

การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง  
สำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2562

การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง  
สำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง  
สำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร

วิลาวัลย์ คุ่มเหม

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐภูมิ ดุษฎี)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สำหรับ วิสาหกิจแปรรูปอาหาร
ชื่อผู้เขียน	นางสาววิลาวัลย์ คุ่มเหม
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อออกแบบ พัฒนาและประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร การศึกษาเริ่มจากการออกแบบคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของห้องเผาไหม้ และปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้เหมาะสมกับการใช้งาน เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ชังข้าวโพด และชังข้าวโพดอัดเม็ด เตาชีวมวลใช้หลักการการเผาไหม้ตรง ทำการทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำ ทดสอบหาสมรรถนะเตาชีวมวลโดยการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนี้ การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว (primary air) และการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้สองทาง (secondary air) มีชุดเติมอากาศ 2 ช่อง คือ ส่วนผสมอากาศเพื่อการเผาไหม้และป้อนอากาศส่วนเกินที่เหมาะสม ใช้เกลียวสกรูลำเลียงชังข้าวโพดและชังข้าวโพดอัดเม็ดได้อย่างต่อเนื่อง ผลการศึกษาและออกแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของห้องเผาไหม้ คือ 40 cm และ 55 cm ตามลำดับ ห้องเผาไหม้มีลักษณะแบบทรงกรวย การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวล พบว่า มีอัตราการความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชังข้าวโพดและชังข้าวโพดอัดเม็ด 8.5 kg/h และ 6.15 kg/h ตามลำดับ การใช้ชังข้าวโพด ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.490 มีประสิทธิภาพสูงสุด 36.21 % เมื่อทำการป้อนอากาศที่ช่อง secondary air ที่ 10 % มีประสิทธิภาพเท่ากับ 39.34% และชังข้าวโพดอัดเม็ด อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 6.885 มีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 36.31 % เมื่อทำการป้อนอากาศที่ช่อง secondary air ที่ 10 % มีประสิทธิภาพเท่ากับ 39.06% คิดเป็นประสิทธิภาพจากการป้อนอากาศ secondary air เพิ่มขึ้น 7.57-8.64 % โดยมีอัตราส่วนสมมูล เท่ากับ 1.19 สามารถผลิตพลังงานความร้อนเฉลี่ยได้ 13.80 kW การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์การคั่วพริกภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ผลการประเมินลักษณะสีของพริกคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องและพริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน จากการทดลองมีลักษณะสีที่อยู่ในกลุ่มเฉดสีเดียวกัน คือ Greyed-orange 173 และ Greyed-Red 178 โดยส่วนใหญ่แล้วพบว่าลักษณะสีมีกลุ่มสีเดียวกัน และเฉดสีมีความใกล้เคียงกัน การประเมินคุณภาพพริกคั่วด้วยประสาทสัมผัส (sensory evaluation) โดยการสำรวจ

จากกลุ่มวิสาหกิจชุมชน การทดสอบการยอมรับจากวิสาหกิจชุมชนอยู่ในระดับพึงพอใจมาก ซึ่งมีคะแนนโดยรวมต่อคุณลักษณะที่ปรากฏ สี และการยอมรับโดยรวมแตกต่างกันทางสถิติ ( $P \geq 0.05$ ) คือ 3.70 3.60 และ 4.00 คะแนน ตามลำดับ ในด้านเศรษฐศาสตร์การใช้งานเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร การใช้ซังข้าวโพด ให้ผลประหยัดค่าใช้จ่ายต่อปีเฉลี่ย 12,231 บาท/ปี และระยะเวลาคืนทุน 2.45 ปี โดยมีค่าผลตอบแทนสุทธิ (NPV) 50,251.85 บาท และมีค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 39 % จากผลการทดสอบที่ได้ เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสามารถนำไปใช้และเผยแพร่ให้กับกลุ่มเกษตรกรชุมชนและวิสาหกิจชุมชนได้

คำสำคัญ : เตาชีวมวล, ซังข้าวโพด, ชีวมวลอัดเม็ด, การป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง



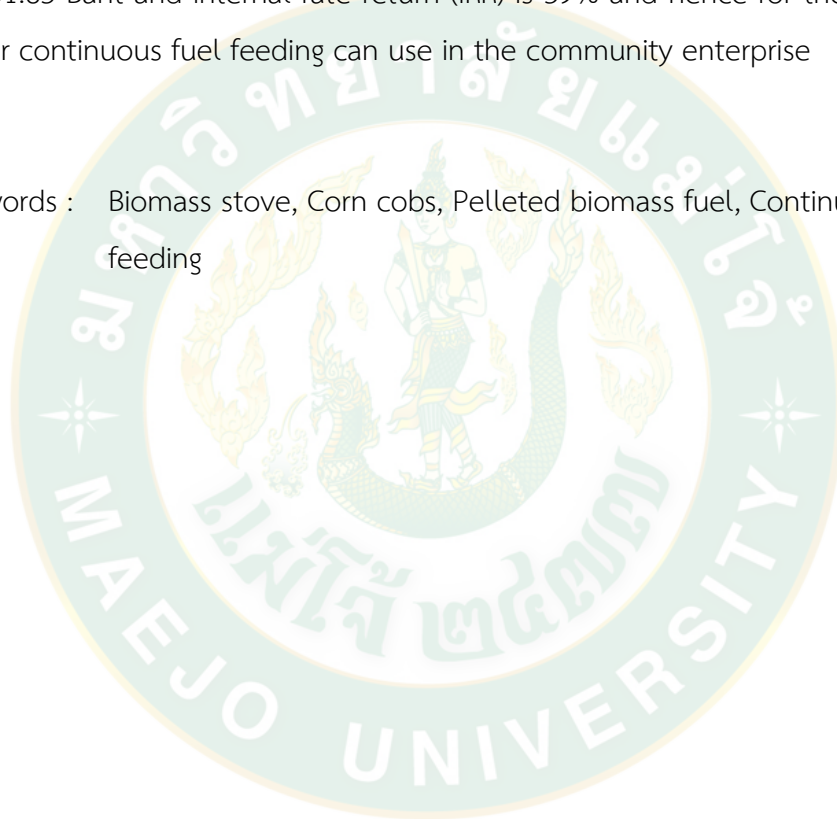
<b>Title</b>	ENHANCEMENT EFFICIENCY OF BIOMASS STOVES UNDER CONTINUOUS FUELFEEDING FOR PROCESSING ENTERPRISE
<b>Author</b>	Miss Wilawan Khumhem
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Natthawud Dussadee

### ABSTRACT

This research aims to design, develop and evaluate performance of biomass stove under continuous fuel feeding for processing enterprise. Combustion chamber dimensions, diameter and height of stove and appropriate air usage calculation are the starting point of this study. The biomass stove is a direct combustion stove. Biomass fuels used in this study are corncobs and pelleted corncobs, and the stove was tested using boiling water. Biomass stove performance evaluation air feeding to calculate, primary air and secondary air was used. There are two feeders into stove, direct to combustion and appropriate additional air. Fuel feeder is a screw conveyor for a continuously transfer of fuels. The result shows appropriate design for combustion chamber diameter and height of biomass stove under continuous fuel feeding are 40 cm and 55 cm, respectively and are funnel-shaped. Biomass stove performance test shows 8.5% and 6.15% of fuel consumption rate, using corncobs and pelleted corncobs respectively. By using corncobs with 7.490 air to fuel ratio shows highest performance at 36.21%, with feeding additional air to secondary air feeder another 10% performance increasing to 39.34%. For pelleted corncobs, with 6.885 air to fuel ratio, highest performance is 36.31% and increases to 39.06% by feeding additional air 10%. It shows that stove efficiency increased 7.57-8.64% by feeding additional air, with 1.19 equivalent ratio and average thermal energy production ability is 13.80 kW. Production quality analysis after completing the process for roasted chilis by comparing color from experimented

product and community enterprise product, result showed greyed-orange 173 and greyed-red 178, respectively, which are in the same color shading. Sensory evaluation by community enterprise survey, resulted in very satisfied level. The overall evaluation scores for appearance, color and statistically different acceptance ( $P>0.05$ ), are 3.70, 3.60 and 4.00, respectively. Economically, biomass stove under continuous fuel feeding for processing enterprise using corncobs can reduce average cost 12,231 Baht/year, payback period is 2.45 year, net present value (NPV) is 50,251.85 Baht and internal rate return (IRR) is 39% and hence for the biomass stove under continuous fuel feeding can use in the community enterprise

Keywords : Biomass stove, Corn cobs, Pelleted biomass fuel, Continuous fuel feeding



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิรินุช จินดารักษ์ ซึ่งให้เกียรติเป็นประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำปรึกษา และแนะนำแก้ไขปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ดุษฎี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และกรุณาให้ความรู้คำแนะนำต่างๆ รวมถึงคำปรึกษา ตลอดจนให้ความดูแล และเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์นี้ เสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชูรัตน์ ธารารักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ รวมถึงตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ใน "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงาน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับ บัณฑิตศึกษา" ครั้งนี้

ขอขอบคุณ "ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561" ที่ให้ทุนอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ นายพงศ์สถิตย์ ศรีภักดี ที่มอบคำแนะนำและ ความช่วยเหลือในการจัดสร้างเตา ชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง และ ขอขอบคุณคณาจารย์ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ทุกท่านที่ได้ประศาสน์ วิชาความรู้ ตลอดจนบุคลากร เจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้ คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย จนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

วิลาวัลย์ คุ่มเหม



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
สารบัญตารางผนวก.....	ฒ
สารบัญภาพผนวก.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มา.....	1
วัตถุประสงค์.....	4
ขอบเขตการศึกษา.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและตรวจสอบเอกสาร.....	5
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
เชื้อเพลิง.....	5
ชีวมวล.....	6
การเผาไหม้เชื้อเพลิงเบื้องต้น.....	12
สถานะที่จำเป็นในการเริ่มทำปฏิกิริยา.....	15
กระบวนการเผาไหม้.....	15
การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	20

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการเตาชีวมวล ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	29
การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ .....	33
การตรวจสอบเอกสาร .....	35
บทที่ 3 อุปกรณ์และการดำเนินงานวิจัย .....	40
เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง .....	40
เชื้อเพลิงชีวมวลและการเตรียมเชื้อเพลิง .....	46
เครื่องเทศสำหรับการใช้ในการทดสอบ .....	49
วิธีการดำเนินการวิจัย .....	50
บทที่ 4 การออกแบบและสร้างระบบเตาชีวมวล ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	58
การคำนวณการออกแบบระบบเตาชีวมวล ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	58
การสร้างระบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	65
บทที่ 5 ผลและการอภิปรายผล .....	70
การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง สำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร .....	70
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะเตาชีวมวล ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ....	82
วิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ ของเตาชีวมวลชนิดป้อนต่อเนื่อง .....	84
การทดลองการคั่วพริกกับวิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหาร .....	85
การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์พริกคั่วภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ .....	90
การประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์การใช้เตาชีวมวล ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง	93
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ .....	96
บรรณานุกรม .....	98
ภาคผนวก .....	102
ภาคผนวก ก แบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	103
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ชีวมวล .....	124
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ .....	129

ภาคผนวก ง ข้อมูลจากการทดสอบ.....	141
ภาคผนวก จ ตัวอย่างแบบประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์.....	150
ภาคผนวก ฉ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	153
ประวัติผู้วิจัย.....	172



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล.....	14
ตารางที่ 2 องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการสันดาป .....	16
ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซังข้าวโพดอัดเม็ด .....	47
ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพดอัดเม็ด .....	47
ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซังข้าวโพด .....	48
ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด .....	49
ตารางที่ 7 เงื่อนไขการใช้งานเตาก๊าซหุงต้มของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหาร.....	59
ตารางที่ 8 เงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	59
ตารางที่ 9 สรุปขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	65
ตารางที่ 10 เงื่อนไขการทดลองคั่วพริกในวิสาหกิจชุมชน .....	86
ตารางที่ 11 ผลการคั่วพริกโดยใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง.....	87
ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยด้านความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์พริกคั่ว (n=10).....	91
ตารางที่ 13 การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชนและผลิตภัณฑ์พริกคั่วที่ได้จากการทดลอง.....	92
ตารางที่ 14 เงื่อนไขการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการคั่วพริก .....	94
ตารางที่ 15 สรุปผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง.....	95

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ความต้องการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศไทย เดือนมกราคม – มิถุนายน ปี 2562...	1
ภาพที่ 2 สัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม (Energy Intensity).....	2
ภาพที่ 3 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ .....	15
ภาพที่ 4 ขั้นตอนการระเหยไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิง .....	21
ภาพที่ 5 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง.....	23
ภาพที่ 6 ตัวอย่างเตาถ่านไม้ และเตาฟืนให้ความอบอุ่น.....	24
ภาพที่ 7 Stoker Furnace.....	25
ภาพที่ 8 ตัวอย่างเตาแบบไหลลง.....	26
ภาพที่ 9 ตัวอย่างระบบเตาเผาไหม้แฉวนลอย .....	26
ภาพที่ 10 เตาเผาแกลบแบบเชื้อเพลิงแฉวนลอย .....	27
ภาพที่ 11 เตาแบบชั้นของไหล .....	28
ภาพที่ 12 Kawasaki Fluidized Bed Gasification and Melting System .....	28
ภาพที่ 13 สมดุลมวลของกระบวนการเผาไหม้ .....	30
ภาพที่ 14 ไดอะแกรมการทำงานของเตาชีวมวลขนาด 20 kW.....	36
ภาพที่ 15 ไดอะแกรมของเตาชีวมวลขนาด 5 kW.....	37
ภาพที่ 16 ไดอะแกรมออกแบบเตาชีวมวล .....	38
ภาพที่ 17 เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	41
ภาพที่ 18 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K.....	41
ภาพที่ 19 เครื่องบันทึกข้อมูล.....	42
ภาพที่ 20 ไดอะแกรมจุดวัดอุณหภูมิในการทดลอง.....	42
ภาพที่ 21 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด .....	43

ภาพที่ 22 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น .....	43
ภาพที่ 23 เครื่องชั่งน้ำหนัก .....	44
ภาพที่ 24 พัดลมป้อนอากาศ.....	44
ภาพที่ 25 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด .....	45
ภาพที่ 26 เครื่องตรวจวัดกระแสไฟฟ้า .....	45
ภาพที่ 27 คู่มือเทียบสี RHS colour chart.....	46
ภาพที่ 28 ชั่งข้าวโพดอัดเม็ด .....	47
ภาพที่ 29 เชื้อเพลิงชั่งข้าวโพด.....	48
ภาพที่ 30 เครื่องเทศหลักที่ใช้ในวิสาหกิจชุมชน .....	50
ภาพที่ 31 ผลิตภัณฑ์พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน .....	50
ภาพที่ 32 ภาพรวมการดำเนินการวิจัย.....	51
ภาพที่ 33 รายละเอียดวิธีการและขั้นตอนการทดสอบเตาชีวมวล .....	54
ภาพที่ 34 เตาก๊าซหุงต้มของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน .....	55
ภาพที่ 35 การคั่วพริกด้วยเตาก๊าซหุงต้มของวิสาหกิจชุมชน .....	57
ภาพที่ 36 การคั่วพริกโดยใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	57
ภาพที่ 37 ไดอะแกรมการออกแบบเตาชีวมวล .....	60
ภาพที่ 38 เตาชีวมวลทรงกระบอกชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	66
ภาพที่ 39 ลักษณะห้องเผาไหม้เตาชีวมวล.....	66
ภาพที่ 40 การเติมอากาศเข้าห้องเผาไหม้.....	67
ภาพที่ 41 ทิศทางการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้.....	67
ภาพที่ 42 สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง .....	68
ภาพที่ 43 การประกอบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง .....	69
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชั่งข้าวโพดและประสิทธิภาพทางความร้อน .....	71
ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์อัตราการป้อนเชื้อเพลิงชั่งข้าวโพดอัดเม็ดและประสิทธิภาพทางความร้อน .....	72

ภาพที่ 46 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของซังข้าวโพดต่อประสิทธิภาพทางความร้อน .....	73
ภาพที่ 47 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของซังข้าวโพดอัดเม็ดต่อประสิทธิภาพทางความร้อน .....	74
ภาพที่ 48 ระยะเวลาและอุณหภูมิในการเดือดของน้ำ กรณีใช้ซังข้าวโพด .....	75
ภาพที่ 49 ระยะเวลาและอุณหภูมิการเดือดของน้ำ กรณีใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด .....	76
ภาพที่ 50 อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดภายในเตาชีวมวล .....	77
ภาพที่ 51 อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดภายในเตาชีวมวล.....	77
ภาพที่ 52 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลกรณีใช้ซังข้าวโพด เมื่อป้อนอากาศสองทาง.....	78
ภาพที่ 53 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลกรณีใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด เมื่อป้อนอากาศสองทาง .....	79
ภาพที่ 54 ระยะเวลาในการเดือดของน้ำกรณีใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง เมื่อป้อนอากาศสองทาง ..	80
ภาพที่ 55 ระยะเวลาในการเดือดของน้ำกรณีใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด เมื่อป้อนอากาศสองทาง .....	80
ภาพที่ 56 อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดภายในเตาชีวมวล เมื่อป้อนอากาศสองทาง .....	81
ภาพที่ 57 อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดภายในเตาชีวมวล เมื่อป้อนอากาศสองทาง .....	82
ภาพที่ 58 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเตาชีวมวลชนิดป้อนต่อเนื่อง .....	83
ภาพที่ 59 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาชีวมวลชนิดป้อนต่อเนื่อง .....	84
ภาพที่ 60 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ .....	85
ภาพที่ 61 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม.....	88
ภาพที่ 62 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานของเตาชีวมวลเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม .....	88
ภาพที่ 63 ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องกับเตาก๊าซหุงต้ม .....	89
ภาพที่ 64 ต้นทุนการผลิตพริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน.....	90

## สารบัญตารางผนวก

	หน้า
ตารางผนวกที่ 1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงซังข้าวโพด.....	130
ตารางผนวกที่ 2 สรุปลัทธิสารส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ของซังข้าวโพด $6.256 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ .....	132
ตารางผนวกที่ 3 สรุปลัทธิความต้องการออกซิเจนในการเผาไหม้ซังข้าวโพด 1 kg.....	133
ตารางผนวกที่ 4 สรุปลัทธิปริมาณของสารต่าง ๆ ในแก๊สไอเสียภายหลังการเผาไหม้ซังข้าวโพด 1 kg...	135
ตารางผนวกที่ 5 ปริมาตรขององค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg ....	136
ตารางผนวกที่ 6 องค์ประกอบเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด .....	139
ตารางผนวกที่ 7 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) $A/F = 4.316$ .....	142
ตารางผนวกที่ 8 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) $A/F = 5.172$ .....	143
ตารางผนวกที่ 9 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) $A/F = 6.051$ .....	144
ตารางผนวกที่ 10 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) $A/F = 6.885$ .....	145
ตารางผนวกที่ 11 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) $A/F = 7.741$ .....	146
ตารางผนวกที่ 12 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้สองทาง Secondary air ( $v_2$ ) 10%.....	147
ตารางผนวกที่ 13 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้สองทาง Secondary air ( $v_2$ ) 30%.....	148
ตารางผนวกที่ 14 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้สองทาง Secondary air ( $v_2$ ) 50%.....	149



## สารบัญภาพผนวก

	หน้า
ภาพผนวกที่ 1 แบบแสดงภาพ Isometric .....	104
ภาพผนวกที่ 2 แบบแสดงด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของเตาชีวมวล .....	105
ภาพผนวกที่ 3 แบบแสดงด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของเตาชีวมวล .....	106
ภาพผนวกที่ 4 แบบแสดงภาพ Isometric ห้องเผาไหม้ .....	107
ภาพผนวกที่ 5 แบบแสดงห้องเผาไหม้ .....	108
ภาพผนวกที่ 6 แบบแสดงระบบป้อนอากาศ .....	109
ภาพผนวกที่ 7 แบบแสดงระบบลำเลียงเชื้อเพลิง .....	110
ภาพผนวกที่ 8 แบบแสดงเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง .....	111
ภาพผนวกที่ 9 แบบแสดงบริเวณด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนห้องเผาไหม้ .....	112
ภาพผนวกที่ 10 แบบแสดงโครงสร้างเตาชีวมวล .....	113
ภาพผนวกที่ 11 แบบแสดงบริเวณด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของโครงสร้างเตาชีวมวล .....	114
ภาพผนวกที่ 12 แบบแสดงโซนเผาไหม้ที่ 1 .....	115
ภาพผนวกที่ 13 แบบแสดงโซนเผาไหม้ที่ 2 .....	116
ภาพผนวกที่ 14 แบบแสดงภาพ Isometric สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง .....	117
ภาพผนวกที่ 15 แบบแสดงด้านหน้า ด้านบน และด้านข้างของสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง .....	118
ภาพผนวกที่ 16 แบบแสดงช่องดูดเขม่า .....	119
ภาพผนวกที่ 17 แบบแสดงฝาปิดช่องดูดเขม่า .....	120
ภาพผนวกที่ 18 แบบแสดงประตูเตาชีวมวล .....	121
ภาพผนวกที่ 19 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนเสื้อของห้องเผาไหม้ .....	122
ภาพผนวกที่ 20 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนฝาปิดช่องดูไฟ .....	123
ภาพผนวกที่ 21 ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของซังข้าวโพด .....	125
ภาพผนวกที่ 22 ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของซังข้าวโพดอัดเม็ด .....	126

ภาพผนวกที่ 23 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด..... 127

ภาพผนวกที่ 24 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพดอัดเม็ด ..... 128

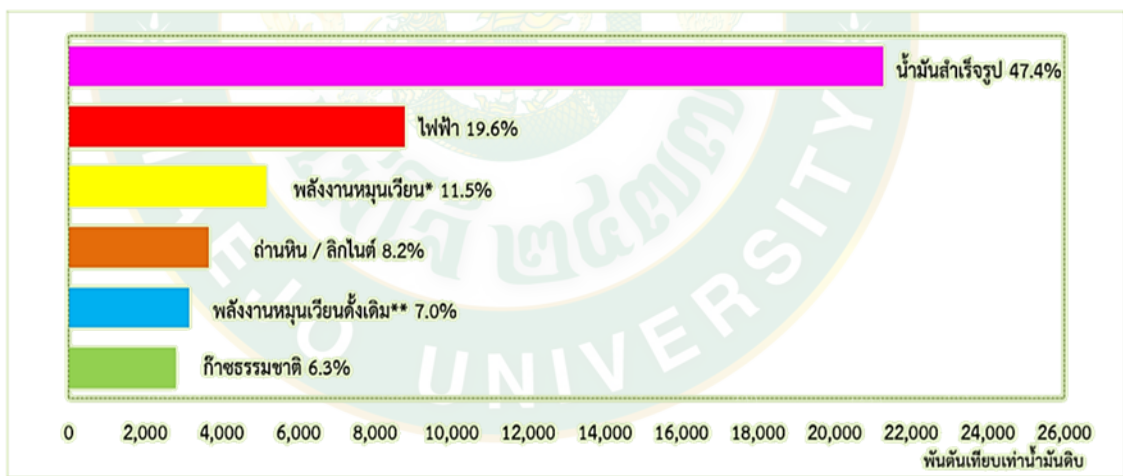


# บทที่ 1

## บทนำ

### ความสำคัญและที่มา

ในปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ การใช้พลังงานยังคงเพิ่มขึ้น ตามการเติบโตทางเศรษฐกิจโดยที่ น้ำมันสำเร็จรูปยังคงเป็นพลังงานที่ใช้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 47.4 ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายทั้งหมด รองลงมาประกอบด้วย ไฟฟ้า พลังงานหมุนเวียน ถ่านหิน/ลิกไนต์ พลังงาน หมุนเวียนดั้งเดิม และก๊าซธรรมชาติ คิดเป็นร้อยละ 19.6 11.5 8.2 7.0 และ 6.3 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งพบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายในช่วงครึ่งแรกของปี 2562 มีปริมาณ 44,799 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปีก่อน ร้อยละ 4.9 คิดเป็นมูลค่ากว่า 671,819 ล้านบาท (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562)



P ตัวเลขเบื้องต้น

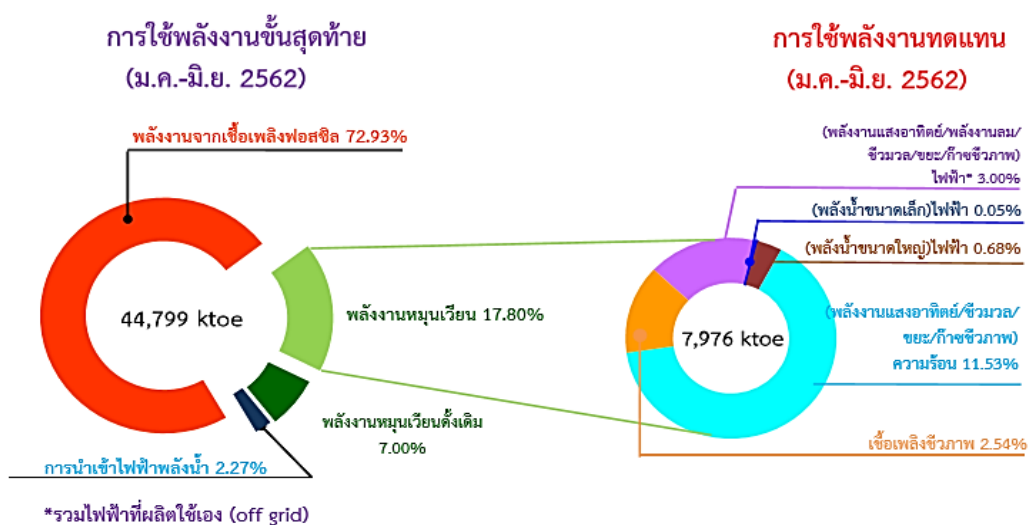
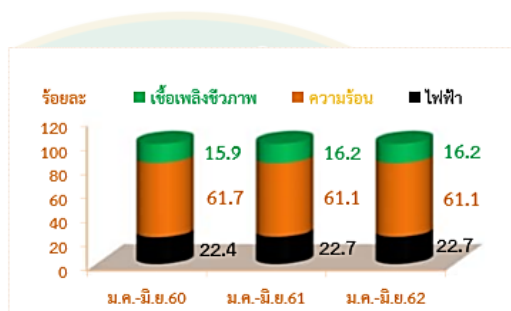
\* ประกอบด้วย พิน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ชยะ และก๊าซชีวภาพ

\*\*ประกอบด้วย พิน ถ่าน แกลบ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่ใช้ในบ้านอยู่อาศัย และอุตสาหกรรมครัวเรือน

ภาพที่ 1 ความต้องการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายของประเทศไทย เดือนมกราคม – มิถุนายน ปี 2562

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2562)

จากการที่รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยลดสัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม (Energy Intensity) พบว่า ในช่วงครึ่งแรกของปี 2562 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทน 7,976 พันตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้น ร้อยละ 21.5 จากช่วงเดียวกันของปีก่อน ส่วนสัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวมมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับปี 2553 ซึ่งเป็นปีฐานที่เริ่มดำเนินการตามแผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี (พ.ศ. 2554 – 2573) และแผนอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2558 – 2579



ภาพที่ 2 สัดส่วนการใช้พลังงานต่อผลิตภัณฑ์มวลรวม (Energy Intensity)

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2562)

ปัจจุบันราคาเชื้อเพลิงจากพลังงานมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ประเทศไทยในฐานะที่เป็นประเทศนำเข้าพลังงานสูงเกือบ 85% จึงได้รับผลกระทบอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งการเพิ่มของราคาเชื้อเพลิงในปัจจุบันที่มีผลกระทบกับชุมชนโดยตรงทำให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มสูงขึ้น จากการศึกษาวิจัยการใช้พลังงานใน

ชุมชน (ธเนศ , 2547) พบว่าชุมชนมีค่าใช้จ่ายทางพลังงานมากถึง 20% ของรายได้ แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศทางด้านเกษตรกรรม และมีผลผลิตทางการเกษตรรวมถึงผลผลิตเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีศักยภาพสูงสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ซึ่งมีปริมาณค่อนข้างสูง และส่วนใหญ่กระจายอยู่ในชุมชนแต่ละท้องถิ่นก็สามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนสำหรับในชุมชนได้ (พรายพล และคณะ, 2553)

การใช้พลังงานในชุมชนโดยส่วนใหญ่จะใช้พลังงานในรูปแบบความร้อน การใช้ประโยชน์จากไม้ แกลบ ในพื้นที่สวน ไร่ นา มาผลิตเป็นเชื้อเพลิง เช่น ถ่านไม้ ผลิตน้ำส้มควันไม้ ถ่านชีวภาพ ลดสารเคมี พื้นฟูบำรุงดิน การใช้ฟืนจากการตัดแต่งกิ่งไม้บริเวณที่พักอาศัย มาใช้ร่วมกับเตาชีวมวล เตาเศรษฐกิจประยุกต์ เพื่อให้ความร้อน หุงต้ม ใช้พลังงานทดแทนเป็นต้นทุนในการผลิตสินค้าผลิตภัณฑ์ของกลุ่มวิสาหกิจ ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) เช่น วิสาหกิจแปรรูปอาหารต่าง ๆ ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลก็จะส่งผลให้วิสาหกิจชุมชนมีต้นทุนในการผลิตต่ำลง ทำให้มีกำไรเพิ่มสูงขึ้น โดยใช้ชีวมวลที่มีอยู่ในท้องถิ่น เช่น ชังข้าวโพด แกลบ เศษไม้ที่ทิ้งจากการแปรรูปทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังช่วยลดการเผาในที่โล่งของชุมชนลงได้ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาเรื่องหมอกควันที่เกิดจากชุมชนลงได้

อย่างไรก็ตามปัญหาของการใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลก็มีอยู่ส่วนใหญ่เกิดจากความชื้นสูง และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความร้อนชีวมวลต่ำ และไม่สามารถนำไปใช้ผลิตพลังงานความร้อนได้อย่างเหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล (กฤตพร และ ลัญจกร, 2561) อย่างไรก็ตามการใช้ชีวมวลด้วยเตาชีวมวลส่วนใหญ่มีประสิทธิภาพความร้อน 14-16% ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซหุงต้ม ซึ่งโดยเฉลี่ยประสิทธิภาพมากกว่า 50% ขึ้นไป (Reed et al, 1988) สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากคุณภาพของเชื้อเพลิงที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบเตาชีวมวล ให้สอดคล้องกับชนิดชีวมวล จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลให้สูงขึ้นได้ ซึ่งในหลักการออกแบบเตาชีวมวลที่เหมาะสมจำเป็นต้องศึกษาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสม รวมถึงในเรื่องของการเติมเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถเติมเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อเชื้อเพลิงในเตาหมดจะต้องมีการนำเอาเชื้อเก่าออกและเติมเชื้อเพลิงใหม่ซึ่งจะต้องมีการเติมเชื้อเพลิงทุก ๆ 40-60 นาที (จิตรภรณ์ และคณะ, 2555) ในส่วนของเชื้อเพลิงชีวมวลต้องมีการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิง โดยเฉพาะความชื้น ขนาด ชนิด ของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อกระบวนการเผาไหม้ประสิทธิภาพทางความร้อนและต้นทุนการใช้เชื้อเพลิง ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา การออกแบบและสร้างเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร การทดสอบได้เลือกใช้วัสดุชีวมวลที่มีในท้องถิ่น คือ ชังข้าวโพดและชังข้าวโพดอัดเม็ด และมีการศึกษาเปรียบเทียบการประเมินสมรรถนะและต้นทุนของเตาชีวมวลกับการใช้ก๊าซหุงต้ม ผลที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้ จะนำไปสู่การออกแบบเตาให้มีสมรรถนะที่สูงเพิ่มขึ้นเหมาะสมกับความต้องการของวิสาหกิจชุมชน และเป็นแนวทางให้ชุมชนหรือวิสาหกิจชุมชนสามารถนำเอาชีวมวลในท้องถิ่นมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้อย่างคุ้มค่า

สามารถเลือกนำไปใช้ได้อย่างหลากหลายตามศักยภาพของพื้นที่ ต่อยอดสู่การสร้างอาชีพ สร้างรายได้ รักษาสิ่งแวดล้อม

### วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลแบบต่อเนื่องโดยใช้ซังข้าวโพด และเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากซังข้าวโพด เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ สำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร
2. เพื่อประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลแบบต่อเนื่อง
3. เพื่อประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลแบบต่อเนื่อง

### ขอบเขตการศึกษา

1. ออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลโดยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง
2. เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบการเผาไหม้ คือซังข้าวโพด และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากซังข้าวโพด
3. การทดสอบการใช้งานเตาชีวมวลจะทดสอบภายใต้ กิจกรรมการคั่ว โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับเตาก๊าซแอลพีจี (ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการทดสอบ คือ การคั่วเครื่องเทศที่เป็นส่วนผสมในเครื่องแกง)
4. ประเมินความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวล โดยการป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องโดยใช้ซังข้าวโพด และเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดจากซังข้าวโพด

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องต้นแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร
2. มีแนวทางในการเพิ่มสมรรถนะของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร โดยสามารถช่วยลดอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ได้
3. ลดค่าใช้จ่าย และการใช้พลังงานในด้านการใช้ก๊าซหุงต้มภายในครัวเรือน
4. แก้ปัญหาปัญหาด้านหมอกควัน และลดปัญหาการเกิดภาวะโลกร้อน

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและตรวจสอบเอกสาร

#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบเตาชีวมวลและการเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร มีทฤษฎีประกอบด้วยทฤษฎีชีวมวล การเพิ่มคุณภาพสำหรับเตาชีวมวลที่มีอยู่ การเผาไหม้เบื้องต้น กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล และการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

#### เชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง (Fuel) คือสารที่สามารถเกิดการสันดาปได้ในอากาศ และให้พลังงานความร้อนออกมา ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เชื้อเพลิงหลัก ๆ ได้แก่ ไม้ฟืน ถ่านหิน น้ำมัน เป็นต้น โดยมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. เชื้อเพลิงแข็ง (Solid fuel) หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เช่น ไม้ฟืน ถ่านไม้ แกลบ ถ่านหิน หินน้ำมัน เป็นต้น ใช้ประโยชน์ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อไอน้ำ ในโรงงานอุตสาหกรรม โรงจักรไอน้ำ เชื้อเพลิงในครัวเรือน และสามารถเพิ่มคุณค่าของเชื้อเพลิงโดยผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน หรือไพโรไลซิส ในกรณีที่ใช้บิทูมินัส จะได้เป็นถ่านโค้กแข็ง ถ้าเป็นถ่านหินทั่วไปจะได้ถ่านโค้กสังเคราะห์ (Formcoke) หรือเชื้อเพลิงไร้ควัน (Smokeless fuel) และถ้าใช้ไม้ ฟืน ผลผลิตที่ได้ คือ ถ่านไม้ (Wood charcoal)

2. เชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) หมายถึง เชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง โดยเกือบทั้งหมดได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ได้แก่ น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา (fuel oil) และยังรวมถึงแอลกอฮอล์ ที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตจากพืชผลทางการเกษตร เชื้อเพลิงชนิดนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรม ยานพาหนะ เพราะใช้สะดวก เก็บรักษาง่าย และให้ค่าพลังงานความร้อนที่สูง

3. เชื้อเพลิงแก๊ส (Gas fuel) หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้อง นิยมใช้กันมากทั้งในธุรกิจอุตสาหกรรม และในครัวเรือน ทั้งนี้เพราะสะดวกและสะอาด อาจจะอยู่ในรูปของแก๊สธรรมชาติ หรืออาจจะได้มาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม เช่น แก๊สปิโตรเลียมเหลว ในต่างประเทศอาจจะมีอุตสาหกรรมการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากถ่านหินหรือจากเตาถลุงเหล็ก หรืออาจเกิดจากกระบวนการหมักที่เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (Biogas) แก๊สเชื้อเพลิงที่มีความสำคัญในเชิง

พาณิชย์ในประเทศไทย คือ แก๊สธรรมชาติและแก๊สปิโตรเลียมเหลว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

## ชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่เก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมาจากการสังเคราะห์แสง เกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ในธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานเพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิล ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลอาจมองว่าเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับทางชีวภาพเกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบ ลักษณะเฉพาะแหล่ง ตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวล คือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี (นคร, 2553)

ชีวมวล หมายถึง สิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต หรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต หรืออินทรีย์สารต่าง ๆ เช่น ไม้ยืนต้น พืชที่มีส่วนประกอบเป็นแป้งและน้ำตาล วัชพืชบกและน้ำ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเกษตร มูลสัตว์ ตลอดจนขยะที่มีอยู่ทั่ว ๆ ไป

ชีวมวล ประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่น ๆ อีกเล็กน้อยในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรต หรือเซลลูโลส ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และยังรวมไปถึงสิ่งต่าง ๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักในรูปแบบอื่น ๆ โดยทั่วไป ชีวมวลอาจจะจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลักๆ คือ ชีวมวลแบบไม้ (woody) แบบไม่ใช่ไม้ (non woody) และของเสียจากสัตว์ ซึ่งมาจากแหล่งต่าง ๆ ดังนี้

- ผลผลิตจากป่าดงพงไพร สวนไร่ นา ต้นไม้ และวัชพืชต่าง ๆ ทั้งบนบกและในน้ำ เช่น ไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อน ไม้โตเร็ว ใบไม้กิ่งไม้ หญ้า พืชล้มลุก จากส่วนเม็ด เปลือก ผล และจากมวลสำหรับ พืชน้ำ เป็นต้น
- ผลผลิตจากพืชเศรษฐกิจ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์ม น้ำมัน แกลบ ฟาง ชานอ้อย ยอดใบ เหง้ามัน ชังข้าวโพด ทลายปาล์ม เป็นต้น
- เศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการ และการประกอบการภาคอุตสาหกรรม เช่น ขี้เถ้า กากอาหาร ส่วเหล้า กากอาหาร รวมไปถึงของเสียจากโรงงานแปรรูป ของเสียประเภทพลาสติก และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม



- ของเสียจากแหล่งชุมชน เช่น ขยะชุมชน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ผลิตภัณฑ์ และของเสียจากสัตว์ เช่น ไชมัน มูลสัตว์ เป็นต้น

ชีวมวลเป็นแหล่งสะสมคาร์บอน ในขณะที่เดียวกันก็ยังเป็นแหล่งสะสมพลังงานแสงอาทิตย์ที่สำคัญอีกด้วย โดยพืชจะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากบรรยากาศมาใช้ประโยชน์ โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) และปลดปล่อยบางส่วนออกมากับการหายใจ คาร์บอนที่สะสมอยู่ในพืชจะถูกเปลี่ยนไปเป็นอินทรีย์วัตถุในดิน (Soil organic matter) หรือถูกตัดแปลงให้เป็นสารเชื้อเพลิงต่อไป แหล่งชีวมวลที่สำคัญ ๆ ได้แก่

- 1) ไม้ชนิดต่าง ๆ ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักที่มนุษย์รู้จักใช้กันมาตั้งแต่สมัยดึกดำบรรพ์
- 2) วัสดุทางการเกษตรต่าง ๆ เช่น อ้อย มันสำปะหลัง
- 3) วัชพืชชบก และวัชพีชน้ำ เช่น หญ้า ผักตบชวา สาหร่าย
- 4) ผลิตภัณฑ์จากพืช เช่น น้ำมันพืช (น้ำมันปาล์ม ถั่วลิสง เม็ดสบู่ดำ เป็นต้น)
- 5) สิ่งเหลือใช้ทางการเกษตร (Waste and residue) เช่น เศษไม้ ขี้เลื่อย แกลบ ชานอ้อย

นอกจากนั้นยังรวมไปถึงขยะ และของเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (Municipal and industrial waste) ส่วนของเหลือที่ได้จากสัตว์ คือ มูลสัตว์ต่าง ๆ โดยมูลสัตว์ที่ตากให้แห้งดีแล้ว จะมีค่าพลังงานความร้อนต่ำกว่าไม้เล็กน้อย สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มในชนบทได้เป็นอย่างดี

โดยแหล่งเชื้อเพลิงชีวมวลที่มนุษย์รู้จักกันดีมาตั้งแต่สมัยโบราณ คือ ฟืน ซึ่งใช้ในการหุงต้มอาหาร ให้ความอบอุ่นเมื่อมีอากาศหนาว ในปัจจุบันประเทศต่าง ๆ ก็หันมาให้ความสนใจกับเชื้อเพลิงชีวมวลกันมากขึ้น ประเมินโดยรวม ๆ เชื้อเพลิงชีวมวลมีความสำคัญเป็นอันดับสามของโลกในด้านของการใช้งานทั่วไป (ศิรินุช, 2551)

## 1. แหล่งกำเนิดของชีวมวล

แหล่งชีวมวล จำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ (กัญจนา, 2544)

### 1) แหล่งปฐมภูมิ (Primary source)

- ไม้ฟืน หาใช้ได้ตามความสะดวก ใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในชนบท ลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ โคน ราก ไม้แห้งที่ล้มตายแล้ว

### 2) แหล่งทุติยภูมิ (Secondary source)

- วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ตอซัง ซังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง
- เศษกากในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง เป็นต้น

## 2. ประเภทของชีวมวล

การแบ่งประเภทของชีวมวลสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ ๆ (Bhattacharya et al., 2003)

1) เชื้อเพลิงไม้ (Woodfuel) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากไม้และผลิตภัณฑ์ของไม้ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น

1.1) ไม้พืน (Fuelwood/firewood) เป็นเชื้อเพลิงที่ได้มาจากพวกไม้โดยตรง โดยไม่มีการแปรรูป

1.2) ถ่านไม้ (Charcoal) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ (Carbonized) หรือกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysed)

1.3) พลังงานจากเศษไม้และวัสดุเหลือใช้จากป่าไม้

2) วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agro-wastes) หมายถึงวัสดุเหลือใช้จากการทำฟาร์ม และการเพาะปลูกพืช เช่น ฟางข้าว แกลบ และกากอ้อย เป็นต้น

3) ของเสียจากสัตว์ (Animal wastes) เป็นของเสียที่ได้จากสัตว์ขบถ่ายออกมา ซึ่งจะหมายถึง มูลสัตว์เป็นหลัก เช่น มูลวัว และมูลสัตว์ปีก เป็นต้น

4) พืชพลังงาน (Fuel crops) ซึ่งหมายถึงพืชที่ปลูกขึ้นมาเพื่อวัตถุประสงค์ของการนำมาใช้เป็นพลังงานเป็นหลัก เช่น อ้อยและมันสำปะหลังที่สำหรับการนำมาผลิตเป็นแอลกอฮอล์ หรือสบู่อุดำ เป็นต้น

## 3. การนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงาน (Biomass conversion)

ในสภาวะปัจจุบันน้ำมันเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมมีราคาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (ศิรินุช, 2551) ทำให้มีความต้องการที่จะใช้พลังงานจากชีวมวลมาทดแทนเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณของชีวมวลที่มีการผลิตได้นั้นยังไม่เพียงพอกับความต้องการ ดังนั้นการใช้ชีวมวลจึงควรจะต้องเลือกใช้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับชนิดของชีวมวลและความต้องการตามสภาพท้องถิ่น ๆ ซึ่งการนำพลังงานเชื้อเพลิงชีวมวลออกมาใช้โดยเฉพาะในด้านของความร้อน สามารถกระทำได้หลายวิธี คือ

1) การเผาไหม้ตรง (Direct combustion) เป็นกระบวนการใช้ความร้อนสลายโมเลกุลวิธีหนึ่ง

2) การใช้ความร้อนสลายโมเลกุล (Thermochemical conversion) ซึ่งสามารถแบ่งตามกระบวนการได้หลายวิธี คือ

- กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)
- กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)
- กระบวนการลิกวิดิแฟคชัน (Liquidfaction)

3) การใช้ชีวเคมีสลายโมเลกุล (Biochemical conversion) ซึ่งสามารถแบ่งตามกระบวนการได้หลายวิธี คือ

- กระบวนการย่อยสลายโดยไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)
- กระบวนการหมัก (Yeast fermentation)

#### 4. การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวล

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความชื้นหรือปริมาณของชีวมวลมีความโดดเด่นในตัวเอง ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการเป็นผลิตภัณฑ์จากสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นพืชหรือสัตว์ คุณสมบัติที่สำคัญเหล่านี้ ได้แก่ คุณสมบัติทางเคมี และทางกายภาพ ซึ่งคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ปริมาณเถ้าในชีวมวลเศษวัสดุการเกษตรมีแนวโน้มสูงกว่าชีวมวลประเภทไม้ (สุพิน, 2553)

##### 1) การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

การวิเคราะห์แบบประมาณ (นคร, 2553) เป็นการวิเคราะห์โดยแบ่งกลุ่มองค์ประกอบในเชื้อเพลิงออกเป็นความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

##### ปริมาณความชื้น (Moisture, M)

ปริมาณความชื้นในชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากในการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ถ้าชีวมวลมีปริมาณความชื้นมากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลงเป็นอย่างมาก ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในชีวมวลจึงมีความจำเป็นและสำคัญมาก

ปริมาณความชื้นในชีวมวลวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่หายไป หลังการอบชีวมวลให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะทำการอบชีวมวลในเตาอบไฟฟ้า จนกว่าชีวมวลจะแห้ง หรือน้ำหนักของชีวมวลคงที่

น้ำหรือความชื้นจะระเหยออกมาจากชีวมวลระหว่างที่ทำการอบแห้ง ปริมาณความชื้นในชีวมวลจะเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของชีวมวล ปริมาณความชื้นในชีวมวลประเภทไม้ มีตั้งแต่ร้อยละ 25 – 65 ในขณะที่ถ้าเป็นชีวมวลประเภทกากตะกอนจากการบำบัดน้ำเสีย (Sludge) จะมีปริมาณความชื้นมากกว่าร้อยละ 90

##### ปริมาณเถ้า (Ash, A)

ปริมาณเถ้าในชีวมวลเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ถ้าชีวมวลมีปริมาณเถ้ามากจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง ชีวมวลบางชนิด เช่น ทะลายปาล์ม ซึ่งมีปริมาณโพแทสเซียมในเถ้ามากจะก่อให้เกิดปัญหาเถ้าหลอม (Slagging) ในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำได้

นอกจากนี้ในเถ้าของชีวมวลบางชนิด เช่น แกลบจะมีปริมาณซิลิกาเป็นจำนวนมาก ซึ่งซิลิกานี้จะไปทำให้ท่อไอน้ำร้อนในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำเกิดการฉีกขาดและผุกร่อน เป็นต้น ดังนั้นการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในชีวมวลจึงมีความจำเป็นและสำคัญมาก

ปริมาณเถ้าในชีวมวลวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่เหลืออยู่จากการเผาไหม้ชีวมวล ภายใต้บรรยากาศอากาศที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง ส่วนประกอบอนินทรีย์ในชีวมวลจะถูกเผาไหม้สมบูรณ์กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในขณะที่ส่วนประกอบอนินทรีย์ในชีวมวลจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสารประกอบออกไซด์เรียกว่าเถ้า

#### ปริมาณไอระเหย (Volatile Matter, VM)

ปริมาณไอระเหยในชีวมวลเป็นน้ำหนักที่หายไปหลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวล ภายใต้สภาวะที่กำหนด คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยไม่ให้ชีวมวลสัมผัสกับอากาศ ไอระเหยจะเกิดขึ้นจากการกลั่นสลายด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิส

#### ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon, FC)

ปริมาณคาร์บอนคงตัวเป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างชีวมวลหลังจากการให้ความร้อนแก่ชีวมวลที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ปริมาณคาร์บอนคงตัวคำนวณได้จากผลต่าง ดังสมการต่อไปนี้

$$\%FC = 100 - (\%M + \%A + \%VM)$$

สมการที่ 1

## 2) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (นคร, 2553) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่าง ๆ ที่สำคัญที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงแข็ง ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน บางครั้งอาจมีการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสและคลอรีนด้วย ปริมาณออกซิเจนสามารถหาได้จากผลต่างระหว่าง 100 กับผลรวมของร้อยละธาตุองค์ประกอบทั้งหมดกับร้อยละความชื้นและเถ้า การวิเคราะห์ธาตุทำได้โดยการกลั่นสลายเชื้อเพลิงแข็งในสภาวะออกซิไดส์อย่างรุนแรงจนกระทั่งกลายเป็นสารประกอบออกไซด์ แล้วจึงหาปริมาณของออกไซด์ที่เกิดด้วยวิธีทางเคมี หรือทางกายภาพ ในปัจจุบันใช้เครื่อง CHNS elemental analysis ในการวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน กำมะถัน และไนโตรเจน ตามมาตรฐาน ASTM

การวิเคราะห์องค์ประกอบที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง เพื่อใช้ในการหาค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ สมการหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้ดังนี้

$$Q = -8,419.7 + 479.3C + 667.6H + 58.8 O - 1,207.7S$$

สมการที่ 2

เมื่อ Q คือค่าความร้อนสูงสุดต่อหนึ่งกิโลกรัม (kJ/kg) ซิวมวลแห้ง C, H, O และ S คือ ค่าเป็นร้อยละโดยน้ำหนักคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ

### 3) พลังงานความร้อนของการเผาไหม้ (ธีรศักดิ์, 2533)

ค่าความร้อน คือพลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีจุดเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง แล้วผลิตผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้กลับมาที่อุณหภูมินี้ ค่าความร้อนที่ใช้มีทั้งค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ในการหาค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลมีค่าประมาณกลาง ๆ คือ 10-20 MJ/kg กลุ่มไม้จะมีค่าสูงกว่ากลุ่มไม้ไผ่ไม้เล็กน้อย ค่าความร้อนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น และเศษเถ้า

ค่าความร้อนสูง (HHV) คือ ค่าความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง bomb calorimeter ที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ) โดยเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกเผาไหม้ในภาชนะปิดที่แช่อยู่ในน้ำ หลังจากเชื้อเพลิงชีวมวลเผาไหม้จะคายความร้อนให้แก่ น้ำ ทำให้อุณหภูมิของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเราสามารถหาปริมาณค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวลได้จากการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำ (เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ ไอน้ำที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้จะควบแน่นเป็นของเหลว การใช้สูตรอย่างง่ายคำนวณ เช่น สูตรของดulong (Dulong formula) ในหน่วย MJ/kg โดยใช้ค่าสัดส่วนโดยมวลของแต่ละธาตุที่เกี่ยวข้อง (Tillman, 1991)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.585 C + 141.924 H + 12.908 S - 15.327 O - 3.538 O^2 \quad \text{สมการที่ 3}$$

สูตรของเดเมียบาส (Demirbas, 1997)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.5 C + 142.3 H - 15.4 O - 24.5 N \quad \text{สมการที่ 4}$$

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 31.2 FC + 15.34 VM \quad \text{สมการที่ 5}$$

ส่วนค่าความร้อนต่ำ (LHV) คือค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่พิจารณาว่าไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่ได้ควมแน่นเป็นของเหลว โดยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง บางส่วนจะถูกใช้ไปในการระเหยน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ให้อยู่ในสถานะไอน้ำ (เอนทัลปีของไอน้ำมีค่าสูงกว่าเอนทัลปีของน้ำที่สถานะของเหลว)

ดังนั้นค่าความร้อนต่ำ (LHV) จะมีค่าน้อยกว่าค่าความร้อนสูง (HHV) หรือถ้ารู้จักประกอบธาตุของไฮโดรเจนในเชื้อเพลิงชีวมวลและค่าความร้อนสูง สามารถคำนวณค่าความร้อนต่ำได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{LHV (MJ/kg)} = \text{HHV} - 211.19 \text{ H}$$

สมการที่ 6

## การเผาไหม้เชื้อเพลิงเบื้องต้น

### 1. การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนร่วมการเกิดความร้อนสูงและแสงเป็นปรากฏการณ์ที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา เมื่อใช้สารชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่มีความร้อนเกิดขึ้นโดยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ที่เผาไหม้ได้ และไนโตรเจนซึ่งอยู่ในสารชีวมวลทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเรียกว่าการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาในเฟสแก๊ส ปฏิกิริยาบนพื้นผิว หรือทั้งคู่ตามด้วยกระบวนการหลอมเหลว การระเหยและไพโรไลซิสในปฏิกิริยาการเผาไหม้จริงเกิดปรากฏการณ์หลายอย่างที่ซับซ้อน เช่น การระเหย การแพร่ การผสม การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีและการเกิดเปลวไฟที่อุณหภูมิสูง เชื้อเพลิงเผาโดยตรงในเฟสก๊าซในการเผาไหม้เป็นแบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน (Premix combustion) และการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงแพร่กระจาย (Diffuse combustion) เชื้อเพลิงของเหลวจะถูกเผาเหมือนเป็นก๊าซเผาไหม้ได้ในเฟสก๊าซหลังจากการระเหยที่พื้นผิว ซึ่งเรียกว่า การเผาแบบระเหย น้ำมันจะถูกเผาในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) แต่การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (Decomposition combustion) ยังดำเนินต่อไปซึ่งจะสลายเชื้อเพลิงบางส่วนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา (กัญจนา, 2544)

### 2. รูปแบบการเผาไหม้

รูปแบบการเผาไหม้ของการเผาไหม้สารชีวมวลโดยตรงซึ่งเป็นของแข็งนั้น ได้แก่ การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (Evaporation combustion) การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (Decomposition combustion) การเผาไหม้ที่พื้นผิว (Surface combustion) การเผาไหม้

แบบช้าๆ ที่ไม่มีไฟแต่มีควัน (Smoldering combustion) ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหยนั้น เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยสารประกอบพื้นฐาน ซึ่งโครงสร้างโมเลกุลจะมีจุดหลอมเหลวต่ำและระเหยได้โดยการให้ความร้อนและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเฟสก๊าซและเกิดการเผาไหม้ ในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัวก๊าซที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวโดยการให้ความร้อน ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $C_mH_nH_2O$  และ  $CO_2$ ) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในเฟสก๊าซ และเกิดเปลวไฟและเกิดการเผาไหม้ โดยปกติคาร์บอนนั้นจะเหลือหลังจากการเผาไหม้ชนิดนี้และถูกเผาด้วยการเผาไหม้ที่พื้นผิว การเผาไหม้ที่พื้นผิวเกิดในกรณีของสารองค์ประกอบ จะประกอบด้วยคาร์บอนที่มีสารระเหยได้สะสมอยู่เล็กน้อยเท่านั้น เช่น ถ่านหิน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำ จะแพร่เข้าไปในรูที่มีอยู่ในพื้นผิวของของแข็งของสารนั้นและเกิดการเผาไหม้โดยปฏิกิริยาที่พื้นผิว การเผาไหม้ช้า ๆ แบบไม่มีไฟแต่มีควันนั้นเป็นปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุดไฟติดของสารระเหยของเชื้อเพลิงที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้นั้น เช่น ไม้ ถ้าการติดไฟทำให้เกิดควันหรืออุณหภูมินั้นเกินกว่าจุดติดไฟ การเผาไหม้ที่มีไฟจะเกิดขึ้น รูปแบบการเผาไหม้หลักในการเผาไหม้ของสารชีวมวลโดยตรง ในอุตสาหกรรมนั้น ได้แก่ การเผาแบบเชื้อเพลิงสลายตัวและการเผาไหม้ที่พื้นผิว (วารสาร, 2557)

### 3. วิธีการเผาไหม้

ในอุตสาหกรรมการเผาไหม้ (Belonio, 2005) อากาศส่วนเกินถูกเติมเข้าไปในปริมาณหนึ่งเพิ่มจากปริมาณอากาศทางทฤษฎีที่ต้องใช้ในการเผาไหม้ของสารชีวมวล ถ้าอัตราการเติมอากาศส่วนเกินสูงเกินไป จะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดต่ำลงและประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดต่ำลงด้วย ดังนั้นในวิธีการเผาสารชีวมวลถูกนำมาใช้ ได้แก่ การเผาไหม้แบบตะแกรง (แบบนิ่งและแบบเคลื่อนไหว) (Fixed grate, moving grate) การเผาไหม้แบบฟลูอิดิซ์เบด (Fluidized bed combustion) การเผาไหม้แบบเตาฮาร์ทแบบหมุน (Rotary hearth furnace combustion) การเผาไหม้แบบเตาเผา (Burner combustion) ซึ่งรูปแบบการเผาไหม้ในแต่ละวิธีแสดงได้ดังตารางที่ 1

### 4. การประยุกต์ใช้

การเผาไหม้ของสารชีวมวลเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดเพื่อที่จะได้พลังงานออกมาและถูกใช้อย่างกว้างขวาง เพราะเทคโนโลยีของเชื้อเพลิงฟอสซิลสามารถใช้ประยุกต์ได้ เนื่องจากการเกิดขึ้นของ  $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $HCL$  และไดออกซินต่ำ ซึ่งเป็นข้อดีของการเผาไหม้สารชีวมวลและความสามารถในการเกิดเปลวไฟนั้นยอดเยี่ยมความร้อนของการเผาไหม้นั้นถูกนำไปใช้สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า และการผลิตความร้อนโดยนำความร้อนคืนผ่านการถ่ายเทของตัวกลาง เช่น ไอน้ำ และน้ำร้อน โดยใช้บอยเลอร์และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในส่วนของปริมาณของความร้อนที่สามารถนำใช้ได้และศูนย์กลางของพลังงานในแหล่งอุตสาหกรรมที่มีเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตพลังงานร่วม 2 รูปแบบ (กิตติกร, 2556) ได้แก่

พลังงานไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อน เช่น เศษไม้และของเสียทางการเกษตร ซึ่งใช้อย่างกว้างขวาง โรงไฟฟ้าและโรงงานที่นำความร้อนไปใช้เป็นประโยชน์โดยไม่ได้คำนึงถึงขนาดใช้ เปลือกชานอ้อย เศษไม้ เศษปาล์มน้ำมัน และมูลไก่ เป็นต้น เป็นเชื้อเพลิง

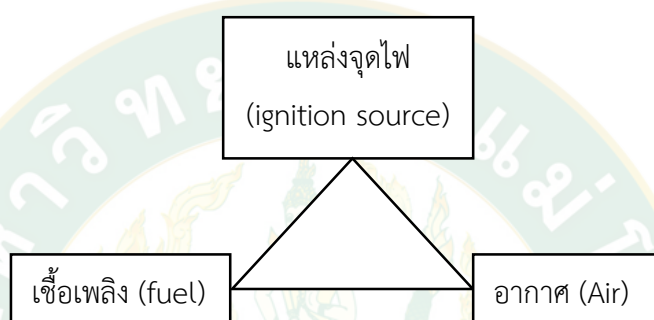
ตารางที่ 1 ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล

วิธีการเผาไหม้	ชนิดของการเผาไหม้	ลักษณะสำคัญ
การเผาไหม้แบบ Fixed bed	ตะกรับวางแนวนอน/เอียง ตะกรับที่มีน้ำหล่อเย็น ตะกรับที่มีการทิ้งขี้เถ้า	ตะกรับเป็นชั้นหรือเป็นแบบเอียงชั้น การเผาไหม้ของสารชีวมวลเป็นการเผาไหม้ที่พื้นผิว ใช้ในเตาเผาแบบ Batch ขนาดเล็ก สำหรับสารชีวมวลที่มีขี้เถ้าน้อย
การเผาไหม้แบบ Moving bed	ตะกรับเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ตะกรับเคลื่อนที่ไปข้างหลัง ตะกรับแบบเป็นชั้น ตะแกรงคล้ายบานเกิด	ตะกรับจะค่อยๆเคลื่อนที่และถูกแบ่งเป็นโซนเผาไหม้และโซนหลังการเผาไหม้ เนื่องจากมีการปล่อยขี้เถ้าอย่างต่อเนื่อง ทำให้ตะกรับมีขนาดใหญ่ เพื่อลดการกีดขวางของขี้เถ้าในการเผา สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้ตั้งแต่เป็นเศษเล็ก ๆ จนถึงเป็นขนาดบดล้อย
การเผาไหม้แบบ Fluidized bed	การเผาไหม้ระบบฟลูอิดไคซ์ เบดแบบฟองอากาศ การเผาไหม้ระบบฟลูอิดไคซ์ เบดแบบหมุนเวียน	ใช้ทรายเป็น Bed โดยให้ทรายและเชื้อเพลิงที่อยู่ในเตาหลอมนั้นอยู่ในสถานะเดือดที่มีความดันของอากาศในการเผาไหม้สูงและเกิดการเผาไหม้ผ่านความร้อนที่กักเก็บทรายและผลการส่งผ่านความร้อนของทรายเหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงและมีคุณภาพต่ำ
การเผาไหม้ Rotary hearth furnace	เตาหลอมแบบ Kiln	ใช้สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีปริมาณความชื้นสูง เช่น กากตะกอนของสารอินทรีย์เหลวและเศษอาหารหรือของเสียขนาดใหญ่ ความสามารถในการไหลถูกจำกัดโดยขนาดของเชื้อเพลิง
การเผาไหม้แบบ Burner	เครื่องฟืนไฟ (burner)	เผาผงไม้หรือผงขนาดละเอียด เช่น เนื้อเยื่อที่อยู่ส่วนกลางของลำต้นอ้อยด้วย Burner เหมือนกับที่เผาเชื้อเพลิงเหลว



### สภาวะที่จำเป็นในการเริ่มทำปฏิกิริยา

องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้หรือปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีตัวทำปฏิกิริยา และสภาวะที่เหมาะสมปฏิกิริยาการเผาไหม้ คือปฏิกิริยาการออกไซด์เชื้อเพลิงให้กลายเป็นออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจกสมบูรณ์ การเผาไหม้ทั่วไปตัวทำปฏิกิริยา คือ เชื้อเพลิง (ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่) และอากาศ ซึ่งจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้ต่อเมื่อสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งก็คือแหล่งให้ความร้อนเพื่อจุดไฟ (Ignition source) ดังภาพที่ 3 (กัญญา, 2544)



ภาพที่ 3 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

การเริ่มต้นปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ เริ่มด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระก่อนแหล่งจุดไฟ จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะจะให้พลังงานส่วนแรกแก่ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระจำนวนมากพอที่จะไปทำให้เริ่มเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ เมื่อเริ่มเกิดการเผาไหม้แล้ว แหล่งจุดไฟจะไม่จำเป็นอีกต่อไปเพราะพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนต้นมากเกินพอที่จะทำให้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลืออยู่เกิดการแตกตัวและการเผาไหม้ต่อเนื่องกันไปได้เองจนสมบูรณ์ (Spontaneous reaction)

### กระบวนการเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นกระบวนการเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนแล้วให้พลังงานความร้อนออกมา ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดการออกซิเดชันอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ที่มีอยู่ในเชื้อเพลิง (สุพิน, 2553)

การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงนั้นต้องมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ ส่วนใหญ่ไม่ใช่ ออกซิเจนบริสุทธิ์ เพราะจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงแต่จะใช้ ออกซิเจนในอากาศ ซึ่งจะมีทั้งก๊าซ ออกซิเจนและไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก ก๊าซอื่นมีน้อยมากจนไม่มีความสำคัญ องค์ประกอบ

ของอากาศแสดงได้ดังตารางที่ 2 ในส่วนที่ช่วยในการสันดาป (ตัวออกซิไดซ์) ก็คือออกซิเจน ส่วนที่เหลือจัดอยู่ใน กลุ่มไนโตรเจน ก๊าซเฉื่อย และความชื้นในอากาศ เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบของส่วนที่เหลือนี้จะเป็นไนโตรเจนโดยส่วนใหญ่ แสดงดังสมการที่ 7 (สมชาติ, 2558)



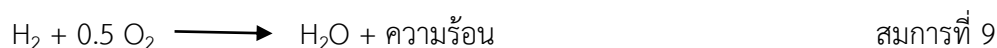
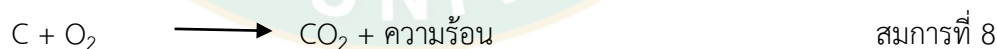
สมการที่ 7

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของอากาศที่ใช้ในการสันดาป

องค์ประกอบ	ร้อยละองค์ประกอบ	
	โดยปริมาตร	โดยมวล
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	21	23
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	79	77
O <sub>2</sub> : N <sub>2</sub>	1 : 3.76	1 : 3.35

### การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

การเผาไหม้สมบูรณ์ (Complete Combustion) ซึ่งเป็นการสันดาปของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนจนหมด ในกรณีนี้คาร์บอนจะเผาไหม้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) และถ้าในเชื้อเพลิงมีกำมะถันอยู่ก็จะเผาไหม้กลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เป็นต้น ดังสมการ



ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 เรียกว่า สารประกอบเคมี ซึ่งเกิดจากธาตุมารวมกันทำให้เกิดเป็นโมเลกุลขึ้น แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวกันระหว่าง 1 อะตอมของคาร์บอนกับ 2 อะตอมของออกซิเจน เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และความร้อน

ในการปฏิบัติการเผาไหม้ในอุตสาหกรรม คือในการใช้งานทั่วไป ต้องการการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ด้วยเหตุผลหลายประการ คือ ต้องการประหยัดเชื้อเพลิง ต้องการความร้อนสูงสุดจากการ

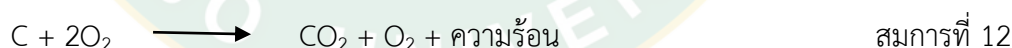
เผาไหม้ และไม่ต้องการมลพิษที่เกิดจากปฏิกิริยาเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำ ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น ซึ่งต้องใช้สภาวะที่เอื้ออำนวยการทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากที่สุด สภาวะอันหนึ่ง คือ การใช้ปริมาณอากาศเกินพอ (Excess air) เพื่อให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงหรือโมเลกุลที่มาจากการแตกตัวของเชื้อเพลิงมีโอกาสพบกับโมเลกุลของออกซิเจนมากขึ้น จากมวลสารสัมพันธ์ เมื่อทราบปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี แล้วสามารถคำนวณปริมาณอากาศเกินพอได้ทันที

### การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

เชื้อเพลิง 1 ส่วน เผาไหม้พอดีกับออกซิเจนจำนวนหนึ่ง ตามสมการที่ 8, 9 และ 10 แต่ในทางปฏิบัตินั้น การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ด้วยปริมาณออกซิเจนที่พอดีนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการสัมผัสของออกซิเจนกับเชื้อเพลิงไม่ทั่วถึง ทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดเป็นแก๊ส คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) นอกจากนี้การมีออกซิเจนไม่เพียงพอทำให้สารระเหย (Volatile Matter) เผาไหม้ไม่หมด ปกติสารระเหยเหล่านี้ยังคงมีความร้อนเหลืออยู่จึงเป็นการสูญเสียเชื้อเพลิงไปกับการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ดังสมการที่ 11



ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องป้อนอากาศให้มากกว่าปริมาณที่ต้องการตามทฤษฎี (Excess Air) เพื่อให้การเผาไหม้มีโอกาสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ในทุก ๆ ส่วนของเชื้อเพลิง อากาศบางส่วนที่ไม่ได้ใช้ในการเผาไหม้จะหลุดออกจากห้องเผาไหม้ไปกลายเป็นส่วนที่สูญเสีย สมการที่ 12 แสดงการเผาไหม้ที่มีอากาศเกินพอดี



เพื่อให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพสูงสุด ปริมาณอากาศเกินพอดีนี้น้อยที่สุดเท่าที่ยังทำให้การเผาไหม้เกิดสมบูรณ์ โดยทั่วไปแล้วการเผาไหม้สำหรับเชื้อเพลิงแข็ง (Solid Fuel) จะให้ออกซิเจนเกิดพอดีอยู่ในช่วงร้อยละ 7 – 15

### สาเหตุที่การเผาไหม้ไม่ค่อยจะสมบูรณ์ (Curran, 2019)

ในสภาวะอากาศพอดี แต่การเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เป็นไปได้ยาก ในทางปฏิบัติทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจาก

1) เนื่องจากการผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงไม่ทั่วถึง ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์เกิดขึ้นได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใกล้กับผนังเตาหรือผนังห้องเผาไหม้ จำเป็นต้องใช้อัตราส่วนของอากาศกับเชื้อเพลิงในภาวะมีอากาศเกินพอ

2) ภาวะความร้อนเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ จึงทำให้ปริมาณความต้องการอากาศ และเชื้อเพลิงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การควบคุมให้ได้อัตราส่วนในปริมาณการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์นั้น จึงเป็นไปได้ยาก

3) เนื่องจากอากาศที่ใช้เผาไหม้จริง ในทางปฏิบัตินั้นมีความชื้นเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ปริมาณอากาศที่ใช้เพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์นั้น จะมากกว่ากรณีของการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์เชิงทฤษฎีโดยใช้อากาศแห้ง

4) เวลาในการเผาไหม้ไม่นานเพียงพอ จึงมีเชื้อเพลิงไหม้ไม่หมดติดไปกับอากาศส่วนที่เหลือ (ในกรณีที่ใช้ภาวะของอากาศเกินพอในการเผาไหม้)

## 1. ปัจจัยที่ผลต่อการเผาไหม้ (Bhattu et al., 2019)

### 1) อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (Air-Fuel ratio)

อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงก็คือ อัตราส่วนระหว่างมวล (หรือจำนวนโมล) ของอากาศต่อมวล (หรือจำนวนโมล) ของเชื้อเพลิงในระหว่างการสันดาป โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น อัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทฤษฎี ( $AF_{th}$ ) และอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงจริง ( $AF_{act}$ ) โดยที่ ( $AF_{th}$ ) คำนวณตามสมการ 13

$$A / F_{th} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{n_{air}}{n_{fuel}} \quad \text{สมการที่ 13}$$

สิ่งที่สำคัญที่สุด คือต้องทราบปริมาณออกซิเจนหรืออากาศที่ต้องจ่ายสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจะคำนวณมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและพลังงานที่ได้จะเป็นพลังงานสูงสุด ดังนั้นปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในกระบวนการสันดาปเพื่อทำให้เกิดกระบวนการสันดาปสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจะเรียกว่า อากาศตามทฤษฎี (Theoretical air หรือ Stoichiometric air) ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกว่ามีปริมาณอากาศที่ใช้จริงเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี คำนวณได้จาก

$$\% \text{Theoretical air} = \frac{A / F_{actual}}{A / F_{theore}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 14}$$

สำหรับกระบวนการสันดาปจริงอากาศที่ต้องการเชิงทฤษฎีนั้นไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการสันดาปได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนั้นยังจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ หรืออะตอมคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมด ทำให้พลังงานความร้อนออกมาน้อยกว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องป้อนอากาศให้เกินกว่าความต้องการเชิงทฤษฎี ปริมาณอากาศที่เกินนี้ เรียกว่า อากาศส่วนเกิน บางครั้งการวัดอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้จริง ๆ ไม่สามารถดำเนินการวัดได้ อาจจะเป็นเนื่องจากเตาเผามีการรั่วไหลของอากาศเข้าห้องเผาไหม้ไปได้ ซึ่งก็มีวิธีที่นิยมสำหรับการหาเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินโดยประมาณได้ โดยทำการวัดแก๊สเผาไหม้ด้วยเครื่องวัดปริมาณแก๊สไอเสีย (Gas Analyser) วัดหาปริมาณออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่เกินออกจากห้องเผาไหม้ โดยสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกินได้ ดังสมการที่ 15

$$\%EA = \left( \frac{\%O_2}{21 - \%O_2} \right) \times 100 \quad \text{สมการที่ 15}$$

หรืออาจจะคำนวณได้จากการวัดปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ส่งเข้าสันดาปจริง ๆ ปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงที่ใช้ตามทฤษฎีและการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริงและตามทฤษฎี ก็สามารถคำนวณหาได้ตามสมการที่ 16

$$\%Excess \text{ air} = \frac{A / F_{\text{actual}} - A / F_{\text{theoretical}}}{A / F_{\text{theoretical}}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 16}$$

ปริมาณอากาศส่วนเกินจะต้องมีการปรับปรุงควบคุมไม่ให้น้อยเกินไปจนเกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หรือมากเกินไปจนทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกไปกับก๊าซไอเสียเนื่องจากออกซิเจน และไนโตรเจนในอากาศที่เกินมานี้ไม่ได้ทำปฏิกิริยาใด ๆ ในการเผาไหม้นอกจากจะดูดพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้และพาออกทิ้งไป

## 2) การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจน (Mixing)

การที่อนุภาคเชื้อเพลิงสัมผัสกับโมเลกุลออกซิเจนได้อย่างทั่วถึง เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการผสมกันแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีพื้นที่ผิวของเชื้อเพลิงสัมผัสกับออกซิเจนจำกัด ดังนั้นควรจะมีพื้นที่ผิวสำหรับการเกิดปฏิกิริยาให้มากที่สุด ซึ่งอาจทำได้โดยการบดลดขนาดเชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น หรือการทำให้ก๊าซในเตาเผาเกิดการเคลื่อนไหวอย่างรุนแรงหรือปั่นป่วน

เนื่องจากความปั่นป่วนจะช่วยทำลายเถ้าที่เกาะอยู่ที่ผิวเชื้อเพลิงให้หลุดออกไป เพื่อให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น

### 3) อุณหภูมิ (Temperature)

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแปรผันตามอุณหภูมิ เริ่มแรกจะเกิดขึ้นเป็นแบบช้า ๆ และเกิดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ความร้อนที่ได้จะไปเพิ่มอุณหภูมิของเชื้อเพลิงและอากาศให้สูงขึ้น ทำให้อัตราการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณความร้อนจากภายนอกที่เพียงพอสำหรับการเริ่มปฏิกิริยาเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ และจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ ปกติแล้วในการเผาไหม้นั้น ต้องการให้มีอุณหภูมิสูงเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่อาจมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ชนิดของเชื้อเพลิง ซึ่งจะให้อุณหภูมิได้อย่างจำกัดที่ปริมาณแตกต่างกัน นอกจากนี้การที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปอาจทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซพิษ และเกิดแผลกเกาะติดผนังเตาทำให้ลดความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนได้ผนังเตาได้

### 4) เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ (Time)

เวลาที่เชื้อเพลิงอยู่ในเตาจำเป็นจะต้องมากกว่าเวลาที่เชื้อเพลิงต้องการเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แต่ในทางปฏิบัติเวลาที่ทำให้เกิดการสันดาปที่สมบูรณ์นั้นต้องยาวนานมาก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มความสูงของห้องเผาไหม้ เพื่อให้เชื้อเพลิงอยู่ในห้องเผาไหม้ได้นานมากขึ้นแต่จะส่งผลไปถึงเงินลงทุนที่สูงขึ้นด้วย

## การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

### 1. กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Gaba and lordache, 2011)

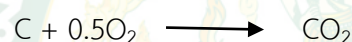
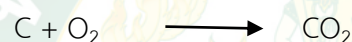
หลักการในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น โดยจะเกิดขบวนการไพโรไลซิสในช่วงของ Solid Phase และแก๊สเฟส (Gas Phase) ในขบวนการไพโรไลซิส สารที่ระเหยได้ในเชื้อเพลิง จะระเหยออกมาจากผิวของอนุภาคเชื้อเพลิง และผสมกับอากาศรอบ ๆ เกิดการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งเรียกช่วงนี้ว่า การเผาไหม้ช่วงแรก (Primary Combustion) หลังจากเผาไหม้แล้วยังมีบางส่วนที่ยังเผาไหม้ยังไม่สมบูรณ์ เมื่อมาพบกับอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) จะเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ต่อไปและออกมาเป็นก๊าซเสียในที่สุด (Borman, 1998)

เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไปมีหลายชนิด เช่น ถ่านไม้ ฝืน ถ่านหิน แกลบ ชี้เลื่อย เป็นต้น กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะแตกต่างกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว หรือเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เนื่องจากคุณสมบัติของเชื้อเพลิงแข็ง เป็นสารประกอบที่ส่วนผสมของสารต่าง ๆ มากมายและผสม

กันอยู่อย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน อีกทั้งสัดส่วนของสารต่าง ๆ ภายในเชื้อเพลิงแข็งไม่แน่นอน นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งด้วย เชื้อเพลิงแข็งประกอบด้วยสารต่าง ๆ ทั้งที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ สารที่เผาไหม้ไม่ได้เรียกว่า สารเฉื่อย (Belonio, 2005) ขั้นตอนหรือกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในเตาเผา นั้น จะมีกระบวนการในการเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงตามลักษณะขั้นตอนดังนี้

#### 1) การทำแห้ง (Drying)

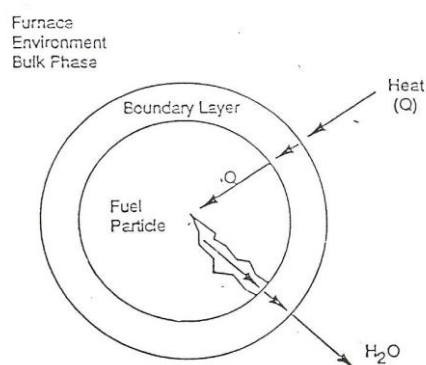
เป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดความชื้นที่มีอยู่ในอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลขณะเริ่มต้นรับความร้อนจากการเผาไหม้ในเตาเผา ปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งเริ่มจากการที่อากาศเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงเกิดกระบวนการเผาไหม้ จากรูปที่ 4 ออกซิเจนจากอากาศจะเข้าไปทำปฏิกิริยาสัมผัสกับผิวของคาร์บอนและเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนดังต่อไปนี้



สมการที่ 17

สมการที่ 18

สมการที่ 19



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการระเหยไอน้ำและการให้ความร้อนแก่อนุภาคเชื้อเพลิง

ที่มา: Tillman (1991)

#### 2) การปล่อยสารระเหย (Devolatilization)

เป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลแล้วทำให้เกิดเป็นสารระเหย หลังจากปฏิกิริยาทั้งสามเกิดขึ้นแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ต้องทำปฏิกิริยาต่อไปอีก โดยจะมีสถานะเป็น

แก๊สและของแข็ง แก๊สจะประกอบไปด้วย CO CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub> O<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน อีกล็กน้อยรอบ ๆ อนุภาคของเชื้อเพลิงเมื่อปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวของอนุภาคน้อย ออกซิเจน จะทำปฏิกิริยากับแก๊สเกิดการเผาไหม้แบบผสมแต่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ในทางตรงกันข้ามถ้าหากปริมาณสารระเหยต่อพื้นที่ผิวมาก จะทำให้ออกซิเจนไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับแก๊ส เป็นผลทำให้ไม่เกิดปฏิกิริยาหรือเกิดได้น้อย เพราะฉะนั้นต้องใช้เวลาเพื่อให้ปริมาณของสารระเหยเจือจางลงจึงจะเกิดปฏิกิริยา ส่วนของแข็งประเภทถ่านจะไม่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเวลานั้นเนื่องจากแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสจะป้องกันไม่ให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาพร้อมกันนั้นอุณหภูมิก็ไม่สูงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ หลังจากแก๊สต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาจะถ่ายเทความร้อนให้กับคาร์บอนให้มีอุณหภูมิสูงถึงจุดเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ และมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังต่อไปนี้



สมการที่ 20

สมการที่ 21

### 3) การจุดติดไฟของสารระเหย (Ignition of volatile)

เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการจุดประกายของสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมา และอยู่ล้อมรอบอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวล

### 4) การเผาไหม้สารระเหย (Combustion of Volatile)

เป็นกระบวนการเผาไหม้สารระเหย ทำให้เกิดเปลวไฟขึ้นรอบ ๆ อนุภาคเชื้อเพลิงชีวมวล

### 5) การจุดติดไฟของถ่านชาร์ (Ignition of Char Particle)

เป็นกระบวนการจุดประกายบนผิวหน้าของถ่านที่เหลือ โดยเริ่มจากเป็นจุดเล็ก ๆ ที่ผิวด้านนอกแล้วค่อย ๆ ขยายออกไปจนเกิดทั่วทั้งอนุภาค

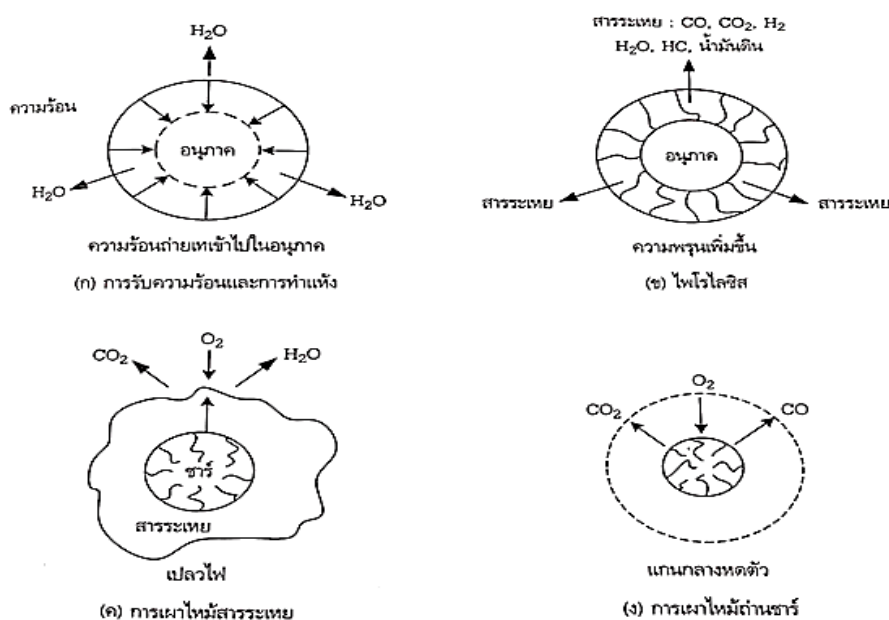
### 6) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (Combustion of Residual Char Particle)

เป็นกระบวนการเผาไหม้อนุภาคของถ่านที่เหลือหลังจากที่สารระเหยระเหยออกมาจากอนุภาคของเชื้อเพลิงชีวมวลบางส่วนหรือหมดแล้ว เมื่อเผาไหม้หมดจะเหลือเป็นขี้เถ้า

การเผาไหม้ชีวมวล เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจน เปลี่ยนพลังงานเคมี เป็นความร้อน และแสงออกมา และมีผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และเถ้า (นคร, 2553) เมื่อเชื้อเพลิงแข็งอยู่ท่ามกลางกระแสการไหลอากาศร้อน เชื้อเพลิงแข็ง จะเกิดการ



สูญเสียมวลใน 3 ช่วง ได้แก่ (1) การทำแห้ง (drying) จากนั้นอนุภาคจะได้รับความร้อน จนถึงอุณหภูมิไพโรไลซิส (i) การปล่อยสารระเหย (devolatilization) เกิดการไพโรไลซิสของอนุภาค เชื้อเพลิงแข็งได้สารระเหยอินทรีย์ที่เผาไหม้ได้และเผาไหม้ไม่ได้ และถ่านชาร์ (char) เป็นผลิตภัณฑ์ (i) การเผาไหม้ถ่านชาร์ (char combustion) เกิดขึ้นหลังจากไพโรไลซิสสิ้นสุดลง โดยที่สารระเหย เกิดการเผาไหม้พร้อม ๆ กันกับกระบวนการการเผาไหม้ของถ่านชาร์ ความสำคัญของแต่ละช่วงต่อการสูญเสียมวลจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงว่ามีความชื้น สารระเหยอินทรีย์ ถ่านคงตัว และเศษเถ้า อยู่มากน้อยเพียงใด สำหรับอนุภาคเชื้อเพลิงแข็งขนาดเล็ก กระบวนการทั้งสามจะเกิดขึ้นตามลำดับ สำหรับขนาดเชื้อเพลิงแข็งที่ใหญ่ขึ้นทั้งสามกระบวนการจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน



ภาพที่ 5 การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง

ที่มา: นคร (2553)

## 2. การเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาต่าง ๆ

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งโดยเฉพาะชีวมวล และถ่านหิน จะมีลักษณะการเผาไหม้แตกต่างกันไป โดยแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ คือ

- การเผาไหม้แบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง
- การเผาไหม้แบบชั้นเชื้อเพลิงแขวนลอย
- การเผาไหม้แบบชั้นของไหล

## 1) การเผาไหม้แบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง

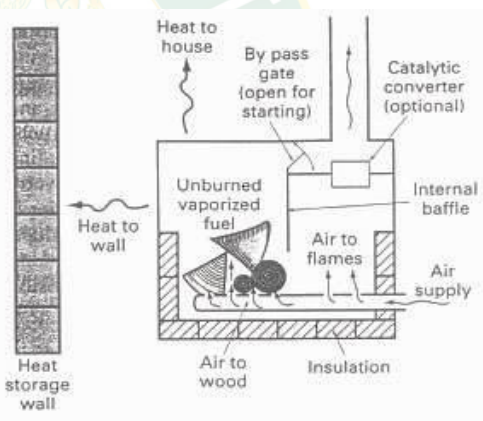
การเผาไหม้แบบทั่วไป เช่น แบบกองไฟ เตาอังโล่ เป็นต้น ซึ่งเป็นการเผาไหม้แบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง (Fixed bed combustion) อาศัยการพาอากาศเข้าตามธรรมชาติ มีอัตราการให้ความร้อนค่อนข้างต่ำ ควบคุมการเผาไหม้ลำบาก มีมลพิษปล่อยออกมา หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพต้องใช้พัดลมพาลมแบบบังคับ ระบบนี้ไม่จำเป็นต้องลดขนาดเชื้อเพลิง ใช้ได้หลากหลาย เช่น เตาไม้ฟืน (wood stove) เตาแบบดัทช์ (Dutch oven) เตาสโตเกอร์ (spreader stoker) และเตาแบบก๊าซไหลลง (downdraft system) (นคร, 2553)

### 1.1) เตาไม้ฟืน

เตาไม้ฟืน ที่ใช้ในครัวเรือนทั่วไปใช้อากาศตามธรรมชาติในการช่วยเผาไหม้ เชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับเตาแบบนี้ควรเป็นท่อนไม้ฟืนแข็งและแห้ง ความชื้นไม่เกิน 20% ขนาดประมาณ 100 – 150 มิลลิเมตร ไม้สดลดความชื้นสูง ถ่านหิน และขยะไม่เหมาะกับเตาประเภทนี้



เตาอังโล่เชื้อเพลิง ฟืน ถ่านไม้



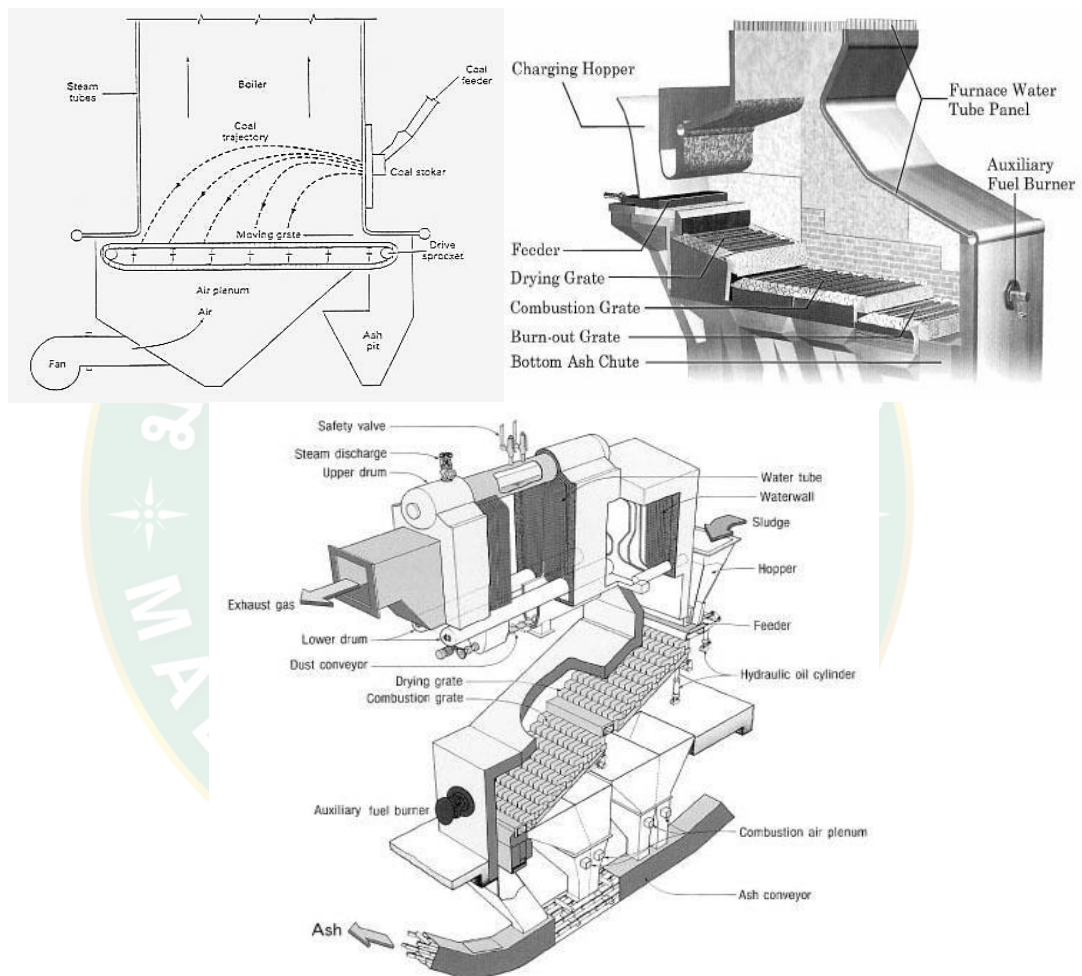
เตาไม้ฟืนให้ความอบอุ่น

ภาพที่ 6 ตัวอย่างเตาถ่านไม้ และเตาฟืนให้ความอบอุ่น

### 1.2) เตาเผาแบบสโตเกอร์

เตาเผาแบบสโตเกอร์มีลักษณะเป็นการเผาไหม้ที่มีชั้นเชื้อเพลิงบาง อากาศไหลผ่านจากด้านล่างขึ้นด้านบน ระบบแบบนี้ต้องการการป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง มีอากาศส่วนใหญ่ไหลผ่านตะแกรงชั้นฟืนขึ้นเชื้อเพลิง ความดันตกคร่อมค่อนข้างต่ำ และมีค่าคงที่เนื่องจากความหนาชั้นเชื้อเพลิงคงที่ประมาณ 100 - 200 มิลลิเมตร การควบคุมอากาศจึงไม่ยาก อากาศอีกส่วนฉีดเข้าเพิ่มเหนือชั้นเชื้อเพลิงเพื่อช่วยในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ ลักษณะของชั้นเชื้อเพลิงส่วนบนเป็นเชื้อเพลิงป้อนเข้าไปใหม่รับความร้อนด้วยการพาจากก๊าซร้อนที่ไหลขึ้นเกิดการทำแห้ง ที่ชั้นต่อมาความร้อนทำ

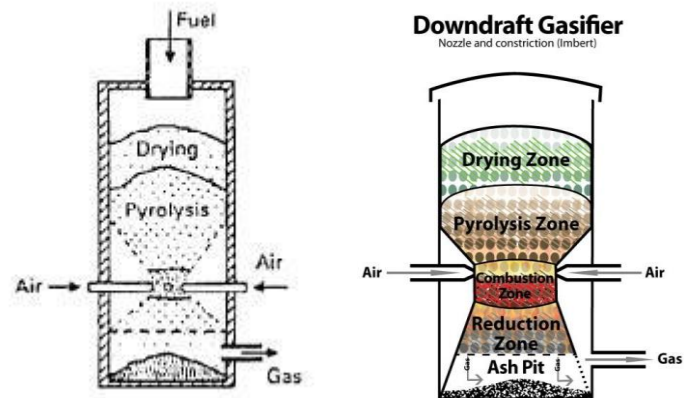
ให้เกิดการขบสารถะเหยตามกระบวนการไพโรไลซิสเพราะก๊าซที่ชั้นนี้มีออกซิเจนอยู่น้อย เนื่องจากออกซิเจนถูกใช้ในการเผาไหม้ในชั้นด้านล่างไปแล้วในชั้นถ่านชาร์ที่ช่วงความหนาประมาณ 50 – 100 มิลลิเมตร เหนือตะกรับ ในชั้นถ่านชาร์จะแยกออกเป็นชั้นออกซิเดชั่น และชั้นรีดักชั่น ซึ่งเกิดอุณหภูมิสูงสุดบริเวณนี้ ชั้นสุดท้ายที่ติดตะกรับคือชั้นเศษเถ้า หากอุณหภูมิเศษเถ้าสูงกว่าจุดอ่อนตัวอาจเกิดซีเถ้าหลอมติดตะกรับเตาได้



ภาพที่ 7 Stoker Furnace

### 1.3) เตาเผาแบบก๊าซไหลลง

ระบบการเผาไหม้ที่ใช้ชั้นเชื้อเพลิงหนาขนาดเล็ก ขึ้นใช้กับคริวเรือนหรือร้านค้าทั่วไป ซึ่งมีข้อดีคือ ไม่จำเป็นต้องป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง และมีฝุ่นควันน้อย

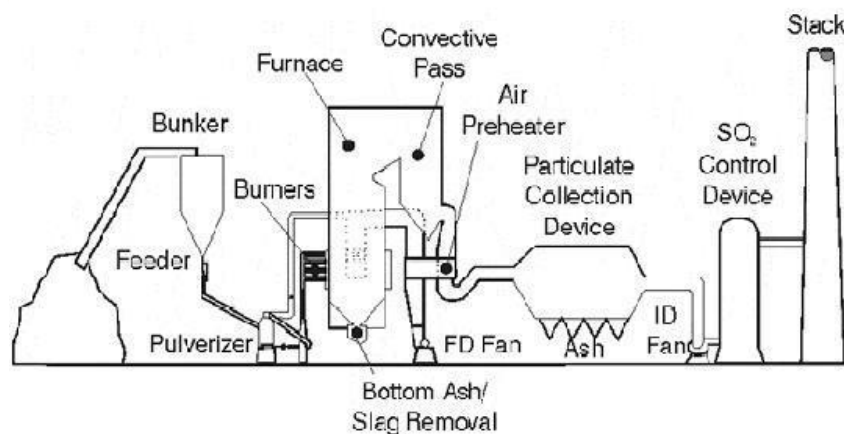


ภาพที่ 8 ตัวอย่างเตาแบบไหลลง

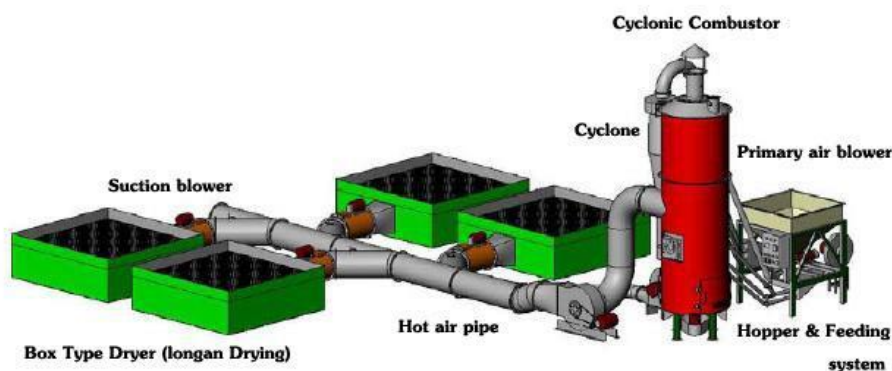
ที่มา: <http://engin1000.pbworks.com/w/page/18942701/Gasifier%20Go-Kart>

## 2) การเผาไหม้แบบชั้นเชื้อเพลิงแขวนลอย

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งแขวนลอย (Suspension burning) ใช้เชื้อเพลิงที่ผ่านการบดโม้เป็นผงขนาดเล็กแล้วเป่าไปกับอากาศผ่านรูเข้าไปในเตาเผาที่มีปริมาตรมากพอที่จะเผาไหม้อนุภาคเชื้อเพลิงเหล่านี้จนหมดได้ก่อนปล่อยออกจาก



ภาพที่ 9 ตัวอย่างระบบเตาเผาไหม้แขวนลอย



ภาพที่ 10 เตาเผาแบบเชื้อเพลิงแขวนลอย

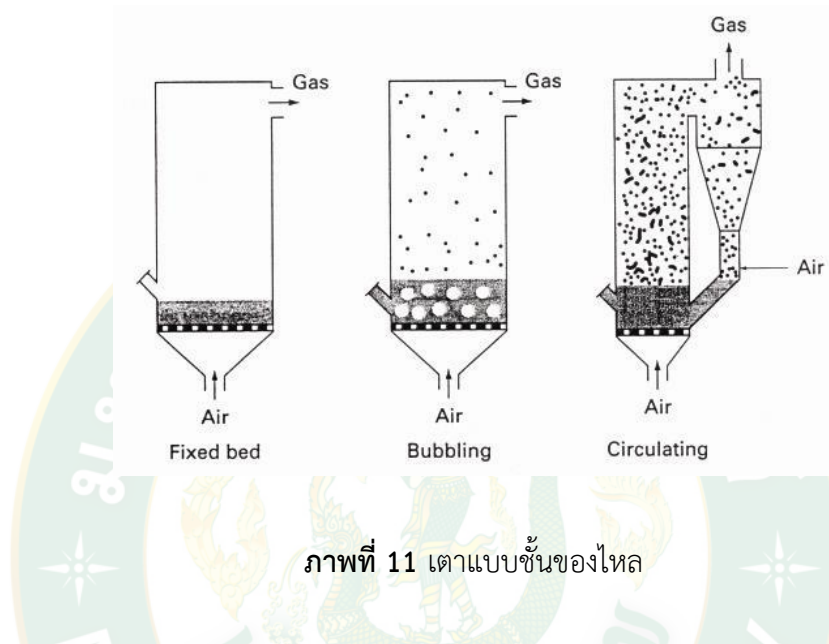
ที่มา: ญัฐวุฒิ และคณะ (2551)

### 3) การเผาไหม้แบบชั้นของไหล

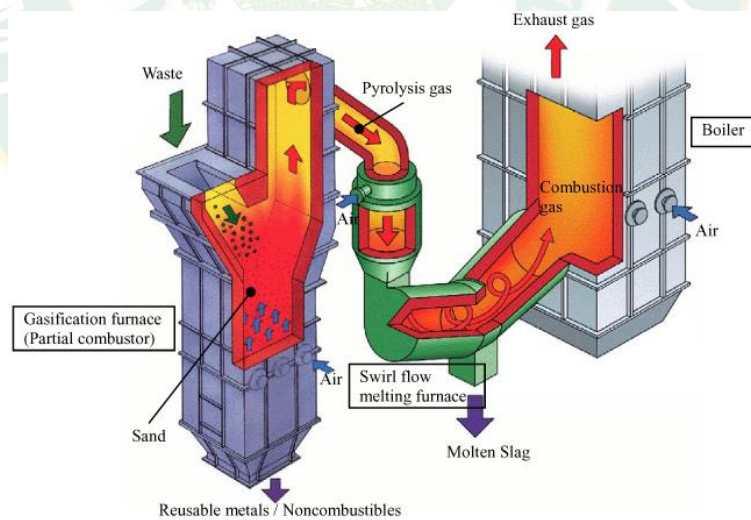
การทำให้มีสถานะเสมือนของไหล (fluidization) หมายถึง การทำให้กลุ่มเม็ดของแข็งขนาดเล็กเปลี่ยนไปมีสถานะคล้ายของไหลโดยการสัมผัสกับก๊าซหรือของเหลวในชั้นของไหล (fluidized bed) แรงแม่ถ่วงที่กระทำต่อน้ำหนักเม็ดของแข็งจะถูกต้านด้วยแรงจากการไหลขึ้นของก๊าซทำให้เม็ดของแข็งอยู่ในสถานะกึ่งแขวนลอย เพื่อให้เข้าใจถึงการเกิดสถานะชั้นของไหล ให้ลองจินตนาการ การไหลของก๊าซ หรืออากาศผ่านชั้นกลุ่มเม็ดของแข็งที่กองอยู่บนตะแกรงพรุน ภายในช่องท่อความเร็วของก๊าซที่เพิ่มสูงขึ้น จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเหล่านี้ โดยที่ความเร็วก๊าซต่ำ ๆ กลุ่มเม็ดของแข็งจะอยู่นิ่งกับที่ตามปกติบนพื้นตะแกรง เมื่อความเร็วสูงขึ้นเรื่อย ๆ แรงแยกบน เม็ดของแข็งเพิ่มขึ้นจนกระทั่งทำให้เม็ดของแข็งยกตัว ชั้นเม็ดของแข็งขยายตัวออก อยู่ในสภาพกึ่งแขวนลอยคล้ายของเหลวกำลังเดือด หากเพิ่มความเร็วก๊าซขึ้นไปอีก แรงก็จะมีมากพอที่จะเป่าเม็ดของแข็งเหล่านี้ให้หลุดออกไปเลยได้

การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งในชั้นของไหล ใช้ได้กับเชื้อเพลิงที่ต้องลดขนาดมาบ้าง อุณหภูมิในชั้นของไหลค่อนข้างต่ำประมาณ  $815 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากความจุความร้อนของชั้นวัสดุสูง การเผาไหม้จึง เสถียรที่อุณหภูมิไม่สูงมาก ระบบการเผาไหม้ในชั้นของไหลจะมีขนาดเล็กกว่าระบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง หรือระบบแขวนลอย แต่จะมีความดันตกคร่อมสูงกว่า

การป้อนเชื้อเพลิงสามารถทำได้จากด้านบน ด้านข้าง หรือด้านล่างของเตา ระบบธรรมดาทั่วไป จะเป็นแบบชั้นของไหลฟองอากาศ (Bubbling fluidized bed) ทำการเผาไหม้ที่ความดันบรรยากาศ มีท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และช่องว่างในเตาด้านบนสำหรับการเผาไหม้สารระเหยและอนุภาคเชื้อเพลิงขนาดเล็กการเผาไหม้ในชั้นของไหล



ภาพที่ 11 เตาแบบชั้นของไหล



ภาพที่ 12 Kawasaki Fluidized Bed Gasification and Melting System

ที่มา: [http://www.gec.jp/waste/data/waste\\_C-1.html](http://www.gec.jp/waste/data/waste_C-1.html)

### ข้อดี

- 1) การกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากการผสมกันของของแข็งอย่างรุนแรงภายในชั้นของไหลทำให้ไม่มีจุดร้อนมากที่ใดที่หนึ่งเป็นพิเศษ (no hot spots)
- 2) พื้นที่แลกเปลี่ยนระหว่างก๊าซกับของแข็งมีมากเพราะขนาดเม็ดของแข็งเล็กทำให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนสูงระหว่างชั้นอนุภาคของแข็งกับพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน
- 3) การเผาไหม้แบบนี้สามารถใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด ที่มีคุณภาพแตกต่างกันมากได้ ทั้งขนาด รูปร่าง ความชื้น ค่าความร้อน และสถานะ เนื่องจากอุณหภูมิเผาไหม้ไม่สูงมากจึงมีการเกิดออกไซด์ของไนโตรเจนน้อย
- 4) ในชั้นการไหลยังสามารถผสมหินปูน เพื่อดักจับออกไซด์ของกำมะถันได้ ทำให้มีมลพิษน้อย

### ข้อเสีย

- 1) มีปริมาณผงฝุ่นอนุภาคแขวนลอยมาก ทำให้จำเป็นต้องใช้เครื่องดักจับของแข็งหรืออุปกรณ์ทำความสะอาดก๊าซ
- 2) อนุภาคของแข็งในชั้นของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงซึ่งจะมีผลต่อการสึกหรอของภายในห้องเผา เม็ดวัสดุในชั้นของไหลมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดการเกาะรวมตัวกัน ทำให้กลายเป็นก้อนของแข็งใหญ่ไม่ลอย (defluidization) ขวางการไหล และการทำงานที่ไหลดต่ำ ๆ ทำได้ยาก จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีพิเศษเข้ามาช่วย

### พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการเตาชีวมวล ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

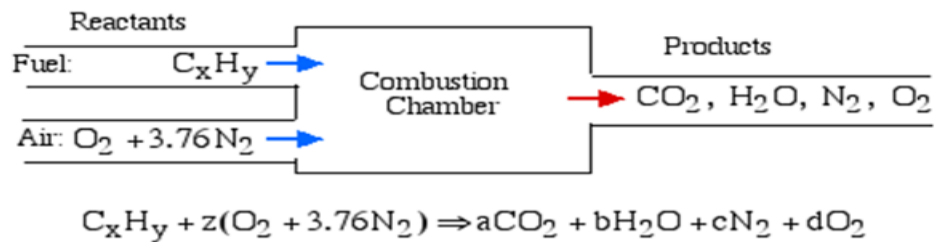
#### 1. อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (จिरพัทธ์, 2556)

ข้อมูลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิง สามารถนำมาคำนวณปริมาณออกซิเจนหรืออากาศที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเชื้อเพลิง (ความต้องการอากาศตามทฤษฎี) ได้ มวลสารสัมพันธ์เป็นความสัมพันธ์โดยโมล ดังนั้นต้องแปลงหน่วยของข้อมูลการวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของกิโกลกรัมโมล ก่อนที่จะนำมาคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี สามารถคำนวณสมดุลระหว่างขาเข้าและขาออกจากระบบได้ ดังนี้

มวลที่เข้าระบบ = มวลที่ออกระบบ

สมการที่ 22

สำหรับกระบวนการเผาไหม้ มวลที่เข้าระบบคือ เชื้อเพลิงชีวมวลและอากาศ ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงคือ ชีวมวลขาออกระบบ ถ้าพิจารณาระบบเผาไหม้มีสภาวะคงที่ คือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาการคำนวณเกี่ยวกับการเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 13



ภาพที่ 13 สมดุลมวลของกระบวนการเผาไหม้

โดยการคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (ทางทฤษฎี) สามารถหาได้จากสมการที่ 13 ในช่วงต้นปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่ต้องใช้ในกระบวนการสันดาปเพื่อทำให้เกิดกระบวนการสันดาปสมบูรณ์ของเชื้อเพลิงจะเรียกว่า อากาศตามทฤษฎี (Theoretical air หรือ Stoichiometric air)

ปริมาณอากาศที่ใช้ในกระบวนการสันดาปเพื่อทำให้เกิดกระบวนการสันดาปของเชื้อเพลิงจะเรียกว่า อากาศที่ใช้จริง (Actual air)

โดยการคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (ทางปฏิบัติ) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A / F_{act} = \frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} = \frac{\rho_{air} \times A \times V_{air}}{m_{fuel}} \quad \text{สมการที่ 23}$$

เมื่อ  $\rho_{air}$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ  $1.2 \text{ kg/m}^3$

A คือ พื้นที่ช่องอากาศไหลผ่าน  $\text{m}^2$

$V_{air}$  คือ ความเร็วลมที่วัดจากพื้นที่ช่องอากาศ  $\text{m/s}$

## 2. อัตราส่วนสมมูล (Equivalence Ratio: ER)

$$ER = \frac{A / F_{actual}}{A / F_{theore}} \quad \text{สมการที่ 24}$$



### 3. เวลาการทำงานรวมกับเตาชีวมวล

เวลาการทำงานรวมกับเตาชีวมวล คือ ผลรวมของเวลาเริ่มในการจุดเตากับเวลาในการใช้งานเตาชีวมวล ผลรวมของเวลาการทำงานรวมกับเตาชีวมวลหาได้จากสมการที่ 25 ดังต่อไปนี้

$$t_{\text{tot}} = t_s + t_o \quad \text{สมการที่ 25}$$

เมื่อ	$t_{\text{tot}}$	คือ เวลาการทำงานรวมของเตาชีวมวล (min)
	$t_s$	คือ เวลาเริ่มต้นการจุดเตาชีวมวล (min)
	$t_o$	คือ เวลาในการใช้งานของเตาชีวมวล (min)

### 4. อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (สุทธิ และ สุเทพ, 2557)

ความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลหาได้จาก การวัดปริมาณของชีวมวลที่ป้อนให้กับระบบเทียบกับเวลาภายใต้สภาวะ การทำงาน อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวลหาได้จากสมการที่ 26

$$\text{FCR} = \frac{m_{\text{fuel}}}{t} \quad \text{สมการที่ 26}$$

เมื่อ	FCR	คือ	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวล (kg/h)
	$m_{\text{fuel}}$	คือ	น้ำหนักเชื้อเพลิง (kg)
	t	คือ	ระยะเวลาการใช้เชื้อเพลิงชีวมวล (h)

5. อัตราสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (Specific Fuel Consumption) เป็นอัตราการใช้เชื้อเพลิงต่ออัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังสมการที่ 27

$$\text{SFC} = \frac{\dot{m}_{\text{fuel}}}{Q_u} \quad \text{สมการที่ 27}$$

เมื่อ	$\dot{m}_{\text{fuel}}$	คือ	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/h)
	$Q_u$	คือ	อัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ได้ (kW)

6. อัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) เป็นสัดส่วนของอัตราความร้อนจากเชื้อเพลิงต่ออัตราความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ ดังสมการที่ 28

$$SEC = \frac{\dot{m}_{\text{fuel}} \text{LHV}}{Q_u} \quad \text{สมการที่ 28}$$

### 7. การประเมินประสิทธิภาพความร้อน

การทดสอบประสิทธิภาพเตาจะใช้วิธีการทดสอบแบบ Boiling test จากพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำต่อพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยจะใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง ตามสมการ 29 – 31

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{\text{fuel}}} \times 100\% \quad \text{สมการที่ 29}$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา, %  
 $Q_{\text{fuel}}$  คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง, kJ  
 $Q_u$  คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์, kJ

ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ หาได้ความร้อนที่ใช้ในการอุ่นและระเหยน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 30

$$Q_u = [m_1 C_p (T_2 - T_1)] + (m_2 h_{fg}) \quad \text{สมการที่ 30}$$

เมื่อ  $m_1$  คือ มวลน้ำเริ่มต้น, kg  
 $m_2$  คือ มวลน้ำที่ระเหย, kg  
 $T_1$  คือ อุณหภูมิน้ำเริ่มต้น, °C  
 $T_2$  คือ อุณหภูมิน้ำเดือด, °C  
 $C_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.186 kJ/kg °C  
 $h_{fg}$  คือ ค่าความร้อนแฝงของการระเหยน้ำ 2,257 kJ/kg

ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง หาได้ตามสมการที่ 31

$$Q_{\text{fuel}} = m_{\text{fuel}} \times \text{LHV} \quad \text{สมการที่ 31}$$

เมื่อ  $m_{\text{fuel}}$  คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด, kg  
 $\text{LHV}$  คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง, kJ/kg

### การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์การลงทุน (Investment analysis) ของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร โดยมีการกำหนดข้อสมมติ การคำนวณหาต้นทุนและรายได้ อายุการใช้งานของระบบทั้งนี้กำหนดเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร มีอายุการใช้งานเท่ากับ 10 ปี จากนั้นกำหนดเงินลงทุน ต้นทุน และรายได้ในแต่ละปี และหาอัตราผลตอบแทน NPV, IRR และ ระยะเวลาคืนทุน (นนงูช, 2544)

เกณฑ์ในการตัดสินใจในการลงทุนจะเป็นตัวชี้วัดความคุ้มค่าของโครงการมี 3 ตัวชี้วัดดังต่อไปนี้

#### 1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) (วันชัย และ ช่อม, 2545)

การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธินั้น คือผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละปีตลอดอายุของโครงการกับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไป หากค่าปัจจุบันที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ แสดงว่าอัตราผลตอบแทนที่ได้รับมีค่าน้อยกว่าต้นทุนของเงินลงทุนหรือผลตอบแทนที่ต้องการ จึงไม่ควรตัดสินใจลงทุน สามารถคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิได้ดังต่อไปนี้

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+i)^t} - \left( \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} + C_0 \right) \quad \text{สมการที่ 32}$$

เมื่อ

NPV = มูลค่าปัจจุบันสุทธิ  
 $B_t$  = ผลตอบแทนในปีที่  $t$  ( $t=1, 2, 3 \dots n$ )  
 $C_t$  = ต้นทุนในปีที่  $t$  ( $t=1, 2, 3 \dots n$ )

$C_0$	=	ต้นทุนในปีเริ่มต้น
$i$	=	อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราส่วนคิดลด (discount rate)
$n$	=	อายุของโครงการ

เกณฑ์การตัดสินใจ คือ การลงทุนเมื่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก และไม่ควรถูกลงทุนถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นลบ

## 2. อัตราผลตอบแทนของโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

เป็นวิธีการคำนวณหาส่วนลดที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของมูลค่าที่จ่ายเท่ากับมูลค่าปัจจุบันของมูลค่าที่ได้รับ หรือทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับศูนย์ โดยถืออัตราส่วนที่คำนวณได้ก็คือ อัตราผลตอบแทนจากการลงทุน มีสูตรในการคำนวณดังนี้

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

สมการที่ 33

เมื่อ

IRR	=	อัตราผลตอบแทนของโครงการ
$B_t$	=	ผลตอบแทนในปีที่ $t$ ( $t=1, 2, 3 \dots n$ )
$C_t$	=	ต้นทุนในปีที่ $t$ ( $t=1, 2, 3 \dots n$ )
$C_0$	=	ต้นทุนในปีเริ่มต้น
$i$	=	อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราส่วนคิดลด (discount rate)
$n$	=	อายุของโครงการ

เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ คือ เปรียบเทียบค่า IRR ที่คำนวณได้กับค่าของอัตราคิดลดหรือค่าเสียโอกาสเงินลงทุนที่เป็นมาตรฐานซึ่งได้กำหนดไว้ก่อนแล้ว ถ้า IRR ที่คำนวณได้สูงกว่าที่กำหนดก็ยอมรับโครงการนั้น ถ้าต่ำกว่าก็ปฏิเสธโครงการ โดยทั่วไป IRR มากกว่าอัตราดอกเบี้ยทั่วไปธุรกิจจะเหมาะสมในการลงทุน

### 3. การประเมินโดยคิดระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PB)

เป็นวิธีประเมินค่าโครงการโดยไม่คำนึงถึงเงินภาษีและดอกเบี้ยเข้ามาวิเคราะห์ทำให้ง่ายต่อการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน (Payback Period) สามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{เงินลงทุน} / \text{ผลกำไรสุทธิรายปี} \quad \text{สมการที่ 34}$$

เมื่อ

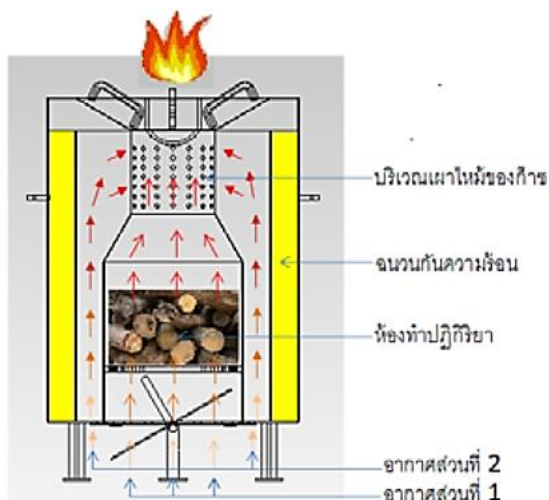
เงินลงทุน คือ มูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนในการซื้อและสร้างเตาชีวมวล  
ผลกำไรสุทธิรายปี คือ ผลต่างกำไรสุทธิต่อปี ที่ได้จากการพัฒนาเตาชีวมวลแบบ  
ป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่องหักจากค่าใช้จ่ายทั้งหมด

เกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ คือ ค่าคำนวณมีหน่วยเป็นปี ถ้าคืนทุนเร็ว แสดงว่ากลุ่มมี  
ประสิทธิภาพในการคืนทุน ยอมรับในโครงการ

#### การตรวจสอบเอกสาร

Leon et al. (1999) ได้ศึกษาการพัฒนาการใช้เตาชีวมวลโดยใช้แท่งเชื้อเพลิงการกลบและ  
แท่งเชื้อเพลิงจากขี้เลื่อย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 - 60 mm ยาว 20 - 30 cm เตาชีวมวลที่ใช้  
ในการทดลองมีขนาดของปล่องสูง 60 cm และ 80 cm ผลการทดลองประสิทธิภาพมากที่สุดคือ  
15.76 % ที่ปล่องสูง 60 cm และต่ำสุด 9.60 % ที่ปล่องสูง 80 cm ของเชื้อเพลิงขี้เลื่อย

สมมาส และคณะ. (2556) ได้ทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW ที่ใช้  
ไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับการใช้เตาก๊าซแบบใช้ก๊าซหุงต้ม (แอลพีจี) เป็นเชื้อเพลิง  
เตาก๊าซหุงต้มที่ใช้ทดสอบเป็นแบบชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำ (KB-5) และประสิทธิภาพสูง (SG5)  
ทดสอบโดยวิธีการต้มน้ำที่ 15 kg เวลา 100 min โดยพบว่าการใช้เตาชีวมวลให้ประสิทธิภาพความ  
ร้อนต่ำกว่าการใช้เตาก๊าซแอลพีจี ชนิดหัวเร่งประสิทธิภาพต่ำและสูงประมาณ 67% และ 60% แต่  
ต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลกลับถูกกว่า 76-80% ดังนั้นการใช้เตาชีวมวลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งของ  
ชุมชนในการลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนและลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกเมื่อเทียบกับใช้เชื้อเพลิง  
ฟอสซิล



