



วิทยานิพนธ์

การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงสำหรับ
กระบวนการอบแห้งปุ๋ย

**Design and Testing of a Downdraft Gasifier for Fertilizer Drying
Process**

นายรัตนะ เลहनิช

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. ๒๕๕๐



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล สาขา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา ภาควิชา

เรื่อง การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงสำหรับ
กระบวนการอบแห้งปุ๋ย

Design and Testing of a Downdraft Gasifier for Fertilizer Drying Process

นามผู้วิจัย นายรัตนะ เลहनิช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ *วิไล สว่างโคสสิน*

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิวะโกศลสิน, Ph.D.)

กรรมการ *Abh Opa*

(รองศาสตราจารย์เกียรติไกร อายุวัฒน์, วศ.ม.)

กรรมการ *W*

(รองศาสตราจารย์รังรัตน์ มั่งเจริญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา *W*

(อาจารย์พิชัย กฤษไมตรี, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

..... *Abh Opa*

(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 30 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2550

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงสำหรับกระบวนการอบแห้งปุ๋ย

Design and Testing of a Downdraft Gasifier for Fertilizer Drying Process

โดย

นายรัตนะ เลहनิก

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

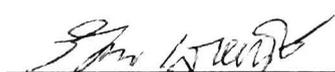
พ.ศ. 2550

รัตนะ เลहनิช 2550: การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงสำหรับ
กระบวนการอบแห้งปุ๋ย ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ประชานกรรมการที่ปรึกษา:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิวะโกศิษฐ, Ph.D. 82 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แสดงถึงการออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซเพื่อใช้แทนเตาฟืนใน
กระบวนการอบปุ๋ย ผลจากงานวิจัย แสดงให้เห็นว่าการใช้เตาผลิตก๊าซชีววมวล มีศักยภาพในการ
ลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการอบปุ๋ยได้ถึง 45.7% เมื่อเทียบกับเตาฟืนและผลิตภัณฑ์ที่
ได้จากการอบ มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาฟืน

จากผลการวิจัยพบว่าเตาผลิตก๊าซชีววมวลมีประสิทธิภาพทางความร้อนประมาณ 76.24 %
– 86.93 % โดยก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้มีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 770.66 – 878.74 kW มี
อัตราการใช้เชื้อเพลิง 130 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ในเชิงเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการใช้เตาเผาชีววมวลจะให้มูลค่า
ปัจจุบันสุทธิเป็นบวก และมีระยะเวลาในการคืนทุนประมาณ 120 วันทำงาน



ลายมือชื่อนิสิต



ลายมือชื่อประธานกรรมการ

Rattana Lehanich 2007: Design and Testing of a Downdraft Gasifier for Fertilizer Drying Process. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Wichai Siwakosit, Ph.D. 82 pages.

The design and testing of a Gasifier to replace a conventional furnace for drying of organic fertilizer is shown in this thesis. The outcomes of this research suggest that a utilization of a gasifier has a potential of 57 % reduction of fuel quantity compared to that of a conventional furnace. In addition, a fertilizer quality is also improved.

The results has indicated that a gasifier yields 76.24 % – 86.93 % thermal efficiency approximately while giving a producer gas with 770.66 – 878.74 kW heating rate. The wood consumption rate is approximately 130 kg/hr.

Economic analysis of the operation of a gasifier indicates a positive net present value and a payback period of approximately 120 working days.

Rattana Lehanich

Student's signature

Wichai Siwakosit

Thesis Advisor's signature

24, May, 2007

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ศิวะโกศิษฐ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนวิทยานิพนธ์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษา แนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ และขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เกียรติไกรอายุวัฒน์ กรรมการที่ปรึกษาวิชาเอก รองศาสตราจารย์ ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ กรรมการที่ปรึกษา วิชาการ และรองศาสตราจารย์ ศันสนีย์ สุภาภา ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุญาติทุนวิจัยจากโครงการวิจัยทุนอุดหนุนวิจัย มก.รหัส ส-ข (วศ) 33-47 เพื่อสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ คุณอรธฤทธิ รื่นเรใจ แห่งศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือ ในการเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวล และขอขอบพระคุณ ศูนย์ปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสนที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลองเตาผลิตก๊าซชีววมวล

ขอขอบพระคุณ บริษัท ศักดิ์สยาม อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการติดตั้งเตาผลิตก๊าซชีววมวล ในกระบวนการอบปุ๋ย เพื่อทดลองและหาผลเปรียบเทียบปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

ขอขอบพระคุณ คุณแม่ พี่สาวและพี่ชาย รวมไปถึงญาติๆ และเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือและกำลังใจ ชี้นะและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รัตนะ เลहनิช

เมษายน 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
สถานะการป้อน	4
กระบวนการผลิตป้อน	5
พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	9
การแปรรูปเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงาน	11
เทคโนโลยีของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	14
ชนิดของเครื่องผลิตก๊าซชีวมวล	21
หลักการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง	26
การหาค่าปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบป้อน	28
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	38
ผลการศึกษาและวิจารณ์	39
การหาค่าปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบป้อน	39
การหาค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการอบป้อน	40
การออกแบบ สร้างและทดสอบเตาผลิตก๊าซเพื่อใช้ในกระบวนการอบป้อน	41
เปรียบเทียบผลการใช้งานจริงระหว่างเตาเผาแบบเดิมกับเตาผลิตก๊าซ	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
สรุปผลการศึกษา	58
ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	60
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	63
ภาคผนวก ข ขนาดของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง	76

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ความต้องการปุ๋ยไนโตรเจนของโลก	4
2	องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซ จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลจากไม้	18
3	ตารางแสดงผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศเพียงพอ	42
4	อัตราการไหลของอากาศที่ ϕ ต่างๆ	43
5	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเตาผลิตก๊าซ	44
6	การเปรียบเทียบก่อนและหลังการออกแบบ	54
7	การเปรียบเทียบระหว่างเตาเผาแบบเดิมและเตาผลิตก๊าซ	55
8	ค่าเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้และระยะเวลาในการคืนทุนต่อหนึ่งเตา	56
ตารางผนวกที่		
ก1	อุณหภูมิน้ำจากการทดลอง	67
ก2	ตารางการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ	75

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงการลุกลามของเปลวไฟที่ล้นออกจากเตาเผา	2
2	เปลวไฟที่ลามออกมานอกเตาทำให้สูญเสียพลังงาน	2
3	ขั้นตอนกระบวนการผลิตปุ๋ย	5
4	จานปั่นปุ๋ย	6
5	ลักษณะของท่ออบปุ๋ย	7
6	ลักษณะของแผ่นเหล็กที่วางเรียงตัวกันภายในท่ออบปุ๋ย	7
7	ลักษณะภายในของเตาเผาไม้ฟืน	8
8	ลักษณะภายนอกของเตาเผาไม้ฟืน	9
9	ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลขึ้น	22
10	ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง	23
11	ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลตัดขวาง	24
12	ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบฟลูอิดไคซ์เบด	25
13	ประเภทของคอกขวดภายในเตาผลิตก๊าซ	28
14	แสดงส่วนประกอบภายนอกของบอมบ์แคลอริมิเตอร์	32
15	ค่าความแตกต่างของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด	33
16	ลักษณะการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด	33
17	เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้	34
18	ลักษณะของเป่าลมชนิด วอร์เท็กซ์ (vortex blower)	35
19	ลักษณะอุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)	36
20	อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดออริฟิส (orifice)	37
21	กราฟแสดงปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ได้ที่ ϕ ต่างๆ	41
22	ลักษณะภายนอกของเตาผลิตก๊าซชีววมวล	45
23	ลักษณะภายในและการไหลของอากาศภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวล	45
24	ลักษณะภายนอกของเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ติดตั้งถังบรรจุเชื้อเพลิงแล้ว	46

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	ขั้นตอนในการสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวล	47
26	ลักษณะการติดตั้งและเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวลในกระบวนการผลิตจริง	47
27	ลักษณะอุณหภูมิในเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่สูงขึ้นเนื่องจากปริมาณอากาศมากเกินไป	48
28	ลักษณะภายในของเตาที่เพิ่มตระแกรงเข้าไปแล้ว	49
29	เกิดเปลวไฟลุกไหม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวลจนลามไปถึงท่อทางออกของก๊าซ	50
30	แสดงการติดตั้งของสกรูและการรองรับไม้ของตระแกรงที่ใส่เข้าไป	50
31	ลักษณะภายในเตาเมื่อนำสกรูออก	51
32	แสดงการกระทุ้งไม้ฟืนเพื่อให้ไม้ฟืนทรุดตัวลง	51
33	เปรียบเทียบเม็คปุ๋ยที่ผ่านการอบจากเตาสองแบบ	52
34	กราฟแสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่อัตราดอกเบี้ย 1- 15 %	56
ภาคผนวกที่		
ก1	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของน้ำในถังแคลอริมิเตอร์จากการทดลองครั้งที่ 1	68
ก2	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของน้ำในถังแคลอริมิเตอร์จากการทดลองครั้งที่ 2	68
ก3	กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของน้ำในถังแคลอริมิเตอร์จากการทดลองครั้งที่ 3	69
ข1	ลักษณะตัวเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง	77
ข2	รายละเอียดขนาดของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง	78
ข3	ลักษณะของถังบรรจุขี้เถ้าและถ่าน	79
ข4	รายละเอียดขนาดของถังบรรจุขี้เถ้าและถ่าน	80
ข5	ลักษณะของถังบรรจุไม้ฟืน	81
ข6	รายละเอียดขนาดของถังบรรจุไม้ฟืน	82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

B	=	ฮาร์ทโทโหลด (Hearth load : m^3/cm^2-hr)
\dot{Q}	=	อัตราการความร้อนที่ถ่ายเทสู่วัตถุ (kW)
\dot{m}	=	อัตราการมวลวัตถุ (kg/s)
c	=	ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ (kJ/kg-K)
ΔT	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป (K)
L	=	ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอของน้ำ (kJ/kg)
Q_{conv}	=	อัตราการความร้อนที่สูญเสียจากการพาความร้อนออกจากท่ออบปฏึก (W)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่ออบปฏึก (m)
L_{cyl}	=	ความยาวท่ออบปฏึก (m)
$(h_m)_{cyl}$	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในท่อทรงกระบอก (w/m^2-K)
T_w	=	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในท่ออบปฏึก (K)
T_∞	=	ค่าอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกโดยรอบเตา (K)
T_f	=	ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในและภายนอกโดยรอบเตา (K)
Gr	=	เลขกราชอฟ (Grashof Number)
g	=	ค่าความเร่งโน้มถ่วงมีค่า $9.81 m/s^2$
β	=	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวมีค่า $\frac{1}{T_f}$ (K^{-1})
ν	=	ค่าความหนืดคินแมติก (m^2/s)
Ra	=	เลขเรย์ลี (Rayleigh Number)
Pr	=	เลขเพรนต์เทิล (Prandtl Number)
Nu	=	เลขนัสเซิล (Nusselt Number)
k	=	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m-K$)
\dot{Q}_{air}	=	อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)
K_0	=	สัมประสิทธิ์การไหลของอากาศ
A	=	พื้นที่ที่คอคอดภายในมีค่า (cm^2)
Δp	=	ผลต่างความดันทั้งสองด้าน (N/m^2)
ρ_{air}	=	ค่าความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ρ_{water}	=	ค่าความหนาแน่นของน้ำ (kg/m^3)
η_{the}	=	ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตก๊าซชีวมวล (%)

$$\begin{aligned} \dot{m}_{gas} &= \text{อัตราการไหลโดยมวลของก๊าซมีค่า (kg/s)} \\ \dot{m}_{wood} &= \text{อัตราการไหลโดยมวลของเชื้อเพลิงมีค่า (kg/s)} \\ HV_{gas} &= \text{ค่าความร้อนของก๊าซมีค่า (kJ/kg)} \\ HV_{wood} &= \text{ค่าความร้อนของไม้เชื้อเพลิงมีค่า (kJ/kg)} \end{aligned}$$

การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซแบบไหลลงสำหรับกระบวนการอบแห้งปุ๋ย

Design and Testing of a Downdraft Gasifier for Fertilizer Drying Process

คำนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีทรัพยากรที่อุดมสมบูรณ์ พื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศจึงเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ปริมาณการใช้ปุ๋ยในการเกษตรจึงมีปริมาณที่มากตามความต้องการของเกษตรกร ซึ่งทำให้เกิดการตั้งโรงงานผสมปุ๋ยภายในประเทศเป็นจำนวนมาก มีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ โดยแต่ละโรงงานจะมีกระบวนการในการผลิตปุ๋ยที่คล้ายคลึงกัน โดยขึ้นอยู่กับขนาดของโรงงานว่ามีกำลังการผลิตมากน้อยแค่ไหน

ในการผสมปุ๋ยอินทรีย์ชนิดเม็ดในโรงงานผสมปุ๋ยขนาดเล็กในประเทศไทย ได้มีการใช้เตาอบแบบหมุน (rotary kiln) เพื่ออบเนื้อปุ๋ยที่ผ่านการผสมแล้วให้มีความชื้นอยู่ในช่วง ร้อยละ 3 ถึง 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้เนื้อปุ๋ยที่ผสมแล้วไม่จับตัวกันเป็นก้อนเหมาะในการเก็บ และการนำไปใช้ (มุกดา, 2543) จากการสำรวจการใช้พลังงานในการอบปุ๋ยขั้นต้นของ บริษัท ศักดิ์สยามอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด พบว่าทางโรงงานใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงในการอบปุ๋ยประมาณวันละ 17,000 กิโลกรัม โดยการเผาไม้ยางพาราแล้วนำความร้อนที่ได้ไปใช้ในการอบปุ๋ยโดยตรง (direct heat) ซึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงในส่วนนี้มาก เนื่องจากมีการสูญเสียในส่วนต่างๆ ซึ่งในสภาวะปัจจุบันที่ไม้ยางพาราหายากขึ้น และมีราคาสูงขึ้นจาก 750-850 บาทต่อตัน เป็น 950-1,100 บาทต่อตัน และยังมีแนวโน้มที่ราคาจะสูงขึ้นอีกในอนาคต เนื่องจากราคาขี้เถ้าที่ได้จากต้นมีราคาที่สูงขึ้นและเศษไม้ยางพารายังนำไปทำ MFD (medium density fiberboard) เพื่อไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์นิเจอร์ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของไม้ยางพาราให้มากกว่าการขายเป็นไม้ฟืน

เตาเผาไม้ฟืนที่ใช้ภายใน บริษัท สักดีสยามอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด จะมีการสูญเสียพลังงานเปลวไฟที่ลุกไหม้ออกมาภายนอกเตาเผาทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการอบแห้งปุยดังภาพที่ 1 และ 2



ภาพที่ 1 แสดงการลุกไหม้ของเปลวไฟที่สิ้นออกจากเตาเผา



ภาพที่ 2 เปลวไฟที่ลามออกมานอกเตาทำให้สูญเสียพลังงาน

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น หากมีการศึกษาเทคโนโลยีใหม่ที่จะช่วยลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงโดยที่คงประสิทธิภาพในการผลิตเท่าเดิมได้ จะทำให้ปัญหาในเรื่องของเชื้อเพลิงในการอบปฏึ่งเป็นส่วนที่สิ้นเปลืองพลังงานมากที่สุดในโรงงาน (Mujumdar, 1987) ลดลงได้

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลมาใช้ทดแทนเตาเผาพื้นแบบห้องเดี่ยวที่ใช้ในโรงงานผสมปุ๋ยที่มีกำลังการผลิต 300 ตันต่อวัน
2. เพื่อทดสอบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแทนเตาเผาเดิมในการผลิตจริงภายในบริษัท ศักดิ์สยามอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
3. เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานก่อนและหลังการปรับปรุงเพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน

3. ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาเทคโนโลยีเตาผลิตก๊าซชีววมวลแต่ละชนิด
2. ออกแบบและสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่เหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการอบแห้งปุ๋ย
3. พิจารณาระยะเวลาในการคืนทุนและมูลค่าปัจจุบันสุทธิในการใช้เตาผลิตก๊าซชีววมวลแทนเตาเผาพื้นแบบเดิม

การตรวจเอกสาร

สถานะการปุ๋ย

ปุ๋ยเป็นปัจจัยการผลิตทางการเกษตรที่สำคัญปัจจัยหนึ่ง ซึ่งมีแนวโน้มความต้องการใช้เพิ่มมากขึ้นทุกปี ดังจะเห็นจากปริมาณความต้องการใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นจาก 3.75 ล้านตันในปี พ.ศ. 2544 เป็น 4.10 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2547 ปริมาณการนำเข้าปุ๋ยเคมีเพิ่มขึ้นจาก 3.39 ล้านตันในปี พ.ศ. 2544 เป็น 3.65 ล้านตันในปี พ.ศ. 2547 มูลค่าการนำเข้าปุ๋ยเคมี เพิ่มขึ้นจาก 20,885 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2544 เป็น 27,800 ล้านบาทในปี พ.ศ. 2547 (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

แต่เนื่องจากปุ๋ยเคมีมีราคาแพงและมีแนวโน้มแพงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ต้นทุนในการผลิตพืชสูงขึ้นมาก แต่ผลผลิตของพืชกลับมีราคาไม่แน่นอน ทำให้มีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับปุ๋ยอินทรีย์มากขึ้น ปริมาณความต้องการปุ๋ยมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ดังตารางที่ 1 ซึ่งให้เห็นว่า ความต้องการปุ๋ยไนโตรเจนของโลกในปี 2000 เพิ่มขึ้นจาก 5 ปีที่แล้ว ประมาณ 25 ล้านตัน ปริมาณของปุ๋ยไนโตรเจนที่ทั้งโลกต้องการเพื่อผลิตพืชนั้นสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่ในปัจจุบันมีการผลิตปุ๋ยไนโตรเจนทางเคมีได้ประมาณปีละ 40 ล้านตัน (ธงชัย, 2546) ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ ตลอดจนในประเทศที่กำลังพัฒนาไม่มีกำลังเงินที่จะจัดซื้อได้อย่างพอเพียงตามความต้องการ จึงเป็นสาเหตุให้ ความสำคัญของปุ๋ยอินทรีย์โดดเด่นขึ้นมาเป็นลำดับ จึงทำให้มีการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ภายในประเทศเพิ่มมากขึ้นอย่างมากตามความต้องการใช้ปุ๋ยของเกษตรกร

ตารางที่ 1 ความต้องการปุ๋ยไนโตรเจนของโลก

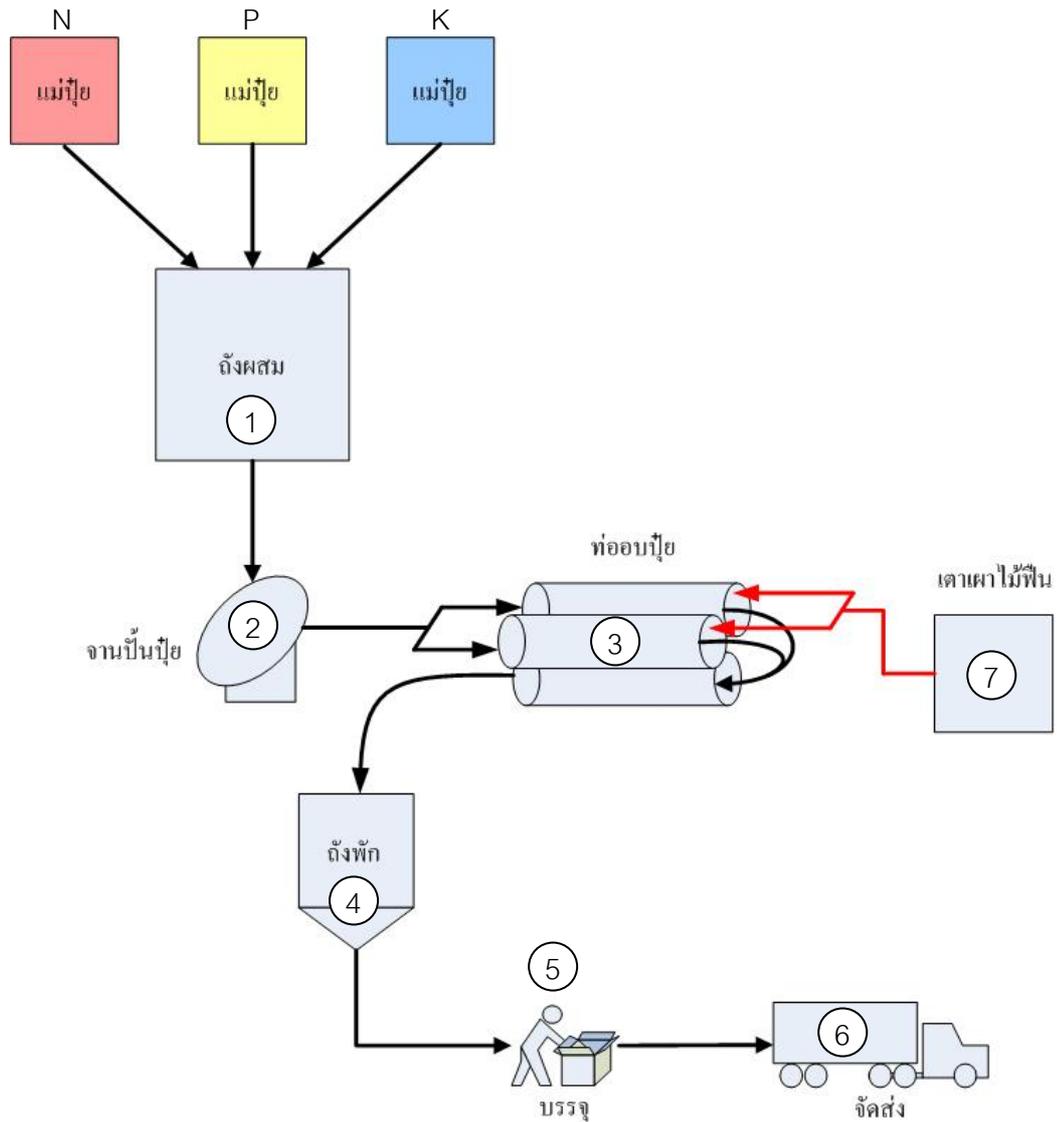
(หน่วย : ล้านตัน)

	ปี ค.ศ.1990	ปี ค.ศ.1995	ปี ค.ศ.2000
ประเทศที่พัฒนาแล้ว	58.9	71.4	85.1
ประเทศที่กำลังพัฒนา	33.9	43.6	54.5
รวม	92.8	115.0	139.6

ที่มา : ธงชัย (2546)

กระบวนการผลิตปุ๋ย

จากการสำรวจกระบวนการผสมปุ๋ยภายใน บริษัท สักดีสยามอินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด พบว่ากระบวนการผสมปุ๋ยอินทรีย์มีขั้นตอนการผลิตดังภาพที่ 1

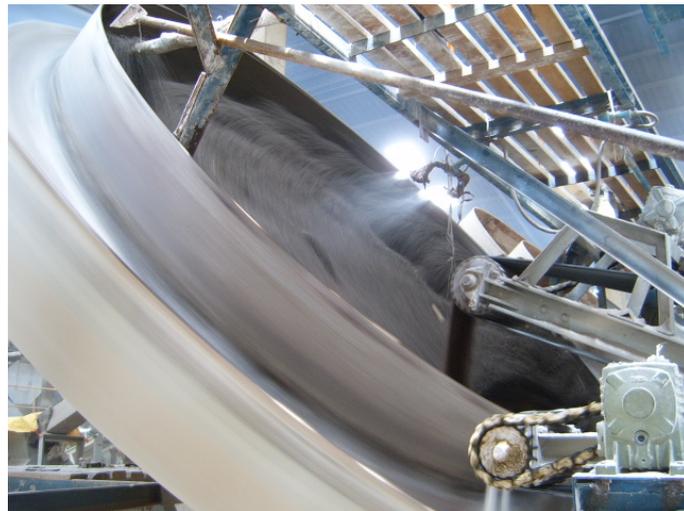


ภาพที่ 3 ขั้นตอนกระบวนการผลิตปุ๋ย

เริ่มต้น ณ ขั้นที่ (1) ด้วยการนำแม่ปุ๋ยซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นชนิดต่างๆ มาผสมตามสูตรของปุ๋ยชนิดต่างๆ ในถังผสมปุ๋ย เมื่อผสมแม่ปุ๋ยให้เข้ากันตามสูตรแล้วจึงลำเลียงต่อไปยังจุดที่ (2) เพื่อปั่นเม็ดปุ๋ยบนจานปั่นเม็ดปุ๋ยซึ่งจะมีลักษณะเป็นจานกลมใหญ่ และหมุนอยู่ตลอดเวลาการผสม

