

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง  
การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลในแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด

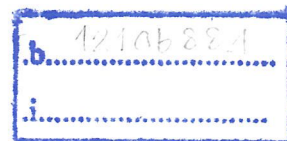
PRODUCTION OF FUEL GASES FROM BIOMASS  
BY FLUIDIZED BED GASIFIER



T104020

สุวภา พุทธิพลตระกูล  
เอื้ออนุช ยงสุวรรณ

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 104020  
วัน,เดือน,ปี 28 ต.ค. 2552



ปฏิญานี้พินธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

**PRODUCTION OF FUEL GASES FROM BIOMASS  
BY FLUIDIZED BED GASIFIER**

**SUWAPA PUTTAPOONTRAKUL  
AUE-ANUCH YONGSUWAN**

**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2008**

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลในแก๊สซิฟายเออร์  
แบบพลูอิดไคซ์เบด  
โดย นางสาวสุภา พุทธพูลตระกูล  
นางสาวเอื้ออนุช ยงสุวรรณ  
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์  
ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


---

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดาม  
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ

(อ.บุญชัย โชติวิริยวาณิชย์)

  
.....กรรมการ  
(รศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)

  
.....กรรมการ  
(ผศ. รินฤดี เบญจางคประเสริฐ)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลในแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด
โดย	นางสาวสุภา พุทธพลตระกูล นางสาวเอื้ออนุช ยงสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ บุญชัย โชควิริยานิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## บทคัดย่อ

โครงการการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลในแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิดไดซ์เบด เป็นโครงการที่มีจุดมุ่งหมายเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สซิฟายเออร์ปรับปรุงเครื่องมือ และผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล

แก๊สซิฟายเออร์ที่ใช้ในโครงการนี้เป็นแบบฟลูอิดไดซ์เบด ที่เน้นประโยชน์ในการทำงานแบบต่อเนื่อง เกิดปฏิกิริยาได้ดี มีการถ่ายเทมวลสารและความร้อนดี ขั้นตอนของการทำโครงการเริ่มต้นด้วยการศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในแก๊สซิฟายเออร์รูปแบบต่างๆ จากนั้นทำการออกแบบแก๊สซิฟายเออร์และระบบที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ระบบป้อน ฉนวนความร้อน ระบบควบคุมระบบทำความสะอาดแก๊สเบื้องต้น โดยอาศัยงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ควบคุมการสร้างตลอดจนแก้ไขปรับปรุงเครื่องมือบางส่วนเพื่อให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ชีวมวลที่เลือกใช้ในการทดลองเดินเครื่อง คือ ชานอ้อย จากจังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งมีขั้นตอนเริ่มต้นคือ การใส่ชีวมวลลงฮอปเปอร์ จากนั้นป้อนเข้าสู่แก๊สซิฟายเออร์ด้วยสกรูป้อนในอัตรา 30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ชานอ้อยจะเกิดการเผาไหม้ในแก๊สซิฟายเออร์ด้วยอากาศผสมกับไอน้ำ อัตราเร็วของฟลูอิดไดซ์แก๊ส 2.7 – 3.7 เมตรต่อวินาที เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในช่วงอุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ แก๊สผสมจะประกอบด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์ และอนุภาคจากชีวมวลซึ่งจะถูกแยกด้วยไซโคลน องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี พบว่ามีปริมาณร้อยละ โดยปริมาตรของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ 2.48 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 3.13 และแก๊สมีเทน 1.23

Report Title                    Production of fuel gases from biomass by fluidized bed gasifier  
By                                    Miss Suwapa Puttapontrakul  
   Miss Aue-anuch Yongsuwan  
Advisor                          Boonchai Chotiviriyavanich  
Co-Advisor                      Assoc. Prof. Dr. Paisal Nakpipat  
Report for                        Bachelor Degree of Chemical Engineering  
   Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering  
   King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## **ABSTRACT**

Production of fuel gases from biomass by fluidized bed gasifier project had the main point that concentrated in the design and development of the fuel gas producer from biomass

The designed gasifier is the fluidized bed type which is more advantage, such as, continuous operation, good reactivity, good mass and heat transfer. This project is also designed the combination parts and systems for gasifier i.e. feeding system, heat insulator, control system, gas products cleaning system base on research and theoretical relation. The experiment have done are investigated optimal operational parameters to concern production

When the bagasse that used in experiment were burned by the air feed rate ranged from 2.7 - 3.7 m/s. The temperature along the riser were found to vary between 500 – 700 °C at atmosphere so that the gas mixture consisted of gas products and particle of biomass which separated by cyclone. These gas products were analyzed component by gas chromatograph. Finally the experiment results have shown that the CO 2.48 , CO<sub>2</sub> 3.13 and CH<sub>4</sub> 1.23 percent by volume



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการทำงานโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 พลังงาน	3
2.2 พลังงานสิ้นเปลือง	3
2.3 ชีวมวล	3
2.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน	6
2.5 ฟลูอิดไดเซชัน	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง	18
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	18
3.2 วิธีการทดลอง	26

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 การดำเนินงานและผลการดำเนินงาน	29
4.1 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องแก้สรีฟายเออร์	29
4.2 ผลการปรับปรุงเครื่องแก้สรีฟายเออร์	33
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชานอ้อย	35
4.4 ผลการทดลองเดินเครื่อง	36
4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก้สผลิตภัณฑ์	36
บทที่ 5 สรุปการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	37
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	37
5.2 ปัญหา อุปสรรค การแก้ปัญหา และข้อเสนอแนะ	38
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก	45
ภาคผนวก ข	49
ภาคผนวก ค	52

# สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 3.1 แก๊สซิฟายเออร์ทั้งระบบ	18
รูปที่ 3.2 ระบบควบคุม	19
รูปที่ 3.3 ท่อไอน้ำหุ้มด้วยฉนวนเซรามิกและยึดด้วยเส้นลวด	20
รูปที่ 3.4 เครื่องเป่าอากาศ	21
รูปที่ 3.5 ท่อสำหรับสอดอุปกรณ์จุดไฟ(บน) และท่อแก๊สหุงต้ม(ล่าง)	22
รูปที่ 3.6 ลวดพันปลายด้วยผ้าชุบน้ำมัน ใช้เป็นอุปกรณ์จุดไฟแทนปืน ไฟฟ้า	22
รูปที่ 3.7 การต่อแก๊สหุงต้ม ไปยังแก๊สซิฟายเออร์	23
รูปที่ 3.8 ชานอ้อย	24
รูปที่ 3.9 หลอดแก้วเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์	24
รูปที่ 3.10 ถังดับเพลิงที่ประจำการไว้	25
รูปที่ 3.11 เครื่องดูดฝุ่น 2 เครื่องที่ใช้ในการทำความสะอาดภายในแก๊สซิฟายเออร์	26
รูปที่ 3.12 การจุดเตาด้วยลวดพันผ้าชุบน้ำมันจุดไฟ	27
รูปที่ 3.13 ชานอ้อย 1 ถัง น้ำหนัก 10 กิโลกรัม	27
รูปที่ 3.14 สภาพภายนอกของแก๊สซิฟายเออร์ขณะทดลองเดินเครื่อง	28
รูปที่ 4.1 แบบร่างของแก๊สซิฟายเออร์	29
รูปที่ 4.2 ด้านซ้ายของแก๊สซิฟายเออร์แสดงช่องสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ (ซ้าย) และด้านขวาของแก๊สซิฟายเออร์แสดงการเชื่อมต่อกับระบบป้อนวัตถุดิบ (ขวา)	30
รูปที่ 4.3 แบบร่างด้านขวาของแก๊สซิฟายเออร์แสดงถึงระบบป้อนวัตถุดิบ	30
รูปที่ 4.4 ภายในด้านบนของถังใส่วัตถุดิบและสกรูป้อน	31
รูปที่ 4.5 แบบร่างของไซโคลนที่ใช้ในโครงการ	31
รูปที่ 4.6 ไซโคลนที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว	32
รูปที่ 4.7 แบบร่างกรวยแผ่นกระจายลมและหัวเตา	32
รูปที่ 4.8 อิฐทนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมคางหมูมุมเอียง 6.3 องศา และ 12.5 องศา ที่ใช้เรียงสลับกัน	33
รูปที่ 4.9 ลักษณะการเรียงอิฐทนความร้อนเป็นวงแหวนในแก๊สซิฟายเออร์	33
รูปที่ 4.10 ท่อนำแก๊สหุงต้มที่ส่วนล่างของแก๊สซิฟายเออร์	34

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบท่อสแตนเลสใหม่ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร กับท่อเก่าที่หนาเพียง 1 มิลลิเมตร	34
รูปที่ 4.12 ท่อที่เดินไว้สำหรับป้อนไอน้ำเข้าสู่ท่อสเปรย์วงแหวนภายในแก๊สซิฟายเออร์	35
รูปที่ 4.13 ท่อที่เดินไว้สำหรับป้อนไอน้ำเข้าไปผสมกับอากาศในท่อฟลูอิดไดซ์	35
รูปที่ 5.1 เปลี่ยนการป้อนชานอ้อยจากสอปเปอร์ด้านล่างเป็นสอปเปอร์ด้านบน	38
รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายแนวตั้งแสดงสภาพภายในของแก๊สซิฟายเออร์ก่อนและหลังการทดลอง	39
รูปที่ 5.3 การเปิดวาล์วปล่อยน้ำที่ความแน่นอยู่ในท่อไอน้ำทิ้ง	40
รูปที่ 5.4 น้ำที่ท่วมขังอยู่ในท่อฟลูอิดไดซ์แก๊สไหลออกมาหลังการคลายน็อต	40
รูปที่ 5.5 ตัวอย่างปัญหาฝุ่นควันและแก๊สที่ออกมาจากระบบ	41
รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของเครื่องเป่าอากาศและความเร็วอากาศ	48
รูปที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของเครื่องเป่าอากาศและการไหลเชิงปริมาตร	48
รูปที่ ค.1 กราฟผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของชานอ้อยด้วย TGA	54
รูปที่ ค.2 โครมาโตแกรมของตัวอย่างแก๊สผลิตภัณฑ์	56

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของชีวมวล	4
ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์แบบปริมาณ	23
ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์แบบธาตุ	24
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชานอ้อย	36
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์จากการทดลองเดินเครื่อง	36
ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองวัดความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าของเครื่องเป่าอากาศ เทียบกับ ความถี่ของมอเตอร์	49
ตารางที่ ข.1 อัตราการป้อนอากาศที่ควรใช้ในทางทฤษฎีเพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ในออกซิเดชัน ไชนเทียบกับอัตราการป้อนวัตถุดิบและการปรับความถี่ของ เครื่องเป่าอากาศ	54
ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ด้วยโครมาโตกราฟ	55

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบัน การที่ราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดวิกฤตด้านพลังงานที่ใช้ในการดำเนินกิจกรรมทุกด้าน ประเทศไทยยังไม่สามารถขุดเจาะน้ำมันใช้เองได้เพียงพอกับความ ต้องการ ทำให้ประสบกับการเก็งกำไรของเหล่าประเทศมหาอำนาจ ขณะที่ประเทศต่างๆทั่วโลก พยายามกันอย่างเต็มที่เพื่อสรรหาพลังงานทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และสรรสร้าง วิทยาการใหม่ๆเพื่อให้ได้ใช้พลังงานทดแทนนั้น

แก๊สซิฟายเออร์ เป็นเครื่องมือที่ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับเป็นพลังงานทางเลือก โดยเครื่องดังกล่าวสามารถเปลี่ยนถ่านหินและชีวมวลเป็น แก๊สเชื้อเพลิงได้ด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หรือกระบวนการเปลี่ยนสารประกอบคาร์บอนเป็น แก๊ส โดยการสังเคราะห์แก๊สในกระบวนการนี้เกิดขึ้นในสภาวะที่จำกัดออกซิเจน และอุณหภูมิสูง ในแก๊สที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้ จะมีแก๊ส  $\text{CO}$   $\text{H}_2$  และ  $\text{CH}_4$  ที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิง ในหลาย ประเทศทั่วโลก ได้มีการพัฒนาเครื่องแก๊สซิฟายเออร์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท รวมทั้ง ใช้ในด้านอุตสาหกรรม และการผลิตกระแสไฟฟ้า

แก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลจัดเป็น ‘พลังงานทางเลือก’ หรือ ‘พลังงานหมุนเวียน’ ที่ควรค่าแก่ การศึกษา ค้นคว้า วิจัยเป็นอย่างยิ่งสำหรับภาวะการณ์ในปัจจุบันที่มีแนวโน้มจะเกิดวิกฤตการ พลังงานในอนาคต ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีของเหลือทิ้งจาก การเกษตรหลายชนิดในปริมาณมาก อาทิ แกลบ ฟางข้าว ชังข้าวโพด กากมะพร้าว ชานอ้อย รวมถึงเศษไม้จากอุตสาหกรรมบางประเภท แต่วัสดุเหล่านี้กลับถูกนำไปใช้ประโยชน์เพียงปริมาณ น้อย เช่น นำไปทำปุ๋ยหมัก อาหารสัตว์ อุตสาหกรรมในครัวเรือน เป็นต้น คุณสมบัติทางกายภาพ ของชีวมวลเหล่านี้เหมาะสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะ ทำการศึกษาและสร้างสรรค์เทคโนโลยีดังกล่าว

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 สามารถออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สซิฟายเออร์สำหรับการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงเพื่อ ใช้แทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้