ภาพที่ 14 ไดอะแกรมการทำงานของเตาชีวมวลขนาด 20 kW

ที่มา : สมมาส และคณะ. (2556)

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

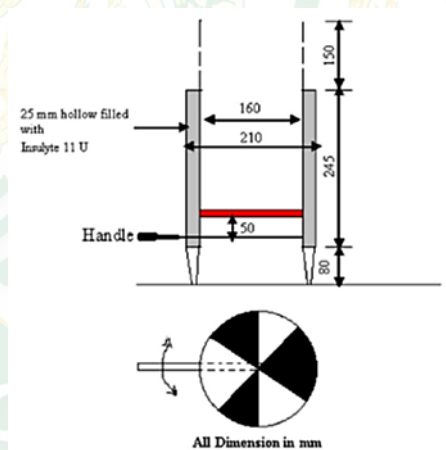
วรารณ. (2557) ได้ศึกษาสมรรถนะการใช้งานเตาก๊าซชีวมวล โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง ลักษณะการทำงานเป็นแบบกะ ใช้พัดลมเป่าอากาศ หัวเตาก๊าซเป็นแบบหัวเดี่ยว และนำไปทดสอบกับการใช้งานในชุมชนจังหวัดลำปาง โดยมีการศึกษาความเร็วลม 4 ระดับ คือ 4.89, 7.41, 9.41 และ 10.21 m/s โดยใช้การปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผลการศึกษาพบว่าก๊าซที่ได้จากเตาชีวมวลมีอุณหภูมิและเปลวไฟใกล้เคียงกับก๊าซหุงต้มแบบใช้ก๊าซแอลพีจี โดยประสิทธิภาพการเผาไหม้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของพัดลม ระยะเวลาที่น้ำเดือดเกิดขึ้นที่ 60, 14, 12, 8 min น้ำเดือดที่อุณหภูมิ 97 °C และรักษาอุณหภูมิของน้ำเดือดได้ 6, 20, 20, 23 min มีการใช้กำลังไฟฟ้า 9-25 W มีอัตราการคืนทุนเฉลี่ย 2 ปี

Belonio (2005) ได้ศึกษาออกแบบสร้างและทดสอบเตาชีวมวล โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง เตาที่ออกแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 cm ความยาวห้องเผาไหม้ 65 cm ส่วนประกอบหลักของเตาก๊าซชีวมวลประกอบด้วย หัวเตา ห้องเผาไหม้ ห้องเก็บขี้เถ้าและชุดป้อนอากาศ เติมเชื้อเพลิงได้ 1 ครั้งต่อการใช้งาน จากการทดสอบการต้มน้ำพบว่าเตาก๊าซชีวมวลมีประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย

13.3% มีระยะเวลาสตาร์ท 1.64 min ระยะเวลาใช้งานเฉลี่ย 50 min และอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงเฉลี่ย 1.59 kg/h

Suvarnakuta et al. (2006) ได้ศึกษาและทดสอบสมรรถนะการทำงานของเตาก๊าซชีววมวล โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับเตาก๊าซหุงต้มที่ใช้ก๊าซแอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง ผลการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพความร้อนเตาสูงสุดเท่ากับ 21.77% เวลาที่ใช้ในการเริ่มต้นสตาร์ทเตา 2 min อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงแกลบมีค่าเฉลี่ย 2.26 kg/h ระยะเวลาของน้ำเริ่มเดือดในการต้มน้ำ 2 kg เท่ากับ 8 min ลักษณะการเผาไหม้และลักษณะของเปลวไฟมีความคล้ายคลึงกับก๊าซแอลพีจี และมีระยะเวลาคืนทุน 5.12 เดือน สามารถประหยัดค่าใช้จ่าย 7,030.44 บาท/ปี

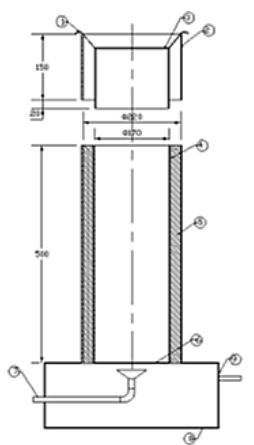
Panwar et al. (2008) ได้ออกแบบเตาชีววมวลขนาด 5 kW ดังรูปที่ 15 สำหรับการประกอบอาหาร โดยใช้วิธีการดูดอากาศธรรมชาติและสามารถใช้เชื้อเพลิงได้แบบหลากหลาย ผลการทดสอบพบว่าเตาชีววมวลมีประสิทธิภาพความร้อน 26.5% สามารถใช้งานได้ง่าย มีมลพิษต่ำ เปลวไฟที่ออกมาคล้ายกับเปลวไฟของก๊าซหุงต้ม มีอุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ย 736°C



ภาพที่ 15 ไดอะแกรมของเตาชีววมวลขนาด 5 kW

ที่มา: Panwar et al. (2008)

Ojolo et al. (2012) ได้ศึกษาออกแบบและทดสอบเตาชีววมวล ดังรูปที่ 16 โดยใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในชุมชนประเทศไนจีเรีย ผลศึกษาพบว่า เตาที่ออกแบบสร้างสามารถนำไปใช้ในชุมชนได้มีระยะเวลาในการจุดติดไฟ ประมาณ 6 min และระยะเวลาการใช้งาน 23 min อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.86 kg/h มีประสิทธิภาพจากการต้มน้ำให้เดือด 10.6 % และต้นทุนในการผลิตอยู่ที่ 70 ดอลลาร์สหรัฐ (2,452.99 THB)



ภาพที่ 16 ไดอะแกรมออกแบบเตาชีวมวล

Vyas et al. (2014) ได้ออกแบบและพัฒนาเตาก๊าซชีวมวล สำหรับการประกอบอาหาร ส่วนประกอบของเตาชีวมวลประกอบด้วยห้องเผาไหม้ ระบบควบคุมอากาศ ช่องอากาศเข้า กระจาย ช่องอากาศผสม ผังเตาด้านนอก และใช้ซังข้าวโพดและขี้เลื่อยอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง ทดสอบหาประสิทธิภาพเตาจากการต้ม น้ำ ปริมาตรห้องเผาไหม้  $0.0109 \text{ m}^3$  เส้นผ่าศูนย์กลาง  $0.178 \text{ m}$  และความสูงของห้องเผาไหม้  $0.441 \text{ m}$  ผลการทดสอบประสิทธิภาพเตาก๊าซชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพดมีประสิทธิภาพเฉลี่ย  $29.59\text{-}33.89 \%$  ขณะเดียวกันเมื่อใช้ขี้เลื่อยอัดแท่งมีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง  $38.68\text{-}40.53 \%$

ชนธกานต์ และคณะ. (2556) ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสามารถใช้งานกับเชื้อเพลิงได้หลากหลายขนาด และลดต้นทุนการผลิต โดยทำการออกแบบและพัฒนาหาขนาดอัตราส่วนห้องเผาไหม้ที่เหมาะสม ทดสอบวัสดุฉนวน และออกแบบเตาก๊าซชีวมวลที่สามารถใช้งานกับเชื้อเพลิงขนาดยาว ผลการทดสอบด้วยการต้ม น้ำพบว่าเตาก๊าซชีวมวลอัตราส่วนห้องเผาไหม้หลักกับห้องเผาไหม้ข้างขนาดที่เหมาะสมที่สุดคืออัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลาง  $2.17$  อัตราความสูง  $1.67$  โดยใช้ปูนซีเมนต์กรุห้องเผาไหม้ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่  $36.58 \%$

วิฑูรย์ และ พงษ์เจต (ม.ป.ป.) ศึกษาการกระจายอุณหภูมิและลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแกลบภายในเตาเผาฟลูอิดเบดรูปรองสีเหลี่ยมจัตุรัส ในการทดลองทำการปรับเปลี่ยนลักษณะห้องเผาไหม้หลายรูปแบบได้แก่ ห้องเผาไหม้ที่ไม่มีการติดตั้งครีบริบและห้องเผาไหม้ที่มีการติดตั้งครีบริบตัววีและตัววีคว่ำแบบแยกตัวที่มุมปะทะการไหล  $30^\circ$  และระยะห่างของครีบริบ ( $0.5H$ ,  $1.0H$  และ  $1.5H$ ) ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการป้อนเชื้อเพลิงแกลบที่  $4.6$ ,  $5.1$  และ  $5.9 \text{ kg/h}$  และปริมาณอัตราการไหลของอากาศที่  $44.3$ ,  $51.6$  และ  $59.8 \text{ kg/h}$  ตามลำดับ การวัดการกระจายตัวของ



อุณหภูมิเลือกวัดตามตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวความสูงของเตาเผาทั้งหมด 11 ตำแหน่ง แก๊สไอเสีย และประสิทธิภาพการเผาไหม้วัดค่าที่บริเวณทางออกของไซโคลน จากการศึกษาทดลอง พบว่าห้องเผาที่มีการติดตั้งครีบบัลดให้ผลของระดับอุณหภูมิที่สูงและเสถียรกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้งครีบบัลด ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และกลุ่มแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ที่พบมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานการเผาไหม้ชีวมวล แนวโน้มของประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้นเมื่อระยะห่างของครีบบัลดมีค่าลดลง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 85-96 % โดยขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศส่วนเกิน, ระยะห่างของครีบบัลด, มุมปะทะและลักษณะของการจัดวางครีบบัลด

ธิติพัทธ์ และคณะ. (2554) การประยุกต์หลักการการเกิดอากาศหมุนควงภายในเตาเผาเชื้อเพลิงชีวมวล สามารถช่วยเพิ่มปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้ โดยลักษณะการหมุนควงของอากาศจะช่วยเพิ่มความเข้มข้นในการผสมคลุกเคล้าของอากาศกับเชื้อเพลิงให้ดียิ่งขึ้น รวมทั้งเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ ผลการศึกษาวิจัยจะพบว่าการประยุกต์ใช้หลักการอากาศหมุนควงภายในเตาเผาสำหรับเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นสามารถช่วยให้กระบวนการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดได้ดียิ่งขึ้น ดังเห็นได้จากระดับอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาที่สูงขึ้นกว่ากรณีเตาเผาแบบทั่วไปที่ไม่มีการประยุกต์ใช้หลักการอากาศหมุนควง และยังช่วยเพิ่มความสมบูรณ์ของกระบวนการการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นโดยสังเกตได้จากปริมาณก๊าซไอเสียที่ลดลง ดังนั้นจึงส่งผลให้เตาเผาที่มีการประยุกต์ใช้หลักการอากาศหมุนควงมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงขึ้น

จากการตรวจสอบงานวิจัย พบว่า โดยส่วนใหญ่เตาจะออกแบบมาในรูปแบบการเติมเชื้อเพลิง เป็นเตาที่ใช้กับชีวมวล และเชื้อเพลิงส่วนใหญ่ คือ แกลบ ชังข้าวโพด ยูคาลิปตัส แถ่ง เชื้อเพลิงชีเลื่อย ประสิทธิภาพความร้อนเฉลี่ย 20 % การป้อนเชื้อเพลิงจะใช้ครั้งเดียว พบว่า เตาที่มีการควบคุมการป้อนอากาศ (fan force) มีประสิทธิภาพดีกว่า ระบบการไหลเวียนธรรมชาติ (natural draft) เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.26 – 24.38 และยังไม่มีการนำเชื้อเพลิงอัดเม็ดมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ของเตาชีวมวล นอกจากจะใช้เชื้อเพลิงอัดเม็ดในอุตสาหกรรมใหญ่ๆแล้ว ยังสามารถนำมาใช้ในชุมชนเพื่อประกอบอาหารต่าง ๆ แต่ต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาเตาชีวมวลที่สามารถใช้งานได้อย่างต่อเนื่องนี้ขึ้นมา แล้วเตาชีวมวลส่วนใหญ่จะมีควันทันเป็นจำนวนมาก ไม่ค่อยเหมาะสำหรับนำไปใช้ในครัวเรือน งานวิจัยนี้จริงมีแนวคิดในการออกแบบ และพัฒนาเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร สามารถปรับการป้อนอากาศได้ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับครัวเรือน หรือกิจการโรงแรมต่าง ๆ ได้

### บทที่ 3

## อุปกรณ์และการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยการประเมินประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร ได้ดำเนินการออกแบบ พัฒนาและสร้างเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ประเมินสมรรถนะและเศรษฐศาสตร์เตาชีวมวล โดยในบทนี้จะเน้นการอธิบายถึงเครื่องมือ อุปกรณ์ วัสดุ และเครื่องมือวัด ที่ใช้ในงานวิจัย ตลอดจนวิธีดำเนินการทดลอง รายละเอียดเนื้อหาบทนี้ มีดังต่อไปนี้

### เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

#### 1. เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วย ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ห้องเผาไหม้ ชุดเติมอากาศ และชุดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ดังภาพที่ 17 เตาชีวมวลมีรูปทรงกระบอก ขนาดความสูงไม่เกิน 55 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm ฉนวนเตาใช้เหล็กแผ่นขนาด 3 mm ม้วนเป็นทรงกระบอก มีฉนวนปูนกันความร้อน 5 cm ห้องเผาไหม้มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวย เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm เจาะรูขนาด 5 mm ส่วนล่างของตัวเตามีช่องสำหรับระบายไถ้ออก ด้านข้างมีท่อขนาด 2 inch สำหรับเติมอากาศโดยใช้พัดลมเติมอากาศขนาด 2 inch 220 V ทำหน้าที่เป็นตัวป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้และควบคุมอัตราการไหลของอากาศ จำนวน 2 ตัว โดยมีวาล์วเปิดปิดลม และบริเวณตรงกันข้ามท่อเติมอากาศด้านข้างของตัวเตาชั้นนอกมีชุดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง มีช่องใส่เชื้อเพลิง สำหรับเก็บหรือพักเชื้อเพลิงไว้ก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ จากนั้นมีชุดลำเลียงเชื้อเพลิง โดยใช้สกรูลำเลียงที่มีกำลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์ เป็นอุปกรณ์สำหรับขนถ่ายเชื้อเพลิงไปยังห้องเผาไหม้ เพื่อให้มีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง ประกอบด้วย เกลียวลำเลียงที่มีขนาด 5 inch ระยะพิตช์ของใบเกลียว 7 cm รางลำเลียงยาว 1 m และขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขนาด 1 hp มีการควบคุมอัตราการป้อนเชื้อเพลิงด้วยอินเวอร์เตอร์ปรับความถี่กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์ควบคุมการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบ ขนาด 4.2A 1 phase 200 V



ภาพที่ 17 เตาชีวมวลชนิดบ้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

## 2. เครื่องมือวัดอุณหภูมิ

### 1) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

การวัดอุณหภูมิในการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวล จะใช้เทอร์โมคัปเปิล ที่ใช้งานเป็นแบบ Chromel-Alumel ชนิด K ชนิดทนความร้อนได้สูงสุด 800 °C ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.7 mm และความยาว 150 mm แสดงดังภาพที่ 18 ต่อเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูล มีช่องบันทึกข้อมูลสูงสุด 6 ช่อง มีการเก็บข้อมูลทุก 5 min วัดอุณหภูมิทั้งหมด 5 จุด ประกอบไปด้วย อุณหภูมิน้ำ อุณหภูมิภายในเตา 3 จุด และอุณหภูมิที่ปล่องควัน



ภาพที่ 18 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K

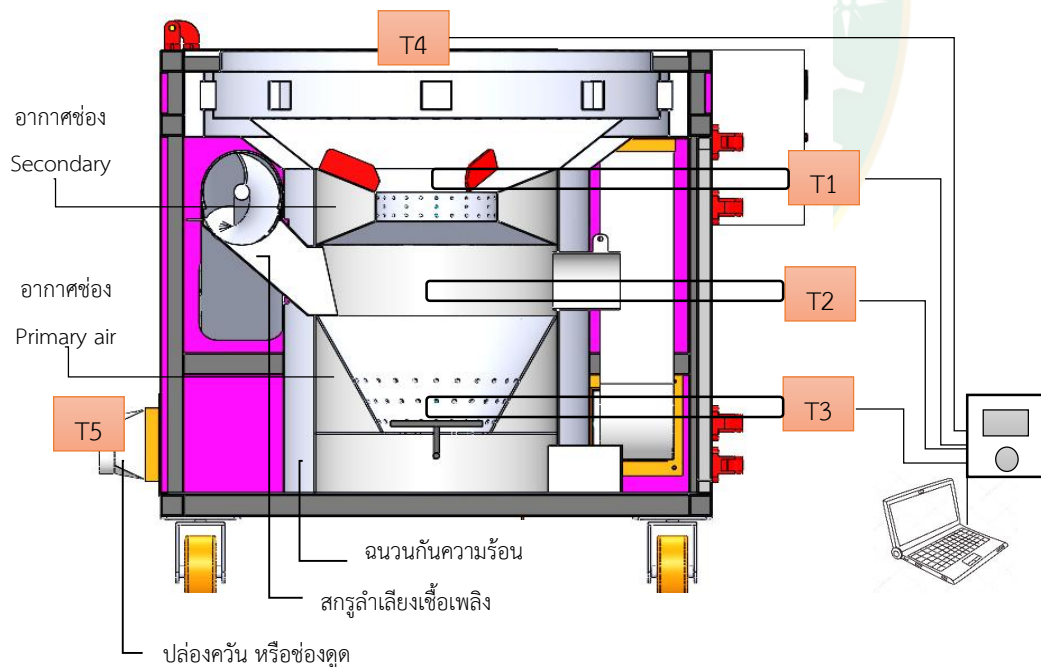
### 2) เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger)

เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ทำหน้าที่บันทึกผลการวัดอุณหภูมิ โดยมีช่องสำหรับเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิล ทั้งหมด 6 ช่อง แสดงดังภาพที่ 19 และสามารถอ่านค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล ชนิด Type K อยู่ในช่วง 0-1370 °C โดยมีความแม่นยำอยู่ที่  $\pm 0.1\%$

การวัดอุณหภูมิในการทดลอง ทำการวัดอุณหภูมิด้วยกัน 5 จุด ได้แก่ T1 คือ อุณหภูมิ ส่วนบนของเตา T2 คือ อุณหภูมิส่วนกลางของเตา T3 คือ อุณหภูมิส่วนล่างของเตา T4 คือ อุณหภูมิ น้ำในกระทะ T5 คือ อุณหภูมิปล่องควัน แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 19 เครื่องบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 20 ไดอะแกรมจุดวัดอุณหภูมิในการทดลอง

### 3) เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด

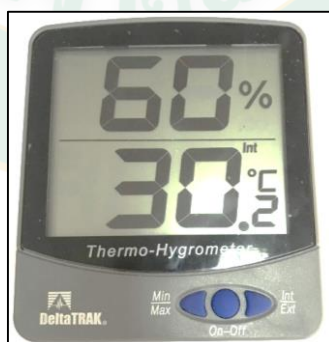
เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (อินฟราเรด) BeneTech รุ่น GM320 ผ่านการรับรองมาตรฐาน CE สามารถวัดอุณหภูมิพื้นผิวอยู่ในช่วง 50-1,000 °C มีความแม่นยำในการวัดที่  $\pm 1.5$  °C ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของผนังเตาชีวมวลภายใน และภายนอกเตา



ภาพที่ 21 เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด

### 4) เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น

เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น (Thermo-hygrometer) ยี่ห้อ Delta Trak รหัสสินค้า Model 13307 รุ่น Jumbo Display ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0-50 °C และช่วงการวัดความชื้น 20-90% ทำหน้าที่ในการวัดอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศแวดล้อม



ภาพที่ 22 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้น

### 3. เครื่องมือวัดน้ำหนักชีวมวลและน้ำ

#### 1) เครื่องชั่งน้ำหนัก

การชั่งน้ำหนักเชื้อเพลิงและน้ำสำหรับการทดสอบต้มน้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัลเป็นผลิตภัณฑ์ของ CST รุ่น CDR-30 พิกัดกำลัง 30 kg ความละเอียด 1 g อุณหภูมิใช้งานที่ 5-40 °C ดังแสดงในภาพ 23



ภาพที่ 23 เครื่องชั่งน้ำหนัก

### 4. เครื่องมือวัดความเร็วลมและวิธีการวัด

#### 1) เครื่องป้อนอากาศ (Air blower)

เครื่องป้อนอากาศใช้สำหรับป้อนอากาศเข้าสู่ Combustion zone ของเตาชีวมวล โดยใช้เครื่องป้อนอากาศยี่ห้อ Electric Blower ขนาด 2 นิ้ว 220 V กำลังไฟฟ้า 150 W 1.0 AMP ความเร็วรอบ 3,000/3600 rpm อัตราการไหลเชิงปริมาตร 0.72-3 m<sup>3</sup>/min แสดงดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 พัดลมป้อนอากาศ

## 2) เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด

การวัดอัตราการป้อนอากาศเข้าเตาชีวมวล ใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัดยี่ห้อ Lutron Electronic รุ่น YK-80 AM แบบใบพัดโลหะ สามารถวัดความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.4-35 m/s ความละเอียด 0.1 m/s ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 2\%$  อุณหภูมิช่วงที่ใช้งานอยู่ที่ 0-60 °C ความละเอียด 0.1 °C แสดงดังภาพที่ 25 การวัดใช้ท่อพีวีซีขนาด 5.08 cm (2 นิ้ว) ต่อร่วมกับหน้าแปลนพีวีซี 2 ด้าน ขวางเครื่องวัดอัตราการไหลตรงกลางและประกอบเข้ากับท่อลำเลียงอากาศ



ภาพที่ 25 เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด

## 5. เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า

### 1) แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter)

แคลมป์มิเตอร์ (Clamp Meter) ใช้สำหรับวัดค่ากระแสที่เกิดขึ้นในวงจรหรือในระบบไฟฟ้า โดยสามารถวัดค่ากระแสได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ โดยที่ไม่จำเป็นต้องสัมผัสกับสายไฟโดยตรง จะใช้เครื่องตรวจวัดกำลังไฟฟ้าชนิดดิจิตอลมัลติมิเตอร์ เป็นผลิตภัณฑ์ของ Chauvin Arnoux รุ่น F05 ดังแสดงในภาพที่ 26 สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟารีแอกทีฟ กำลังไฟฟ้าปรากฏ ค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ความถี่และความต้านทาน โดยวัดแรงดันได้ 600 Vac/dc และกระแสได้ 400 lac/dc



ภาพที่ 26 เครื่องตรวจวัดกระแสไฟฟ้า

## 6. เครื่องมือวิเคราะห์คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์

1) คู่มือเทียบสี (RHS colour chart) รุ่นที่ 6 Sixth edition 2015 สำหรับการเปรียบเทียบสีของวัสดุทดสอบกับมาตรฐานของสี ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 คู่มือเทียบสี RHS colour chart

### เชื้อเพลิงชีวมวลและการเตรียมเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง 2 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด และชังข้าวโพดอัดเม็ด ซึ่งเป็นชีวมวลประเภทวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร โดยคุณสมบัติทางเคมีของเชื้อเพลิงนำไปทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวิจัยของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อำเภอมะแมะ จังหวัดลำปาง โดยผลการวิเคราะห์แบบปริมาณของชังข้าวโพดและชังข้าวโพดอัดเม็ดทั้ง 2 ชนิด มีรายละเอียดดังนี้

#### 1. ชังข้าวโพดอัดเม็ด (wood pellets)

ชังข้าวโพดอัดเม็ดที่ใช้ในการทดลองซื้อมาจากโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลอัดแท่งจากชังข้าวโพด สหกรณ์การเกษตรแม่แจ่ม จำกัด ดังแสดงในภาพ 28 ชังข้าวโพดอัดเม็ดมีความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $1,292 \text{ kg/m}^3$  มีค่าความร้อนอยู่ที่  $14.26 \text{ MJ/kg}$  ความชื้น  $8.37\%$  และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.8 \text{ cm}$  ความยาว  $4 \text{ cm}$  ตากแดดเพื่อไล่ความชื้นบางส่วนออก ลักษณะของชังข้าวโพดอัดเม็ด แสดงดังภาพที่ 28 ผลการวิเคราะห์แบบปริมาณของชังข้าวโพดอัดเม็ด แสดงในตารางที่ 3





ภาพที่ 28 ซังข้าวโพดอัดเม็ด

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซังข้าวโพดอัดเม็ด

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

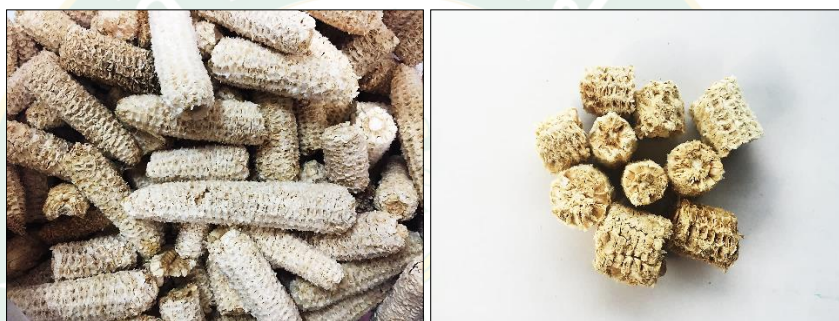
โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของชีวมวลจะประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก และมี ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) เพียงเล็กน้อย สำหรับผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพดอัดเม็ดแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพดอัดเม็ด

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Carbon (%)	ASTM D5373-14 <sup>E2</sup>	47.88
Hydrogen (%)	ASTM D5373-14 <sup>E2</sup>	6.25
Nitrogen (%)	ASTM D5373-14 <sup>E2</sup>	0.49
Sulphur (%)	ASTM D4239-14 <sup>E2</sup>	0.07
Oxygen (%)	(Plus errors)	45.33

## 2. ชังข้าวโพด (Corn cob)

ชังข้าวโพดเป็นวัสดุที่เหลือทิ้งจากการทำไร่ข้าวโพดเพื่อนำไปทำอาหารสัตว์ โดยส่วนใหญ่แล้วเกษตรกรจะมีวิธีการจัดการวัสดุเหลือทิ้งนี้ด้วยวิธีการเผา ซึ่งทำให้เกิดปัญหาอื่น ๆ ตามมา เช่น เกิดปัญหาหมอกควัน มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ดังนั้นการนำชังข้าวโพดมาแปรรูปเป็นพลังงานเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ในการทดลองชังข้าวโพดที่ใช้มีขนาด 20 - 30 mm ความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ  $373.02 \text{ km/m}^3$  มีค่าความร้อนอยู่ที่  $15.51 \text{ MJ/kg}$  ความชื้น 13.21% การเตรียมตัวอย่างเริ่มจากการนำตัวอย่างชังข้าวโพดมาลดความชื้นด้วยการตากให้แห้งด้วยแสงอาทิตย์ให้ความชื้นลดลง ลักษณะของชังข้าวโพดแสดงดังภาพที่ 29 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชังข้าวโพดแสดงในตารางที่ 5 สำหรับผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุแสดงในตารางที่ 6



ภาพที่ 29 เชื้อเพลิงชังข้าวโพด

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของชังข้าวโพด

การวิเคราะห์แบบประมาณ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Moisture (%)	ASTM D3302 M-15	13.21
Ash (%)	ASTM D7582-15	1.85
Volatile matter (%)	ASTM D7582-15	73.42
Fixed carbon (%)	ASTM D7582-15	11.53
Gross calorific value (MJ/kg)	ASTM D5865-13	15.51
Net calorific value (MJ/kg)	ASTM D5865-13	13.49

โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของชีวมวลจะประกอบไปด้วย คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบหลัก และมีไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) เพียงเล็กน้อย สำหรับผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	วิธีมาตรฐาน	ผลการวิเคราะห์
Carbon (%)	ASTM D5373-14 <sup>E2</sup>	47.96
Hydrogen (%)	ASTM D5373-14 <sup>E2</sup>	6.20
Nitrogen (%)	ASTM D5373-14 <sup>E2</sup>	0.43
Sulphur (%)	ASTM D4239-14 <sup>E2</sup>	0.06
Oxygen (%)	(Plus errors)	45.35

#### เครื่องเทศสำหรับการใช้ในการทดสอบ

วิสาหกิจชุมชนกลุ่มทำขนมจีนบ้านบวกเปา “น้ำพริกแกง ตราแม่อำพร” ต.หนองแห้ง อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ ปัจจุบันได้ดำเนินการผลิตและจัดจำหน่ายน้ำพริกแกงทางภาคเหนือ จำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ ปัจจุบันมีการส่งออกพริกแกงเป็นหลัก จากการสำรวจกระบวนการผลิตพริกแกงของวิสาหกิจชุมชน พบว่าเครื่องเทศหลักที่ใช้ เช่น พริก ลูกจันทน์ ลูกกระวาน กานพลู อบเชย ลูกผักชี ยี่หระ ต้องนำไปคั่วไฟอ่อนให้หอมก่อน โดยแยกกันคั่วทีละอย่าง เพราะเครื่องเทศแต่ละอย่างมีขนาดและความหนาต่างกัน จึงใช้เวลาในการคั่วให้หอมเหลืองไม่เท่ากัน อีกทั้งยังมีวิธีการคั่วแตกต่างกัน พริกแห้งนำไปคั่วได้เลยแต่จะใช้ระยะเวลาสั้นก่อนเครื่องเทศชนิดอื่น ลูกจันทน์ ทูบเอาเปลือกแข็งออกก่อน แล้วบุนเนื้อในให้พอแตกก่อนนำไปคั่ว ลูกกระวาน นำไปคั่วก่อนแล้วแกะเปลือกออกใช้แต่เม็ดข้างใน กานพลู เลือกเอาเกสรออกก่อนนำไปคั่ว อบเชย หักเป็นชิ้นเล็ก ๆ ก่อนนำไปคั่ว ลูกผักชีและยี่หระ นำไปคั่วได้เลย ส่วนพริกไทยเม็ดนั้นนำมาคั่วหรือไม่ต้องผ่านการคั่วก็ได้ สามารถนำไปโขลกได้เลย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกการทดสอบการคั่วพริก ดังแสดงในภาพที่ 30 เนื่องจากพริกเป็นเครื่องเทศหลักในการผลิตและจำหน่ายของวิสาหกิจชุมชน และจากการสำรวจพบว่าพริกจะมีการใช้ในปริมาณที่ค่อนข้างมาก และใช้ระยะเวลาในการคั่วมากกว่าเครื่องเทศอื่น ๆ โดยพริกแห้งมีความชื้น 10.15 %wb ในการคั่วพริกจะใช้ระยะเวลาประมาณ 30 นาทีต่อครั้ง



ภาพที่ 30 เครื่องเทศหลักที่ใช้ในวิสาหกิจชุมชน



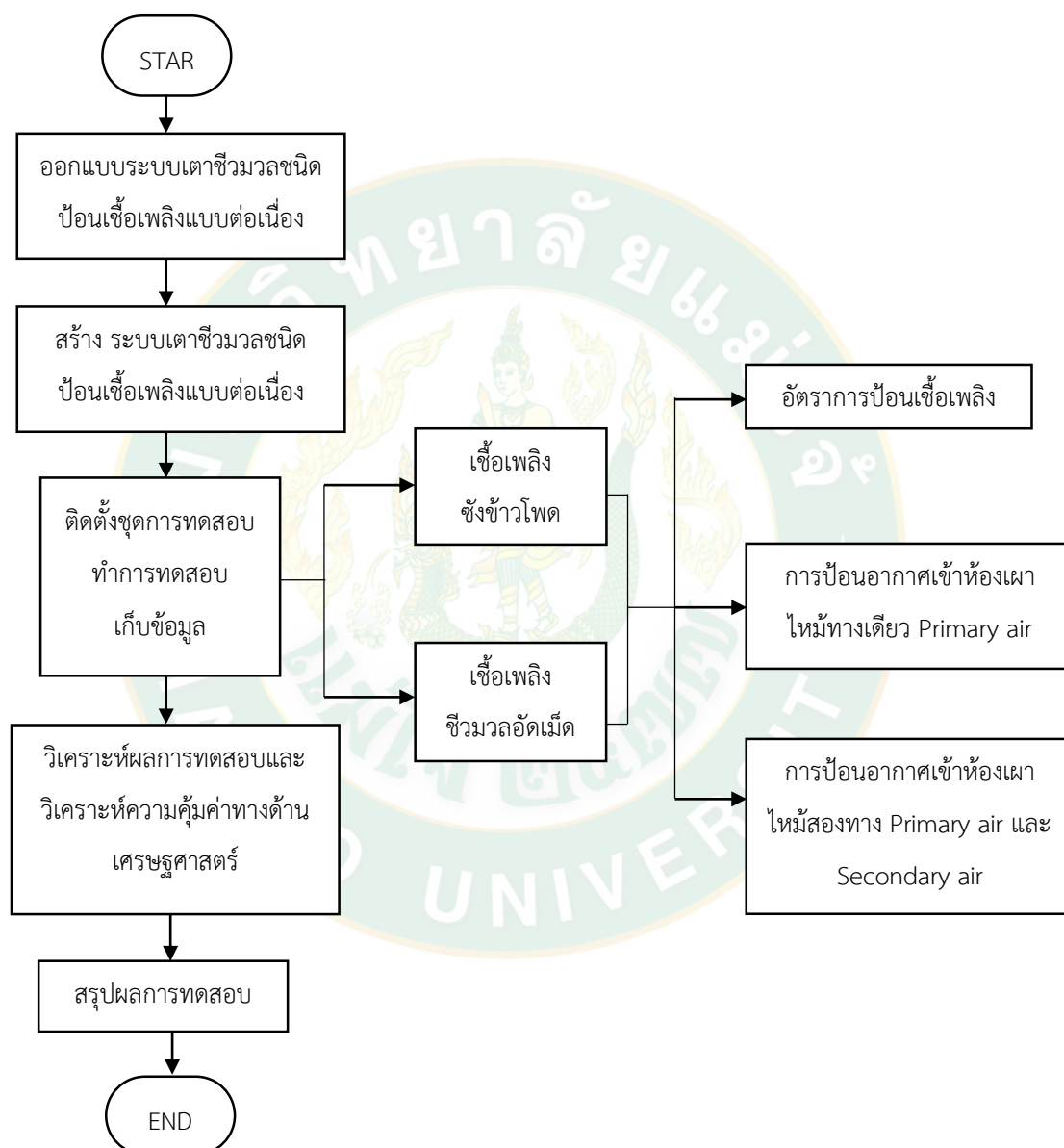
ภาพที่ 31 ผลิตภัณฑ์พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน

### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษานี้จะทำการออกแบบ สร้าง และทดสอบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร เพื่อใช้ทดแทนเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม ที่วิสาหกิจชุมชนใช้ในปัจจุบัน โดยมีขั้นตอนหลักๆ ดังต่อไปนี้

- 1) การออกแบบและสร้างเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ให้สามารถปรับค่าอัตราการไหลของอากาศ มีระบบป้อนอากาศ และสามารถป้อนเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง
- 2) การทดสอบสมบัติเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง
- 3) ประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง
- 4) ประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์
- 5) ประเมินความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด และชังข้าวโพดอัดเม็ด ศึกษาในเรื่องของ อัตราการป้อนอากาศ การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว และการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้สองทาง รายละเอียดของการทดสอบสามารถสรุปขั้นตอนการดำเนินการการศึกษา ได้ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ภาพรวมการดำเนินการวิจัย

### 1. วิธีการออกแบบเตาชีวมวล

การออกแบบระบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย การทดสอบเราจะทำการทดสอบเก็บข้อมูลการคั่วเครื่องเทศ โดยเครื่องเทศ

ที่ทำการเลือกทดสอบ คือ ฟริก เนื่องจากฟริกเป็นวัตถุดิบหลักของชุมชน จากนั้นเมื่อได้เงื่อนไขแล้ว ในการคั่วแล้ว จึงนำมาออกแบบ และสร้างเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง และทำการสมรรถนะเตาชีวมวลโดยการต้มน้ำ จากนั้นเมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมแล้ว จะทำการคั่ว ฟริก โดยใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องนี้ ทำการทดสอบการคั่วต่อไป รายละเอียดการออกแบบ และสร้าง จะนำเสนอในบทที่ 4 อีกครั้ง

## 2. วิธีการทดสอบเตาชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพดและซังข้าวโพดอัดเม็ด

การดำเนินการทดสอบและการเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์สมรรถนะเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับเตาก๊าซหุงต้มโดยใช้วิธีการต้มน้ำ มีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมความพร้อมของเตาชีวมวล โดยการตั้งอุณหภูมิ ปรับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง และอัตราการป้อนอากาศให้ได้ตามต้องการ รวมไปถึงการเตรียมความพร้อมของเครื่องบันทึกข้อมูลด้วย
- 2) นำเชื้อเพลิงซังข้าวโพดใส่ลงไปในห้องป้อนเชื้อเพลิง และทำการจุดเตา จากนั้นนำน้ำใส่ลงไปในกระทะ 23 kg เพื่อทำการทดสอบด้วยการต้มน้ำ (Water Boiling Test) โดยประยุกต์ใช้ตามมาตรฐาน VITA แต่กำหนดเวลาสิ้นสุดการทดลองเมื่อเชื้อเพลิงหมดหมด (ภาณุวันท์, 2546)
- 3) ทำการทดสอบด้วยการต้มน้ำ (Water Boiling Test) โดยบันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 min ซึ่งข้อมูลที่ต้องทำการบันทึกค่า ได้แก่
  - น้ำหนักน้ำเริ่มต้น
  - น้ำหนักน้ำภายหลังการทดสอบ
  - น้ำหนักของเชื้อเพลิง
  - น้ำหนักถ่าน
  - อุณหภูมิของน้ำภายในกระทะ
  - อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้
  - อุณหภูมิของผนังเตา
  - อุณหภูมิอากาศร้อนบริเวณปล่องควัน
  - อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
  - ความชื้นสัมพัทธ์
  - ปริมาณพลังงานไฟฟ้า

ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 2 – 3 โดยเปลี่ยนวัสดุทดสอบจากเชื้อเพลิงซังข้าวโพดเป็นซังข้าวโพดอัดเม็ด เมื่อได้ข้อมูลการทดสอบ Water Boiling Test เสร็จสิ้นแล้ว นำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์สมรรถนะเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

### 3. เงื่อนไขการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการใช้งานเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สำหรับการทดสอบดังกล่าวจะใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ เชื้อเพลิงซังข้าวโพดและซังข้าวโพดอัดเม็ด ในการทดสอบมีตัวแปรที่ควบคุม 3 ตัวแปร คือ

#### 1) อัตราการป้อนเชื้อเพลิง

พิจารณาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงซังข้าวโพดที่  $A/F = 6.256 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$  และพิจารณาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดที่  $A/F = 6.051 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$

การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด ได้แก่ 5.0, 6.5, และ 8.5 kg/h

การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด ได้แก่ 6.2, 9.0, และ 12.9 kg/h

#### 2) อัตราการป้อนอากาศที่ Primary air

พิจารณาอัตราการป้อนอากาศที่ Primary air เมื่อได้เงื่อนไขอัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับการใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดและเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดแล้ว จึงนำมาทดสอบโดยวิธีการป้อนอากาศ

การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด ได้แก่ 117, 132, 147, 161, 176 และ 190 m<sup>3</sup>/h

การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด ได้แก่ 73, 88, 102, 117 และ 131 m<sup>3</sup>/h

#### 3) อัตราการป้อนอากาศที่ Secondary air

เมื่อทำการทดลองดังข้อ 1) และ 2) แล้วนำเงื่อนไขที่ดีที่สุดมาทำการทดสอบโดยการเพิ่มการป้อนอากาศที่ Secondary air อีกหนึ่งทาง

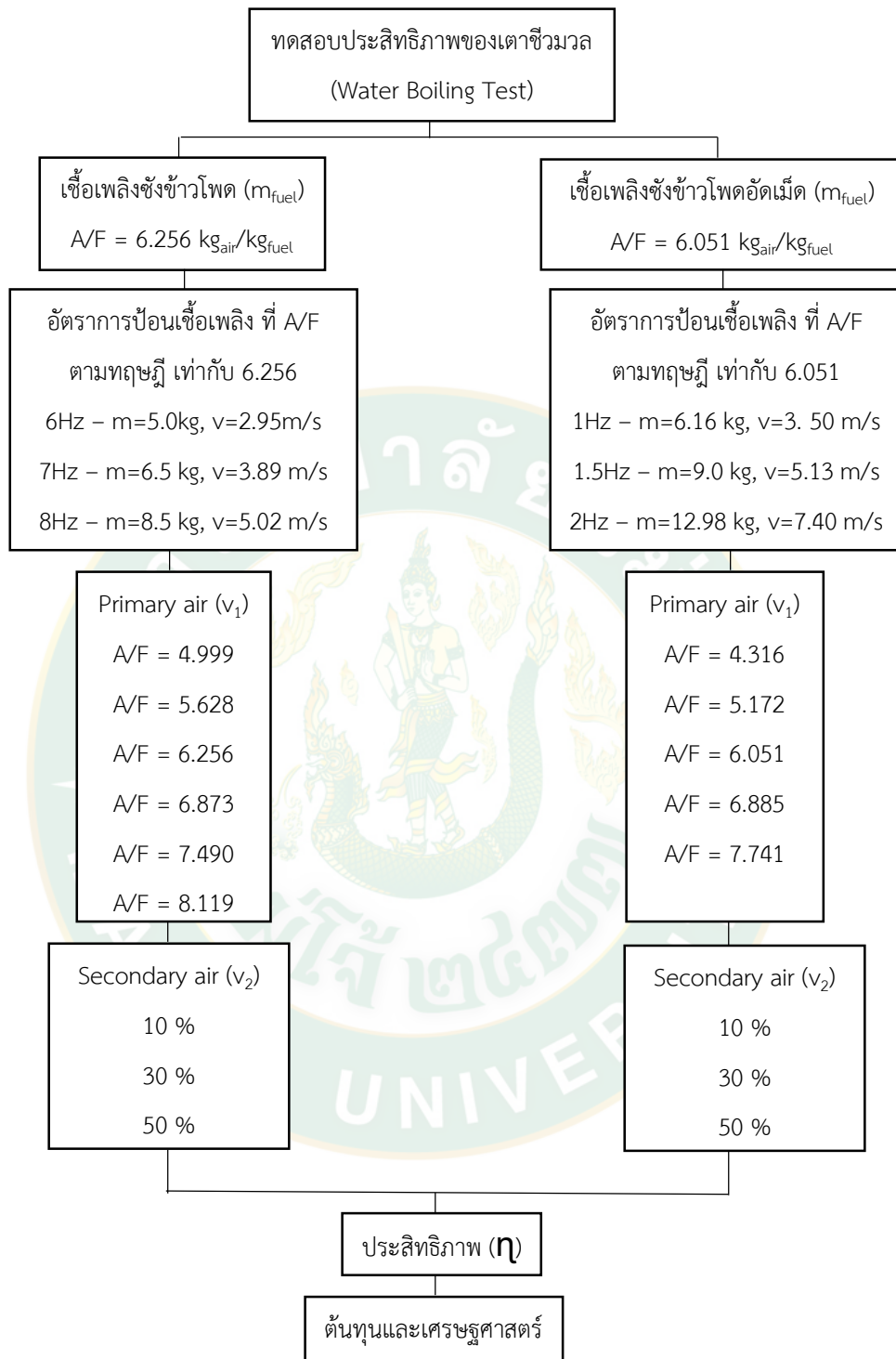
การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพด ได้แก่ 10, 30 และ 50% ของอัตราการป้อนอากาศที่ Primary air ในเงื่อนไขที่ดีที่สุด

การทดสอบโดยใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด ได้แก่ 10, 30 และ 50% ของอัตราการป้อนอากาศที่ Primary air ในเงื่อนไขที่ดีที่สุด

#### 4) การวิเคราะห์ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ในการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นจะแบ่งเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพและทางเคมีเทคนิค การวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลทางเทคนิค จะทำการวิเคราะห์อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน ประสิทธิภาพทางความร้อน ระยะเวลาในการเดือดของน้ำ และอุณหภูมิการเผาไหม้ในเตาชีวมวล

โดยการดำเนินการทดสอบ และการเก็บข้อมูลผลการทดสอบ มีเงื่อนไขการทดสอบสมรรถนะของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องดังแสดงในภาพที่ 33 ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 33 รายละเอียดวิธีการและขั้นตอนการทดสอบเตาชีวมวล



#### 4. วิธีการทดสอบสมรรถนะเตาก๊าซหุงต้ม

การทดสอบสมรรถนะของเตาก๊าซหุงต้มด้วยวิธีการทดสอบ Water Boiling Test โดยเตาก๊าซหุงต้มที่ใช้ในการทดสอบดังภาพที่ 34 เป็นเตาที่มีการใช้เป็นประจำสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ในการทดสอบผู้วิจัยทำการบันทึกข้อมูลทุก ๆ 5 min ซึ่งข้อมูลที่ต้องทำการบันทึกค่า ได้แก่

- น้ำหนักน้ำเริ่มต้น
- น้ำหนักน้ำภายหลังการทดสอบ
- น้ำหนักก๊าซหุงต้มก่อนทำการทดสอบ
- น้ำหนักก๊าซหุงต้มหลังทำการทดสอบ
- อุณหภูมิของน้ำภายในกระทะ
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อม
- ความชื้นสัมพัทธ์

ภายหลังเสร็จสิ้นขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธีการ Water Boiling Test จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์อัตราความสิ้นเปลืองก๊าซหุงต้ม อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน และประสิทธิภาพทางความร้อน



ภาพที่ 34 เตาก๊าซหุงต้มของกลุ่มวิสาหกิจชุมชน

#### 5. การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

หลังจากทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเทคนิคในการใช้งานเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในกระบวนการแปรรูปอาหารเสร็จสิ้นแล้ว ทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยเป็นการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน และผลตอบแทนจากการลงทุน อีกทั้งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value: NPV), อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน การวิเคราะห์ค่าผลตอบแทนสุทธิจะแสดงให้เห็น

เห็นว่าเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ที่กำลังพิจารณามีมูลค่าปัจจุบันสุทธิของการลงทุนที่สมควรแก่การลงทุนหรือไม่ และการวิเคราะห์ค่าอัตราผลตอบแทนภายในเป็นการหาค่า discount rate (i) ที่ทำให้ค่าผลตอบแทนสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์หากค่าอัตราผลตอบแทนภายในมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าของทุน discount rate (i) ถือได้ว่าการลงทุนดังกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุน

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

เมื่อ

NPV	=	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
$B_t$	=	ผลตอบแทนในปีที่ t (t=1, 2, 3 ... n)
$C_t$	=	ต้นทุนในปีที่ t (t=1, 2, 3 ... n)
$C_0$	=	ต้นทุนในปีเริ่มต้น
i	=	อัตราดอกเบี้ย หรือ อัตราส่วนคิดลด (discount rate)
n	=	อายุของโครงการ

เกณฑ์การตัดสินใจ คือ การลงทุนเมื่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นบวก และไม่ควรลงทุนถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเป็นลบ

## 6. การทดสอบการใช้งานคั่วเครื่องเทศของวิสาหกิจชุมชน

ทำการทดสอบการคั่วพริกของเตาก๊าซหุงต้มด้วยวิธีการทดสอบภายใต้กิจกรรมการคั่ว โดยการคั่วพริกสำหรับกลุ่มวิสาหกิจชุมชน ดังภาพที่ 35 ในการทดสอบผู้วิจัยทำการบันทึกข้อมูล ซึ่งข้อมูลที่ต้องทำการบันทึกค่าได้แก่

- น้ำหนักพริกเริ่มต้น
- น้ำหนักพริกภายหลังการคั่ว
- น้ำหนักก๊าซหุงต้มก่อนทำการคั่ว
- น้ำหนักก๊าซหุงต้มหลังทำการคั่ว
- ระยะเวลาในการในการคั่ว

ภายหลังเสร็จสิ้นขั้นตอนการทดสอบด้วยวิธีการคั่ว จะนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์อัตราความสิ้นเปลืองก๊าซหุงต้ม อัตราความสิ้นเปลืองพลังงาน



ภาพที่ 35 การคั่วพริกด้วยเตาก๊าซหุงต้มของวิสาหกิจชุมชน

หลังจากที่เราได้ทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำ ของเตาชีวมวลและได้เงื่อนไขที่เหมาะสมแล้วนั้น จึงนำมาทดสอบ การคั่วพริกของชุมชน ดังภาพที่ 36 ทำการทดสอบและเก็บข้อมูลการคั่วเช่นเดียวกับการเก็บข้อมูลการใช้เตาก๊าซหุงต้ม โดยทำการคั่วพริกที่ น้ำหนัก 2 kg/ครั้ง ตามที่วิสาหกิจชุมชนใช้จริง เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ มี 2 ชนิด คือ ชังข้าวโพด และชังข้าวโพดอัดเม็ด เลือกที่เงื่อนไขที่ดีที่สุดของแต่ละชนิดมาทดสอบในการคั่ว จากนั้นทำการวิเคราะห์ระยะเวลาในการคั่ว อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงาน และนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ การคั่วด้วยก๊าซหุงต้ม



ภาพที่ 36 การคั่วพริกโดยใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

## บทที่ 4

### การออกแบบและสร้างระบบเตาชีวมวล

#### ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

#### การคำนวณการออกแบบระบบเตาชีวมวล

##### ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องนี้ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งความร้อนสำหรับใช้งานในการคั่วเครื่องเทศของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหาร ซึ่งได้มีการใช้เตาชีวมวลในการคั่วเครื่องเทศ เพื่อลดการใช้ก๊าซหุงต้ม โดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในการออกแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องนี้ต้องเป็นวัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร และหาได้ง่ายตามแหล่งชุมชน โดยในเบื้องต้นได้เลือกใช้ ชังข้าวโพด และชังข้าวโพดอัดเม็ด ซึ่งเป็นชีวมวลที่มีปริมาณมากในพื้นที่เขตภาคเหนือ หลักการที่ใช้ออกแบบเตาชีวมวลนั้นจะออกแบบให้เตามีการเผาไหม้ที่ดี มีประสิทธิภาพสูง และมีปริมาณควันน้อย โดยใช้หลักการการเผาไหม้โดยตรงเป็นหลัก การออกแบบจะใช้หลักการในการคำนวณโดยจะอ้างอิงตามการออกแบบแบบเตาชีวมวล แกลบ (Belonio, 2005) ซึ่งตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบนี้มี 2 ตัวแปรคือ ขนาดของห้องเผาไหม้ และความสูงของห้องเผาไหม้ ในการออกแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องได้ทำการออกแบบภายใต้เงื่อนไขความต้องการ การใช้งานเตาชีวมวลของวิสาหกิจแปรรูปอาหาร และได้ทำการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7 แสดงเงื่อนไขความต้องการของวิสาหกิจชุมชน ในการคั่วเครื่องเทศ โดยเบื้องต้นวิสาหกิจชุมชนมีการใช้ก๊าซหุงต้มเฉลี่ย 1.02 kg/h ระยะเวลาการคั่วเครื่องเทศโดยประมาณ 30 min/ ครั้ง และปริมาณเครื่องเทศที่ใช้เฉลี่ยครั้งละ 2 kg และถ้าวิเคราะห์การใช้ก๊าซหุงต้มต่อครั้ง จะพบว่ามี การใช้ 0.51 kg/ครั้ง หรือ 0.51 kg/kg<sub>เครื่องเทศ</sub> คิดเป็นการใช้พลังงาน 25,612.2 kJ/ครั้ง

ตารางที่ 7 เงื่อนไขการใช้งานเตาก๊าซหุงต้มของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหาร

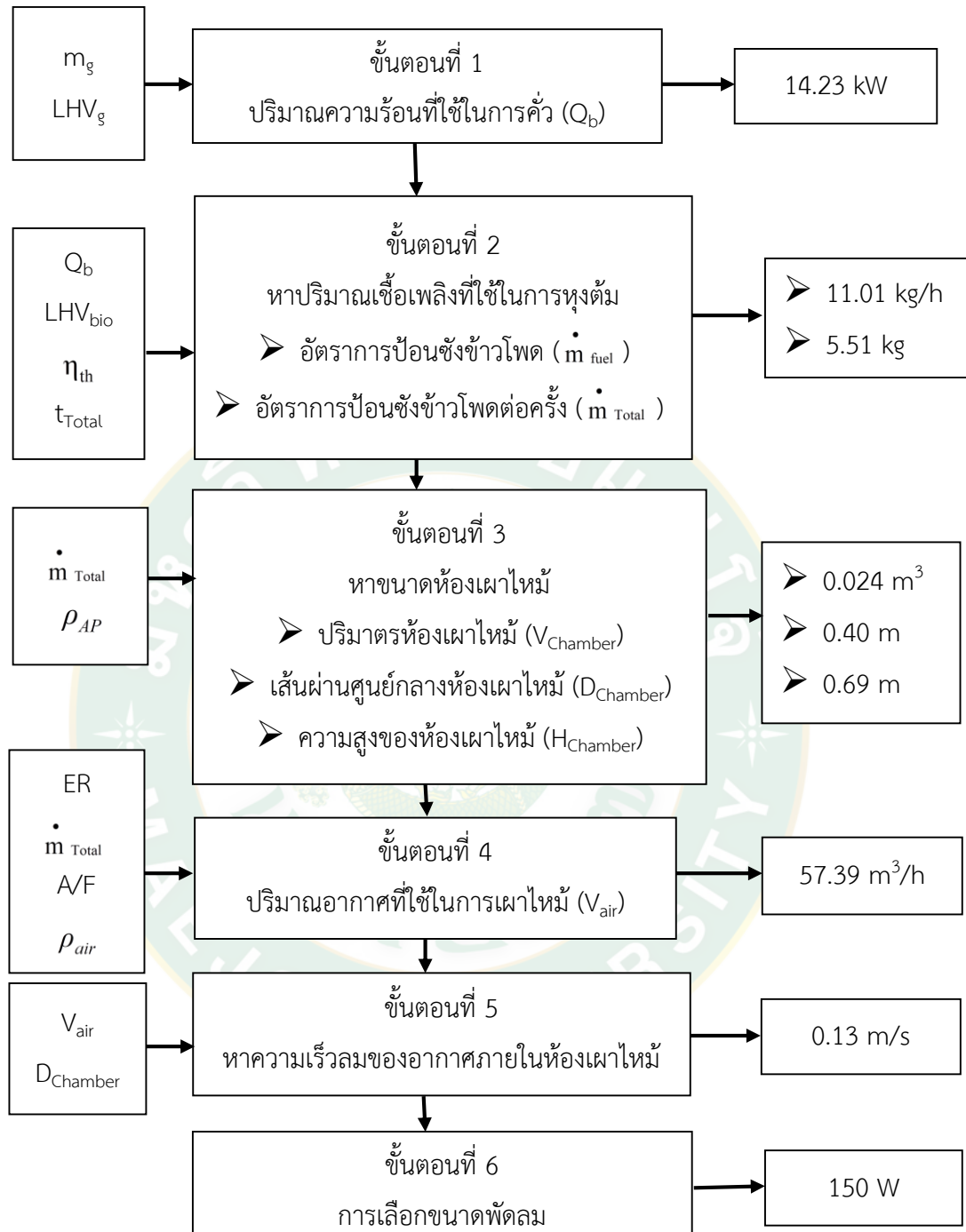
สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่	หน่วย
$LHV_g$	ค่าความร้อนของก๊าซหุงต้ม	50,220	kJ/kg
$m_g$	น้ำหนักเชื้อเพลิงของก๊าซหุงต้ม	1.02	kg/h
$t_{Total}$	เวลาในการคั่วเครื่องเทศต่อครั้ง	30	min
$m$	ปริมาณเครื่องเทศที่คั่วต่อครั้ง	2	kg

ในส่วนของการออกแบบเตาชีวมวลจะเน้นในด้านการป้อนเชื้อเพลิงให้ได้ตามค่าความร้อนของก๊าซหุงต้ม โดยเบื้องต้นตั้งสมมุติฐาน ประสิทธิภาพเตาชีวมวลได้ 30% มีอัตราการป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื้อ 11.01 kg โดยซึ่งข้าวโพดมีค่าความร้อน 15,510 kJ/kg รายละเอียดเงื่อนไขการทดลองดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เงื่อนไขเริ่มต้นในการออกแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

สัญลักษณ์	ความหมาย	ค่าคงที่	หน่วย
$\eta_{th}$	ประสิทธิภาพเตาชีวมวล	30	%
$m_{fuel}$	อัตราการป้อนซึ่งข้าวโพด	11.01	kg/h
$LHV_{bio}$	ค่าความร้อนของซึ่งข้าวโพด	15,510	kJ/kg
$D_{Chamber}$	เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้	0.40	m
$\rho_{Ap}$	ความหนาแน่นที่ปรากฏ	230	kg/m <sup>3</sup>
ER	Equivalence ratio	1	-
A/F	Stoichiometric air	6.26	kg <sub>air</sub> /kg <sub>fuel</sub>
$\rho_{air}$	air density	1.20	kg/m <sup>3</sup>

ในการออกแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องมีขั้นตอนในการออกแบบทั้งหมด 6 ขั้นตอน โดยแสดงได้ดังภาพที่ 37 และในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 37 ไดอะแกรมการออกแบบเตาชีวมวล

### ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการคั่วเครื่องเทศ

ในขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลจะต้องทราบถึงค่าความต้องการพลังงานความร้อนที่จะนำไปใช้ในการคั่วเครื่องเทศ โดยค่าความต้องการพลังงานความร้อนสามารถนำไปใช้ในการออกแบบขนาดของห้องเผาไหม้เพื่อให้ได้ปริมาณความร้อนตามที่ต้องการได้ ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อน ได้แก่ น้ำหนักเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม ( $m_g$ ), และค่าความร้อนของก๊าซหุงต้ม ( $LHV_g$ ) โดยการคำนวณหาปริมาณพลังงานความร้อนสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการคั่วเครื่องเทศ (} Q_b \text{)} &= \frac{m_g \times LHV_g}{3600} \\ &= \frac{1.02 \text{ kg/h} \times 50,220 \text{ kJ/kg}}{3600 \text{ s}} \\ \text{ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการคั่วเครื่องเทศ (} Q_b \text{)} &= 14.23 \text{ kW} \end{aligned}$$