กระบวนการนี้ จะมีการฉีดละอองน้ำลงไปเพื่อให้แม่ปุย ซึ่งมีลักษณะเป็นผงจับตัวกันเป็นเม็ดปุย จากนั้นเม็ดปุยที่ได้ขนาดจะถูกส่งเข้าสู่จุดที่ (3) เพื่ออบเม็ดปุยในท่ออบปุย ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อกลมทรงกระบอกยาว เพื่อไล่ความชื้นภายในเม็ดปุยให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ซึ่งมีการควบคุมคุณภาพของเม็ดปุยโดยการควบคุมอุณหภูมิภายในท่ออบปุย โดยการควบคุมปริมาณไอน้ำที่ใส่ในเตาเผาไอน้ำพิน (7) เมื่อได้เม็ดปุยซึ่งมีคุณภาพตามต้องการแล้วจึงลำเลียงเม็ดปุยต่อไปยังถังพัก (4) เพื่อให้ปุยเย็นตัวลง หลังจากนั้นจึงทำการบรรจุ (5) จัดเก็บและจัดส่ง (6) ต่อไป

- งานปั่นเม็ดปุย มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลมขนาดใหญ่ เอียงทำมุมกันแนวระดับ ดังภาพที่ 4 งานปั่นปุยจะหมุนโดยอาศัยกำลังจากมอเตอร์ที่มาขับงานปั่นปุยให้หมุน เมื่อใส่ปุยที่ผสมตามสูตรลงไปงานปั่นปุยงานปั่นปุยก็จะหมุน ในระหว่างนั้นก็จะมีกรีดน้ำลงไปในงานปั่นปุยเพื่อให้ผงปุยจับกันเป็นก้อนและกลิ้งอยู่ในงานปั่นปุยเนื่องจากการหมุนของงานปั่นปุยนั่นเอง เมื่อปุยมีขนาดเม็ดตามต้องการแล้วก็จะนำเม็ดปุยที่ได้ไปอบต่อในท่ออบปุยอีกที



ภาพที่ 4 งานปั่นปุย

- ท่ออบปุย มีลักษณะเป็นท่อกลมทรงกระบอกยาว ดังภาพที่ 5 ภายในจะมีแผ่นเหล็กทำหน้าที่นำพาเม็ดปุยจากอีกด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง โดยแผ่นเหล็กนี้จะมีอยู่หลายแผ่นเอียงทำมุมตามแนวท่อ หมุนเป็นเกลียวต่อกันไปเมื่อท่อหมุน ดังภาพที่ 6 เม็ดปุยก็จะถูกแผ่นเหล็กนี้นำเม็ดปุยให้เคลื่อนที่ไปตามท่อ เมื่อท่อหมุนถึงจุดสูงสุดของท่อเม็ดปุยก็จะร่วงลงมาด้านล่างของท่อ ในขณะที่เม็ดปุยหล่นลงมาก็จะได้รับความร้อนจากเตาเผาไอน้ำพิน ความชื้นจะถูกทำให้ลดลงในขั้นตอนนี้ เมื่อเม็ดปุยหล่นลงมาด้านล่างแล้วก็จะถูกนำขึ้นไปโดยแผ่นเหล็กชุดต่อไป เป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จน

ชุดท่ออบปฏุย ท่ออบปฏุย มีสามท่อ สองท่อนจะเป็นท่อที่นำอากาศร้อนจากเตาเผาไม้ฟืนมาไล่ความชื้นออกจากเมล็ดปฏุย ส่วนท่อด้านล่างอีกหนึ่งท่อจะนำอากาศภายนอกมาใช้เพื่อให้เมล็ดปฏุยเย็นตัวลง เมื่อออกจากท่อด้านล่างแล้วก็จะนำไปเก็บไว้ในถังพักต่อไป

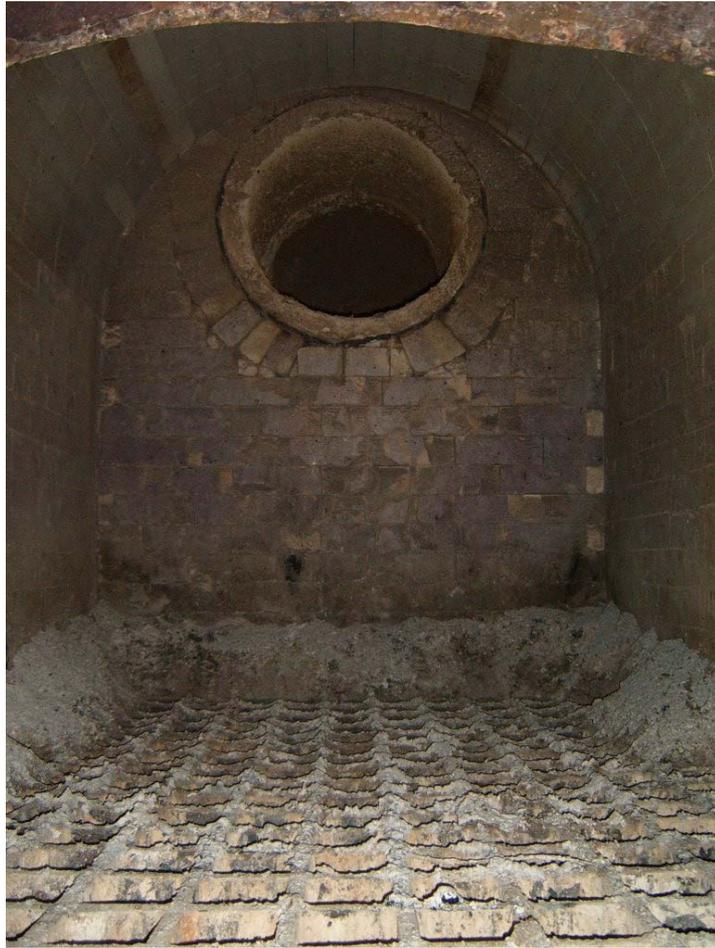


ภาพที่ 5 ลักษณะของท่ออบปฏุย



ภาพที่ 6 ลักษณะของแผ่นเหล็กที่วางเรียงตัวกันภายในท่ออบปฏุย

- เตาเผาไม้ฟืน มีลักษณะเป็นห้องขนาดใหญ่ ภายในจะมีตะแกรงขนาดใหญ่เพื่อใช้รองรับไม้ฟืนที่ใส่เข้าไป ผนังก่อด้วยอิฐทนไฟหลายชั้น ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ลักษณะภายในของเตาเผาไม้ฟืน

เพื่อป้องกันความร้อนที่จะสูญเสียไปภายนอก ตัวเตาจะมีประตูด้านหน้าเพื่อเปิดใส่ฟืน ด้านหลังจะต่อท่ออากาศขนาดใหญ่ไปเข้าที่ท่ออบนึ่งเพื่อนำอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไม้ฟืนไปอบนึ่งต่อไป ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ลักษณะภายนอกของเตาเผาไม้ฟืน

พลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ

เมื่อเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงจะให้พลังงานความร้อนออกมา องค์ประกอบที่สำคัญในเชื้อเพลิง คือ คาร์บอน และไฮโดรเจน ธาตุของเชื้อเพลิงนี้เมื่อเผาไหม้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจน ทำให้ได้พลังงานความร้อนออกมาและสามารถนำความร้อนที่ได้นั้นไปใช้ประโยชน์ และทำให้เกิดก๊าซไอเสียขึ้น เชื้อเพลิงที่เรานำมาใช้ประโยชน์แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ เชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงก๊าซ (ประเสริฐ และคณะ, 2544)

เชื้อเพลิงแข็ง

หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของแข็งที่อุดมภูมิปกติ ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชื้อเพลิงนี้ส่วนมากประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน กำมะถัน และเถ้า เมื่อทำปฏิกิริยาทางเคมีกับออกซิเจนในอากาศแล้วจะให้พลังงานความร้อนออกมา โดยปกติเมื่อเผา คาร์บอนจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเผาไฮโดรเจนจะได้น้ำ เชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ไม้ (Wood) ถ่านหิน (Coal) หินน้ำมัน (Oil Shale) และถ่าน เป็นต้น ส่วนเชื้อเพลิงแข็งที่ได้จากกระบวนการผลิต ได้แก่ ถ่านไม้ (Charcoal) ถ่านโค้ก (Coke) ถ่านอัดเป็นก้อน หรือเป็นแท่ง (Fuel Briquette) เป็นต้น

เชื้อเพลิงเหลว

หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุดมภูมิปกติ เชื้อเพลิงประเภทนี้ ได้แก่ น้ำมันที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม น้ำมันพืช และน้ำมันจากสัตว์ เป็นต้น เชื้อเพลิงเหลวนิยมใช้กับยานพาหนะและตามโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เพราะสะดวกต่อการใช้งาน และให้ค่าความร้อนสูง เชื้อเพลิงเหลวที่นิยมใช้ส่วนมากจะได้จากผลิตภัณฑ์การกลั่นปิโตรเลียม เช่น น้ำมันก๊าด โซลีน (Gasoline) น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล (Diesel) และน้ำมันเตา (Fuel Oil) เป็นต้น สำหรับเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากกรรมวิธีการผลิตจากหินน้ำมัน หรือพืชผลทางการเกษตร เช่น การผลิตแอลกอฮอล์ และการสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ ฯลฯ ถือเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาทดแทนการบริโภคน้ำมันปิโตรเลียมได้ส่วนหนึ่ง

เชื้อเพลิงก๊าซ

หมายถึง เชื้อเพลิงที่มีสถานะเป็นก๊าซที่อุดมภูมิปกติ หรืออาจหมายถึงรวมถึงก๊าซทุกชนิดที่สามารถนำมาทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้ว เกิดการเผาไหม้ทำให้ได้พลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เชื้อเพลิงประเภทนี้ส่วนใหญ่จะมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างเช่น ก๊าซหุงต้ม (LPG) ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) และก๊าซชีววมวล เป็นต้น

พลังงานทดแทน

หมายถึง พลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มาเป็น 2 ประเภท คือ พลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่าพลังงานประเภทสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่าพลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล และน้ำ เป็นต้น

ชีวมวล

คือ สารทุกรูปแบบที่ได้จากสิ่งแวดล้อม ซึ่งรวมถึงการผลิตจากการเกษตรและป่าไม้ ของเสียจากสัตว์ เช่น มูลสัตว์ และของเสียจากโรงงานแปรรูปทางการเกษตร ขยะ และน้ำเสียจากชุมชน

วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

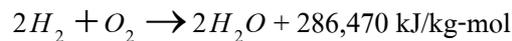
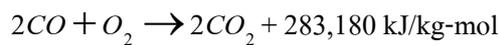
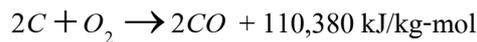
วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหลักที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ได้แก่ แกลบ ฟาง ข้าว ชานอ้อย กากและกะลาปาล์ม และกะลามะพร้าว ฯลฯ จากการประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากพืช 10 ชนิดที่มีศักยภาพสูง ได้แก่ อ้อย ข้าว น้ำมันปาล์ม มะพร้าว มันสำปะหลัง ข้าวโพด ถั่วลิสง ฝ้าย ถั่วเหลืองและข้าวฟ่าง ในปี พ.ศ.2544 พบว่ามีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ประมาณ 63 ล้านตัน โดยถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นๆ ประมาณ 16 ล้านตัน ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ส่วนที่ยังไม่ได้ใช้เท่ากับ 42 ล้านตัน (ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทยปี 2544/2545)

การแปรรูปเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงาน

การแปรรูปเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานมีอยู่หลายวิธี (ประเสริฐ และคณะ, 2544) ในส่วนที่สนใจมีกระบวนการดังนี้

การเผาไหม้โดยตรง (Combustion)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในที่ซึ่งมีอากาศ เพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ การสันดาปเป็นปฏิกิริยาการรวมตัวกันของเชื้อเพลิงกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วพร้อมเกิดการลุกไหม้และคายความร้อน ในการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะไม่ใช้ออกซิเจนล้วนๆ แต่จะใช้อากาศแทนเนื่องจากอากาศมีออกซิเจนอยู่ 21% โดยปริมาตร หรือ 23% โดยน้ำหนัก เชื้อเพลิงชีวมวลประกอบด้วยธาตุต่างๆ ดังนี้ คาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และธาตุอื่นๆ ที่สำคัญได้แก่ ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เนื่องจากจะทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อเกิดการเผาไหม้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เมื่อนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้จะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. ระบบการป้อนเชื้อเพลิงโดยใช้แรงงานคน เป็นระบบที่มีใช้อยู่ดั้งเดิมโดยการใช้คนตักเชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่เตา ประสิทธิภาพของระบบจะขึ้นอยู่กับความชำนาญและความเอาใจใส่ของแรงงาน

2. ระบบการป้อนเชื้อเพลิงแบบสโตกเกอร์ (Stoker) เป็นระบบที่ใช้เครื่องจักรป้อนเชื้อเพลิงแทนแรงงานคนโดยมีกลไกที่ไม่ซับซ้อนมากนัก มีราคาถูก และสามารถออกแบบให้ใช้ได้กับเชื้อเพลิงแข็งหลายๆชนิด หลายขนาด แต่มีข้อเสียคือระบบสโตกเกอร์มีขีดความสามารถในการผลิตไอน้ำต่ำ ระบบสโตกเกอร์แบ่งออกได้ตามลักษณะการป้อนเชื้อเพลิง คือ ระบบสโตกเกอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน (Overfeed Stoker) ซึ่งเป็นแบบตะกรับเลื่อน (Traveling Grate Stoker) และระบบสโตกเกอร์ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านล่าง (Underfeed Stoker)

3. ระบบพัลเวอร์ไรซ์ (Pulverized) การเผาไหม้เชื้อเพลิงของระบบพัลเวอร์ไรซ์จะเกิดขึ้นในลักษณะเชื้อเพลิงที่ถูกแขวนลอย ดังนั้นขนาดของเชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาจะต้องมีขนาดเล็กสามารถแขวนลอยอยู่ได้ในอากาศ อากาศส่วนแรกที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาจะถูกอุ่นก่อนเพื่อช่วยในการอบแห้งเชื้อเพลิง อากาศส่วนที่สองจะถูกส่งเข้าสู่เตาโดยตรงเพื่อช่วยทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ฝุ่นเถ้าที่เกิดขึ้นจะถูกปล่อยออกมากับไอเสีย

4. ระบบไซโคลน (Cyclone) ระบบนี้ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของการเผาไหม้เชื้อเพลิงของระบบพัลเวอร์ไรซ์ เชื้อเพลิงที่ถูกป้อนเข้าสู่เตาอาศัยแรงโน้มถ่วงเช่นเดียวกับระบบพัลเวอร์ไรซ์ แต่ไม่จำเป็นต้องบดเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็ก สามารถลดค่าใช้จ่ายของการบดเชื้อเพลิงลงได้ การเผาไหม้ระบบไซโคลนจะใช้หัวเผาแบบ Horizontal water-cooled ขนาดเล็กทำให้เตาเผาระบบไซโคลนมีขนาดเล็กกว่าเตาเผาพัลเวอร์ไรซ์เมื่อคิดต่อหน่วยปริมาตร อากาศที่เข้าสู่เตาจะอยู่ในแนวสัมผัสกับผนังของห้องเผาไหม้ซึ่งจะทำให้เชื้อเพลิงเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (Turbulence) ในห้องเผาไหม้ทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างทั่วถึงและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อุณหภูมิของการเผาไหม้จะสูงถึง 1650 °C ทำให้ 30-50 เปอร์เซ็นต์ของเถ้าหลอมเป็นซีโลหะเหลว (Liquid Slag) ส่วนที่เหลืออีก 70-50 เปอร์เซ็นต์จะเป็นเถ้าลอยปนมากับก๊าซไอเสีย

5. ระบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed) ระบบฟลูอิดไดซ์เบดนั้นอากาศจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิง เมื่อเพิ่มอัตราความเร็วของอากาศถึงจุดหนึ่งเชื้อเพลิงจะลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายของไหลโดยจะมีสารเฉื่อย (Inert Material) เช่นทราย หรือสารทำปฏิกิริยา (Reaction Material) เช่น หินปูนเป็นฐาน เมื่อเริ่มติดเตา ฐานจะได้รับความร้อนจากภายนอกจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่เตาอย่างสม่ำเสมอ

ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวล โดยใช้ความร้อนในที่ที่มีอากาศจำกัด (Destructive Distillation) อุณหภูมิและความดันที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส จะต่ำกว่ากระบวนการผลิตก๊าซชีวมวล (Gasification) ผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความดัน ปริมาณความชื้น และส่วนประกอบของชีวมวล โดยทั่วไปผลผลิตหลักที่ได้ คือ ถ่าน (Charcoal) ผลผลิตรองที่ได้ คือ น้ำมันไพโรไลติก (Pyrolytic oil) เมทธานอล กรดน้ำส้ม และผลิตภัณฑ์ ที่เป็นก๊าซ ซึ่งก๊าซที่ได้นี้สามารถนำไปใช้

ประโยชน์ในการอบชีวมวลที่จะใช้ในกระบวนการ หรือใช้เผาไหม้เป็นเชื้อเพลิงซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการ

โดยปกติการเผาถ่านที่กระทำกันอยู่ คือ กระบวนการไพโรไลซิส แต่เนื่องจากลักษณะของเตาที่ใช้เผา และการเก็บผลผลิตเพียงแก่ถ่านทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเผาถ่านต่ำ พลังงานที่ได้จากถ่านจะได้เพียงร้อยละ 20 ของพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่เดิมในชีวมวล USAID (United States Agency for International Development) ได้ทดลองตั้งสถานีเผาถ่านในประเทศกานา โดยใช้เทคโนโลยีทางไพโรไลซิส ที่สามารถเก็บผลิตภัณฑ์รอง อาทิ ก๊าซต่างๆ กลับมาใช้ได้อีก ปรากฏว่าโดยวิธีนี้จะสามารถได้พลังงานทั้งหมดร้อยละ 80 ของพลังงานเดิมที่มีในชีวมวลนั้น

การผลิตก๊าซชีวมวล (Gasification)

เป็นกระบวนการ Partial Oxidation ที่ใช้อุณหภูมิสูง ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงอยู่ในสภาพของก๊าซที่ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์

การผลิตก๊าซชีวมวลเป็นกระบวนการที่ใช้กันมานานแล้วไม่ว่าจะใช้กับ ถ่านหิน เศษไม้ หรือขยะ ได้มีการพัฒนาเตาผลิตก๊าซชีวมวล (Gasifier) เพื่อใช้กับวัสดุดังกล่าวกับเตาผลิตก๊าซชีวมวลที่ใช้กับไม้ได้ทำการออกแบบให้ใช้ได้กับความดันบรรยากาศ ซึ่งต่างกับเตาผลิตก๊าซชีวมวลที่ใช้กับถ่านหินซึ่งใช้ ความดันที่ 400 Psig หรือสูงกว่านี้ ความแตกต่างหนึ่งระหว่างการผลิตก๊าซชีวมวลของไม้ และถ่านหิน คือ กระบวนการผลิตก๊าซชีวมวลของไม้ ก๊าซที่ได้จะมีปริมาณความชื้นสูง ความชื้นนี้เกิดจากกระบวนการแล้วยังมาจากไม้ที่ใช้ แต่สามารถกำจัดออกจากก๊าซที่เกิดขึ้นได้ (McKendry, 2002a, 2002b)

เทคโนโลยีของการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากสารอินทรีย์ เพื่อใช้ในการสันดาป เริ่มมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1812 ในประเทศอังกฤษ โดยการอบถ่านหินให้แห้งในเตาเผาที่ปิดสนิท จะได้ก๊าซที่มีค่าความร้อนประมาณ 15 MJ/Nm^3 จากการผลิตก๊าซจากถ่านหินในสมัยนั้น เป็นการเอาสารระเหยออกจากถ่านหินเป็นส่วนใหญ่ และส่วนที่เหลือคือถ่านหินที่มีปริมาณคาร์บอนสูงประมาณ 70% ของน้ำหนัก ถ่านหินก่อนอบ การผลิตก๊าซจากถ่านหินอย่างแท้จริง ได้ถูกคิดค้นขึ้นมาในฝรั่งเศสในปี ค.ศ. 1839

โดยแปรรูปถ่านหินเป็นก๊าซทั้งหมด ก๊าซที่ได้มีค่าความร้อนต่ำตั้งแต่ 4.5 – 5.0 MJ/Nm³ เตาผลิตก๊าซที่ได้เรียกว่า Gasifier หรือ Producer gas ซึ่งเป็นเครื่องขนาดใหญ่และใช้กันมานานประมาณ 100 ปีการผลิตเตาผลิตก๊าซขนาดเล็กที่ใช้กับรถยนต์ เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 จนถึงสงครามโลกครั้งที่ 1 จากนั้นก็จึงมีการคิดค้นสร้างเตาผลิตก๊าซใช้กับงานอื่นๆ ที่มีขนาดเล็กจนปัจจุบัน (ปรีชา, 2529)

ก๊าซที่ได้จากเตาสังเคราะห์ก๊าซจะมีค่าความร้อนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และกรรมวิธีการผลิต แสดงได้ดังนี้

Wood gasification (air)	=	3.7-5.6 MJ/Nm ³
(O ₂)	=	11-14 MJ/Nm ³
Coal gasification	=	20 MJ/Nm ³
Natural gas	=	3.9 MJ/Nm ³

การใช้ประโยชน์ของก๊าซจากเตาผลิตก๊าซ โดยทั่วไปแบ่งออกได้ 3 ระบบใหญ่ๆ คือ ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลว (Syn – gas system) เป็นเชื้อเพลิงสำหรับสันดาปภายนอก (Direct heat system) และเป็นเชื้อเพลิงสำหรับสันดาปภายในเครื่องยนต์ (Shaft power system)

การแบ่งเขตในเครื่องผลิตก๊าซ

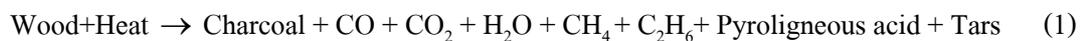
เครื่องผลิตก๊าซจากชีวมวล แบ่งออกเป็น 4 เขตตามอุณหภูมิและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น คือ เขตอบแห้ง เขตไพโรไลซิส เขตรีดักชัน และเขตสันดาป (ปรีชา, 2529) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เขตอบแห้ง (Drying zone)

ในโซนนี้ความร้อนจะลดลงมากทำให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดการสลายตัวของสารระเหย แต่ความชื้นในเชื้อเพลิงจะถูกความร้อนทำให้ระเหยตัวออกมาในรูปของไอน้ำ โซนนี้จะมีอุณหภูมิประมาณ 100 – 200 °C ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซเชื้อเพลิงยังไม่เด่นชัด

2. เขตไพโรไลซิส (Pyrolysis zone)

ความร้อนจากโซนรีดักชัน จะแพร่เข้าสู่โซนนี้ เพื่อที่จะเผาไหม้สารอินทรีย์หรือเชื้อเพลิงแข็งนั่นเอง ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสส่วนใหญ่เป็นของเหลวเช่น เมททานอล กรดน้ำส้มและน้ำมันดิน อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่า 200 – 500 °C ของแข็งที่เหลืออยู่ภายหลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้ว คือ คาร์บอนในรูปของถ่าน ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อในโซนรีดักชัน และ โซนสันดาป ปฏิกิริยาที่ได้ในโซนนี้อาจเขียนอยู่ในรูปของสมการทางเคมีดังนี้



ผลผลิตพวกก๊าซเชื้อเพลิงมีเล็กน้อยและนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ ซึ่งจะต้องสร้างระบบทำความสะอาดสารระเหยที่ได้จากเขตนี้

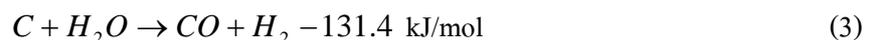
3. เขตรีดักชัน (Reduction zone)