1.2.2 ศึกษากระบวนการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวลในแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิดไคซ์ เบด

1.2.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในปฏิบัติงานของแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิด ไคซ์เบด

### 1.3 ขอบเขตโครงการงาน

- 1.3.1 ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน และรูปแบบของแก๊สซิฟายเออร์ประเภทต่างๆ
- 1.3.2 วิเคราะห์และคำนวณเพื่อออกแบบเครื่องแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิด ไคซ์เบด
- 1.3.3 ควบคุมการสร้างเครื่องแก๊สซิฟายเออร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง
- 1.3.4 วิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล
- 1.3.5 วิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี
- 1.3.6 คำนวณอัตราการไหลของอากาศ อัตราการป้อนชีวมวล ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ทั้งในออกซิเดชัน โชน และรีดักชัน โชน

### 1.4 ขั้นตอนการทำโครงการงาน

- 1.4.1 ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของเครื่องผลิตแก๊สเชื้อเพลิง โดยเฉพาะการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากชีวมวล อาทิ เศษไม้ แกลบ ทลายปาล์ม ชังข้าวโพด ขยะพลาสติกบางชนิด ในแก๊สซิฟายเออร์ประเภทต่างๆ ซึ่ง ได้แก่ แก๊สซิฟายเออร์แบบเบดหุคหนึ่ง (อัฟคราฟต์ และคาวน์คราฟต์) และแบบฟลูอิด ไคซ์เบด
- 1.4.2 วิเคราะห์เพื่อกำหนดรูปแบบของแก๊สซิฟายเออร์รวมถึงกำหนดวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ
- 1.4.3 สร้างเครื่องแก๊สซิฟายเออร์
- 1.4.4 ทดลองเดินเครื่อง
- 1.4.5 แก้ไขปรับปรุงแก๊สซิฟายเออร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกรณีมีข้อบกพร่อง หรือต้องการให้มีความเหมาะสมในการดำเนินการมากขึ้น
- 1.4.6 สรุปผลการดำเนินงานและเขียนรายงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการโครงการงาน

- 1.5.1 สามารถออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิด ไคซ์เบดได้
- 1.5.2 สามารถเปลี่ยนชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรและอุตสาหกรรมบางประเภทให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงได้
- 1.5.3 ได้ข้อมูลของการออกแบบและปรับปรุงแก๊สซิฟายเออร์สำหรับนำไปปรับปรุงและพัฒนาเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
- 1.5.4 โครงการงานนี้สามารถเป็นกรณีศึกษาให้ผู้สนใจด้านพลังงานทดแทนได้ศึกษาข้อมูลและ/หรือสามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้เกิดประสิทธิผลยิ่งขึ้น ได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พลังงาน (Renewable energy) [3]

พลังงานหมุนเวียน คือ พลังงานจากธรรมชาติรอบตัวที่นำมาใช้ได้ไม่มีวันหมด เนื่องจากสามารถสร้างทดแทนได้ในเวลาสั้นๆ โดยธรรมชาติ โดยทั่วไปมักจัดพลังงานหมุนเวียนเป็นพลังงานทดแทน (Alternative energy) ประเภทหนึ่ง และเป็นพลังงานสะอาดหรือพลังงานสีเขียว เนื่องจากไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ตัวอย่างของพลังงานหมุนเวียน ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากน้ำ พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานไฮโดรเจน เป็นต้น

### 2.2 พลังงานสิ้นเปลือง (Nonrenewable energy) [3]

พลังงานสิ้นเปลือง คือ แหล่งพลังงานจากใต้พื้นดิน เมื่อใช้หมดแล้วไม่สามารถสร้างขึ้นมาใหม่หรือหามาทดแทนโดยธรรมชาติได้ทันความต้องการในเวลาสั้นๆ ต้องใช้เวลานานหลายร้อยล้านปีจึงจะสร้างขึ้นมามากได้และมีปริมาณจำกัด ชื่อที่ใช้แทนพลังงานกลุ่มนี้จึงมีทั้งพลังงานฟอสซิล และพลังงานที่ใช้แล้วหมด

ตัวอย่างของพลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ พลังงานที่ได้จากน้ำมันดิบ (ปิโตรเลียม) ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติและพลังงานนิวเคลียร์ (แรมูเรเนียม) เป็นต้น

### 2.3 ชีวมวล (Biomass) [1]

#### 2.3.1 เชื้อเพลิงชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเกษตร เช่น แกลบ ชังข้าวโพด ชานอ้อย จี๊เลื้อย เป็นต้น

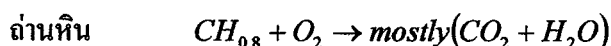
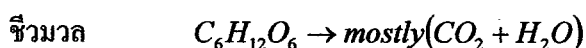
ตารางที่ 2.1 สมบัติของชีวมวล

ชนิดชีวมวล	ความชื้น (%)	ค่าประมาณ			คุณค่าทางความร้อน (HHV) (เมกะจูล/กิโลกรัม)
		สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
ไม้กระถินยักษ์	0.63	81	1.78	17	15.91
ไม้อูคาลิปตัส	1.14	79	2.64	17	15.41
เปลือกไม้อูคาลิปตัส	0.27	41	11.2	48	18.82
แกลบ	3.53	63	19.45	14	12.39
กะลามะพร้าว	4.46	76	1.32	18	15.94
ซังข้าวโพด	2.23	81	1.38	15	15.58
เห้งมันสำปะหลัง	4.46	80	2.73	13	14.59
กากมันสำปะหลัง	3.55	82	3.28	11	14.41
เปลือกมันสำปะหลัง	4.49	84	1.55	10	13.67
ทางปาล์ม	16.2	76	4.72	18	14.78

ที่มา : “โรงไฟฟ้าชีวมวลสุรนารี” หน่วยปฏิบัติการวิศวกรรมพลังงานและสิ่งแวดล้อม  
สำนักวิชาวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การที่ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เนื่องจากในขั้นตอนของการเจริญเติบโต นั้นพืชได้ใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำและพลังงานจาก แสงอาทิตย์ให้แป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็น เชื้อเพลิงก็จะได้พลังงานออกมาจากการเผาไหม้ของคาร์บอนที่พืชสะสมไว้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ของชีวมวลและถ่านหิน



ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นจึงมีของเหลือใช้หรือเหลือทิ้งจากการเกษตร หลังการเก็บเกี่ยวหลายชนิด ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก และอุตสาหกรรมของประเทศ ส่วนใหญ่เป็นอุตสาหกรรมเกษตร ดังนั้นจึงมีวัสดุเหลือทิ้งมากมาย สิ่งต่าง ๆ เหล่านี้สามารถ นำมาทำเป็นเชื้อเพลิงทดแทนฟืนและถ่าน ได้ทั้งสิ้น การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงิน

ตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม

### 2.3.2 ประเภทของเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกออกได้ 4 ประเภท

1. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากไม้ (Forest Biomass) ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็นไม้เนื้ออ่อน (Soft wood) และแข็ง (Hard wood) ได้แก่ เศษไม้ เปลือกไม้ กิ่งไม้ และพวงจี่เสี้ยว
2. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการเกษตร (Agriculture Biomass) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าว โปด แกลบ เป็นต้น
3. เชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากอุตสาหกรรมเกษตร (Industrial waste) เช่น เชื้อเพลิงที่ได้จากโรงงานน้ำตาล ได้แก่ ชานอ้อย นอกจากนี้ยังมีกากสับประรดที่ได้จากโรงงานทำสับประรดกระป๋อง เชื้อเพลิงประเภทนี้จะมีปริมาณความร้อนสูงมาก
4. เชื้อเพลิงที่ได้จากของเหลือใช้จากมนุษย์ (Domestic waste) ได้แก่ เชื้อเพลิงที่ได้จากขยะเทศบาล

#### 2.3.2.1 ข้อดีการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. การนำชีวมวลมาใช้ เป็นการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์สูงสุดนอกจากจะก่อให้เกิดรายได้แก่ผู้ผลิตชีวมวลแล้ว ยังลดภาวะในการกำจัดเช่นนำไปฝังกลบ หรือเผาทิ้ง เป็นต้น
2. การไม่นำชีวมวลมาใช้ โดยปล่อยให้ย่อยสลายตามธรรมชาติ จะเกิดแก๊สมีเทนซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่ง และมีอันตรายกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 21 เท่า
3. ชีวมวลจะมีกำมะถัน หรือซัลเฟอร์ไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้ จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด (น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3-3.8 ซึ่งขึ้นกับประเภทของถ่านหิน)
4. ซี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นด่าง ดังนั้นเหมาะสมที่นำไปเพาะปลูก หรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์
5. ก่อให้เกิดรายได้ การสร้างงานในชุมชน
6. ประหยัดเงินตราต่างประเทศเพราะไม่ต้องนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเตาและถ่านหิน เป็นต้น

7. ถ้าโรงไฟฟ้าชีวมวลตั้งกระจายอยู่ตามที่ต่าง ๆ จะช่วยเสริมการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้า ภูมิภาค ได้เป็นอย่างดีเช่น แรงดันไฟฟ้าไม่ตก แต่จะสม่ำเสมอ ลดการสูญเสียในสายไฟฟ้า และหม้อแปลงลง

### 2.3.2.2 ข้อเสียการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. ชีวมวลมีน้ำหนักเบา ถ้าขนส่งชีวมวลทางรถบรรทุก ต้องขนส่งมากเที่ยว ซึ่งจะ ทำให้มี ค่าใช้จ่ายมากขึ้นแล้ว ยังอาจมีผลกระทบต่อชุมชนในด้านการจราจร ความปลอดภัยในการใช้ถนน
2. เนื่องจากชีวมวลมีความชื้นสูง การออกแบบหม้อผลิตไอน้ำและปล่องไอเสียต้องใหญ่ ตลอดจนถึงการติดตั้งอุปกรณ์ลดความชื้นเพิ่มเติม ซึ่งทำให้เงินลงทุนมากขึ้น นอกจากนี้ถ้าชีวมวลมีความชื้นหลากหลายหม้อผลิตไอน้ำอาจทำงานได้ไม่เต็มที่
3. ถ้าชีวมวลมีจุดหลอมเหลวต่ำ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิการเผาไหม้สูงเกินไป จะทำให้ขี้เถ้าหลอมละลายติดในห้องเผาไหม้ ซึ่งมีผลให้หม้อผลิตไอน้ำมีประสิทธิภาพลดลง
4. ชีวมวลบางประเภทมีส่วนผสมของอัลคาไลน์ ซึ่งจะกัดกร่อนท่อไอน้ำในหม้อผลิตไอน้ำดังนั้นในการออกแบบหม้อผลิตไอน้ำต้องคำนึงถึงจุดนี้

## 2.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [14,22,23]

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดแก๊สโดยอาศัยการสันดาปเพียงบางส่วน of เชื้อเพลิง เช่น ถ่านหิน ไม้ ถ่านไม้ และชีวมวลอื่นๆ แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้ เรียกว่า แก๊สชีวมวล (Producer gas) ซึ่งสามารถติดไฟและใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายใน

### 2.4.1 เครื่องแก๊สซิฟายเออร์

เครื่องแก๊สซิฟายเออร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงในสถานะแก๊ส การพัฒนาเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ในระยะเริ่มแรกนิยมใช้เครื่อง 3 แบบ คือ แบบอากาศในเตาไหลขึ้น (Up-draught) แบบอากาศในเตาไหลลง (Down-draught) และแบบอากาศไหลในเตาตามขวาง (Cross draught) ซึ่งในปัจจุบันเครื่องแก๊สซิฟายเออร์ได้รับการพัฒนาจนสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบใหญ่ๆ ตามลักษณะการใช้วัตถุดิบ และขั้นตอนการเกิดแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งได้แก่

#### 2.4.1.1 เครื่องแก๊สซิฟายเออร์แบบเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบเคลื่อนตกลดขณะเผา (Moving

#### Packed bed gasifier)

เป็นเครื่องที่มีมาก่อนที่สงครามโลกครั้งที่ 2 จะสงบลง ลักษณะการเผาเป็นการเผาภายใน ถ่านหรือไม้จะค่อยๆถูกเผาหมดไปเรื่อยๆ ตรงส่วนที่เผาไหม้ ถ่านหรือไม้ที่อยู่ส่วนบนก็จะเคลื่อนตกลงมาแทนที่ส่วนที่ถูกเผาไป ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ยังแบ่งออกเป็น 4 แบบ ได้แก่

-ระบบลมภายในเตาวิ่งขึ้น (Up Draught) โดยมากนิยมใช้วัสดุประเภทถ่านมากกว่า วัสดุประเภทไม้ เพราะระบบนี้มีทาร์ออกมามาก [26]

-ระบบลมภายในเตาวิ่งลง (Down Draught) โดยมากนิยมใช้วัสดุประเภทไม้ และใช้ ถ่านได้ดีด้วยเช่นกัน ระบบนี้มีทาร์ออกมาน้อยกว่า ระบบลมภายในวิ่งขึ้น [26]

-ระบบลมภายในเตาวิ่งในแนวนอน (Cross Draught) โดยมากนิยมใช้วัสดุประเภท ถ่านหรือไม้ มีทาร์ออกมาน้อยกว่าระบบแรก แต่มากกว่าระบบที่สอง [26]