### ขั้นตอนที่ 2 การคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในการคั่วเครื่องเทศ

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการใช้ จากขั้นตอนที่ 1 เสร็จสิ้นแล้วจึงได้ทำการคำนวณหาปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการคั่วเครื่องเทศเพื่อให้ได้ปริมาณพลังงานความร้อนตามที่ต้องการซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณหาปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด ได้แก่ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการคั่วเครื่องเทศ ( $Q_b$ ) ค่าความร้อนของซึ่งข้าวโพด ( $LHV_{bio}$ ) และประสิทธิภาพของเตาชีวมวล ( $\eta_{th}$ ) โดยกำหนดให้เตาชีวมวลมีประสิทธิภาพเท่ากับ 30% และซึ่งข้าวโพดมีค่าความร้อนเท่ากับ 15,510 kJ/kg การคำนวณหาปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด (} \dot{m}_{fuel} \text{)} &= \frac{Q_b}{LHV_{bio} \times \eta_{th}} \\ &= \frac{14.23 \text{ kw}}{15,510 \text{ kJ/kg} \times 0.30} \\ \text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด (} \dot{m}_{fuel} \text{)} &= 11.01 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดในระยะเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว สามารถคำนวณหาปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดต่อการใช้งาน 1 ครั้ง ได้จากปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด ( $\dot{m}_{\text{fuel}}$ ) และระยะเวลาในการคั่วเครื่องเทศ ( $t_{\text{Total}}$ ) ซึ่งจากความต้องการของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหารมีความต้องการในการคั่วเครื่องเทศ 30 min/ครั้ง โดยการคำนวณหาปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดต่อการใช้งาน 1 ครั้ง สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดต่อครั้ง } (\dot{m}_{\text{Total}}) &= \dot{m}_{\text{fuel}} \times t_{\text{Total}} \\ &= \frac{11.01 \text{ kg/h} \times 30 \text{ min}}{60 \text{ min/h}} \\ \text{ปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด } (\dot{m}_{\text{Total}}) &= 5.51 \text{ kg} \end{aligned}$$

### ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้

เมื่อทราบถึงค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่ต้องการนำใช้ในการคั่วเครื่องเทศและปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพดเพื่อให้ได้ค่าปริมาณพลังงานความร้อนตามที่ต้องการแล้วสามารถคำนวณหาขนาดของห้องเผาไหม้ได้จากปริมาณการป้อนซึ่งข้าวโพด ( $\dot{m}_{\text{Total}}$ ) และความหนาแน่นที่ปรากฏ ( $\rho_{\text{Ap}}$ ) โดยกำหนดให้ความหนาแน่นที่ปรากฏเท่ากับของซึ่งข้าวโพด  $230 \text{ kg/m}^3$  และของซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดเท่ากับ  $1,292.55 \text{ kg/m}^3$  ในการคำนวณหาขนาดห้องเผาไหม้สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

ในกรณีของการใช้ซึ่งข้าวโพด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรห้องเผาไหม้ } (V_{\text{Chamber}}) &= \frac{\dot{m}_{\text{Total}}}{\rho_{\text{Ap}}} \\ &= \frac{5.51 \text{ kg}}{230 \text{ kg/m}^3} \\ \text{ปริมาตรห้องเผาไหม้ } (V_{\text{Chamber}}) &= 0.024 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ในกรณีของการใช้ซึ่งข้าวโพดอัดเม็ด

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรห้องเผาไหม้ } (V_{\text{Chamber}}) &= \frac{\dot{m}_{\text{Total}}}{\rho_{\text{Ap}}} \\ &= \frac{5.79 \text{ kg}}{1,292.55 \text{ kg/m}^3} \\ \text{ปริมาตรห้องเผาไหม้ } (V_{\text{Chamber}}) &= 0.004 \text{ m}^3 \end{aligned}$$



สรุปปริมาตรของห้องเผาไหม้เมื่อใช้ซังข้าวโพดมีขนาด  $0.024 \text{ m}^3$  และปริมาตรของห้องเผาไหม้เมื่อใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดมีขนาด  $0.004 \text{ m}^3$  ในเบื้องต้น แนวคิดการออกแบบใช้ห้องเผาไหม้แบบกรวยที่มีการป้อนอากาศสัมผัสเชื้อเพลิงให้มากที่สุด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ให้สมบูรณ์สูงสุด โดยห้องเผาไหม้ด้านบนถูกกำหนดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $40 \text{ cm}$  สำหรับรองรับกระทะคั่วขนาด  $76 \text{ cm}$  หรือ เบอร์ 30 การหาขนาดความสูงของห้องเผาไหม้ หาได้จากสมการปริมาตรทรงกรวยรูปสามเหลี่ยม

#### ขั้นตอนที่ 4 การคำนวณหาความสูงของห้องเผาไหม้

เนื่องจากเตาชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบถูกจำกัดด้วยปริมาตรของกระทะ ซึ่งกระทะที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาด  $76 \text{ cm}$  หรือ เบอร์ 30 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบให้ห้องเผาไหม้มีรูปทรงเป็นทรงกรวย โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $0.2 \text{ m}^2$  และมีปริมาตร  $0.048 \text{ m}^3$  การหาขนาดความสูงของห้องเผาไหม้ หาได้จากสมการปริมาตรทรงกรวยรูปสามเหลี่ยม มีดังนี้

หาความสูงของห้องเผาไหม้

$$H_{\text{Chamber}} = \frac{3}{\pi} \left( \frac{V_{\text{Chamber}}}{R^2 + rR + r^2} \right)$$

$$H_{\text{Chamber}} = \frac{3}{\pi} \left( \frac{0.048 \text{ m}^3}{0.2^2 \text{ m}^2 + (0.2 \times 0.09) \text{ m}^2 + 0.09^2 \text{ m}^2} \right)$$

$$H_{\text{Chamber}} = 0.69 \text{ m}$$

อย่างไรก็ตามด้านห้องเผาไหม้ดังกล่าวจะรองรับได้เพียงเชื้อเพลิงที่เผาเท่านั้น ดังนั้นจะต้องเพิ่มความสูงหรือปริมาตร เพื่อไว้กรณีที่เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้ช้าหรือไม่หมด ตามประสบการณ์การออกแบบจริงได้กำหนดใช้ปริมาตรเพิ่มขึ้นอีก 1 เท่า (Jain et al, 2019) ดังนั้นถ้าต้องการหาความสูงจะต้องใช้ปริมาตร  $0.048 \text{ m}^3$  และความสูงของกรวยห้องเผาไหม้คิดเป็น  $69 \text{ cm}$

#### ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมต่อขนาดของห้องเผาไหม้และปริมาณการป้อนเชื้อเพลิงเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องทำการพิจารณา เนื่องจากหากมีอัตราการป้อนอากาศที่ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้เกิดควันระหว่างการใช้งานได้ โดยในการคำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ( $V_{\text{air}}$ ) ได้ทำการ

กำหนดค่า Equivalence ratio เท่ากับ 1 และค่า Stoichiometric air (A/F) ที่ได้จากการคำนวณ เท่ากับ  $6.256 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$  และค่าความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ  $1.20 \text{ kg}/\text{m}^3$  การคำนวณหา ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ( $V_{\text{air}}$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ } (V_{\text{air}}) &= \frac{ER \times \dot{m}_{\text{Total}} \times A/F}{\rho_{\text{air}}} \\ &= \frac{1 \times 11.01 \text{ kg/h} \times 6.256 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}}{1.20 \text{ kg}/\text{m}^3} \\ \text{ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ } (V_{\text{air}}) &= 57.39 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

#### ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณหาความเร็วลมของอากาศภายในห้องเผาไหม้

เมื่อห้องเผาไหม้ด้านบนถูกกำหนดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $40 \text{ cm}$  ( $D_{\text{Chamber}}$ ) และปริมาณ อากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ( $V_{\text{air}}$ ) ที่เหมาะสมต่อขนาดของเตาชีวมวลที่ทำการออกแบบเสร็จสิ้นแล้ว สามารถคำนวณหาความเร็วลมได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วลม} &= \frac{V_{\text{air}}}{\frac{\pi D^2}{4}} \\ &= \frac{57.39 \text{ m}^3/\text{h}}{\frac{\pi \times 0.4^2 \text{ m} \times 3600 \text{ s}}{4}} \\ \text{ความเร็วลม} &= 0.13 \text{ m/s} \end{aligned}$$

#### ขั้นตอนที่ 7 การเลือกขนาดพัดลม

จากค่าปริมาณอากาศสามารถนำไปเลือกขนาดของพัดลมที่มีความเหมาะสมกับเตาชีวมวลที่ ได้ทำการออกแบบขึ้น โดยจากข้อมูลการคำนวณปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ข้างต้น ได้ทำการ เลือกพัดลมขนาด  $2 \text{ inch}$  โดยเน้นพัดลมที่ใช้ไฟ  $220 \text{ V}$  ขนาด  $1 \text{ Phase}$  กำลังไฟฟ้า  $150 \text{ W}$   $1.0 \text{ AMP}$  และให้อัตราการไหลเชิงปริมาตร  $0.72\text{-}3 \text{ m}^3/\text{min}$  เนื่องจากปริมาตรอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ มีอัตราการป้อนลมเฉลี่ยอยู่ที่  $57.39 \text{ m}^3/\text{h}$  ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการลมที่ผลิตได้

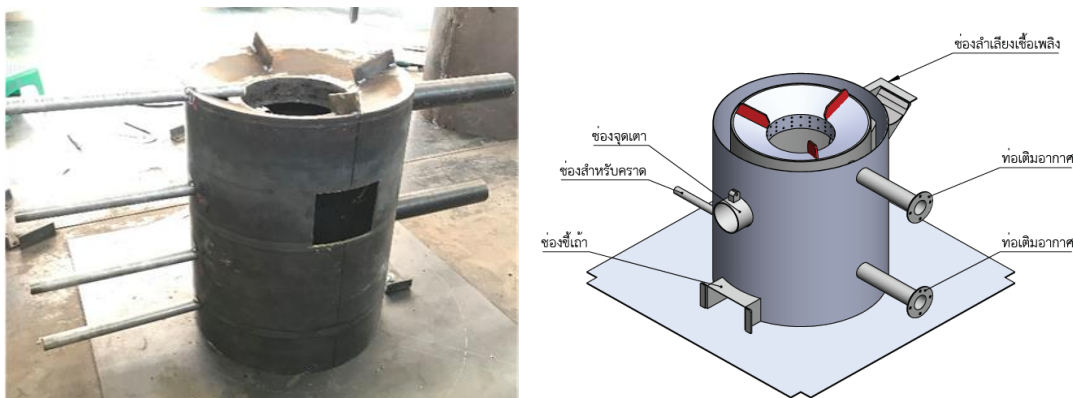
การออกแบบคำนวณเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องทั้ง 6 ขั้นตอนข้างต้นสามารถนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 9 ดังต่อไปนี้

**ตารางที่ 9** สรุปขั้นตอนการออกแบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วยนับ
1.	ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการคั่วเครื่องเทศ ( $Q_b$ )	14.23	kW
2.	อัตราการป้อนซังข้าวโพด ( $\dot{m}_{fuel}$ )	11.01	kg/h
3.	ปริมาณการป้อนซังข้าวโพดต่อครั้ง ( $\dot{m}_{Total}$ )	5.51	kg
4.	อัตราการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ด ( $\dot{m}_{fuel}$ )	11.58	kg/h
5.	ปริมาณการป้อนซังข้าวโพดอัดเม็ดต่อครั้ง	5.79	kg
6.	ปริมาตรห้องเผาไหม้ในทางทฤษฎี ( $V_{Chamber}$ )	0.024	$m^3$
7.	ปริมาตรห้องเผาไหม้ในทางปฏิบัติ ( $V_{Chamber}$ )	0.048	$m^3$
8.	เส้นผ่านศูนย์กลางห้องเผาไหม้ ( $D_{Chamber}$ )	0.40	m
9.	ความสูงของห้องเผาไหม้ ( $H_{Chamber}$ )	0.69	m
10.	ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ( $V_{air}$ )	57.39	$m^3/h$
11.	เลือกขนาดพัดลม 2 inch	150	W
12.	ปริมาณการคั่วพริก	2	kg

### การสร้างระบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

จากการคำนวณการออกแบบเตาชีวมวล ทางผู้วิจัยได้ออกแบบเตาชีวมวลทรงกระบอกแบบป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.40 m ความสูงของเตาชีวมวล 0.69 m แต่เนื่องจากการใช้งานจริง เตามีขนาดสูงเกินไปทำให้ไม่สะดวกแก่การใช้งานของชุมชน จึงต้องมีการลดขนาดความสูงเตาเป็น 0.55 m มีการเติมอากาศเข้าไปในห้องเผาไหม้ด้วยกันสองจุด ซึ่งใช้ซังข้าวโพดและซังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ฉนวนเป็นผนังปูนความหนา 5 cm ดังแสดงในภาพที่ 38



ภาพที่ 38 เตาชีวมวลทรงกระบอกชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

### 1. จัดสร้างห้องเผาไหม้

ห้องเผาไหม้เตาชีวมวลถูกสร้างด้วยเหล็กขนาด 3 mm ซึ่งห้องเผาไหม้จะมีลักษณะเป็นรูปกรวยเจาะรูรอบ ๆ ขนาด 8 mm ระยะห่าง 15 องศา เพื่อเป็นช่องอากาศ กรวยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 0.40 m ด้านล่าง 0.19 m และความสูงของกรวย 0.23 m

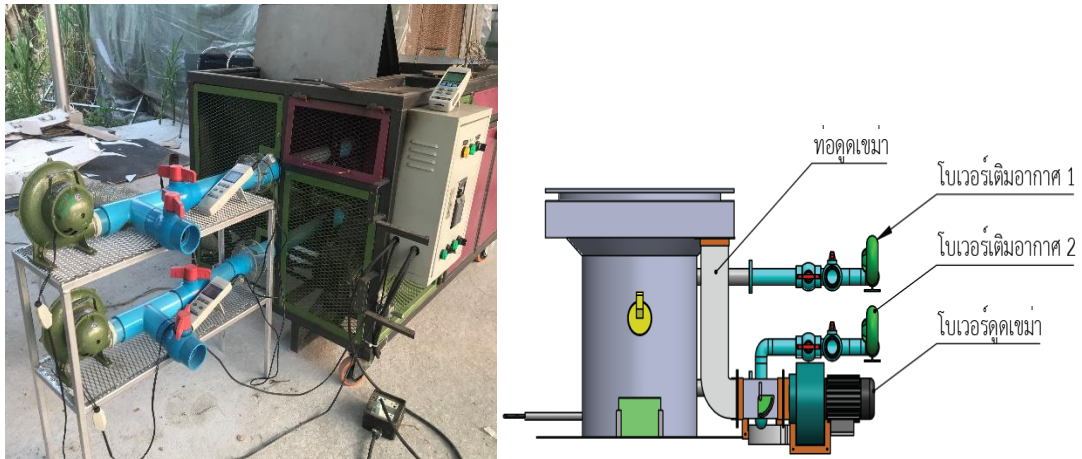


ภาพที่ 39 ลักษณะห้องเผาไหม้เตาชีวมวล

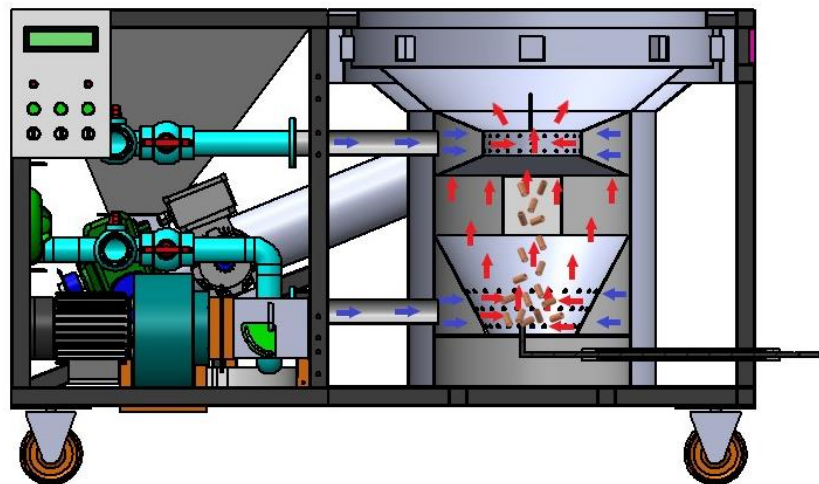
### 2. จัดสร้างระบบการเติมอากาศ

โดยในการออกแบบเตาชีวมวลเพื่อให้มีการเผาไหม้ที่สะอาดจึงได้ออกแบบการเติมอากาศเข้าห้องเผาไหม้ 2 จุดด้วยกัน จุดที่ 1 คือ เติมเข้ารอบ ๆ ห้องเผาไหม้โดยตรง ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจะเกิดการเผาไหม้ค่อยข้างที่จะไม่สมบูรณ์ จึงมีการเติมอากาศเข้าไปในจุดที่ 2 คือ การเติมอากาศเข้าด้านบนห้องเผาไหม้ที่มีลักษณะเป็นการเผาไหม้ช้า เป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สบางส่วนที่เกิดการเผา

ไหม้ไม่สมบูรณ์จากจุดที่ 1 ให้สมบูรณ์มากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 40 การสร้างท่อลมหรืออวาล์วควบคุมการไหลของอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2 inch และมีพัดลมโบเวอร์แอร์ดูดควันขนาด 2 inch และแสดงทิศทางการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้ ดังภาพที่ 41



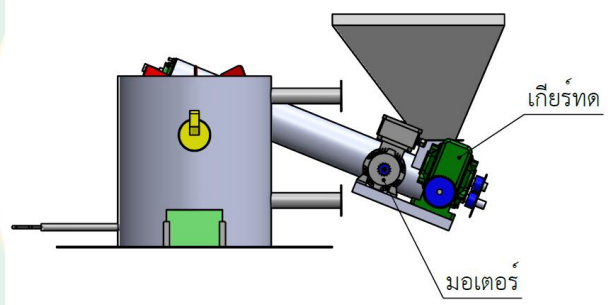
ภาพที่ 40 การเติมอากาศเข้าห้องเผาไหม้



ภาพที่ 41 ทิศทางการไหลของอากาศในห้องเผาไหม้

### 3. จัดสร้างระบบการป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง

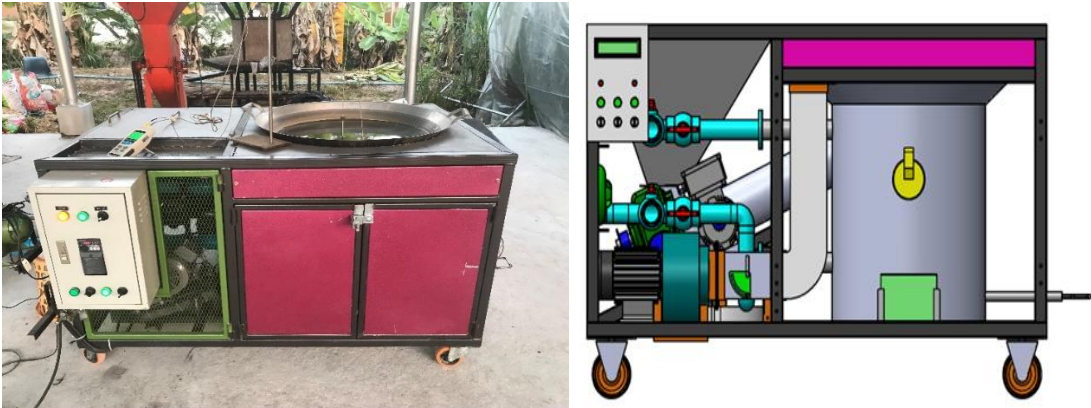
การจัดสร้างการป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เป็นการใช้สกรูลำเลียงเชื้อเพลิงจากฮอปเปอร์ไปสู่ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิง ที่มีขนาด 5 inch ระยะพิตช์ของใบเกลียว 7 cm ด้วยความยาว 1 m ที่มีกำลังขับจากมอเตอร์ขนาด 1 hp ดังแสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง

### 4. การประกอบและติดตั้งเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

การประกอบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง โดยนำชิ้นส่วนต่าง ๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งมี 3 ส่วนหลักๆ คือ ห้องเผาไหม้ ระบบการเติมอากาศ และระบบการป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง จากนั้นจึงสร้างกรอบตัวเตาขนาด กว้าง 150 cm ยาว 92 cm สูง 78 cm และทำการทดสอบเตาชีวมวลเพื่อดูหลักการและปรับปรุงแก้ไขต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 43



ภาพที่ 43 การประกอบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง



## บทที่ 5

### ผลและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาระบบการออกแบบและพัฒนาเตาชีวมวลโดยวิธีการป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง และทำการทดสอบการใช้งานเตาชีวมวลจะทดสอบภายใต้ กิจกรรมการคั่ว โดยทำการเปรียบเทียบสมรรถนะกับเตาก๊าซหุงต้ม โดยชีวมวลที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ชังข้าวโพด และชังข้าวโพดอัดเม็ด นอกจากนี้ยังได้ทดสอบประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลแบบต่อเนื่อง โดยหาอัตราการป้อนเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ อัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมเข้าห้องเผาไหม้แบบทางเดียว (Primary air) และอัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมของการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้สองทาง (Primary air - Secondary air) ประเมินความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังนี้

#### การประเมินสมรรถนะเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง สำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร

##### 1. การประเมินอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

ผลการประเมินประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องนี้ ได้มีการควบคุมค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎีของชังข้าวโพด และชังข้าวโพดอัดเม็ด คือ 6.26 และ 6.05  $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$  ตามลำดับ การทดลองได้มีการป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบทางเดียว มีการป้อนเชื้อเพลิงทั้งหมด 3 ค่า และปรับอากาศใช้เหมาะสมตามทฤษฎีโดยใช้ชังข้าวโพดและชังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง รายละเอียดผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

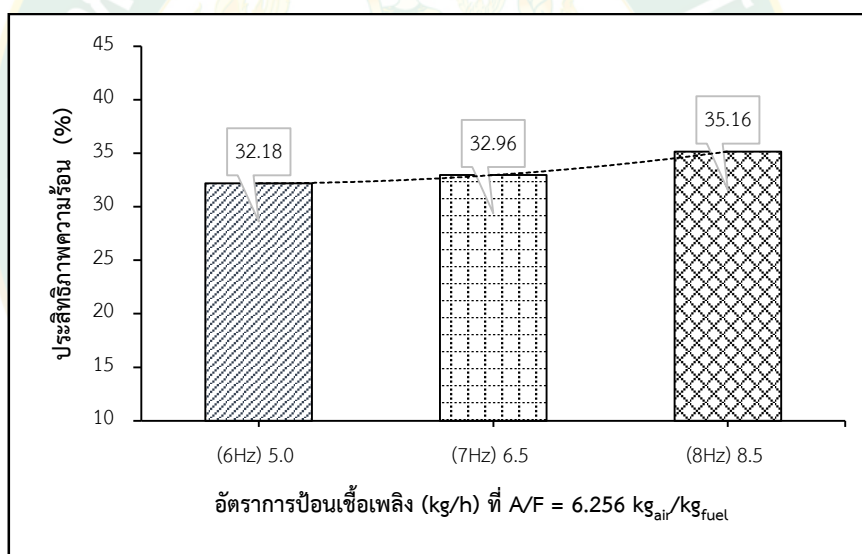
ภาพที่ 44 แสดงผลอัตราการป้อนเชื้อเพลิงชังข้าวโพดเทียบกับประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล จากการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพของเตาในแต่ละอัตราการป้อนเชื้อเพลิงไม่ได้แตกต่างกันมากนัก และประสิทธิภาพทางความร้อนที่สูงที่สุดคือ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 8.5  $\text{kg/h}$  มีประสิทธิภาพสูงสุดถึงร้อยละ 35.16

การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากทำให้เกิดปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น (กฤษกร, 2555) โดยที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงที่ 8.5  $\text{kg/h}$  ได้ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลสูงสุด ร้อยละ 35.16 ในขณะที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5  $\text{kg/h}$  ให้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำสุดคิดเป็นร้อยละ 32.18 เตาชีวมวลที่มีประสิทธิภาพสูง หมายถึงเตาที่มีการเผาไหม้ที่ดี ในขณะที่เดียวกัน มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ต่ำ เมื่อเทียบพลังงานความร้อนที่เตา

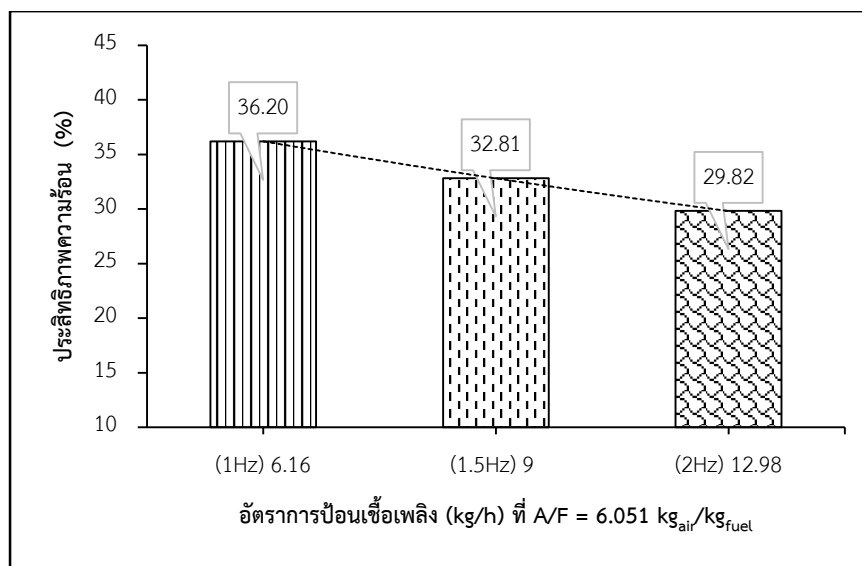


ผลิตได้ (จิตราภรณ์ และ อุศราวดี, 2555) อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปเทียบกับประสิทธิภาพเตาชีวมวลแบบไร้ควัน พบว่ามีประสิทธิภาพความร้อนอยู่ที่ร้อยละ 23.6 จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพพบว่าเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องมีความร้อนสูงกว่า 48.98 % (ธนาต, 2560)

ภาพที่ 45 แสดงผลของประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดเทียบกับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง ที่ 6.16 – 12.98 kg/h ในสภาวะการเผาไหม้ตามทฤษฎี โดยพบว่าในส่วนของการใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด การเพิ่มอัตราการป้อนเชื้อเพลิงทำให้ประสิทธิภาพความร้อนลดต่ำลง เนื่องจากชีวมวลอัดเม็ดมีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้มีการเผาไหม้ช้า เมื่อป้อนในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้เชื้อเพลิงสัมผัสอากาศไม่ทั่วถึง และอาจทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (ปรัชญา, 2555) โดยการปรับอัตราการป้อนที่ 6.16 ให้ประสิทธิภาพความร้อนร้อยละ 36.20 ในขณะที่การปรับอัตราการป้อน 12.98 kg/h ให้ประสิทธิภาพร้อยละ 29.82 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาที่ต่ำเกิดจากเชื้อเพลิงมีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์อัตราการป้อนเชื้อเพลิงซังข้าวโพดและประสิทธิภาพทางความร้อน



ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์อัตราการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดและประสิทธิภาพทางความร้อน

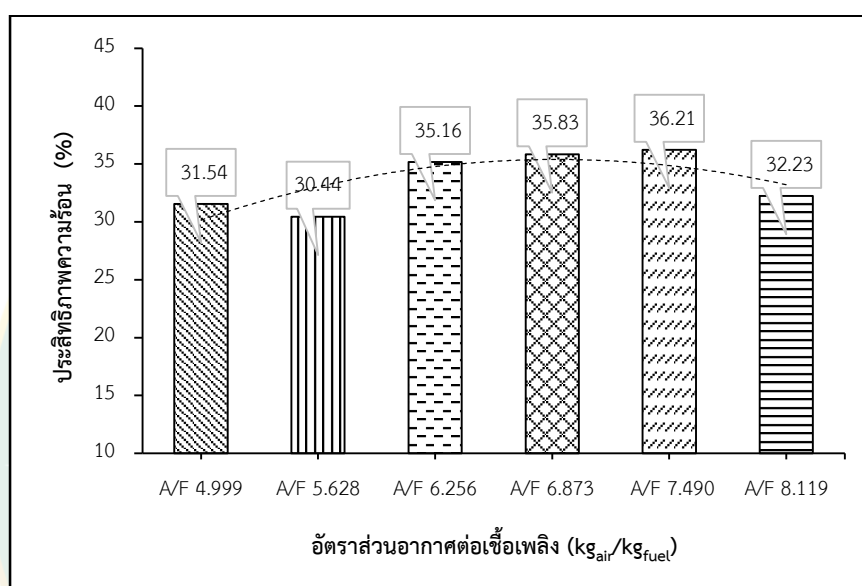
จากการทดสอบอัตราการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งข้าวโพดกับซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล พบว่าในกรณีของการใช้ซึ่งข้าวโพดให้มีประสิทธิภาพความร้อนดีที่สุดที่อัตราการป้อน 8.50 kg/h ในขณะที่การใช้ซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดให้อัตราการป้อนดีที่สุด 6.16 kg/h จากเงื่อนไขที่ดีที่สุดจะนำไปสู่การทดสอบการปรับค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F Ratio) รายละเอียดผลการทดลองและการปรับดังแสดงในหัวข้อที่ 2

## 2. ผลการปรับอากาศต่อเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้แบบทางเดียว Primary air ( $v_1$ )

การทดสอบและการประเมินประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ได้มีการกำหนดอัตราการป้อนเชื้อเพลิงคงที่ โดยในส่วนของซึ่งข้าวโพดป้อนเชื้อเพลิงที่ 8.50 kg/h และซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดป้อนที่ 6.16 kg/h จากนั้นทำการควบคุมปริมาณอากาศที่อัตราการไหลต่าง ๆ โดยวิเคราะห์ในรูปอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 5 ระดับ ได้แก่ 4.99 5.62 6.25 6.87 7.49 และ 8.12  $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$  สำหรับซึ่งข้าวโพด และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 4.32 5.17 6.05 6.89 และ 7.74  $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$  สำหรับซึ่งข้าวโพดอัดเม็ด

ภาพที่ 46 แสดงผลการปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ที่มีผลต่อประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เมื่อใช้ซึ่งข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง โดยพบว่า อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.49 ได้ประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 36.21 และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 5.62 ทำให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำสุด ร้อยละ 30.44 ดังนั้นผลของอัตราการป้อนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่

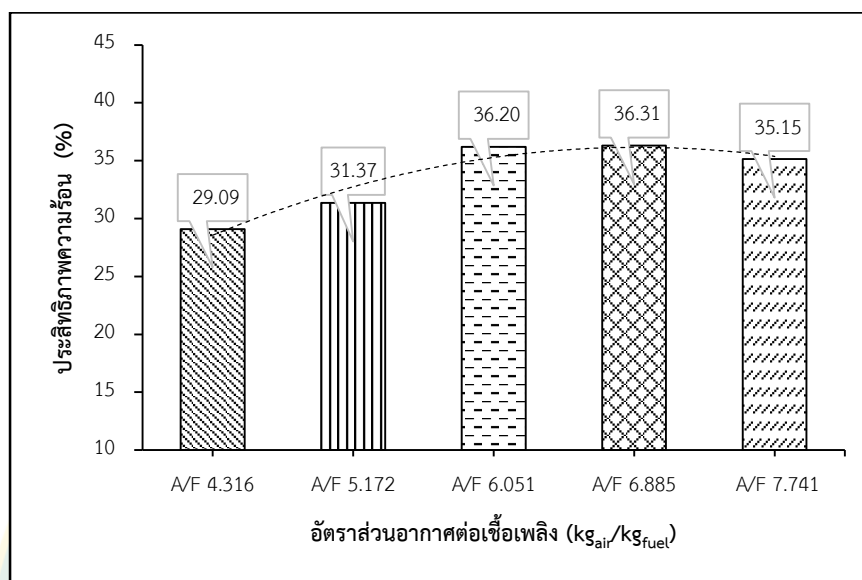
เหมาะสมสำหรับซังข้าวโพด ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.49 ส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด โดยมีค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.2 ซึ่งค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของทฤษฎีของซังข้าวโพดคือ  $6.25 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$  การที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงสูงกว่าทฤษฎี หรือที่อากาศส่วนเกิน (% Excess air) เท่ากับ 20 % ส่งผลดีต่อการเผาไหม้ (สุพิน, 2553) จึงทำให้มีประสิทธิภาพสูง แต่เมื่อมีอัตราส่วนอากาศที่มากเกินไปกว่าทฤษฎีมากจนเกินไป จะส่งผลให้ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลลดลง (พงค์สถิตย์, 2561)



ภาพที่ 46 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของซังข้าวโพดต่อประสิทธิภาพทางความร้อน

ภาพที่ 47 แสดงผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ พบว่า อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อน โดยที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 6.88 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดร้อยละ 36.31 และที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 4.31 ทำให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนต่ำสุดร้อยละ 29.09 ดังนั้นผลของอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมสำหรับซังข้าวโพดอัดเม็ด ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 6.88 ให้ค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 1.1 และขณะที่ในทางทฤษฎีความต้องการอากาศในการเผาไหม้ซังข้าวโพดอัดเม็ดต้องใช้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงเท่ากับ  $6.05 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$  ซึ่งจะเห็นว่าในการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงกับเตาชีวมวลต้องใช้อากาศที่มากกว่าทางทฤษฎี (% Excess air) เท่ากับ 14 % จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมากกว่าหรือเท่ากับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทาง

ทฤษฎี ประสิทธิภาพทางความร้อนก็เพิ่มขึ้นด้วย จึงจะส่งผลให้เตามีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ถ้าหากอากาศมากเกินไป 15 % จะทำให้ประสิทธิภาพความร้อนมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 47 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงของซังข้าวโพดอัดเม็ดต่อประสิทธิภาพทางความร้อน

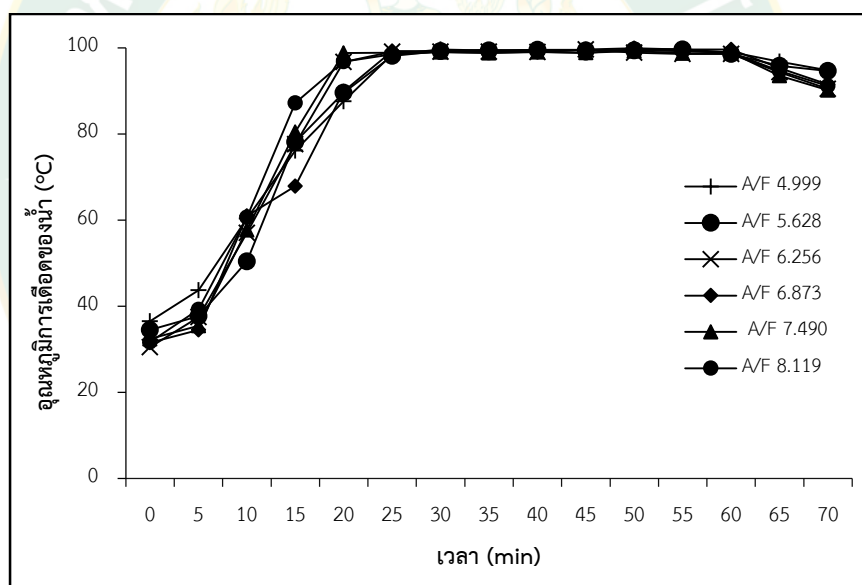
#### ระยะเวลาของอุณหภูมิในการต้มน้ำต่อสมรรถนะเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง

ภาพที่ 48 ผลของอุณหภูมิการทดสอบเตาชีวมวลโดยการต้มน้ำ เมื่อใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้น้ำในการต้ม 23 L ผลการศึกษา พบว่า อุณหภูมิน้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นที่ 30 °C ถึง 98 °C ใช้เวลาทั้งหมด 22 min ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.49 ให้อุณหภูมิการต้มน้ำเฉลี่ยสูงสุด โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในช่วง 97-98 °C และอุณหภูมิกังที่ต่อเนื่องประมาณ 98 °C นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.49 มีอุณหภูมิน้ำถึงจุดเดือดเร็วกว่าที่อัตราส่วนอื่น ๆ โดยเฉลี่ยอุณหภูมิน้ำเริ่มเดือดที่เวลา 20 min ขึ้นไป การเดือดของน้ำ เกิดจากเตาชีวมวลส่งถ่ายความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ให้กับน้ำ โดยพลังงานความร้อนที่ป้อนให้กับน้ำต่ำ ส่งผลให้ระยะเวลาการเดือดของน้ำเพิ่มขึ้นแต่เมื่อพลังงานความร้อนสูง จึงส่งผลให้ระยะเวลาการเดือดของน้ำลดลง (Ramirez et al.,2007)

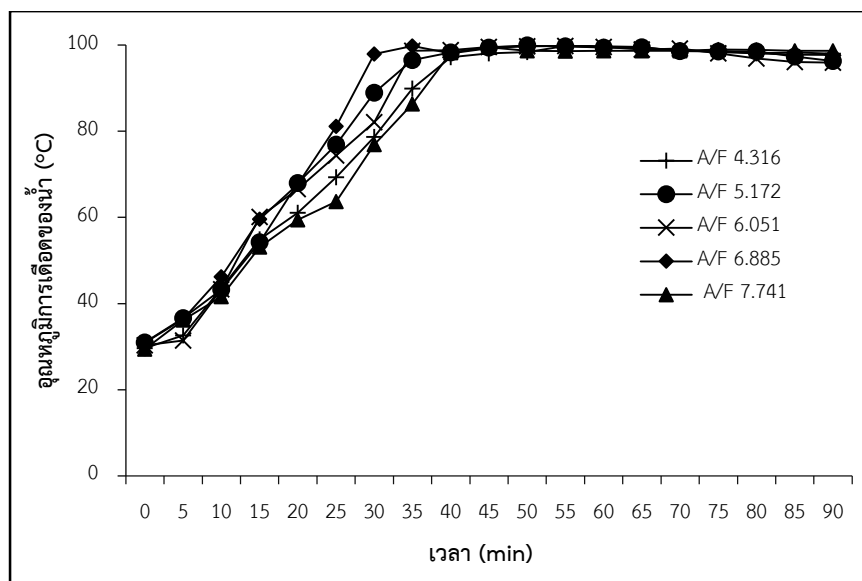
พลังงานความร้อนจากเตาชีวมวลสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับ การปรับอากาศต่อเชื้อเพลิง โดยทั่วไปในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งจำเป็นต้องใช้ปริมาณอากาศสูงกว่าทฤษฎี และจะให้อากาศส่วนเกินอยู่ในช่วง 10% ถึง 20% (Molino et al., 2016)

ภาพที่ 49 แสดงผลของอุณหภูมิการต้มน้ำที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 4.31-7.74 ของการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด โดยพบว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 6.88 ใช้ระยะเวลาการต้มน้ำให้เดือดสั้นสุด มีเวลา 32 min ในขณะที่การปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.74 และ 4.31 ให้อุณหภูมิการต้มน้ำต่ำกว่า 6.88 และใช้เวลาในการเดือดสูงกว่า

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดเชื้อเพลิงระหว่างซังข้าวโพดและซังข้าวโพดอัดเม็ดพบว่า การใช้ซังข้าวโพดให้อุณหภูมิการเดือดของน้ำสั้นกว่าซังข้าวโพดอัดเม็ด ซึ่งผลดังกล่าวสรุปได้ว่าการใช้ซังข้าวโพดให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่าการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด จากการเปรียบเทียบเชิงกายภาพ เชื่อว่าความหนาแน่นน่าจะเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลให้การเผาไหม้แตกต่างกัน เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง ส่งผลให้อากาศไม่สามารถเข้าผสมระหว่างการเผาไหม้ได้ดีกว่าเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ ดังนั้นการใช้เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ จะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์กว่า (สมมาสและคณะ., 2556)



ภาพที่ 48 ระยะเวลาและอุณหภูมิในการเดือดของน้ำ กรณีใช้ซังข้าวโพด

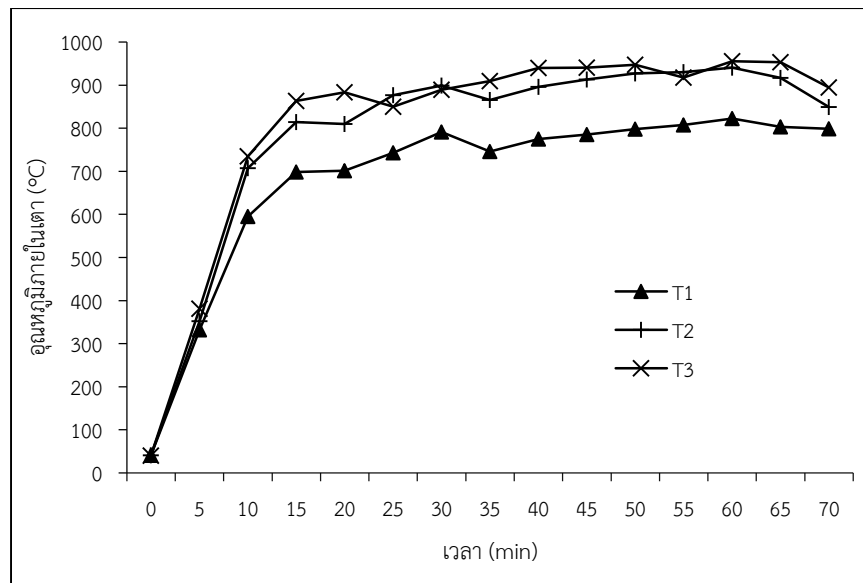


ภาพที่ 49 ระยะเวลาและอุณหภูมิการเดือดของน้ำ กรณีใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด

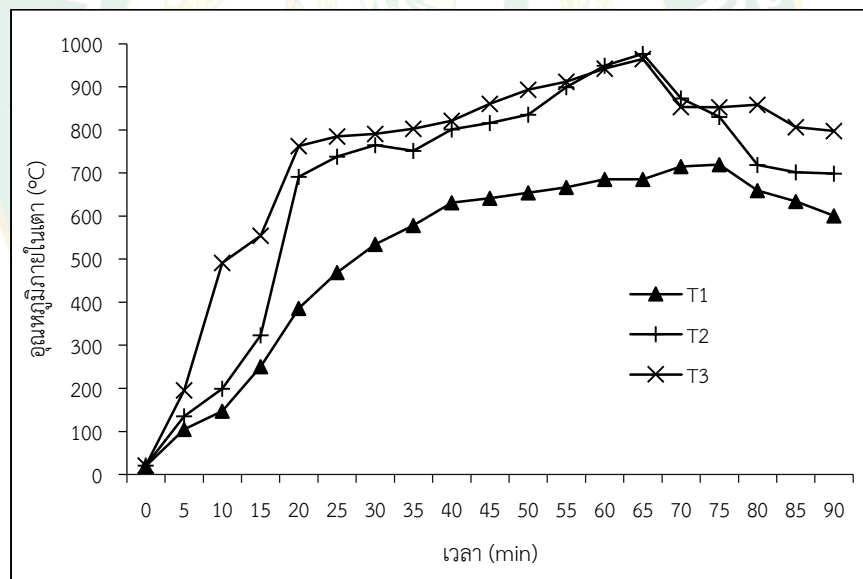
#### อุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

จากการทดลองได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิเตาชีวมวล 3 จุด ได้แก่ T1 คือ อุณหภูมิส่วนบนของเตา T2 คือ อุณหภูมิส่วนกลางของเตา T3 คือ อุณหภูมิส่วนล่างของเตา จากภาพที่ 50 ได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิเตา ที่มีประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดในเงื่อนไขการป้อนอากาศทางเดียวของเชื้อเพลิงซังข้าวโพด ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.490 พบว่า เตาชีวมวลมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 947 °C ที่เวลาการเผาไหม้ที่ 50 min ดังภาพที่ 50 อย่างไรก็ตามถ้าวัดอุณหภูมิสูงสุด ณ บริเวณที่ชีวมวลเกิดเผาไหม้อุณหภูมิของเตานี้กับการใช้ซังข้าวโพดมีอุณหภูมิสูงประมาณ 735-947 °C โดยเป็นการเกิดขึ้นในช่วงท้ายของเวลาเผาซึ่งก็คือช่วงด้านล่างของเตาชีวมวล ในขณะที่ช่วงบนและกลางเตาชีวมวลมีอุณหภูมิช่วง 595-822 °C

ในส่วนของเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 6.885 อุณหภูมิเตาชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงพบว่ามีลักษณะเส้นกราฟ อุณหภูมิคล้ายกับกรณีใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงดังภาพที่ 51 อุณหภูมิภายในของเตาชีวมวลมีอุณหภูมิแตกต่างกันเล็กน้อยภายในเตามีอุณหภูมิเฉลี่ย 965 °C เวลาการเผาไหม้ที่ 65 min โดยเกิดขึ้นในช่วงด้านล่างของเตาชีวมวล อุณหภูมิช่วงบนเตาของการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิเฉลี่ย 595-792 °C ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งเป็นผลมาจากประเภทของวัสดุและความหนาของผนังเตา อย่างไรก็ตามเมื่อมีการหุ้มฉนวนให้กับเตาก็พบว่าการสูญเสียความร้อนไปกับผนังมีแนวโน้มลดลง



ภาพที่ 50 อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดภายในเตาชีวมวล

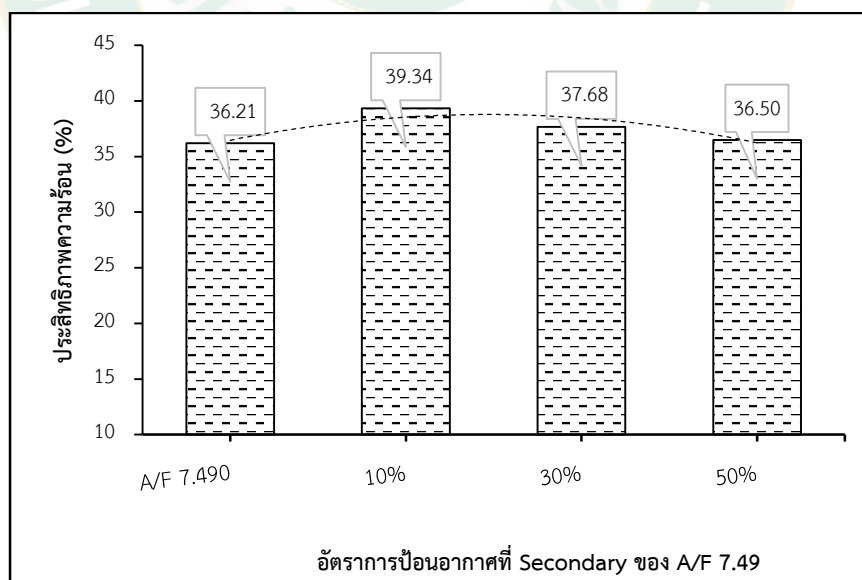


ภาพที่ 51 อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดภายในเตาชีวมวล

### 3. ผลการปรับอากาศต่อเชื้อเพลิงเข้าห้องเผาไหม้ แบบสองทาง Secondary air ( $v_2$ )

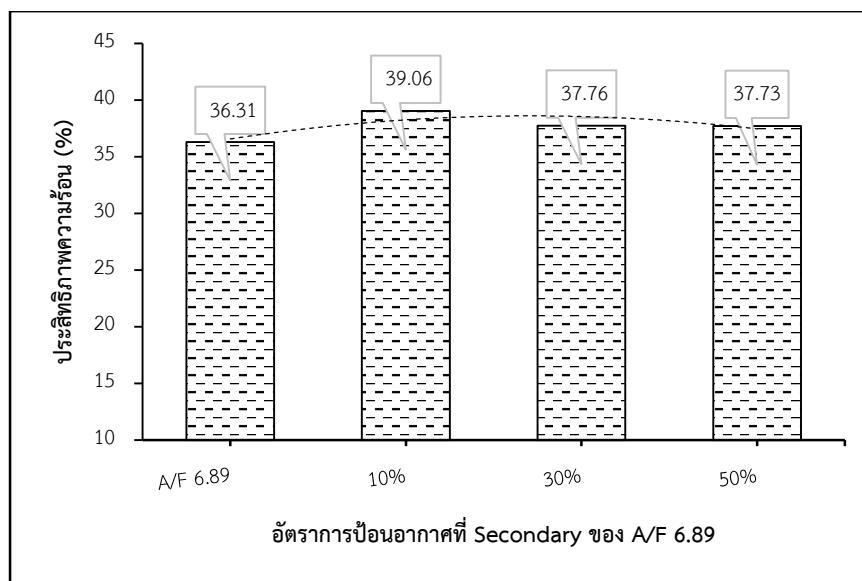
ผลจากการหาอัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว ซึ่งได้อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (A/F) ที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงแต่ละชนิด แล้วในการทดสอบโดยการป้อนอากาศอันดับต่อไปจะเป็นการป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้แบบสองทาง ทางช่องอากาศ  $V_2$  ในการเลือกค่ามาทดลองนี้ได้เลือกค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 7.49 และ 6.88 ในกรณีของซังข้าวโพด และซังข้าวโพดอัดเม็ด ตามลำดับ การป้อนอากาศเพิ่มเข้าทางช่องอากาศ  $V_2$  ได้ทำการป้อนอากาศ 3 ระดับ คือ 10, 30 และ 50% ของอัตราส่วนอากาศทางช่องอากาศ  $V_1$

ผลการทดสอบ พบว่า เมื่อใช้เชื้อเพลิงทั้ง 2 ชนิด ดังภาพที่ 52 และ 53 ที่สภาวะอากาศต่อเชื้อเพลิงเหมาะสมสูงสุด การป้อนอากาศเพิ่ม 10% ในช่องทางอากาศ  $V_2$  ส่งผลให้ประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น โดยในกรณีของการใช้ซังข้าวโพดให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 39.34 % คิดเป็นอากาศส่วนเกิน (% Excess air) เท่ากับ 30% และในกรณีของซังข้าวโพดอัดเม็ด ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด 39.06% คิดเป็นอากาศส่วนเกิน 25% ถัดมาเป็นค่าการเพิ่มอากาศเข้าทางช่องอากาศ  $V_2$  การป้อนมากกว่า 30% ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลจะลดลง การลดลงของประสิทธิภาพความร้อน เมื่อเพิ่มอากาศ ส่งผลให้มีความร้อนบางส่วนสูญเสียไปกับการไหลของแก๊สที่ออกจากหัวเตา (เชิดชูเกียรติ, 2560) โดยในภาพที่ 53 การป้อนอากาศในช่องอากาศ  $V_2$  จะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 7-9%



ภาพที่ 52 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลกรณีใช้ซังข้าวโพด เมื่อป้อนอากาศสองทาง

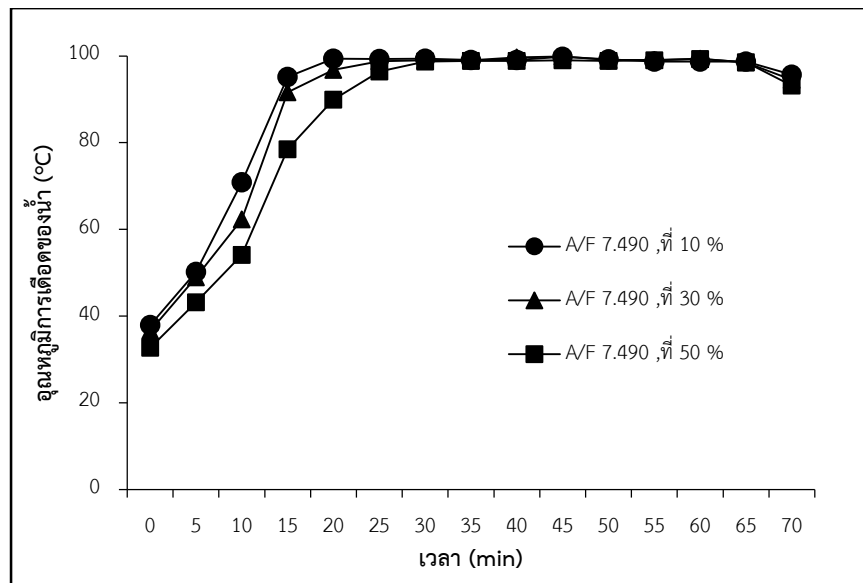




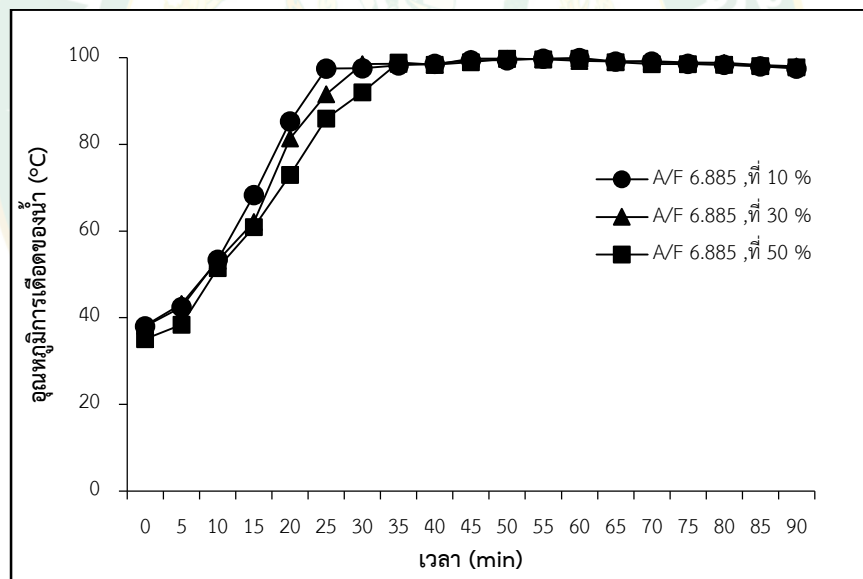
ภาพที่ 53 ประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวลกรณีใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด เมื่อป้อนอากาศสองทาง

#### ระยะเวลาของอุณหภูมิการต้มน้ำต่อสมรรถนะเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง

ภาพที่ 54 และ 55 แสดงอุณหภูมิการต้มน้ำของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำ พบว่า การเพิ่มอากาศทางช่องอากาศ  $V_2$  เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะเวลาอุณหภูมิการเดือดของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากเตาชีวมวลมีการเผาไหม้ชีวมวลที่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น (ปัญจพร, 2560) การเพิ่มอากาศในช่องอากาศ  $V_2$  คิดเป็น 10% ให้ระยะเวลาการเดือดของน้ำสั้นสุดที่ 22 min กรณีของซังข้าวโพด และระยะเวลา 27 min ในกรณีของซังข้าวโพดอัดเม็ด ขณะที่การเพิ่มอากาศ 50% ระยะเวลาการเดือดมากกว่า 30 min ขึ้นไป โดยภาพรวมอุณหภูมิของน้ำ จากการทดลองจะเดือดประมาณ  $97\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นต้นไป



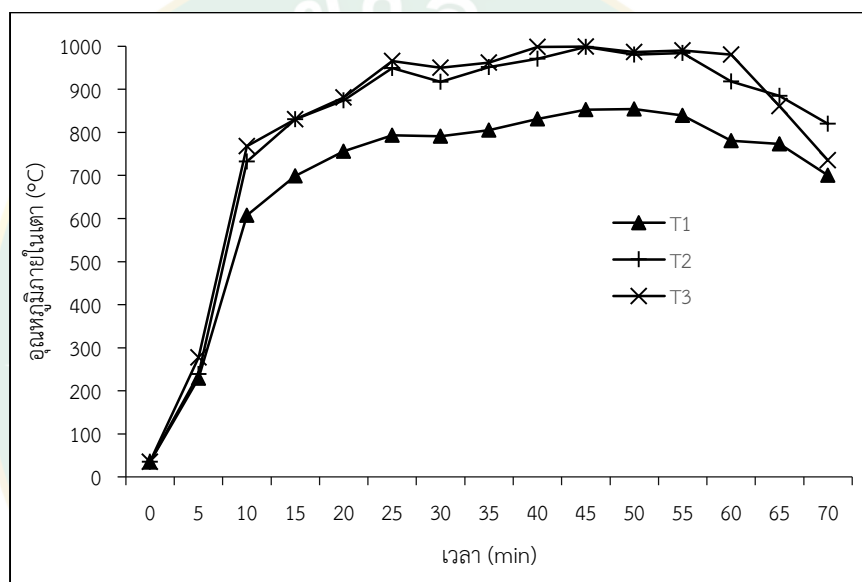
ภาพที่ 54 ระยะเวลาในการเดือดของน้ำกรณิใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง เมื่อป้อนอากาศสองทาง



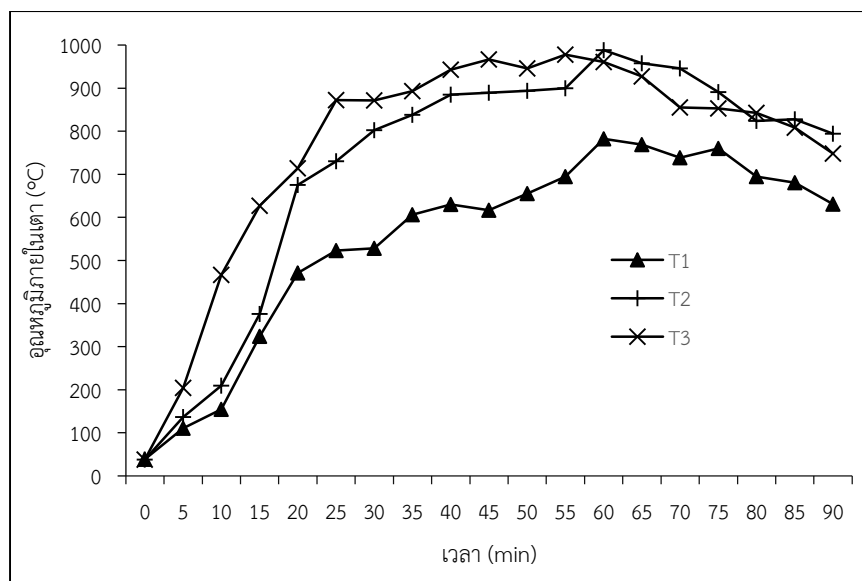
ภาพที่ 55 ระยะเวลาในการเดือดของน้ำกรณิใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด เมื่อป้อนอากาศสองทาง

### อุณหภูมิการเผาไหม้ภายในเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

ภาพที่ 56 และ 57 แสดงอุณหภูมิของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเตาชีวมวล พบว่า การเพิ่มอากาศสองทาง ส่งผลให้อุณหภูมิภายในการเผาไหม้ของเตาชีวมวลเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากเตาชีวมวลมีการเผาไหม้ชีวมวลที่สมบูรณ์เพิ่มขึ้น การเพิ่มอากาศทางช่องอากาศ  $V_2$  คิดเป็น 10% กรณีของซังข้าวโพด มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 999.1 °C เวลาการเผาไหม้ที่ 45 min กรณีของซังข้าวโพดอัดเม็ด มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด 977.5 °C เวลาการเผาไหม้ที่ 55 min โดยภาพรวมอุณหภูมิของเตาชีวมวลเมื่อใช้ซังข้าวโพดมีอุณหภูมิสูงกว่าเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด



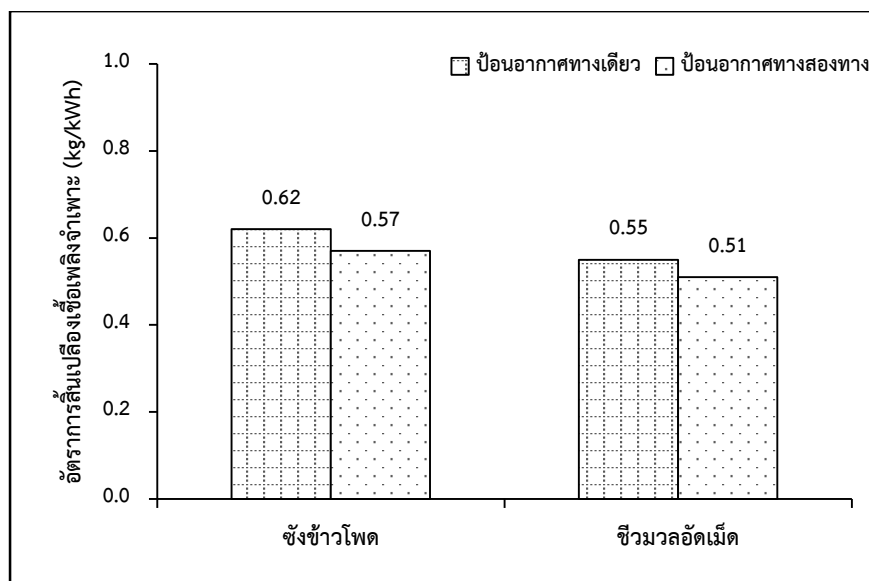
ภาพที่ 56 อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดภายในเตาชีวมวล เมื่อป้อนอากาศสองทาง



ภาพที่ 57 อุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดภายในเตาชีวมวล เมื่อป้อนอากาศสองทาง

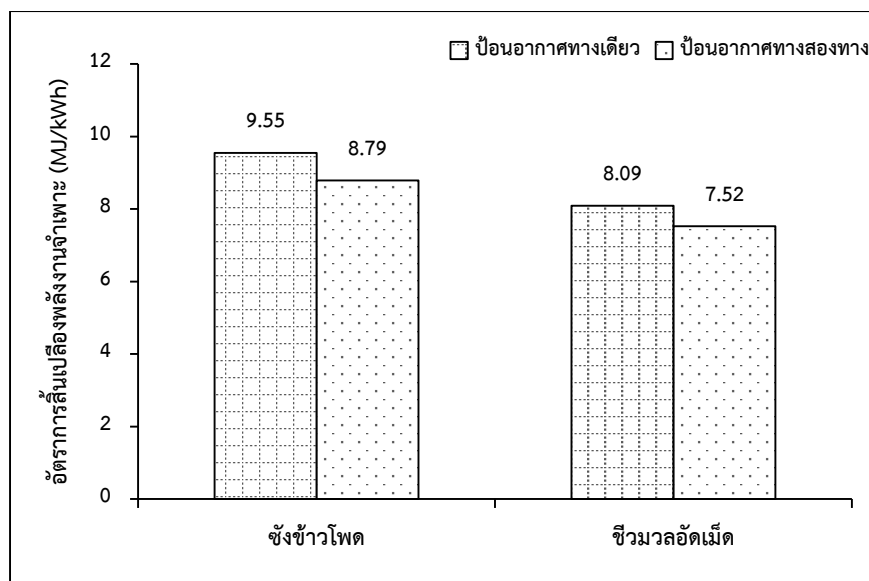
### อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะเตาชีวมวล ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

ภาพที่ 58 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของการป้อนอากาศแบบช่องทางเดียว และแบบสองทาง กรณีของการใช้ซึ่งข้าวโพดและซึ่งข้าวโพดอัดเม็ด โดยพบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศทางช่องทาง  $V_2$  ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะลดลง เนื่องจากการเพิ่มการป้อนอากาศทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงสมบูรณ์ขึ้น และทำให้ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์จากการต้มน้ำและการระเหยน้ำเพิ่มขึ้น การใช้ซึ่งข้าวโพดอัดเม็ดให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะต่ำกว่าการใช้ซึ่งข้าวโพด โดยที่อัตราการป้อนอากาศช่องทางเดียวของซึ่งข้าวโพด มีค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ  $0.62 \text{ kg/kWh}$  และซึ่งข้าวโพดอัดเม็ด เท่ากับ  $0.55 \text{ kg/kWh}$  การป้อนอากาศเพิ่มแบบสองทาง ทำให้มีอัตราการสิ้นเปลืองลดลง ประมาณ  $8.06\%$



ภาพที่ 58 อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะของเตาชีวมวลชนิดป้อนต่อเนื่อง

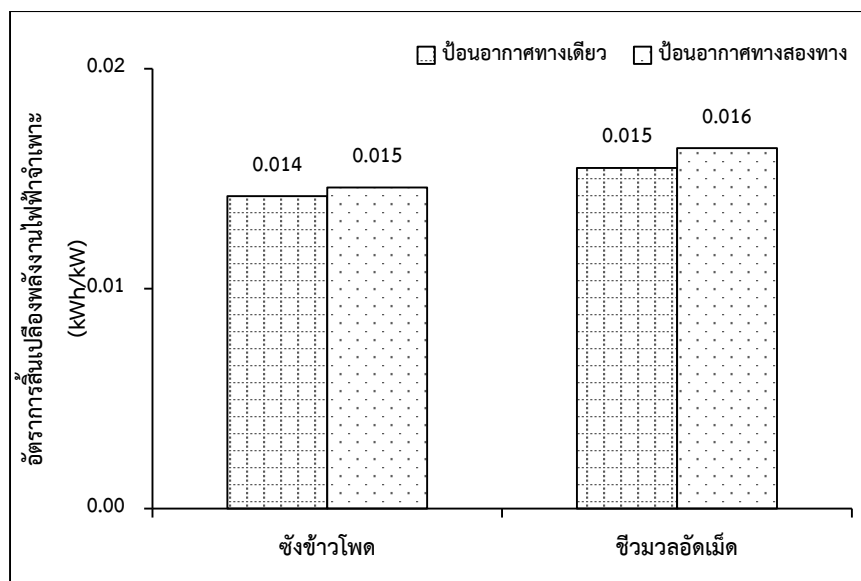
ภาพที่ 59 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการป้อนอากาศแบบช่องทางเดียว และแบบสองทาง พบว่าการปรับอัตราการป้อนอากาศแปรผันตรงกับค่าอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ โดยขึ้นอยู่กับปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงและปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งการกำหนดอัตราการป้อนอากาศทางเดียวของชั่งข้าวโพดและชั่งข้าวโพดอัดเม็ด เท่ากับ 9.55 และ 8.09 MJ/kWh ตามลำดับ โดยให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุด ในขณะที่การกำหนดอัตราการป้อนอากาศสองทาง มีค่า 8.79 และ 7.52 MJ/kWh ตามลำดับ ส่งผลให้อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุด การเพิ่มขึ้นและลดลงของอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะในการผลิตความร้อน ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการทำงานของระบบ และต้นทุนการผลิตพลังงาน (ปัญจพร, 2560) โดยเฉลี่ยอัตราการป้อนชั่งข้าวโพดอยู่ที่ 8.5 kg/h อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจะอยู่ในช่วง 8-10 kJ/kWh และชั่งข้าวโพดอัดเม็ด 6.16 kg/h อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจะอยู่ในช่วง 7-9 kJ/kWh



ภาพที่ 59 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาชีวมวลชนิดป้อนต่อเนื่อง

### วิเคราะห์อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ ของเตาชีวมวลชนิดป้อนต่อเนื่อง

เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่องมีการใช้พลังงานอยู่ 2 ลักษณะ คือ พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้า ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ โดยพบว่า การป้อนอากาศให้กับเตาชีวมวลแบบสองช่องทาง ใช้อัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงกว่าการใช้แบบช่องทางเดียว ทั้งนี้เนื่องจากแบบสองช่องทางมีการเพิ่มจำนวนพัดลมที่ป้อน อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับกำลังที่ใช้ในส่วน of เชื้อเพลิง พบว่า มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 12.5 % การป้อนอากาศทางเดียวในส่วน of ชั่งข้าวโพดและชั่งข้าวโพดอัดเม็ด มีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 0.014 kWh/kW และ 0.015 kWh/kW ในกรณี of การป้อนอากาศแบบสองทาง มีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ 0.015 kWh/kW และ 0.016 kWh/kW



ภาพที่ 60 อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

#### การทดลองการคั่วพริกกับวิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหาร

##### 1. เงื่อนไขการทดลองการคั่วพริกกับวิสาหกิจชุมชน

การทดลองนี้ได้นำเอาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองการต้มข้าวในห้องปฏิบัติการมาทดสอบการคั่วพริกกับวิสาหกิจชุมชน พริกแกงพื้นเมือง ตราแม่อำพร ตั้งอยู่ที่ บ้านเลขที่ 127 หมู่ 3 ต.หนองแหง อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50210 โดยพริกที่ใช้ในการคั่วเฉลี่ย โดยการคั่วจะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 30 min เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบมี 2 ชนิด คือ ชั่งข้าวโพด และชั่งข้าวโพดอัดเม็ด การทดลองนี้ได้ทดสอบเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงดั้งเดิมคือ แก๊สหุงต้ม ขนาด 15 kg/ถัง แบบใช้หัวแก๊สแบบเตาฟู่ รายละเอียดเงื่อนไขการคั่วพริก ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เงื่อนไขการทดลองคั่วพริกในวิสาหกิจชุมชน

ข้อมูลการทดสอบ	เงื่อนไขการทดสอบ
เครื่องเทศที่ใช้ทดสอบ	พริก
เชื้อเพลิงที่ใช้	ซังข้าวโพด และซังข้าวโพดอัดเม็ด
ปริมาณพริกที่ใช้	2 kg
อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ทางช่องทางหลัก	ซังข้าวโพด เท่ากับ $7.49 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ ซังข้าวโพดอัดเม็ด เท่ากับ $6.88 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$
อัตราการป้อนอากาศทางรอง	ซังข้าวโพด และซังข้าวโพดอัดเม็ด 10%

## 2. การประเมินอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงานจำเพาะ

ตารางที่ 11 แสดงผลและลักษณะการใช้งานของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่องเปรียบเทียบกับการใช้ก๊าซหุงต้ม ผลการศึกษา พบว่า ด้านการเปรียบเทียบสมรรถนะของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหารที่เปรียบเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม ภายใต้กิจกรรมการคั่วพริก แสดงรายละเอียดผลสรุปการคั่วพริกโดยใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหารดังตาราง

### อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงาน

อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของก๊าซหุงต้ม ซังข้าวโพด และซังข้าวโพดอัดเม็ด  $0.26 \text{ kg}/\text{kg}_b$ ,  $1.20 \text{ kg}/\text{kg}_b$  และ  $1.03 \text{ kg}/\text{kg}_b$  ตามลำดับ ดังภาพที่ 61 การใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดใช้อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่ำกว่าการใช้ซังข้าวโพด เนื่องจากความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงสูงกว่า ซึ่งส่งผลให้อัตราการเผาไหม้ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นต่ำ (ชนธกานต์ และ จักรกฤต, 2556) ในส่วนของแก๊สหุงต้มที่ทดสอบคั่ว ในสภาวะเดียวกันมีอัตราความสิ้นเปลือง  $0.26 \text{ kg}/\text{kg}_b$  ในส่วนของอัตราสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ พบว่า การใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนต่อเนื่องกับซังข้าวโพด ใช้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงสุดคิดเป็น  $18.68 \text{ MJ}/\text{kWh}$  ในขณะที่การใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ด ใช้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ  $15.13 \text{ MJ}/\text{kg}_b$  ถัดมาในส่วนของก๊าซหุงต้มนี้ พบว่า มีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ  $12.81 \text{ MJ}/\text{kg}_b$  ดังภาพที่ 62 ผลที่เกิดขึ้นพอสรุปได้ว่า เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง สามารถทำงานเกี่ยวกับการคั่วได้ โดยมีอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะสูงกว่าการใช้ก๊าซหุงต้ม เฉลี่ย  $31.42 \%$

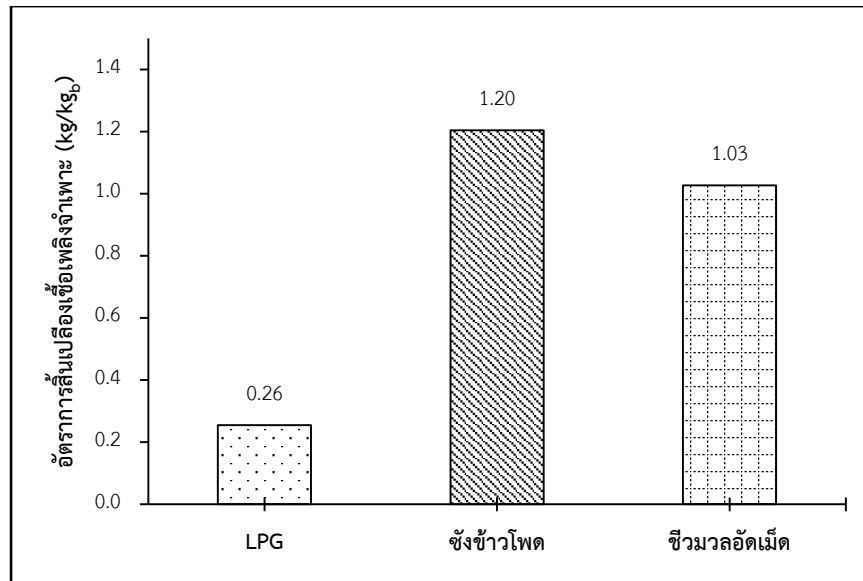


ตารางที่ 11 ผลการคั่วพริกโดยใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

คุณสมบัติ	เตาก๊าซหุงต้ม	เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง	
		ซังข้าวโพด	ชีวมวลอัดเม็ด
เชื้อเพลิงที่ใช้	ก๊าซหุงต้ม	ซังข้าวโพด	ชีวมวลอัดเม็ด
ระยะเวลาในการคั่ว (min)	30	17	20
ปริมาณพริกที่ใช้ในการคั่ว (kg <sub>b</sub> )	2	2	2
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (kg)	0.51	2.41	2.05
ค่าความร้อนต่ำ(MJ/kg)	50.22	15.51	14.74
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (kg/h)	1.02	8.5	6.16
อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ (kg/kg <sub>b</sub> )	0.26	1.20	1.03
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg <sub>b</sub> )	12.81	18.68	15.13
ประสิทธิภาพความร้อน (%)	50.47	39.34	39.06

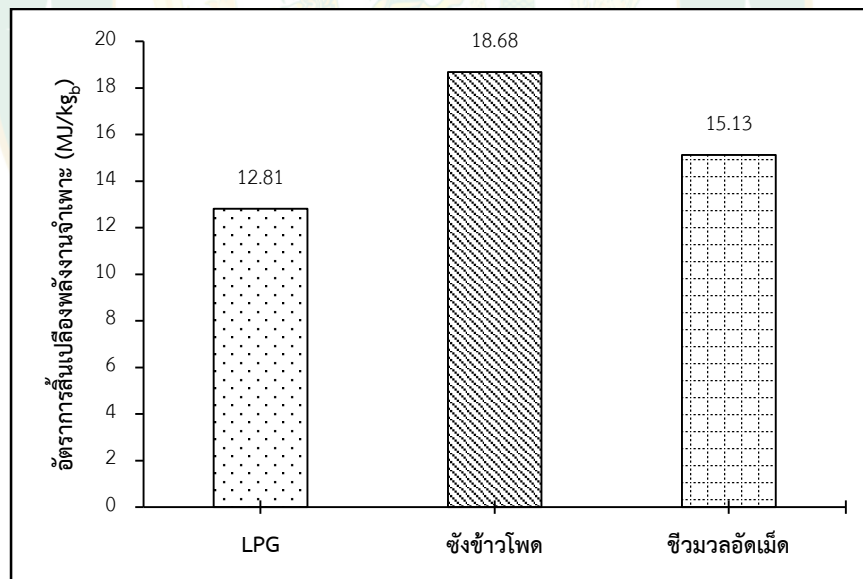
จากตารางที่ 11 ผลการคั่วพริกโดยใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เมื่อทำการคั่วพริกที่ 2 kg เท่ากัน พบว่าระยะเวลาในการคั่วพริกของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง มีระยะเวลาในการคั่วพริกสั้นกว่าการใช้ก๊าซหุงต้ม 10-13 min เนื่องจากเตาชีวมวลมีปริมาณความร้อนที่สูงกว่าก๊าซหุงต้ม การคั่วพริกจำเป็นต้องใช้ไฟอ่อนหรือปริมาณความร้อนน้อย เตาชีวมวลไม่สามารถลดปริมาณความร้อน หรือไม่สามารถหรี่ไฟได้ จึงทำให้มีปริมาณความร้อนที่สามารถนำมาใช้งานได้อีก จึงได้ทำการเพิ่มปริมาณพริกที่ใช้ในการคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เป็น 3 kg

จากการทดสอบการคั่วพริกที่ 3 kg พบว่ามีระยะเวลาในการคั่วพริก ด้วยซังข้าวโพดและซังข้าวโพดอัดเม็ด 26 min และ 30 min ตามลำดับ การคั่วพริกในระยะเวลาเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน แต่ปริมาณพริกที่ใช้ในการคั่วต่างกัน การคั่วพริกด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สามารถคั่วพริกในปริมาณที่มากกว่าการใช้เตาก๊าซหุงต้ม ดังนั้นในการทดลองนี้จะนำไปประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์การใช้เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องต่อไป



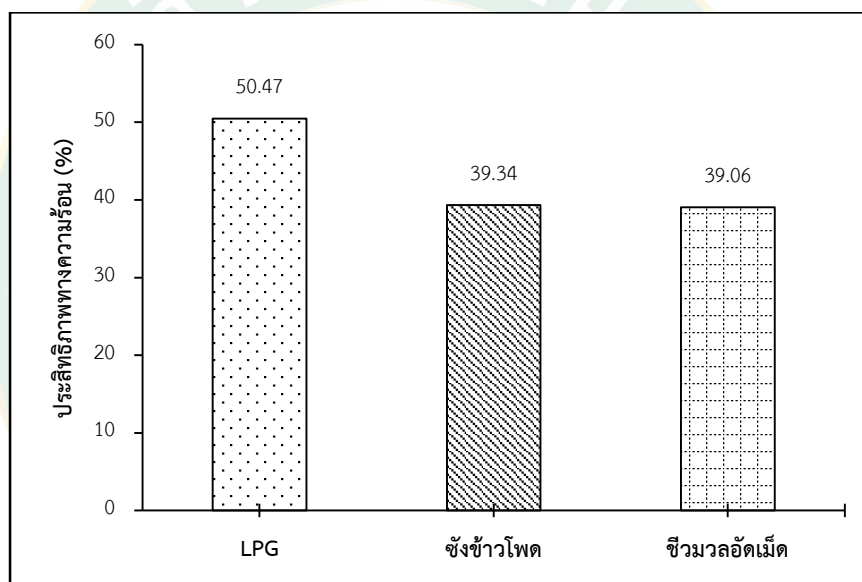
ภาพที่ 61 อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงของเตาชีวมวลเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม

หมายเหตุ: เมื่อ kg<sub>b</sub> คือ ปริมาณมวลของผลิตภัณฑ์คั่ว คือ ฟริก



ภาพที่ 62 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานของเตาชีวมวลเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม

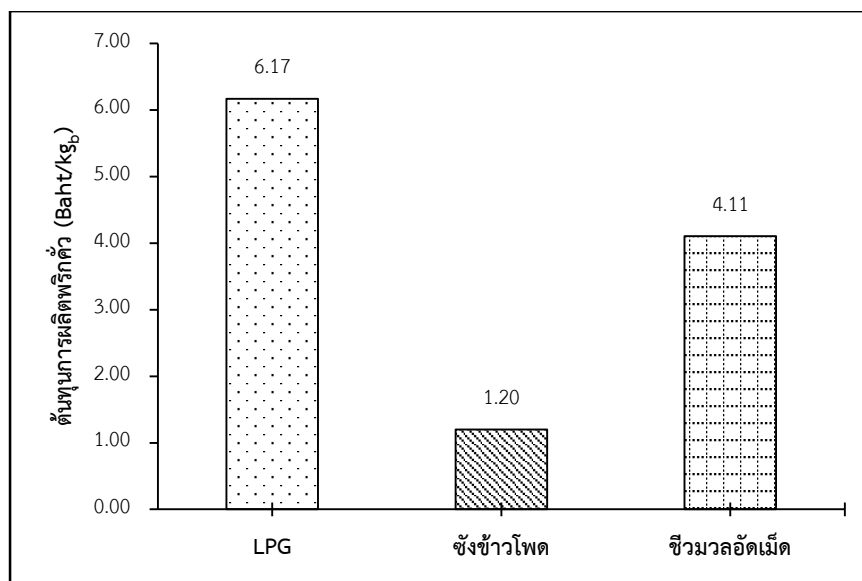
**ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องเทียบกับเตาก๊าซหุงต้ม**  
 เนื่องจากการวัดประสิทธิภาพเตาชีวมวลแบบป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง ไม่สามารถวัดด้วยการคั่ว  
 ดังนั้นในหัวข้อนี้ จึงเป็นการนำเอาการทดสอบด้วย วิธีการต้มน้ำ มาทดสอบเทียบกับการใช้ก๊าซหุงต้ม  
 อีกครั้งที่ วิสาหกิจแปรรูปอาหาร แม่อำพร ผลการศึกษา พบว่าประสิทธิภาพความร้อนของเตาชีวมวล  
 เมื่อใช้ซังข้าวโพด และซังข้าวโพดอัดเม็ด มีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าร้อยละเท่ากับ 39.06 – 39.34  
 ในขณะที่การใช้ก๊าซหุงต้มมีค่าเฉลี่ยร้อยละสูงสุด 50.47 สาเหตุที่ใช้ก๊าซหุงต้ม ให้ประสิทธิภาพความ  
 ร้อนสูงกว่า เนื่องจากก๊าซหุงต้มมีสถานะเป็นแก๊ส ระหว่างการเผาไหม้กระบวนการผสม ของเชื้อเพลิง  
 มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง ซึ่งอากาศนี้เข้าผสมค่อนข้างยาก ดังนั้นประสิทธิภาพ  
 ของการใช้เตาก๊าซหุงต้มจึงสูงกว่า (Borman,1998)



ภาพที่ 63 ประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องกับเตาก๊าซหุงต้ม

### 3. การประเมินต้นทุนการคั่วเครื่องเทศ (พริก)

จากภาพที่ 64 แสดงต้นทุนการคั่วพริกของวิสาหกิจชุมชนแปรรูป น้ำพริกแกง แม่อำพร  
 พบว่า เตาชีวมวลที่ใช้ซังข้าวโพดมีต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนต่ำที่สุด โดยมีต้นทุนการผลิตพริก  
 อยู่ที่ 1.2 Baht/kg<sub>b</sub> ในขณะที่เดียวกันการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดมีต้นทุนการผลิตพริกคั่วคือ 4.11  
 Baht/kg<sub>b</sub> และการใช้เตาแก๊สหุงต้มมีต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนสูงคือ 6.17 Baht/kg<sub>b</sub> จาก  
 การวิเคราะห์ข้อมูลการใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดมีต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนสูงกว่าซังข้าวโพด  
 เนื่องจากเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดมีต้นทุนสูงกว่าซังข้าวโพด โดยชีวมวลอัดเม็ดมีต้นทุนอยู่ที่ 4  
 Baht/kg ในขณะที่ซังข้าวโพดมีต้นทุนอยู่ที่ 1 Baht/kg



ภาพที่ 64 ต้นทุนการผลิตพริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน

### การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์พริกคั่วภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ

การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์พริกคั่วภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ จะทำการแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่

1. การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์พริกคั่วด้วยประสาทสัมผัส (Sensory evaluation)
2. การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์พริกคั่ว

ผลการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์พริกคั่วภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ ในแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์พริกคั่วด้วยประสาทสัมผัส

การประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์พริกคั่วด้วยประสาทสัมผัสจากการสำรวจประชากรจำนวน 10 คน ได้แก่ กลุ่มวิสาหกิจชุมชน “น้ำพริกแกง ตราแม่อำพร” ต.หนองแหง อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ โดยวิธีการทดสอบการยอมรับ (Acceptance testing) ทำการประเมินคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชนเทียบกับคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์พริกคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคความแปรปรวน (Analysis of variance) (สุรชัย และคณะ., 2558) จากผลการสำรวจประชากรจำนวน 10 คน โดยแบบทดสอบ 5 ระดับ (5-point Hedonic scale) ต่อคุณลักษณะที่ปรากฏ สีของผลิตภัณฑ์ และการยอมรับโดยรวม ผลการวิเคราะห์พบว่า คุณลักษณะ

ความชอบด้านรูปร่าง และสีของผลิตภัณฑ์พริกคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง มีคะแนนความชอบแตกต่างกันทางสถิติ ( $P \geq 0.05$ ) โดยคะแนนความชอบรวมมากที่สุดคือ 4.00 คะแนน ซึ่งอยู่ในระดับชอบมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากผลิตภัณฑ์พริกคั่วจากการทดลองมีสีที่เข้มกว่าผลิตภัณฑ์พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน ซึ่งมีคะแนนความชอบไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P \geq 0.05$ ) โดยมีคะแนนความชอบรวม 3.60 คะแนน ซึ่งผลการยอมรับโดยรวมของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์พริกคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องอยู่ในระดับชอบมาก ผลการประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์พริกคั่วสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยด้านความชอบของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์พริกคั่ว (n=10)







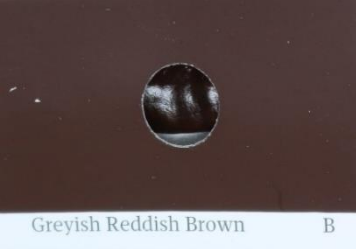
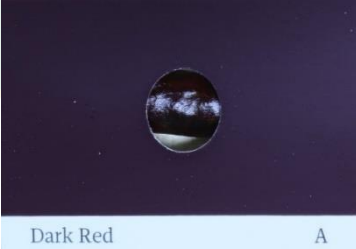
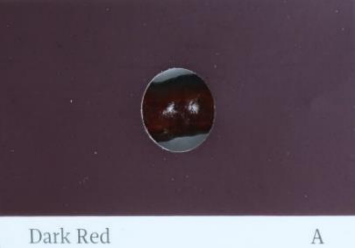

คุณสมบัติ	ผลิตภัณฑ์พริกคั่ว จากการทดลอง
ลักษณะที่ปรากฏ	3.70±0.48
สี	3.60±0.52
การยอมรับโดยรวม	4.00±0.00

หมายเหตุ ค่าของข้อมูล คือ ค่าเฉลี่ย  $\pm$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

## 2. การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์พริกคั่วโดยใช้สมุดคู่มือเทียบสี (RHS colour chart)

การวิเคราะห์คุณภาพสีของผลิตภัณฑ์พริกคั่ว จะทำการสุ่มตัวอย่างพริกคั่วเพื่อนำมาเทียบสีจำนวน 5 ตัวอย่าง ซึ่งการวิเคราะห์จะใช้คู่มือเทียบสีมาตรฐาน RHS colour chart ทำการเปรียบเทียบระหว่างสีของผลิตภัณฑ์พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน และผลิตภัณฑ์พริกคั่วที่ได้จากการทดลอง สามารถวิเคราะห์สีและทำการเปรียบเทียบสีของพริกคั่วทั้ง 2 วิธี ได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การประเมินลักษณะสีของผลิตภัณฑ์พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชนและผลิตภัณฑ์พริกคั่วที่ได้จากการทดลอง

พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน (* )	พริกคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิด ป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง (**)	สีของพริกคั่วจากการเทียบสี ด้วย คู่มือเทียบสี R.H.S Color chart
 Brownish Orange A	 Dark Reddish Orange A	* กลุ่มสี Greyed-orange N167 เฉดสี Brownish Orange A ** กลุ่มสี Greyed-orange 173 เฉดสี Dark Reddish Orange A
 Strong Brown A	 Moderate Reddish Orange C	* กลุ่มสี Greyed-orange 172 เฉดสี Strong Brown A ** กลุ่มสี Greyed-Red 178 เฉดสี Moderate Reddish Orange C
 Dark Reddish Orange B	 Deep Red A	* กลุ่มสี Greyed-Red 178 เฉดสี Dark Reddish Orange B ** กลุ่มสี Greyed-Purple 185 เฉดสี Deep Red A
 Greyish Reddish Brown B	 Dark Red A	* กลุ่มสี Greyed-Purple 187 เฉดสี Dark Red A ** กลุ่มสี Greyed-Purple 183 เฉดสี Dark Red A
 Dark Red A	 Dark Greyish Purple A	* กลุ่มสี Greyed-Brown 200 เฉดสี Greyish Reddish Brown B ** กลุ่มสี Greyed-Black 202 เฉดสี Dark Greyish Purple A

จากตารางที่ 13 จะเห็นว่า พริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน มีสีส้มเข้มหรือสีน้ำตาลส้ม เทียบสีจะอยู่ที่ในกลุ่ม Greyed-orange N167, สีแดงส้มเข้มหรือสีน้ำตาลเข้ม เทียบสีจะอยู่ในกลุ่ม Greyed-orange 172, สีแดงเข้มหรือสีแดงอมน้ำตาลเข้ม เทียบสีจะอยู่ในกลุ่ม Greyed-Red 178, สีแดงม่วงเข้มหรือสีม่วงเข้มอมดำ เทียบสีจะอยู่ในกลุ่ม Greyed-Purple 187 และมีสีน้ำตาลเข้มหรือมีสีน้ำตาลแดงเข้มอมดำ เทียบสีจะอยู่ที่ในกลุ่ม Greyed-Brown 200 จากการเทียบสีของพริกคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง จากตารางจะเห็นว่า มีสีแดงเข้มหรือสีแดงอมส้มเข้ม เทียบสีจะอยู่ที่ในกลุ่ม Greyed-orange 173, สีแดงเข้มหรือสีแดงอมส้มปลายกลาง เทียบสีจะอยู่ในกลุ่ม Greyed-Red 178, สีแดงเข้มหรือสีแดงอมม่วงเข้ม เทียบสีจะอยู่ในกลุ่ม Greyed-Purple 185, สีม่วงเข้มอมดำหรือสีม่วงแดงเข้มอมดำ เทียบสีจะอยู่ในกลุ่ม Greyed-Purple 183 และมีสีดำเทาหรือม่วงเข้มอมดำ เทียบสีจะอยู่ที่ในกลุ่ม Greyed-Black 202

จากการเปรียบเทียบสีของพริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน กับพริกคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง พบว่ามีลักษณะสีที่อยู่ในกลุ่มเฉดสีเดียวกัน คือ Greyed-orange 173 และ Greyed-Red 178 โดยส่วนใหญ่แล้วมีกลุ่มสีเดียวกัน เฉดใกล้เคียงกัน แต่ยังพบว่ามีบางกลุ่มสีที่ต่างกันคือ การคั่วพริกของวิสาหกิจชุมชน มีกลุ่มสี Greyed-Brown 200 แต่การคั่วพริกด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง พบกลุ่มสี Greyed-Black 202 เนื่องจากอยู่ในกลุ่มสีเข้มกว่า 1 กลุ่ม แต่โดยรวมแล้วกลุ่มสีมีความใกล้เคียงกัน

### การประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์การใช้เตาชีวมวล ชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการคั่วพริกด้วยเตาชีวมวลแบบต่อเนื่อง สำหรับการคั่วพริกของวิสาหกิจชุมชน ได้ทำการประเมินผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value: NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) และระยะเวลาคืนทุน การวิเคราะห์ค่าผลตอบแทนสุทธิจะแสดงให้เห็นว่าเตาชีวมวลที่กำลังพิจารณาดังกล่าวเหมาะสมกับการลงทุนหรือไม่ และการวิเคราะห์ค่าอัตราผลตอบแทนภายในเป็นการหาค่า discount rate (i) ที่ทำให้ค่าผลตอบแทนสุทธิมีค่าเท่ากับศูนย์หากค่าอัตราผลตอบแทนภายในมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าของทุน discount rate (i) ถือได้ว่าการลงทุนดังกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุน

ตารางที่ 14 แสดงเงื่อนไขในการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการคั่วพริก ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มวิสาหกิจชุมชนมีเงินลงทุนสำหรับค่าวัสดุเป็นจำนวน 600,000 บาท/ปี และมีเงินลงทุนค่าแก๊สหุงต้ม เป็นจำนวน 14,810.40 บาท/ปี โดยมีรายได้จากการขายพริกป่น 816,000 บาท/ปี คิดเป็นรายได้สุทธิ 201,189.60 บาท/ปี และค่าผลตอบแทนสุทธิ ของการใช้เตาชีวมวลแบบต่อเนื่อง ดัง

ตารางที่ 15 เมื่อใช้ซังข้าวโพด ผลตอบแทนสุทธิ (NPV) 724,196.53 บาท ผลกำไรที่เพิ่มขึ้น 116,469.44 บาท/ปี ระยะเวลาคืนทุน 0.34 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 72% และเมื่อใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดผลตอบแทนสุทธิ (NPV) 689,283.34 บาท ผลกำไรที่เพิ่มขึ้น 111,148.40 บาท/ปี ระยะเวลาคืนทุน 0.36 ปี และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 67% ที่ทำให้ค่า NPV เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด ซึ่งถือได้ว่าการลงทุนดังกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุน

ตารางที่ 14 เงื่อนไขการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการคั่วพริก

ลำดับ	รายการ	จำนวน	หน่วยนับ
แก๊สหุงต้ม			
1	จำนวนรอบ	5.00	รอบ/วัน
2	ปริมาณแก๊สหุงต้มที่ใช้	0.51	kg/รอบ
3	ราคาแก๊สหุงต้ม	24.2	บาท/kg
4	ปริมาณพริกที่ใช้คั่ว	2	kg/รอบ
5	ราคาซื้อวัตถุดิบ (พริก)	250	บาท/kg
6	ราคาขายพริกป่น	340	บาท/kg
7	จำนวนวันที่คั่ว	20	วัน/เดือน
เตาชีวมวล ใช้ซังข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง			
8	ปริมาณซังข้าวโพดที่ใช้	1.8	kg/รอบ
9	ปริมาณพริกที่ใช้คั่ว	3	kg/รอบ
10	ราคาซังข้าวโพด	1	บาท/kg
11	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า	0.10	kWh/รอบ
เตาชีวมวล ใช้ซังข้าวโพดอัดเม็ดเป็นเชื้อเพลิง			
12	ปริมาณซังข้าวโพดอัดเม็ดที่ใช้	1.6	kg/รอบ
13	ปริมาณพริกที่ใช้คั่ว	3	kg/รอบ
14	ราคาซังข้าวโพดอัดเม็ด	4	บาท/kg
15	ปริมาณการใช้ไฟฟ้า	0.10	kWh/รอบ
16	ราคาค่าไฟฟ้า	4.00	บาท/kWh
17	เงินลงทุนสร้างเตาชีวมวล	40,000	บาท
18	อายุการใช้งาน	10.00	ปี
19	ค่าบำรุงรักษาคิดเป็น 10% ของค่าเครื่อง	4,000	บาท/ปี
20	ดอกเบี้ย	8.50	%



ตารางที่ 15 สรุปผลการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาซีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

รายการ	เชื้อเพลิงซังข้าวโพด	ซังข้าวโพดอัดเม็ด
ผลตอบแทนสุทธิ (NPV) (บาท)	724,196	689,283
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) (%)	72	67
ผลกำไรที่เพิ่มขึ้น (บาท/ปี)	116,464	111,148
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	0.34	0.36



## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบและสร้างเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร โดยชีวมวลที่ใช้ในการศึกษา คือ ชังข้าวโพด และชังข้าวโพดอัดเม็ด นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอัตราการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ คือการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว และการป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้สองทาง ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

การวิเคราะห์ผลการทดสอบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร สามารถสรุปการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการออกแบบเตาชีวมวลขนาด 14.23 kW โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 cm และความสูงของห้องเผาไหม้ 55 cm การป้อนเชื้อเพลิงสามารถป้อนเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง
2. การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลนี้ได้มีการทดสอบโดยใช้ชังข้าวโพดและชังข้าวโพดอัดเม็ด เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ มีอัตราการความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 8.5 kg/h และ 6.15 kg/h ตามลำดับ พบว่าชังข้าวโพด ที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.490 มีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 36.21 เมื่อทำการป้อนอากาศที่ช่อง secondary air พบว่าการป้อนอากาศที่ 10 % มีประสิทธิภาพร้อยละ 39.34 และเมื่อใช้ชังข้าวโพดอัดเม็ดอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 6.885 มีประสิทธิภาพสูงสุดร้อยละ 36.31 เมื่อทำการป้อนอากาศที่ช่อง secondary air พบว่าการป้อนอากาศที่ 10 % มีประสิทธิภาพร้อยละ 39.06 สรุปคือ ผลการเปรียบเทียบการใช้งานที่มีการป้อนอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่มีการป้อนอากาศ 2 จุด คือจุดแรกช่อง primary air และจุดสองที่ช่อง secondary air จึงทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 7.57-8.64 จากการป้อนอากาศจุดเดียว คิดเป็นอากาศส่วนเกิน (% Excess air) 25-30 % ซึ่งประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 7.490 ซึ่งมี Equivalence Ratio เท่ากับ 1.19
3. การคำนวณของวิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหาร น้ำพริกแกง แม่อำพร พบว่าเตาชีวมวลที่ใช้ชังข้าวโพดมีต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนต่ำที่สุด โดยมีต้นทุนการผลิตพริกอยู่ที่ 1.2 Baht/kg<sub>b</sub> ในขณะที่เดียวกันการใช้ชังข้าวโพดอัดเม็ดมีต้นทุนการผลิตพริกคือ 4.11 Baht/kg<sub>b</sub> และการใช้ก๊าซหุงต้มมีต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนสูงสุดคือ 6.17 Baht/kg<sub>b</sub> จากการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้ชังข้าวโพดอัดเม็ดมีต้นทุนการผลิตพลังงานความร้อนสูงกว่าชังข้าวโพด เนื่องจากเชื้อเพลิงชังข้าวโพด

อัดเม็ดมีต้นทุนสูงกว่าซังข้าวโพด โดยชีวมวลอัดเม็ดมีต้นทุนอยู่ที่ 4 Baht/kg ขณะที่ซังข้าวโพดมีต้นทุนอยู่ที่ 1 Baht/kg

4. การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์พริกคั่วภายหลังเสร็จสิ้นกระบวนการ พบว่าการทดสอบการยอมรับจากวิสาหกิจชุมชนอยู่ในระดับพึงพอใจมาก ซึ่งมีคะแนนโดยรวมต่อคุณลักษณะที่ปรากฏ สี และการยอมรับโดยรวมแตกต่างกันทางสถิติ ( $P \geq 0.05$ ) คือ 3.70 3.60 และ 4.00 คะแนนตามลำดับ มีลักษณะสีที่อยู่ในกลุ่มเฉดสีเดียวกัน คือ Greyed-orange 173 และ Greyed-Red 178 โดยส่วนใหญ่แล้วมีกลุ่มสีเดียวกัน เฉดสีใกล้เคียงกัน

5. ด้านเศรษฐศาสตร์การใช้งานเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร พบว่า การใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดให้ผลกำไรเพิ่มขึ้นต่อปีเฉลี่ย 116,464 บาท/ปี และระยะเวลาคืนทุน 0.34 ปี โดยมีค่าผลตอบแทนสุทธิ (NPV) 724,196 บาท และมีค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 72 % การใช้เชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ดให้ผลกำไรเพิ่มขึ้นต่อปีเฉลี่ย 111,148 บาท/ปี และระยะเวลาคืนทุน 0.36 ปี โดยมีค่าผลตอบแทนสุทธิ (NPV) 689,283 บาท และมีค่าอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) 67 % ที่ทำให้ค่า NPV เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด ซึ่งถือได้ว่าการลงทุนดังกล่าวมีความเหมาะสมในการลงทุน

### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเตานี้เป็นเตาชีวมวล เงื่อนไขการคั่วจะต่างจากการคั่วโดยใช้เตาก๊าซหุงต้ม ดังนั้นควรมีการศึกษาในเรื่องของคุณภาพของผลิตภัณฑ์เพิ่มเติม
2. จากการทดลองเป็นข้อมูลการคั่วพริก หากมีการนำไปใช้ในการคั่วผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ อาจจะต้องมีการศึกษาเงื่อนไขเพิ่มเติม เนื่องจากการคั่วผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน
3. วิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหาร มีการใช้งานหลากหลายประเภท เช่น การคั่ว การนึ่ง การอบ การต้ม เป็นต้น กรณีศึกษา ศึกษาการคั่ว แต่กรณีใช้งาน เหมาะกับการใช้ต่อเนื่องทั้งวันจะได้ประโยชน์มาก เตาชีวมวลสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ ได้ในวิสาหกิจชุมชนที่ต้องมีการใช้ความร้อนในระยะเวลานาน เหมาะกับการใช้งานทั้งวัน และประหยัดเชื้อเพลิง เพราะฉะนั้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในวิสาหกิจชุมชนแปรรูปอาหารชนิดอื่น ๆ และสามารถเผยแพร่ได้

## บรรณานุกรม

- เชิดชูเกียรติ ผาคา. 2560. **พัฒนาและประเมินสมรรถนะของเตาชีวมวลแบบไหลลงและศึกษาขนาดที่เหมาะสมของเชื้อเพลิง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. **โครงการส่งเสริมการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพ**. กรุงเทพฯ: กระทรวง พลังงาน.
- \_\_\_\_\_. 2562. **สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย มกราคม-มิถุนายน 2562**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://www.dede.go.th/ewt\\_news.php?nid=50540](http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=50540) (25 สิงหาคม).
- กฤตพร แซ่แ่ง สายจันทร์ และ ลัญจกร นิลกาญจน์. 2561. **กระบวนการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวมวลภาคครัวเรือนเพื่อลดการใช้แก๊สหุงต้ม**. วารสารนาคบุตรปริทรรศน์ มหาวิทยาลัยราชภัฏ นครศรีธรรมราช.
- กฤษกร รับสมบัติ. 2555. **การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเปลือกไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเครื่องกำเนิดไอน้ำโดยการเพิ่มความหนาแน่นของเชื้อเพลิง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- กัญญา บุญเกียรติ. 2544. **เชื้อเพลิงและการเผาไหม้**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กิตติกร สาสุจิตต์. 2556. **เทคโนโลยีพลังงานชีวมวล**. เชียงใหม่: สาขาวิชาพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- จิตรภรณ์ วงศ์จินา และ อุศรวดี ชื่นทิ. 2555. **การพัฒนาและการเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลเชื้อเพลิงแกลบสำหรับชุมชน**. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- จิรพัทธ์ ชูโชติถาวร. 2556. **การวิเคราะห์พลังงานและเศรษฐศาสตร์ของการผลิตความร้อนจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ชนธกานต์ ไสยิ่ง และ จักรกฤต ไคร์โพ้ง. 2556. **การพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลสำหรับครัวเรือน**. เชียงใหม่: วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ณัฐฉมิ ดุษฎี, อภิชาติ สวนคำกอง, ชูรัตน์ ธารารักษ์ และ นิกราน หอมดวง. 2551. **การศึกษาการใช้ชีวมวลในภาคเศรษฐกิจต่าง ๆ และชีวมวลที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์ (ภาคเหนือ)**. แหล่งทุนมูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม.
- ธเนศ ไชยชนะ. 2547. **การวิเคราะห์พลังงานเพื่อการผลิตข้าวในภาคเหนือของประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- ธนชาติ มหาวัน. 2560. **การพัฒนาเตาก๊าซชีววมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ฉัตรพัทธ์ ลิ้มกุล และ ชินรัชช์ เจริญพงษ์. 2554. **การประยุกต์หลักการอากาศไหลหมุนวนในเตาเผาเชื้อเพลิงชีววมวล**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธีรศักดิ์ ฤกษ์สมบูรณ์. 2533. **สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนกับการวิเคราะห์แบบประมาณของถ่านหินแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นคร ทิพย์วงศ์. 2553. **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีววมวล**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- นงนุช ปรมาคม. 2544. **ธนกิจเกษตร**. กรุงเทพฯ: ฟีนิกซ์พับลิชชิง.
- ปรัชญา กริโส. 2555. **การทดสอบระบบผลิตพลังงานจากขยะมูลฝอยโดยเทคโนโลยีก๊าซซิฟิเคชันแบบไหลลง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- ปัญญาพร หนาดคำ. 2560. **การเพิ่มค่าความร้อนของโปรตีนเคอร์แกสที่ผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้น้ำ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- พงศ์สถิตย์ ศรีภักดี. 2561. **ออกแบบ สร้าง และทดสอบสมรรถนะเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบมัลท์โฟลว์โดยใช้เชื้อเพลิงชีววมวล**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- พรายพล คุ่มทรัพย์, ภูรี สิริสุนทร และ ณพล สุกใส. 2553. **ตลาดก๊าซปิโตรเลียมเหลว: นโยบายราคาและแนวทางเลือกของประเทศไทย**. กรุงเทพฯ: ศูนย์บริการวิชาการเศรษฐศาสตร์ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- วารสารณ์ ทุมชาติ. 2557. **การผลิตโปรตีนเคอร์แกสจากเตาแบบ Inverted Downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง**. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 7(1), 26-39.
- วันชัย ริจิรวนิช และ ช่อม พลอยมีค่า. 2545. **เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม**. กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิฑูรย์ ชิงถ่วงทอง และ พงษ์เจต พรหมวงศ์. ม.ป.ป. **อิทธิพลของมุมปะทะของครีบวางขวางต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีววมวลภายในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด**. ใน การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย 9.
- ศิรินุช จินดารักษ์. 2551. **การเปลี่ยนรูปชีววมวลเป็นพลังงาน**. พิษณุโลก: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- สมชาติ ฉันทศิริวรรณ. 2558. **วิศวกรรมโรงไฟฟ้า**. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

- สมมาส แก้วล้วน, ดำรงค์ดี จันโทสี, สุรัชชัย จันทร์ศรี และ เวคิน ปิยรัตน์. 2556. การทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลขนาด 20 kW. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*, 24-33.
- \_\_\_\_\_. 2556. การทดสอบประสิทธิภาพของเตาชีวมวลสำหรับหุงต้มแบบอากาศไหลขึ้น. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [www.thaiscience.info](http://www.thaiscience.info) (1 กุมภาพันธ์ 2561).
- สุธินี หิรัญประเสริฐศรี และ สุเทพ บุตรีดี. 2557. การศึกษาสภาวะเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝังกลบโดยผ่านกระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์*, 16-27.
- สุพิน จอดนอก. 2553. **ขบวนการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาชีวมวลทรงกระบอก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สุรัชชัย อุดมอ่าง, นิรมล อุดมอ่าง และ รัฐนันท์ พงศ์วิริทธิ์. 2558. การยอมรับและพฤติกรรมของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ชาสมุนไพร. *วารสารศรีนครินทร์วิโรฒวิจัยและพัฒนา สาขามนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์*, 187-199.
- Belonio, A. T. 2005. **Rice Husk Gas Stove Handbook**, Appropriate Technology Center.
- Bhattacharya, S. C., Abdul Salam, P., Pham, H. L. and Ravindranath, N. H. 2003. Sustainable biomass production for energy in selected Asian countries. **Biomass and Bioenergy**, 25 (471-482).
- Bhattu, D., Zotter, P., Zhou, J., Stefenelli, G., Klein, F., Bertrand, A., Temime-Roussel, B., Marchand, N., Slowik, J. G. and Baltensperger, U. 2019. Effect of stove technology and combustion conditions on gas and particulate emissions from residential biomass combustion. **Environmental science and technology**, 53(4), 2209-2219.
- Curran, H. J. 2019. Developing detailed chemical kinetic mechanisms for fuel combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, 37(1), 57-81.
- Gaba, A. and Lordache, S. F. 2011. Reduction of Air Pollution by Combustion Processes. **The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources**, 119.
- Jain, T. & Sheth, P. N. 2019. Design of energy utilization test for a biomass cook stove: Formulation of an optimum air flow recipe. **Energy**, 166(1097-1105).
- Leon, M., Bhattacharya, S., A.H.Md.M.R.Siddique, Pham, H.-L. and Mahandari, C. 1999. **Study on Improved Institutional Biomass Stoves**. In Solar World Congress – ISES. (serial online) 99, 4 – 9.

- Molino, A., Chianese, S. and Musmarra, D. 2016. Biomass gasification technology: The state of the art overview. **Journal of Energy Chemistry**, 25(1), 10-25.
- Ojolo, S. J. and Orisaleye, J. I. 2012. Development of an Inverted Downdraft Biomass Gasifier Cookstove. **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)**, 3(3), 513-516.
- Panwar, N. L. & Rathore, N. S. 2008. Design and performance evaluation of a 5 kW producer gas stove. **Biomass and Bioenergy**, 32, 1349 – 1352.
- Reed, T. B. & Das, A. 1988. **Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems** (No. SERI/SP-271-3022; Other: ON: DE88001135 United States 10.2172/5206099 Other: ON: DE88001135 NTIS, PC A07/MF A01; 1. NREL English); Solar Energy Research Inst., Golden, CO (USA).
- Suvarnakuta, P. & Suwannakuta, P. 2006. **Biomass cooking stove for sustainable energy and environment**. The 2<sup>nd</sup> Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE 2006), 21-23 November 2006, Bangkok, Thailand.
- Tillman, D. A. 1991. **Combustion of Solid Fuels and Wastes**. San Diego: Academic Press.
- Vyas, D. K., Dipak, T., Viral, M. & Akbari, S. H. 2014. Design and Development of Inverted Down Draft Gasifier for Cooking Purpose. **Scholars Journal of Engineering and Technology**, 2(2A), 113-122.



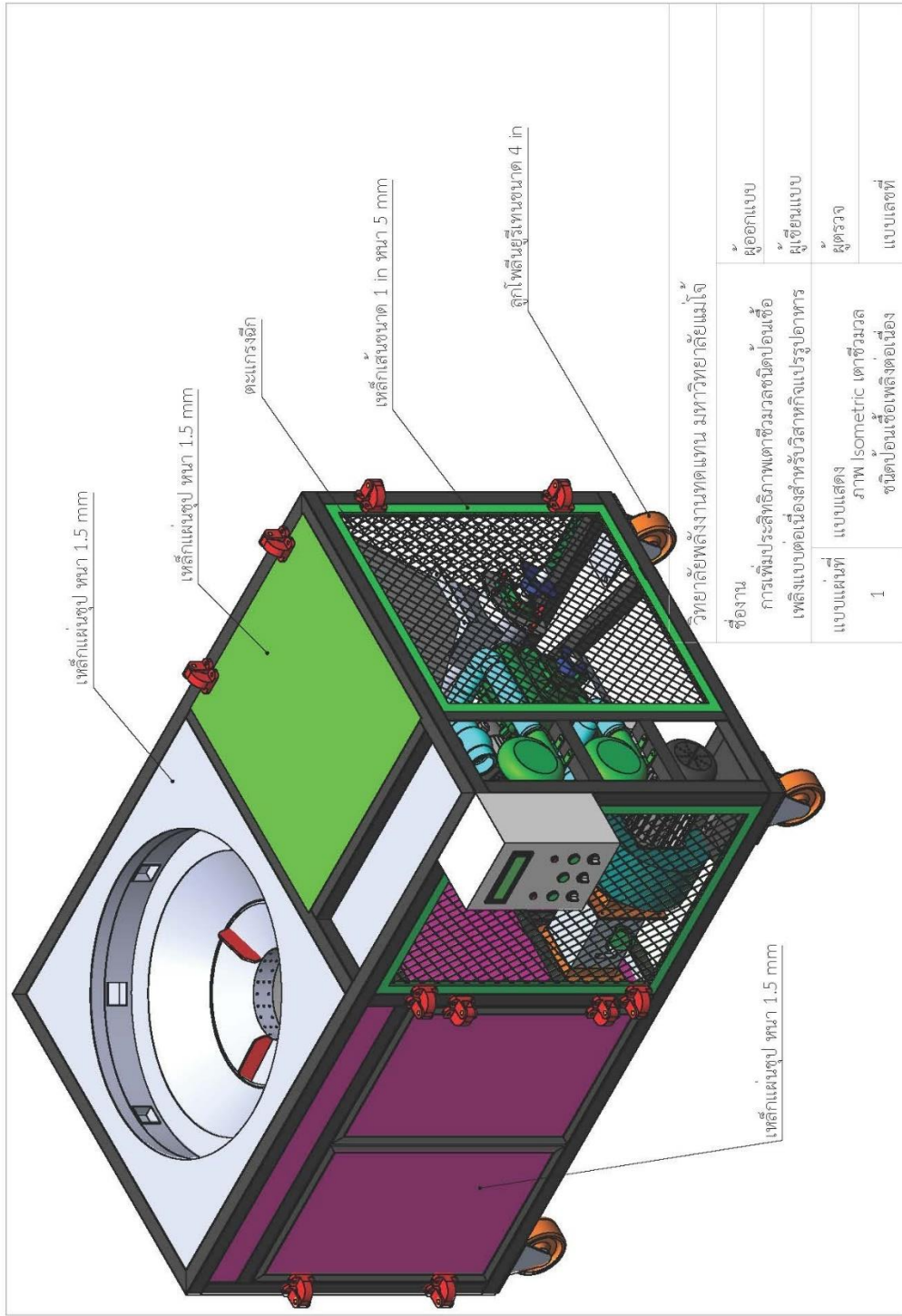
ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

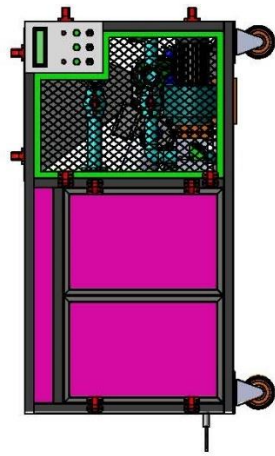
แบบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง



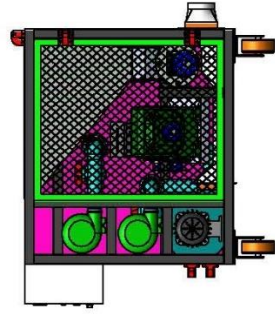
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
การพัฒนาประสิทธิภาพตัวควบคุมอัตโนมัติเพื่อ	ผู้เขียนแบบ
เลี้ยงแบบต่อเนื่องสำหรับสัตว์ปีกแปรรูปอาหาร	ผู้ตรวจ
แบบแผ่นที่	แบบแสดง
1	ภาพ Isometric ตัวควบคุมอัตโนมัติต่อเนื่อง
	แบบเลขที่

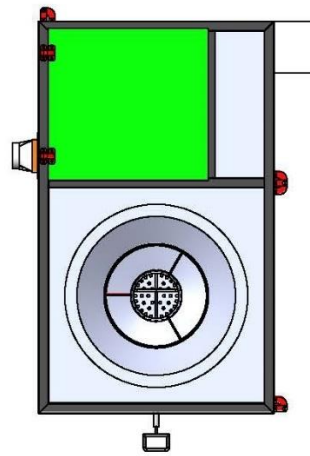
ภาพผนวกที่ 1 แบบแสดงภาพ Isometric



ภาพด้านหน้า



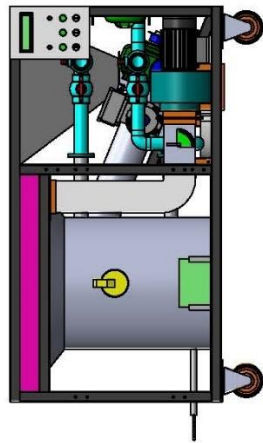
ภาพด้านข้าง



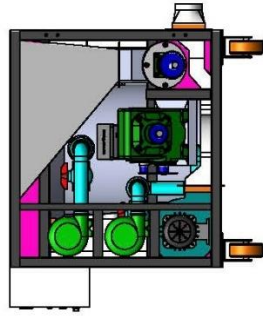
ภาพด้านบน

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
การเพิ่มประสิทธิภาพเตาซีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับปรับปรุงอาหาร	ผู้เขียนแบบ
แบบแผ่นที่	ผู้ตรวจ
2	แบบเลขที่

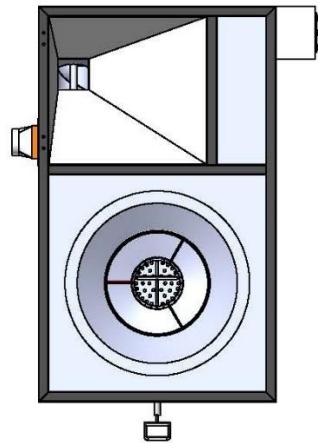
ภาพผนวกที่ 2 แบบแสดงด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของเตาซีวมวล



ภาพด้านหน้า



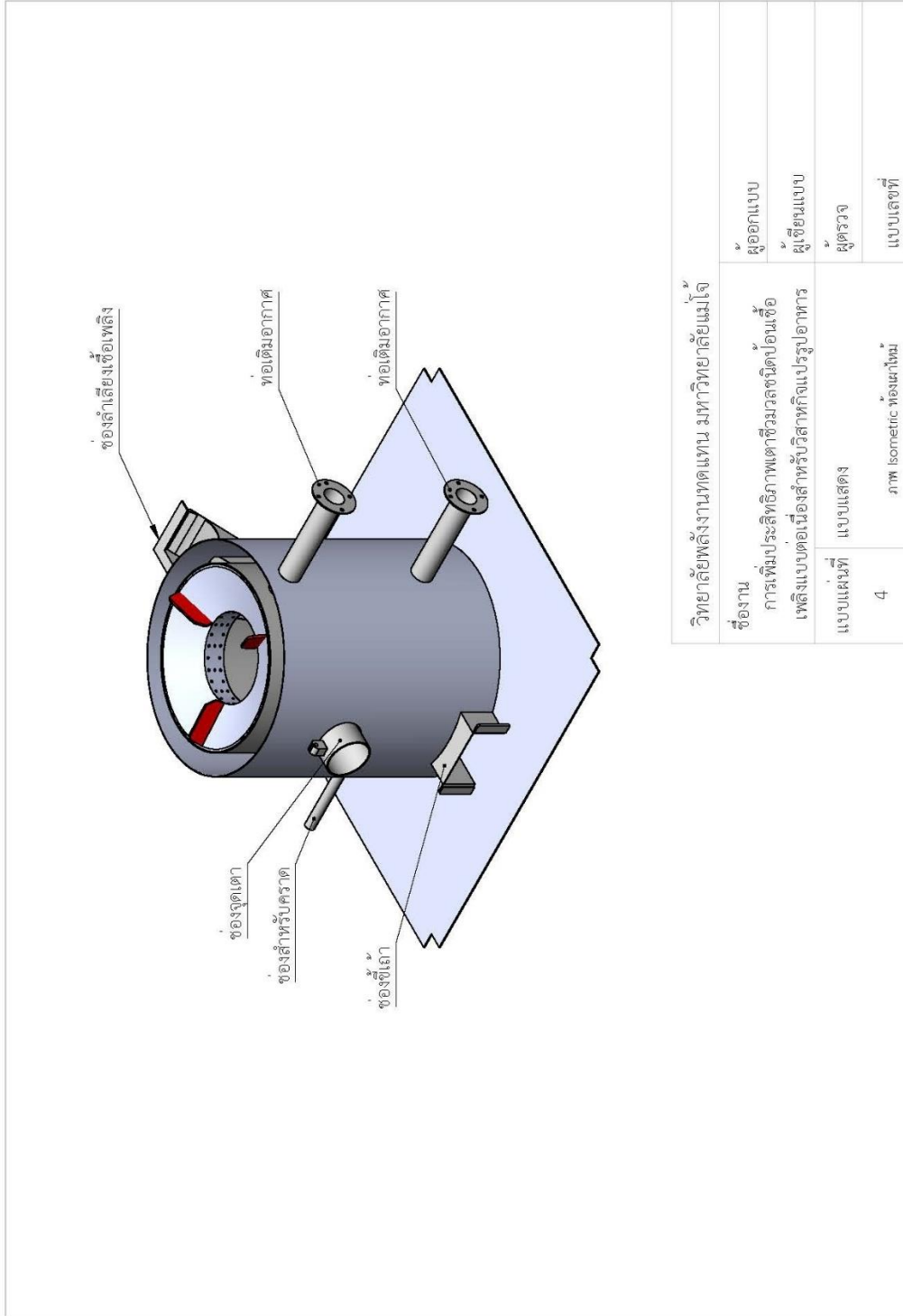
ภาพด้านข้าง



ภาพด้านบน

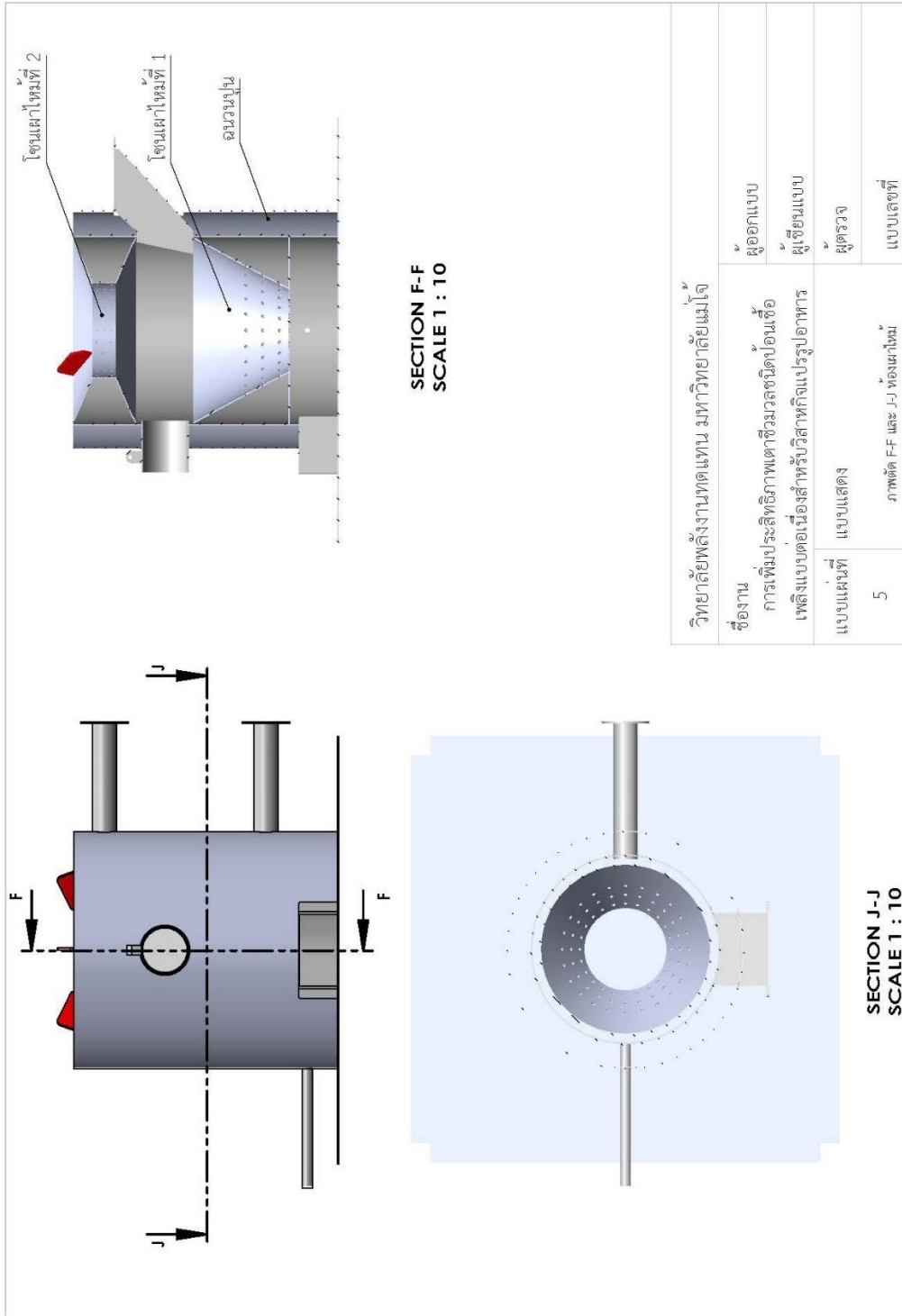
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับโรงสกัดแปรรูปอาหาร	ผู้ออกแบบ
	ผู้เขียนแบบ
	ผู้ตรวจ
แบบแผ่นที่ 3	แบบแสดง ภาพตามมุม ด้านข้างและตามมุม เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง

ภาพผนวกที่ 3 แบบแสดงด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของเตาชีวมวล

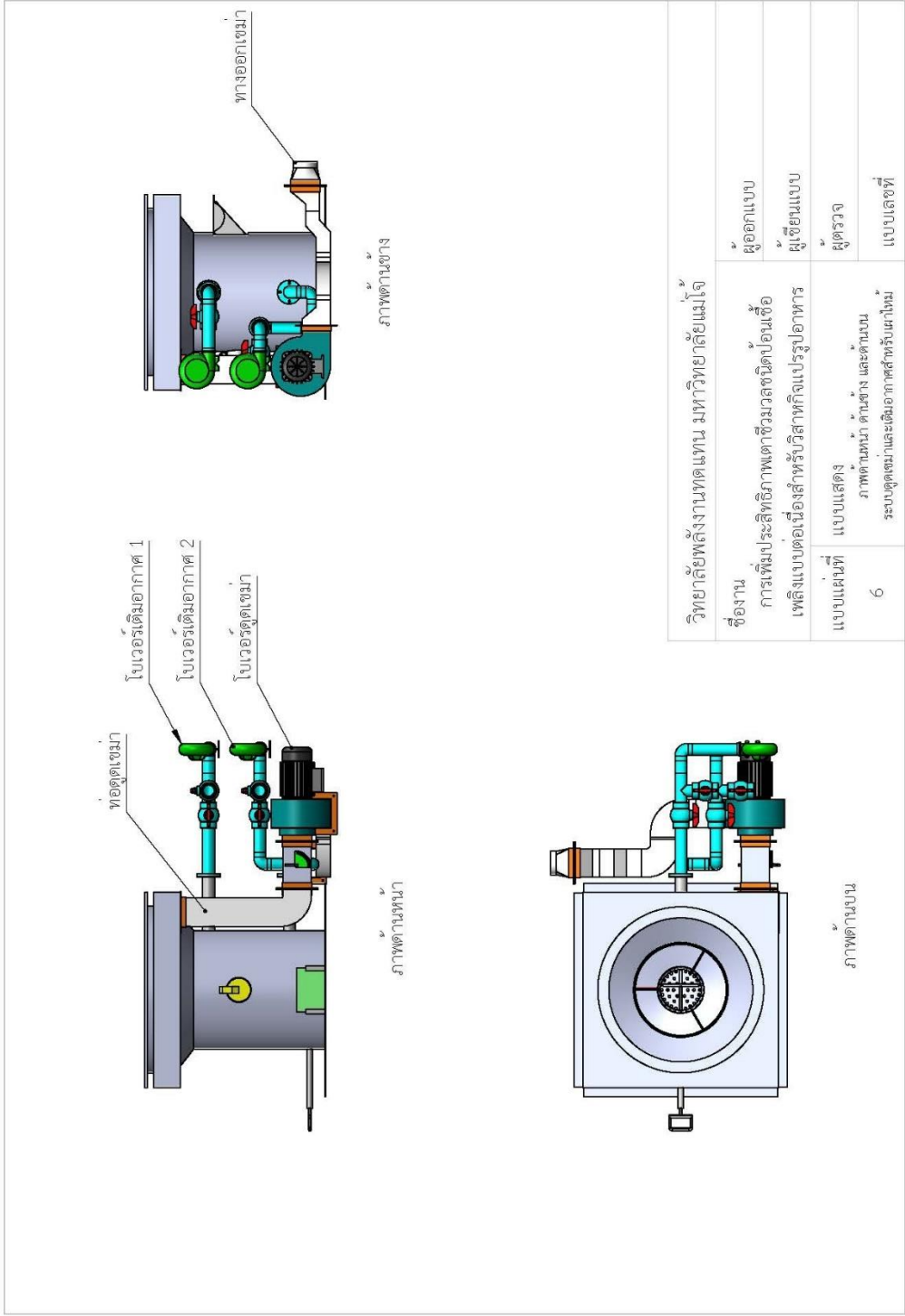


วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับสัตว์ปีกแปรรูปอาหาร	ผู้ออกแบบ
	ผู้เขียนแบบ
	ผู้ตรวจ
แบบแผ่นที่ 4	แบบแสดง
ภาพ Isometric ท้องเผาไหม้	
แบบเลขที่	

ภาพผนวกที่ 4 แบบแสดงภาพ Isometric ท้องเผาไหม้

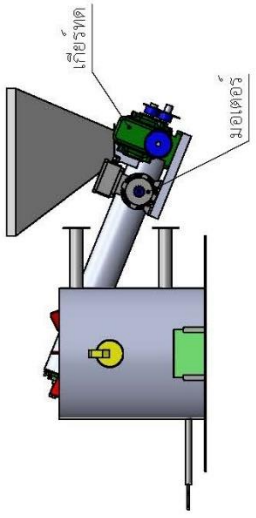


ภาพผนวกที่ 5 แบบแสดงห้องเผาไหม้

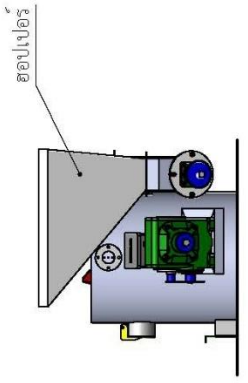


วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
การเพิ่มประสิทธิภาพตัวผสมชนิดอื่นเพื่อ	ผู้เขียนแบบ
เพลิงแรงดูดของสารชีวสัทกัปรับปรุงอาหาร	ผู้ตรวจ
แบบแผนที่	แบบเลขที่
6	

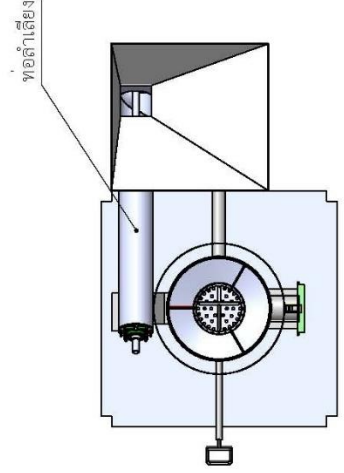
ภาพผนวกที่ 6 แบบแสดงระบบป้อนอากาศ



ภาพด้านหน้า



ภาพด้านข้าง

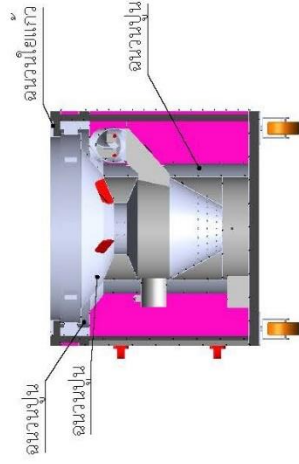
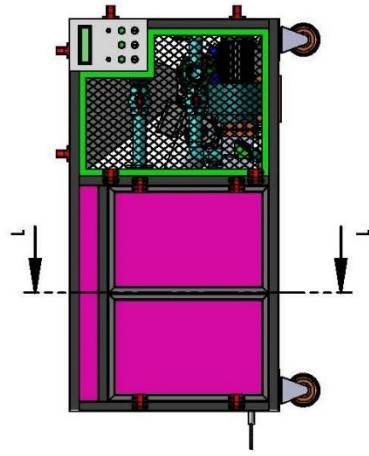


ภาพด้านบน

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน การเพิ่มประสิทธิภาพตัวมอเตอร์ขับเคลื่อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับปรับรูปอาการ	ผู้ออกแบบ ผู้เขียนแบบ ผู้ตรวจ
แบบแผนที่ 7	แบบแสดง ภาพด้านหน้า ด้านข้างและด้านบน ระบบลำเลียงเชื้อเพลิง

ภาพผนวกที่ 7 แบบแสดงระบบลำเลียงเชื้อเพลิง

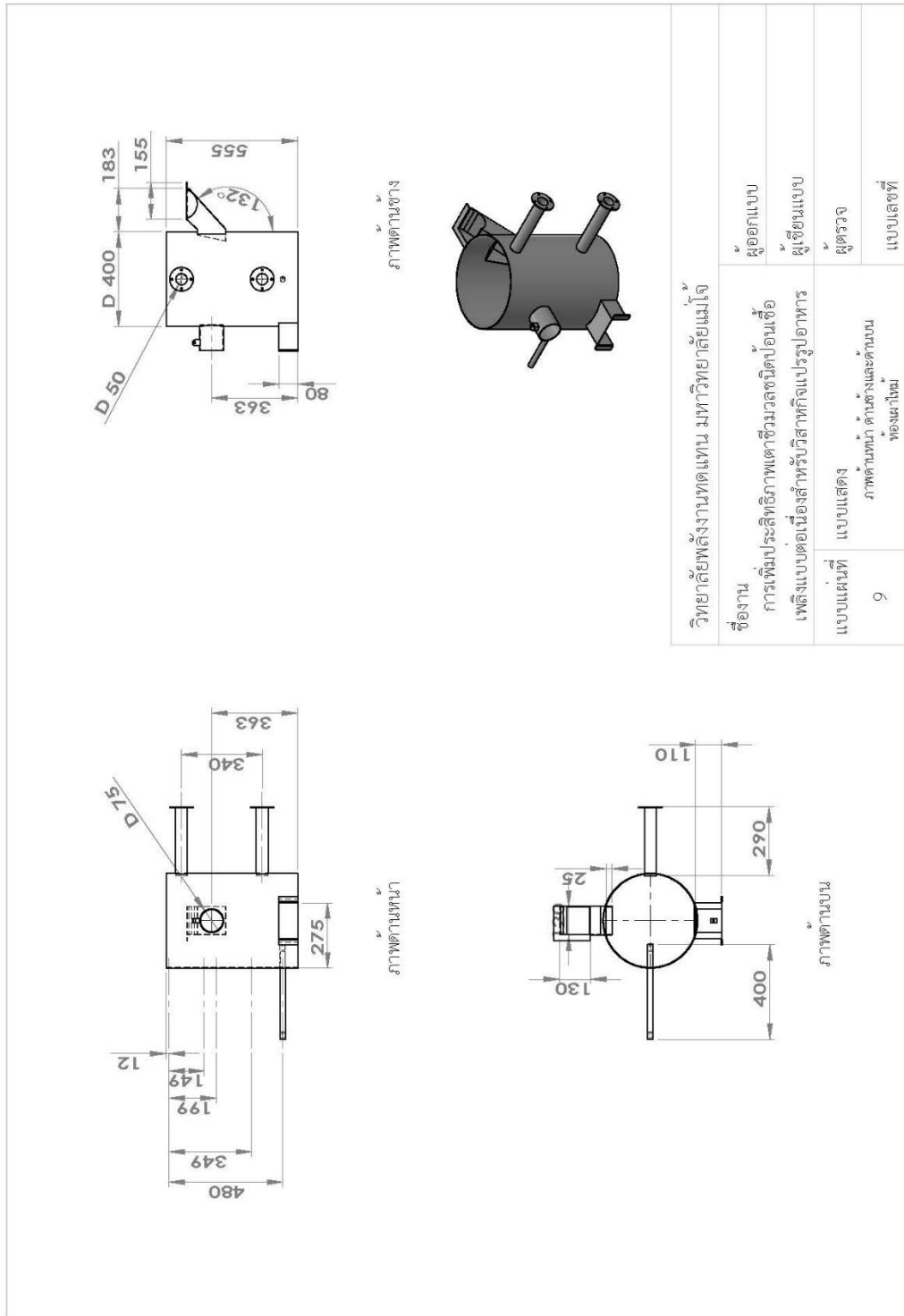




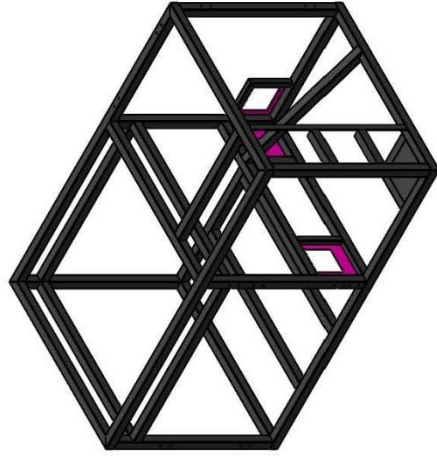
SECTION L-L

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับปรับรูปอาหาร	ผู้เขียนแบบ
แบบแผนที่	ผู้ตรวจ
8	แบบเลขที่
ภาพตัด L-L เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง	

ภาพผนวกที่ 8 แบบแสดงเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง

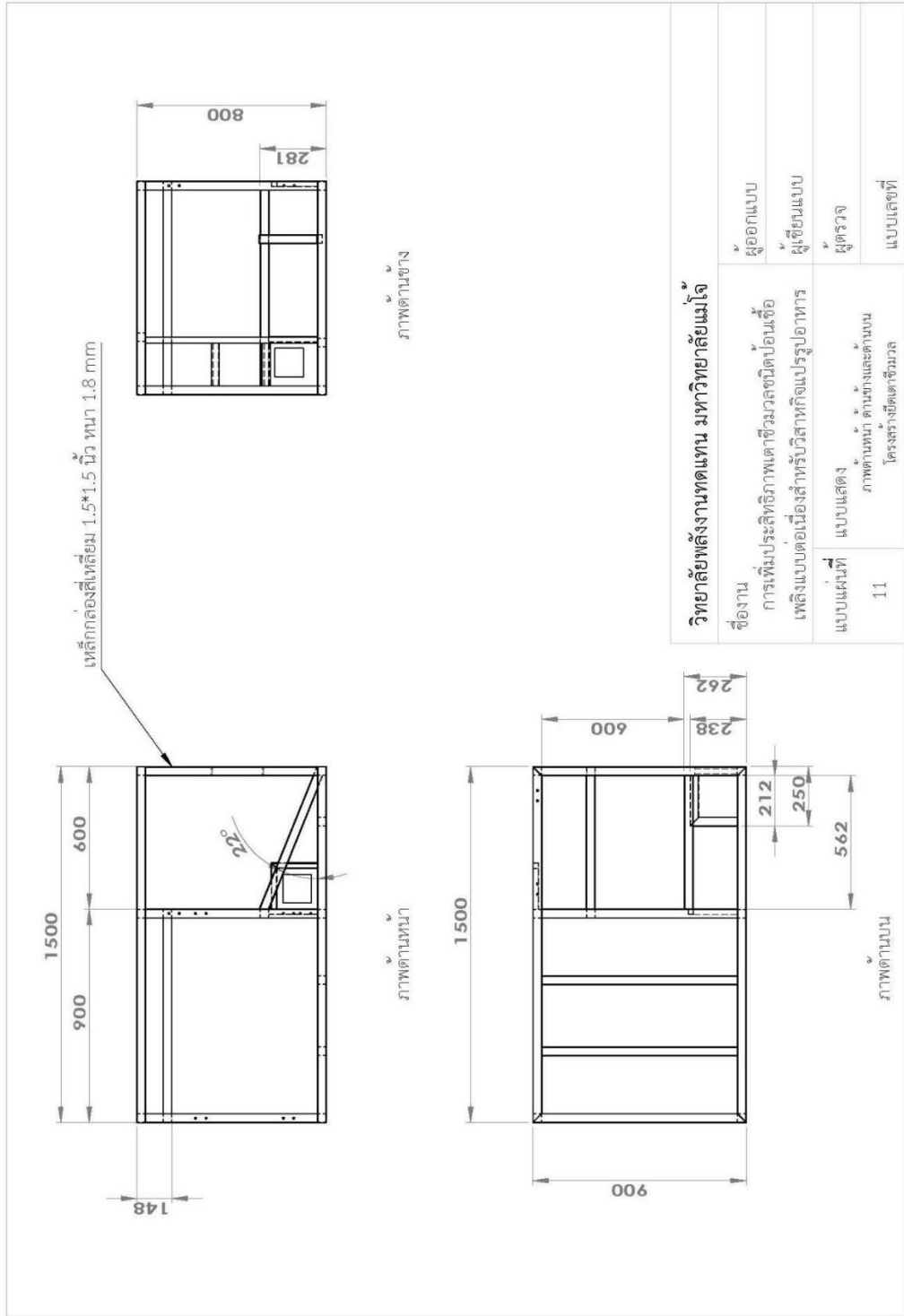


ภาพผนวกที่ 9 แบบแสดงบริเวณด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนห้องเผาไหม้

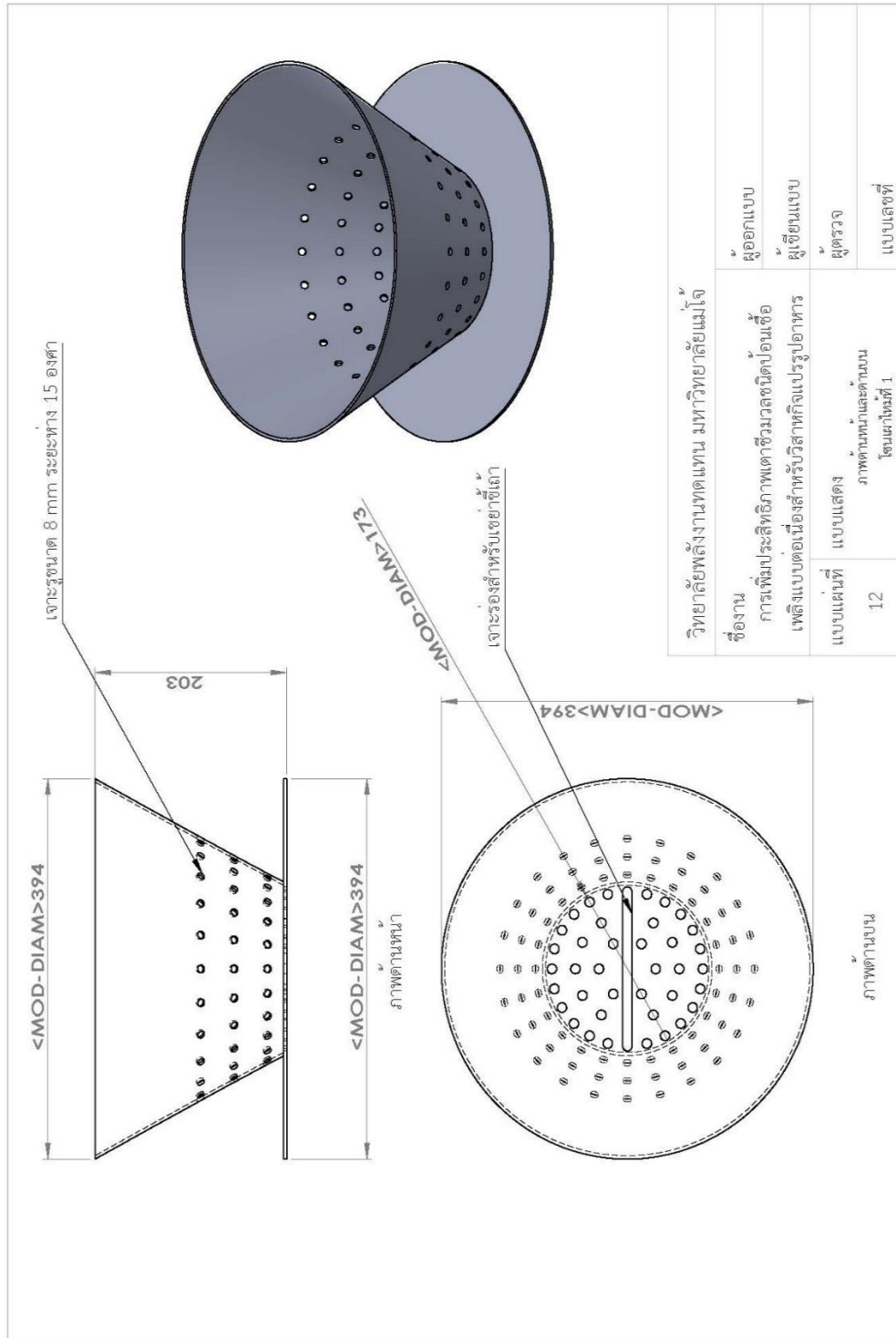


วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
การเพิ่มประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร	ผู้เขียนแบบ
แบบแผ่นที่	ผู้ตรวจ
10	แบบเลขที่
ภาพ Isometric โครงสร้างเตาชีวมวล	

ภาพผนวกที่ 10 แบบแสดงโครงสร้างเตาชีวมวล

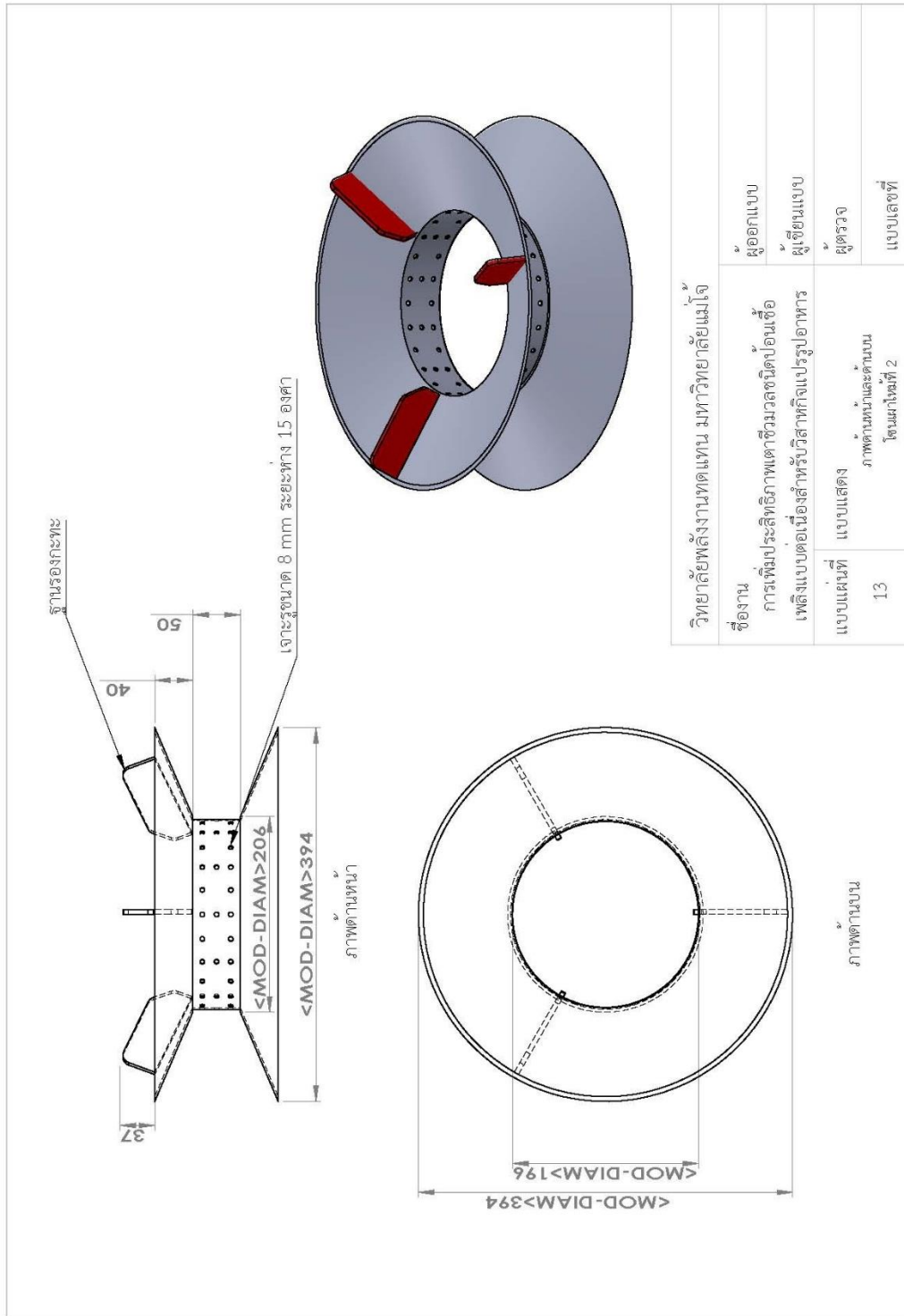


ภาพผนวกที่ 11 แบบแสดงบริเวณด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนของโครงสร้างเตาชีวมวล

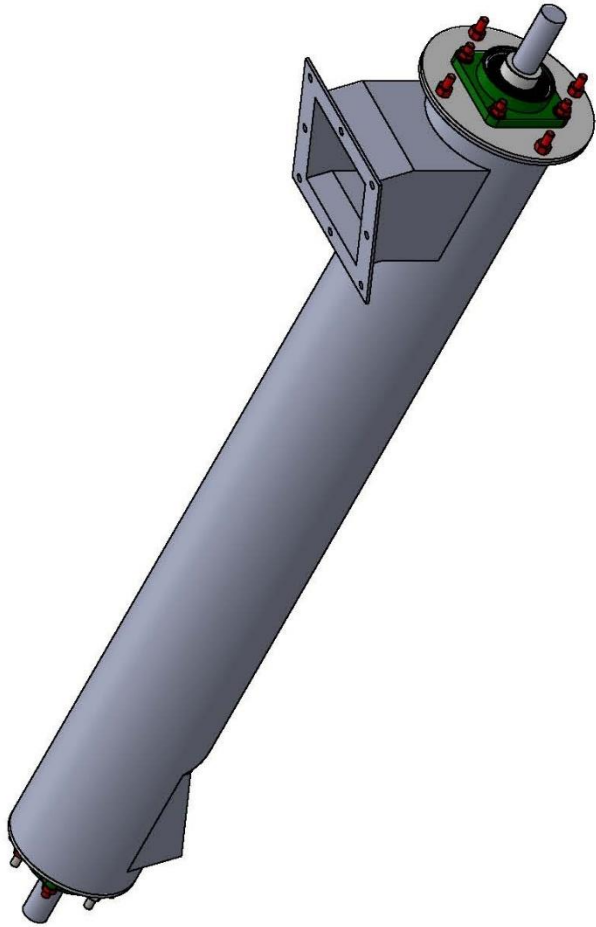


วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้		ผู้ออกแบบ
ชื่องาน	การเพิ่มประสิทธิภาพเตาเชื่อมวอลซินตอนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร	ผู้เขียนแบบ
แบบแผนที่	แบบแสดง	ผู้ตรวจ
12	ภาพต้นแบบและต้นแบบ ชิ้นแม่พิมพ์ที่ 1	แบบเลขที่

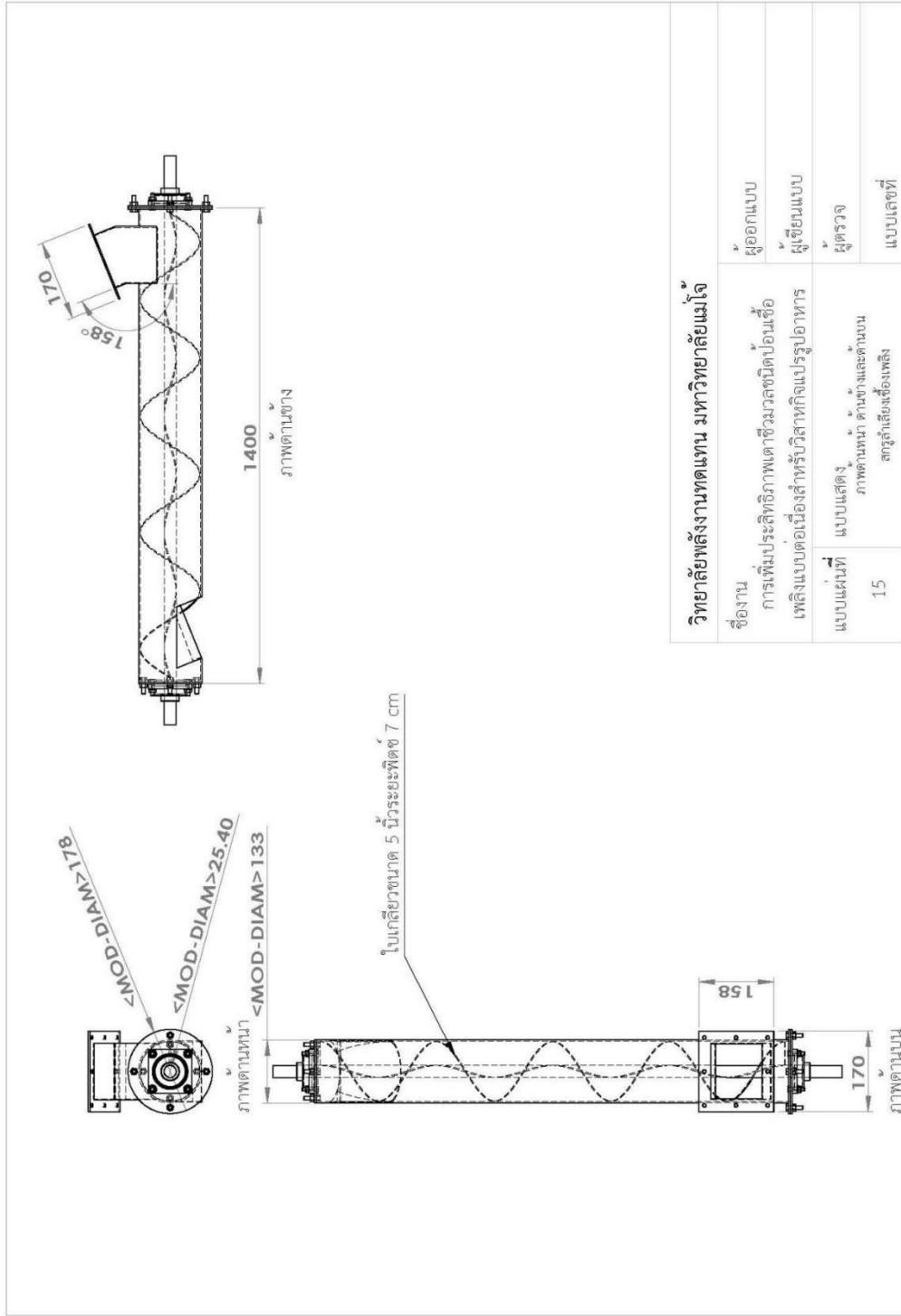
ภาพผนวกที่ 12 แบบแสดงชิ้นแม่พิมพ์ใหม่ที่ 1



ภาพผนวกที่ 13 แบบแสดงโหนดใหม่ที่ 2

	วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้		ผู้ออกแบบ
	ชื่องาน	การเพิ่มประสิทธิภาพตัวเชื่อมชนิดบ่อน้ำเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร	ผู้เขียนแบบ
	แบบแผนนี้	แบบแสดง	ผู้ตรวจ
	14	ภาพ Isometric สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง	แบบเลขที่

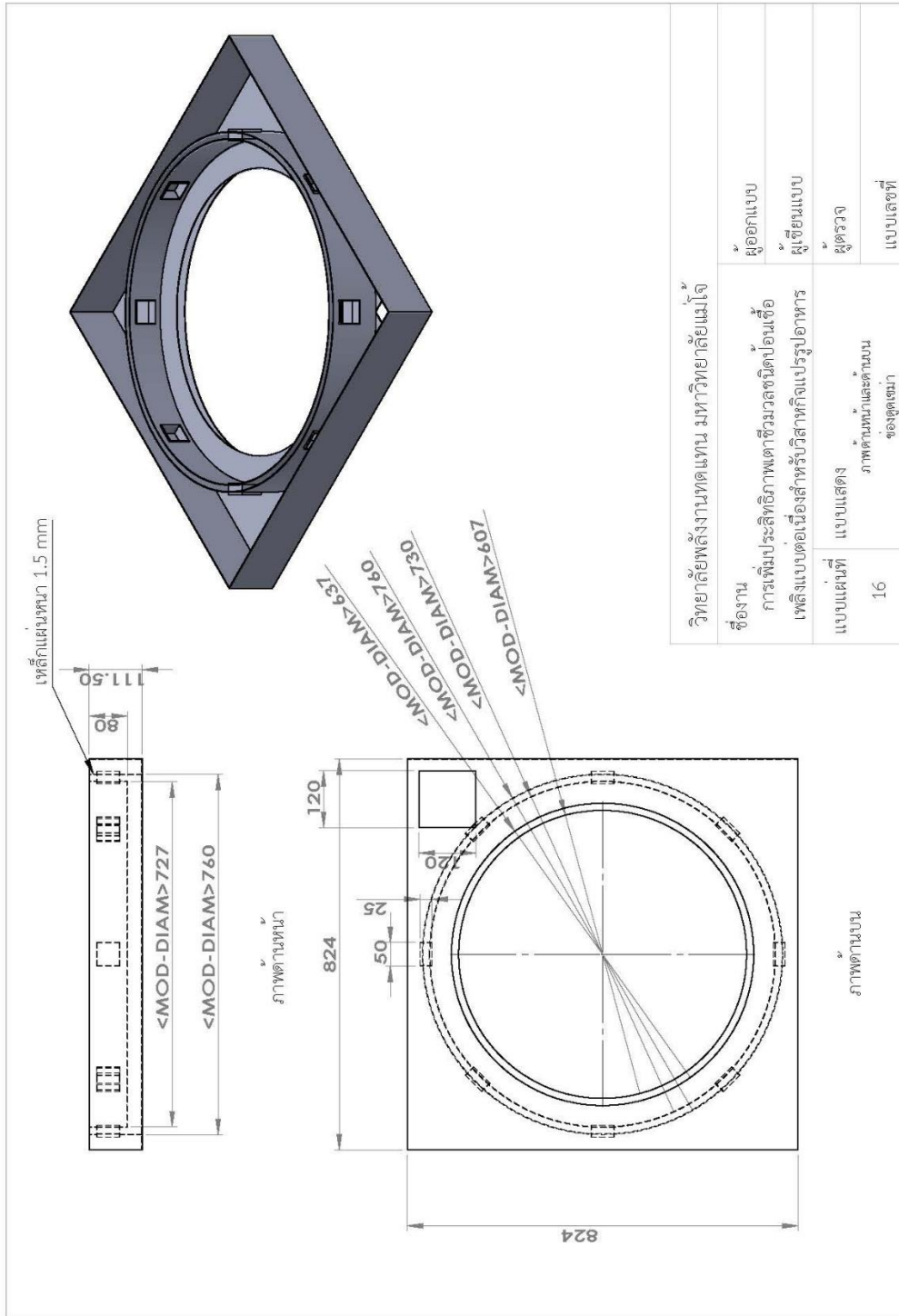
ภาพผนวกที่ 14 แบบแสดงภาพ Isometric สกรูลำเลียงเชื้อเพลิง



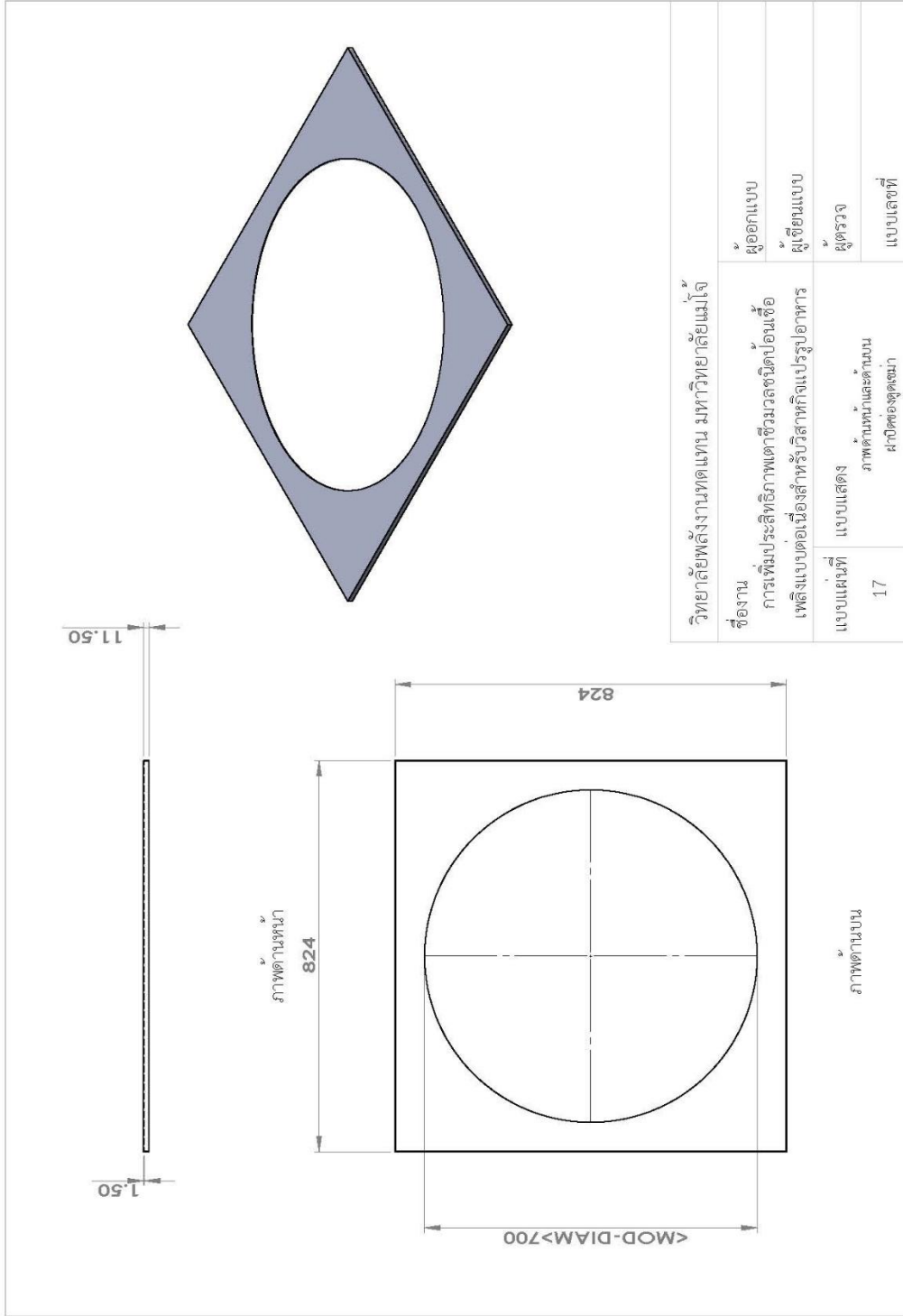
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้	
ชื่องาน	ผู้ออกแบบ
การเพิ่มประสิทธิภาพตัวผสมชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องสำหรับวิสาหกิจแปรรูปอาหาร	ผู้เขียนแบบ
แบบแผนที่มี	ผู้ตรวจ
15	ภาพต้นหนา ด้านข้างและต้นบน สกรูเส้นโค้งเพลิง
	แบบเลขที่

ภาพผนวกที่ 15 แบบแสดงด้านหน้า ด้านบน และด้านข้างของสกรูลำเลียงเชื้อเพลิง

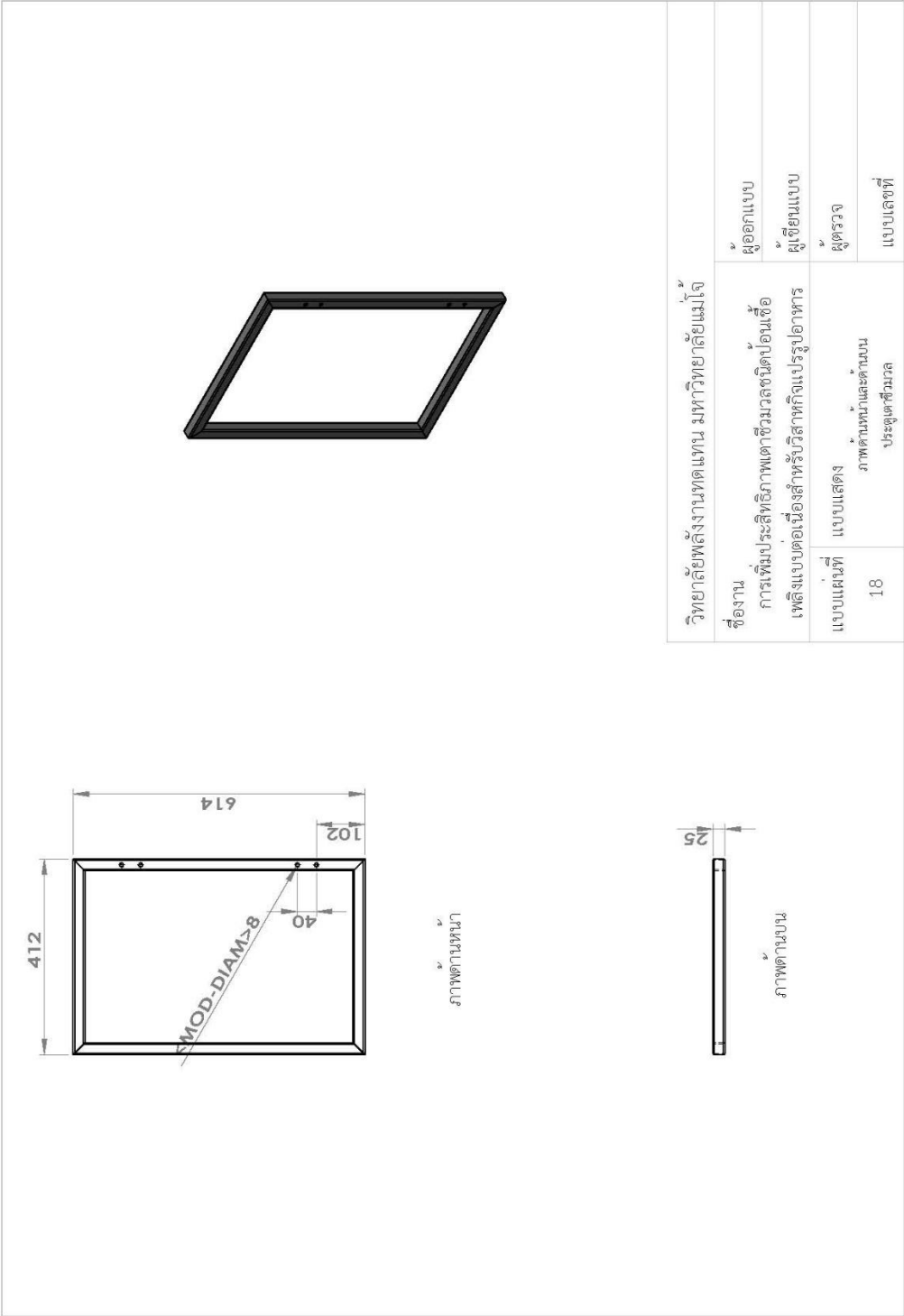




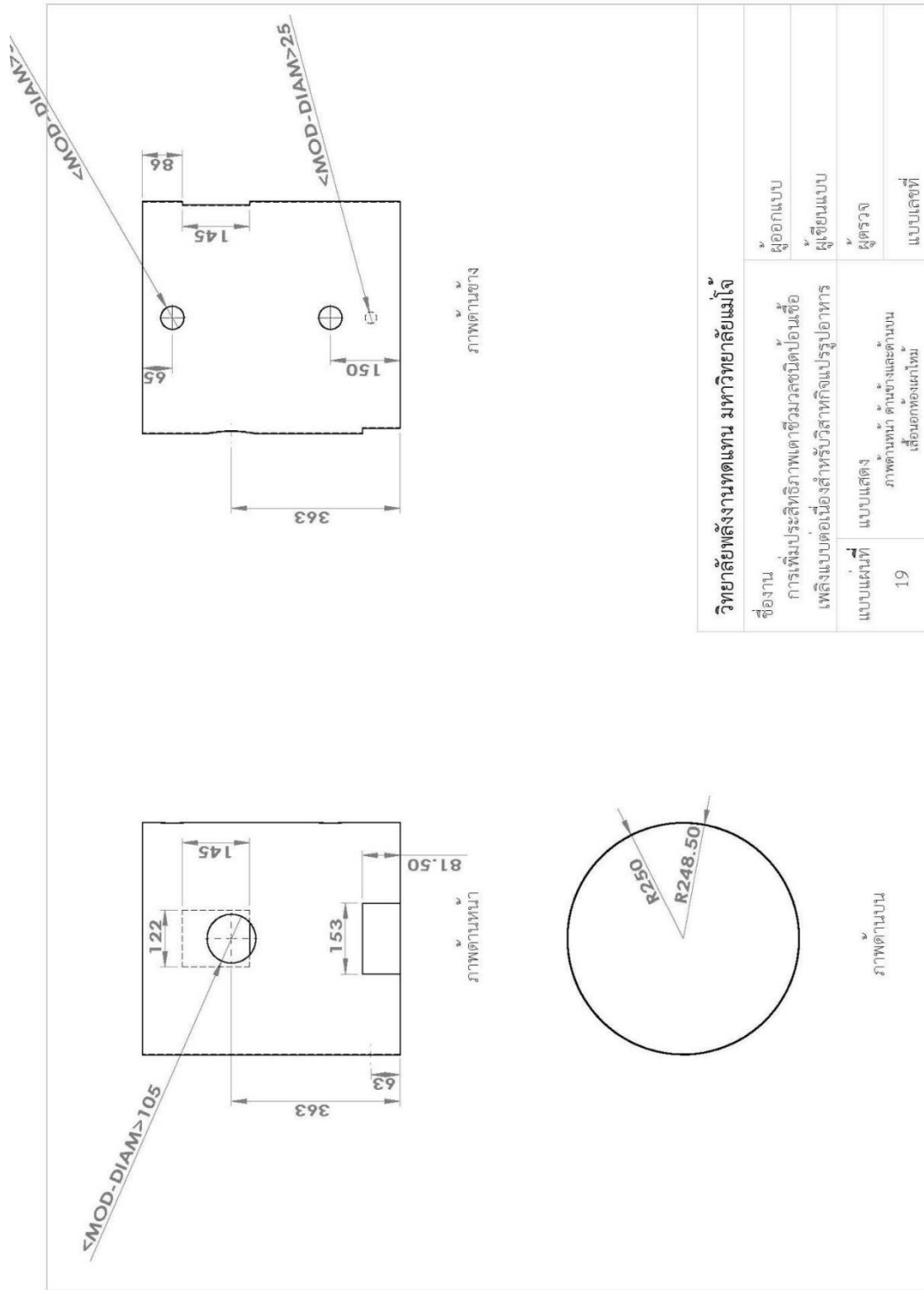
ภาพผนวกที่ 16 แบบแสดงช่องดูเดเมา



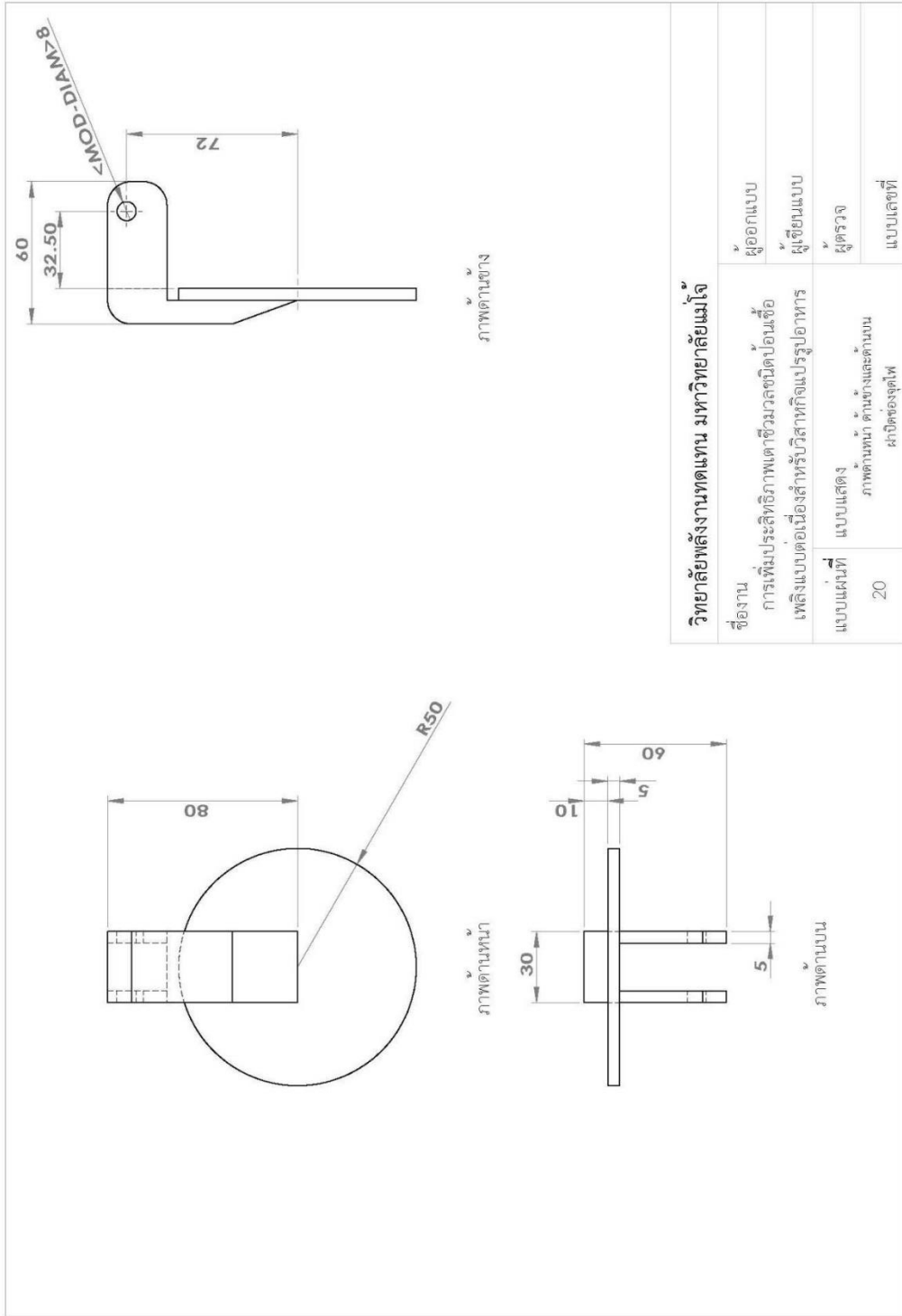
ภาพผนวกที่ 17 แบบแสดงฝาปิดช่องดูดงา



ภาพผนวกที่ 18 แบบแสดงประตูเตาชีวมวล



ภาพผนวกที่ 19 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนเนื้อเชื้อเพลิงของห้องเผาไหม้



ภาพผนวกที่ 20 แบบแสดงภาพด้านหน้า ด้านข้าง และด้านบนฝาปิดช่องตู้ไฟ



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ชีวมวล

ที่ ทปก-ช. 616, 5.9.61

CF-017

Report No. 610571

Page 1 of 2

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

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

LAB NO.	610571-01	SAMPLE DATE	25/07/2018
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	25/07/2018
SAMPLE DESCRIPTION	ซังข้าวโพด	ANALYSED DATE	1/8/2018 - 1/9/2018
SAMPLE CONDITION	Normal		

	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302/3302 M-15	13.21
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	1.85
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	73.42
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	11.53
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>42</sup>	0.05
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	20.72
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	4951
DRY BASIS	NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	19.26
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	4604
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	2.13
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	84.59
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	13.28
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>42</sup>	0.06
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	23.87
AIR DRY BASIS		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	5705
	NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	22.56
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	5392
	RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-

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

Approved By : 

( Dr.Kanitta Wongyai )  
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : 

( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
SCIENTIST LEVEL 7

ภาพผนวกที่ 21 ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของซังข้าวโพด

CF-017

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

Report No. 610571

Page 2 of 2

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

LAB NO.		610571-02		SAMPLE DATE		25/07/2018		
SAMPLE NAME		ชีวมวล		RECEIVED DATE		25/07/2018		
SAMPLE DESCRIPTION		ชีวมวลอัดเม็ด (จากขี้ข้าวโพด)		ANALYSED DATE		1/8/2018 - 1/9/2018		
SAMPLE CONDITION		normal						
	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT				
AS RECEIVED	MOISTURE	% by weight	ASTM D3302/3302 M-15	8.37				
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	13.58				
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	65.11				
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	12.94				
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>2</sup>	0.05				
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	14.74				
			Kcal/Kg	ASTM D5865-13	3523			
DRY BASIS	NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	13.49				
			Kcal/Kg	ASTM D5865-13	3224			
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	14.82				
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	71.06				
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	14.12				
	SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>2</sup>	0.06				
	GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	16.09				
AIR DRY BASIS			Kcal/Kg	ASTM D5865-13	3846			
	NET CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	14.94				
			Kcal/Kg	ASTM D5865-13	3571			
	INHERENT MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	6.79				
	ASH	% by weight	ASTM D7582-15	13.82				
	VOLATILE MATTER	% by weight	ASTM D7582-15	66.24				
	FIXED CARBON	% by weight	ASTM D7582-15	13.16				
SULFUR	% by weight	ASTM D4239-14 <sup>2</sup>	0.05					
GROSS CALORIFIC VALUE	MJ/Kg	ASTM D5865-13	15.00					
		Kcal/Kg	ASTM D5865-13	3585				
	RELATIVE DENSITY		AS 1038.21.1.1-2002	-				

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

Approved By : 

( Dr.Kanitta Wongyai )  
SCIENTIST LEVEL 9

Reported By : 

( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
SCIENTIST LEVEL 7

ภาพผนวกที่ 22 ใบรายงานผลการวิเคราะห์โดยประมาณของขี้ข้าวโพดอัดเม็ด



CF-018

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


Report No. 610571

Page 1 of 2

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

LAB NO.	610571-01	SAMPLE DATE	25/07/2018	
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	25/07/2018	
SAMPLE DESCRIPTION	ซังข้าวโพด	ANALYSED DATE	3/8/2018 - 1/9/2018	
SAMPLE CONDITION	Normal			
	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS DETERMINED (AIR DRY) BASIS	MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	8.18
	ASH	%	ASTM D7582-15	1.96
	CARBON	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	43.10
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	6.49
	NITROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	0.39
	TOTAL SULFUR	%	ASTM D4239-14 <sup>2</sup>	0.05
	OXYGEN	%	(plus errors)	48.01
DRY BASIS	ASH	%	ASTM D7582-15	2.13
	CARBON	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	46.94
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	6.07
	NITROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	0.42
	TOTAL SULFUR	%	ASTM D4239-14 <sup>2</sup>	0.06
	OXYGEN	%	(plus errors)	44.38
DRY ASH-FREE BASIS	CARBON	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	47.96
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	6.20
	NITROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>2</sup>	0.43
	TOTAL SULFUR	%	ASTM D4239-14 <sup>2</sup>	0.06
	OXYGEN	%	(plus errors)	45.35

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

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

Reported By :   
( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
SCIENTIST LEVEL 7

ภาพผนวกที่ 23 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของซังข้าวโพด

CF-018

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

Report No. 610571

Page 2 of 2

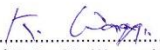
CUSTOMER : วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
63 หมู่ที่ 4 ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

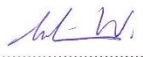
LAB NO.	610571-02	SAMPLE DATE	25/07/2018
SAMPLE NAME	ชีวมวล	RECEIVED DATE	25/07/2018
SAMPLE DESCRIPTION	ชีวมวลอัดเม็ด (จากขี้ง้าวโพด)	ANALYSED DATE	3/8/2018 - 1/9/2018
SAMPLE CONDITION	normal		

	PARAMETER	UNIT	METHOD	RESULT
AS DETERMINED (AIR DRY) BASIS	MOISTURE	% by weight	ASTM D7582-15	6.79
	ASH	%	ASTM D7582-15	13.82
	CARBON	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	38.01
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	5.72
	NITROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	0.39
	TOTAL SULFUR	%	ASTM D4239-14 <sup>42</sup>	0.05
	OXYGEN	%	(plus errors)	42.01
DRY BASIS	ASH	%	ASTM D7582-15	14.82
	CARBON	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	40.78
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	5.32
	NITROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	0.41
	TOTAL SULFUR	%	ASTM D4239-14 <sup>42</sup>	0.06
	OXYGEN	%	(plus errors)	38.61
DRY ASH-FREE BASIS	CARBON	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	47.88
	HYDROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	6.25
	NITROGEN	%	ASTM D5373-14 <sup>42</sup>	0.49
	TOTAL SULFUR	%	ASTM D4239-14 <sup>42</sup>	0.07
	OXYGEN	%	(plus errors)	45.33

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

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

Reported By :   
( Miss Nucharin Whangdeeniran )  
SCIENTIST LEVEL 7

ภาพผนวกที่ 24 ใบรายงานผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของขี้ง้าวโพดอัดเม็ด



ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

## การคำนวณหาอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ทางทฤษฎี

### ซังข้าวโพด

1. คำนวณหาสมการเผาไหม้ และ A/F Ratio ของเชื้อเพลิงซังข้าวโพด

ตารางผนวกที่ 1 องค์ประกอบเชื้อเพลิงซังข้าวโพด

องค์ประกอบ	%	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวนโมเลกุล
C	47.96	12	3.997
H <sub>2</sub>	6.20	1	6.200
O <sub>2</sub>	45.35	16	2.834
N <sub>2</sub>	0.43	14	0.031
S	0.06	32	0.002
Ash	1.96	-	-



สมดุลสมการจะได้ดังนี้

$$C: 3.997 \rightarrow A$$

$$A = 3.997$$

$$H: 6.200 \rightarrow 2B$$

$$B = 3.100$$

$$S: 0.002 \rightarrow E$$

$$E = 0.002$$

$$O: 2.834 + 2\text{Ash} \rightarrow 2A + B + 2E$$

$$2.834 + 2\text{Ash} = 2(3.997) + (3.100) + 2(0.002)$$

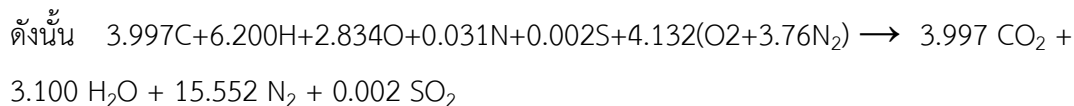
$$= 7.994 + 3.100 + 0.004$$

$$\text{Ash} = (11.098 - 2.834) / 2$$

$$N: 0.031 + \text{Ash}(2 \times 3.76) \rightarrow 2D$$

$$D = (0.031 + 4.132(2 \times 3.76)) / 2$$

$$D = 15.552$$



การหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ

$$A/F \text{ Ratio} = m_{air} / m_{fuel}$$

มวลของอากาศ

$$\begin{aligned} M_{air} &= n_{air} \times M.W_{air} \\ &= (n_{dry \text{ air}} \times M.W_{dry \text{ air}}) + (n_{H_2O} \times M.W_{H_2O}) \\ &= (4.132 \times 4.76 \text{ k mol}) (28.97 \text{ kg/k mol}) + (3.100 \text{ k mol} \times 18 \text{ kg/k mol}) \\ &= 56.791 + 55.800 \end{aligned}$$

$$M_{air} = 625.591 \text{ kg}$$

มวลของเชื้อเพลิง

$$\begin{aligned} m_{fuel} &= n_{fuel} \times M.W_{fuel} \\ &= (n_C \times MW_C) + (n_H \times MW_H) + (n_O \times MW_O) + (n_N \times MW_N) + (n_S \times MW_S) \\ &= (3.997 \times 12) + (6.200 \times 1) + (2.834 \times 16) + (0.031 \times 14) + (0.002 \times 32) \\ &= 47.964 + 6.200 + 45.344 + 0.434 + 0.064 \end{aligned}$$

$$m_{fuel} = 100.006 \text{ kg}$$

$$A/F \text{ Ratio} = 625.591 / 100.006 = 6.256 \text{ kg}_{air} / \text{kg}_{fuel}$$

หรือ ปริมาณอากาศที่ใช้กับเชื้อเพลิง 1 kg

$$\begin{aligned} V &= m / \rho \\ &= 6.256 \text{ kg} / 1.2 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$V = 5.213 \text{ m}^3$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} v &= Q/A = 5.213 \text{ m}^3 / 0.00245 \text{ m}^2 \\ &= 2127.76 \text{ m} / 3600 \text{ s} \end{aligned}$$

$$v = 0.59 \text{ m/s}$$

ตารางผนวกที่ 2 สรุปร้อยส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ของซังข้าวโพด  $6.256 \text{ kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$

อากาศ ( $\text{kg}_{\text{air}}$ )	เชื้อเพลิง ( $\text{kg}_{\text{fuel}}$ )
6.26	1
31.3	5
62.6	10

2. คำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 หน่วยมวล

การคำนวณหาปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะหาจากการเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาขององค์ประกอบต่าง ๆ กับออกซิเจน โดยจะพิจารณาแยกแต่ละองค์ประกอบดังนี้

C: คาร์บอน มีปริมาณ 47.96% หรือ 0.4796kg

คาร์บอน 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล ดังสมการต่อไปนี้



สมมูลมวล      12 + 32      44

หากต้องการให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ต้องใช้คาร์บอน 12 kg ต่อออกซิเจน 32kg หากในเชื้อเพลิงมีปริมาณคาร์บอนอยู่ 0.4796 kg จะต้องการออกซิเจนปริมาณ 1.2805 kg

H<sub>2</sub>: ไฮโดรเจนมีปริมาณ 6.20% หรือ 0.0620kg

ไฮโดรเจน 2 โมล จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล เกิดเป็นน้ำ 2 โมล ดังสมการต่อไปนี้



สมมูลมวล      4      32      36

หากต้องการให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ต้องใช้ไฮโดรเจน 4 kg ต่อออกซิเจน 32kg หากเชื้อเพลิงมีปริมาณไฮโดรเจนอยู่ 0.0620kg จะต้องการออกซิเจนปริมาณ 0.496kg

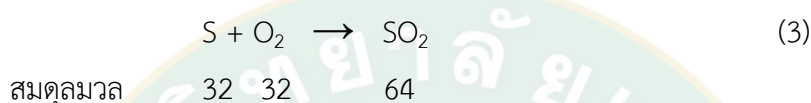
O<sub>2</sub>: ออกซิเจนปริมาณ 45.35% หรือ 0.4535kg

เนื่องจากในเชื้อเพลิงมีออกซิเจนอยู่แล้วเป็นปริมาณ 0.4535 kg ดังนั้นการคำนวณขั้นตอนสุดท้ายก่อนจะสรุปการคำนวณหาปริมาณออกซิเจน จะต้องนำออกซิเจนจำนวนนี้หักลบจากปริมาณดังกล่าวด้วย ซึ่งจะแสดงให้เห็นอีกครั้งในตารางสรุป

N<sub>2</sub>: ไม่เปิดปฏิกิริยาในการเผาไหม้

S<sub>2</sub>: ซัลเฟอร์มีปริมาณ 0.06% หรือ 0.0006 kg

ซัลเฟอร์ 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมล เกิดเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1 โมล ดังสมการต่อไปนี้



หากต้องการให้การทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ต้องใช้ซัลเฟอร์ 32 kg ต่อออกซิเจน 32 kg หากในเชื้อเพลิงมีปริมาณซัลเฟอร์อยู่ 0.0006 kg จะต้องการออกซิเจนปริมาณ 0.0006 kg

Ash: ไม่เกิดปฏิกิริยาในการเผาไหม้

ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการในการทำปฏิกิริยาทั้งหมดนี้คือ  $1.2805 + 0.496 + 0.0006 = 1.7771$  kg แต่เนื่องจากมีออกซิเจนอยู่ในซังข้าวโพดแล้วเป็นปริมาณ 0.4535 kg ดังนั้นปริมาณออกซิเจนที่ต้องการจากภายนอกเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์คือ  $1.7771 - 0.4535 = 1.3236$  kg ต่อการเผาไหม้ซังข้าวโพด 1 kg

**ตารางผนวกที่ 3** สรุปความต้องการออกซิเจนในการเผาไหม้ซังข้าวโพด 1 kg

องค์ประกอบ	สมการการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน	ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการจากภายนอก (kg)
C	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	+1.2805
H <sub>2</sub>	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	+0.4960
O <sub>2</sub>	มีอยู่ในซังข้าวโพด	-0.4535
N <sub>2</sub>	ไม่เกิดปฏิกิริยาในการเผาไหม้	0
S	$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	+0.0006
Ash	ไม่เกิดปฏิกิริยาในการเผาไหม้	0
	<b>รวม</b>	<b>1.3236</b>

### 3. คำนวณหาปริมาณอากาศที่ต้องใช้ให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

เนื่องจากอากาศที่ระดับน้ำทะเลจะประกอบไปด้วยออกซิเจน  $O_2$  และไนโตรเจน  $N_2$  เป็นปริมาณ 23.2% และ 76.8% (โดยน้ำหนัก) ตามลำดับ ดังนั้นหากในการเผาไหม้ไม้พืน 1 kg ซึ่งต้องการออกซิเจนจากภายนอกคิดเป็นปริมาณ 1.3236kg จะคำนวณได้ว่าออกซิเจนปริมาณดังกล่าวมาจากอากาศมวล  $(1 \times 1.3236) / 0.232 = 5.7052$  kg

### 4. คำนวณหามวลของแก๊สไอเสีย

พิจารณารองค์ประกอบของสารต่าง ๆ ภายหลังกการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดังนี้

- เมื่อเผาไหม้คาร์บอน 1 โมล (12kg) จากสมการที่ 1 จะเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมล (44kg) หากเผาไหม้คาร์บอนปริมาณ 0.4796 kg จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์) เท่ากับ 1.7601 kg
- เมื่อเผาไหม้ไฮโดรเจน 2 โมล (4kg) จากสมการที่ 2 เกิดเป็นน้ำ 2 โมล (36kg) หากเผาไหม้ไฮโดรเจนปริมาณ 0.0620kg จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (น้ำ) เท่ากับ 0.558kg
- ออกซิเจนจะเป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ในระหว่างการเผาไหม้ และหากเรากำหนดให้เป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ จะไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่ในแก๊สไอเสีย
- ไนโตรเจนจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ไนโตรเจนส่วนที่มีอยู่เดิมในเชื้อเพลิง คิดเป็นปริมาณ 0.0043kg และอีกส่วนหนึ่งมาจากอากาศภายนอกที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งจากการที่อากาศ 1 kg จะมีไนโตรเจนอยู่ 0.768 kg เมื่อต้องการอากาศในการเผาไหม้ 5.7052kg ดังนั้นไนโตรเจนจะมีเท่ากับ 4.3816 ซึ่งไนโตรเจนจะเป็นสารที่ไม่ทำปฏิกิริยา ดังนั้นไนโตรเจนทั้งหมดจะผ่านออกไปพร้อมกับแก๊สไอเสียโดยจะมีไนโตรเจนรวม =  $0.0043 + 4.3816 = 4.3859$ kg
- เมื่อเผาไหม้ซัลเฟอร์ 1 โมล (32kg) จากสมการที่ 3 เกิดเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ 1 โมล (64kg) หากเผาไหม้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.0006 kg จะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ (แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์) เท่ากับ 0.0012 kg



ตารางผนวกที่ 4 สรุปปริมาณของสารต่าง ๆ ในแก๊สไอเสียภายหลังการเผาไหม้ซังข้าวโพด 1 kg

การทำปฏิกิริยา		ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในแก๊สไอเสีย
สาร	ปริมาณออกซิเจนที่ต้องการ	(kg)
C ปริมาณ 0.4796	1.2805	1.7601
H ปริมาณ 0.0620	0.496	0.558
N <sub>2</sub> ปริมาณ 0.0043 (มีในเชื้อเพลิง)		
N <sub>2</sub> ปริมาณ 4.3816 (จากอากาศ)		4.3852
S ปริมาณ 0.0006	0.0006	0.0012
<b>รวม</b>		<b>6.7045</b>

#### 5. คำนวณหาปริมาตรของแก๊สไอเสีย

จากกฎของ Avogadro ซึ่งกล่าวไว้ว่า ภายใต้สภาวะ ความดัน และอุณหภูมิเดียวกัน แก๊สจำนวน 1 โมล จะมีปริมาตรเท่ากัน ดังนั้น หากเรามีแก๊สไอเสียที่ประกอบไปด้วยสารชนิดต่าง ๆ ก็จะสามารถแปลงค่าจากมวลให้ปริมาตรได้โดยการเทียบค่าสภาวะมาตรฐาน ตามที่กฎของ Avogadro ได้กล่าวไว้

สภาวะที่จะกำหนดให้กับแก๊สไอเสียคือให้มีอุณหภูมิเท่ากับ 400 °C และมีความดัน เท่ากับ 101.3 kPa ส่วนสภาวะมาตรฐานตามกฎของ Avogadro คือ ที่ความดัน 101.3 kPa อุณหภูมิ 0°C แก๊สปริมาณ 1 โมล จะมีปริมาตรเท่ากับ 10.2 m<sup>3</sup> โดยในการคำนวณจำเป็นต้องแปลงค่าอุณหภูมิจาก องศาเซลเซียสให้เป็นองศาเคลวินก่อน ด้วยการบวกค่า 273 ให้กับองศาเซลเซียส

#### การกำหนดปริมาณของแก๊ส CO<sub>2</sub>

ในแก๊สไอเสียมีปริมาณ CO<sub>2</sub> เท่ากับ 1.7601 kg คิดเป็นปริมาตรสาร 1.7601/44 = 0.040 โมล แก๊สที่อุณหภูมิ 0°C หรือ 273K จะมีปริมาตร 10.2 m<sup>3</sup> ต่อแก๊ส 1 โมล แก๊สไอเสียอุณหภูมิ 400 °C หรือ 673K จะมีปริมาตร (673/273)×10.2 = 25.145 m<sup>3</sup> ต่อแก๊ส 1 โมล แต่ CO<sub>2</sub> มีปริมาณ 0.040 โมล ดังนั้นแก๊ส CO<sub>2</sub> มีปริมาตรเท่ากับ 25.145×0.040 = 1.0058 m<sup>3</sup>

#### การคำนวณหาปริมาตรของไอน้ำ

ในแก๊สไอเสียมีปริมาณไอน้ำ  $\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 0.558 kg คิดเป็นปริมาณสาร  $0.558/18 = 0.031$  โมล แก๊สที่อุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$  หรือ 273K มีปริมาตร  $10.2 \text{ m}^3$  ต่อแก๊ส 1 โมล แก๊สไอเสียอุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  หรือ 673K จะมีปริมาตร  $(673/273) \times 10.2 = 25.145 \text{ m}^3$  ต่อแก๊ส 1 โมล แต่  $\text{H}_2\text{O}$  มีปริมาณ 0.031 โมล ดังนั้น ไอน้ำ  $\text{H}_2\text{O}$  จะมีปริมาตรเท่ากับ  $25.145 \times 0.031 = 0.7795 \text{ m}^3$

#### การคำนวณปริมาตรของแก๊ส $\text{N}_2$

ในแก๊สไอเสียมีปริมาณแก๊ส  $\text{N}_2$  เท่ากับ 4.3852 kg คิดเป็นปริมาณสาร  $4.3852/28 = 0.1566$  โมล แก๊สที่อุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$  หรือ 273K มีปริมาตร  $10.2 \text{ m}^3$  ต่อแก๊ส 1 โมล แก๊สไอเสียอุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  หรือ 673K จะมีปริมาตร  $(673/273) \times 10.2 = 25.145 \text{ m}^3$  ต่อแก๊ส 1 โมล แต่ แก๊ส  $\text{N}_2$  มีปริมาณ 0.1566 โมล ดังนั้น แก๊ส  $\text{N}_2$  จะมีปริมาตรเท่ากับ  $25.145 \times 0.1566 = 3.9377 \text{ m}^3$

#### การคำนวณปริมาตรของแก๊ส $\text{SO}_2$

ในแก๊สไอเสียมีปริมาณแก๊ส  $\text{SO}_2$  เท่ากับ 0.0012 kg คิดเป็นปริมาณสาร  $0.0012/64 = 0.00002$  โมล แก๊สที่อุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$  หรือ 273K มีปริมาตร  $10.2 \text{ m}^3$  ต่อแก๊ส 1 โมล แก๊สไอเสียอุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$  หรือ 673K จะมีปริมาตร  $(673/273) \times 10.2 = 25.145 \text{ m}^3$  ต่อแก๊ส 1 โมล แต่ แก๊ส  $\text{SO}_2$  มีปริมาณ 0.00002 โมล ดังนั้น แก๊ส  $\text{SO}_2$  จะมีปริมาตรเท่ากับ  $25.145 \times 0.00002 = 0.0005 \text{ m}^3$

จากการคำนวณหาปริมาตรของสารประกอบต่าง ๆ ของแก๊สไอเสียทำให้สามารถหาผลรวมของปริมาตรที่เกิดขึ้น ภายหลังจากเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg คือ  $1.0058 + 0.7795 + 3.9377 + 0.0005 = 5.7235 \text{ m}^3$

**ตารางผนวกที่ 5** ปริมาตรขององค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg

ปริมาณสาร (kg)	โมล	ปริมาตร ( $\text{m}^3$ )
$\text{CO}_2$ : 1.7601	0.040	1.0058
$\text{H}_2\text{O}$ : 0.5580	0.031	0.7795
$\text{N}_2$ : 4.3852	0.1566	3.9377
$\text{SO}_2$ : 0.0012	0.0002	0.0005
รวม		5.7235

#### 6. คำนวณปริมาณของ CO<sub>2</sub> ในแก๊สไอเสีย

ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ CO<sub>2</sub> ในแก๊สไอเสียสามารถบอกเป็นปริมาณได้ 2 ค่า คือ บอกเป็นเปอร์เซ็นต์ฐานเปียก และบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ฐานแห้ง โดยมีความแตกต่างกันในการบอก ดังนี้

เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกจะคิดจากปริมาตรของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ CO<sub>2</sub> (1.0058 m<sup>3</sup>) ต่อ ปริมาตรของแก๊สทั้งหมด (5.7235 m<sup>3</sup>) เท่ากับ  $1.0058/5.7235 = 17.57\%$  (wet basis)

เปอร์เซ็นต์ฐานแห้งจะคิดจากปริมาตรของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ CO<sub>2</sub> (1.0058m<sup>3</sup>) ต่อ ปริมาตรของแก๊สที่หักลบปริมาตรของไอน้ำออกเสียก่อน (5.7235 m<sup>3</sup> = 4.9440 m<sup>3</sup>) เท่ากับ  $1.0058/4.9440 = 20.34\%$  (dry basis)

#### 7. คำนวณปริมาณอากาศสำหรับการเผาไหม้แบบ excess air

ในกรณีที่เราต้องการให้การเผาไหม้เป็นแบบอากาศเกิน (excess air) สามารถที่จะ คำนวณหาปริมาณอากาศได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Air flow require} &= (0.20+1.00) \times (5.7052) \\ &= 1.2 \times 5.7052 \\ &= 6.8462 \text{ kg / fuel 1 kg} \end{aligned}$$

นั่นคือในการเผาไหม้เชื้อเพลิงจำนวน 1 kg หากเป็นการเผาไหม้ที่พอดี หรือเป็นการเผาไหม้ ทางทฤษฎีจะต้องการอากาศเป็นจำนวน 5.7052 kg และสำหรับกรณีที่เป็นการเผาไหม้ที่มีอากาศเป็น 20% จะต้องการอากาศจำนวน 6.8468 kg

#### 8. คำนวณหาปริมาณของแก๊สไอเสียสำหรับการเผาไหม้แบบ excess air

มวลของแก๊สไอเสียที่เกิดขึ้นภายหลังการเผาไหม้กรณีอากาศเกิน (excess air) จะเป็นผลรวม ของมวลของแก๊สไอเสีย จากกรณีการเผาไหม้ทางทฤษฎี กับมวลของอากาศที่เกินเข้ามา โดยเขียนเป็น สมการได้ดังต่อไปนี้

$$\text{Weigh of exhaust} = \text{weight of exhaust with no excess} + \% \text{ weight excess air}$$

จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg เกิดแก๊สไอเสียมวล 6.7045 kg และในกรณีที่มีอากาศเกิน 20% ของปริมาณอากาศที่ต้องการเผาไหม้พอดี จะสามารถคำนวณหามวลของแก๊สไอเสียใหม่ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Weight of exhaust} &= 6.7045 + (0.2 \times 5.7052) \\ &= 7.8455 \text{ kg} \end{aligned}$$

มวลของแก๊สไอเสียกรณีเป็นการเผาไหม้แบบอากาศเกินจะมีค่าเท่ากับ 7.8455 kg ต่อ การเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg

#### 9. คำนวณหาปริมาณของ CO<sub>2</sub> ของแก๊สไอเสียสำหรับการเผาไหม้แบบ excess air

ให้อากาศ 1 โมล ประกอบด้วย O<sub>2</sub> จำนวน 23.2% และ N<sub>2</sub> จำนวน 76.8% สามารถคำนวณหาโมลโมเลกุลของอากาศได้ดังต่อไปนี้

$$\text{O}_2: \text{มีมวลโมเลกุล } 32\text{kg ในอากาศมี } 23.2\% \text{ คิดเป็นมวล} = 0.232 \times 32 = 7.424 \text{ kg}$$

$$\text{N}_2: \text{มีมวลโมเลกุล } 28\text{kg ในอากาศมี } 76.8\% \text{ คิดเป็นมวล} = 0.768 \times 28 = 21.504 \text{ kg}$$

ดังนั้น อากาศ 1 โมล มีมวลโมเลกุลเท่ากับ  $7.424 + 21.504 = 28.928 \text{ kg}$

ในแก๊สไอเสียมีปริมาณของอากาศ เท่ากับ  $0.2 \times 5.7045 = 1.1409 \text{ kg}$  คิดเป็นปริมาตรสาร  $1.1409/28.928 = 0.0394$  โมล แก๊สที่อุณหภูมิ 0°C หรือ 273k จะมีปริมาตร 10.2 m<sup>3</sup> ต่อแก๊ส 1 โมล แก๊สไอเสียอุณหภูมิ 400°C หรือ 673k จะมีปริมาตร  $(673/273) \times 10.2 = 25.145 \text{ m}^3$  ต่อแก๊ส 1 โมล แต่อากาศมีปริมาณ 0.0394 โมล ดังนั้นอากาศจะมีปริมาตรเท่ากับ  $25.145 \times 0.0394 = 0.9907 \text{ m}^3$

ปริมาตรของแก๊สไอเสียรวม กรณีเผาไหม้แบบอากาศเกิน จะหาค่าได้จากปริมาตรของอากาศร้อนที่ได้คำนวณไปในขั้นตอนที่ผ่านมา กับ ปริมาตรของแก๊สไอเสียที่หาได้ในข้อ 4

$$\text{ปริมาตรของแก๊สไอเสียรวม กรณีเผาไหม้แบบอากาศเกิน } 5.7235 + 0.9907 = 6.7142 \text{ m}^3$$

เปอร์เซ็นต์ฐานเปียกจะคิดจากปริมาตรของแก๊สคาบอนไดออกไซด์ CO<sub>2</sub> (1.0058m<sup>3</sup>) ต่อ ปริมาตรของแก๊สไอเสียทั้งหมด (6.7142 m<sup>3</sup>) เท่ากับ  $1.0058/6.7142 = 14.98\%$  (wet basis)

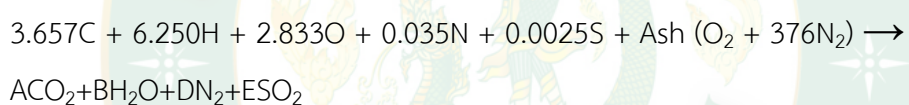
เปอร์เซ็นต์ฐานแห้งจะคิดจากปริมาตรของแก๊สคาบอนไดออกไซด์ CO<sub>2</sub> (1.0058m<sup>3</sup>) ต่อ ปริมาตรของแก๊สไอเสียที่หักลบปริมาตรของไอน้ำออกเสียก่อน  $(6.7142 \text{ m}^3 - 0.7795 \text{ m}^3)$  เท่ากับ  $1.0058/5.9347 = 16.95\%$  (dry basis)

### ซังข้าวโพดอัดเม็ด

1. คำนวณหาสมการเผาไหม้ และ A/F Ratio ของเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด

ตารางผนวกที่ 6 องค์ประกอบเชื้อเพลิงซังข้าวโพดอัดเม็ด

องค์ประกอบ	%	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวนโมเลกุล
C	43.88	12	3.657
H <sub>2</sub>	6.25	1	6.250
O <sub>2</sub>	45.33	16	2.833
N <sub>2</sub>	0.49	14	0.035
S	0.07	32	0.002
Ash	13.82	-	-



สมดุลสมการจะได้ดังนี้

$$C: 3.657 \rightarrow A$$

$$A = 3.657$$

$$H: 6.250 \rightarrow 2B$$

$$B = 3.125$$

$$S: 0.002 \rightarrow E$$

$$E = 0.002$$

$$O: 2.833 + 2\text{Ash} \rightarrow 2A + B + 2E$$

$$2.833 + 2\text{Ash} = 2(3.657) + (3.125) + 2(0.002)$$

$$= 7.314 + 3.125 + 0.004$$

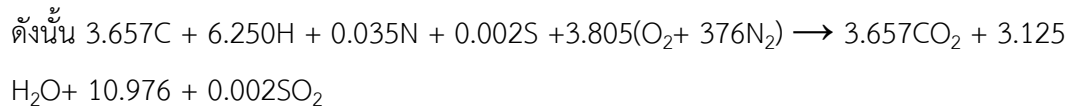
$$\text{Ash} = (10.443 - 2.833) / 2$$

$$\text{Ash} = 3.805$$

$$N: 0.035 + \text{Ash} (2 + 3.76) \rightarrow 2D$$

$$D = (0.035 + 3.805 (2+3.76)) / 2$$

$$D = 10.975$$



**หาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง จากสมการ**

$$A/F \text{ Ratio} = m_{\text{air}}/M_{\text{fuel}}$$

มวลของอากาศ

$$\begin{aligned} m_{\text{air}} &= n_{\text{air}} \times M.W_{\text{air}} \\ &= (n_{\text{dry air}} \times M.W_{\text{dry air}}) + (n_{H_2O} \times M.W_{H_2O}) \\ &= (3.805 \times 4.76 \text{ k mol}) (28.97 \text{ kg/k mol}) + (3.125 \text{ k mol} \times 18 \text{ kg/k mol}) \\ &= 524.699 + 56.250 \end{aligned}$$

$$m_{\text{air}} = 580.949 \text{ kg}$$

มวลของเชื้อเพลิง

$$\begin{aligned} M_{\text{fuel}} &= n_{\text{fuel}} \times M.W_{\text{fuel}} \\ &= (n_C \times M.W_C) + (n_H \times M.W_H) + (n_O \times M.W_O) + (n_N \times M.W_N) + (n_S \times M.W_S) \\ &= (3.65 \times 12) + (6.250 \times 1) + (2.833 \times 16) + (0.035 \times 14) + (0.002 \times 32) \\ &= 43.884 + 6.250 + 45.328 + 0.490 + 0.064 \\ &= 96.016 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$A/F \text{ Ratio} = 580.949/96.016 = 6.051 \text{ k}_{\text{air}} / \text{kg}_{\text{fuel}}$$

หรือ ปริมาณอากาศที่ใช้กับเชื้อเพลิง 1 kg

$$\begin{aligned} V &= m/\rho \\ &= 6.051 \text{ kg} / 1.2 \text{ kg/m}^3 \\ &= 5.043 \text{ m}^3 \end{aligned}$$



ภาคผนวก ง

ข้อมูลจากการทดสอบ

ตารางผนวกที่ 7 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) A/F = 4.316

เวลา (นาที)	T น้ำ	T(โซนการเผาไหม้)			T ปล่อง ควัน	T ผนังเตา		Tamb	RH	เถ้า
		T1	T2	T3		ด้าน นอก	ด้าน ใน			
0	29.6	33.6	33.2	33.0	32.1	36.9	36.5	34.5	27.0	0.928
5	31.6	103.3	106.9	120.9	78.8	40.6	39.2	33.5	34.1	
10	33.5	134.1	153.8	160.0	83.0	36.2	37.8	35.0	38.6	
15	54.9	138.7	161.9	155.3	50.6	38.4	38.8	35.0	38.6	
20	57.1	469.6	595.8	308.4	48.7	34.3	37.7	35.1	27.0	
25	63.3	523.7	582.9	616.7	44.5	34.5	42.5	33.8	30.0	
30	71.7	546.0	628.7	605.9	45.0	34.3	45.0	32.9	31.0	
35	89.9	595.4	651.4	627.5	46.2	39.6	48.2	32.2	32.0	
40	97.2	600.9	711.4	742.6	51.9	42.0	54.9	31.5	33.0	
45	98.1	699.7	787.1	762.9	44.2	44.7	60.6	31.0	34.0	
50	98.4	631.8	774.2	777.0	47.3	49.1	65.0	30.6	35.0	
55	99.8	652.6	814.2	815.4	44.8	56.1	72.3	30.3	37.0	
60	99.6	750.4	834.2	814.9	43.8	63.6	81.2	29.7	41.0	
65	99.2	761.8	890.4	815.7	166.8	63.8	89.9	29.0	44.0	
70	98.8	749.2	773.4	849.5	43.8	68.8	110.1	28.5	46.0	
75	98.4	676.1	747.4	784.7	42.0	69.4	112.5	28.2	46.0	
80	98.1	671.0	727.1	767.2	36.3	68.9	121.3	28.0	47.0	
85	98.3	601.4	643.5	706.1	152.0	62.2	99.0	27.7	47.0	
90	98.0	585.2	590.3	670.6	81.5	57.0	98.1	27.5	49.0	



ตารางผนวกที่ 8 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) A/F = 5.172

เวลา (นาที)	T น้ำ	T(โซนการเผาไหม้)			T ปล่อง ควัน	T ผนังเตา		Tamb	RH	เถ้า
		T1	T2	T3		ด้าน นอก	ด้าน ใน			
0	31.0	35.3	36.3	36.3	32.3	38.4	37.5	34.7	24.0	0.800
5	36.6	276.7	298.2	406.2	108.0	33.3	38.5	39.4	22.0	
10	43.2	257.8	400.1	443.6	111.7	38.8	44.8	38.8	23.0	
15	54.2	353.2	455.9	541.6	41.2	40.7	46.3	37.3	24.0	
20	68.0	524.6	641.9	642.7	45.0	44.0	48.1	36.2	24.0	
25	76.9	560.0	629.8	759.2	43.8	47.0	58.4	34.9	25.0	
30	88.9	541.2	664.5	713.2	41.1	50.2	68.2	34.2	26.0	
35	96.5	580.9	797.4	771.9	43.3	52.9	70.7	33.4	28.0	
40	98.3	706.6	728.3	836.3	44.0	54.5	76.5	32.7	31.0	
45	99.4	795.5	880.5	827.8	37.1	57.7	83.9	32.0	33.0	
50	99.9	762.2	947.5	830.9	41.7	62.1	89.2	31.3	34.0	
55	99.7	805.1	962.2	967.8	44.3	62.2	96.4	30.4	36.0	
60	99.4	854.0	989.6	974.4	44.3	64.3	101.4	30.4	36.0	
65	99.5	835.9	976.2	998.0	120.5	68.6	106.8	29.9	38.0	
70	98.6	813.6	985.1	918.0	40.5	70.7	117.2	29.5	39.0	
75	98.5	727.0	888.6	866.6	38.0	74.4	124.5	29.0	40.0	
80	98.5	726.3	770.4	785.8	47.2	67.7	132.1	28.6	41.0	
85	97.3	724.7	726.8	792.4	87.3	65.1	98.9	28.4	42.0	
90	96.3	685.3	693.4	795.3	76.0	61.0	77.3	28.1	42.0	

ตารางผนวกที่ 9 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้องเผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) A/F = 6.051

เวลา (นาที)	T น้ำ	T(โซนการเผาไหม้)			T ปล่อง ควัน	T ผนังเตา		Tamb	RH	เถ้า
		T1	T2	T3		ด้าน นอก	ด้าน ใน			
0	30.3	33.7	33.7	33.6	35.2	34.3	35.0	34.3	25.0	0.877
5	31.4	77.3	80.3	93.3	82.4	33.0	35.0	33.0	27.0	
10	33.3	153.1	167.2	177.9	106.2	33.2	34.5	33.2	28.0	
15	60.1	524.2	654.4	647.7	57.2	35.9	43.1	35.9	29.0	
20	66.6	689.1	775.0	762.2	57.5	37.9	47.3	37.9	31.0	
25	74.4	635.6	734.8	755.2	57.4	40.4	50.2	40.4	32.0	
30	82.1	749.8	764.5	780.0	57.1	38.4	63.8	38.4	34.0	
35	98.7	775.2	812.0	708.1	59.6	42.3	70.6	42.3	35.0	
40	98.8	712.6	856.4	826.4	53.2	45.9	82.5	40.9	35.0	
45	99.6	762.9	875.9	842.4	53.8	46.2	94.2	46.2	37.0	
50	99.7	770.3	878.2	896.0	54.7	49.7	100.8	49.7	39.0	
55	99.8	780.8	906.5	917.6	47.5	45.0	104.8	45.0	40.0	
60	99.6	892.9	987.7	907.7	49.5	52.5	105.8	52.5	41.0	
65	99.0	874.8	958.5	924.3	101.8	54.7	110.0	54.7	42.0	
70	99.2	848.6	867.4	841.8	54.7	62.4	102.6	62.4	42.0	
75	98.1	739.5	761.2	856.4	47.5	68.2	100.0	78.2	43.0	
80	96.9	686.1	715.7	796.8	49.5	60.9	99.0	70.9	43.0	
85	96.1	675.7	626.2	815.7	71.8	57.8	99.1	67.8	43.0	
90	95.9	573.6	608.6	801.1	65.4	57.4	98.1	77.4	43.0	

ตารางผนวกที่ 10 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้อง  
เผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) A/F = 6.885

เวลา (นาที)	T น้ำ	T(โซนการเผาไหม้)			T ปล่อง ควัน	T ผนังเตา		Tamb	RH	เถ้า
		T1	T2	T3		ด้าน นอก	ด้าน ใน			
0	20.9	19.4	20.7	20.8	19.3	20.6	21.2	21.3	68.0	0.828
5	26.4	104.7	135.7	195.3	81.8	21.2	21.5	20.2	65.0	
10	46.2	147.4	199.5	491.5	101.8	22.6	22.8	20.3	65.0	
15	59.6	250.4	323.6	554.3	40.5	25.3	25.9	20.3	65.0	
20	67.7	385.7	691.4	762.7	49.5	30.0	31.3	20.5	64.0	
25	88.1	468.7	738.2	724.9	45.7	35.0	36.5	20.8	62.0	
30	98.9	534.7	764.5	790.9	47.6	44.8	47.7	21.2	61.0	
35	99.8	528.5	751.4	803.0	45.0	44.4	48.5	21.3	60.0	
40	98.1	631.4	801.5	821.0	52.3	53.9	60.6	21.7	59.0	
45	99.3	641.8	816.0	860.7	54.5	58.6	74.0	22.0	59.0	
50	99.8	654.0	835.2	893.5	48.3	63.3	82.4	22.4	57.0	
55	99.9	666.4	899.4	912.3	57.5	69.1	97.6	22.9	56.0	
60	99.7	685.0	909.1	942.6	53.1	70.8	105.9	23.1	53.0	
65	99.6	685.5	976.7	964.6	125.5	71.9	124.3	23.5	54.0	
70	98.6	715.2	873.4	853.2	55.6	71.2	135.2	23.7	53.0	
75	98.7	719.2	830.1	852.5	53.6	68.7	123.1	24.0	52.0	
80	98.1	659.3	718.4	858.1	43.8	68.4	102.3	24.2	51.0	
85	97.8	634.1	702.0	806.3	87.4	62.6	98.2	24.5	50.0	
90	97.7	600.3	698.5	797.8	77.5	60.3	89.2	24.8	49.0	

ตารางผนวกที่ 11 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้อง  
เผาไหม้ทางเดียว Primary air ( $v_1$ ) A/F = 7.741

เวลา (นาที)	T น้ำ	T(โซนการเผาไหม้)			T ปล่อง ควัน	T ผนังเตา		Tamb	RH	เถ้า
		T1	T2	T3		ด้าน นอก	ด้าน ใน			
0	29.4	33.4	33.4	33.7	31.1	37.0	36.3	34.4	25.0	0.832
5	36.2	205.6	238.7	479.6	110.3	33.6	38.5	31.5	30.0	
10	41.6	280.5	329.9	524.4	120.2	35.9	39.2	31.2	33.0	
15	48.1	453.4	530.9	607.6	63.7	38.8	40.1	30.8	35.0	
20	55.4	572.4	647.5	679.0	63.7	42.3	57.5	30.3	37.0	
25	63.7	651.9	649.0	615.7	55.2	49.1	66.0	29.8	39.0	
30	68.9	671.6	667.8	788.6	66.0	47.5	63.6	29.6	41.0	
35	77.3	689.5	720.1	851.9	60.4	52.5	69.5	29.2	44.0	
40	81.2	696.8	818.1	869.4	61.7	52.6	73.9	29.0	44.0	
45	91.5	700.7	822.5	887.2	60.6	54.6	80.6	28.8	45.0	
50	98.7	725.9	818.4	933.1	63.5	62.9	99.4	28.3	43.0	
55	98.6	769.2	877.1	939.7	54.0	63.8	111.3	28.1	44.0	
60	98.7	866.0	901.6	953.4	64.6	68.4	113.8	27.7	44.0	
65	98.7	885.0	904.2	928.7	126.8	68.5	116.5	27.5	45.0	
70	98.7	876.7	952.8	935.8	58.4	69.4	129.0	27.3	45.0	
75	99.0	795.3	913.0	934.1	57.8	65.9	128.8	27.1	47.0	
80	98.9	762.9	888.3	818.5	57.1	61.7	127.3	26.9	48.0	
85	98.7	644.8	811.8	812.3	91.3	55.6	107.9	26.6	50.0	
90	98.7	613.9	735.7	790.4	89.4	55.8	99.9	26.2	52.0	

ตารางผนวกที่ 12 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้อง  
เผาไหม้สองทาง Secondary air ( $v_2$ ) 10%

เวลา (นาที)	T น้ำ	T(โซนการเผาไหม้)			T ปล่อง ควัน	T ผนังเตา		Tamb	RH	เถ้า
		T1	T2	T3		ด้าน นอก	ด้าน ใน			
0	38.0	38.2	37.8	37.5	36.5	45.5	42.9	38.2	26.0	0.754
5	42.5	110.7	120.5	204.5	77.6	42.2	46.3	37.7	26.0	
10	53.4	154.1	189.6	466.5	94.2	47.7	47.1	37.6	26.0	
15	68.3	323.9	276.0	627.1	60.7	51.7	54.5	37.6	26.0	
20	85.3	471.0	675.5	713.8	60.4	53.1	55.2	37.8	26.0	
25	97.5	522.7	530.2	882.0	52.6	56.8	57.3	38.4	25.0	
30	97.6	508.4	602.4	871.2	52.5	56.6	65.7	38.1	25.0	
35	98.2	606.3	697.8	862.9	52.6	57.5	83.8	37.5	26.0	
40	98.6	629.9	684.6	943.2	51.3	59.8	72.4	37.7	25.0	
45	99.4	616.8	739.5	966.9	53.9	59.6	82.8	37.9	25.0	
50	99.4	655.1	793.6	945.7	57.1	61.0	93.3	37.8	26.0	
55	99.8	654.3	890.1	927.5	56.6	62.4	97.9	37.7	26.0	
60	99.9	782.2	903.9	960.9	62.0	64.3	104.8	37.4	26.0	
65	99.1	769.1	987.9	957.6	138.4	69.4	121.9	37.2	29.0	
70	99.1	738.5	945.6	855.5	60.4	72.5	120.4	36.8	29.0	
75	98.6	760.2	891.0	853.0	61.4	72.2	125.2	36.4	31.0	
80	98.4	695.0	824.3	842.5	59.1	68.7	133.5	36.0	31.0	
85	98.0	680.4	827.8	808.2	81.2	69.4	110.7	35.3	32.0	
90	97.5	630.8	794.0	748.2	70.4	62.9	99.6	35.4	33.0	

ตารางผนวกที่ 13 ช่วงอุณหภูมิจน ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้อง  
เผาไหม้สองทาง Secondary air ( $v_2$ ) 30%

เวลา (นาที)	T น้ำ	T(โซนการเผาไหม้)			T ปล่อง ควัน	T ผนังเตา		Tamb	RH	เถ้า
		T1	T2	T3		ด้าน นอก	ด้าน ใน			
0	38.2	40.0	39.2	38.9	39.0	43.5	41.3	40.0	25.0	0.884
5	43.2	144.9	162.3	153.8	78.0	45.2	44.4	40.0	25.0	
10	53.2	280.5	344.2	476.2	104.6	19.2	47.5	39.5	26.0	
15	59.1	349.7	463.7	540.3	53.5	54.6	59.2	39.0	26.0	
20	71.4	414.8	573.3	767.6	53.4	56.8	64.0	39.0	27.0	
25	81.6	584.7	736.7	809.9	56.3	69.6	69.6	39.1	26.0	
30	98.5	592.0	718.4	882.6	57.9	60.6	68.5	39.2	25.0	
35	98.6	580.0	738.1	871.0	58.2	62.9	74.2	39.2	25.0	
40	98.4	555.0	894.1	841.4	53.5	63.5	76.7	39.0	26.0	
45	99.8	583.7	904.4	883.9	48.2	65.0	79.8	38.7	28.0	
50	99.8	618.3	947.0	982.6	55.3	67.5	101.8	38.3	30.0	
55	99.6	633.8	987.6	922.6	61.4	66.6	108.5	38.0	29.0	
60	99.3	757.4	931.3	969.0	60.0	69.1	121.0	37.7	30.0	
65	99.1	761.6	836.7	946.5	126.1	71.5	128.6	37.5	30.0	
70	99.2	738.9	804.4	894.8	59.2	71.6	128.8	37.3	31.0	
75	98.9	730.0	792.3	868.5	57.9	70.4	111.9	37.2	31.0	
80	98.8	685.1	779.0	824.6	52.3	69.9	113.0	37.0	34.0	
85	98.3	661.9	828.5	807.5	111.8	68.5	99.1	36.8	35.0	
90	98.0	639.6	785.1	789.0	99.8	60.1	98.7	36.5	34.0	

ตารางผนวกที่ 14 ช่วงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของซังข้าวโพดอัดเม็ด การป้อนอากาศเข้าห้อง  
เผาไหม้สองทาง Secondary air ( $v_2$ ) 50%

เวลา (นาที)	T น้ำ	T(โซนการเผาไหม้)			T ปล่อง ควัน	T ผนังเตา		Tamb	RH	เถ้า
		T1	T2	T3		ด้าน นอก	ด้าน ใน			
0	35.1	38.5	37.6	37.3	37.8	43.4	43.2	40.0	27.0	0.807
5	38.4	144.8	151.0	237.4	90.1	43.1	43.0	39.1	27.0	
10	41.5	197.9	237.8	472.9	83.6	44.1	43.8	38.9	27.0	
15	50.9	256.3	622.9	668.4	48.4	47.9	47.3	38.9	27.0	
20	63.0	363.9	639.4	777.0	48.4	49.2	50.3	38.8	27.0	
25	66.0	430.9	720.7	711.5	54.9	52.8	54.0	38.7	27.0	
30	78.0	512.3	711.5	731.2	56.0	53.3	54.8	38.6	26.0	
35	98.9	632.9	862.1	868.4	56.8	53.7	72.7	38.5	26.0	
40	98.4	646.1	820.9	808.4	56.0	57.5	73.2	38.3	27.0	
45	99.0	632.6	896.5	888.7	57.0	58.5	87.6	38.4	27.0	
50	99.8	654.7	848.7	945.3	57.9	72.1	88.3	38.5	25.0	
55	99.6	720.0	902.8	990.6	58.0	63.1	92.2	38.4	24.0	
60	99.8	717.0	982.8	944.2	58.4	71.1	114.1	38.4	24.0	
65	99.0	716.6	901.0	949.9	141.9	72.5	116.0	38.5	25.0	
70	98.5	642.5	838.2	892.7	62.7	69.2	134.6	38.7	25.0	
75	98.5	635.5	831.3	857.9	57.4	68.0	122.5	38.6	24.0	
80	98.4	606.4	773.4	846.0	56.1	67.3	109.1	38.5	24.0	
85	98.1	585.4	729.2	847.2	122.4	65.5	101.2	38.5	24.0	
90	97.8	561.7	738.8	834.2	89.6	64.2	97.2	38.5	24.0	



ภาคผนวก จ

ตัวอย่างแบบประเมินคุณภาพผลิตภัณฑ์



### แบบประเมินผลิตภัณฑ์พริกคั่วด้วยประสาทสัมผัส (sensory evaluation)

**คำชี้แจง :** แบบสอบถามนี้เป็นการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์พริกคั่ว ภายหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง จึงขอความร่วมมือในการแสดงความคิดเห็น โดยข้อมูลของท่านจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์ต่อไป โปรดทำเครื่องหมาย ✓ หน้าข้อที่ตรงกับความเป็นจริงของท่าน

#### ตอนที่ 1 รายละเอียดของผู้ตอบแบบสอบถาม

1. เพศ  ชาย  หญิง
2. อายุ  น้อยกว่า 15 ปี  15 – 30 ปี  
 31 – 45 ปี  มากกว่า 45 ปี
3. การศึกษา  ต่ำกว่าหรือเทียบเท่าประถมศึกษา  มัธยมศึกษา หรือเทียบเท่า  
 อนุปริญญา หรือเทียบเท่า  ปริญญาตรี หรือสูงกว่า
4. อาชีพ  นักเรียน/นักศึกษา  รับราชการ  รัฐวิสาหกิจ  
 เจ้าของกิจการ  ผู้บริหารหน่วยธุรกิจ  พนักงานหน่วยธุรกิจ  
 อื่น ๆ โปรดระบุ.....

#### ตอนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับการทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์พริกคั่ว ด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เปรียบเทียบกับพริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน

กรุณาประเมิน สี และลักษณะที่ปรากฏ ของพริกคั่วด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับพริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน แล้วให้คะแนนความชอบที่ตรงกับความรู้สึกของท่าน ในการให้คะแนนจะใช้เลขสากลเฮโดนิค 5 ระดับ (5-point Hedonic scale) ซึ่งมีความหมายดังนี้

ด้านคุณลักษณะ	ระดับความพึงพอใจ				
	5 มากที่สุด	4 มาก	3 ปานกลาง	2 น้อย	1 น้อยที่สุด
ลักษณะที่ปรากฏ					
สี					
การยอมรับโดยรวม					

เมื่อประเมินแต่ละตัวอย่างเสร็จแล้วกรุณาประเมินการยอมรับของผลิตภัณฑ์ โดยใส่เครื่องหมาย ✓ ในช่องที่ตรงกับความรู้สึกของท่าน

- ยอมรับพริกคั่ว ด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง มีความเหมือนพริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน
- ไม่ยอมรับพริกคั่ว ด้วยเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง เนื่องจากไม่มีความเหมือนพริกคั่วของวิสาหกิจชุมชน

ข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาผลิตภัณฑ์

.....

.....

.....

.....

ขอขอบคุณที่สละเวลาในการทำแบบประเมิน



ภาคผนวก ฉ

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

ในส่วนของการเผยแพร่ผลงานวิจัย ได้นำเสนอบทความทางวิชาการ จำนวน 2 บทความ รายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

บทความที่ 1 เรื่อง : Thermal Efficiency of biomass stoves under continuous fuel feeding Using corncob as Fuel

ชื่องานประชุม : The 24th Tri-University International Joint Seminar and Symposium 2017 Mie University, Japan

วันที่จัดงาน : 23-27 October 2017

สถานที่จัดงาน : Mie University, Japan

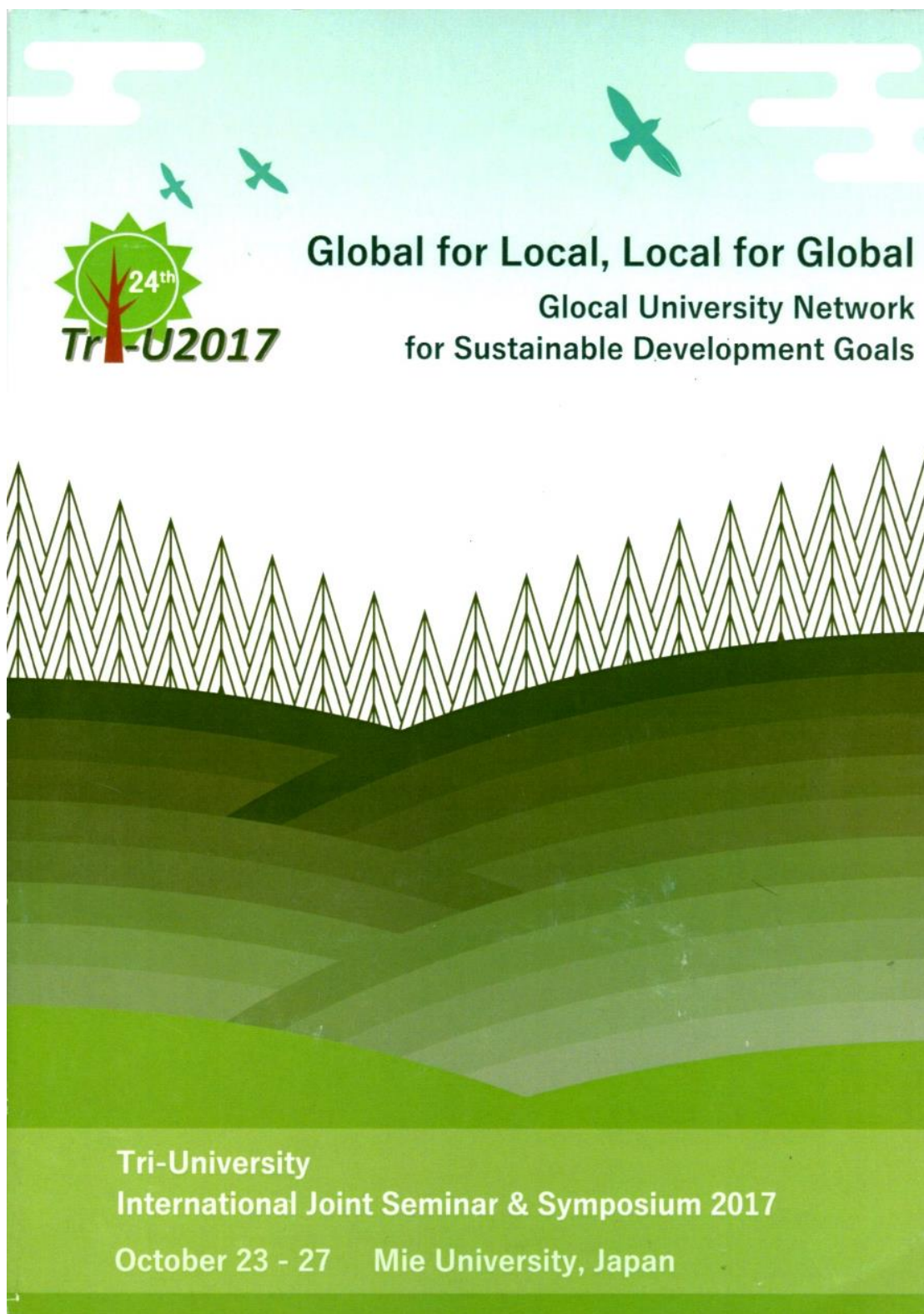
บทความที่ 2 เรื่อง : ศึกษาอัตราการป้อนอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิด ป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

ชื่องานประชุม : การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

วันที่จัดงาน : 13-15 มิถุนายน 2561

สถานที่จัดงาน : ณ โนโวเทล ระยอง







**Tri-University  
International Joint Seminar & Symposium 2017**

October 23<sup>rd</sup> – 27<sup>th</sup>, 2017 at Mie University

Population, Food, Energy, Environment and Children



***Global for Local, Local for Global***

*Glocal University Network  
for  
Sustainable Development Goals*

Scope: Two years ago, UN member countries adopted a set of goals to end poverty, protect the planet, and ensure sustainable prosperity for all the people in the world. Local universities in Asia which are also struggling in the waves of globalization should work for achieving this movement. Let's make a tight glocal university network and go hand in hand to accomplish this mission for future generations.

**Oral Presentation Timetable**

Oct.24	EG4	Room C [Energy]			
17:10-17:30	1	Maejo	Ajcharapa	Chuanchai	EG4-C1
17:30-17:50	2	Jiangsu	Gabriel	Murillo Morales	EG4-C2
17:50-18:10	3	Chiang Mai	Suchada	Yodyudee	EG4-C3
18:10-18:30	4	Maejo	Phitchaphom	Khammee	EG4-C4
Oct.24	EV4	Room D [Environment]			
17:10-17:30	1	Jiangsu	Zhe	Yang	EV4-D1
17:30-17:50	2	Mie	Takahiro	Takeuchi	EV4-D2
17:50-18:10	3	Bogor Agriculture	Fitria	Irsbawati	EV4-D3
18:10-18:30	4	Shanghai Ocean	Yuan	Chai	EV4-D4
Oct.24	C4	Room E [Children]			
17:10-17:30	1	Guangxi	Qinwen	Luo	C4-E1
17:30-17:50	2	Chiang Mai	Pattarapon	Saigerdsri	C4-E2
17:50-18:10	3	Guangxi	Ang	Mu	C4-E3
18:10-18:30	4	Guangxi	Yiming	Zhong	C4-E4
Oct.26	EG5	Room A [Energy]			
9:00-9:20	L	Jiangsu	Binjuan	Zhao	EG5-AL
9:20-9:40	1	Bogor Agriculture	Mu'minah	Mustaqimah	EG5-A1
9:40-10:00	2	Maejo	Wilawan	Khumbem	EG5-A2
10:00-10:20	3	Mie	Takuya	Hioki	EG5-A3
10:20-10:40	4	Maejo	Numchok	Manmai	EG5-A4
Oct.26	F5	Room B [Food]			
9:00-9:20	L	Khabarovsk	Kirill	Zemliak	F5-BL
9:20-9:40	1	Shanghai Ocean	Weixiang	Liu	F5-B1
9:40-10:00	2	Guangxi	Yuanyuan	Zhang	F5-B2
10:00-10:20	3	Mie	Sasicha	Chensom	F5-B3

TRIU17FD01 (paper number)

## Thermal Efficiency of biomass stoves under continuous fuel feeding Using corncob as Fuel

Wilawan Khumhem, Natthawud Dussadee\*, Churat Thararux, Nigran Homdoug and Rameshprabu Ramaraj

<sup>1</sup> School of renewable energy, Maejo University, Sansai Chiang Mai 50290, Thailand  
\*e-mail: zomza05wilawan@gmail.com ; natthawud92@gmail.com

**Abstract:** This study was focused on continuity test of biomass stove at household level. The designed biomass stove has 3 parts are consisting of a fuel system, followed by combustion and the ash storage system and the furnace used in the experiment is a cylindrical furnace 80 centimeters height and Diameter 40 centimeters. There is corn cob biomass used in the test. In the fuel continuous and consistent fuel injection by using conveyor screws with, controlled by an inverter to control the fuel feeding as a result high system performance. Use a blower to fill the air in the combustion chamber. Testing biomass stoves are a direct combustion of biomass. by determining the fuel feeding rate of corn cob at 8 kg/h The moisture content of corn cob is between 10-15% and Biomass stove tests were carried out varying air/fuel ratio range (A/F) of 1.99, 3.31, 4.63, 5.95 and 7.28. The size of the corn cob is 1 inch and 2 inches. From the study results, Thermal efficiency via Water Boiling Testing (WBT) is used for testing biomass stove. the adjusting of air fuel ratio was effected on energy and fuel consumption rate, hot water temperature, internal stove temperature, duration of heat input and thermal efficiency. which fuel feeding rate of corn cob at 8 kg/h. found that at 1 inch corn cob, the A/F 3.31 is highest thermal efficiency 15.54%. And 2 inch corn cob, the A/F 4.63 is highest thermal efficiency 15.50%. The minimum cost heat production of biomass stove was about 0.81 Baht/kWh. Consider continuous fuel feeding using conveyor screws. It has the effect of controlling the internal combustion temperature a relatively stable. Therefore, it was suitable to use for cooking in households or in small restaurants.

**Key words:** biomass stove, Thermal efficiency, Water boiling test, corncob

### 1. Introduction

At present, fossil fuel energy is on the downward trend, which is driving down the fuel price. As a result of the energy crisis, such energy is unavoidable for those who use it. However, the government is trying to find measures to promote biomass used. It is a lot of agricultural waste to be used as renewable energy, it can be seen from the Alternative Energy Development and Alternative Energy Development Plan of the country [1].