ก๊าซร้อนที่ผ่านมาจากกระบวนการแรก จะไหลผ่านมายังโซนรีดักชัน ซึ่งมีปฏิกิริยาหลักคือ Reduction อุณหภูมิในโซนนี้จะมีค่าระหว่าง 500 – 900 °C ในโซนนี้จะเป็นเขตของการสังเคราะห์ก๊าซติดไฟทั้งหมดเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน และมีการเปลี่ยนก๊าซบางส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ซึ่งก็คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำ ในโซนสันดาป ให้กลายเป็นก๊าซที่สามารถเผาไหม้ได้ โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านคาร์บอนที่กำลังลุกไหม้อยู่ ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ดังสมการ

Boudouard reaction:



Water gas reaction:



Water shift reaction:



Methane reaction:



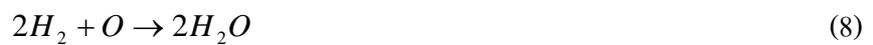
ปฏิกิริยาในสมการ (2)-(4) เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900 °C ก๊าซที่ได้จากทั้งสมการทั้งสองเป็นก๊าซที่เผาไหม้ได้ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซชีววมวลนี้ จะขึ้นอยู่กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ว่าจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้มากน้อยเพียงใด ในโซนรีดักชัน นี้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดีเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเร็วระหว่างก๊าซที่สัมผัสกับเชื้อเพลิงแข็ง และพื้นที่ที่ก๊าซสัมผัสกับผิวของเชื้อเพลิงแข็ง

ดังนั้นขนาดและปริมาณของเชื้อเพลิงแข็งที่ป้อนเข้าไปยังเตาเผา จึงมีผลต่อการผลิตก๊าซชีววมวล เชื้อเพลิงขนาดใหญ่จะมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรต่ำ จะยากต่อการจุดเผาภายในเตา และจะทำให้เกิดปริมาณของช่องว่างระหว่างเชื้อเพลิงด้วยกันมาก เป็นผลทำให้มีออกซิเจนไหลผ่านเข้าไปในระบบมาก ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นก็จะน้อยลงตามไปด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีววมวลต่ำ แต่ถ้าขนาดของเชื้อเพลิงมีขนาดเล็ก ก็จะทำให้เกิดการสูญเสียของความดันภายในเตามาก จึงต้องใช้พัดลมขนาดใหญ่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น และก๊าซชีววมวลที่ผลิตได้จะมีปริมาณของฝุ่นมากขึ้น จากปฏิกิริยา (2) ถ้าอุณหภูมิในโซนรีดักชันสูงกว่า 900 °C ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 90% จะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 1,100 °C จะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือประสิทธิภาพของเตาเผาจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในโซนรีดักชัน

ในขณะที่ก๊าซร้อนจากโซนสันดาปเคลื่อนที่เข้าสู่โซนรีดักชัน จะทำให้อุณหภูมิของก๊าซลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาในสมการ (2) และ (3) เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นไอน้ำกับคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากันเพื่อก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ดังปฏิกิริยาในสมการ (4) ซึ่งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 600 °C ปฏิกิริยานี้จะมีความสำคัญเพราะทำให้ส่วนผสมของไฮโดรเจนในก๊าซชีววมวลมีค่ามากขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าความร้อนที่ได้ในกระบวนการ แต่ถ้ากระบวนการมีไอน้ำมากเกินไปอาจทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนดังปฏิกิริยา (5) ทำให้ค่าความร้อนของก๊าซชีววมวลที่ได้มีค่าลดลง ดังนั้นเชื้อเพลิงแข็งที่ใช้จะต้องมีความชื้นไม่มากเกินไป ในกระบวนการก๊าซไฮโดรเจนบางส่วนอาจจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นได้เล็กน้อย ดังปฏิกิริยา (6)

4. เขตสันดาป (Combustion zone)

อากาศจะถูกส่งเข้ามาในโซนนี้ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อากาศและเชื้อเพลิงสัมผัสกัน เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างก๊าซออกซิเจนในอากาศกับคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งอยู่ในเชื้อเพลิงผลของปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการ



ปฏิกิริยาในสมการ (7) และ (8) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาคูดความร้อนในโซนรีดักชัน และโซนไฟโรไลซิส อุณหภูมิในโซนสันดาปจะมีค่าระหว่าง 1,100-1,500 °C

ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์และพลังงานที่เกิดขึ้นในเขตนี้จะเป็นแหล่งที่ทำให้เกิดการสังเคราะห์ก๊าซทั้งระบบ เครื่องผลิตก๊าซจากไม้และถ่านจะให้ก๊าซที่มีองค์ประกอบและค่าความร้อนแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบและค่าความร้อนของก๊าซ จากเตาผลิตก๊าซชีวมวลจากไม้

Gas	Gasifier	
	Foley and Barnard	Zainal
N ₂ (%)	50-54	42.31
CO (%)	20-22	23.04
CO ₂ (%)	9-11	16.42
H ₂ (%)	12-15	15.23
CH ₄ (%)	2-3	1.58
O ₂ (%)	0	1.42
Heat content (MJ/m ³)	5.5	4.85

ที่มา : Foley and Barnard (1982) และ Zainal (2001)

โดยก๊าซชีววมวลที่ผลิตออกมาได้จะมีค่าความร้อน 5.5 MJ/m^3 ($5,323.26 \text{ kJ/kg}$) และ 4.85 MJ/m^3 ($4,668.57 \text{ kJ/kg}$) ตามลำดับอย่างไรก็ตามองค์ประกอบของก๊าซเหล่านี้ยังแปรผันไปตามอุณหภูมิของเตาผลิตก๊าซชีววมวล เป็นสำคัญ ดังเช่น องค์ประกอบของก๊าซจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของชี้เลี้ยงไม้สนในเตาเผาไฟฟ้า ระหว่างอุณหภูมิ 540°C - 870°C ซึ่งให้ปริมาณก๊าซทั้งหมดมีค่า 25-35 %

ประเภทของกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวล

การออกแบบสร้างเตาเผาเพื่อผลิตก๊าซชีววมวล จะต้องคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิ อัตราความเร็วในการเผาไหม้ ปริมาณของอากาศในเตาเผา กระบวนการผลิตก๊าซชีววมวลอาจแบ่งออกได้ดังนี้ (อนุตร, 2545)

Air Gasification

เป็นวิธีการผลิตก๊าซชีววมวลแบบง่ายที่สุด กระบวนการนี้เป็นกระบวนการดูดความร้อนและอากาศที่ใช้ในกระบวนการมีจำนวนน้อย ก๊าซที่ได้ในกระบวนการประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เนื่องจากมีก๊าซไนโตรเจนที่เป็นก๊าซเฉื่อย จึงทำให้ก๊าซที่ได้มีค่าความร้อนต่ำ กระบวนการนี้ต้องการอากาศที่เผาไหม้พอดีประมาณ 1.6 กรัมต่ออากาศที่ใช้จริงประมาณ 1 กรัม หรือมีค่า Equivalence Ratio ประมาณ 0.25 (Equivalence Ratio คืออัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ต่อปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้พอดี)

Oxygen Gasification

ในการเผาไหม้เพื่อผลิตก๊าซชีววมวล โดยใช้ก๊าซออกซิเจนโดยตรง ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จะให้พลังงานปานกลาง ซึ่งมีศักยภาพพอที่จะส่งก๊าซไปตามท่อส่งได้หรือใช้ในการสังเคราะห์ทางเคมีเพื่อใช้ในการผลิต เมธานอล แอมโมเนีย หรือมีเทน อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะสูงและเร็วกว่า Air Gasification จึงก่อให้เกิดฝุ่นละอองที่มากกว่าก๊าซน้อยกว่า ในการผลิตก๊าซชีววมวลจำนวน 1 ตัน จะต้องใช้ปริมาณออกซิเจน 0.33 ตัน เนื่องจากก๊าซออกซิเจนมีราคาแพงจึงไม่มีการผลิตก๊าซชีววมวลในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

Pyrolysis Gasification

เนื่องจากก๊าซชีววมวลที่ได้จะมีองค์ประกอบที่เป็นสารระเหยสูงเมื่อเทียบกับถ่านหิน เราสามารถใช้วิธีการกลั่นสารระเหยเพื่อให้ได้ก๊าซที่มีพลังงานปานกลาง ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นก๊าซมีเทน Light Hydrocarbon และยังได้ถ่านและน้ำมันในกระบวนการอีกด้วย วิธีการผลิตก๊าซชีววมวลแบบ Pyrolysis Gasification ยังแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- Slow Pyrolysis Gasification เป็นกระบวนการแปรรูปพลังงานที่สะสมอยู่ในถ่านและน้ำมันดิน ให้อยู่ในรูปของก๊าซเชื้อเพลิง เป็นกระบวนการที่ช้าช้อน ก๊าซชีววมวลที่ได้จะเป็นก๊าซที่มีพลังงานปานกลาง และมีความสะอาด วิธีการแปรรูปพลังงานอาจทำได้โดยนำถ่านไปเผาในฟลูอิดไคซ์เบดของทราย โดยทำให้ทรายมีความร้อนสูงขึ้น และส่งทรายร้อนดังกล่าวไปยังเบดที่สองที่อยู่ถัดไป ซึ่งทำให้เกิดการกลั่นสลายของถ่านในเบดนี้ ถ่านส่วนหนึ่งในเบดที่สองจะถูกเผาเพื่อให้ความร้อนกับก๊าซไพโรไลซิสและนำความร้อนที่ได้ในฟลูอิดไคซ์เบดแรก หรือให้ความร้อนจากภายนอกด้วยการป้อนเข้าไปพร้อมกับชีววมวลเปียกที่ความดันสูง

- Fast Pyrolysis Gasification ได้มีการค้นพบว่าไอน้ำของโมเลกุลที่เกิดขึ้น ระหว่างการกลั่นสลายนั้นสามารถแตกตัวที่อุณหภูมิสูงให้สาร Olefins และผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถที่จะคงอยู่ได้ ถ้าได้รับความร้อนก่อนที่ปฏิกิริยาต่อไปจะเกิดขึ้นสารพวก Olefins เป็นสารที่เราสามารถนำไปสังเคราะห์เป็นสารเคมีอื่นที่เป็นประโยชน์ได้ เช่น สามารถแปรสภาพอย่างง่ายให้เป็น สารพวกไฮโดรคาร์บอน หรือ แอลกอฮอล์

Hydrogen Gasification

การนำไฮโดรเจนไปใช้ในที่มีความดันสูง จะสามารถเปลี่ยนองค์ประกอบภายในของก๊าซชีววมวลได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งเป็นวิธีการที่น่าสนใจสำหรับที่ซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนมากอย่างเพียงพอ

Chemical and Electrochemical Gasification

กระบวนการนี้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทางเคมีได้ผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ HBr ที่ได้ไป Electrolyzed เพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน

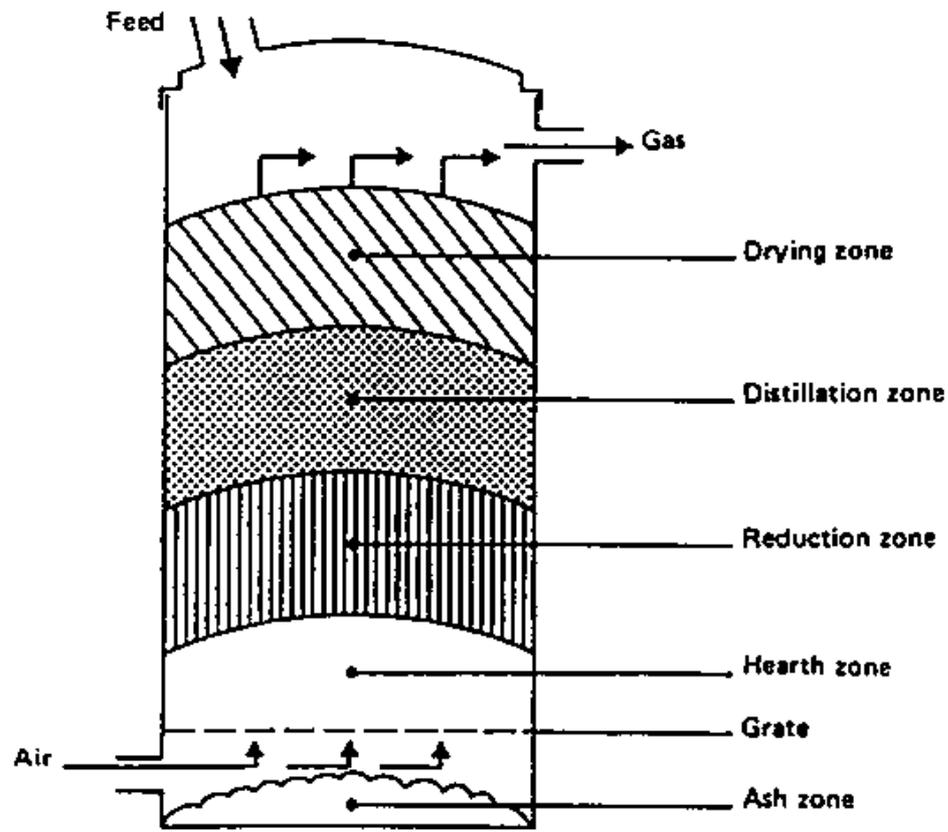
ชนิดของเตาผลิตก๊าซชีวมวล

เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบ่งออกเป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ ดังที่ได้กล่าวมาในตอนต้น การออกแบบเตาผลิตก๊าซจากชีวมวลโดยการจัดเขตต่างๆ เหล่านี้ให้แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมของการใช้งาน วัสดุที่ใช้ และคุณสมบัติของก๊าซที่ได้ สามารถแบ่งเตาผลิตก๊าซชีวมวลออกเป็น 4 แบบ คือ แบบไหลขึ้น แบบไหลลง แบบไหลตัด และแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FAO, 1986)

การเคลื่อนตัวของวัตถุดิบ อากาศ ก๊าซ การกระจายของอุณหภูมิ ขนาดจำกัดของวัตถุดิบ และความชื้นของวัตถุดิบที่เหมาะสม มีส่วนเกี่ยวข้องในการเลือกชนิดของเครื่องผลิตก๊าซเหล่านี้

1. เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้น (Updraft gasifier)

เตาประเภทนี้เป็นเตาเผาที่ผลิตใช้เริ่มแรก และเป็นแบบง่ายที่สุด เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าทางส่วนบนของเตา และอากาศจะถูกส่งผ่านตะแกรงเข้ามาทางด้านล่างบริเวณเหนือตะแกรงขึ้นไป จะมีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงขึ้น ซึ่งเราเรียกบริเวณส่วนนี้ว่าโซนสันดาป (Combustion zone) หรือ ฮาร์ท โซน (Hearth zone) เมื่ออากาศผ่านเข้าไปบริเวณโซนสันดาปจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ก๊าซร้อนที่ผ่านจากโซนเผาไหม้ จะมีอุณหภูมิสูงและจะถูกส่งผ่านไปยังโซนรีดักชัน ซึ่งเป็นโซนที่มีปริมาณของคาร์บอนมากเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน หลังจากนั้นก๊าซที่ได้จะไหลเข้าสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในชั้นของชีวมวล และกลั่นสลายในช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C หลังจากนั้นก๊าซจะไหลเข้าสู่ชั้นของชีวมวลที่ขึ้น เนื่องจากก๊าซยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่ จึงไประเหยน้ำที่อยู่ในชีวมวลเหล่านั้น ทำให้ก๊าซที่ออกจากเตาเผาชีวมวลมีอุณหภูมิต่ำลง



ภาพที่ 9 ลักษณะโครงสร้างของเตาผลิตก๊าซแบบไหลขึ้น

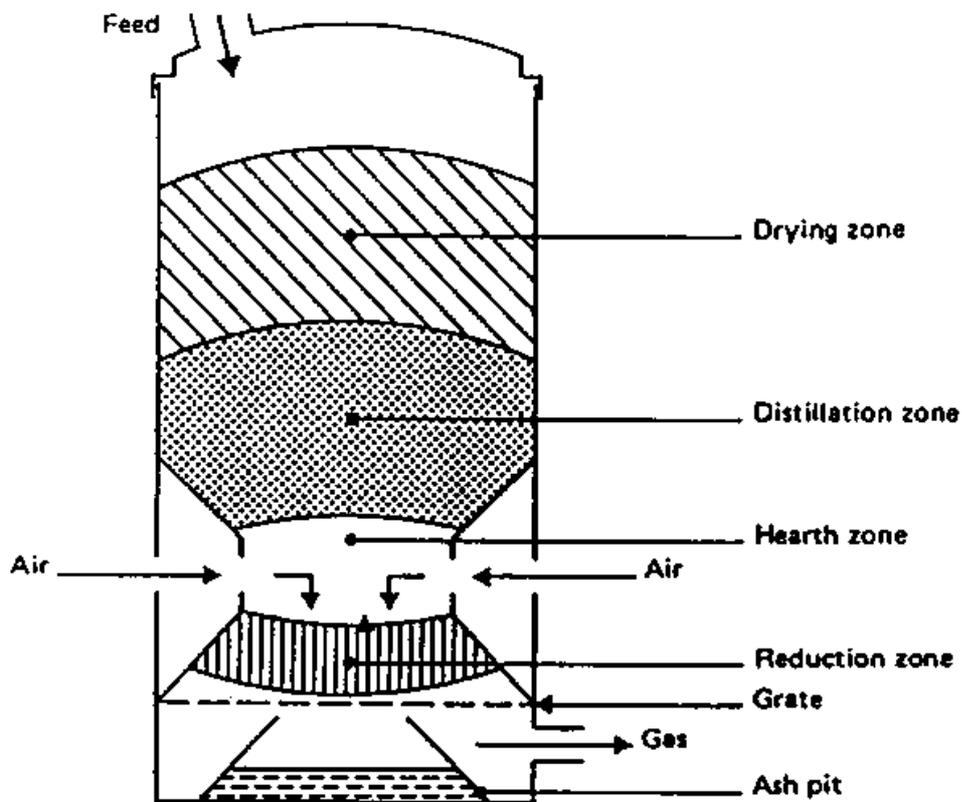
ที่มา : FAO (1986)

เตาเผาประเภทนี้จะไม่ซับซ้อน มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมากและก๊าซชีววมวลที่ได้มีอุณหภูมิไม่สูงนัก แต่มีข้อจำกัด คือ ก๊าซที่ผลิตได้จะมีสารเคมีประเภทน้ำมัน และน้ำมันดินเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในโซนไพโรไลซิส (distillation zone) และจะกลั่นตัวเมื่ออยู่ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นก๊าซที่ได้จากเตาเผาประเภทนี้จึงเหมาะกับการนำไปใช้สำหรับหม้อน้ำ หรือการอบแห้งวัสดุทางเกษตรซึ่งก๊าซที่ได้จะผสมกับอากาศ และทำการเผาไหม้โดยตรงในห้องเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนในกระบวนการที่ใช้ความร้อนต่อไป

2. เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง (Downdraft gasifier)

เตาเผาชีววมวลแบบนี้ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อที่จะขจัดน้ำมันดิน ที่มีอยู่ภายในเชื้อเพลิงแข็ง โดยเฉพาะ อากาศจะถูกส่งจากด้านบนสู่ด้านล่างของเตาเผา ดังภาพที่ 10 ผ่านกลุ่มของหัวฉีด ซึ่ง

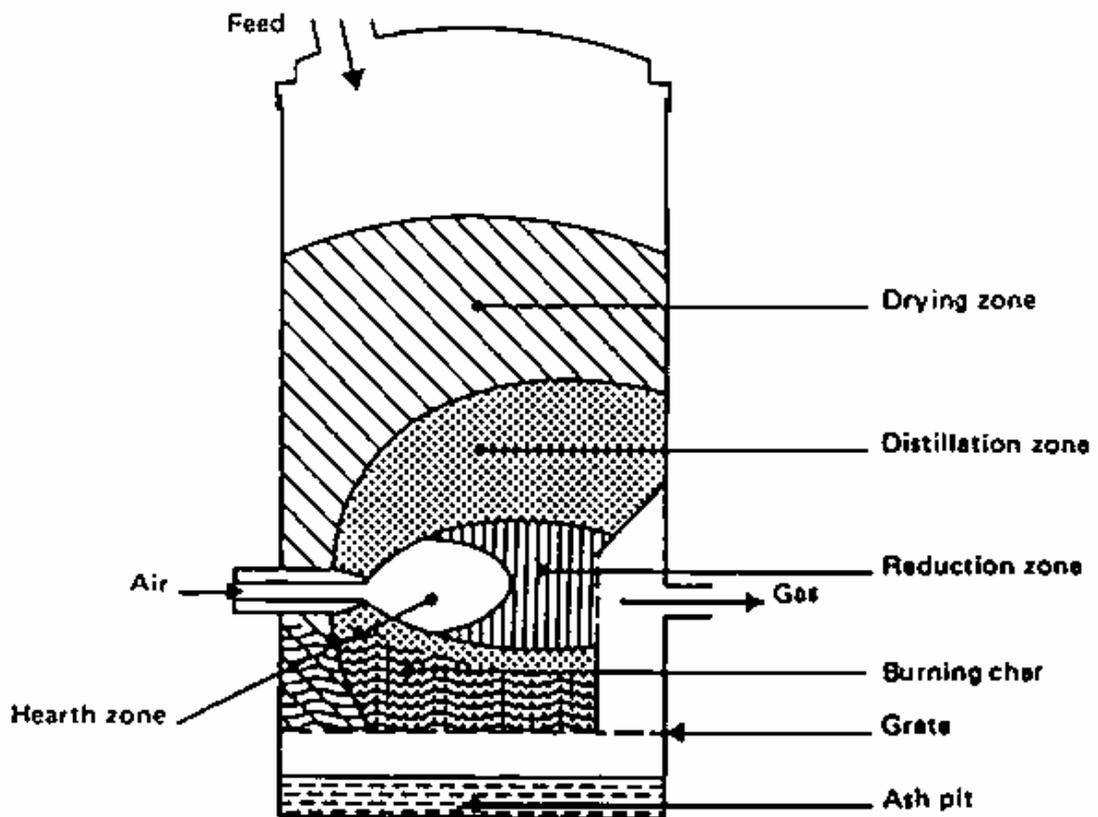
เรียกว่า Tuyers บริเวณหัวนี้จะเป็นบริเวณของโซนสันดาป ก๊าซที่ได้จากโซนสันดาป จะถูก Reduced ในขณะที่ไหลลงสู่ด้านล่างและผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อนซึ่งอยู่เหนือตะแกรงเล็กน้อย ขณะเดียวกันในชั้นของชีวมวลที่อยู่ทางด้านบนของโซนสันดาป จะมีปริมาณออกซิเจนน้อยมากทำให้เกิดการกลั่นสลาย และไอของน้ำมันดินที่เกิดจากการกลั่นสลายจะไหลผ่านชั้นของคาร์บอนที่ร้อน ทำให้น้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซ ซึ่งการแตกตัวนี้จะเกิดที่อุณหภูมิคงที่ในช่วงระหว่าง 800-1,000 °C ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C ปฏิกิริยาคูดความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิต่ำลง แต่ถ้าต่ำกว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ปฏิกิริยาคายความร้อนจะทำให้ก๊าซที่ได้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก๊าซที่ผ่านโซนสันดาปจะมีส่วนประกอบของน้ำมันดินและน้ำมัน ซึ่งจะมีปริมาณลดลงเหลือน้อยกว่า 10% ของน้ำมันดินและน้ำมันที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลขึ้น และก๊าซที่ได้จะมีความสะอาดมากกว่า ทำให้ใช้การกรองน้อยลงเตาผลิตก๊าซชีวมวลทั้งแบบไหลขึ้น และ ไหลลง จะมีความเร็วของอากาศไหลผ่านต่ำ และเต้าจะอยู่บริเวณตะแกรง ดังนั้นจึงมีปริมาณเถ้าถ่านติดออกมา กับก๊าซชีวมวลน้อยมาก



ภาพที่ 10 ลักษณะ โครงสร้างของเตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบไหลลง
ที่มา : FAO (1986)

3. เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลตัดขวาง (Cross-draft gasifier)