-ระบบลมภายในเตาวิ่งขึ้นและวิ่งลง (Double Circulation) ใช้ได้ทั้งวัสดุประเภทไม้ ถ่าน ใสในเครื่องปฏิกรณ์เดียวกันแต่คนละที่ โดยที่บริเวณที่ลมวิ่งขึ้นจะใสถ่านและตรงที่ลมวิ่ง ลงจะใสไม้ [21]

#### 2.4.1.2 เครื่องแก๊สซิฟายเออร์แบบฟลูอิดไคซ์เบด

เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ วัสดุที่ใช้เผามีขนาดเล็ก เช่น ขี้เลื่อย แกลบ ถ่านหินบด เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะวิ่งวนอยู่ใน เนื่องจากมีแก๊สเป่าด้านล่างทำให้ดูคล้ายกับลักษณะของของ ไหล และยังสามารแบ่งออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ [4]

-ระบบที่ไม่ต้องพึ่งแหล่งพลังงานความร้อนจากภายนอก (Direct Heat Fluidized Bed Gasifier) แต่ความร้อนเกิดจากการเผาภายใน

-ระบบที่ต้องใช้ความร้อนจากภายนอก (Indirect Heat Fluidized Bed Gasifier)

#### 2.4.1.3 เครื่องแก๊สซิฟายเออร์แบบเอนเทรนดโฟลว์

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่นิยมใช้กับวัสดุประเภทถ่าน ทั้งถ่านหินและถ่านไม้ โดยบดให้เป็นเม็ดเล็กแล้วผสมน้ำทำให้เป็นสลอรี่ (Slurry) ใสเข้าเครื่องปฏิกรณ์ และใช้ออกซิเจนเป็นแก๊ส สำหรับเผา

#### 2.4.1.3 เครื่องแก๊สซิฟายเออร์แบบโทลเทรนมีเดีย

เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กับถ่านหินโดยปนกับสารประกอบบางชนิด เช่น โดโลไมท์ (Dolomite) ซึ่งก็คือหินปูนที่ถูกแคลไซน์แล้ว (Calcined Limestone) หรืออาจจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่นเหล็กออกไซด์ (FeO) แล้วใช้แก๊สออกซิเจนหรืออากาศเป็นแก๊สสำหรับเผา

#### 2.4.2 ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [22]

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจัดเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สกับของแข็ง ของแข็งที่ใช้ได้ ได้แก่ เชื้อเพลิงประเภท ถ่านหิน ถ่าน ไม้ และชีวมวลอื่นๆ เป็นต้น ส่วนแก๊สโดยทั่วไปจะใช้ แก๊สออกซิเจนเป็นทำปฏิกิริยา แต่อาจใช้แก๊สอื่นแทนแก๊สออกซิเจนได้ แก๊สซิฟิเคชันสามารถแบ่ง ออกเป็น 3 ประเภทคือ

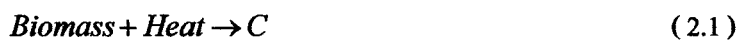
**2.4.2.1 ออกซิเดทีฟแก๊สซิฟิเคชัน (Oxidative gasification)** ใช้แก๊สออกซิเจนเป็นตัวทำปฏิกิริยา แก๊สออกซิเจนมาจากการผ่านอากาศเข้าสู่เตา หรืออาจใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ก็ได้ แก๊สชีววมวลที่เกิดขึ้นจากการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีความร้อน (Heating value) สูงกว่าแก๊สชีววมวลที่เกิดจากการใช้อากาศ องค์ประกอบของแก๊สชีววมวล ได้แก่  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , และ  $\text{H}_2\text{O}$  (ถ้าใช้อากาศจะมี  $\text{N}_2$  ด้วย)

**2.4.2.2 สติมแก๊สซิฟิเคชัน (Steam gasification)** ใช้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง ปกติอุณหภูมิของเตาจะสูง และต้องใช้ความร้อนจากนอกระบบมาช่วยให้อุณหภูมิของเตาสูงเพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน แก๊สชีววมวลที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบของ  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , และ  $\text{H}_2\text{O}$

**2.4.2.3 ไฮโดรแก๊สซิฟิเคชัน (Hydro gasification)** ใช้  $\text{H}_2$  ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแข็ง ความร้อนภายในเตาสูงมาก และใช้ความดันในเตาสูงถึง 20 เมกะปาสกาล แก๊สชีววมวลที่เกิดขึ้นองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น  $\text{CH}_4$

### 2.4.3 ปฏิกิริยาหลักของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน [2,7,17,28]

**2.4.3.1 ปฏิกิริยาไพโรไลซิส (Pyrolysis Reaction)** ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนี้คือ Pyrolysis of carbonaceous fuels หรือ Devolatilization เป็นการเผาแบบอับอากาศเพื่อแยกสารระเหยเช่น ทาร์ (Tar) ฟีนอล น้ำมันจากไม้ ออกจากชีววมวล ได้ถ่าน (Char) หรือแกรไฟต์ เป็นผลิตภัณฑ์หลัก และได้แก๊ส  $\text{H}_2$  กับ  $\text{CH}_4$  เล็กน้อย รูปแบบทั่วไปของปฏิกิริยาไพโรไลซิส คือ



**2.4.3.2 ปฏิกิริยาเผาไหม้โดยตรง (Combustion Reaction)** การเผาไหม้โดยตรงด้วยออกซิเจนทำให้ได้พลังงานความร้อนเพื่อนำไปใช้งานต่อไปในปฏิกิริยาถัดไป สามารถลดการใช้เชื้อเพลิง LPG ในการทำให้ระบบอยู่ในอุณหภูมิสูงตลอดเวลาได้ ขบวนการนี้ทำให้ได้แก๊ส  $\text{CO}_2$  ซึ่งส่วนหนึ่งใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเบาคาร์ด ปฏิกิริยาเผาไหม้โดยตรงประกอบด้วย



**2.4.3.3 ปฏิกิริยาเบาคาร์ด (Boudouard)** เป็นปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ทำให้เกิดแก๊ส CO คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ของสมดุลเคมีระหว่าง  $\text{CO}_2$  และ CO เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งจะส่งผลต่อค่าคงที่สมดุล



2.4.3.4 ปฏิกริยากับไอน้ำ (Hydrolysis) เป็นปฏิกริยาแก๊สซิฟิเคชันที่ทำให้เกิดแก๊ส  $H_2$  เป็นสำคัญ



2.4.3.5 ปฏิกริยากับไฮโดรเจน (Hydrogenolysis) ทำให้ได้แก๊สมีเทน



#### 2.4.4 การเผาไหม้

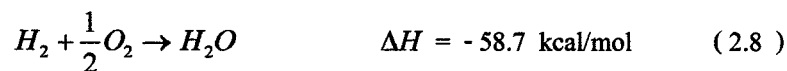
การเผาไหม้เป็นปฏิกริยาระหว่างแก๊สออกซิเจนกับเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และต่อเนื่องจนเกิดเปลวไฟลุกไหม้เมื่อการเผาไหม้ดำเนินต่อไปจะให้พลังงานความร้อนออกมา แก๊สออกซิเจนที่ใช้ทำปฏิกริยาการเผาไหม้มาจากอากาศ ซึ่งมีแก๊สออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 21 โดยปริมาตร

หลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ได้มีการนำเทคนิคการเผาไหม้ถ่านหินในเตาแบบฟลูอิดไคซ์เบดมาแทนการเผาไหม้ถ่านหินที่พ่นเป็นผงเข้าสู่เตา พลังงานที่ได้จากการเผาถ่านหินจะนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ประเทศที่เป็นผู้นำในการค้นคว้าได้แก่ ประเทศอังกฤษ และประเทศสหรัฐอเมริกา นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายท่านได้ทดลองหาคูณสมบัติของการถ่ายเทความร้อนของฟลูอิดไคซ์เบดโดยนำท่อสำหรับทำไอน้ำใส่เข้าไปภายในเบด [6]

ประมาณต้นปี ค.ศ. 1950 การค้นคว้าเกี่ยวกับการเผาไหม้ได้เจริญก้าวหน้ามากขึ้น ได้มีการนำเทคนิคฟลูอิดไคซ์เบดมาใช้กับการเผาไหม้มากยิ่งขึ้น เพราะมีข้อดีคือ การถ่ายเทความร้อนที่สูง คณะกรรมการการไฟฟ้าส่วนกลางและสมาคมวิจัยการใช้ถ่านหินของประเทศอังกฤษ ได้สร้างเตาเผาไหม้ฟลูอิดไคซ์เบดขึ้นมาเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเผาไหม้ ลักษณะฟลูอิดไคซ์เบดภายในเบด และการถ่ายเทความร้อน ตลอดจนการออกแบบแผ่นกระจายแก๊ส หลังจากศึกษาได้ข้อมูลเบื้องต้นแล้วสมาคมการวิจัยการใช้ถ่านหินแห่งประเทศอังกฤษ จึงสร้างหม้อน้ำที่ใช้ระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งสามารถผลิตไอน้ำได้ 3,600 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

##### 2.4.4.1 ปฏิกริยาเคมีของการเผาไหม้

การเผาไหม้จะเกิดปฏิกริยาเคมีระหว่างคาร์บอน ไฮโดรเจน และธาตุอื่นๆ กับแก๊สออกซิเจนตัวอย่างเช่น ปฏิกริยาการเผาไหม้ของแก๊สเชื้อเพลิง แก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นสามารถเกิดปฏิกริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนได้ดังนี้



การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างแก๊สออกซิเจนกับเชื้อเพลิง มีการลุกไหม้ของเชื้อเพลิง และการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างแก๊สออกซิเจนกับเชื้อเพลิง

หมายเหตุ ค่าเอนทัลปีที่แสดง เป็นค่าพลังงานความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาของแก๊ส (Heat of reaction) ที่อุณหภูมิ 700 K

#### 2.4.4.2 การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง

เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจะเกิดการเผาไหม้ได้ค่านั้นจะต้องให้แก๊สออกซิเจนสัมผัสกับพื้นผิวของคาร์บอนในของแข็งอย่างทั่วถึง เมื่อเริ่มเกิดการเผาไหม้จะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกดูดซับออกมาจากผิวของของแข็ง จากนั้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนจนได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานความร้อน

การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีการติดไฟแล้วลุกไหม้ การติดไฟไม่สามารถจะเกิดขึ้นได้เอง จึงอาศัยความร้อนจากภายนอกมากระตุ้นให้เกิดการเผาไหม้ให้พลังงานความร้อนออกมาแล้วเกิดการสะสมอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นการติดไฟของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งจึงขึ้นอยู่กับสถานะของเชื้อเพลิง อัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศ และชนิดของเชื้อเพลิง

การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งเกิดขึ้นแบบไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ปฏิกิริยาเริ่มต้นที่ผิวของเชื้อเพลิงแล้วลุกลุ่เข้าไปเรื่อยๆ เนื่องจากพื้นผิวของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งที่สัมผัสกับอากาศมีบริเวณจำกัด ดังนั้นแม้จะให้แก๊สออกซิเจนมากเกินไป การเผาไหม้ที่จะเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของเชื้อเพลิงที่สัมผัสกับอากาศเท่านั้น การแก้ไขสามารถทำได้โดยบดเชื้อเพลิงให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส การใช้เตาเผาไหม้แบบฟลูอิดไคซ์เบดจะช่วยให้เกิดการปั่นป่วนภายในเบด จนแก๊สออกซิเจนสัมผัสกับเชื้อเพลิงได้อย่างทั่วถึง นอกจากนี้ยังมีตัวแปรที่สำคัญในการเผาไหม้ เช่น เวลาที่ใช้ และอุณหภูมิของการเผาไหม้ต้องสูงเพียงพอที่เชื้อเพลิงจะลุกไหม้อย่างต่อเนื่อง เวลาของการเผาไหม้ในเบดควรเหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เป็นต้น

#### 2.4.4.3 การเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed combustor)

เชื้อเพลิงที่นิยมมาเผาไหม้ในเตาฟลูอิดไคซ์เบด ได้แก่ ถ่านหิน ถ่านโค้ก หินน้ำมัน ไม้และถ่านไม้ เป็นต้น แล้วนำพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า ทำไอน้ำในหม้อน้ำและนำพลังงานความร้อนไปใช้ในอุตสาหกรรม วรเดช เพรสพรายวงส์ [5] ทำการวิจัยการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนท์ในฟลูอิดไคซ์เบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 200 มม. พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเผาไหม้ คือ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วของอากาศ 98.20 ซม./วินาที อัตราการป้อนถ่านหิน 0.675 กรัม/ซม<sup>2</sup>.นาที ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดร้อยละ 89.57

ศศิวิมล สูงสว่าง [6] ทำการวิจัยการเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไคซ์เบดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 150 มม. พบว่าอุณหภูมิเผาไหม้แกลบที่เหมาะสมคือ 700 องศาเซลเซียส โดยใช้ความเร็วของอากาศ 32.77 ม./นาที่ อัตราการป้อนแกลบเข้าสู่คอลัมน์ 50.83 กรัม/นาที่ ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงสุดร้อยละ 96.00

## 2.5 ฟลูอิดไคเซชัน [8]

เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล แต่เดิมวางเม็ดหรือชิ้นของแข็งดังกล่าวไว้บนตะแกรงในหอทดลองที่มักมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ปัจจุบันนี้ได้มีดัดแปลงให้อยู่ในแนวนอน ของไหลที่ใช้คือ แก๊ส หรือของเหลวที่ปล่อยผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะไหลผ่านเม็ดของแข็งแล้วไหลออกทางส่วนบนของหอทดลอง เพื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหลคือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบดหรือหอทดลอง หรือระหว่างเบดต่อบેดก็ได้ จึงเรียกของแข็งในสถานะนี้ว่า ฟลูอิดไคซ์เซชัน

