณหภูมิ 3 นาที เวลาเป็นเครื่อง 350 นาที ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง V_{fuel} = 4380 MJ/kg [20] ทำการควบคุมการผลิตไอร้อนหรือแก๊ส 4 กระบวนการ คือ 1) กระบวนการ Drying Zone ที่อุณหภูมิ 100-135 °C 2) กระบวนการ Pyrolysis Zone ที่อุณหภูมิ 200-300 °C 3) กระบวนการ Combustion Zone ที่อุณหภูมิ 1,100-1,500 °C 4) กระบวนการ Reduction Zone ที่อุณหภูมิ 200-300 °C โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแก๊ส (IR-35, IR, JR-35C, TK & JR-35, 12 K) ทำการทดสอบเครื่องใช้เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพได้จากปริมาณที่ถูกต้องซึ่งมีการรณรงค์ถึงงานวิจัยในลักษณะก่อนประมาณ 1 kg จากนั้นใช้ทำการต้ม เชื้อเพลิงในน้ำ, เตาเผา และเติมน้ำครั้งละ 1 ลิตร กิ่งไม้แห้งที่วางตามฝาปิด แล้วปิดฝาตรงช่องใส่เชื้อเพลิง แล้วทำการเปิดพัดลมเพื่อให้เกิดการดูดซับไอน้ำเป็นการสังเกตความผิดปกติการลุกไหม้ จากนั้นจึงใช้แก๊สชีวภาพ 10-15 นาที โดยเปิดวาล์วส่งก๊าซจากภาชนะที่ใช้โคลนกักเก็บของคาร์บอนหรือของบิวทิลแก๊ส เมื่อมีการดูดซับของแก๊สเชื้อเพลิงให้มีความชื้น และเปิดพัดลมพัดลม Lubric electronic YC-850AM ซีลิตราเวอร์ตม 3 3/8 โดยทำการเปลี่ยนแก๊สเชื้อเพลิงส่วนการ Cooling ส่งไปจุดผลิตไฟที่หัวเตาเพื่อทำการต้มน้ำ ทดสอบโดยคำนวณหาความร้อนของแก๊สชีวภาพ (cal/g) และ ปริมาณที่ผลิตจากการใช้แก๊สชีวภาพใช้ปิโตรเลียมเหลว(LPG) แก๊สชีวภาพ บิวทิลแก๊ส ตลอดจนการคำนวณหาปริมาณและระดับของของคาร์บอนหรือของบิวทิลแก๊สที่ผลิตออกมา การคำนวณการขึ้นเชื้อเพลิงให้เน้นไปด้านกระบวนการ Gasifier เป็นสำคัญที่สุดของผลและคำนวณประสิทธิภาพ

2.3. ทดสอบ โดยหาประสิทธิภาพหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพแบบไฮโดร

ทำการทดสอบหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพโครงการสำหรับงานวิจัยแบบไฮโดร ใช้หัตถ์เผาแก๊สชีวภาพแบบไฮโดร ทำการทดสอบความชื้นของแก๊สชีวภาพในหัวเตา 2.2 โดยหัตถ์เผาหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพแบบตั้งใหม่ ออก ผลิตแก๊สชีวภาพ ระหว่างอากาศและแก๊สชีวภาพ บิวทิลแก๊สส่วนเติม 1:1.2 แล้วนำแก๊สชีวภาพกับอากาศมาเผาไปจุดผลิตไฟทุกโหลที่หัวเตาเผาแก๊สชีวภาพแบบไฮโดร เพื่อทำการต้มน้ำ เก็บค่าบิวทิลแก๊สและคำนวณประสิทธิภาพ

2.4. ทดสอบ โดยหาประสิทธิภาพหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพแบบตั้งสุญญากาศ

ทำการทดสอบหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพโครงการสำหรับงานวิจัยแบบไฮโดร ใช้หัตถ์เผาแก๊สชีวภาพแบบตั้งสุญญากาศแบบอากาศหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพแบบตั้งใหม่ และไฮโดร ทำการทดสอบโดยหาประสิทธิภาพหัตถ์เผาแก๊สชีวภาพแบบตั้ง 2.3 แล้วนำแก๊สชีวภาพกับอากาศ บิวทิลแก๊สส่วนเติมแล้วจุดผลิตไฟทุกโหลที่หัวเตาเผาแก๊สชีวภาพแบบตั้งสุญญากาศต้มน้ำ เก็บค่าบิวทิลแก๊สและคำนวณประสิทธิภาพ