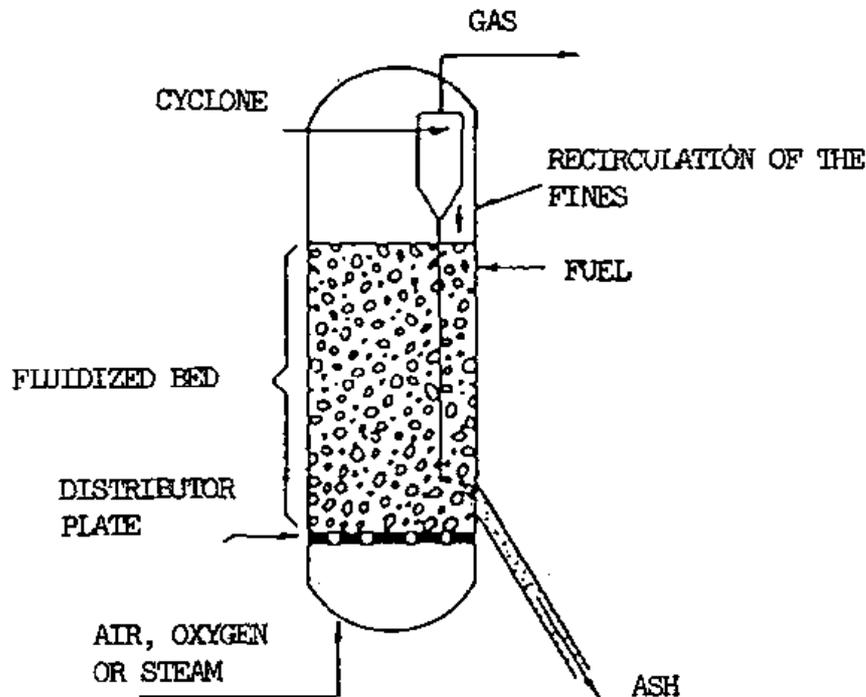
เตาเผาแบบนี้อากาศจะถูกจ่ายผ่านหัวฉีดซึ่งอยู่ในแนวราบ ดังภาพที่ 11 โชนสันดาปจะอยู่ ถัดจากหัวฉีดออกไป และถัดออกไปจะเป็นโชนรีดักชัน แล้วก๊าซชีววมวลจะออกสู่ภายนอกโดยผ่าน ตะแกรง ซึ่งอยู่ในแนวตั้ง โดยรอบบริเวณโชนสันดาป และโชนรีดักชัน จะเป็นโชนไพโรไลซิส หรือ Distillation น้ำมันและน้ำมันดินที่ได้จากโชนไพโรไลซิส จะผ่านโชนรีดักชัน ก่อนที่จะออกไปสู่ภายนอกเตา ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำมันและน้ำมันดินเกิดการแตกตัวเป็นก๊าซก่อนที่จะออกไปสู่ ภายนอก ทำให้ก๊าซชีววมวลที่ได้มีปริมาณน้ำมันและน้ำมันดินต่ำ เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบนี้ได้ทำ การออกแบบให้สามารถใช้กับขานพาหนะ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา และมีผลตอบแทนเร็วต่อการ เปลี่ยนแปลงของภาระที่กระทำอยู่ เชื้อเพลิงแข็งที่ควรนำมาใช้กับเตาเผาแบบนี้ ควรเป็นถ่านไม้ที่มี คุณภาพสูง



ภาพที่ 11 ลักษณะโครงสร้างของผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลตัดขวาง
ที่มา : FAO (1986)

4. เตาผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized Bed gasifier)

เตาผลิตก๊าซชีวมวลจากที่กล่าวมาแล้วทั้งสามแบบข้างต้น การทำงานของกระบวนการในระบบขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาทางเคมีและสภาพทางฟิสิกส์ของเชื้อเพลิง โดยที่จะเกิดปัญหาทางด้าน Slag ที่เกิดขึ้นมากเกินไป จึงทำให้เกิดการอุดตันในเตาเผาบ่อยครั้ง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการนำเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด มาใช้เตาเผาแบบนี้อากาศจะไหลผ่านชั้นของเชื้อเพลิงแข็ง เมื่อเราเพิ่มความเร็วนของอากาศที่ไหลผ่านสูงจนกระทั่งทำให้เชื้อเพลิงที่วางอยู่เริ่มลอยตัวขึ้นมีลักษณะคล้ายกับของไหลดังภาพที่ 12 ในขณะที่เริ่มติดไฟนั้นเบด จะเริ่มร้อนขึ้นจนอุณหภูมิถึงจุดติดไฟของเชื้อเพลิง หลังจากนั้นเชื้อเพลิงจึงจะถูกป้อนเข้าไปอย่างสม่ำเสมอ ภายใจเตาจะใส่วัสดุเฉื่อย เช่นทราย หรือวัสดุเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ หินปูน ซึ่งช่วยในการถ่ายเทความร้อนและช่วยในการทำความสะอาดก๊าซที่ได้จากเบด เตาเผาแบบนี้มีข้อดีคือ การควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาสามารถทำได้ง่าย จึงสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าได้ ทำให้ไม่เกิดการจับตัวของ Slag ที่เกิดขึ้นจึงสามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีเถ้ามากได้ แต่ข้อเสียของเตาเผาแบบนี้คือ ก๊าซชีวมวลที่ออกจากเตาเผาจะมีปริมาณเถ้า และฝุ่นถ่านออกมาด้วย เนื่องจากความเร็วของอากาศภายในเตาสูง จึงต้องมีการนำไซโคลน (Cyclone) หรือ Baghouse มาใช้กับระบบนี้ด้วย



ภาพที่ 12 ลักษณะ โครงสร้างของเตาผลิตก๊าซแบบฟลูอิดไดซ์เบด
ที่มา : FAO (1986)

ก๊าซที่ได้ออกมาจากเครื่องผลิตก๊าซชีววมวลสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ 3 ทาง คือ

1. นำไปสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Syn gas) เช่น เมทานอล น้ำมันเบนซิน และ แอมโมเนีย
2. การใช้ก๊าซเพื่อเดินเครื่องยนต์ (Shaft-power system)
3. การใช้ก๊าซเพื่อพลังงานความร้อน หรือการนำไปใช้สร้างความร้อนโดยตรง (Direct-heat system)

ในงานวิจัยนี้จะนำก๊าซที่ได้ออกมาจากเตาผลิตก๊าซชีววมวลไปใช้สร้างความร้อนโดยตรง (Direct-heat system) โดยการนำก๊าซที่ได้ไปเผาไหม้ต่อในห้องเผาไหม้ และนำอากาศร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปอบปุ๋ยต่อไป

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลคือก๊าซชีววมวล ซึ่งจะมีค่าความร้อนแตกต่างกัน ตามส่วนผสมของก๊าซว่ามีโมเลกุลใดอยู่ในอัตราส่วนเท่าใด ซึ่งโดยปกติก๊าซที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลนั้น จะมีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน และมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซที่สามารถเผาและให้ความร้อนออกมา ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนในกรณีของ Air Gasification นั้น เป็นก๊าซที่ไม่ให้ความร้อนในการเผาไหม้ ซึ่งจะไม่นำมาใช้ในการคำนวณค่าความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิง และในการผลิตก๊าซชีววมวลนั้นกระบวนการและสถานะในการผลิต ยังมีส่วนให้อัตราการเกิดองค์ประกอบที่ต่างกัน ในก๊าซชีววมวล โดยสถานะหนึ่งที่น่าสนใจและเป็นปัญหาที่สำคัญในกระบวนการผลิตก๊าซชีววมวล คือ ปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงตั้งต้นที่นำไปผลิตเป็นก๊าซชีววมวลนั้น จากบทความการวิจัยพบว่า หากปริมาณความชื้นในเชื้อเพลิงเพิ่มสูงขึ้น จะมีผลให้อัตราการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ลดลง แต่อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนสูงขึ้น ถึงแม้ว่าก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซมีเทนจะเป็นก๊าซที่ให้ค่าความร้อนสูงกว่า ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ก็ตาม แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนนั้น น้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการลดลงของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ เป็นเหตุให้ค่าความร้อนจากก๊าซชีววมวลลดลงเมื่อความชื้นในเชื้อเพลิงตั้งต้นมีอัตราส่วนสูงขึ้น (Zainal, 2001)

หลักการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง

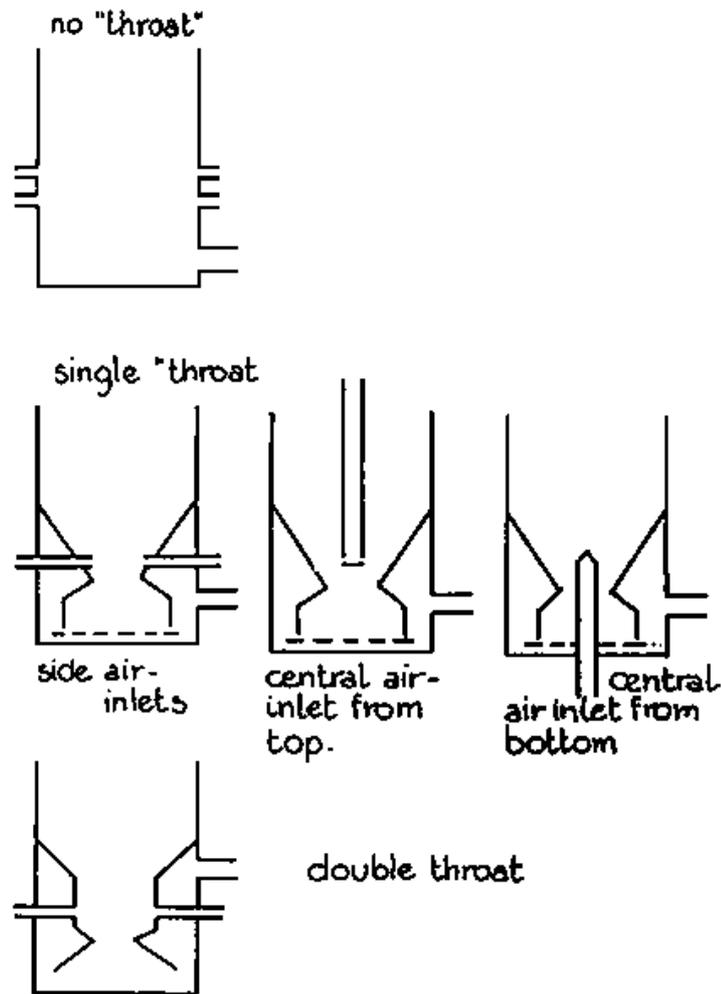
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) เสนอหลักการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลงไว้ตาม FAO (1986) เตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง เป็นเตาที่สามารถใช้ได้ดีกับเชื้อเพลิงไม้เนื่องจากเตาชนิดนี้เมื่อผลิตก๊าซออกมาได้จะมีน้ำมันดิน ออกมาน้อย

ซึ่งน้ำมันดินนี้จะไหลไปกับก๊าซที่ผลิตออกมาและไปเกาะติดอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ก๊าซไหลผ่าน และเตาชนิดนี้ยังเป็นเตาที่ติดตั้งและเดินเครื่องได้ง่าย จึงนิยมใช้เตาชนิดนี้ทั่วไป การออกแบบเตาผลิตก๊าซแบบไหลลงจะพิจารณาในโซนเผาไหม้ ซึ่งเป็นโซนที่ก่อให้เกิดความร้อนและเกิดการสังเคราะห์ก๊าซขึ้นและเป็นส่วนที่อากาศจากภายนอกจะไหลเข้าสู่เตาเพื่อให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิง การควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ให้กระจายตัวได้ดีจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก ซึ่งแนวทางที่จะช่วยให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในโซนนี้เป็นไปอย่างทั่วถึงจะทำให้ได้ 2 วิธีคือ การลดพื้นที่หน้าตัดภายในโซนหรือการทำคอคอดในช่วงโซนนี้ (throat concept) และการกระจายหัวจ่ายลมให้ทั่วถึงตามเส้นรอบวง โดยหลักการออกแบบเตาสามารถ สรุปได้ดังนี้

- กำหนดตัวแปรขึ้นมาหนึ่งตัว คือ ฮาร์ทโทลด์ (Hearth load : B) ซึ่งมีหน่วยเป็น m^3/cm^2-hr ซึ่งก็คืออัตราการไหลของอากาศที่เข้าภายในเตาผลิตก๊าซชีวมวลต่อพื้นที่หน้าตัดภายในโซนเผาไหม้โดยที่ B จะมีค่าแตกต่างกันระหว่าง แบบไม่มีคอคอด (no throat) แบบหนึ่งคอคอด (single throat) และแบบสองคอคอด (double throat) ซึ่งจะมีค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้ดังนี้ 0.03, 0.11 และ 0.4 ตามลำดับ

- ค่าความสูงของโซนรีดักชันควรมีค่ามากกว่า 20 cm แต่ไม่ควรเกิน 32 cm (ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากเตาผลิตก๊าซหลายเครื่อง)

- การแบ่งประเภทของคอคอดภายในเตาผลิตก๊าซแบบไหลลงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ แบบไม่มีคอคอด แบบหนึ่งคอคอด และแบบสองคอคอด ตามภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ประเภทของคอขวดภายในเตาผลิตก๊าซ

ที่มา : FAO (1986)

การหาค่าปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบปุย

ปุยที่ถูกปั่นเป็นเม็ดจะมีความชื้นอยู่ในเม็ดปุย จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการอบไล่ความชื้นออกจากเม็ดปุย ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการอบปุยจะมาจาก การเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาเผาไม้ฟืน ความร้อนนี้จะถูกถ่ายเทไปสู่เม็ดปุยภายในท่ออบปุย น้ำที่อยู่ในเม็ดปุยจะถูกทำให้ระเหยออกไป ปริมาณความร้อนที่ใช้ทั้งหมดภายในกระบวนการอบปุยนี้ จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เม็ดปุยเพื่อทำให้น้ำระเหยออกไป และความร้อนที่สูญเสียจากท่ออบปุย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่นับรวมความร้อนสูญเสียจากเตาอบปุยเพราะมีค่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความร้อนสูญเสียจากท่ออบปุย

ในการคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เม็ดปุ๋ยเพื่อให้ น้ำระเหยออกไป จะคำนวณโดยอาศัยสมการที่ (9) ซึ่งจะแบ่งการคิดออกเป็นสองส่วนคือ พลังงานความร้อนของการเปลี่ยนอุณหภูมิของสาร และพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนสถานะของสาร (Özsisik, 1985)

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T + \dot{m}L \quad (9)$$

พลังงานความร้อนของการเปลี่ยนอุณหภูมิของสารจะเป็นช่วงที่น้ำในเม็ดปุ๋ยมีการเปลี่ยนอุณหภูมิจาก อุณหภูมิเม็ดปุ๋ยถึงอุณหภูมิ 100 °C และพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนสถานะของสารจะเป็นช่วงที่น้ำมีอุณหภูมิ 100 °C เปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นไอ

ในส่วนการคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนสูญเสียจากท่ออบปุ๋ย จะคิดเป็นแบบ การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection) ในท่อทรงกระบอกยาวแนวนอน (Özsisik, 1985) ดังสมการที่ (10)

$$Q_{conv} = \pi DL(h_m)_{cyl}(T_w - T_\infty) \quad (10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในท่อทรงกระบอกจะสามารถหาได้จากสมการที่เกี่ยวข้องดังนี้ โดยที่

$$Gr = \frac{g\beta D^3(T_w - T_\infty)}{\nu^2} \quad (11)$$

เมื่อได้เลขกราชอฟแล้วก็จะนำไปหาเลขเรย์ลีได้จากสมการ(12)

$$Ra = Gr \times Pr \quad (12)$$

เมื่อได้ค่าเลขเรย์ลีก็จะนำไปหาค่าเลขนัสเซลได้จากสมการ(13)

$$Nu^{1/2} = 0.60 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1 + (0.599/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad (13)$$

จะใช้สมการ (13) ได้ในกรณี $10^{-4} < Ra < 10^{12}$ เมื่อได้ค่า Nu แล้วก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนภายในท่อทรงกระบอกได้จากสมการ (14)

$$Nu = \frac{(h_m)_{cyl} D}{k} \quad (14)$$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

1. อุปกรณ์วัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแบบบอมป์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter)
2. เทอร์โมคัปเปิลชนิด เค (Type K)
3. เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้า (digital multimeter)
4. อุปกรณ์จ่ายลมชนิดวอร์เทกซ์ (vortex blower)
5. อุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)
6. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดออริฟิศ (orifice)

จะขอกล่าวถึงในรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์วัดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแบบบอมป์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter)

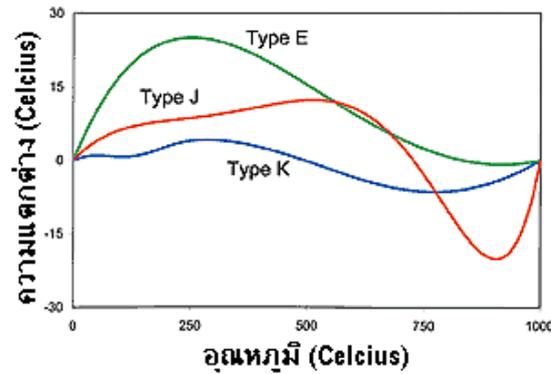
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง และเชื้อเพลิงเหลว โดยอาศัยหลักการทำงานด้วยกระบวนการปริมาณคงที่ เมื่อเชื้อเพลิงเกิดการสันดาปแล้วจะให้พลังงานความร้อนออกมาซึ่งจะกำหนดให้อยู่ในรูปของค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงต่อหน่วยน้ำหนัก เช่น บีที ยู/ปอนด์ กิโลแคลอรี/กิโลกรัม และ กิโลจูล/กิโลกรัม แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงส่วนประกอบภายนอกของบอมม์แคลอริมิเตอร์

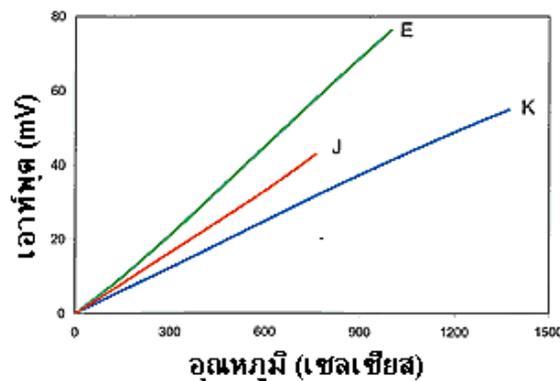
2. เทอร์โมคัปเปิลชนิด เค (Type K)

เป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิซึ่งสามารถวัดค่าอุณหภูมิ ได้ในช่วงที่กว้างคือมีค่าประมาณ $-250\text{ }^{\circ}\text{C} - 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วแต่ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งแต่ละชนิดจะมีผลการตอบสนองของช่วงอุณหภูมิในการวัดที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 15 ซึ่งการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลจะใช้งานร่วมกับเครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้า (digital multimeter)



ภาพที่ 15 ค่าความแตกต่างของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด
ที่มา : สุภัทรชัย (2546)

ภาพที่ 15 แสดงถึงความแตกต่างของเส้นโค้งการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลซึ่งทั้ง 3 ชนิดคือ Type E, Type K และ Type J เทียบกับเส้นตรงในย่านอุณหภูมิ 0- 1,000 °C ซึ่งทั้ง 3 ชนิดนี้ ใช้กันอยู่ในวงการอุตสาหกรรม จะเห็นได้ว่า Type K มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ความนิยมใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K จึงมากที่สุด เนื่องจากมีค่าความแปรปรวนของเอาต์พุตน้อยเมื่อมีการใช้งานในอุณหภูมิสูง ในขณะที่เอาต์พุตสัมพัทธ์ของเทอร์โมคัปเปิลทั้ง 3 ซึ่งแปรผันในฟังก์ชันของอุณหภูมิช่วง 0-1,400 °C แสดงอยู่ในภาพที่ 16 และเราก็จะเห็นได้ว่าเทอร์โมคัปเปิล Type E และ Type J ให้การตอบสนองที่ดีกว่า Type K และแม้ว่าจะด้วยสาเหตุนี้ความนิยมใน Type K ก็ยังมีมากกว่าเนื่องจากคุณลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ดีกว่านั่นเอง



ภาพที่ 16 ลักษณะการตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด
ที่มา : สุภัทรชัย (2546)

3. เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้า (digital multimeter)

เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้าหรือโดยทั่วไปเรียกว่าดิจิตอลมัลติมิเตอร์ถูกจัดไว้ในจำพวกมิเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ มิเตอร์จำพวกนี้ประกอบด้วย VTVM มิเตอร์ที่ใช้ FET ทรานซิสเตอร์ หรือ IC ข้อดีที่มิเตอร์จำพวกนี้เหนือกว่ามิเตอร์แบบทั่วไปคือ มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์สูงกว่าประมาณ $10\text{ M}\Omega$ หรือมากกว่า สำหรับเครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะใช้วัดอุณหภูมิซึ่งใช้งานร่วมกับ เทอร์โมคัปเปิลชนิด เค มีลักษณะเป็นดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 เครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

โดยมีคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องวัดปริมาณทางไฟฟ้า(สำหรับวัดอุณหภูมิ) มีดัง ต่อไปนี้

บริษัทผู้ผลิต	Uni-Trend International Limited
รุ่น	UT60G
ช่วงอุณหภูมิในการวัด	-40 – 1000°C
ค่าความถูกต้อง	-40 – 0°C :±(3%+4) 0 – 400°C :±(1%+3) 400 – 100°C :±(2%+10)
ความเร็วในการวัด	3 ครั้ง/วินาที
ขนาด (H×W×L)	177mm×85mm×40mm

4. อุปกรณ์จ่ายลมชนิดวอร์เท็กซ์ (vortex blower)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายลมให้กับเตาผลิตก๊าซโดยใช้งานร่วมกับอินเวอร์เตอร์ เป็นเครื่องเป่าลมชนิดวอร์เท็กซ์ มีขนาด 7.5 kW ใช้ไฟ 3 เฟส ซึ่งติดตั้งชุดใบพัดมาพร้อมมอเตอร์ ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 18 ลักษณะของเป่าลมชนิด วอร์เท็กซ์ (vortex blower)

5. อุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)

เป็นอุปกรณ์ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสสลับ โดยการเปลี่ยนความถี่ เมื่อความถี่ของไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนแปลง ความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามสมการ $N=120f/N$ โดยที่ N = ความเร็วรอบต่อนาที, f = ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าต่อวินาที และ P = จำนวนขั้วของมอเตอร์ ในการควบคุมนี้ถ้าต้องการแรงบิดคงที่ จะต้องรักษาให้อัตราส่วนของแรงดันต่อความถี่ที่จ่ายเข้ามอเตอร์คงที่ด้วย

โดยมีคุณลักษณะเฉพาะดังนี้

บริษัทผู้ผลิต

SQUARE D

รุ่น	ATV18D23N4
Input	380/460 V – 50/60 Hz 42.9/38.6 A
Output	380/460 V 29.3 A
Output frequency	0.5-320 Hz



ภาพที่ 19 ลักษณะอุปกรณ์ปรับค่าความถี่แบบอินเวอร์เตอร์ (inverter)

6. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดออร์ฟิส (Orifice)

เป็นอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลม โดยมีลักษณะเป็นแผ่นโลหะเจาะรูกลมตรงกลางขอบของรูจะเป็นมุมตัด นำไปวางขวางกระแสการไหลของของไหลในท่อ การคำนวณค่าอัตราการไหลจะใช้หลักการของการวัดค่าความดันที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลมชนิดออริฟิศ (orifice)

ในส่วนรายละเอียดในการคำนวณค่าอัตราการไหลจะศึกษาได้ในภาคผนวก ก

วิธีการ

1. การหาค่าปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบปฏ

ค่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบปฏจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ค่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เมล็ดปฏ และค่าความร้อนที่สูญเสียจากท่ออบปฏ โดยค่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เมล็ดปฏจะหาได้จากสมการ(9) และค่าความร้อนที่สูญเสียจากท่ออบปฏจะหาได้จากสมการ(10)-(14)