### 2.5.1 ประเภทของฟลูอิดไคเซชัน

แบ่งออกเป็นสองประเภท ดังนี้

2.5.1.1 ฟลูอิดไคเซชันสองสถานะ (Two phase Fluidization) ในหอทดลองหรือเบดที่ใช้งานจะประกอบด้วยของสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล อาจจะเป็นแก๊สหรือของเหลวก็ได้ ซึ่งอาจจะแบ่งได้เป็นอีก 2 ประเภท

- แก๊สฟลูอิดไคเซชัน (Gas Fluidization)
- ฟลูอิดไคเซชัน (Liquid Fluidization)

2.5.1.2 ฟลูอิดไคเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) ภายในหอทดลองหรือเบดจะประกอบไปด้วยของสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว แก๊ส สำหรับฟลูอิดไคเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไคเซชันสองสถานะ หอทดลองที่เป็นฟอง (bubble column) และหอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed bed) ดังนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อนมาก การคำนวณต้องใช้หลักคณิตศาสตร์ขั้นสูง

### 2.5.2 ลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบด

คำว่า เบด หมายถึง อาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลองซึ่งมีตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของเม็ด

ของแข็งที่อยู่ในหอคอลง เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอคอลงเรียบร้อยตามต้องการแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอคอลงอย่างช้าๆ ขณะที่ของไหลความเร็วน้อย เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัว ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่าเบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ และหากเพิ่มความเร็วของของไหลขึ้นอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไคเซชัน (incipiently fluidized bed) หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวขึ้นตามความเร็วของไหล เม็ดของแข็งยังชิดกันอยู่มาก ดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหนาแน่น (dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของไหลมากขึ้นอีกของไหลเกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งออกไปจากหอคอลง เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไคซ์เบดเจือจาง (diluted-phase fluidized bed) หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อย เม็ดของแข็งจะหลุดลอยออกจากหอคอลง ซึ่งลักษณะนี้นำมาใช้ประโยชน์ในการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ ถ้าใช้อากาศก็เป็นการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatics transport) เช่น การลำเลียงผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ เป็นต้น ถ้าเป็นของเหลวก็เรียกว่าขนส่งด้วยของเหลว (Hydraulics transport) เช่น การขนส่งเม็ดแร่

ฟลูอิดไคซ์เบดที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Particulated bed of homogeneously bed or smoothly fluidized bed or liquid fluidized bed) ฟลูอิดไคซ์เบดที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะของเบดจะต่างจากที่ใช้ของเหลวมาก เพราะเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วที่จะทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เบดแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สเกิดขึ้น ซึ่งจะแทรกตัวขึ้นมายังผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งไหลจากส่วนบนของฟองแก๊สลงมาส่วนล่าง พร้อมกันนั้นยังมีเม็ดของแข็งบางส่วนลอยติดตามฟองขึ้นไปด้วยภายในเบด จะเห็นว่าการเคลื่อนของเม็ดของแข็งที่เป็นไปอย่างไม่เป็นระเบียบ

### 2.5.3 ลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบดที่คล้ายกับของไหล

ในขณะที่เม็ดของแข็งลอยตัวอยู่ในลักษณะฟลูอิดไคซ์แบบหนาแน่น ผิวหน้าของเบดจะเรียบสม่ำเสมอเหมือนกับผิวหน้าของของไหลที่อยู่ในภาชนะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นฟลูอิดไคซ์เบดแบบเดียวกันหรือจัดหอคอลงเอนไปทางซ้ายหรือขวาก็ตาม ผิวหน้าก็ยังเรียบอยู่อย่างเดิม ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบดใส่ลงไปบนเบดวัตถุของแข็งนั้นจะลอยตัวอยู่บนผิวหน้าของเบด นอกจากนี้ถ้าเจาะรูด้านข้างของเบด เม็ดของแข็ง

จะไหลออกมาทางรูนั้นได้เหมือนของเหลว หรือลื่นน้ำเอาเบค 2 เบคมาต่อท่อถึงกัน เม็ดของแข็งจากเบคสูงกว่าจะไหลไปยังเบคที่มีเม็ดของแข็งต่ำกว่า

จากคุณสมบัติที่ของแข็งในเบคทำหน้าที่คล้ายกับของไหลนี้มีประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมอย่างมาก สามารถนำเทคนิคนี้ไปใช้งานในระบบต่อเนื่อง (Continuous process) ได้

#### 2.5.4 ข้อได้เปรียบและเสียเปรียบของฟลูอิดไอเซชัน

##### ข้อได้เปรียบ

1. การกระจายอุณหภูมิสม่ำเสมอ และคงที่ตลอดทั้งเบค ไม่เกิดปัญหาเรื่อง Hot Spot จากปฏิกิริยาคายความร้อน
2. สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ การควบคุมทำได้ง่าย
3. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของชีวมวลกับกับฟลูอิด ไคซ์แก๊สมีมากกว่า ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี มีการถ่ายเทมวลสารและความร้อนได้ดีกว่า
4. การ Heat-up (การอุ่นเครื่อง) ทำได้รวดเร็ว ง่ายต่อการสตาร์ท และชดาวน์เครื่อง
5. ประสิทธิภาพสูง

##### ข้อเสียเปรียบ

1. เวลาที่ของไหลสัมผัสกับเม็ดของแข็งสั้นมาก จึงต้องใช้เบคสูงๆหรือเบคหลายชั้น ทำให้เปลืองเงินลงทุน
2. ใช้กับเม็ดของแข็งที่เปียกหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และตกตะกอน
3. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปเม็ดของแข็ง จะออกจากเบคไปพร้อมกับของไหล
4. เกิดการสันตะเหือนของหอตลอด หรือเกิดการกัดกร่อน เนื่องจากเม็ดของแข็งมากระทบกับผนังของหอตลอด

#### 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การค้นพบแก๊สชีวมวล เริ่มมีการบันทึกไว้เมื่อ Clayton (1699) ทดลองกลั่นสลายถ่านหิน แล้วพบว่าแก๊สที่ปล่อยออกจากเครื่องกำเนิดแก๊ส สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานเกี่ยวกับแก๊สชีวมวลจากการค้นพบของ Gardner and Barker (1791) ซึ่งพบว่าแก๊สร้อนที่ปล่อยออกมาจากปล่องควันหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้สำหรับหม้อไอน้ำได้อีกครั้ง ต่อมา Murdock (1792) นำแก๊สชีวมวลที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินมาใช้ประโยชน์ในการจุดตะเกียงให้แสงสว่างและให้ความอบอุ่นภายในที่อยู่อาศัย [16]

ในระยะแรกนิยมทำกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากถ่านหิน ต่อมาจึงมีผู้พยายามคิดค้นกระบวนการทำแก๊สซิฟิเคชันจากวัตถุดิบอย่างอื่น Lebon (1789) ทดลองทำกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจากไม้ และ Lampadius (1801) ศึกษาความเป็นไปได้จากการใช้ประโยชน์แก๊สชีวมวลคงที่ที่ผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านไม้ การศึกษาได้ก้าวหน้ามากขึ้นจนถึงขั้นการริเริ่มใช้แก๊สชีวมวลกับเครื่องยนต์ชนิดสันดาปภายใน โดย Fourcroy (1804) ผู้ค้นพบวอเตอร์แก๊ส (Water gas) จากการฉีดไอน้ำไปบนชั้นบนของถ่านหินที่ร้อนแดงและนำวอเตอร์แก๊สที่ได้ไปใช้กับเครื่องยนต์ [16]

ในระหว่างปี ค.ศ. 1815 – ค.ศ. 1839 นักวิจัยหลายท่านได้ศึกษากระบวนการเคมีที่ทำให้เกิดแก๊สชีวมวล Taylor (1815) ศึกษาปฏิกิริยาการเกิดแก๊สชีวมวล แล้วออกแบบและก่อสร้างเครื่องกำเนิดแก๊สสำหรับผลิตแก๊สขึ้นและจดลิขสิทธิ์ไว้ ส่วนที่ประเทศฝรั่งเศส Bischof (1840) ได้ออกแบบและก่อสร้างโรงงานเหล็กขนาดใหญ่ที่ใช้แก๊สชีวมวลจำนวนมากเป็นเชื้อเพลิงหลักของโรงงาน การพัฒนาเกี่ยวกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในช่วงระยะเวลานี้จะเน้นการออกแบบเครื่องกำเนิดแก๊ส Siemens (1861) ประสบความสำเร็จจากการออกแบบและก่อสร้างเครื่องกำเนิดแก๊สเชิงพาณิชย์สำหรับผลิตแก๊สชีวมวล ต่อมา Dowson (1878) ได้พัฒนาการออกแบบเครื่องกำเนิดแก๊สสมัยใหม่สำหรับใช้กับเครื่องจักรขนาดใหญ่ [16]

ในตอนต้นของศตวรรษที่ 20 การใช้เครื่องกำเนิดแก๊สได้ขยายไปตามเมืองต่างๆของทวีปยุโรปและแถบสแกนดิเนเวีย ในอังกฤษได้มีการใช้แก๊สชีวมวลแทนการใช้ น้ำมันสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนในสก๊อตแลนด์ Parkev (1901) ทดลองติดตั้งเครื่องกำเนิดแก๊สจากไม้ขนาด 2.5 และ 25 แรงม้า บนรถยนต์โดยสารและรถสามารถแล่นได้ไกลถึง 1000 ไมล์ หลังจากนั้น Humphey ก็ประสบความสำเร็จจากการใช้แก๊สชีวมวลกับบีมน้ำมันขนาดใหญ่ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 1 [16]

Poter and Smith ชาวอังกฤษร่วมกันปรับปรุงเครื่องกำเนิดแก๊สสำหรับติดตั้งในรถยนต์ ซึ่งในขณะนั้นได้มีการกักตุนน้ำมันเชื้อเพลิงไว้ใช้ระยะสงคราม การพัฒนาเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดแก๊สที่สำคัญคือ Imbert (1923) ผู้ออกแบบเครื่องกำเนิดแก๊สชนิดอากาศไหลลง (Down draught gasifier) ซึ่งถือเป็นต้นแบบของเครื่องกำเนิดแก๊สในปัจจุบัน [16]

การพัฒนาเกี่ยวกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในระยะต่อมา จะเน้นการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ (Kinetic) Tao Von Fredersdoff (1955) ศึกษาจลนพลศาสตร์เคมีของการผลิตแก๊สชีวมวลจากถ่านหิน May และคณะได้ศึกษาการเกิดแก๊สชีวมวลจากการเผาถ่านโค้กในเครื่องกำเนิดแก๊สทั้งแบบฟลูอิดไคซ์เบด และแบบเบดนิ่ง Squires (1961) นำผลการศึกษาของ May และคณะมาศึกษาเพิ่มเติม แล้วสรุปว่าในเตาปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่ง คาร์บอนจะว่องไวต่อปฏิกิริยาเฉพาะตรงบริเวณทางเข้าของไอน้ำร้อน แต่ในเตาชนิดฟลูอิดไคซ์เบด คาร์บอนจะว่องไวต่อปฏิกิริยาเท่ากันทุก

บริเวณ นอกจากนั้นยังได้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับไอน้ำ คาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ และเสนอสมการของอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา [16]

Reed และคณะ [24] ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่งและมีคอกคอดภายในเตา ระบบนี้ใช้แก๊สออกซิเจนและไอน้ำเข้าสู่เตาแบบไหลลง การทดลองแสดงให้เห็นว่า แก๊สชีวมวลจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในสถานะที่คาร์บอนเข้าทำปฏิกิริยาจนอิ่มตัว นอกจากนั้นยังได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดแก๊สอากาศไหลลงแบบเบดอยู่กับที่ที่ไม่มีคอกคอด และได้สร้างเครื่องกำเนิดแก๊สขึ้นมาทดลองใช้กับชีวมวลหลายชนิด ผลการทดลองได้แก๊สชีวมวลออกมามากพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้

Jenkins และ Ebeling [15] ได้ศึกษาค่าสหสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของชีวมวลหลายชนิด กับการแปรสภาพเป็นพลังงานของชีวมวล แล้วสรุปว่าคุณสมบัติของชีวมวลมีผลต่อค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิง และองค์ประกอบของแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จากการศึกษาได้นำแก๊สชีวมวล 62 ชนิดมาทดลองหาคุณสมบัติโดยประมาณและชีวมวล 51 ชนิดมาหาคุณสมบัติโดยละเอียด จากนั้นทดลองผลิตแก๊สชีวมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สชีวมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดคงที่ใช้อากาศไหลลงสู่เตา

Kunuii [18] ศึกษาการใช้พลังงานสำหรับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและศึกษาระบบกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันถ่านหินเพื่อผลิตแก๊สชีวมวลที่สะอาด จากการศึกษาพบว่าการใช้เครื่องกำเนิดแก๊สฟลูอิด ไคซ์เบด 2 เครื่อง ที่ใช้ถ่านหินไหลเวียน ไปมาระหว่าง 2 เครื่องนี้ จะทำให้แก๊สชีวมวลที่ได้มีคุณภาพดีและได้แก๊สปริมาณสูง

Cruz [12,13] ทดลองนำแก๊สชีวมวลจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านไม้ในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดนิ่ง ไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลร่วมกับน้ำมันดีเซล จากการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ดี โดยใช้แก๊สชีวมวลที่สะอาดและมีค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 889.92 กิโลแคลอรี/ลบ.ม. เครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ควรเป็นเครื่องยนต์ขนาดกลางและมีอัตราการหมุน 1300 – 1500 รอบต่อนาที

การวิจัยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันส่วนใหญ่จะใช้เครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดอยู่กับที่ แต่ก็มีนักวิจัยหลายท่านสนใจนำเทคนิคทางฟลูอิด ไคซ์เบดมาใช้กับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน Xu และคณะ [29] ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของแกลบในเครื่องฟลูอิด ไคซ์เบด โดยศึกษาถึงสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต เช่น อัตราการเกิดแก๊สชีวมวล ถ่านสุก และน้ำมัน องค์ประกอบของแก๊สชีวมวล ที่อุณหภูมิของเบดต่างๆกัน อัตราการป้อนแกลบ และความเร็วที่เหมาะสมของอากาศในการพ่นเข้าสู่เตา ผลการศึกษาพบว่า สถานะที่เหมาะสมได้แก่อุณหภูมิของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 704-805 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนอากาศ 0.75-0.87 ลบ.ม. ต่อกิโลกรัมของแกลบ อัตราการป้อนแกลบ 13.6-18.1 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยใช้เครื่องแบบฟลูอิด ไคซ์เบดขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. การทดลองได้ร้อยละของคาร์บอนที่ถูกแปรสภาพโดยความร้อนคิดเป็นร้อยละ 75 แก๊สชีววมวลมีค่าความร้อนระหว่าง 1067.90 - 1779.84 กิโลแคลอรี/ลบ.ม.

กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันในประเทศไทยเริ่มได้รับความสนใจหลังจากสงครามโลกครั้งที่ 2 ยุติลง เครื่องกำเนิดแก๊สที่สร้างขึ้นมาใช้ในสมัยนั้นเป็นแบบเบดนิ่ง อากาศจะถูกพ่นเข้าสู่เครื่องทางด้านข้าง ภายในเครื่องมีคอกคอด กรมโยธาธิการทหารบก [4] เป็นผู้สร้างขึ้นมาใช้กับไม้พินและถ่านไม้ ขณะที่เผาไหม้จะมีการพ่นละอองน้ำเข้าสู่เครื่องด้วย แก๊สชีววมวลที่ผลิตออกมาจะนำไปใช้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ต่อมาความสนใจเกี่ยวกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ได้ลดลง เนื่องจากน้ำมันเชื้อเพลิงได้รับความนิยมใช้มากกว่าแก๊สชีววมวล เมื่อเกิดวิกฤตด้านน้ำมันขึ้นภายในประเทศ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจึงกลับมาได้รับความสนใจจากนักวิจัยอีกครั้งหนึ่งในฐานะพลังงานทดแทน โดยเน้นการนำชีววมวลมาทดลองเพื่อให้เกิดแก๊สชีววมวลที่มีประสิทธิภาพ

Coovattachai [11] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทดลองผลิตแก๊สชีววมวลจากชีววมวลหลายชนิด เช่นถ่านไม้ ไม้ กาบมะพร้าว และแกลบอัดก้อน โดยใช้เครื่องกำเนิดแก๊สแบบเบดอยู่กับที่ และแบบฟลูอิดไคซ์เบด เพื่อนำแก๊สชีววมวลไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบการใช้พลังงานในเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างกัน ได้แก่ แก๊สชีววมวล แก๊สชีววมวลร่วมกับน้ำมันปิโตรเลียม และน้ำมันปิโตรเลียมเพียงอย่างเดียว จากการศึกษาสรุปได้ว่า การใช้แก๊สชีววมวลจากถ่านไม้ ไม้ และก้ามมะพร้าวในเครื่องยนต์แก๊สโซลีนสามารถใช้แก๊สชีววมวลอย่างเดียวกับน้ำมันปิโตรเลียมได้ แต่ในเครื่องยนต์ดีเซลต้องใช้แก๊สชีววมวลร่วมกับน้ำมันดีเซล ปัญหาที่พบในการทดลองคือความสะอาดของแก๊สชีววมวล ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบระบบทำความสะอาดแก๊สที่มีประสิทธิภาพ ความชื้นของอากาศก็เป็นอุปสรรคต่อการติดของเครื่องยนต์คือ ทำให้เครื่องยนต์ติดช้าและสูญเสียพลังงานมากขึ้น อย่างไรก็ตามการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้พลังงานจากแก๊สชีววมวล จะเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าน้ำมันปิโตรเลียม

Pitakarnnop [19] และ Boomrowd [20] ทดลองกระบวนการกลั่นสลายแกลบซึ่งทำให้เกิดแก๊สชีววมวล น้ำมันดินและถ่านสุก แก๊สชีววมวลจะนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าและนำแก๊สชีววมวลไปใช้กับเครื่องยนต์ของเครื่องสีข้าว จากการศึกษาพบว่าแก๊สชีววมวลใช้ได้ดีกับเครื่องยนต์ของเครื่องสีข้าวขนาดกลางจนถึงขนาดเล็ก ซึ่งมีกำลังของเครื่องยนต์ไม่เกิน 30 กำลังม้า การใช้แกลบในแต่ละวันไม่น้อยกว่า 1 ตันต่อ 1 เครื่อง และจากการศึกษาทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบทั้งหมดพบว่า มีความคุ้มค่าจนสามารถนำไปเผยแพร่สู่ชนบทได้

Sitthipong [27] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทดลองกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแกลบในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบ Single-stage และ Double-stage และนำแก๊สชีววมวลไปใช้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ในศึกษาได้ทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตแก๊สชีววมวลจากแกลบ เช่น อัตราการใช้อากาศ อัตราการป้อนแกลบ องค์ประกอบของแก๊ส

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เชื้อเพลิงและเปรียบเทียบการทดลองของฟลูอิด ไคซ์เบดทั้ง 2 แบบ จากการศึกษาพบว่า Double-stage fluidized bed จะให้เกิดชีวมวลที่มีค่าความร้อนสูงกว่า และมีประสิทธิภาพของทั้งระบบดีกว่า single-stage fluidized bed

Asia Institute of Thailand [10] ได้ศึกษากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลในเครื่องกำเนิดแก๊สฟลูอิด ไคซ์เบดขนาด  $15 \times 15$  ตร.ซม. เตานี้ใช้ท่อทองแดงพันรอบเตาและมีน้ำไหลหล่อเลี้ยงภายในท่อเพื่อควบคุมอุณหภูมิของเบด ภายในเบดจะใส่เม็ดทรายลงไปด้วย วัตถุประสงค์ที่นำมาทดลองคือผิวไม้หรือขี้เลื่อย จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของเบดสูงขึ้นการเกิดทาร์จะลดลง อุณหภูมิของเบดต้องไม่เกิน 750 องศาเซลเซียส ได้ โดยที่ขี้เลื่อยมีความชื้นประมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

##### 3.1.1 แก๊สซิฟายเออร์ (Gasifier)



รูปที่ 3.1 แก๊สซิฟายเออร์ทั้งระบบ

เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ระบบป้อนวัตถุดิบเข้าสู่แก๊สซิฟายเออร์ (Feeder System) ประกอบด้วยถังใส่วัตถุดิบ (Hopper) มีสกรูลำเลียง (Screw Feeder) หมุนเพื่อนำเอาวัตถุดิบเข้าสู่แก๊สซิฟายเออร์คอลัมน์ที่มีความสูง 2.6 เมตร ด้วยมอเตอร์กำลัง 1 แรงม้า เฟสเดียว (Single phase) เป็นตัวขับเคลื่อน แก๊สซิฟายเออร์มีความสูงรวม 3.3 เมตร ผนังด้านในเรียงบรรจุด้วยอิฐซึ่งทนความร้อนได้ 1000 องศาเซลเซียส ตัวถังทำด้วยเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิทั้งหมด 4 จุด จุดที่หนึ่งตรงตำแหน่งทางออกของแก๊ส จุดที่สองต่ำจากจุดที่หนึ่ง 63 เซนติเมตร จุดที่สามต่ำจากจุดที่สอง 54 เซนติเมตร และตำแหน่งสุดท้ายเหนือแผ่นกระจายลม (Air Distributor) ส่วนช่วงล่างของคอลัมน์เชื่อมต่อกับเครื่องเป่าอากาศ (Blower) และมีท่อสำหรับปล่อยเถ้าออก (Ash Outlet) ตรงกลางติดตั้งแผ่นกระจายลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 27 เซนติเมตร ขนาดรู 2.5 มิลลิเมตร รอบแผ่นกระจายลมเป็นหัวเผาแก๊สหุงต้ม (LPG Burner) เว้นระยะห่างจากผนังโดยรอบ 5 เซนติเมตร สำหรับเป็นช่องระบายเถ้า

ออก (Ash outlet) และไซโคลน (Cyclone) แยกอนุภาคขนาดเล็ก เช่น เถ้า ออกจากแก๊สผสม ผ่นังทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 3.5 มิลลิเมตร เชื่อมต่อกับส่วนบนของแก๊สไฟเบอร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร ด้านล่างเป็นทางออกของเถ้า และด้านบนเป็นทางออกของแก๊สผลิตภัณฑ์

### 3.1.2 ระบบควบคุม (Control System)

โครงการนี้มีกรวัดและควบคุม ได้แก่ อุณหภูมิ 4 ตำแหน่งภายในแก๊สไฟเบอร์ในหน่วย องศาเซลเซียส รอบหมุนของมอเตอร์ในเครื่องเป่าอากาศในหน่วยของความถี่ (เฮิร์ตซ์) และการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อน

ระบบควบคุมซึ่งประกอบด้วย

ประกอบด้วย

มอเตอร์อินเวอร์เตอร์ (Motor inverter) ของเครื่องเป่าอากาศ	1 เครื่อง
มอเตอร์อินเวอร์เตอร์ (Motor inverter) ของมอเตอร์ขับเคลื่อน	1 เครื่อง
มิเตอร์ (Meter) ของเทอร์โมคัปเปิล	4 เครื่อง



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุม

### 3.1.3 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ (Gas Chromatograph)

แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน จะนำไปวิเคราะห์ทางองค์ประกอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ ซึ่งในโครงการนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟแบบ TCD (Thermal Conductivity Detector)

แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่

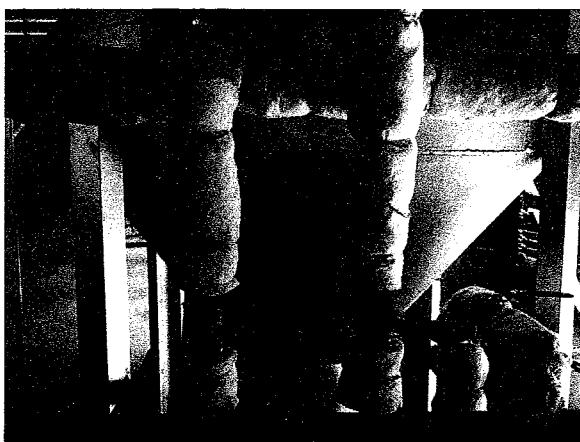
เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัดสัญญาณ (Detector) แล้วสัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

แก๊สโครมาโตกราฟ มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้ [3]

1. แก๊สพา (Carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
4. คอลัมน์ (Column)
5. เครื่องวัดสัญญาณ (Detector)
6. เครื่องบันทึก (Recorder)

เครื่องวัดสัญญาณ แบบ TCD วิเคราะห์สารที่ออกมาพร้อมกับแก๊สพาโดยใช้หลักการทำงานคือ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่ง ขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในเครื่องวัดสัญญาณ แล้วเครื่องวัดสัญญาณ จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโตแกรม

### 3.1.4 ฉนวนเซรามิก



รูปที่ 3.3 ท่อไอน้ำหุ้มด้วยฉนวนเซรามิกและขีดด้วยเส้นลวด

### ข้อมูลของฉนวน

ชื่อฉนวน : CERAMIC FIBER BLANKTET

ชื่อเฉพาะ : Refractory Ceramic Fiber, Refractory Fiber, Alumino Silicate  
Manmade Mineral Fiber, AMORPHOUS Ceramic Fiber, RCF

CAS Number : 142844-00-6

การวิเคราะห์ทางเคมี :  $Al_2O_3$  ร้อยละ 30 – 60,  $SiO_2$  ร้อยละ 40 – 60

ข้อมูลอักษกัษย : ไมคคไฟ, ไมเผาไหม้

อุณหภูมิ 1260 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่น : 128 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร

ขนาด : 7200 × 610 × 25 มิลลิเมตร

### 3.1.5 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)



รูปที่ 3.4 เครื่องเป่าอากาศ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเป่าอากาศในการทดลองนี้คือ เครื่องเป่าอากาศ (Blower) ซึ่งใช้ความถี่ 0-50 เฮิร์ตซ์

### 3.1.6 อุปกรณ์จุดไฟ

ระบบทำความร้อน หรือระบบเผาสำหรับแก๊สซิฟายเออร์ นอกจากหัวเตาที่ติดตั้งอยู่ภายใน แล้ว ยังประกอบด้วย ท่อแก๊สหุงต้ม ท่อสำหรับสอดอุปกรณ์ไฟ และตัวจุดไฟ

1. ท่อแก๊สหุงต้ม เป็นท่อโลหะสแตนเลสและเชื่อมกับท่อเกลียวสำหรับใช้น้ำปิดเชื่อมต่อกับหัวเตาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการอุ่นเครื่อง และการเผาในช่วงแรก ในการใช้งาน