2.5. การวิเคราะห์หัตถ์ ๑.๑ ซึ่งโดย(นิกราน, สมยศ, และหัตถ์, 2559)พบว่า

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง คือ ส่วนของแก๊สชีวภาพต่อเวลา หาได้จากการหารดังต่อไปนี้

$$FC = \frac{M}{T} \quad (1)$$

เมื่อ FC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)

M คือ น้ำหนักเชื้อเพลิง (kg)

1 คือ เวลาที่ใช้ทั้งหมด (h)

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ คือ อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเชิงมวลต่อความร้อนที่ใช้ประโยชน์จากเวลา
 เครื่องยนต์ หรือ ได้จากสมการดังนี้

$$SFC = \frac{C}{Q} \tag{2}$$

เมื่อ SFC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ(kg/kWh)
 Q คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ (kJ)

อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ คือ อัตราส่วนของผลคูณอัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงกับค่าความร้อนจำเพาะ
 ตามมีค่าโดย 28,000 kJ (14) ต่อปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์ หรือได้จากสมการดังนี้

$$SEC = \frac{C \times LHV}{Q} \tag{3}$$

เมื่อ SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของระบบ
 ประสิทธิภาพความร้อนในการผสมใช้วิธีการดังนี้ หรือได้จากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{(m_{wi} \times C_p (T_{wb} - T_{wi}) - (m_{we} \times h_g))}{m_{fuel} \times LHV_{fuel}} \times 100 \tag{4}$$

เมื่อ η คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ (%)

m_{wi} คือ มวลน้ำที่ระเหย (g)

m_{we} คือ มวลน้ำที่ระเหย (g)

C_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.185 J/kg °C

h_g คือ ค่าความร้อนแฝงของน้ำมีค่า 2,257 kJ/kg

LHV_{fuel} คือ ค่าความร้อนต่อมวลของน้ำมันมีค่าโดย 28,000 kJ/kg (14)

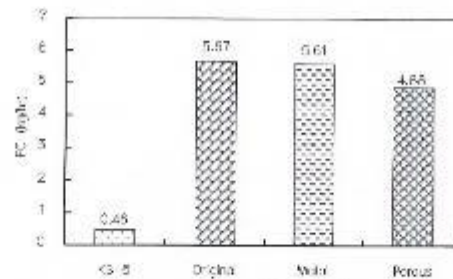
T_{wi} คือ อุณหภูมิที่เริ่มตั้ง (°C)

T_{wb} คือ อุณหภูมิจุดเดือดของน้ำ (°C)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

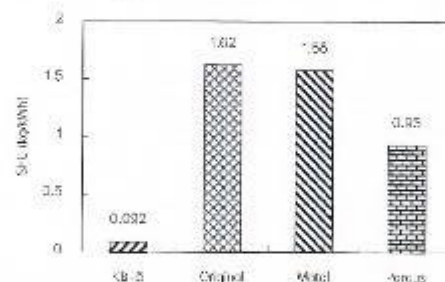
1. อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ตั้งแต่ระดับความสูง 3 เมตรถึงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของ ดีเซลเบา
 เกือบเป็น 2 เท่าของดีเซลแบบเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดา ผลการวิจัยการผสมผสานการใช้ความร้อนจากเตา 3 ชั้นร่วมกับเครื่องยนต์ดีเซล
 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง ค่าค่าที่ ดีเซลเบาและดีเซลธรรมดาแบบดั้งเดิมและระบบไฮบริดเป็น 13.95 % และ 13.01 %
 ตามลำดับ ส่วนค่าเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดาใช้สำหรับเชื้อเพลิงที่เข้าเครื่องยนต์ มีค่าเท่ากับ 13.01% และมีการ
 คิดถึงปัจจัยอัตราส่วนผสมอากาศกับเชื้อเพลิงที่การเผาไหม้ที่สมบูรณ์แบบดีเซลเบาและดีเซลธรรมดา และมีการ
 ปรับลดระดับค่าสิ่งเหล่านี้ ค่าที่ขึ้นแบบกับค่าเฉลี่ยที่ดูจาก KB-3 ที่มีอัตราการสิ้นเปลืองที่ต่ำกว่า มีการพัฒนา
 เครื่องยนต์และเครื่องยนต์ไฮบริด เพื่อใช้ในการสูบลูกสูบจากเครื่องยนต์ดีเซล ทำให้ระยะเวลาการตั้งน้ำมัน ส่งผลให้มีการ
 ใช้เชื้อเพลิงอย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยอัตราใช้เชื้อเพลิงเชิงมวลที่ค่าเป็นแนวทางการศึกษาวิจัยด้านเชื้อเพลิงมีแนวโน้มไปใช้
 ตาม

ผลการศึกษารายงานและผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณครั้งที่ 1
 1. Netino Graduate Record, Performance and Creative Index on Competition
 วันที่ 17-19 สิงหาคม 2560 โรงเรียนจิตรลดา กรุงเทพมหานคร



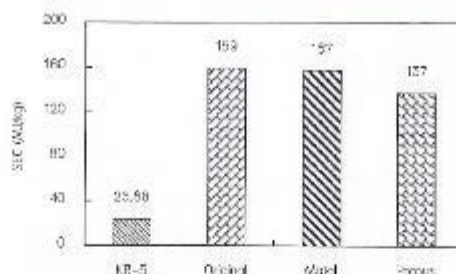
ภาพ 3 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

2. อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ ดังแสดงตามภาพ 4 โดยผลจากการใช้หัวเผาแบบใช้ชีวมวลแบบวัสดุพูน ใช้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ มีค่าเท่ากับค่าเผาแก๊สชีวภาพแบบกึ่งเต็มและแบบไฮโดร ออกไซด์ ตามเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาแก๊สสูงคั้น KB-5 หัวเผาแบบใช้ชีวมวลแบบวัสดุพูน รวมถึงมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ สูงกว่า โดยอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ 0.092 kg/kWh ในขณะที่หัวเผาแก๊สสูงคั้น KB-5 มีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ 0.092 kg/kWh



ภาพ 4 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (SFC)

3. อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ดังแสดงตามภาพ 5 แสดงอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะการใช้หัวเผาแบบใช้ชีวมวลแบบวัสดุพูนมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ เท่ากับหัวเผาแก๊สชีวภาพแบบกึ่งเต็มและแบบไฮโดร เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาแก๊สสูงคั้น KB-5 หัวเผาแบบใช้ชีวมวลแบบวัสดุพูนมีอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะมากกว่า 5.7 เท่า

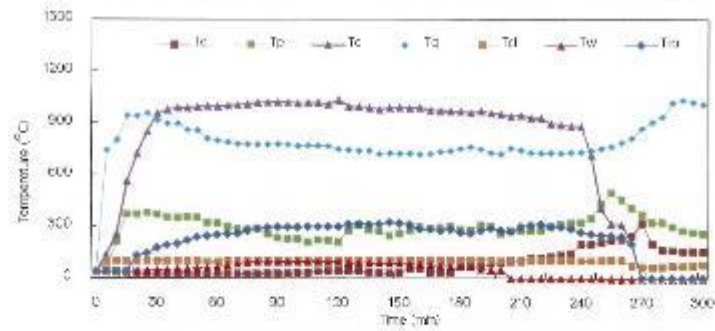


ภาพ 5 แสดงอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC)

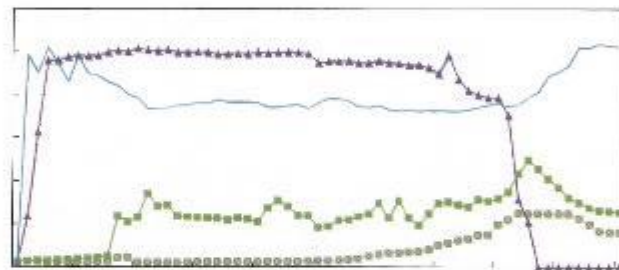
4. อุณหภูมิกระบวนการผลิตในรีเวิร์เซอร์มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน Down-stott Gullier จนถึงจุดใดตัวใดโดยใช้อุณหภูมิค่าใดเป็นเกณฑ์ และอุณหภูมิภายในของเตาซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิการสลายโปรตีนของเมล็ด 4 โคน คือ โซนอบแห้ง (Drying Zone) โซนถดถอย (Devoliation Zone) หรือ โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) โซนเผาไหม้ (Combustion Zone) และ โซนรีดักชัน (Reduction Zone) ดังนี้