2. การหาค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการอบปฏ

ในกระบวนการอบปฏจะมีการใช้เชื้อเพลิงหลายชนิดแล้วแต่สถานที่และแหล่งที่มาของเชื้อเพลิง ซึ่งขึ้นอยู่กับ การตัดสินใจของโรงงานแต่ละ โรง สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง ในการหาค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงจะใช้เครื่อง บอมบ์แคลอริมิเตอร์ ในส่วนรายละเอียดในการทดลองของบอมบ์แคลอริมิเตอร์จะศึกษาได้ในภาคผนวก ก

3. การออกแบบ สร้างและทดสอบเตาผลิตก๊าซเพื่อใช้ในกระบวนการอบปฏ

หลังจากคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบปฏแล้ว จะนำค่าความร้อนที่ได้มาใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบเตาผลิตก๊าซให้เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่ต้องการใช้ในกระบวนการอบปฏ โดยอ้างอิงจากหลักการออกแบบตาม FAO (1986) หลังจากออกแบบเสร็จก็จะทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซ เพื่อทดสอบการทำงานในสภาวะการผลิตจริง และศึกษาข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปปรับปรุงการทำงานต่อไป

4. การเปรียบเทียบผลการใช้งานจริงระหว่างเตาเผาแบบเดิมกับเตาผลิตก๊าซชีวมวล

เมื่อทำการเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซทดแทนเตาเผาเดิมแล้ว จะนำผลจากการใช้งานเตาผลิตก๊าซชีวมวลมาเปรียบเทียบกับเตาเผาเดิม ในด้านอัตราการใช้เชื้อเพลิง ระยะเวลาคั้นทุนและคิมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เพื่อเปรียบเทียบความคุ้มค่าในการลงทุน

ผลการศึกษาและวิจารณ์

เพื่อให้สอดคล้องกับวิธีดำเนินการวิจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผลวิจัยจึงขอเสนอผลและวิจารณ์แบ่งเป็นหัวข้อดังนี้ คือ

การหาค่าปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบปุย

1. การหาค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เมล็ดปุย

ในกระบวนการอบปุยอินทรีย์ของบริษัท สักคีสยาม อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด เม็ดปุยที่ผ่านการป่นจะมีปริมาณความชื้นภายในเม็ดปุยประมาณ 13-15% เมื่อเม็ดปุยผ่านการอบออกมาแล้วจะมีค่าความชื้นเหลืออยู่ประมาณ 5-7% มีกำลังการผลิต 300 ตันต่อวัน โดยประมาณ และทำงาน 14 ชั่วโมงต่อวัน

โดยกำหนดให้อุณหภูมิอากาศภายนอกมีค่า 35°C (308.15 K) และอุณหภูมิน้ำเดือดมีค่า 100°C (373.15 K) คิดค่าความชื้นที่เหลืออยู่ในเม็ดปุยหลังจากอบแล้วที่ 5% (wet basis) ความชื้นภายในเม็ดปุยก่อนอบมีค่า 15% (wet basis) ปุย 300 ตันต่อวันเป็นผลผลิตที่ผ่านการอบและมีค่าความชื้น 5% ก็จะมีน้ำอยู่ในเม็ดปุย $300 \times 0.05 = 15$ ตันต่อวัน เนื้อเม็ดปุยแห้งจะมีน้ำหนัก 285 ตันต่อวัน ที่ความชื้น 15% (wet basis) ปุยจะมีน้ำหนัก = น้ำหนักปุยแห้ง / $(1 - 0.15) = 335.29$ ตันต่อวัน น้ำหนักน้ำภายในเม็ดปุยที่ต้องการให้ระเหยไปมีค่า $335.29 - 300 = 35.29$ ตันต่อวันจะสามารถหาค่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เม็ดปุยได้ดังสมการ (9)

มวลของน้ำที่ต้องการให้ระเหยออกจากเม็ดปุย 35.29 ตันต่อวัน จะมีค่า 0.7 kg/s ที่ชั่วโมงทำงาน 14 ชั่วโมงต่อวัน จะได้อัตราความร้อนที่ถ่ายเทสู่น้ำในเม็ดปุย มีค่า $1,772.82\text{ kJ/s}$ (kW) ซึ่งเป็นอัตราความร้อนที่ใช้ทั้งหมด 4 เตาเมื่อคิดเทียบเพียงหนึ่งเตาจะมีค่า 443.21 kJ/s (kW)

2. การหาค่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากท่ออบปุย

ในกระบวนการอบปุยท่อที่ใช้ในการอบปุยต่อหนึ่งเตาเผา จะใช้ 3 ท่ออบโดยแบ่งออกเป็นท่ออบร้อน 2 ท่อและท่ออบเย็น 1 ท่อ ในการคิดค่าความร้อนสูญเสียจากท่ออบปุยจะคิดจากท่ออบ

ปฏีเพียง 2 ท่อ โดยกำหนดให้อากาศร้อนที่เข้าที่ท่ออบปฏีมีอุณหภูมิ 900 °C (1,173.15 K) และอุณหภูมิปลายท่อมีค่า 100 °C (373.15 K) ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในท่อจะมีค่า 773.15 K โดยจะคิดการสูญเสียความร้อนเป็นแบบ การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection) ดังสมการ (10)

ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะสามารถหาได้จากสมการที่ (11) - (12) โดยที่

$$T_f = \frac{1}{2}(T_w + T_\infty) = 540.65 \text{ K}$$

เลขกราชอฟ (Gr) มีค่า 2.322×10^9 ทำให้ เลขเรย์ลี (Ra) มีค่า 1.579×10^9 ซึ่งจะนำค่าไปใช้ในการคำนวณต่อไปในสมการที่ (13)

จากสมการที่ (13) จะได้ค่า เลขนัสเซล (Nu) มีค่า 132.94 เมื่อได้ค่าเลขนัสเซลแล้วก็สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนได้จากสมการ (14)

เมื่อแทนค่าลงในสมการ (14) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่า $7.15 \text{ W/m}^2\text{-K}$ และแทนค่าลงในสมการ (10) จะได้ค่าความร้อนสูญเสียจากท่ออบปฏีมีค่า 125.34 kW ต่อหนึ่งท่ออบปฏีใน 1 เดคาเผาจะคิดค่าความร้อนสูญเสียจากท่ออบปฏี 2 ท่อ จึงทำให้มีค่าความร้อนสูญเสียจากท่ออบปฏีทั้งหมด 250.68 kW ต่อเดคาเผา 1 เดคา

จากผลการคำนวณค่าความร้อนถ่ายเทเข้าสู่สู่น้ำในเม็ดปฏีและค่าความร้อนสูญเสียจากท่ออบปฏี สามารถสรุปได้ว่าปริมาณความร้อนทั้งหมดที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการอบปฏีต่อ 1 เดคาเผาไม้พินจะมีค่า $443.21 + 250.68 = 693.89 \text{ kW}$ ซึ่งผลจากการคำนวณนี้เป็นการประมาณค่าความร้อนเบื้องต้น โดยกำหนดให้ใช้ค่าตัวแปรที่ง่ายต่อการคำนวณ เนื่องจากการวัดค่าความร้อนและค่าความร้อนสูญเสียในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยากที่จะวัดค่าได้ครบถ้วน

การหาค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการอบปฏี

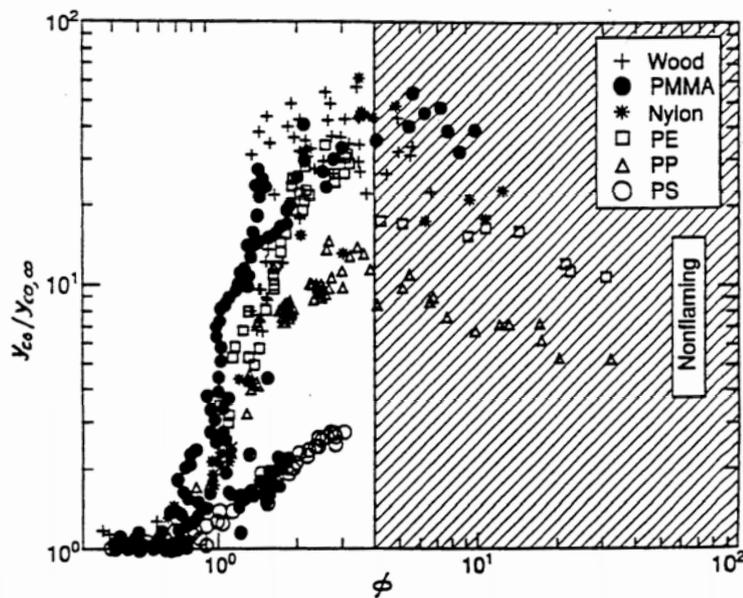
ในกระบวนการอบปฏีมีการใช้ไม้พินเป็นเชื้อเพลิง เผาในเตาเผาพินและนำความร้อนไปใช้ในการอบปฏีต่อไป ซึ่งไม้พินที่ใช้จะเป็นไม้ยางพารา มีขนาดยาวประมาณ 1.50 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลางหลายขนาดคละกันไป ในการหาค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงจะใช้อุปกรณ์ บอมบ์

แคลอรีมิเตอร์ จากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ เพื่อหาค่าความร้อนของตัวอย่างเชื้อเพลิงแข็ง ไม้ยางพาราให้ค่าความร้อนอยู่ที่ 3,127.4 cal/g (13,093.8 kJ/kg)

ในส่วนตัวอย่างการคำนวณค่าความร้อนจากการทดลองบอมบ์แคลอรีมิเตอร์สามารถศึกษาได้ในภาคผนวก ก

การออกแบบ สร้างและทดสอบเตาผลิตก๊าซเพื่อใช้ในกระบวนการอบปฏึก

เมื่อเราคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ต้องใช้ในกระบวนการอบปฏึกได้แล้ว ก็ต้องออกแบบเตาผลิตก๊าซที่สามารถผลิตก๊าซชีวมวลให้ได้ค่าความร้อนเท่ากับค่าความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบปฏึก โดยจากหลักการทำงานของเตาผลิตก๊าซชีวมวลจะอาศัยหลักการเผาไหม้เชื้อเพลิงในสภาวะอับอากาศ คือการเผาไหม้โดยที่ใช้อากาศน้อยที่สุด การเผาไหม้เชื้อเพลิงในสภาวะอับอากาศจะได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ปริมาณสูงสุดในช่วงที่อากาศในสภาวะที่เผาไหม้พอดีมีค่าเป็น 2-4 เท่าของอากาศที่ใช้จริง (Quintiere, 2006) เมื่อใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิง ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 กราฟแสดงปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้ที่ ϕ ต่างๆ

ที่มา : Quintiere (2006)

โดยที่ y_{CO} คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจริง

$y_{CO,\infty}$ คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นที่สภาวะเผาไหม้สมบูรณ์

ϕ คือ อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่เผาไหม้พอดีต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง

จากภาพที่ 21 ถ้าใช้ ϕ ในช่วง 2-4 จะทำให้เกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ออกมาประมาณ 20-60 เท่าของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นช่วงที่ได้ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุด

ตารางที่ 3 ตารางแสดงผลิตภัณฑ์ของการเผาไหม้ด้วยปริมาณอากาศเพียงพอ

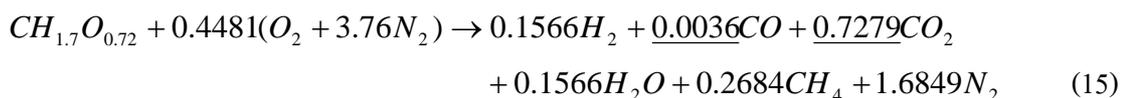
Substance	Formula	Actual Yields (g products/g mass lost)			
		CO ₂	CO	Soot	Other hydrocarbon
Wood (red oak)	CH _{1.7} O _{0.72}	1.27	0.004	0.015	0.001

ที่มา : Quintiere (2006)

เชื้อเพลิงที่ใช้ในเตาผลิตก๊าซจะเป็นไม้ยางพารา ซึ่งเป็นการยากที่จะระบุสูตรสมการเคมีได้อย่างแน่นอน จึงใช้สูตรสมการเคมีของไม้ โอ๊คแดง (red oak) เป็นหลักในการคำนวณหาค่าปริมาณอากาศที่จำเป็นต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ ได้ (stoichiometry) ซึ่งมีสูตรเคมีดังตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาเชื้อเพลิง CH_{1.7}O_{0.72} 1 mole จะมีมวล 25.22 g เพราะฉะนั้นจะมี

$$CO = \frac{0.004 \times 25.22}{28} = 0.0036 \text{ mole และ } CO_2 = \frac{1.27 \times 25.22}{44} = 0.7279 \text{ mole}$$

จะได้สมการการเผาไหม้ของไม้ กับอากาศที่สตอยคิโอมेटรีดังนี้



อากาศจะมีมวล 0.4481(32+3.76(28)) = 61.52 g เพราะฉะนั้นอัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศ (F/A)_{stoi} จะมีค่า 0.41 และกำหนดให้เตาผลิตก๊าซมีประสิทธิภาพ 75% แสดงว่าถ้าไม้ยางพาราให้ค่าความร้อนทั้งหมด 13,093.8 kJ/kg เตาผลิตก๊าซก็จะผลิตก๊าซที่ให้ค่าความร้อนได้ 9,820.35 kJ/kg แต่

ค่าความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการอบปี้มีค่า 693.89 kJ/s จำเป็นต้องใช้ก๊าซที่ผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซปริมาณ 0.069 kg/s เมื่อคิดจากกฎทรงมวล มวลเข้าต้องเท่ากับมวลออก

$$\dot{m}_{wood} = 0.41\dot{m}_{air} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{wood} + \dot{m}_{air} \quad (17)$$

$$\dot{m}_{gas} = 0.41\dot{m}_{air} + \dot{m}_{air} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{gas} = 1.41\dot{m}_{air} \quad (19)$$

จากสมการที่ (19) จะทำให้ทราบปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้สมบูรณ์ (stoichiometry) ซึ่งจะหาปริมาณอากาศที่ใช้จริงได้จาก $\phi = 2-4$ เมื่อทราบปริมาณอากาศที่ใช้จริง ก็จะทำอัตราการใช้ของอากาศที่ไหลผ่านเข้าไปในเตาได้ เมื่อกำหนดให้ค่าความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ที่อุณหภูมิ 35 °C มีค่า 1.1481578 kg/m³ (Özisik, 1985)

ตารางที่ 4 อัตราการใช้ของอากาศที่ ϕ ต่างๆ

ค่าความชื้น ภายในเม็ดปี้ (%)	$\phi = 2$		$\phi = 3$		$\phi = 4$	
	\dot{m}_{air} (kg/s)	Air inlet (m ³ /s)	\dot{m}_{air} (kg/s)	Air inlet (m ³ /s)	\dot{m}_{air} (kg/s)	Air inlet (m ³ /s)
13	0.0216	0.0188	0.0144	0.0125	0.0108	0.0094
14	0.0233	0.0203	0.0155	0.0135	0.0116	0.0101
15	0.0251	0.0218	0.0167	0.0145	0.0125	0.0109

ในการคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตก๊าซแบบไหลลง (downdraft gasifier) จะคำนวณจากอัตราการใช้ของอากาศที่ไหลผ่านเข้าไปในเตาดังตารางที่ 4 โดยการออกแบบเตาผลิตก๊าซในวิทยานิพนธ์นี้จะออกแบบเตาเป็นแบบไม่มีคอกวด เนื่องจากเพื่อความสะดวกในการสร้างและขนาดของไม้ปี้ที่ใช้ (มีขนาดประมาณ 8×10 cm) มีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่ใช้ในเตาผลิตก๊าซทั่วไป (มีขนาดประมาณ 5×10 cm) จึงต้องการพื้นที่ภายในเตาเพื่อให้ไม้ปี้ทรุดตัวได้เองโดย

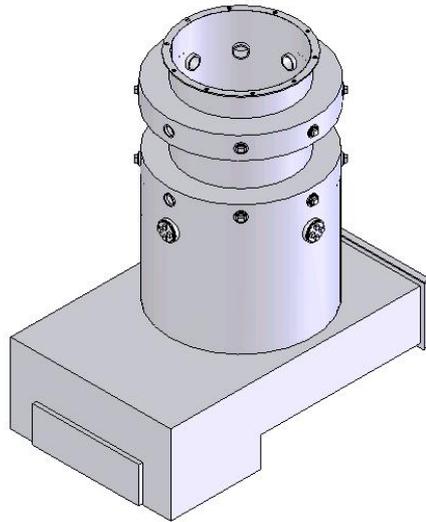
ไม่ไปขัดกับคอกขวด และเพื่อให้การกระจายตัวของอนุภาคนิวเคลียสในโซนสันดาปเป็นไปอย่างสม่ำเสมอก็จะมีกรวางหัวจ่ายลมให้รอบเส้นรอบวงและเพิ่มหัวจ่ายลมให้มากขึ้นเพื่อให้อากาศเข้าไปภายในเตาได้สม่ำเสมอทุกๆ จุด จากฮาร์ทโหลด (B) สำหรับแบบไม่มีคอกขวดจะมีค่ามากที่สุดที่ยอมรับได้คือ $0.03 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$ จะสามารถหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเตาได้ดังนี้

$$B = 0.03 = \frac{\text{Air inlet}}{\text{Surface area throat}} \quad (20)$$

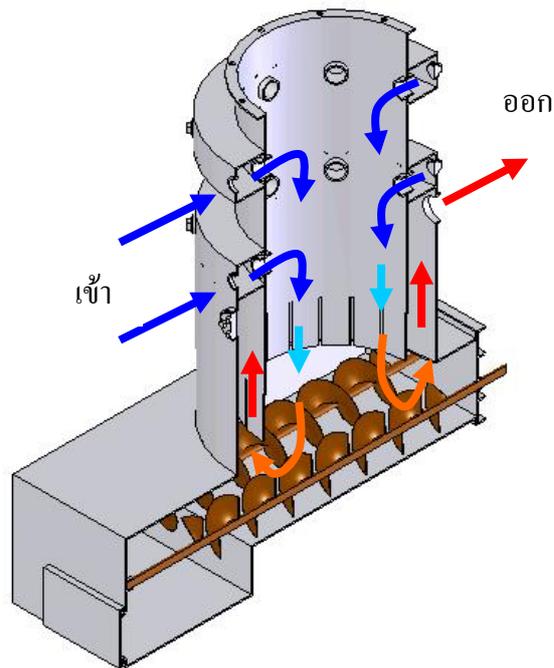
ตารางที่ 5 เส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตก๊าซ

ค่าความชื้น ภายในเม็ดย่อย (%)	$\phi = 2$		$\phi = 3$		$\phi = 4$	
	Surface area throat (cm^2)	Diameter throat (cm)	Surface area throat (cm^2)	Diameter throat (cm)	Surface area throat (cm^2)	Diameter throat (cm)
13	2,253.44	53.56	1,502.29	43.74	1,126.72	37.88
14	2,433.96	55.67	1,622.64	45.45	1,216.98	39.36
15	2,618.74	57.74	1,745.82	47.15	1,309.37	40.83

จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่คำนวณออกมาได้ จะเลือกใช้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 cm เนื่องจากเป็นค่าที่สะดวกในการสร้างเตาผลิตก๊าซ และมีค่าใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่คำนวณออกมาได้ กำหนดให้ค่าความสูงของโซนรีดักชัน มีค่าไม่เกิน 32 cm เมื่อได้ข้อกำหนดในการออกแบบแล้วก็ทำการสร้างแบบจำลอง 3 มิติขึ้นมาดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ลักษณะภายนอกของเตาผลิตก๊าซชีววมวล

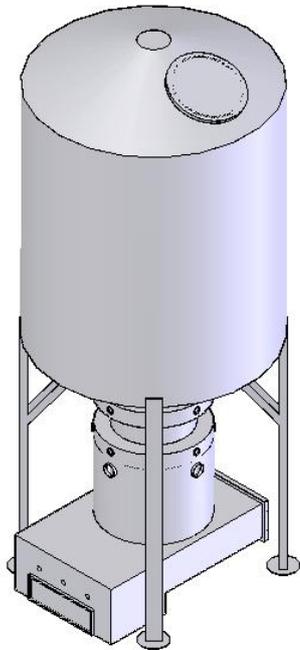


ภาพที่ 23 ลักษณะภายในและการไหลของอากาศภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวล

ในส่วนรายละเอียดตัวอย่างการคำนวณหาค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตก๊าซชีววมวล
ศึกษาได้ในภาคผนวก ก

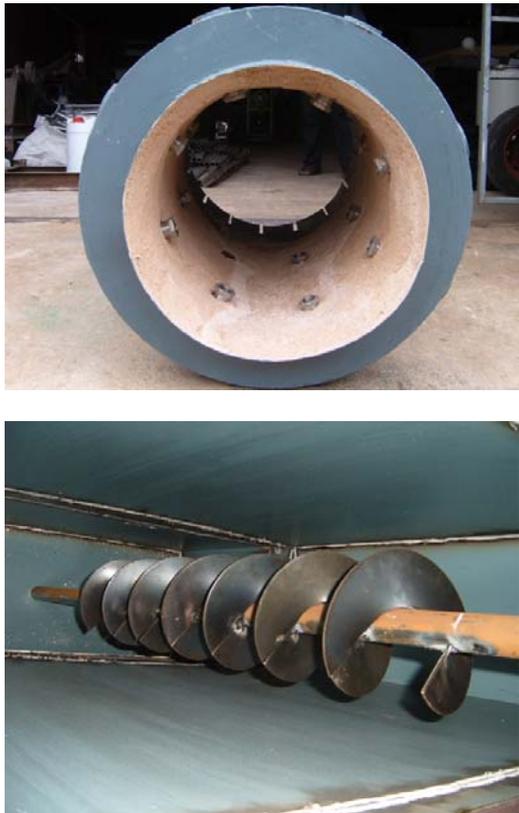
การออกแบบขั้นที่ 1

จากภาพที่ 23 เป็นลักษณะภายในของเตาผลิตก๊าซ ในการออกแบบจะมีหัวจ่ายลมอยู่สองชุดคือหัวจ่ายลมชุดบน และหัวจ่ายลมชุดล่างเพื่อเพิ่มปริมาณอากาศได้ในกรณีที่อากาศเข้าไปในเตาไม่เพียงพอ ซึ่งจะมีวาล์วเปิดปิดอยู่ที่ทั้งสองชุด ด้านล่างติดตั้งชุดสกรูไว้เพื่อใช้สกรูในการนำจี๊เข้าและถ่านออกจากเตา และยังใช้สกรูทำหน้าที่เป็นส่วนที่ดันให้เชื้อเพลิงไม่ตกลงมาเผาไหม้ด้านล่างของเตา เชื้อเพลิงจะถูกใส่จากทางด้านบนจึงควรมีถังบรรจุเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องในการเดินเครื่องไม่จำเป็นต้องเติมเชื้อเพลิงบ่อย จึงประยุกต์ถังบรรจุน้ำเก่ามาดัดแปลงเป็นถังบรรจุเชื้อเพลิงด้านบนดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ลักษณะภายนอกของเตาผลิตก๊าซชีวมวลที่ติดตั้งถังบรรจุเชื้อเพลิงแล้ว

เมื่อทำการออกแบบแล้วในขั้นต่อไปก็ทำการสร้างและติดตั้งในกระบวนการผลิตจริง ในส่วนการติดตั้งจะติดตั้งทดแทนเตาเผาแบบเดิมก่อนเพียงหนึ่งเตา ดังภาพที่ 26 โดยที่จะยังคงใช้เตาเผาแบบเดิมเป็นห้องเผาไหม้ของเตาผลิตก๊าซอยู่ เนื่องจากอยู่ในชั้นทดลองเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินในการเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซก็ยังสามารถที่จะใส่ไม้ฟืนเข้าไปในห้องเผาไหม้เดิม เพื่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุดต่อกระบวนการผลิต จากนั้นทดลองเดินเครื่อง โดยที่ยังไม่เก็บค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิง



ภาพที่ 25 ขั้นตอนในการสร้างเตาผลิตก๊าซชีววมวล



ภาพที่ 26 ลักษณะการติดตั้งและเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวลในกระบวนการผลิตจริง

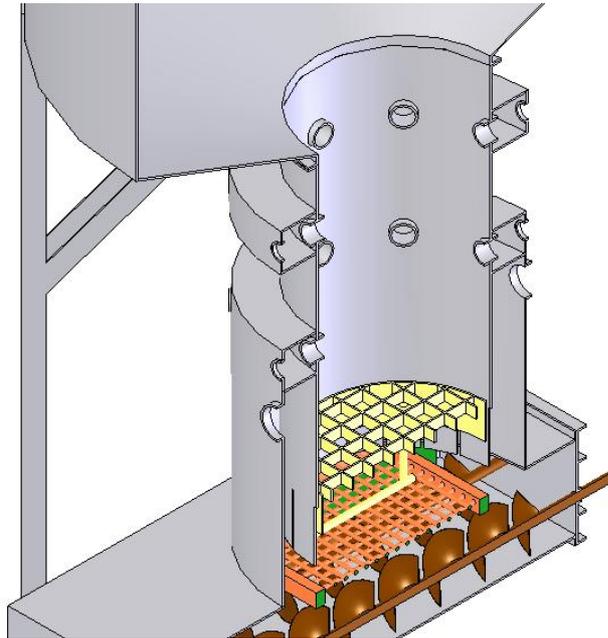
ผลการทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซ ปรากฏว่าเตาสามารถสร้างก๊าซชีววมวลออกมาได้ในระดับที่น่าพอใจ แต่เมื่อมีการทำงานไประยะหนึ่งปริมาณก๊าซชีววมวลเริ่มลดน้อยลง และตัวเตาเริ่มร้อนขึ้นโดยสังเกตเห็นจากเหล็กที่ตัวเตาเปลี่ยนเป็นสีแดง เนื่องจากไม้ฟืนที่เผาไหม้อยู่ได้ทรุดตัวลงมาเผาไหม้บริเวณด้านล่างของเตาเนื่องจากระยะห่างระหว่างสกรูกับขอบด้านในของเตามีค่ามาก ทำให้เกิดเป็นโพรงขึ้นมาบริเวณด้านล่างของเตา ปริมาณอากาศที่เข้าไปเผาไหม้จึงมากกว่าปกติ คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เป็นผลผลิตจากการเผาไหม้ในสภาวะอับอากาศก็เริ่มน้อยลงเนื่องจากการเผาไหม้เริ่มที่จะสมบูรณ์มากขึ้น เปลวไฟจากการเผาไหม้ที่ไม่ปรากฏในสภาวะอับอากาศ ก็เริ่มมีมากขึ้นเนื่องจากปริมาณอากาศที่เพิ่มมากขึ้นทำให้อุณหภูมิของตัวเตามีมากขึ้น



ภาพที่ 27 ลักษณะอุณหภูมิในเตาผลิตก๊าซชีววมวลที่สูงขึ้นเนื่องจากปริมาณอากาศมากเกินไป

การออกแบบขั้นที่ 2

จากผลการทดลองในขั้นที่ 1 สกรูที่อยู่บริเวณด้านล่างมีระยะห่างจากขอบเตาด้านในมากจึงแก้ไขด้วยการเพิ่มตระแกรง เข้าไปเหนือบริเวณสกรูเพื่อให้โซนการเผาไหม้อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 25 ซึ่งในการเพิ่มตระแกรงเข้าไปจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือตระแกรงชั้นบนและชั้นล่าง เพื่อสามารถใส่ตระแกรงเข้าไปภายในเตาได้จากช่องนำขี้เถ้าและถ่านออก



ภาพที่ 28 ลักษณะภายในของเตาที่เพิ่มตระแกรงเข้าไปแล้ว

เมื่อเพิ่มตระแกรงเข้าไปแล้วผลปรากฏว่าการเดินเครื่องเป็นไปด้วยดี ก๊าซที่ออกมาติดไฟดี แต่เมื่อทำงานไปสักระยะหนึ่งก๊าซก็เริ่มลดน้อยลงอีก โดยที่เตามีความร้อนเพิ่มขึ้นและเหล็กเปลี่ยนสีเป็นสีแดง แต่ตำแหน่งในสูงขึ้นจากเดิมซึ่งตรงกับบริเวณ โซนรีดักชัน แสดงว่าภายในเตาเกิดเป็นโพรงขึ้นมา แสดงว่าไม้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงได้เกิดการขัดตัวกันขึ้นภายในเตา เมื่อไม้ไม่ทรุดตัวลงมา ปริมาณอากาศที่เข้าไปก็ยังคงเท่าเดิมแต่ปริมาณเชื้อเพลิงลดลง ทำให้อากาศมีปริมาณเพียงพอต่อการเผาไหม้สมบูรณ์ ทำให้เกิดเป็นเปลวไฟขึ้นมาภายในเตา ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ติดไฟเริ่มลดน้อยลงทำให้ปริมาณก๊าซที่ออกไปมีน้อยลง และความร้อนที่ตัวเตามีมากขึ้น และปัญหาที่พบคือสกรูไม่สามารถหมุนได้เนื่องจากความร้อนทำให้ลูกปืนที่รองรับสกรูอยู่เกิดความเสียหาย



ภาพที่ 29 เกิดเปลวไฟลุกไหม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวลจนลามไปถึงท่อทางออกของก๊าซ

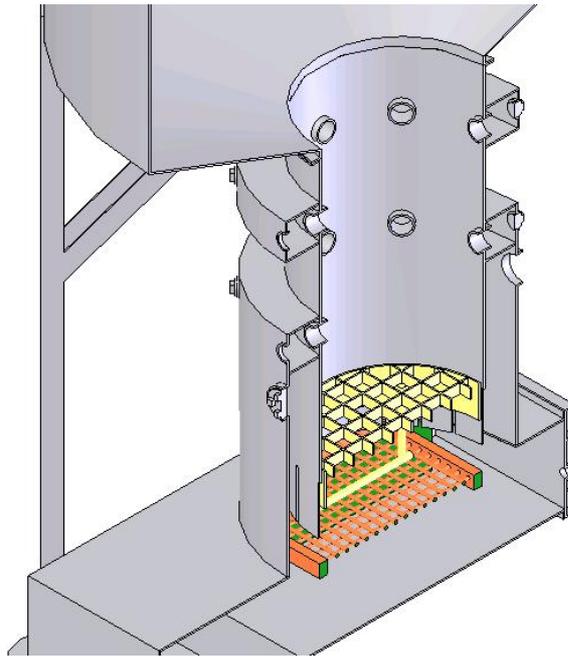


ภาพที่ 30 แสดงการติดขัดของสกรูและการรองรับไม้ของตะแกรงที่ใส่เข้าไป

การออกแบบขั้นที่ 3

จากผลการทดลองในขั้นที่ 2 จะแก้ไขโดยการวางกระทงบริเวณถังบรรจุเชื้อเพลิงด้านบน และวางกระทงบริเวณด้านล่างของถังบรรจุเชื้อเพลิง เพื่อให้การขัดตัวกันของไม้พินหลุดออกมา ทำให้ไม้ทรุดตัวลงตามปกติ และยังสามารถนำสกรูตรงบริเวณด้านล่างออก เนื่องจากยังไม่มีการต่อระบบส่ง

กำลังให้กับสกรู จึงไม่สามารถที่จะใช้สกรุนำขี้เถ้าและถ่านออกมาได้ และยังขวางการนำขี้เถ้าและถ่านออกจากเตาเมื่อมีการเปิดเตา ในการนำขี้เถ้าและถ่านออกจากเตาในขั้นการทดลองนี้จะเป็นการนำออกจากเตาในช่วงก่อนเดินเครื่องเตาตอนเช้า เพราะฉะนั้นในส่วนบริเวณด้านล่างของเตาจึงเปรียบเสมือนเป็นถังบรรจุขี้เถ้าและถ่านจากการเผาไหม้ไม้ เมื่อนำสกรูออกไปก็จะทำให้เพิ่มพื้นที่ในการเก็บขี้เถ้าและถ่านได้มากขึ้น



ภาพที่ 31 ลักษณะภายในเตาเมื่อนำสกรูออก



ภาพที่ 32 แสดงการกระทุ้งไม้ฟืนเพื่อให้ไม้ฟืนทรุดตัวลง

ผลการทดสอบ เมื่อมีการกระทันท์ไม้พินและนำสกรูออกทำให้การทำงานเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และสะดวกขึ้นในการเปิดเตาเพื่อนำน้ำเข้าและถ่านออก โดยที่ปริมาณก๊าซที่ออกจากเตามีความสม่ำเสมอมากขึ้น และสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องไม่ติดขัด

เตาผลิตก๊าซที่สร้างตามขนาดที่ออกแบบไว้ สามารถทำงานได้ดี แต่ก็มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นในระหว่างการทำงานของเตา เมื่อมีการแก้ไขปรับปรุงแล้ว การทำงานของเตาก็ดีขึ้น สามารถผลิตก๊าซออกมาได้สม่ำเสมอและอุณหภูมิของเปลวไฟที่ได้ออกมามีค่าสูงสุดประมาณ 900-950 °C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเปลวไฟของเตาเผาเดิมที่มีค่าอยู่ประมาณ 900-1,000 °C ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

และจากใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลแทนเตาเผาเดิมในการผลิตจริง เม็ดปุ๋ยที่ผ่านการอบแล้วมีค่าความชื้นอยู่ภายในเกณฑ์ที่บริษัท กำหนดคือไม่เกิน 5 % และได้คุณภาพของเม็ดปุ๋ยที่ดี คือ เม็ดปุ๋ยจับตัวแข็งดีไม่แตกตัวได้ง่าย ซึ่งเป็นผลจากการได้รับความร้อนในการอบปุ๋ยอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งต่างจากการอบปุ๋ยโดยใช้เตาพินแบบเดิม จากภาพ 33 เม็ดปุ๋ยที่ได้จากการอบโดยใช้เตาผลิตก๊าซมีสีอ่อนกว่าเม็ดปุ๋ยที่ได้จากการอบโดยใช้เตาพิน แสดงถึงความชื้นในเม็ดปุ๋ยที่ต่ำกว่า



ภาพที่ 33 เปรียบเทียบเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการอบจากเตาสองแบบ

ในส่วนรายละเอียดขนาดของเตาผลิตก๊าซสามารถศึกษาได้ในภาคผนวก ข

การเปรียบเทียบผลการใช้งานจริงระหว่างเตาเผาแบบเดิมกับเตาผลิตก๊าซ

1. การเปรียบเทียบอัตราการใช้เชื้อเพลิงระหว่างเตาเผาแบบเดิมกับเตาผลิตก๊าซ

เมื่อทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซหลังจากการปรับปรุงจนได้ปริมาณก๊าซที่สม่ำเสมอ และสามารถเดินเครื่องได้อย่างต่อเนื่อง ก็จะทดลองวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตจริงด้วยเตาผลิตก๊าซ กระบวนการอบปุ๋ยจะมีเตาเผาไม้ฟืนอยู่ 4 เตา ในการทดลองจะนำเตาผลิตก๊าซไปทดแทนเตาเผาไม้ฟืนเดิมเพียง 1 เตา โดยการวัดอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาฟืนเดิมจะใช้ค่าเฉลี่ยของปริมาณการใช้ไม้ฟืน 17,000 kg/day สำหรับเตาผลิตก๊าซจะทำการชั่งน้ำหนักไม้ก่อนการบรรจุลงไปภายในเตา และเริ่มจับเวลาตั้งแต่ก๊าซเริ่มติดไฟได้ดี จนกระทั่งเปลวไฟเริ่มเบาลง (อุณหภูมิของเปลวไฟเริ่มต่ำลง) ทำการทดลองซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ยอัตราการใช้เชื้อเพลิงออกมา โดยที่มีปริมาณไม้เฉลี่ย 650 kg และเวลาเฉลี่ยที่ผลิตก๊าซได้ 5 hr อัตราการสลายตัวของไม้จึงมีค่า 130 kg/hr (0.03611 kg/s) จากผลต่างความสูงของमानอมิเตอร์ที่ใช้งานคู่กับอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของลม (orifice) ขนาด 3 นิ้วมีค่า 15 cm ซึ่งคำนวณอัตราการไหลของอากาศได้จากสมการ (21) (Richard and Donald, 2000)

$$\dot{Q}_{air} = K_o A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{air}}} \quad (21)$$

สามารถคำนวณ Δp ได้จาก $\Delta p = \rho_{water} g \Delta h$ ซึ่ง Δh คือค่าผลต่างความสูงของน้ำภายใน मानอมิเตอร์ เมื่อแทนค่าลงในสมการ (21) จะได้ค่า $\dot{Q}_{air} = 0.0358 \text{ m}^3/\text{s}$ เพราะฉะนั้นอัตราการไหลโดยมวลของอากาศจะมีค่า 0.0411 kg/s และจากกฎทรงมวล มวลเข้าต้องเท่ากับมวลที่ออก เพราะฉะนั้นอัตราการไหลโดยมวลของก๊าซที่ได้จะเท่ากับ อัตราการสลายตัวของไม้+อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ มีค่า 0.07721kg/s โดยค่าความร้อนของก๊าซที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 5,323.26 kJ/kg (Foley and Barnard 1982) และ 4,668.57 kJ/kg (Zainal, 2001) ซึ่งจะหาประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซได้จากสมการ (22)

$$\eta_{the} = \frac{\dot{m}_{gas} \times HV_{gas}}{\dot{m}_{wood} \times HV_{wood}} \times 100\% \quad (22)$$

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้นำก๊าซไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบของก๊าซจึงไม่ทราบค่าความร้อนที่แท้จริงของก๊าซที่ผลิตออกมาได้จากเตาผลิตก๊าซ จึงใช้การประมาณค่าจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง คือใช้ค่าความร้อนของก๊าซมีค่า 5,323.26 kJ/kg (Foley and Barnard,1982) และ 4,668.57 kJ/kg (Zainal,2001) จากอัตราการใช้เชื้อเพลิง 130 kg/hr โดยประมาณ ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตก๊าซชีววมวลจะมีค่า 86.93 % และ 76.24 % ตามลำดับซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับที่กำหนดไว้ในขั้นตอนการออกแบบ จากสมการที่ (15) อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้พอดี $(A/F)_{\text{stoi}}$ มีค่า 2.439 และอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่ใช้จริง $(A/F)_{\text{actual}}$ มีค่า 1.138 ซึ่งทำให้ค่า ϕ มีค่า 2.143 เป็นค่าที่อยู่ในช่วง $\phi=2-4$ ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดปริมาณก๊าซ คาร์บอนมอนอกไซด์มากที่สุดตามทีออกแบบไว้ ตามตารางที่

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบก่อนและหลังการออกแบบ

	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ	ค่าที่ได้จากการทดลอง
η (%)	75	76.24 – 86.93
อัตราการผลิตก๊าซ (kW)	597.09 – 693.89	770.66 – 878.74
ϕ	2 – 4	2.143
เส้นผ่านศูนย์กลางคอคอด (cm)	37.88 – 57.74	50
ฮาร์ทโทลด (Hearth load: B) ($\text{m}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$)	0.03	0.066

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวแปรขั้นต้นที่ใช้ในการออกแบบเตาผลิตก๊าซชีววมวลกับค่าตัวแปรที่ได้หลังจากการทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวล ซึ่งค่าฮาร์ทโทลดที่ได้หลังจากการทดลองเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซชีววมวลมีค่ามากกว่าที่ใช้ในการออกแบบ เพราะมีการป้อนอากาศเข้าไปในเผาไหม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวลในปริมาณที่มากกว่าที่กำหนดไว้ในขั้นตอนออกแบบ แต่เตาผลิตก๊าซชีววมวลสามารถทำงานได้ดี และสามารถผลิตก๊าซออกมาได้ในปริมาณที่มาก ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการในการอบนึ่ง แสดงว่าปริมาณความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบนึ่งมีมากกว่าที่ประมาณไว้ ซึ่งอาจจะเกิดจากค่าความร้อนสูญเสียภายในท่ออบนึ่งที่มีมากกว่าที่คำนวณไว้

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบระหว่างเตาเผาแบบเดิมและเตาผลิตก๊าซ

	เตาเผาแบบเดิม (ต่อหนึ่งเตา)	เตาผลิตก๊าซ (ต่อหนึ่งเตา)
ปริมาณเชื้อเพลิง (กิโลกรัมต่อวัน)	4,250	1,820
ชั่วโมงการทำงาน (ต่อวัน)	14	14
อัตราการใช้เชื้อเพลิง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	303.57	130
ค่าเชื้อเพลิง (บาทต่อกิโลกรัม)	1.10	1.10
ค่าสับเชื้อเพลิง (บาทต่อกิโลกรัม)	-	0.1
รวมค่าเชื้อเพลิง (บาทต่อกิโลกรัม)	1.10	1.11
ค่าเชื้อเพลิง (บาทต่อชั่วโมง)	333.93	144.3
ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการเดินเครื่อง (บาทต่อชั่วโมง)	-	37.5
ค่าเชื้อเพลิงสุทธิ (บาทต่อชั่วโมง)	333.93	181.8

ต้นทุนในการผลิตจะลดลงเมื่อเปลี่ยนมาใช้เตาผลิตก๊าซแทนเตาเผาแบบเดิมโดยการเปรียบเทียบจากตาราง 7 ในการเดินเครื่องเตาผลิตก๊าซ จะใช้โบลเวอร์ ขนาด 7.5 kW ในการคำนวณค่าใช้จ่ายจะกำหนดให้โบลเวอร์ มีการใช้กำลังไฟฟ้าอย่างเต็มที่คือ 7.5 kW เพราะฉะนั้นจะใช้กำลังไฟฟ้า $7.5 \times 14 = 105$ kWh/day (คำนวณโดยคิดอัตราค่าไฟฟ้า 5 บาทต่อหน่วย)

2. การเปรียบเทียบทางด้านเศรษฐศาสตร์ของเตาผลิตก๊าซ

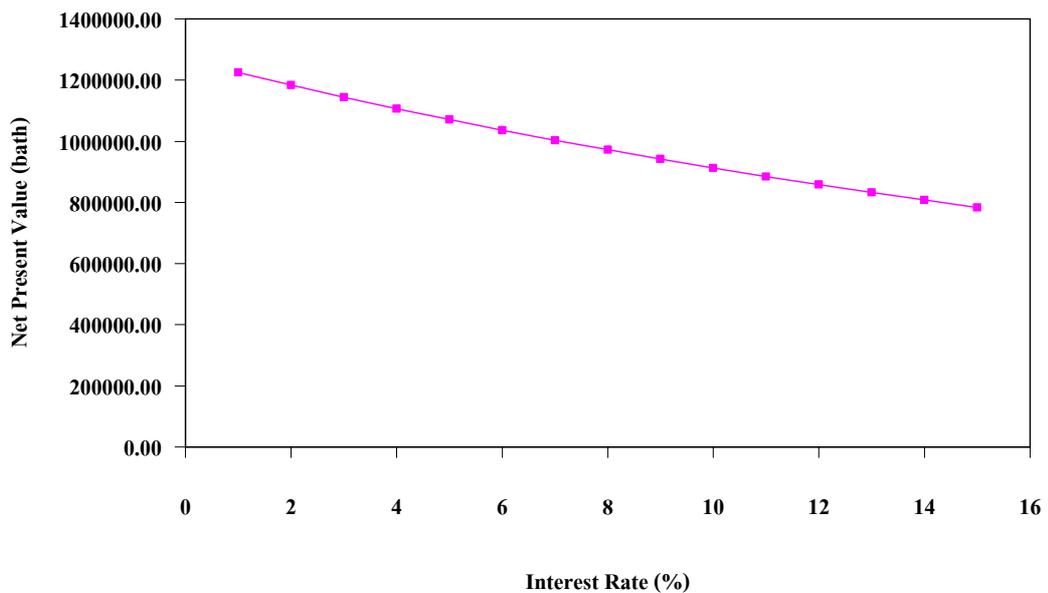
การเปรียบเทียบในส่วนของอัตราการใช้เชื้อเพลิงระหว่างเตาผลิตก๊าซชีวมวลและเตาเผาแบบเดิม จะเห็นผลประหยัดได้อย่างชัดเจนเมื่อเปลี่ยนมาใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลแทนดังตารางที่ 6 ในทางเศรษฐศาสตร์จะทำการคิดหาระยะเวลาในการคืนทุนอย่างง่ายและคิดมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นตัวบอกความคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่

ตารางที่ 8 ค่าเชื้อเพลิงที่สามารถประหยัดได้และระยะเวลาในการคืนทุนต่อหนึ่งเตา

ค่าเชื้อเพลิงที่ประหยัดได้	152.13	บาทต่อชั่วโมง
	2,129.82	บาทต่อวัน
เงินลงทุน	200,000.00	บาท
ระยะเวลาในการคืนทุน (โดยประมาณ)	120	วัน

จากตารางที่ 8 คิดการทำงานเป็น 24 วันต่อเดือน ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการอบปฏิตดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยเตาผลิตก๊าซชีววมวลใช้ไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิงน้อยกว่าเตาฟืนแบบธรรมดาถึงชั่วโมงละ 152.13 บาทต่อชั่วโมง และคิดเป็นเงิน 2,129.82 บาทต่อวันทั้งนี้คิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงที่ลดลง 45.57% และจากการประมาณค่าใช้จ่ายต่างๆ การใช้เตาผลิตก๊าซ จะคืนทุนในเวลาประมาณ 120 วันของการผลิตถ้าทดแทนเตาผลิตก๊าซ แทนเตาฟืนแบบเดิมทั้งหมด เนื่องจากปริมาณการใช้ไม้ฟืนลดลงวันละ 2,430 kg ต่อเตา และเนื่องจากการลดปริมาณการใช้ไม้ฟืนลงทำให้การตัดไม้ลดลงเป็นตามกัน

ในการคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิจะคิดเมื่อเตาผลิตก๊าซแทนเตาเผาเดิมเพียง 1 เตาซึ่งจะคิดโดยใช้อัตราดอกเบี้ยตั้งแต่ 1 – 15 % ในการคิดซึ่งจะได้ค่าดังแสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 กราฟแสดงมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่อัตราดอกเบี้ย 1- 15 %

จากภาพที่ 28 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่าเป็นบวกแสดงว่า การลงทุนในการสร้างเตาผลิตก๊าซ
มาใช้ทดแทนเตาเผาแบบเดิมมีความคุ้มค่าในการลงทุน

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการออกแบบเตาผลิตก๊าซโดยใช้หลักอ้างอิงตาม FAO (1986) โดยใช้ค่าฮาร์ทโบลด์ (B) มีค่า $0.03 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$ ค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่เผาไหม้พอดีต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง (ϕ) มีค่า 2 – 4 อัตราความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ต่อหนึ่งเตาเผา มีค่า 597.09 – 693.89 kW และคิดให้เตาผลิตก๊าซมีประสิทธิภาพ 75 % ซึ่งสามารถออกแบบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตก๊าซได้มีค่า 50 cm ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วง 37.88 – 57.74 cm ตามที่คำนวณไว้และได้ค่า ϕ 2.143 และอัตราความร้อนที่เตาผลิตก๊าซสามารถผลิตได้มีค่า 770.73 – 878.81 kW ซึ่งค่าทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อกำหนดขั้นต้นที่ใช้ในการออกแบบมีความถูกต้องในการใช้งานจริง

จากผลการทดลองใช้เตาผลิตก๊าซทดแทนเตาเผาแบบเดิม เม็ดปุยที่ผ่านการอบออกมามีความชื้นอยู่ในเกณฑ์ที่บริษัทกำหนดคือ มีค่าไม่เกิน 5 % และลักษณะของเม็ดปุยมีความแข็งแรงมากกว่าเม็ดปุยที่ผ่านการอบจากเตาเผาเดิม และสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปุยได้ถึง 45.7 % ซึ่งเป็นผลมาจากประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตก๊าซที่มีค่าประมาณ 76.24 % – 86.93 %

คิดเป็นเงินที่ประหยัดจากการใช้เชื้อเพลิงที่ลดลง 2,129.82 บาทต่อวัน ต่อเตาผลิตก๊าซเพียง 1เตา ด้วยผลประหยัดจากการใช้เชื้อเพลิงที่ลดลงสามารถที่จะคืนทุนในระยะเวลาประมาณ 120 วันทำการ ทำให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุนเนื่องจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิของเตาผลิตก๊าซมีค่าเป็นบวก

ข้อเสนอแนะ

เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเพื่อปรับปรุง และแก้ไขความคลาดเคลื่อนของผลการศึกษานั้น ผู้วิจัยได้สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยนี้มาสรุปในหัวข้อนี้

1. เนื่องจากในกระบวนการผลิตปุ๋ยของทางโรงงานจะมีการผลิตมากในช่วงหน้าปุ๋ย คือ ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ ถึงเดือนเมษายนซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณการใช้ปุ๋ยมาก เมื่อหมดช่วงหน้าปุ๋ยก็จะมีปริมาณการผลิตที่ลดลง ทำให้การทดลองใช้เตาผลิตก๊าซแทนเตาเผาเดิมในกระบวนการผลิตต้องรอจนกว่าจะหมดช่วงหน้าปุ๋ย เพื่อไม่ให้กระทบต่อกำลังการผลิตของโรงงาน

2. จากปัญหาการขาดตัวของไม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวล ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการผลิตก๊าซชีววมวล ความร้อนที่ได้จะมีค่าไม่คงที่ จึงควรจะหาแนวทางในการแก้ปัญหาการขาดตัวของไม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวล เพื่อสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการขาดตัวกันของไม้ภายในเตาผลิตก๊าซชีววมวล เพื่อช่วยให้การเดินเครื่องของเตาผลิตก๊าซมีความต่อเนื่องไม่ติดขัด

3. ในงานวิจัยนี้ยังขาดส่วนการวัดค่ามลพิษต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากไอเสียจากเผาไหม้ ทั้งจากเตาเผาเดิมและเตาผลิตก๊าซชีววมวล ซึ่งค่ามลพิษจากไอเสียที่วัดได้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์หรือไม่ จึงควรที่จะมีการวัดค่าปริมาณมลพิษที่เกิดขึ้นว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรเพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการเผาไหม้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

4. เตาผลิตก๊าซชีววมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเตาที่มีขนาดกำลังการผลิตจำกัด เมื่อมีความต้องการกำลังการผลิตที่มากขึ้นควรจะมีการศึกษาและพัฒนาขนาดของเตาผลิตก๊าซชีววมวลให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อรองรับปริมาณความต้องการที่มากขึ้นตาม

5. เชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไม้ยางพาราที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 – 8 cm ยาวประมาณ 10 cm ซึ่งในปัจจุบันไม้ยางพาราเริ่มหายากขึ้นเนื่องจากมีราคาแพงขึ้น และสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้อีก จึงควรนำเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาทดลองใช้กับเตาผลิตก๊าซชีววมวล รวมถึงการเปลี่ยนขนาดของเชื้อเพลิงที่ใช้ เพื่อนำข้อมูลของเชื้อเพลิงชนิดอื่นมาเปรียบเทียบกับไม้ยางพารา

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2547. พระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. 2518 และกฎกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ประกาศกรมวิชาการเกษตรที่เกี่ยวข้อง. กรุงเทพฯ.