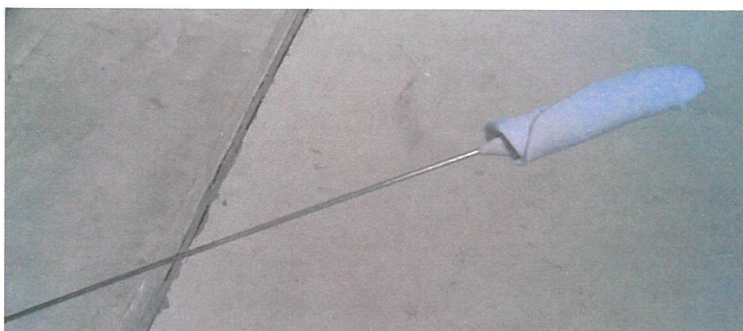
ต้องอาศัยอุปกรณ์จุดไฟสอดเข้าไป นอกจากนี้ ท่อดังกล่าวยังสามารถใช้สังเกตการติดไฟ สี และลักษณะของไฟได้

2. ท่อสำหรับสอดอุปกรณ์จุดไฟ เป็นท่อโลหะสแตนเลสเชื่อมต่อกับบอกลวาล์ว สำหรับการควบคุมปริมาณแก๊สและท่อสายยางเชื่อมต่อกับถังแก๊สหุงต้ม โดยท่อสำหรับสอดอุปกรณ์จุดไฟนี้จะยาวไปถึงบริเวณหัวเตาที่อยู่ภายในแก๊สซิฟายเออร์



รูปที่ 3.5 ท่อสำหรับสอดอุปกรณ์จุดไฟ(บน) และท่อแก๊สหุงต้ม(ล่าง)

3. อุปกรณ์จุดไฟ เดิมโครงการนี้วางแผนให้ใช้ปืนไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์จุดไฟ แต่ในทางปฏิบัติมีปัญหาเรื่องความยาวของปลายปืนกับระยะห่างของท่อถึงหัวเตา จึงเปลี่ยนเป็นลวดโลหะยาวประมาณ 2 ฟุต พันปลายด้วยเศษผ้าแล้วชุบด้วยน้ำมันดีเซล



รูปที่ 3.6 ลวดพันปลายด้วยผ้าชุบน้ำมัน ใช้เป็นอุปกรณ์จุดไฟแทนปืนไฟฟ้า

### 3.1.7 แก๊สหุงต้ม

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาปฐุมณีใน โครงการนี้คือแก๊สหุงต้ม (LPG)

รายละเอียดของถังแก๊สหุงต้มที่ใช้ในโครงการมีดังนี้

- ถังแก๊สหุงต้มขนาด 48 กิโลกรัม

- น้ำหนักถังเปล่า 35.3 กิโลกรัม
- ความจุ 108 ลูกบาศก์เดซิเมตร
- ความหนาผนังถัง 2.60 มิลลิเมตร
- ความดันที่ใช้งานสูงสุด 1.65 เมกะปาสคาล
- ความดันที่ทดสอบ 3.3 เมกะปาสคาล
- หมายเลข 46-009-427
- วันที่ทดสอบถัง 12-46



รูปที่ 3.7 การต่อแก๊สหุงต้ม ไปยังแก๊สซิฟายเออร์

### 3.1.8 วัตถุประสงค์(ขานอ้อย) [25]

#### 1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)

วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และค่าทางความร้อน (Heating value)

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

การวิเคราะห์แบบประมาณ	ขานอ้อย (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
คาร์บอนคงตัว	20.1
สารระเหย	75.8
เถ้า	4.2
คุณค่าทางความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	18.11

## 2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

วิเคราะห์ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์แบบธาตุ

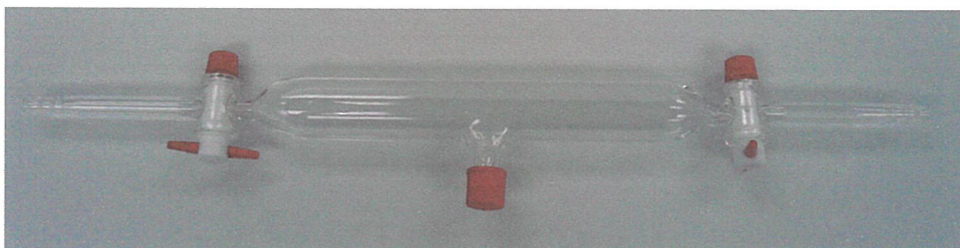
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ชานอ้อย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	44.1
ไฮโดรเจน	5.26
ออกซิเจน	44.4
ไนโตรเจน	0.19



รูปที่ 3.8 ชานอ้อย

### 3.1.9 หลอดแก้วเก็บแก๊ส

ใช้เก็บตัวอย่างแก๊สผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีต่อไป



รูปที่ 3.9 หลอดแก้วเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์

### 3.1.10 ถังดับเพลิง

เนื่องจากการดำเนินโครงการเกี่ยวกับเปลวไฟและเชื้อเพลิงจึงอาจทำให้เกิดการระเบิดหรือเพลิงไหม้ได้ เพื่อความปลอดภัยจึงต้องมีถังดับเพลิงวางประจำไว้ใกล้ๆเพื่อใช้ระงับเหตุให้ทันท่วงที



รูปที่ 3.10 ถังดับเพลิงที่ประจำการไว้

### 3.1.11 เครื่องดูดฝุ่น

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพื่อดูดฝุ่นหรือขานอ้อยออกจากแก๊สซิฟายเออร์เมื่อต้องการทำความสะอาดเครื่อง เครื่องดูดฝุ่นที่ใช้ในโครงการมีทั้งหมด 2 เครื่อง ดังรูปที่ 3.11 ได้แก่ เครื่องดูดฝุ่นแบบถังทรงกระบอกที่อาศัยหลักการเหมือนไซโคลน และเครื่องดูดฝุ่นธรรมดาที่อาศัยแผ่นกรองต่อท่อให้ทำงานร่วมกัน



รูปที่ 3.11 เครื่องดูดฝุ่น 2 เครื่องที่ใช้ในการทำความสะอาดภายในแก๊สซิฟายเออร์

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### 3.2.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่มอเตอร์ของเครื่องเป่าอากาศ (Blower)

##### กับอัตราการไหลของอากาศ (Flow rate)

1. เตรียมอุปกรณ์ ได้แก่ แอนิเมเตอร์ ระบบไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ให้พร้อม
2. บันทึกอุณหภูมิ
3. เปิดสวิทช์ ปรับความถี่ของมอเตอร์เป็น 0 เฮิร์ตซ์
4. ปรับความถี่ของมอเตอร์ขึ้นครั้งละ 1-2.5 เฮิร์ตซ์ ปล่อยให้มอเตอร์ปรับความเร็ว

##### รอบจนอัตราการหมุนคงที่ บันทึกค่าความถี่

5. ใช้แอนิเมเตอร์วัดอัตราเร็วลมที่ปากท่อของเครื่องเป่าอากาศ
6. บันทึกค่าความเร็วในหน่วย เมตร/วินาที
7. ปรับความถี่ขึ้น และทำเหมือนเดิมตั้งแต่ข้อ 4 จนถึงความถี่ 50 เฮิร์ตซ์
8. นำผลที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ รวมถึงสมการความสัมพันธ์ได้

#### 3.2.2 การอุ่นเครื่อง

##### 1. เปิดสวิทช์มอเตอร์ของเครื่องเป่าอากาศปรับความถี่เป็น 5 เฮิร์ตซ์ เพื่อให้มีออกซิเจนไหลเวียนอยู่ภายในแก๊สซิฟายเออร์

2. เตรียมอุปกรณ์จุดไฟ ในที่นี้คือลวดพันผ้าชุบน้ำมันแล้วจุดไฟ
3. สอดลวดเข้าไปในท่อสำหรับจุดไฟของแก๊สซิฟายเออร์ ดังรูปที่ 3.12
4. เริ่มเปิดวาล์วปล่อยแก๊สหุงต้ม ไหลเข้าไปทีละน้อย
5. สังเกตผ่านท่อว่ามีการติดไฟหรือไม่ ถ้าติดแล้วจึงดึงลวดออกมา
6. เริ่มจับเวลา

7. ค่อยๆเพิ่มความถี่ของเครื่องเป่าอากาศ พร้อมกับสังเกตลักษณะของเปลวไฟ ระวังอย่าให้ไฟดับ

8. หยุดความถี่ของเครื่องเป่าอากาศไว้ที่ 15 เฮิร์ตซ์ จะปรากฏเปลวไฟสีน้ำเงิน แสดงว่าการเผาไหม้สมบูรณ์ ปิดช่องของท่อสำหรับจุดไฟ

9. สังเกตอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจนถึง 300 องศาเซลเซียส

10. บันทึกเวลาที่ใช้ในการอุ่นเครื่อง



รูปที่ 3.12 การจุดเตาด้วยลวดพันผ้าชุบน้ำมันจุดไฟ

### 3.2.3 การเผาไหม้



รูปที่ 3.13 ขานอ้อย 1 ตัง น้ำหนัก 10 กิโลกรัม

1. ชั่งขานอ้อย 30 กิโลกรัม เพื่อเตรียมป้อนเข้าสู่แก๊สซิฟายเออร์
2. หลังจากการอุ่นเครื่องทำให้อุณหภูมิเพิ่มถึง 300 องศาเซลเซียสแล้ว จึงเริ่มป้อนขานอ้อยเข้าไปอย่างต่อเนื่องพร้อมกับเพิ่มความถี่เป็น 20-25 เฮิร์ตซ์ เพื่อเพิ่มอัตราการเผาไหม้

3. บันทึกเวลา
4. สังเกตอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
5. เมื่ออุณหภูมิเพิ่มถึง 400 องศาเซลเซียส เพิ่มอัตราการป้อนขานอ้อยและป้อนอย่างต่อเนื่อง
6. ปิดวาล์วแก๊สหุงต้ม ปล่อยให้วัตถุดิบลุกไหม้ด้วยตัวเอง
7. เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 450 – 500 องศาเซลเซียส ลดความถี่ของเครื่องเป่าอากาศลง เป็น 10-12 เฮิร์ตซ์ และเปิดวาล์วไอน้ำที่ความดันประมาณ 0.2-0.3 บาร์
8. ปล่อยให้เข้าสู่สภาวะคงตัวโดยสังเกตจากอุณหภูมิ ใช้เวลาประมาณ 15 นาที
9. การทดสอบแก๊สผลิตภัณฑ์ทำได้โดยการต่อท่อแยกจากทางออกของไซโคลนไปเชื่อมต่อกับหัวเตาแก๊ส แล้วจุดไฟ
10. หากพบว่าแก๊สมีการลุกติดไฟได้ดี จึงเก็บแก๊สตัวอย่างไปวิเคราะห์



รูปที่ 3.14 สภาพภายนอกของแก๊สซิฟายเออร์ขณะทดลองเดินเครื่อง

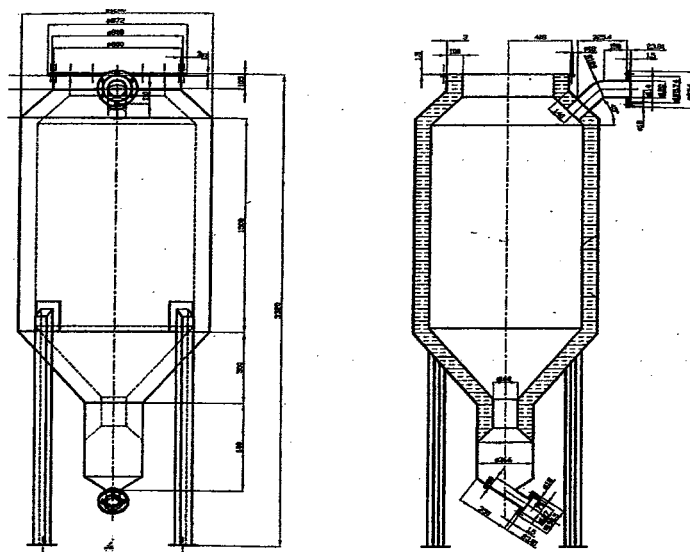
## บทที่ 4

### การดำเนินงานและผลการดำเนินงาน

#### 4.1 ผลการออกแบบและสร้างเครื่องแก๊สฟายเออร์

##### 4.1.1 แก๊สฟายเออร์ (Gasifier)

แก๊สฟายเออร์ (Gasifier) เป็นเครื่องมือในการเกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน มีส่วนสูงรวม 3.3 เมตร ผนังด้านในเรียงบรรจุด้วยอิฐทนไฟทรงสี่เหลี่ยมคางหมู กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร หนา 7 เซนติเมตร มุมเอียงประมาณ 12.5 องศา และ 6.3 องศา สามารถทนความร้อนได้ 1000 องศาเซลเซียส ตัวถังทำด้วยเหล็กหนา 4.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 เมตร องศาเซลเซียส บริเวณผนังที่มีการเจาะรูเพื่อสอดท่อสแตนเลสทั้งหมด 4 จุด จุดที่หนึ่งตรงตำแหน่งทางออกของแก๊ส จุดที่สองต่ำจากจุดที่หนึ่ง 63 เซนติเมตร เป็นช่วงโซนที่มีการเกิดรีดักชัน จุดที่สามต่ำจากจุดที่สอง 54 เซนติเมตร เป็นช่วงโซนที่มีการเกิดออกซิเดชัน และตำแหน่งใกล้แผ่นกระจายลมสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิ ส่วนช่วงล่างของคอลัมน์เชื่อมต่อกับเครื่องเป่าอากาศ (Blower) และมีท่อสำหรับระบายแก๊สออก บริเวณเหนือตำแหน่งทรงกรวยติดท่อวงแหวนสำหรับสเปรย์ไอน้ำเพื่อลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิในออกซิเดชัน โซนสูงเกินไป เพราะอุณหภูมิที่สูงเกินไปในโซนนี้จะทำให้ออกซิเดชัน โซนขยายพื้นที่มากขึ้นจนไปลดรีดักชัน โซน ในการป้อนชีวมวลจะป้อนที่ตำแหน่งต่ำกว่าทางออกของแก๊สเพื่อให้แก๊สที่อยู่ในระบบทำปฏิกิริยากับวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงใหม่ที่ป้อนเข้าไป และผ่านลงไปสู่รีดักชัน โซนและออกซิเดชัน โซนตามลำดับ