โซนอบแห้ง (Drying Zone) อุณหภูมิที่เริ่มแห้งหรือความชื้น (Mo) อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 100 – 135°C และสูงขึ้นไปเมื่อเปียกทั้งหมด เข้าสู่โซนถดถอย (Devoliation Zone) หรือ โซนไพโรไลซิส (Pyrolysis Zone) ซึ่งเกิดขึ้นจะถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการที่อุณหภูมิที่ไม่ใช่ไฮดรอลิเซนส์ (To) อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 200 – 600°C และระดับของเมล็ดที่เริ่มมีเชื้อเพลิงสูงและลดลงเมื่อเชื้อเพลิงเริ่มหมด เข้าสู่โซนเผาไหม้ (Combustion zone) เป็นโซนที่เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้หรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (TC) ซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากไฮโดรคาร์บอนและคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 1,100 – 1,500 °C โซนสุดท้ายคือโซนรีดักชัน (Reduction Zone) เป็นโซนที่ลดปริมาณสิ่งคงเหลือหรือสลายตัวไป ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์และไฮโดรเจนและมีความ อุณหภูมิโซนนี้จะอยู่ในช่วง 600 – 900 °C ด้วยอุณหภูมิที่สูง ต้องผ่านการลดอุณหภูมิ (TR) เพื่อลดการสลายตัวของเมล็ดและความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ตรงจุดเมล็ดที่ 3-4 กิ่ง ด้วยเมล็ดที่ได้มีความชื้นค่าอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 90 – 110 °C ทั้งนี้อุณหภูมิบรรดาภาค (TR) จำนวนที่ลดลงของอุณหภูมิด้วย และค่าเชื้อเพลิงที่ไปจุดติดจุดใหม่ก็เกิดความชื้นทำให้มีอุณหภูมิที่ต่ำ (TR) ทั้งสองภาพภาค 6 ภาพ 7 และภาพ 8 ซึ่งแสดงอุณหภูมิการต้ม น้ำของทั้งสามครั้งจะเพิ่ม จากการคิดหาผลรวมค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตโปรตีนของเมล็ด อุณหภูมิจะสูงขึ้นและมีอุณหภูมิคงที่เสถียร และมีผลต่อค่าของโปรตีนที่ได้นั่นเอง ซึ่งการอุณหภูมิกระบวนการผลิตในรีเวิร์เซอร์มีผลต่อทั้ง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และแบบจำลองที่อุณหภูมิไม่แน่นอน ด้วยทั้งสามแบบจำลองแบบจำลองที่สามจากตารางที่ 1 ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้ของอุณหภูมิแปรผันหรือตัวแปรที่ 212 °C มีผลต่อทั้งสามแบบจำลองแบบจำลองที่มีอุณหภูมิแปรผันหรือตัวแปรที่ 260 °C และแบบจำลองที่มีอุณหภูมิแปรผันหรือตัวแปรที่ 297 °C

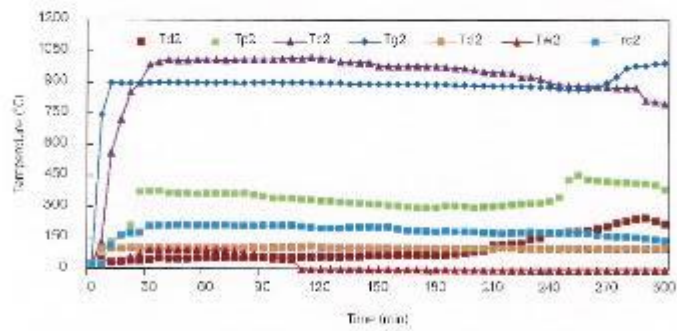
การประชุมวิชาการและงานนิทรรศการงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 1
 1st National Graduate Research Conference and Creative Innovation Competition
 วันที่ 17-18 ตุลาคม 2560 วิทยาลัยนานาชาติ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพ 6 แสดงอุณหภูมิการต้มน้ำที่ใช้หั่นกาแฟที่อุณหภูมิแตกต่างกัน และเมื่อถึงถึงกำหนดให้จุ่ม



ภาพ 7 แสดงอุณหภูมิการต้มน้ำที่ใช้หั่นกาแฟที่อุณหภูมิแบบไล่ระดับขึ้นลงตามลำดับ



ภาพ 8 แสดงอุณหภูมิการต้มน้ำที่ใช้หั่นกาแฟที่อุณหภูมิแบบไล่ระดับขึ้นลงตามลำดับ

5. ประสิทธิภาพการสกัดกาแฟของเครื่องชงกาแฟแบบดริปสกรู Down-drip Coffee ที่ใช้หั่นกาแฟที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
 ผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการสกัดกาแฟของเครื่องชงกาแฟแบบดริปสกรูที่ใช้หั่นกาแฟที่อุณหภูมิแตกต่างกัน
 ได้ประสิทธิภาพการสกัดกาแฟสูงสุด 22.4% และหั่นกาแฟที่อุณหภูมิแบบไล่ระดับขึ้นลงตามลำดับ