ธงชัย มาลา. 2546. **ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ** : เทคนิคการผลิตและการใช้ประโยชน์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประเสริฐ เทียนนิมิตร และคณะ. 2544. **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น**. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

ปรีชา เกียรติกระจาย. 2529. **เทคโนโลยีการแปรรูปพลังงานจากไม้**. โครงการเผยแพร่ความรู้ทางวนผลิตภัณฑ์ ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

มุกดา สุขสวัสดิ์. 2543. **ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพ**. บริษัทโอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.

ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. 2544/2545. **ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร**. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
<http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=437>

สุภัทรชัย สิงห์บาง. 2546. **ข้อเปรียบเทียบระหว่าง RTD กับ เทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม**. Industrial Technology Review 109. แหล่งที่มา: http://industrial.se-ed.com/itr109/itr109_139, 20 พฤศจิกายน 2548.

อนุตร จำลองกุล. 2545. **พลังงานหมุนเวียน**. บริษัทไอ.เอส.พรินติ้ง เฮ้าส์, กรุงเทพฯ

FAO Corporate document repository. 1986. Wood gas as engine fuel, **FAO Forestry paper-72**.
www.fao.org/DOCREP/T0512E/Contents

- Figliola, Richard and Donald Beasley. 2000. **Theory and Design for Mechanical Measurements**, Lehigh Press Inc.
- Foley, G. and G. Barnard. 1982. Biomass gasification in developing countries. **A Final Report to the World Bank**, London. 161 p.
- McKendry, Peter. 2002a. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, **Bioresource Technology**. 83: 47-54.
- McKendry, Peter. 2002b. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, **Bioresource Technology**. 83: 55-63.
- Mujumdar, Arun S. 1987. **Handbook of Industrial Drying**, Marcel Dekker Inc.
- Quintiere, J. G. 2006. **Fundamentals of fire phenomena**. John Willey & Sons,ltd.
- Özisik, M. Necati. 1985. **Heat transfer a basic approach**. McGraw-Hill, Singapore.
- Zainal, Z.A. and el. 2001. Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials, **Energy Conversion and Management**. 42: 1499-1515

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เมล็ดป๊อป

จะมีข้อกำหนดในการคำนวณดังนี้

- ปริมาณป๊อปที่ผลิตได้ 300 ตันต่อวัน
- เตาเผาไม้ฟืนมีทั้งหมด 4 เตา
- มีชั่วโมงการทำงาน 14 ชั่วโมงต่อวัน
- อุณหภูมิเมล็ดป๊อปก่อนอบมีค่า 35 °C และอุณหภูมิที่น้ำเดือดมีค่า 100 °C
- ค่าความชื้นในเมล็ดป๊อปก่อนการอบมีค่า 15 % หลังจากอบแล้วมีค่าความชื้น 5%
- ค่าความชื้นเมล็ดป๊อปหลังจากอบแล้ว 5% จะมีน้ำอยู่ภายใน $300 \times 0.05 = 15$ ตันต่อวัน
- เนื้อเมล็ดป๊อปจริง ๆ จะมีน้ำหนัก $300 - 15 = 285$ ตันต่อวัน
- น้ำหนักป๊อปที่ค่าความชื้น 15% มีค่า $285 / (1 - 0.15) = 335.29$ ตันต่อวัน
- น้ำหนักป๊อปที่ต้องการให้ระเหยออก (m) ไปจะมีค่า $335.29 - 300 = 35.29$ ตันต่อวัน หรือมีค่า 0.7 กิโลกรัมต่อวินาที
- ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ (c) มีค่า 4.18 kJ/kg-K
- ค่าความร้อนแฝงจำเพาะของการกลายเป็นไอของน้ำ (L) มีค่า 2,260 kJ/kg

จะสามารถหาค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่เมล็ดป๊อปได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}c\Delta T + \dot{m}L \\ &= 0.7(4.18(100 - 35)) + 0.7(2,260) \\ &= 1,772.82 \text{ kJ/s} \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากท่ออบป๊อป

จะมีข้อกำหนดในการคำนวณดังนี้

- คิติดการสูญเสียค่าความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนแบบอิสระ

- คัดค่าความร้อนสูญเสียจากท่ออบปฏึกเพียง 2 ท่อจาก 3 ท่อ
- อุณหภูมิความร้อนที่เข้าท่ออบปฏึกมีค่า 900 °C (1,173.15 K)
- อุณหภูมิความร้อนปลายท่ออบปฏึกมีค่า 100 °C (373.15 K)
- ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในท่ออบปฏึก (T_w) จะมีค่า 773.15 K
- เส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่ออบปฏึก (D) มีค่า 0.8 เมตร
- ท่ออบปฏึกมีความยาว (L_{cyl}) 15 เมตร
- ค่าอุณหภูมิภายนอกโดยรอบเตา (T_∞) มีค่า 308.15 K
- ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในและภายนอกโดยรอบเตา $T_f = \frac{1}{2}(T_w + T_\infty)$ มีค่า 540.65 K
- ค่าความเร่งแวนดิ่ง (g) มีค่า 9.81 m/s²
- ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (β) มีค่า $\frac{1}{T_f} = 1.85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
- ค่าความหนืดคินเนแมติก (ν) ที่ $T_f = 540.65 \text{ K}$ มีค่า 43.14 m²/s
- เลขแพรนด์เทล (Pr) ที่ $T_f = 540.65 \text{ K}$ มีค่า 0.68
- ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ที่ $T_f = 540.65 \text{ K}$ มีค่า 0.043 W/m-K

จะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากท่อได้จากสมการ

$$Q = \pi DL(h_m)_{cyl}(T_w - T_\infty)$$

จากสมการนี้จำเป็นต้องทราบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (h_m) ซึ่งจะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g\beta D^3(T_w - T_\infty)}{\nu^2} \\ &= \frac{9.81 \times 1.85 \times 10^{-3} \times 0.8^3 (773.15 - 308.15)}{43.14^2} \\ &= 2.322 \times 10^9 \end{aligned}$$

เมื่อได้ค่าเลขกราชอฟ ก็จะนำไปหาค่าเลขเรย์ลีและเลขนัสเซลต่อไปดังสมการ

$$\begin{aligned} Ra &= Gr \times Pr \\ &= 2.322 \times 10^9 \times 0.68 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 1.579 \times 10^9 \\
 Nu^{1/2} &= 0.60 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.599 / Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \\
 &= 0.60 + \frac{0.387(1.579 \times 10)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.599}{0.68}\right)^{9/16}\right]^{8/27}} \\
 &= 132.94
 \end{aligned}$$

เมื่อได้เลขนัสเซลแล้วจะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 Nu &= \frac{(h_m)_{cyl} D}{k} \\
 132.94 &= \frac{(h_m)_{cyl} \times 0.8}{0.043} \\
 (h_m)_{cyl} &= 7.15 \text{ W/m}^2\text{-K}
 \end{aligned}$$

นำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนแทนค่าในสมการเพื่อหาค่าปริมาณความร้อนต่อหนึ่งท่ออบปฏู

$$\begin{aligned}
 Q &= \pi DL(h_m)_{cyl}(T_w - T_\infty) \\
 &= \pi \times 0.8 \times 15 \times 7.15(773.15 - 308.15) \\
 &= 125.34 \text{ kJ/s}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการอบปฏู

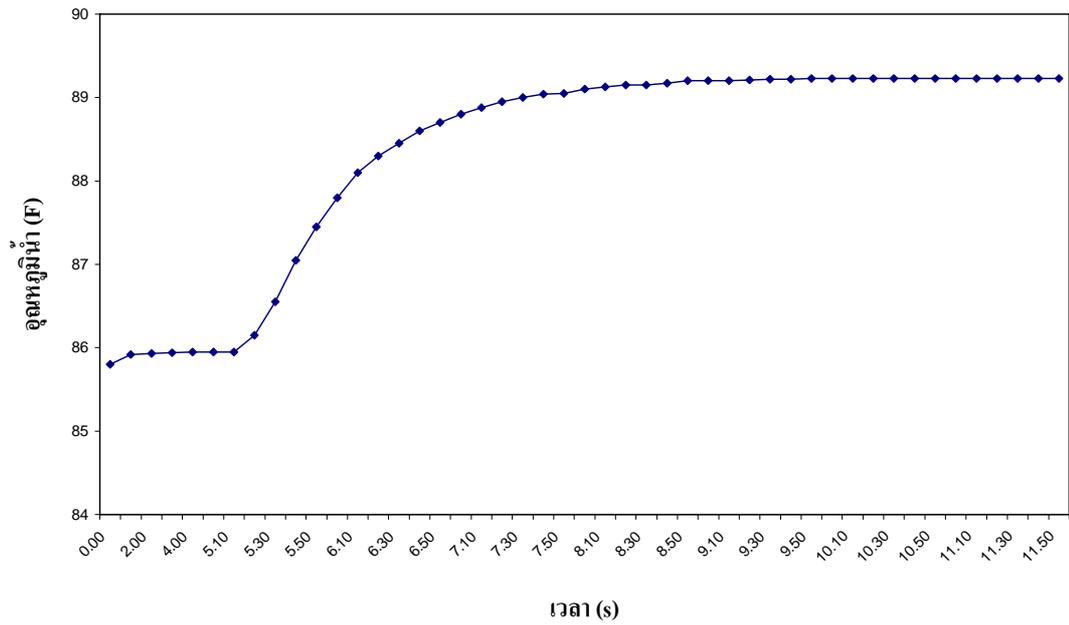
ในการหาค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงจะใช้ บอมบ์แคลอริมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการทดลอง ซึ่งใช้ไม่ย่างพาราเป็นเชื้อเพลิง มีข้อมูลในการทดลองดังนี้

- น้ำหนักเชื้อเพลิงที่นำมาหาค่าความร้อน 1 กรัม
- อุณหภูมิห้องขณะทำการทดลอง 27.5 °C
- น้ำหนักของน้ำที่ใช้ 1330 กรัม

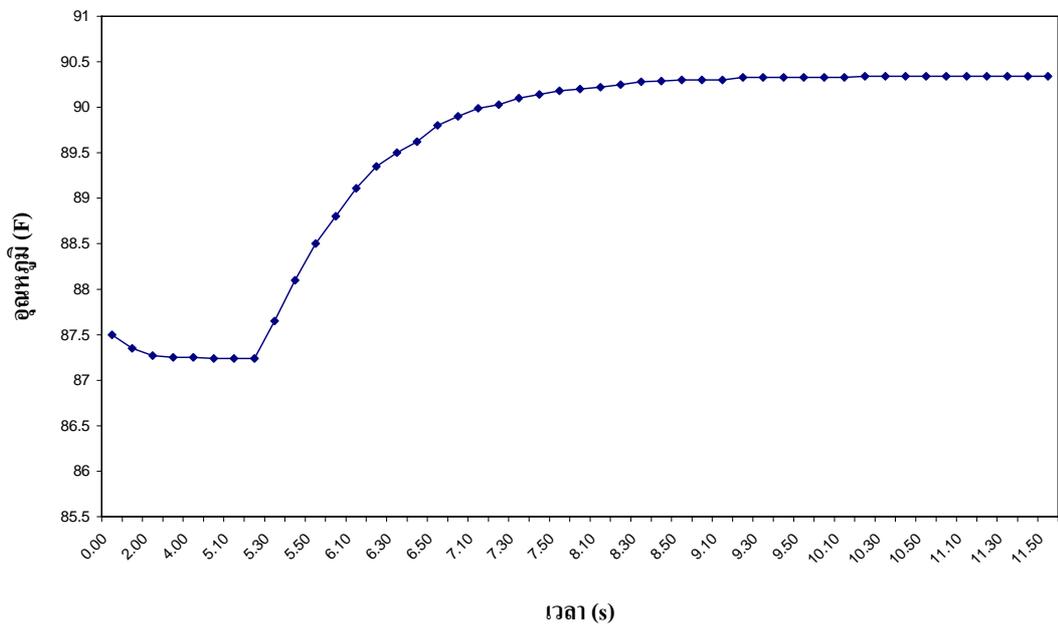
- Calorific value ของ fuse wire มีค่า 2.3 แคลอรี/ซม.
- ความยาวของ fuse wire ที่ใช้ 10 เซนติเมตร
- Average specific heat 1 แคลอรี/กรัม-°C
- Water equivalent ของบอมบ์แคลอรีมิเตอร์มีค่า 430 กรัม

ตารางผนวกที่ ก1 อุณหภูมิน้ำจากการทดลอง

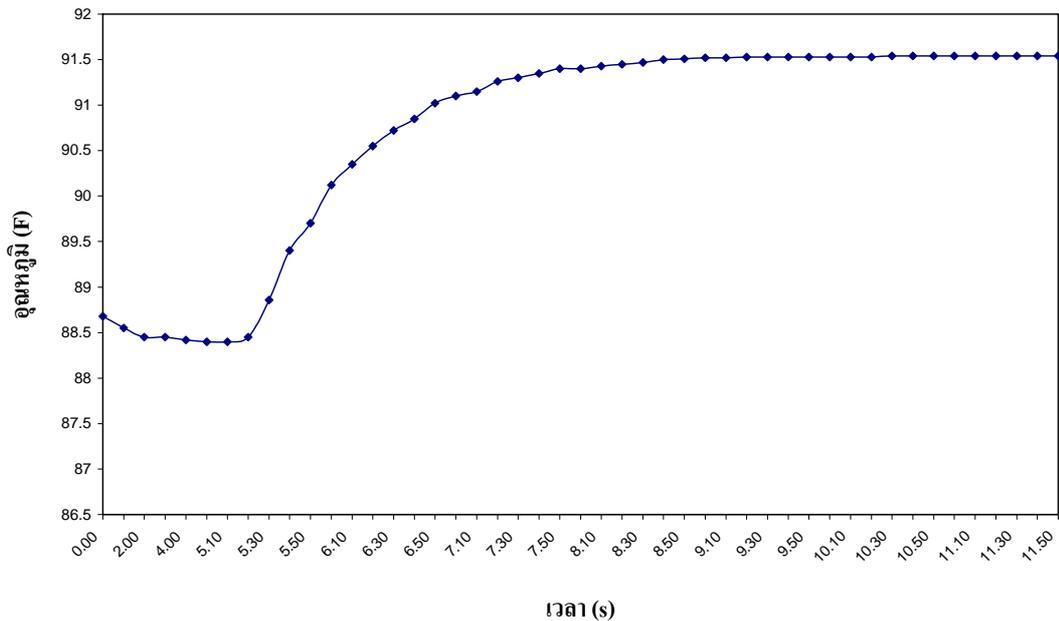
เวลา (s)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เวลา (s)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0.00	85.8	87.5	88.68	8.10	89.13	90.22	91.43
1.00	85.92	87.35	88.55	8.20	89.15	90.25	91.45
2.00	85.93	87.27	88.45	8.30	89.15	90.28	91.47
3.00	85.94	87.25	88.45	8.40	89.17	90.29	91.5
4.00	85.95	87.25	88.42	8.50	89.2	90.3	91.51
5.00	85.95	87.24	88.4	9.00	89.2	90.3	91.52
5.10	85.95	87.24	88.4	9.10	89.2	90.3	91.52
5.20	86.15	87.24	88.45	9.20	89.21	90.33	91.53
5.30	86.55	87.65	88.86	9.30	89.22	90.33	91.53
5.40	87.05	88.1	89.4	9.40	89.22	90.33	91.53
5.50	87.45	88.5	89.7	9.50	89.23	90.33	91.53
6.00	87.8	88.8	90.12	10.00	89.23	90.33	91.53
6.10	88.1	89.11	90.35	10.10	89.23	90.33	91.53
6.20	88.3	89.35	90.55	10.20	89.23	90.34	91.53
6.30	88.45	89.5	90.72	10.30	89.23	90.34	91.54
6.40	88.6	89.62	90.85	10.40	89.23	90.34	91.54
6.50	88.7	89.8	91.02	10.50	89.23	90.34	91.54
7.00	88.8	89.9	91.1	11.00	89.23	90.34	91.54
7.10	88.88	89.99	91.15	11.10	89.23	90.34	91.54
7.20	88.95	90.03	91.26	11.20	89.23	90.34	91.54
7.30	89	90.1	91.3	11.30	89.23	90.34	91.54
7.40	89.04	90.14	91.35	11.40	89.23	90.34	91.54
7.50	89.05	90.18	91.4	11.50	89.23	90.34	91.54
8.00	89.1	90.2	91.4				



ภาพผนวกที่ ก 1 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของน้ำในถังแคลอรีมิเตอร์จากการทดลองครั้งที่ 1



ภาพผนวกที่ ก 2 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของน้ำในถังแคลอรีมิเตอร์จากการทดลองครั้งที่ 2



ภาพผนวกที่ ก3 กราฟแสดงค่าอุณหภูมิของน้ำในถังแคลอรีมิเตอร์จากการทดลองครั้งที่ 3

สามารถหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้จากสมการ

$$Q_{bomb} = \frac{(M_w C_{UN} \Delta T)}{fuelmass} - \text{Heat of combustion of fuse wire}$$

โดยที่ Q_{bomb} คือ ปริมาณความร้อนต่อ 1 กรัมเชื้อเพลิง
 M_w คือ น้ำหนักของน้ำบวกกับ Water equivalent ของแคลอรีมิเตอร์ (g)
 C_{UN} คือ average specific heat ของน้ำมีค่า 1 แคลอรี/กรัม - °C
 ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง °C
 Heat of combustion of fuse wire คือ ค่าความร้อนของ fuse wire × ความยาวของ fuse wire

โดย ΔT คือค่าของอุณหภูมิสูงสุด - ค่าอุณหภูมิต่ำที่สุดของน้ำในแคลอรีมิเตอร์ในการทดลองแต่ละครั้ง มีค่า 3.43 °F (1.91 °C), 3.10 °F (1.72 °C) และ 3.14 °F (1.74 °C) ตามลำดับ และลวด fuse wire ที่เหลือจากการทดลองมีความยาวน้อยมากจึงคิดให้ลวด fuse wire ถูกเผาไหม้หมดทั้ง 10 เซนติเมตร

$$Q_{bomb} = \frac{((1330 + 430) \times 1.91) - 23}{1}$$

$$= 3,338.6 \text{ แคลอรี/กรัม}$$

ทำการคำนวณซ้ำอีกสองการทดลอง มีค่า 3,004.2 และ 3,039.4 แคลอรี/กรัม ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ย 3,127.4 แคลอรี/กรัม หรือมีค่าประมาณ 13,093.8 kJ/kg

การคำนวณหาค่าขนาดของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง

เมื่อทราบค่าปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงจากการทดลองบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ จะนำมาหาค่าขนาดของเตาผลิตก๊าซได้ โดยมีข้อกำหนดดังนี้

- ค่าความร้อนของไม้เชื้อเพลิงมีค่า 13,093.8 kJ/kg
- เตาผลิตก๊าซมีประสิทธิภาพ 75%
- อัตราส่วนเชื้อเพลิงต่ออากาศมีค่า 0.41
- ฮาร์ทโพลด์ (B) มีค่า $0.3 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$
- ค่าความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 35°C มีค่า 1.1481578 kg/m^3

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากเตาผลิตก๊าซชีววมวลมีค่า

$$13,093.8 \times 0.75 = 9820.35 \text{ kJ/kg}$$

ค่าความร้อนที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการอบปฏิต่อหนึ่งเตาเผามีค่า 443.21 kJ/s และมีค่าความร้อนสูญเสียต่อหนึ่งเตาเผา มีค่า $125.34 \times 2 = 250.68 \text{ kJ/s}$ ซึ่งรวมกันมีค่า 693.89 kJ/s ก็จะมีน้ำหนักก๊าซที่จะต้องผลิตได้จากเตาผลิตก๊าซ

$$\dot{m}_{gas} = \frac{693.89}{9820.35} = 0.076 \text{ kg/s}$$

จากกฎทรงมวล โดยคิดให้มวลอากาศและมวลเชื้อเพลิงที่เข้าสู่เตาผลิตก๊าซจะเท่ากับมวล

ก๊าซที่ออกจากเตาผลิตก๊าซ

$$\dot{m}_{wood} = 0.41\dot{m}_{air}$$

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{wood} + \dot{m}_{air}$$

$$\dot{m}_{gas} = 0.41\dot{m}_{air} + \dot{m}_{air}$$

$$\dot{m}_{gas} = 1.41\dot{m}_{air}$$

เพราะฉะนั้นอัตรามวลอากาศที่ต้องใช้ในกระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์จะมีค่า

$$\dot{m}_{air} = \frac{0.0706}{1.41} = 0.0501 \text{ kg/s}$$

กำหนดให้ค่าอัตราส่วนอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่เผาไหม้พอดีต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง (ϕ) มีค่า 4 ก็จะทำให้ได้อัตรามวลอากาศที่ต้องใช้จริงในการเผาไหม้มีค่า

$$\dot{m}_{air} = \frac{0.0501}{4} = 0.012525 \text{ kg/s}$$

เมื่อได้ค่าอัตรามวลอากาศที่จำเป็นจะต้องใช้ในกระบวนการเผาไหม้จริงก็จะทำให้ทราบค่าอัตราการไหลของมวลของอากาศมีค่า

$$\text{อัตราการไหลของอากาศ} = \frac{\dot{m}_{air}}{\rho_{air}} = \frac{0.012525}{1.1481578} = 0.010909 \text{ m}^3/\text{s}$$

อัตราการไหลของอากาศมีค่า $0.010909 \text{ m}^3/\text{s}$ ซึ่งจะมีค่า $39.2724 \text{ m}^3/\text{hr}$ เมื่อได้ค่าอัตราการไหลของอากาศแล้วก็จะนำไปหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตก๊าซได้จากสมการ

$$B = 0.03 = \frac{\text{Air inlet}}{\text{Surface area throat}}$$

$$\text{Surface area (throat)} = \frac{39.2724}{0.03} = 1,309.37 \text{ cm}^2$$

$$\text{Diameter (throat)} = \sqrt{\frac{1,309.37 \times 4}{\pi}} = 40.83 \text{ cm}$$