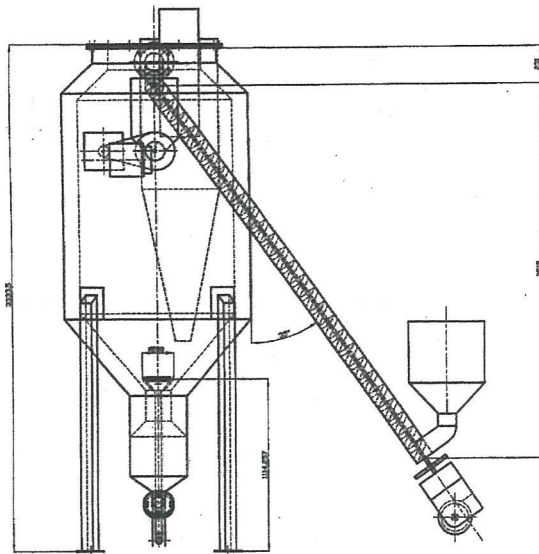
รูปที่ 4.1 แบบร่างของแก๊สฟายเออร์



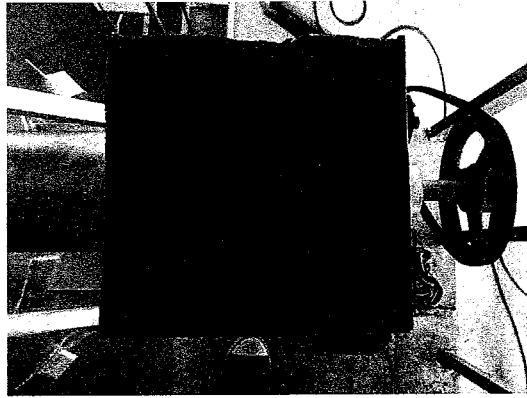
รูปที่ 4.2 ด้านซ้ายของแก๊สซิฟายเออร์แสดงช่องสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ (ซ้าย) และด้านขวาของแก๊สซิฟายเออร์แสดงการเชื่อมต่อกับระบบป้อนวัตถุดิบ (ขวา)

#### 4.1.2 ระบบป้อนวัตถุดิบเข้าสู่แก๊สซิฟายเออร์ (Feeder System)

ประกอบด้วยถังใส่วัตถุดิบ (Hopper) มีสกรูลำเลียง (Screw Feeder) หมุนเพื่อนำวัตถุดิบเข้าสู่แก๊สซิฟายเออร์คอลัมน์ที่มีความสูง 2.6 เมตร โดยใช้แรงจากมอเตอร์กำลัง 1 แรงม้า เฟสเดียว (Single phase) เป็นตัวขับเคลื่อน



รูปที่ 4.3 แบบร่างด้านขวาของแก๊สซิฟายเออร์แสดงถึงระบบป้อนวัตถุดิบ



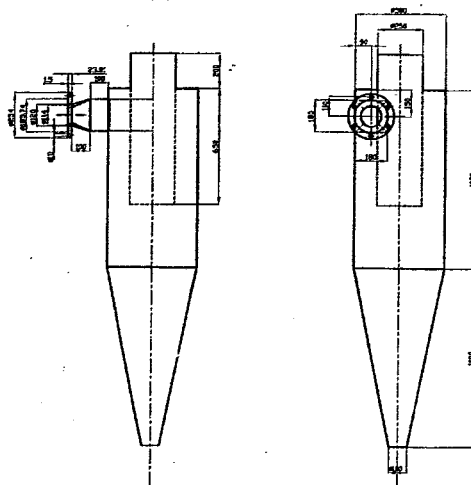
รูปที่ 4.4 ภายในด้านบนของถังใส่วัสดุคืบและสกรูป้อน

#### 4.1.3 ไซโคลน (Cyclone)

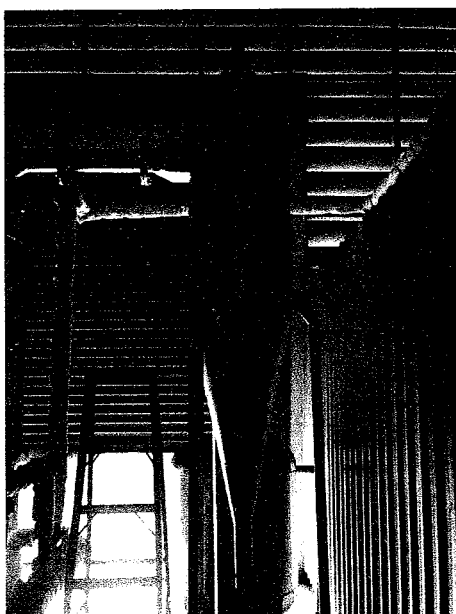
ผนังของไซโคลนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมหนา 3.5 มิลลิเมตร เชื่อมต่อกับส่วนบนของแก๊สพายเออร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เมตร แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เข้ามาจะหมุนวนอยู่ภายในกระบอกไซโคลน 5 รอบ ฝุ่นเถ้าและอนุภาคของขานอ้อยจะออกไปทางด้านล่าง และแก๊สผลิตภัณฑ์จะออกไปทางด้านบน

ไซโคลน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลาง	500	เซนติเมตร
ทางเข้าของแก๊สและอนุภาค	180 x 186	เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส	250	เซนติเมตร
ความสูงของกระบอกไซโคลน	1	เมตร
ความสูงของกรวยไซโคลน	1	เมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของอนุภาค	90	เซนติเมตร



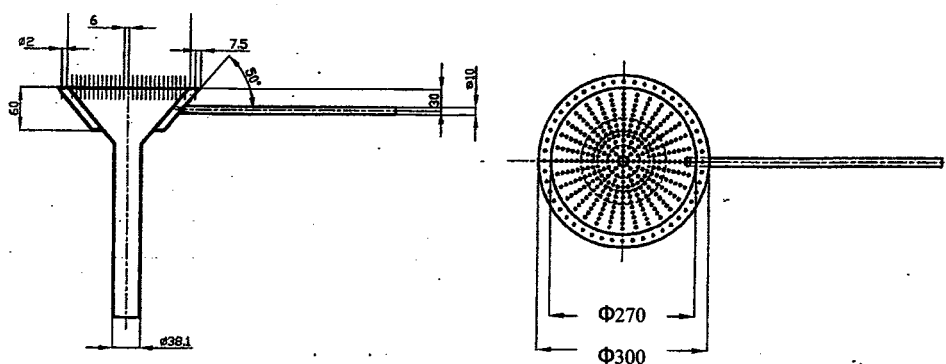
รูปที่ 4.5 แบบร่างของไซโคลนที่ใช้ในโรงงาน



รูปที่ 4.6 ไซโคลนที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

#### 4.1.4 แผ่นกระจายลม (Distributor) และหัวเตา (Burner)

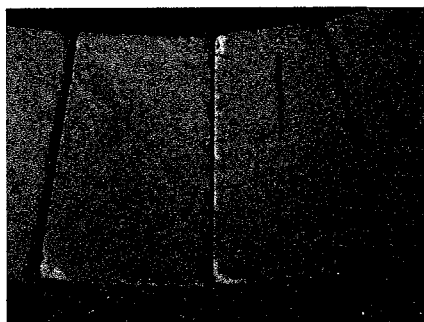
กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจำเป็นต้องอาศัยออกซิเจนและเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ปฏิกิริยารวมถึงการเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดซ์เซชันซึ่งจะทำให้เกิดออกซิเคชันโซน ภายในส่วนล่างของคอลัมน์จึงมีการติดตั้งกรวยแผ่นกระจายลม (Air Distributor) เส้นผ่านศูนย์กลาง 27 เซนติเมตร ขนาดรู 2.5 มิลลิเมตร และรอบแผ่นกระจายลมเป็นหัวเตาแก๊สหุงต้ม (LPG Burner) เชื่อมต่อกับท่อแก๊สจากภายนอก นอกจากนี้ ยังมีการเว้นช่องว่างจากผนังโดยรอบเป็นระยะ 5 เซนติเมตร เพื่อเป็นช่องระบายเถ้าออก (Ash Outlet)



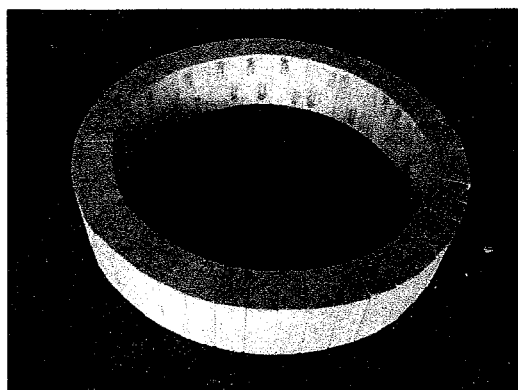
รูปที่ 4.7 แบบร่างกรวยแผ่นกระจายลมและหัวเตา

## 4.2 ผลการปรับปรุงเครื่องแก๊สซิฟายเออร์

4.2.1 เนื่องจากตัวถังของแก๊สซิฟายเออร์เป็นทรงกระบอก อีฐทนความร้อนที่ใช้ก็ต้องมี มุมโค้งที่เหมาะสม ซึ่งไม่สามารถหาได้ในตลาดวัสดุ จึงแก้ไขด้วยการใช้อีฐทรงสี่เหลี่ยมเปียกปูน แทน แต่อีฐชนิดนี้ที่หาได้ในตลาดวัสดุมีมุมลาดเอียงที่เมื่อเรียงเป็นวงแหวนแล้วไม่ได้ขนาดตาม ต้องการ วิธีแก้ปัญหาคือ การใช้อีฐที่มีมุมลาดเอียงต่างกันเรียงสลับกันเพื่อให้ได้วงแหวนที่มีขนาดพอดีกับผนังภายในของแก๊สซิฟายเออร์ แล้วประสานด้วยคอนกรีตทนความร้อนเพื่ออุดร่องและ รอยต่อ



รูปที่ 4.8 อีฐทนความร้อนทรงสี่เหลี่ยมคางหมูมุมเอียง 12.5 องศา และ 6.3 องศาที่ใช้เรียงสลับกัน



รูปที่ 4.9 ลักษณะการเรียงอิฐทนความร้อนเป็นวงแหวนในแก๊สซิฟายเออร์

4.2.2 ปัญหาท่อส่งแก๊สหุงต้ม การจุดไฟเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ในแก๊สซิฟายเออร์บริเวณ เหนือแผ่นกระจายอากาศ หรือออกซิเดชัน โชน ต้องมีการป้อนแก๊สหุงต้มเข้าไปเพื่อให้เกิด การเผาไหม้ในช่วงแรก แต่ท่อนำแก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวเป็นท่อที่บริษัทผู้รับเหมาสร้างเครื่องได้ ติดตั้งไว้ เป็นโลหะสแตนเลสที่บางเพียง 1 มิลลิเมตร ปัญหาที่เกิดขึ้น คือ เมื่อทำการเชื่อมต่อท่อกับ หัววาล์วด้วยไฟฟ้า งานสแตนเลสต้องใช้กระแสไฟฟ้า 10-15 แอมแปร์ ทำให้ขนาดท่อที่บางเพียง 1

มิลลิเมตร เกิดการทะลุและไม่สามารถใช้งานได้ จึงตัดท่อเก่าออกจนชิดผนังของแก๊สซิฟายเออร์ แล้วเชื่อมท่อสแตนเลสที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร แทนท่อเก่า



รูปที่ 4.10 ท่อนำแก๊สหุงต้มที่ส่วนล่างของแก๊สซิฟายเออร์



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบท่อสแตนเลสใหม่ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร กับท่อเก่าที่หนาเพียง 1 มิลลิเมตร

4.2.3 การเดินท่อส่งไอน้ำ ไอน้ำเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการเกิดสเต็มแก๊สซิฟิเคชัน หลังจากติดตั้งแก๊สซิฟายเออร์แล้ว จะต้องมีการเดินท่อไอน้ำมาจากหม้อไอน้ำ (Steam Boiler) ของบริษัท อัลเทอร์เนทีฟ เอนเนอร์ยี อินเตอร์เนชันแนล (ประเทศไทย) จำกัด ท่อไอน้ำเป็น เหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 2 นิ้ว แล้วแยกท่อไปยังแก๊สซิฟายเออร์ 2 ตำแหน่ง ควบคุมการป้อนด้วย วาล์ว ได้แก่ ท่อฟลูอิด ไคซ์แก๊สที่ไอน้ำจะผสมกับอากาศแล้วป้อนเข้าสู่ซิฟายเออร์ส่วนล่างเพื่อเพิ่มความดันในการฟลูอิด ไคซ์ และลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และท่อวงแหวนสำหรับสเปรย์ ไอน้ำบริเวณเหนือรอยต่อระหว่างคอลัมน์กับพื้นที่ทรงกรวย