- บุษยา ไชยชนะ, พงศกร ชื่นชม, ธาณี และณิชา ทอดรมณี, 2556. การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาฟุ้งดิน
 ชนิดสวิตช์เฟือง. วิศวกรรมเครื่องกลเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
 ภิรมย์ราชมงคล, เบ็ญจบุรี, สุพรรณบุรี, จังหวัดสุพรรณบุรีและคณะ, 2552.ศึกษาการเสียดสีของลูกกลิ้งและตัว
 ลวดที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องฟอกยาสีฟันงานแม่พิมพ์ประเทศไทย ครั้งที่ 6
 มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิจิตร, 23 มกราคม-12 กุมภาพันธ์ 2552 .
- นิวัฒน์ วัฒนพงษ์, กิตติกร สาธุจิตต์และณัฐวุฒิ สุขขี, สภวกรรมการเครื่องกลปัจจุบันนี้ การทดสอบเมื่อใช้พลังงานซึ่งมาจกเป็น
 เครื่องยนต์ การปรับปรุงประสิทธิภาพของพลังงาน ความร้อนและของเสียในกรณีด้านกลไกของเครื่องจักรและระบบ
 ครั้งที่ 10 โครงการวิจัยโดยกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ 11-12 มีนาคม 2554
- นิพนธ์พร พานานนท์, นิวัฒน์ วัฒนพงษ์, กิตติกร สาธุจิตต์, ณัฐวุฒิ สุขขี, อิศริณีวัฒน์ อิศริณีวัฒน์, การประเมินสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล
 เครื่องแบบโหลตเมื่อใช้เชื้อเพลิงจากวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตรของเครื่องยนต์ดีเซลที่ปรับปรุงประสิทธิภาพ
 ของเครื่องยนต์ของประเทศไทยครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วันที่ 4-6 พฤศจิกายน
 2555
- กาญจนาพร วัฒนสิทธิ์, 2555. การออกแบบและทดสอบภาคตัดท้ายของเครื่องยนต์โหลต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
 ภิรมย์ราชมงคล, 2555. โครงการวิจัย สหภาพยานยนต์ประเทศไทยและกรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
 ภาควิชาวิศวกรรม.
- สาวิตรี จิวบุญสุข และสาวิตรี เพ็ญสุข, 2550. พฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวเผาโหลต. การประชุมวิชาการ
 ครั้งที่ 4 ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศไทยครั้งที่ 21 จังหวัดชลบุรี วันที่ 17-19 ตุลาคม 2550
- อภิสิทธิ์ พรหมสอน และณัฐ สุวีริยาสุข, 2555. การทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาฟุ้งดินประสิทธิภาพสูง
 เมื่อจำนวนและทิศทางลม มีผลผ่านตัวนำกลางของรังสีถึงบน ล้อขึ้นไป. การประชุมวิชาการเครื่องฟอกยาสีฟัน
 วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 25 จังหวัดฉะเชิงเทรา วันที่ 24-27 ตุลาคม 2555
- Homburg, Tippawong and Dusakko 2015. Performance and emissions of a modified small engine operated
 on producer gas Energy Conversion and Management, 2015

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายภูวติท ดิษฐสุภามาศ	
เกิดเมื่อ	6 มิถุนายน พ.ศ.2513	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2537	วิศวกรรมบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา เครื่องกล มหาวิทยาลัยสยาม
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2537-2538	วิศวกรอาวุโส บริษัท แฟนชีวิวด อินดัสตรีส จำกัด (มหาชน)
	พ.ศ. 2541-2551	วิศวกรอาวุโส บริษัท เทลคอมเอเชียคอร์ปอเรชั่น จำกัด (มหาชน)
	พ.ศ. 2551-2552	Project Manager บริษัท แม่วังดิจิตอล จำกัด
	พ.ศ. 2553-ปัจจุบัน	หุ้นส่วนผู้จัดการ ห้างหุ้นส่วน ยู แคร้ ทีม