ทำการคำนวณซ้ำโดยเปลี่ยน ค่าอัตราส่วนอัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่เผาไหม้พอดี ต่ออากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง (ϕ) เป็น 2 และ 3 และเปลี่ยนค่าความชื้นของไม้ที่ 13-14 %

การคำนวณหาค่าอัตราการไหลของอากาศ

เป็นการคำนวณหาค่าอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าเตาผลิตก๊าซชีววมวล จะคำนวณจากระดับน้ำจากमानometer ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้

- อุปกรณ์วัดความเร็วลมแบบออร์ฟิซขนาด 3 นิ้ว
- ผลต่างของระดับน้ำในमानometer (Δh) มีค่า 15 cm
- สัมประสิทธิ์การไหลของอากาศ (K_o) มีค่า 0.62
- พื้นที่คอคออดภายในออร์ฟิซ (A) มีค่า 0.00114 m^2 (เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.81 cm)
- ค่าความหนาแน่นของอากาศ (ρ_{air}) ที่อุณหภูมิ $35 \text{ }^\circ\text{C}$ มีค่า 1.1481578 kg/m^3
- ค่าความหนาแน่นของน้ำ (ρ_{water}) มีค่า $1,000 \text{ kg/m}^3$

$$\begin{aligned} \Delta p &= \rho_{water} g \Delta h \\ &= 1,000 \times 9.81 \times 0.15 \\ &= 1471.5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

ค่าผลต่างความดันทั้งสองด้านมีค่า 1,471.5 Pa (1.4715 kPa) เมื่อได้ค่าผลต่างความดันแล้วก็นำไปหาค่าอัตราการไหลของอากาศได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{air} &= K_o A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_{air}}} \\ &= 0.62 \times 0.00114 \times \sqrt{\frac{2 \times 1,471.5}{1.1481578}} \\ &= 0.0358 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

จะได้ค่าอัตราการไหลของอากาศ $0.0358 \text{ m}^3/\text{s}$ (0.0411 kg/s)

การคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตก๊าซ

สามารถหาประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาผลิตก๊าซโดยมีข้อกำหนดและสมการดังนี้

- อัตราการไหลโดยมวลของอากาศ (\dot{m}_{air}) มีค่า 0.0411 kg/s
- อัตราการไหลโดยมวลของเชื้อเพลิง (\dot{m}_{wood}) มีค่า 0.03611 kg/s
- ค่าความร้อนของไม้เชื้อเพลิง (HV_{wood}) มีค่า $13,093.8 \text{ kJ/kg}$
- ค่าความร้อนของก๊าซ (HV_{gas}) มีค่า $5,323.26 \text{ kJ/kg}$ และ $4,668.57 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned}\dot{m}_{gas} &= \dot{m}_{air} + \dot{m}_{wood} \\ &= 0.0411 + 0.03611 \\ &= 0.07721 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

จากกฎทรงมวล อัตราการไหลโดยมวลของก๊าซมีค่าเท่ากับอัตราการสลายตัวของไม้รวมกับอัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่เข้าเตาผลิตก๊าซ จะมีค่า 0.07721 kg/s

$$\begin{aligned}\eta_{the} &= \frac{\dot{m}_{gas} \times HV_{gas}}{\dot{m}_{wood} \times HV_{wood}} \times 100\% \\ &= \frac{0.07721 \times 5,323.26}{0.03611 \times 13,093.8} \times 100\% \\ &= 86.93\%\end{aligned}$$

เมื่อคิดค่าความร้อนของก๊าซมีค่า $5,323.26 \text{ kJ/kg}$ เตาผลิตก๊าซมีประสิทธิภาพทางความร้อน 86.93% และถ้าค่าความร้อนของก๊าซมีค่า $4,668.57 \text{ kJ/kg}$ เตาผลิตก๊าซจะมีประสิทธิภาพ 76.24% และการหาค่าอัตราการผลิตก๊าซจะต้องหาค่า factor เพื่อให้เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซจากการใช้ไม้ยางพารา 1 kg เหมือนกัน

$$\begin{aligned}\text{Factor} &= \frac{\dot{m}_{wood} + \dot{m}_{air}}{\dot{m}_{wood}} \\ &= \frac{0.03611 + 0.0411}{0.03611}\end{aligned}$$

$$= 2.138$$

$$\begin{aligned} \text{อัตราการผลิตก๊าซ} &= \text{Factor} \times \dot{m}_{gas} \times HV_{gas} \\ &= 2.138 \times 0.07721 \times 5,323.26 \\ &= 878.74 \text{ kW} \end{aligned}$$

ทำการคำนวณซ้ำโดยใช้ค่าความร้อนของก๊าซมีค่า 4,668.57 kJ/kg ซึ่งจะทำให้ได้ค่าอัตราการผลิตก๊าซ มีค่า 770.66 kW

ในการคำนวณค่า ฮาร์ทโทโหลด (Hearth load: B) หลังจากการทดลองใช้งานเตาผลิตก๊าซชีวมวลจริง ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาผลิตก๊าซมีค่า 50cm และมีอัตราการไหลโดยมวลของอากาศมีค่า 0.0358 m³/s (128.88 m³/hr)

$$\begin{aligned} B &= \frac{\text{Air inlet}}{\text{Surface area throat}} \\ &= \frac{128.88}{\pi \times \frac{50^2}{4}} \\ &= 0.066 \text{ m}^3/\text{cm}^2\text{-hr} \end{aligned}$$

การคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

ตัวอย่างการคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิมีข้อกำหนดดังนี้

- อายุการใช้งานของเตาผลิตก๊าซ 5 ปี
- เงินลงทุน (I) มีค่า 200,000 บาท
- ไม่มีมูลค่าซาก
- อัตราภาษี 30%
- ค่าบำรุงรักษา 20,000 บาทต่อปี
- ค่าไฟฟ้า 151,200 บาทต่อปี
- ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้จะคิดจากราคาไม้ฟืนที่ลดลง ซึ่งมีค่า 613,388.16 บาทต่อปี
- ค่าอัตราดอกเบี้ยที่ใช้ในการคำนวณจะใช้ 1 – 15 % ในการคำนวณ

$$\begin{aligned}\text{ค่าเสื่อม} &= \frac{200,000}{5} \\ &= 40,000 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ผลประหยัด} &= 613,388.16 - (151,200 + 20,000 + 40,000) \\ &= 402,188.16 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Cash flow} &= 402,188.16(1 - 0.3) + 40,000(0.3) \\ &= 293,531.712 \text{ บาทต่อปี}\end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ก2 ตารางแสดงการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ

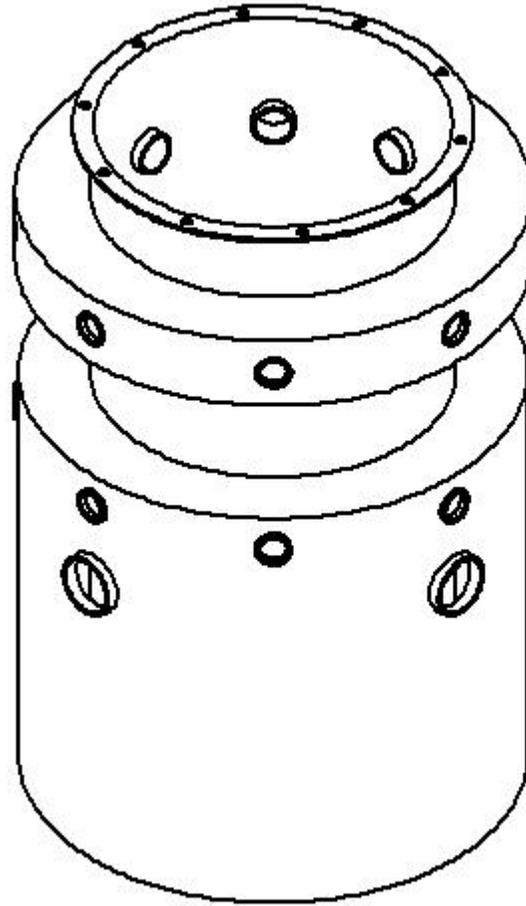
Year/Cost (บาท)	0	1	2	3	4	5
ผล ประหยัด	-	402,188.16	402,188.16	402,188.16	402,188.16	402,188.16
ค่าเสื่อม	-	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000
Cash flow	-200,000	293,531.712	293,531.712	293,531.712	293,531.712	293,531.712

$$\begin{aligned}NPV &= \sum_j^N \frac{CashFlow}{(1+i)^j} - I \\ &= 293,531.712(P/A, 1\%, 5) - 200,000 \\ &= 293,531.712(4.853) - 200,000 \\ &= 1,224,509.40 \text{ บาท}\end{aligned}$$

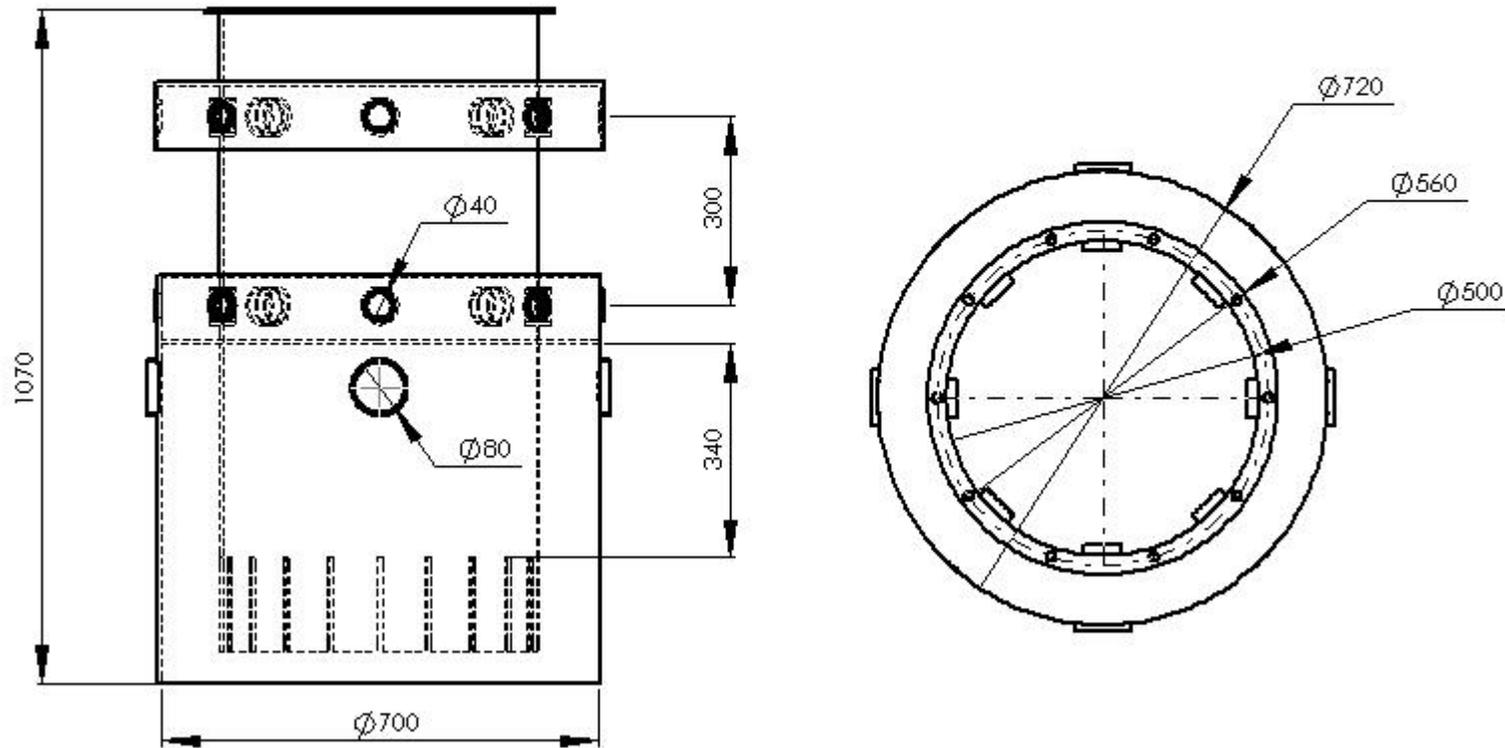
ทำการคำนวณซ้ำโดยการเปลี่ยนค่าอัตราดอกเบี้ยที่ใช้เป็น 2 – 15 % ต่อไป

ภาคผนวก ข

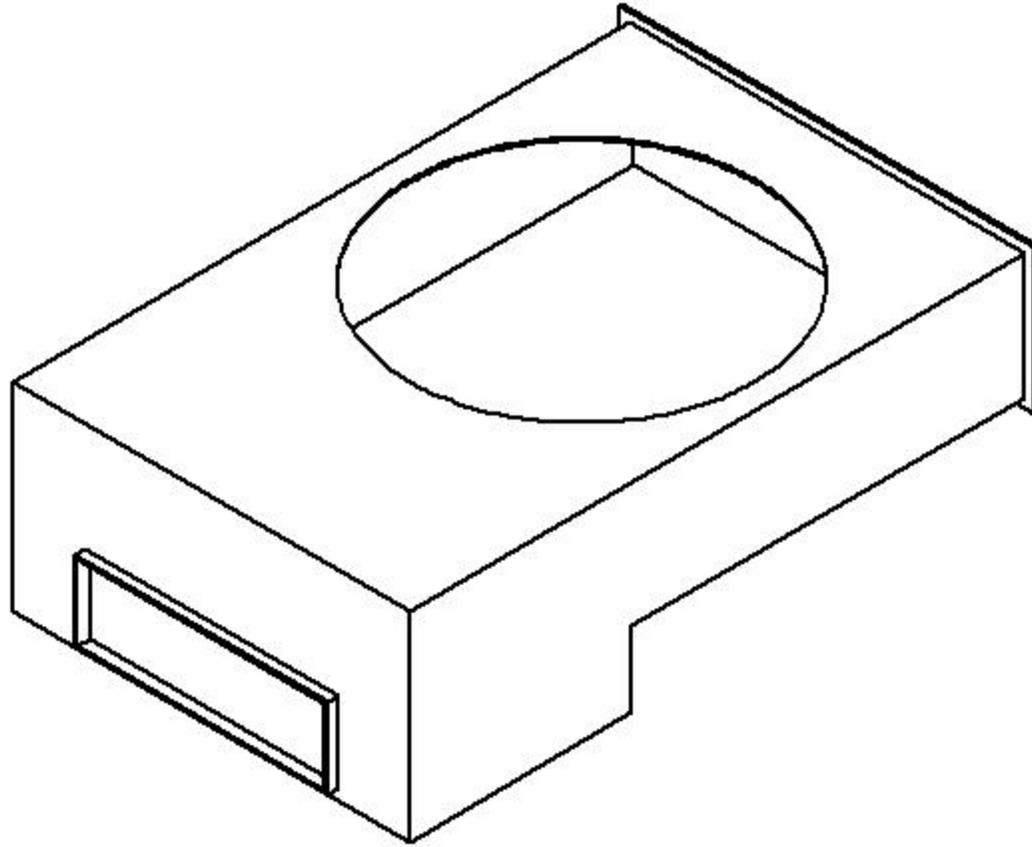
ขนาดของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง



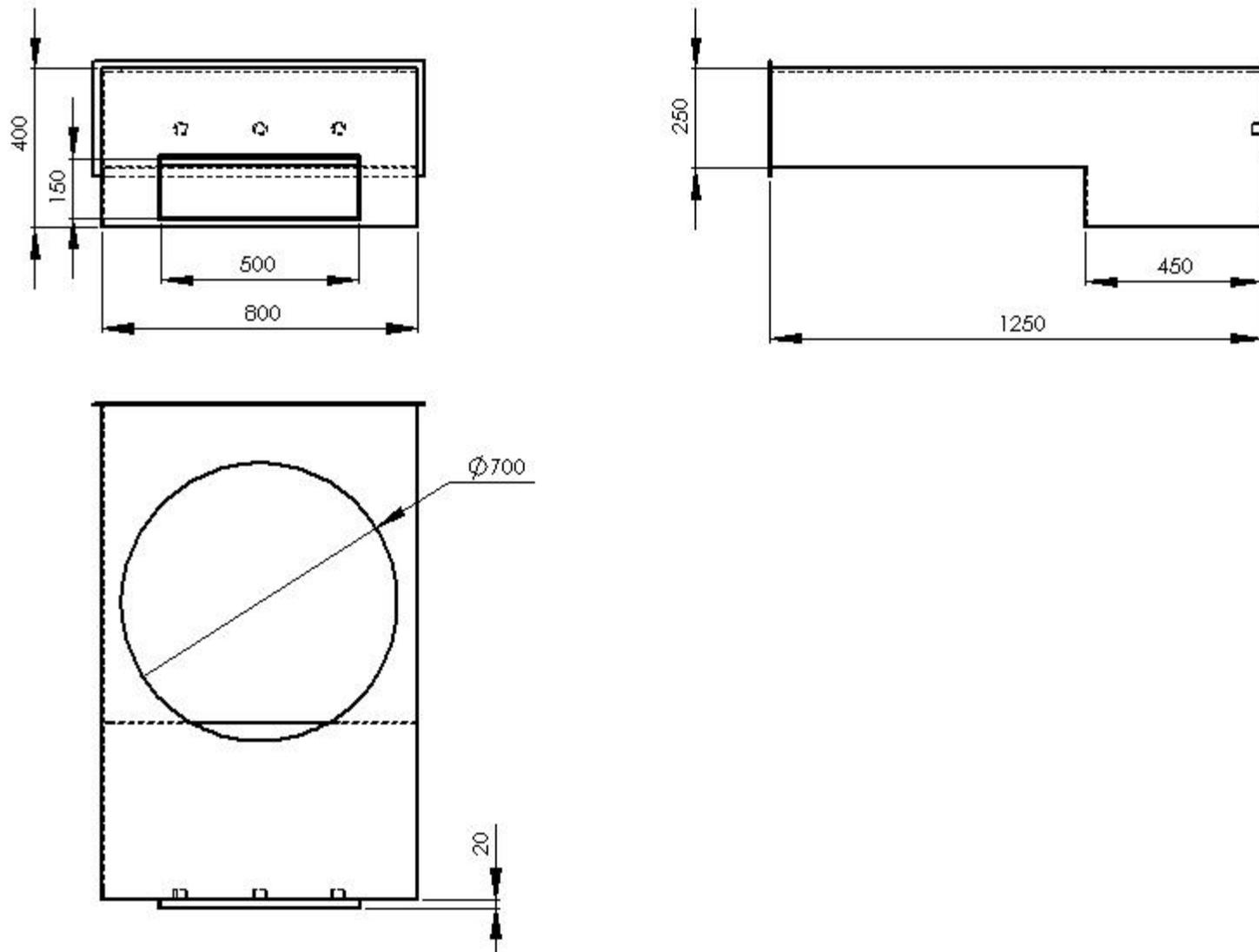
ภาพผนวกที่ ข1 ลักษณะตัวเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง



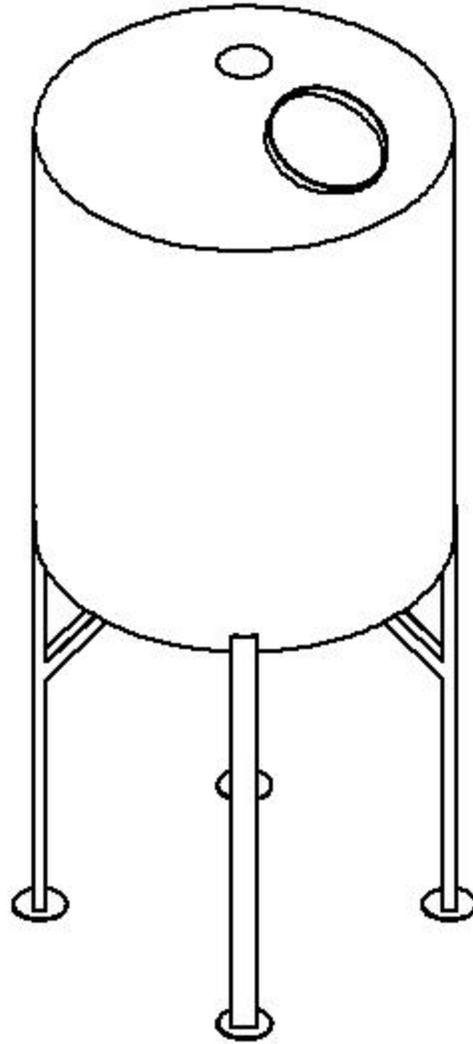
ภาพผนวกที่ ข2 รายละเอียดขนาดของเตาผลิตก๊าซชีววมวลแบบไหลลง



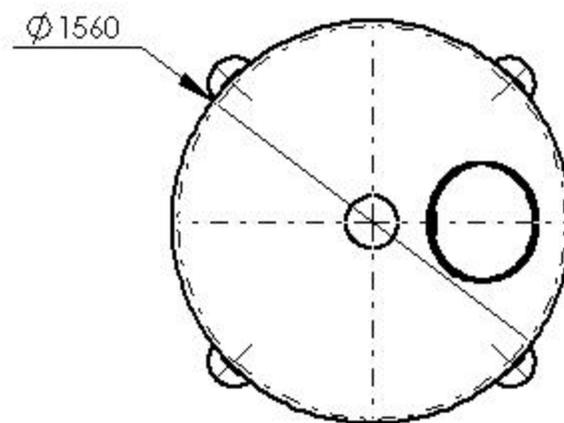
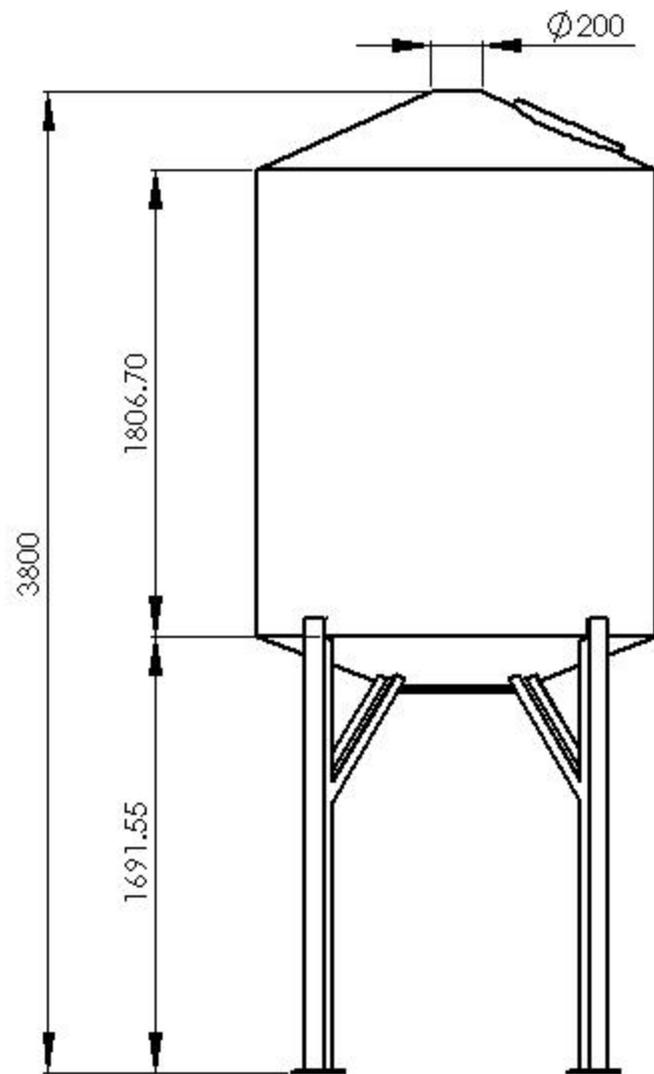
ภาพผนวกที่ ข3 ลักษณะของถังบรรจุซีเมนต์และถ่าน



ภาพผนวกที่ ข4 รายละเอียดขนาดของถังบรรจุซีเมนต์และถ่าน



ภาพผนวกที่ ข5 ลักษณะของถังบรรจุไม้ฟืน



ภาพผนวกที่ ข6 รายละเอียดขนาดของถังบรรจุไม้ฟืน