Thailand is a developing country that needs natural resources, both domestically and internationally, for use in various activities. In agriculture, the industry has a lot of agricultural output. One output exported to foreign countries is worth billions of Baht a year [2]. In processing these yields there will be a lot of scrap waste. This may have been wrongly eliminated. However, waste from agriculture or industry. They can be used in alternative energy [3]. An agricultural waste collection, especially, biomass fuels like husk, wood chips, etc., are used with biomass gasifiers that another way to support the use of domestic renewable energy, which can be used to replace LPG at the household level. The effect of the use also affects the reduction of combustion in the community [4].

The use of LPG in large household accounts for 54% of LPG consumption nationwide and it is likely to increase every year [5]. The continuous increase of crude oil prices in the world market. As a result, LPG prices rise as well [6]. So to reduce the cost of using LPG to households. Therefore, there are ways to use LPG gas economically and effectively. Biomass furnaces can produce heat from agricultural residues as fuel in the past has been widely used. The burning of the cooking is quite good with less smoke and can be used as a substitute for LPG for household use [7].

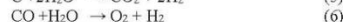
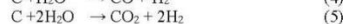
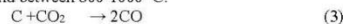
The current use of biomass stoves is compatible with other fuels. But there is still the problem of refueling that cannot refuel continuously. The purpose of this research. Both in terms of community and researchers, efforts have been made to develop biomass gasifiers to continually refuel. In terms of efficiency, combustion to compare the use of household gas. To investigate the thermal efficiency of the furnace by means of

Water boiling test (WBT) [8]. To know the thermal efficiency of the burner. The results of the study will be alternative to alternative energy and reduce the use of LPG with reduce household expenses.

Gasification process: Gasification is a process that converts organic or fossil fuel based carbonaceous materials into carbon monoxide, hydrogen and carbon dioxide. This is achieved by reacting the material at high temperatures (>700 °C), without combustion, also with a controlled amount of oxygen or steam. The resulting gas mixture is called syngas or producer gas and the heating value of gas was of 5 MJ/m<sup>3</sup> [9]. The reactions of biomass gasification in fixed bed gasifier consist of four processes: drying, pyrolysis, combustion, and reduction. The details are as follows: the drying zone is for taking the water/moisture content out of the biomass materials. The temperature in this zone was in a range of 100-135 °C. In the pyrolysis zone (or distillation zone) the biomass are decomposed with high heat in limited oxygen. The reaction is exothermic. The heat produced causes the biomass to release all of volatile constituent parts to boil off forming a volatile gas and leaving a pure carbon residue. The temperature in this zone having between of 200-600 °C. Oxidation zone or combustion zone appears where oxygen re-acts with carbon and hydrogen. In the complete combustion process, the carbon is converted into carbon dioxide; simultaneously hydrogen is converted into water. The combustion reaction is exothermic and temperature of this zone between 1100-1500 °C.



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





### Evaluate of biomass stoves under continuous fuel feeding

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

$$FC = \frac{M}{T} \quad (8)$$

When FC is the fuel consumption rate (kg/h) biomass M is a mass of biomass (kg), T is the duration time (h) and specific fuel consumption is the ratio of biomass energy at duration time.

The Specific Energy Consumption rate of energy consumption per unit of energy produced; the following equation:

$$SEC = \frac{E}{Q_u} \quad (9)$$

When SEC is a Specific Energy Consumption rate (kJ/kWh) E is a Power consumption (kJ/h),  $Q_u$  is available heat (kW).

The thermal efficiency of the biomass stove can find on the boiling test, the equation for calculating is the ratio of available heat with heat of biomass fuel.

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{fuel}} \times 100\% \quad (10)$$

When  $\eta$  is a biomass stove thermal efficiency (%),  $Q_u$  is available heat,  $Q_{fuel}$  is the heat of biomass fuel. The available heat is calculated from the heat used to evaporate water and warm.

$$Q_u = [m_{w,1} C_{p,w} (T_{w,b} - T_{w,i})] + [m_{w,2} h_{fg}] \quad (11)$$

When  $m_{w,1}$  and  $m_{w,2}$  is initial and evaporate mass of water (kg),  $C_{p,w}$  is the specific heat of water is 4.186 kJ/kg °C,  $h_{fg}$  is latent heat of vaporization is 2,257 kJ/kg. The heat input from biomass is calculated as follows.

$$Q_{fuel} = m_{fuel} \times LHV \quad (12)$$

When  $m_{fuel}$  is biomass input in the stove (kg) and LHV is the lower heating value of biomass (kJ/kg).

### 3. Material and method

The biomass stoves under continuous fuel feeding was tested as biomass downdraft gasification, that stove was developed to continuous feed the biomass. The combustion of the stove was a pure gasification process which can show the differences on the previously developed biomass stove. The experiment is a cylindrical furnace 80 centimeters height and Diameter 40 centimeters fill biomass in the hopper and continuous fuel feeding adjusting and controlling the speed of rotation with electrical inverter. The bottom of the chamber was a chimney, gas storage and take out ash system. The feeding of air was used blower, and blower air from the blow of the combustion chamber, the detail of the experiment set up was shown in Fig.1 and Fig.2.

The biomass used for "biomass stoves under continuous fuel feeding" fueled consumption from the corn cob which is agricultural waste in the north of Thailand. In the analysis, the

lower heating value 14.26 MJ/kg and the detail of chemical analysis are shown in Table 1.

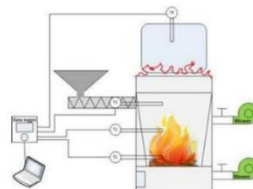


Fig.1 Diagram of a biomass stoves experiment.



Fig.2 biomass stoves under continuous fuel feeding

Table 1 physical and chemical analysis of corncob

Chemical Property	Corn cob
Moisture (%)	11.82
Volatile (%)	69.74
Fixed carbon (%)	12.81
Ash (%)	5.62
C (%)	42.12
H (%)	6.52
O (%)	45.11
N (%)	0.45
LHV (MJ/kg)	14.26

The instrument for the research was used 93 W of the blower to feed the air into the combustion chamber. The air flow rate was measured by anemometer by YK-180 AM of LUTRON. The temperature of water and combustion chamber were used type K thermocouples with data logger by DX 220 of YOKOGAWA. The weight of biomass and water measured by a digital weight scale by DS-530 of DIGI.



Fig.3 corn cob size 1 inch and 2 inch

Biomass stove tests were carried out varying air/fuel ratio range of 1.99, 3.31, 4.63, 5.95 and 7.28. The size of the corn cob is 1 inch and 2 inches shown in Fig.3. The combustion chamber temperature was measured at the top, medium and

bottom of biomass stoves. Duration time of tests was 60 min. The data was analyzed specific energy consumption, water temperature, thermal efficiency, heat transfer and cost of heat production.

**5. Result and discussion**

**5.1. The fuel consumption**

Fig. 4 shows the fuel consumption rate of Biomass Stoves. When using corn cob, fuel is comparable between 2 sizes of 1 inch and 2 inches. The study found that. Fuel 2 inch that is Fuel consumption rate 7.41 kg/h. At the same time, if compare the fuel consumption rate 1inch that is Fuel consumption rate 8 kg/h. found that the 2 inch fuel consumption rate is lower than 1 inch. Which resulted from the size of the fuel to be used affects the ability of the air mixture to burn.

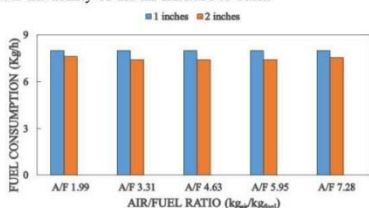


Fig.4 The fuel consumption of biomass stove

**5.2. Specific energy consumption**

Fig. 5 shows the specific energy consumption of biomass corn cob 2 size and air to fuel ratio. Found that at 2 inches A/F 4.63 and 2 inches A/F 3.31 the lowest specific consumption rate. This is due to the fuel size and air feed. The result of mixing with oxygen better while burning.

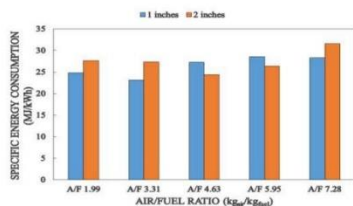


Fig.5 The energy consumption of use biomass stove

**5.3. The temperature of boiling water**

Fig. 6 shows the water boiling temperature of under the air fuel ratio. There are 2 sizes of fuel. Found that a 1-inch-fuel of A/F 3.31. Water temperatures rise faster than other air-to-fuel ratio. And fig. 7 shows the size 2-inch-fuel of A/F 4.63. Water temperatures rise faster than other air-to-fuel ratio. This is due to the fact that the air to fuel ratio in that condition is appropriate. This maximizes the combustion efficiency.

**5.4. Thermal efficiency**

Fig. 8 shows the Thermal efficiency of biomass stoves using corn cobs as fuel at the 1 and 2 inches. It was found that at 1 inch corn cob, the air to fuel ratio 3.31 is higher heat efficiency 15.54%. And 2 inch corn cob, the air to fuel ratio 4.63 is higher heat efficiency 15.50%. The performance of these 2 sizes with similar values. But the difference in air to fuel ratio. The difference is that entering the air into the

combustion chamber. The air intake is low and too high.

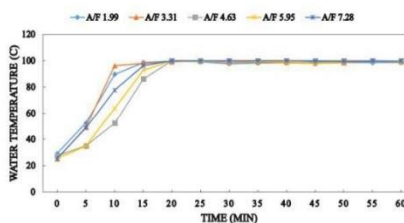


Fig.6 comparing water temperature boiling of corn cob 1 inch

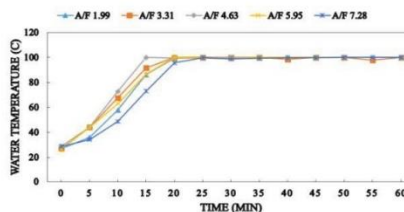


Fig.7 comparing water temperature boiling of corn cob 2 inch

As a result, the amount of heat released is lower. [10] And sometimes the heat will come off the burner because the air in high volume.

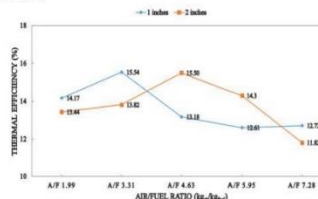


Fig.8 thermal efficiency of biomass stove

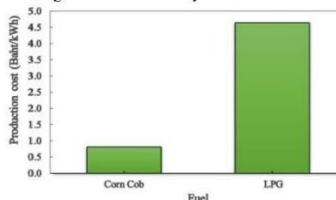


Fig. 9 the cost of heat production of biomass stove

**5.5. Cost of heat production**

Fig. 9 shows the cost of producing biomass stove compared to LPG. The results showed that. Fuel from corn cob provides the lowest cost of production with a price of 0.81 Baht/kWh. And when comparing cost with LPG It was found that the biomass stove cost 3.5 times lower. By using LPG with an average cost of 4.64 Baht/kWh. [11]

**6. Conclusions**

From the study results, adjusting the air to fuel ratio will affect the fuel consumption rate, also hot water temperature

heating time, heat efficiency and heat production costs. Fuel size and air to fuel ratio adjustment at 2 inches fuel, the lowest fuel consumption is 7.41 kg/h. Adjusting the A/F 3.31 to 1 inch and adjusting the A/F 4.63 to 2 inches. Water temperatures are rising faster and boils. The higher the temperature, the ratio of air to fuel other: boiling water temperature starts to boil for 17 minutes after the biomass boiler. Biomass stove has the maximum thermal efficiency was 15.5%. And the lowest cost of producing corn cobs was 0.81 Baht/kWh. Finally, this study demonstrated that very interesting results on thermal efficiency of biomass stoves under continuous fuel feeding using corncob as fuel.

#### 7. Acknowledgments

Authors would like to thank for provided the research grant from school of Renewable energy Maejo University "Project and development of the renewable energy potential graduates. ASEAN".

#### 8. References

- [1] Ministry of Energy, (2015), Alternative Energy Development Plan: AEDP2015, [http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015\\_Final\\_version.pdf](http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015_Final_version.pdf).
- [2] Bank of Thailand (2014) Report on agricultural situation, 2014 and 2015, [online], source: <https://www.bot.or.th>, accessed on July 20, 2017.
- [3] Thanapol Tantisatechakul (2015), Community Renewable Energy from Mangrove Biomass Charcoal. nJournal of Science and Technology No. 3, 418-431.
- [4] Waraporn Thumtachat (2014) Production of Inverted Downdraft Gas Burners Using Chaff to Fuel. Journal of the Faculty of Industrial Technology Lalang Rajabhat University No. 1 pages 26-39.
- [5] N.L. Panwar and N.S. Rathore, "Design and performance evaluation of a 5 kW producer gas stove," Biomass and Bioenergy, Vol. 32, pp. 1349-1352, 2008.
- [6] Ampol PichaiCherd. "Enhancement of LPG Burners by Bringing Heat back to Warm Air". ME-NETT23 4-7/11/2552 Chiang Mai Province, (2009).
- [7] Belonio, A.T. (2005), Rice Husk Gas Stove Handbook, Appropriate Technology Center. Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University.
- [8] Prapan Rukpaised. Efficient burning (Online) <http://www.mdboilers.com> [July 2017].
- [9] Food and Agriculture Organization (FAO) (1986), Wood Gas as Engine fuel, Mechanical Wood Products Branch Forest, Italy.
- [10] small red file, Isaac Lockman, Marc Par'e, Jordan Edwards (2010), Design of a Rice Husk Gasification Cook Stove for Rural Nicaragua, Handbook, Georgia Institute of Technology.
- [11] Thanachat Mahawan Nigran Homdoun Natthawud Dussadee Churat Taralux Rameshprabu Ramaraj, (2016), Application of gasification technology for design household, smokeless biomass stove, proceeding of 23rd Tri-U International Joint Seminar and Symposium Bogor Agricultural University, Indonesia, 23-28 October 2016.



Ms. Wilawan Khumhem

Ms. Wilawan Khumhem  
Date of birth : 05/08/1994  
- Candidate in Master of Engineering (Renewable Energy Engineering)  
- Applied physic of science  
- Biomass technology



Dr. Natthawud Dussadee

Dr. Natthawud Dussadee  
Assistant Professor & Director,  
School of Renewable Energy, Maejo University,  
Professional  
Agricultural Processes, Energy Conservation, Solar energy and Thermal Process (Solar Heating, Heat exchanger), Biomass and Biofuel.



Dr. Churat Thararux

Dr. Churat Thararux,  
Assistant Professor,  
School of Renewable Energy, Maejo University  
Professional:  
1. Gasification and Pyrolysis Process  
2. Biomass Conversion Technology  
3. Internal Combustion Engine  
4. Biomass Power Plant Engineering  
5. Combustion Engineering  
6. Bio hydraulic oil



Dr. Nigran Homdoun

Dr. Nigran Homdoun  
Doctor of Engineering (Mechanical Engineering)  
Professional:  
1. Gasification and Pyrolysis Process  
2. Biomass Conversion Technology  
3. Internal Combustion Engine  
4. Biomass Power Plant Engineering  
5. Combustion Engineering



Dr. Rameshprabu Ramaraj

Dr. Rameshprabu Ramaraj, M.Eng., M.Sc., M.Phil., Ph.D., Lecturer, School of Renewable Energy, Maejo University,  
Professional in scientific and engineering field:  
Biology (animal, plant & microbes), sustainable resource engineering, environment and ecological engineering, bio-statistical analysis and related software applications, biofuels and solid fuels.



14th Conference on Energy Network of Thailand  
การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 14

13 - 15 มิถุนายน 2561 ณ โนโวเทล ระยอง

# Proceeding



## สารบัญ

<b>EI-04 นวัตกรรมด้านพลังงาน</b>	
การศึกษาประสิทธิภาพโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกสำหรับอบแห้งผักบวช	2
การพัฒนาศูนย์ข้อมูลสารสนเทศด้านพลังงานของประเทศไทย	10
การทดสอบกักตุนน้ำขนาดเล็กพลังงานแสงอาทิตย์	17
การศึกษาทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของปล่องรังสีอาทิตย์ไม่เกี่ยวข้องกับการระบายอากาศ ภายใต้สภาวะอากาศแบบร้อนชื้นของประเทศไทย	21
การลดความร้อนสะสมภายในห้องใต้หลังคาด้วยฉนวนกันความร้อนจากปะเก็นและน้ำยางธรรมชาติ	26
อิทธิพลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่มีต่อการลดของความชื้นกามะพร้าวภายในเครื่องอบแห้งแบบสกรูลำเลียง	31
การประยุกต์ใช้คลื่นอัลตราซาวด์สำหรับการอบแห้งเมล็ดข้าวเปลือก	36
การลดความชื้นของข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบกระแสน้ำโดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง	40
ออกแบบและสร้างระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนที่ใช้ทำความร้อนแบบเทอร์มิสโตป	45
การออกแบบ และศึกษาประสิทธิภาพของเรือนน้ำพลังงานแสงอาทิตย์	51
การพัฒนาเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าเฟสเดียวด้วย FPGAs ภายใต้เงื่อนไขสัญญาณไซน์ตามมาตรฐาน IEEE 1459-2010	56
การสร้างเครื่องอบกล้วยน้ำว้าโดยใช้แสงอาทิตย์ร่วมกับหลอดฮาโลเจน	63
การออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งเปลือกหัวโดยใช้บีมความร้อน	68
การพัฒนาแบบต้นแบบผู้ผลิต RDF โดยใช้เทคโนโลยีไบโอดีเซลร่วมกับบีมลมบ่อนอากาศโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เพื่อจัดการขยะชุมชน	74
การจัดการปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และการเติมอากาศด้วยระบบระบายอากาศแบบผสมผสานภายใต้เงื่อนไขที่ปกคลุมด้วยเรือนขึ้น	81
การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนภายในห้องน้ำที่ติดตั้งตัวสร้างการไหลแบบสั้น	89
อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าต่อสมบัติเชิงโครงสร้างและสมบัติเชิงกลของฟิล์มบางบิสมีเทลลูไรด์แบบบีดงได้เคลือบโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเทอริง	96
การศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องผลิตก๊าซไอโซนเพื่อการบำบัดและปรับสภาพน้ำเสีย	104
การศึกษาหัวแฉกวัสดุพูนแบบวงแหวนที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของหัวแฉก	111
ระบบวัดและประมวลผลระยะไกลค่าความเป็นกรดต่างและค่าออกซิเจนในน้ำ	115
การออกแบบซอฟต์แวร์เครื่องทดสอบการสึกหรอโดยแลปวิว	119
ศึกษาผลกระทบของความยาวและลักษณะท่อลมระบายอากาศในระบบระบายอากาศของการเก็บรักษาข้าวเปลือก	123
การประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เพื่อการประเมินศักยภาพพลังงานชีวมวลในเขตพื้นที่ภาคเหนือตอนบน กรณีศึกษาจังหวัดน่านและจังหวัดแพร่	129
การใช้พลังงานของรถปลักอินโซบริดภายใต้รูปแบบพฤติกรรมจราจรที่จริงของคนในกรุงเทพมหานคร	137
<b>ศึกษาอัตราการป้อนอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดบ้อนเชื้อเพลิงแบบค้อนเนื่อง</b>	<b>143</b>
การพัฒนาแคปซูลขนาด KB-8 โดยใช้วัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น	151

ศึกษาอัตราการป้อนอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง  
The Study on The Effect of Air Flow Rate to Thermal Efficiency of Biomass Stoves Under Continuous Fuel Feeding

วิลาวัลย์ คุ้มเหม\*, พงศ์สกลิต ศรีภักดิ์<sup>1</sup>, ชูรัตน์ อารารักษ์<sup>1</sup>, นิกราน ทองดวง<sup>1</sup>, เสริมสุข บัวเจริญ<sup>1</sup>, ศิริบุญ จินดารักษ์<sup>2</sup>  
และณัฐวัฒน์ คุชฎี<sup>1</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน

<sup>2</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

\*ผู้ติดต่อ: zomza05wflawan@gmail.com, 0827759498, 053875590

**บทคัดย่อ**

**EI-04-210**

งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการป้อนอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง ใช้หลักการการเผาไหม้โดยตรง ซึ่งเป็นกระบวนการที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจน แล้วให้พลังงานความร้อนออกมา เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ห้องเผาไหม้ ชุดเดิมอากาศจะทำการเติมอากาศไปตามช่องลมเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ชุดเดิมอากาศสำหรับการเผาไหม้มี 2 จุด คือจุดแรกของ primary air และจุดสองที่ห้อง secondary air จากนั้นเกลียวลำเลียงเชื้อเพลิง ซึ่งอยู่ในรางลำเลียงจะทำกรรณถ่ายเชื้อเพลิงไปยังห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเสร็จสิ้นการทำงาน ทำการทดสอบด้วยวิธีการต้มน้ำ (water boiling test, WBT) เตาชีวมวลนี้ได้มีการทดสอบโดยใช้ข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ มีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 8 kg/h พบว่า ที่ A/F 6.615 มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 38.74 % เมื่อทำการป้อนอากาศที่ห้อง secondary air พบว่าการป้อนอากาศที่ 30 % ของ A/F 6.615 มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเท่ากับ 40.78% สรุปคือ ผลการเปรียบเทียบการใช้งานเตาที่มีการป้อนอากาศเข้าสู่เตา พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่มีการป้อนอากาศ 2 จุด คือจุดแรกของ primary air และจุดสองที่ห้อง secondary air จึงทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 5.27 % จากการป้อนอากาศจุดเดียว ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดที่ A/F 6.615 ซึ่งมี Equivalence Ratio เท่ากับ 1.27 สามารถผลิตพลังงานความร้อนได้ 12.80 kW เป็นรูปแบบการเผาไหม้โดยตรงซึ่งสามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแก๊สซิฟิเคชัน

**คำหลัก:** เตาชีวมวล, ประสิทธิภาพ, ป้อนเชื้อเพลิงต่อเนื่อง

**Abstract**

The objective of this study was to evaluation effect of air flow rate on thermal efficiency of direct combustion continuous biomass stoves. The principle is the fuel reacts chemically with oxygen and then let the heat out. When combustion burns has at the combustion chamber, the Blower is responsible for releasing the air through the air tube. The biomass stoves have air tube 2 point is primary air and secondary air. The continuous fuel feeding in to the combustion chamber and consistent fuel injection by using conveyor screws. The experiment by water boiling test, (WBT). and use corn crop is fuel for combustion. The results show was the fuel consumption 8 kg/h at A/F 6.615 has a high efficiency of 38.74 %. When has released the air through the secondary air, the result shows the volume air flow rate at 30 % of ของ A/F 6.615 has efficiency increase 40.78%

The comparison of biomass stove has blower is responsible for releasing the air to the combustion chamber, the results show the thermal efficiency of biomass stove has air tube 2 point is primary air and secondary air, this efficiency increases by 5.28 % of single point feed. The efficiency at A/F 6.615 has equivalence ratio 1.27, It can produce 12.80 kW of heat and direct combustion can increase of efficiency more than gasification.

**Keywords:** biomass stoves, thermal efficiency, continuous fuel feeding

**1. บทนำ**

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก[1] ซึ่งอาจมีการใช้ประโยชน์ในบางส่วนและบางส่วนยังมีการกำจัดอย่างผิดวิธี เช่นการเผาทำลายเป็นต้น โดยในพื้นที่ภาคเหนือมีการปลูกไร่ข้าวโพดเป็นจำนวนมาก หลังจากเก็บเกี่ยวข้าวโพดแล้ว ลำต้นและใบจะถูกเผาทิ้งเพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูกครั้งต่อไป ซึ่งอาจจะทำให้ไฟลุกไหม้ป่า ซึ่งเป็นที่มาของปัญหาหมอกควันในพื้นที่ภาคเหนือ อย่างไรก็ตามวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรหรืออุตสาหกรรมต่างๆ เหล่านี้สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนได้ [2]

การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยเฉพาะเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ เศษไม้ ปลาย มาใช้กับเตาชีวมวลเป็นอีกแนวทางหนึ่ง ในการสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทน

ภายในประเทศโดยสามารถใช้ทดแทนการใช้แก๊สหุงต้มในระดับครัวเรือนได้ดี[3] การใช้แก๊สหุงต้มในครัวเรือนปริมาณมากถึง 54% ของปริมาณการใช้แก๊ส LPG ทั้งประเทศ และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุก ๆ ปี การเพิ่มราคาของน้ำมันดิบในตลาดโลกอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ราคาแก๊ส LPG เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการใช้แก๊ส LPG ให้กับครัวเรือน จึงมีการหาวิธีการเพื่อให้สามารถใช้แก๊ส LPG อย่างประหยัด และมีประสิทธิภาพสูงสุด ผลจากการใช้งานยังส่งผลต่อการลดการเผาไหม้ในชุมชนได้อีกทางหนึ่ง เตาชีวมวลเป็นเตาผลิตความร้อนอีกประเภทที่สามารถใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงได้ ที่ผ่านมามีการนำเอาไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย การเผาไหม้ในการประกอบอาหารค่อนข้างดี ควันมีน้อยและสามารถใช้ทดแทนแก๊สหุงต้มสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือนได้ดี[4] แต่อย่างไรก็ตาม

การนำเอาเตาแก๊สชีววมวลไปใช้งานในปัจจุบันยังคงมีปัญหายอยู่ในเรื่องของการป้อนเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถป้อนเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อเชื้อเพลิงในเตาหมดจะต้องมีการนำเอาเชื้อเพลิงและเติมเชื้อเพลิงใหม่ ซึ่งจะต้องมีการเติมเชื้อเพลิงทุก ๆ 40-60 นาที ซึ่งขึ้นอยู่กับการปรับระดับความเร็วลมที่ป้อน ข้อเสียจากการที่ไม่สามารถเติมเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง ก็มีการพยายามพัฒนาเตาชีววมวลโดยใช้หลักการเดียวกันให้สามารถเติมเชื้อเพลิงได้อย่างต่อเนื่อง

เตาชีววมวลเป็นแนวทางหนึ่งในการสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนภายในประเทศ สามารถทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม ผลจากการใช้งานยังส่งผลต่อการลดการเผาไหม้ชุมชนได้อีกทางหนึ่ง เตาชีววมวลเป็นเตาผลิตความร้อนอีกประเภทที่สามารถใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นเชื้อเพลิงได้ ที่ผ่านมามีการนำเอาไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย การเผาไหม้ในการประกอบอาหารค่อนข้างดี ควันมีน้อย และสามารถให้ทดแทนแก๊สหุงต้มสำหรับการใช้งานในระดับครัวเรือน วิสาหกิจแปรรูปอาหาร หรือระดับอุตสาหกรรมได้ เตาชีววมวลนี้ต่างจากเตาชีววมวลทั่วไปคือสามารถป้อนเชื้อเพลิงได้ต่อเนื่อง ใช้งานได้เป็นระยะเวลายาวนาน ตามความต้องการของผู้ใช้งาน

ผู้ประดิษฐ์ได้พัฒนาเตาชีววมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง สามารถคิดไฟได้เป็นระยะเวลานานตามความต้องการอย่างต่อเนื่อง โดยมีพัดลมเติมอากาศเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และใช้สกรูลำเลียงเชื้อเพลิงและมอเตอร์ในการขับเคลื่อนอย่างต่อเนื่อง ทดแทนแรงงาน สามารถใช้ในครัวเรือนขนาดใหญ่หรือในระดับอุตสาหกรรมได้

**2. ทุษฏีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการคำนวณ**

**2.1 เตาชีววมวล**

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากเตาชีววมวล คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงชีววมวลด้วยการจำกัดปริมาณอากาศในระหว่างการทำปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ได้ผลผลิตเป็นแก๊สที่สามารถจุดติดไฟได้ มีขั้นตอนดังนี้ นำชีววมวลใส่เข้าไปในเตาและให้ความร้อน ความชื้นในชีววมวลถูกไล่ออก (Drying) ด้วยอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 100-135°C จากนั้นสารระเหยในชีววมวล เช่น น้ำมันดิน ไฮโดรคาร์บอน น้ำมันควันไม้ สารระเหยอื่นๆ ถูกไล่ออกจากชีววมวล (Devolatilization) ภายใต้อุณหภูมิ 450-600°C เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการเผาไหม้ ถ่านบางส่วน (Fixed Carbon) เกิดการสันดาปจนได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการปลดปล่อยพลังงานความร้อน และ CO<sub>2</sub> ในกระบวนการสุดท้าย ถ่าน (C) จะทำปฏิกิริยากับ CO<sub>2</sub> และไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) ได้ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ปฏิกิริยาทั้งหมดนี้เป็นปฏิกิริยาในขั้นตอนรีดักชัน (Reduction) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 600°C [5]

**2.2 เชื้อเพลิงและการเผาไหม้ [6]**

การเผาไหม้ เป็นปฏิกิริยาเคมีประเภทหนึ่ง ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างสารต่าง ๆ กับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของออกซิเจน (ออกไซด์) ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาเคมีนี้ จะให้ความร้อนออกมา โดยทั่วไปเชื้อเพลิงจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>), ออกซิเจน (O), ซัลเฟอร์ (S), ไนโตรเจน (N), น้ำ H<sub>2</sub>O และ เถ้า

การเผาไหม้จะเกิดดังต่อไปนี้



สำหรับไนโตรเจน สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ แต่เกิดในปริมาณที่น้อยมากคือ ในสัดส่วน ดังนั้น ในแง่การเผาไหม้ ถือว่าไม่เกิดการเผาไหม้ จากสมการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะเห็นว่าไอเสียที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>), น้ำ (H<sub>2</sub>O) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) ใน ทางปฏิบัติอาจเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม่สมบูรณ์ ทำให้สารคาร์บอนในเชื้อเพลิงเกิดเป็นเขม่า ซึ่งเป็นคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นสารประกอบของคาร์บอนที่ยังเผาไหม้ไม่ ล้นสุด ผลผลิตทั้งสองตัวนี้ถือเป็นเชื้อเพลิงส่วนที่เผาไหม้ไม่หมดที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

**2.3 คุณสมบัติชีววมวลสำหรับการทดสอบ [7]**

เชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการทดสอบเตาชีววมวล เป็นวัสดุเชื้อเพลิงชีววมวลเหลือใช้ทางการเกษตร คือ ซังข้าวโพดที่นำมาทดสอบมีความร้อนเฉลี่ย 16.16 MJ/kg มีความหนาแน่นเฉลี่ย 132.6 kg/m<sup>3</sup> และความชื้นไม่เกิน 10%

จากการคำนวณซังข้าวโพด มีอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงตามทฤษฎี อยู่ที่ 5.19 kg<sub>air</sub>/kg<sub>fuel</sub>

**ตารางที่ 1** การวิเคราะห์คุณสมบัติของซังข้าวโพด

คุณสมบัติ	ซังข้าวโพด	
Proximate	VM	69.74
Analysis	FC	12.81
(%)	ASH	5.62
	C	46.39
Ultimate	H	6.05
Analysis	O	40.67
(%)	N	0.50
	S	0.01
	LHV	16.16
	(MJ/kg)	

ที่มา : ธนชาติ มหาวิน. การพัฒนาเตาแก๊สชีววมวลไร้ควันสำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชนโรงฆ่าสัตว์.



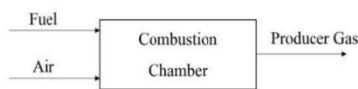
**รูปที่ 1** ซังข้าวโพด

**2.4 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง [8]**

ข้อมูลจากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงสามารถนำมาคำนวณปริมาณออกซิเจนหรืออากาศที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเชื้อเพลิง (ความต้องการอากาศตามทฤษฎี) ได้มวลสารสัมพันธ์เป็นความสัมพันธ์โดยโมล ดังนั้นต้องแปลงหน่วยของข้อมูลการวิเคราะห์ให้อยู่ในรูปของกิโลกรัมโมล ก่อนที่จะนำมาคำนวณปริมาณอากาศที่ต้องการตามทฤษฎี สามารถคำนวณสมดุลระหว่างขาเข้าและขาออกจากระบบได้ ดังนี้

มวลที่เข้าระบบ = มวลที่ออกระบบ

สำหรับกระบวนการเผาไหม้ มวลที่เข้าระบบคือเชื้อเพลิงชีวมวลและอากาศ ซึ่งแก๊สเชื้อเพลิงคือ ชีวมวลขาออก ระบบ ถ้าพิจารณากระบวนการเผาไหม้มีสภาวะคงที่ คือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลา การคำนวณเกี่ยวกับการเผาไหม้ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สมดุลมวลของกระบวนการเผาไหม้

โดยการคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (ทางทฤษฎี) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A/F_{theore} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \quad (1)$$

เมื่อ  $m_{air}$  คือ อัตราการไหลของอากาศ, kg/s  
 $m_{fuel}$  คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง, kg/s

การคำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง (ทางปฏิบัติ) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$A/F_{actual} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} = \frac{\rho_{air} \times A \times V_{air}}{m_{fuel}} \quad (2)$$

เมื่อ  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m<sup>3</sup>  
 $A$  คือ พื้นที่ของอากาศไหลผ่าน, m<sup>2</sup>  
 $V$  คือ ความเร็วลมที่วัดจากพื้นที่ของอากาศ, m/s

การคำนวณหาอัตราส่วนสมมูล [9] (Equivalence Ratio)

$$ER = \frac{A/F_{actual}}{A/F_{theore}} \quad (3)$$

ความหมายของอัตราส่วนสมมูล

ER < 1 หมายความว่าเชื้อเพลิงน้อยหรืออากาศมากเกินไปกว่าค่าพอดี (Fuel-lean mixture)

ER > 1 หมายความว่าเชื้อเพลิงมากเกินไปหรือมีออกซิเจนน้อยเกินไปที่จะออกซิไดซ์เชื้อเพลิงได้หมด (Fuel-rich mixture)

ER = 1 หมายความว่าเชื้อเพลิงพอดีที่จะถูกออกซิไดซ์ โดยออกซิเจนในอากาศได้หมด (Stoichiometry)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง

เชื้อเพลิง	V (m/s)	FC (kg/hr)	A/F ratio
ซึ่งข้าวโพด	3	8	3.96
	4	8	5.29
	5	8	6.61
	6	8	7.93
	7	8	9.26

2.5 การประเมินประสิทธิภาพความร้อน [10]

การทดสอบประสิทธิภาพเตาจะใช้วิธีการทดสอบแบบ Boiling test จากพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำต่อพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยจะใช้ซึ่งข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิง ตามสมการ 4 - 6

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{fuel}} \times 100\% \quad (4)$$

เมื่อ  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตา, %

$Q_{fuel}$  คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง, kJ

$Q_u$  คือ ปริมาณความร้อนที่ใช้ประโยชน์, kJ

ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์ หาได้ความร้อนที่ใช้ในการอุ่นและระเหยน้ำ ดังแสดงในสมการที่ 5

$$Q_u = [m_{w,1} C_{p,w} (T_{w,2} - T_{w,1})] + [m_{w,2} h_{fg}] \quad (5)$$

เมื่อ  $m_{w,1}$  คือ มวลน้ำเริ่มต้น, kg

$m_{w,2}$  คือ มวลน้ำที่ระเหย, kg

$C_{p,w}$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำมีค่า 4.186 kJ/kg °C

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

ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง หาได้ตามสมการ 6

$$Q_{fuel} = m_{fuel} \times LHV \quad (6)$$

เมื่อ  $m_{fuel}$  คือ มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมด, kg

$LHV$  คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง ซึ่งข้าวโพด 14,260 kJ/kg

2.6 อัตราการสิ้นเปลืองชีวมวล [11]

อัตราการสิ้นเปลืองชีวมวลหมายถึงปริมาณชีวมวลที่ใช้ต่อระยะเวลาในการใช้งานเตาของแก๊สชีวมวล ใช้บ่งบอกถึงภาวะปริมาณการใช้ชีวมวล หาได้จากสมการที่ 7

$$FC = \frac{m}{t} \quad (7)$$

เมื่อ FC คือ อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง, kg/h

$m$  คือ มวลเชื้อเพลิงชีวมวล, kg



t คือ ระยะเวลาการใช้งานเตาแก๊สชีวมวล, h

อัตราการผลิตพลังงานเฉพาะคือค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตกำลังงาน มีประโยชน์ในด้านการวิเคราะห์สมรรถนะเตาชีวมวลที่ได้จากสมการที่ 8

$$SEC = \frac{E}{Q_U} \quad (8)$$

เมื่อ SEC คือ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานเฉพาะ, kJ/kWh

E คือ อัตราการใช้พลังงาน, kJ/h

$Q_U$  คือ พลังงานที่เตาแก๊สชีวมวลผลิตได้, kW

### 3. วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

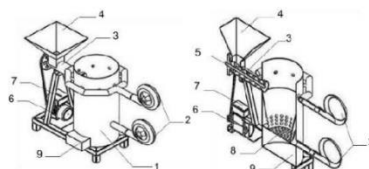
ตารางที่ 3 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะ	เครื่องมือวัด
ศึกษาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง	- ใช้พัดลมในการป้อนอากาศขนาด 2 นิ้ว 220 V กำลังไฟฟ้า 93 W จะใช้ท่อพีวีซีขนาด 2 นิ้ว ต่อร่วมกับหน้าแปลน (จำนวน 2 ตัว) - วัดอัตราการไหลและอัตราการป้อนอากาศเข้าสู่เตา ใช้เครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด Lutron electronic รุ่น YK-80 AM แบบใบพัดโลหะ การวัดใช้ท่อพีวีซี 2 นิ้ว ต่อร่วมกับหน้าแปลนพีวีซี 2 ชิ้น วางเครื่องวัดอัตราการไหลตรงกลางและประกอบเข้ากับท่อป้อนอากาศ
การป้อนเชื้อเพลิง	- ปั่นทีละเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาที่ชื่อ FBT รุ่น NoJS-307 - ใช้มอเตอร์ขนาดกำลังของมอเตอร์ 0.75 kW หรือ 1 hp ต่อเข้ากับชุดเกียร์ทดรอบที่อัตราทด 1:10 เพื่อขับสกรูในการป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง - ความเร็วรอบควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์รุ่น MITSUBISHI D700 ขนาด 4.2 A
วัดอุณหภูมิ	- เทอร์โมคัปเปิล ยี่ห้อ SPL รุ่น T_S/119 ทำการวัดอุณหภูมิ - ใช้ Data logger รุ่น TM-947SD มีช่องบันทึกสูงสุด 4 ช่องเพื่อเก็บข้อมูล
ชั่งน้ำหนัก	- ภาชนะสำหรับใส่น้ำในการทดสอบ WBT เป็นกระโถย ขนาดเบอร์ 33 - มีการชั่งน้ำหนักของเชื้อเพลิงและน้ำ โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ Desktop ยี่ห้อ CST รุ่น CDR-30

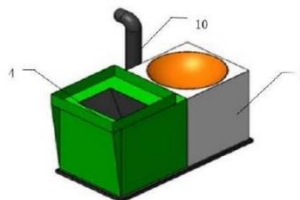
	พิกัด 30 กิโลกรัม ความละเอียด 1 กรัม
--	--------------------------------------

#### 3.2 วิธีการทดลอง

เตาชีวมวลเป็นเตารูปทรงกระบอกขนาดความสูง 80 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร หลักการทำงานของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงอย่างต่อเนื่อง ใช้หลักการเผาไหม้โดยตรง ซึ่งเป็นกระบวนการที่เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจน แล้วให้พลังงานความร้อนออกมา เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ห้องเผาไหม้ ชุดเติมอากาศจะทำการเติมอากาศไปตามช่องลมเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ในการเติมอากาศจะที่ตัวยก 2 จุด คือ จุดแรกช่อง primary air และจุดสองที่ช่อง secondary air ตั้งอยู่ที่ 5 จากระดับเกลียวลำเลียงเชื้อเพลิง ซึ่งอยู่ภายในรางลำเลียงควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ จะทำการขนถ่ายเชื้อเพลิงไปยังห้องเผาไหม้อย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเสร็จสิ้นการทำงาน บริเวณด้านล่างของห้องเผาไหม้มีชุดแตรงสำหรับระบายไอน้ำ เตาชีวมวลนี้ได้มีการทดสอบโดยใช้ซึ่งข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้

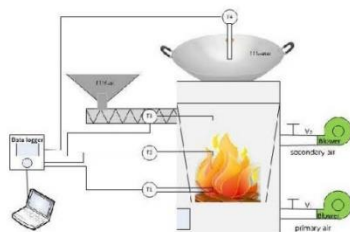


รูปที่ 3 ลักษณะด้านในของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

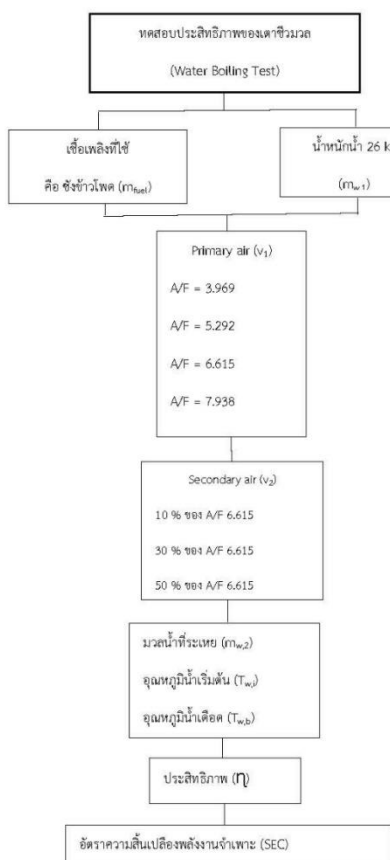


รูปที่ 4 ลักษณะด้านนอกของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

1. ตัวเตาชีวมวล
2. ชุดเติมอากาศ
3. ชุดลำเลียงเชื้อเพลิง
4. ช่องใส่เชื้อเพลิง
5. เกลียวและรางลำเลียง
6. มอเตอร์
7. อุปกรณ์ควบคุมการปรับเปลี่ยนความเร็วรอบ
8. ตะแกรงระบายไอน้ำ
9. ช่องระบายไอน้ำออก
10. ปล่องควัน



รูปที่ 5 โดอะแกรมการทดลองเตาชีวมวล



รูปที่ 6 โดอะแกรมแสดงการทดลองเตาชีวมวล

การทดสอบเตาชีวมวลจะทดสอบแบบวิธีการต้มน้ำเดือด (water boiling test, WBT) จากรูปที่ 6 เป็นการทดสอบที่วัดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการทำน้ำให้เดือดตามเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อหาประสิทธิภาพและอัตราการป้อนอากาศที่เหมาะสมดังนี้

- 1) เชื้อเพลิงที่ใช้ทดสอบ คือ ชิงข้าวโพด
- 2) อัตราการป้อนชิงข้าวโพด 8 kg
- 3) น้ำหนักน้ำเริ่มต้น 26 kg
- 4) ป้อนอากาศช่อง primary air อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ 3.969, 5.292, 6.615, 7.938 และ 9.261 kg<sub>air</sub>/kg<sub>fuel</sub>
- 5) ป้อนอากาศช่อง secondary air คิดเป็น 10, 30, 50 % ของ A/F 6.615

ในการทดสอบเตาแก๊สชีวมวลแบบป้อนต่อเนื่อง จะเริ่มต้นด้วยการป้อนเชื้อเพลิงในเตาชีวมวล จากนั้นเริ่มจุดไฟในเตาชีวมวล เตาชีวมวลแบบป้อนต่อเนื่องจะติดไฟจากด้านล่างเตา จากนั้นเปิดพัดลมป้อนอากาศเข้าสู่เตา ปรับอัตราการไหลอากาศป้อนเข้าสู่เตา เมื่อเตาชีวมวลเริ่มติดไฟแล้วนำน้ำเข้ามาทดสอบการต้มน้ำ เริ่มจับเวลาและวัดอุณหภูมิน้ำ โดยทำการบันทึกค่าทุกๆ 5 min ตลอดจนเชื้อเพลิงเผาไหม้หมด จากนั้นชั่งน้ำหนักของน้ำในภาชนะที่เหลือ ค่าที่ได้ทั้งหมดถูกนำไปใช้ในการคำนวณ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนจากความสัมพัทธ์ในสมการที่ 4



รูปที่ 7 เตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง

**4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล**

การทดสอบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องนี้จะทดสอบแบบวิธีการต้มน้ำเดือด (water boiling test, WBT) ที่มีรูปแบบการควบคุมอากาศโดยช่อง primary air และมีการป้อนของอากาศจุดสองที่ช่อง secondary air ได้ทำการทดสอบและเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบต้มเดือดดังตารางที่ 4

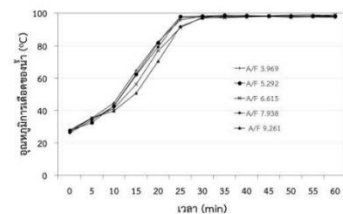
ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการป้อนอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพเตาชีวมวล

พหุคูณ A/F	อุณหภูมิ (°C)		ระยะเวลา เดือด (min)	มวลน้ำ (kg)			น้ำหนัก เชื้อเพลิง (kg/h)	η (%)	SRC (MJ/AWh)	
	เริ่มต้น	น้ำเดือด		เริ่มต้น	สุดท้าย	รวม				
ป้อนอากาศคือ Primary air										
	3.96	28.0	99.3	26.00	26	14.68	11.33	8	29.21	12.33
	5.29	27.7	98.6	25.15	26	10.73	15.27	8	36.97	9.74
	6.61	27.1	99.3	23.32	26	9.90	16.10	8	38.74	9.29
	7.93	26.2	98.6	24.29	26	11.39	14.61	8	35.81	10.05
	9.26	27.2	98.8	24.34	26	10.90	15.11	8	36.72	9.81
ป้อนอากาศคือ secondary air คิดเป็น 10, 30, 50 % ของ A/F 6.615										
	10%	28.7	98.6	23.40	26	8.95	17.05	8	40.41	8.91
	30%	27.4	98.4	23.05	26	8.81	17.19	8	40.78	8.83
	50%	26.6	98.7	23.25	26	9.63	16.37	8	39.26	9.17

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการป้อนอากาศเข้าสู่ตัวเตาจะใช้เชื้อเพลิงในปริมาณเท่ากัน โดยมีการป้อนอากาศ primary air และ secondary air ซึ่งพบว่าการป้อนอากาศ 2 จุดทำให้มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยของการใช้เตาสูงกว่าการป้อนอากาศที่ primary air เพียงจุดเดียว

4.1 ผลของอัตราการป้อนอากาศที่ primary air ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวล

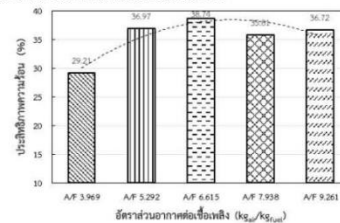
รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิการเดือดของน้ำ พบว่าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นประมาณ 27 °C ถึง 98 °C ใช้เวลาประมาณ 25 นาที และอุณหภูมิคงที่ต่อเนื่องประมาณ 98 °C นอกจากนี้ยังพบว่าที่ A/F 6.615 มีอุณหภูมิน้ำถึงจุดเดือดเร็วกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ โดยใช้เวลาประมาณ 23 นาที



รูปที่ 8 แสดงอุณหภูมิของน้ำ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.969, 5.292, 6.615, 7.938 และ 9.261 kg<sub>air</sub>/kg<sub>fuel</sub>

รูปที่ 9 แสดงประสิทธิภาพความร้อนเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่อง โดยใช้ซึ่งข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงพบว่าการปรับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ A/F 6.615 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 38.74 % ถัดมาเป็นอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ A/F 5.292 ให้ประสิทธิภาพความร้อน 36.97 % และ

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ A/F 3.969 ให้ประสิทธิภาพความร้อนน้อยสุด 29.21 % จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงมากกว่าหรือเท่ากับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางฤษฎี ประสิทธิภาพทางความร้อนก็เพิ่มขึ้นด้วย



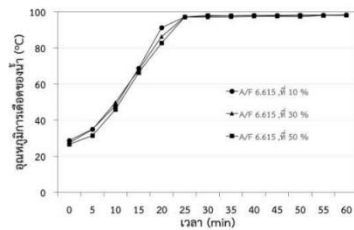
รูปที่ 9 แสดงอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาชีวมวล

4.2 ผลของอัตราการป้อนอากาศที่ secondary air โดยคิดเป็น 10, 30 และ 50 % ของ primary air ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวล

จากการทดสอบประสิทธิภาพในช่วงต้นดังรูป 9 พบว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ A/F 6.615 ให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงสุด ดังนั้นจึงทำการทดสอบการป้อนอากาศจุดที่สองที่ของ secondary air คิดเป็น 10, 30, 50 % ของ A/F 6.615

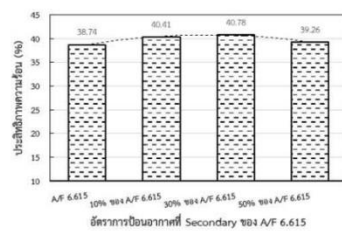
รูปที่ 10 แสดงอุณหภูมิการเดือดของน้ำ ณ อัตราการป้อนอากาศที่ของ secondary air คิดเป็น 10, 30, 50 % ของ A/F 6.615 พบว่าอุณหภูมิมีเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว จากอุณหภูมิน้ำเริ่มต้นประมาณ 28 °C ถึง 99 °C ใช้เวลาประมาณ 25 นาที และอุณหภูมิคงที่ต่อเนื่องประมาณ 99 °C นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราการป้อนอากาศที่ของ secondary air คิดเป็น 10 % ของ A/F

6.615 มีอุณหภูมิถึงจุดเดือดเร็วกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ โดยใช้เวลาประมาณ 20 นาที ทั้งนี้มีสาเหตุเกิดจากอัตราส่วนผสมของอากาศกับซึ่งข้าวโพดในสภาวะนั้นมีความเหมาะสม ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้เกิดสูงสุด



รูปที่ 10 แสดงอุณหภูมิของน้ำ ณ อัตราการป้อนอากาศที่ของ secondary air คิดเป็น 10, 30, 50 % ของ A/F 6.615

รูปที่ 11 แสดงถึงประสิทธิภาพความร้อนที่อัตราการป้อนอากาศที่ของ secondary air จากการทดสอบพบว่า การป้อนอากาศที่ของ secondary air ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากเดิม 4.41-6.52 % และจะเห็นได้ว่า ที่การป้อนอากาศ secondary air คิดเป็น 50 % ของ A/F 6.615 มีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 40.78 %

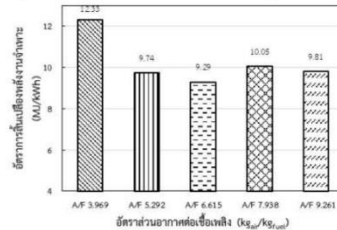


รูปที่ 11 อัตราการป้อนอากาศที่ของ secondary air คิดเป็น 10, 20, 30 % ของ A/F 6.615 ต่อประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาชีวมวล

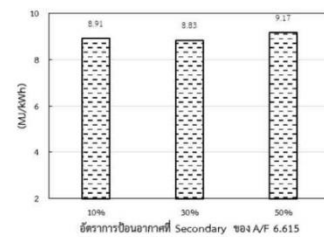
4.3 การวิเคราะห์อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

รูปที่ 12 และ รูปที่ 13 แสดงอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของเตาชีวมวล ทั้ง 2 เจริญไซ พบว่าการใช้เตาชีวมวลในเงื่อนไขที่ 2 ที่อัตราการป้อนอากาศที่ของ secondary air คิดเป็น 10, 30, 50 % ของ A/F 6.615 ดังรูปที่ 12 ให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำกว่าที่อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง 3.969, 5.292, 6.615, 7.938 และ 9.261  $kg_{air}/kg_{fuel}$  โดยเกิดขึ้นทุกๆ ค่าของการปรับอัตราการป้อนอากาศ เหตุผลการให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำเกิดจากเตาแก๊สชีวมวลมีการใช้ปริมาณเชื้อเพลิงที่ต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณความร้อนที่เตาผลิตได้ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณน้ำที่หายไปและอุณหภูมิน้ำที่เดือด โดยความ

ร้อนที่ผลิตได้เป็นผลมาจากความร้อนที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิงและความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ที่เป็นลักษณะแบบเผาตรง [12] การป้อนปริมาณอากาศที่ต่ำและสูงเกินไปส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมีค่าต่ำ [13] และบางครั้งความร้อนบางส่วนจะหลุดออกจากเตาเมื่อป้อนอากาศในปริมาณที่สูง



อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ที่อัตราส่วนอากาศต่อลิ่ง 3.969, 5.292, 6.615, 7.938 และ 9.261  $kg_{air}/kg_{fuel}$



รูปที่ 13 อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ ที่อัตราการป้อนอากาศที่ของ secondary air คิดเป็น 10, 30, 50 % ของ A/F 6.615

5. สรุปผลการทดลอง

จากตารางที่ 5 การทดสอบเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องใช้ซึ่งข้าวโพดเป็นเชื้อเพลิงให้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 8 kg/h พบว่า ที่ A/F 6.615 มีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 38.74 % เมื่อทำการป้อนอากาศที่ของ secondary air พบว่าที่ 30 % ของ A/F 6.615 มีประสิทธิภาพสูงสุด เท่ากับ 40.77% สรุปคือ ผลการเปรียบเทียบการใช้งานเตาที่มีการป้อนอากาศเข้าสู่เตา พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาที่มีการป้อนอากาศ 2 จุด คือจุดแรกของ primary air และจุดสองที่ของ secondary air ทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นประมาณ 5.27 % จากการป้อนอากาศจุดเดียว เนื่องจาก A/F 6.615 ประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งมี Equivalence Ratio เท่ากับ 1.27 สามารถผลิตความร้อนได้ 12.80 kW เป็นรูปแบบการเผาไหม้โดยตรงซึ่งสามารถให้ประสิทธิภาพสูงกว่าแก๊สซิฟิเคชัน

ตารางที่ 5 สรุปผลการศึกษาก๊าซอากาศที่มีผลต่อประสิทธิภาพเตาชีวมวล

อัตราส่วน อากาศต่อ เชื้อเพลิง (A/F) (kg <sub>air</sub> /kg <sub>fuel</sub> )	ความเร็วลม(v) (m/s)		ประสิทธิภาพ ( $\eta$ ) (%)
	primary air (v <sub>1</sub> )	secondary air (v <sub>2</sub> )	
3.969	3	-	29.21
5.292	4	-	36.97
6.615	5	-	38.74
7.938	6	-	35.81
9.261	7	-	36.72
ป้อนอากาศของ secondary air คิดเป็น 10, 30, 50 % ของ A/F 6.615			
10 % ของ A/F 6.615	5	0.5	40.41
30 % ของ A/F 6.615	5	1.5	40.77
50 % ของ A/F 6.615	5	2.5	39.27

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจาก  
ขอขอบพระคุณ “ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา  
จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2561”  
ขอขอบพระคุณ “โครงการผลิต และพัฒนาศักยภาพ  
บัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียนในระดับ  
บัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้”

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษและวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัย  
แม่โจ้. (2559). เทคโนโลยีระบบลดหมอกควันโดยการแปรรูป  
ผลิตภัณฑ์เหลือใช้ทางการเกษตรเป็นพลังงานทดแทนให้กับชุมชน.  
วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้. เชียงใหม่.
- [2] ธนาพล ตันคัลลิตกุล สุริยา พงษ์เกษม ปรีชญ์ปวีณ ภูญาภา  
นุวัฒน์ ไม้บ้านกวย (2558) พลังงานทดแทนชุมชนจากเชื้อเพลิงชีว  
มวลอัดแห้งจากทามะพร้าว วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
ฉบับที่ 3 หน้า 418-431
- [3] วราภรณ์ ทุมชาติ (2557) การผลิตโปรตีนเคอร์นัทจากเตาแบบ  
Inverted Downdraft โดยใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง วารสารวิชาการ  
คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ฉบับที่  
1 หน้า 26-39
- [4] Belonio, A.T. (2005), Rice Husk Gas Stove Handbook,  
Appropriate Technology Center. Department of  
Agricultural Engineering and Environmental Management,  
College of Agriculture, Central Philippine University.

[5] เยาวจิร อัจฉกุล. เทคโนโลยีพลังงานจากชีวมวลแบบ Three  
Stage Gasifier, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา :  
[http://www.dede.go.th/dede/images/stories/KM\\_boer/three\\_stage.pdf](http://www.dede.go.th/dede/images/stories/KM_boer/three_stage.pdf), เข้าดูเมื่อวันที่ 26/04/2561.

[6] ประพันธ์ รักนิเทศ. การเผาไหม้อย่างมีประสิทธิภาพ. [ระบบ  
ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.mdboilers.com>. เข้าดูเมื่อ  
วันที่ 26/04/2561.

[7] ธนชาติ มหาวิน. (2560). การพัฒนาเตาชีวมวลไร้ควัน  
สำหรับการผลิตความร้อนในวิสาหกิจชุมชนโรงผ้าสัตรี. ปรียญา  
วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[8] จิรพัทธ์ ชูโชติถาวร. 2556. การวิเคราะห์พลังงานและ  
เศรษฐศาสตร์ของการผลิตความร้อนจากถ่านเป็ยร์ปากของ 1  
ตัวกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร  
มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมพลังงาน. บัณฑิตวิทยาลัย.  
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[9] บุญส่ง เหมวัฒน์. ปริมาณสัมพันธของการเผาไหม้. [ระบบ  
ออนไลน์], แหล่งที่มา <http://mte.kmutt.ac.th/elearning>, เข้าดู  
เมื่อวันที่ 26/04/2561.

[10] สุทิน ธีระประเสริฐศรี และ สุเทพ บุครดี. 2557. การศึกษา  
สภาวะเหมาะสมสำหรับ การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากขยะหลุมฝัง  
กลบโดยผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน. วารสารวิศวกรรมศาสตร์.  
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 9(1): 16-27.

[11] D.K. Vyas, T. Dipak, M. Viral, S.H. Akbari, (2014), Design  
and Development of Inverted Down Draft Gasifier for  
Cooking Purpose, Scholars Journal of Engineering and  
Technology 2014; 2(2A):113-122

[12] ฐิติกร บุญชูวงศ์, รัตนชัย โพธิ์รินทร์, ศิริชัย เทพา และศิริบุษ  
จินดารักษ์ (2552) การศึกษาการผลิต Produce gas จากเตาผลิต  
ก๊าซแบบ Updraft โดยใช้เศษผักและแกลบเป็นเชื้อเพลิง, การ  
ประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5,  
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ จังหวัดพิษณุโลก

[13] small red tile, Isaac Lockman, Marc Pare, Jordan  
Edwards (2010), Design of a Rice Husk Gasification Cook  
Stove for Rural Nicaragua, Handbook, Georgia Institute of  
Technology

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นางสาววิลาวัลย์ คุ่มเหม  
เกิดเมื่อ 5 สิงหาคม 2537  
ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2554 ระดับมัธยมศึกษา  
โรงเรียนเขาทราชัยทับคล้อพิทยา จังหวัดพิจิตร  
พ.ศ. 2559 ระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