รูปที่ 4.12 ท่อที่เดินไว้สำหรับป้อนไอน้ำเข้าสู่ท่อสเปร์ยวงแหวนภายในแก๊สซิฟายเออร์



รูปที่ 4.13 ท่อที่เดินไว้สำหรับป้อนไอน้ำเข้าไปผสมกับอากาศในท่อฟลูอิดไดซ์แก๊ส

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของขานอ้อย

วิเคราะห์ด้วย TGA (Thermal Gravimetric Analysis) อาศัยหลักการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน

สภาวะที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วย TGA

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	10	องศาเซลเซียส/นาที
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้วิเคราะห์	50-800	องศาเซลเซียส
น้ำหนักตัวอย่าง	7.895	มิลลิกรัม

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของขานอ้อย

คุณสมบัติ	ร้อยละ โดยน้ำหนัก
ความชื้น	25.952
สารอินทรีย์ระเหยได้	49.327
เกลืออินทรีย์	17.730
เถ้า	6.000

หมายเหตุ : ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากศูนย์เครื่องมือวิจัย คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

#### 4.4 สถานะในการทดลองเดินเครื่อง

อุณหภูมิเริ่มต้น	29	องศาเซลเซียส
อัตราการป้อนอากาศขณะอุ่นเครื่อง	0.5	ลบ.ม./นาที
เวลาที่ใช้ในการอุ่นเครื่องจนอุณหภูมิสูงถึง	300	องศาเซลเซียส 32 นาที
อัตราการป้อนขานอ้อย	30	กิโลกรัม/ชั่วโมง
อุณหภูมิสูงสุด	600	องศาเซลเซียส
อัตราการป้อนอากาศขณะเผาไหม้	2.17	ลบ.ม./นาที
ความเร็วของฟลูอิด ไคซ์แก๊ส	2.7-3.7	เมตร/วินาที

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์จากการทดลองเดินเครื่อง

องค์ประกอบในแก๊สผลิตภัณฑ์	ร้อยละ โดยปริมาตร
N <sub>2</sub>	-
CO <sub>2</sub>	3.13
CO	2.48
CH <sub>4</sub>	1.23
H <sub>2</sub>	-

## บทที่ 5

# สรุปผล และข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในการออกแบบแก๊สซิฟายเออร์และอุปกรณ์ต่างๆ ได้อาศัยข้อมูลจากทฤษฎีและวารสารที่เกี่ยวข้องเพื่อกำหนดรูปแบบ และพิจารณาวัสดุที่มีอยู่ในท้องตลาดเพื่อเป็นตัวกำหนดขนาด ใช้เวลาในการสร้างเครื่องรวมถึงการแก้ไขเนื่องจากทำผิดแบบเป็นระยะเวลา 4 เดือน และมีการปรับปรุงเครื่องมือตลอดระยะเวลาการทำโครงการ

แก๊สซิฟายเออร์ที่ออกแบบในโครงการนี้ สามารถทำงานได้ทั้งแบบฟลูอิด ไคซ์เบด และแบบเบดนิ่ง (Fixed bed) ขึ้นอยู่กับลักษณะการป้อนชีวมวลและอัตราเร็วของอากาศ ซึ่งในโครงการนี้ได้ศึกษาปรากฏการณ์เชิงคุณภาพ สังเกตลักษณะการเคลื่อนไหวของชีวมวลเพื่อประมาณการใช้ อัตราการป้อนอากาศ ในการทดลองเดินเครื่องได้ใช้ชานอ้อยเป็นวัตถุดิบ การทดลองดังกล่าวทำขึ้นเพื่อทดสอบระบบการป้อน ทดสอบอัตราการป้อนอากาศ และใช้ในการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง พบว่าการใช้สกรูป้อนไม่เหมาะกับชานอ้อย เนื่องจากเกิดการเกาะตัวของเส้นใยทำให้อุดตันภายในท่อสกรู อัตราการป้อนอากาศคิดค่าตามปริมาณที่คำนวณได้ในทางทฤษฎีเพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์(ภาคผนวก ข) เมื่อต้องการให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะลดอัตราการป้อนอากาศลงด้วยการปรับความถี่ของเครื่องเป่าอากาศ (ภาคผนวก ก) แล้วเพิ่มปริมาณไอน้ำ ในการป้อนไอน้ำ ถ้าป้อนในปริมาณน้อยจะทำให้การฟลูอิด ไคซ์ไม่มีดี และผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ในปริมาณที่ต่ำ แต่ถ้าป้อนในปริมาณมากจะทำให้อุณหภูมิของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว และยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องความชื้น

การทำงานของแก๊สซิฟายเออร์ เริ่มต้นที่การอุ่นเครื่อง หากการอุ่นเครื่องใช้ชานอ้อยบรรจุเป็นเบดนิ่งอยู่ภายในเครื่องก่อนแล้วจึงจุดไฟ จะทำให้อุณหภูมิภายในแก๊สซิฟายเออร์สูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ไม่ต้องใช้แก๊สหุงต้มในปริมาณมาก ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาควันและเถ้าสะสมในตัวเครื่อง และประการสำคัญยิ่งไปกว่านั้นคือ สูญเสียชานอ้อยที่ถูกนำมาอุ่นเครื่องไปโดยไม่ก่อให้เกิดแก๊สเชื้อเพลิง เว้นแต่จะทำการปรับสภาวะต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับวิธีการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงแบบเบดนิ่งเท่านั้น ในการทำงานแบบต่อเนื่อง เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องสูงมากกว่า 400 องศาเซลเซียสแล้วจึงเริ่มป้อนชานอ้อยเข้าไป เกิดปฏิกิริยาภายในเครื่องแบ่งออกเป็น 2 โซน ได้แก่ รีดักชันโซน คาร์บอนในชานอ้อยบางส่วนจะสัมผัสกับรีดิวซ์แก๊สเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน และออกซิเดชันโซนที่อยู่บริเวณเหนือแผ่นกระจายลมและหัวเตาแก๊สหุงต้ม คาร์บอนจะถูกเผาไหม้ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลอยขึ้นไปสู่รีดักชัน โซนและทำหน้าที่เป็นรีดิวซ์

แก๊สต่อไป แก๊สผลิตภัณฑ์ และอนุภาคของขานอ้อยจะเข้าสู่ไซโคลนเพื่อเป็นการทำความสะอาด แก๊สเบื้องต้นก่อนจะเข้าไปสู่เครื่องสกรับเบอร์แล้วใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้อื่นๆ

## 5.2 ปัญหา อุปสรรค การแก้ปัญหา และข้อเสนอแนะ

5.2.1 ระบบสกรูป้อน สกรูป้อนที่ออกแบบไว้ทำงานไม่ดีเมื่อใช้ขานอ้อยเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากขานอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยหลายขนาด และมักเกาะตัวกันคล้ายฟองน้ำ เมื่อถูกสกรูบีบ จะเกิดการอัดตัวกันแน่นจนเกิดการอุดตันในท่อ สกรูติดขัด ทำให้การขนถ่ายขานอ้อยเข้าสู่ แก๊สซิฟายเออร์ขัดข้องและไม่ต่อเนื่อง จึงแก้ปัญหาด้วยการเปลี่ยนจากป้อนวัตถุดิบที่ฮอปเปอร์ ด้านล่างเป็นป้อนที่ ฮอปเปอร์ด้านบนแทนชั่วคราว เพื่อลดระยะเวลาทางการขนถ่ายและลดโอกาสการ อุดตัน



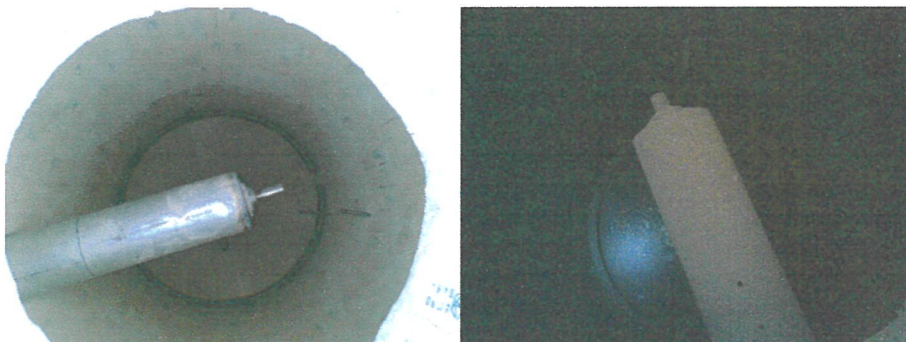
รูปที่ 5.1 เปลี่ยนการป้อนขานอ้อยจากฮอปเปอร์ด้านล่างเป็นฮอปเปอร์ด้านบน

5.2.2 ปัญหาการวัดค่าอัตราการไหลของอากาศและไอน้ำ เนื่องจากมาตรวัด หรือเครื่องวัดที่ใช้ตรวจวัด ในกรณีของอุปกรณ์ป้อนอากาศ (Blower) จึงวัดความเร็วลมด้วยแอนิเมเตอร์ (Anemometer) เทียบกับค่าต่างๆที่ปรากฏบนอินเวอร์เตอร์แล้วสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อ ประมาณอัตราการไหลของอากาศที่ความถี่ต่างๆ รวมถึงสมการความสัมพันธ์ ผลที่ได้คือกราฟ เส้นตรง ดังรูปที่ ก.1 และ ก.2 และยังสามารถนำไปคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศได้ ดังภาคผนวก ก

5.2.3 ปัญหาอุปกรณ์จุดไฟ เนื่องจากปืนไฟฟ้าสำหรับจุดไฟมีขนาดปลายปืนสั้นเกินไป ทำให้ไม่สามารถสอดปลายปืนเข้าไปในท่อเพื่อจุดไฟที่ตำแหน่งหัวเตาได้ แก้ปัญหาด้วยการเปลี่ยน จากปืนไฟฟ้าเป็นเส้นลวดยาว พันปลายด้วยเศษผ้าชุบน้ำมัน จุดไฟ แล้วสอดเข้าไปแทน ลักษณะ

ของลวดจุดไฟนี้เป็นดังรูปที่ 3.6 แต่มีข้อควรระวังคือ เวลาที่ทำการจุดไฟมันจะมีการพ่นสะเก็ดไฟออกมาจากท่อ ผู้จุดไฟควรสวมหน้ากาก และแว่นตาเพื่อความปลอดภัย ดังรูปที่ 3.12

**5.2.4 ปัญหาการอุดตันที่บริเวณแก๊สซิฟายเออร์ส่วนล่าง** เนื่องจากมีเถ้าเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก และมีความชื้นสะสม ทำให้เกิดการจับตัวกันและเกาะกันอยู่บริเวณเหนือช่องว่างสำหรับเป็นทางออกของแก๊สรอบๆ แผ่นกระจายลมและหัวเตา ส่งผลให้เถ้าจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไม่สามารถระบายออกไปจากแก๊สซิฟายเออร์ได้ ทำให้เกิดการสะสมของชั้นเบด และเกิดการสะสมของความชื้น ปัญหาที่ตามมา คือ เมื่อลดการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนและเพิ่มการเผาไหม้ด้วยไอน้ำ อุณหภูมิในเครื่องจะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วและควบคุมได้ยาก และเมื่อทำการทดลองครั้งถัดไป การอุ่นเครื่องต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้น การแก้ปัญหาคือ ป้อนวัตถุดิบในปริมาณที่เหมาะสม ควบคุมปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ และรักษาอุณหภูมิภายในกระบวนการให้สูง กรณีที่ยังมีเถ้าติดอยู่ภายใน ทำความสะอาดโดยเปิดฝาของแก๊สซิฟายเออร์ส่วนบน ปล่อยให้อากาศระบายเข้าไปภายในประมาณ 20 นาทีเพื่อให้เถ้าและผนังภายในแห้งขึ้น ทำการกำจัดเถ้าที่ติดอยู่ตามผนังเครื่องรวมทั้งที่เกาะตัวกันบริเวณส่วนล่างของเครื่องออกด้วยอุปกรณ์ตัก การตักเถ้านั้นจะต้องทำอย่างช้าๆ เพื่อไม่ให้ฝุ่นเถ้าฟุ้งกระจาย ห้ามใช้น้ำราดบนเถ้าเพราะจะทำให้ไอฐและตัวประสานเสียสภาพได้ เมื่อเหลือเถ้าเพียงเล็กน้อยแล้วจึงใช้เครื่องดูดฝุ่น ดังรูปที่ 3.11 ฝุ่นเถ้าที่เหลือออกไป



รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายแนวตั้งแสดงสภาพภายในของแก๊สซิฟายเออร์ก่อนและหลังการทดลอง

**5.2.5 ปัญหาไอน้ำควบแน่นเป็นของเหลว** แม้ว่าจะมีการหุ้มฉนวนใยเซรามิกเพื่อลดการสูญเสียความร้อนแล้ว แต่ก่อนทำการทดลองท่อเหล็กและวาล์วทองเหลืองมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อม เมื่อมีการปล่อยไอน้ำมาตามท่อไอน้ำ จะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวปะปนไปกับไอน้ำ ทำให้มีความชื้นเพิ่มเข้าไปในระบบ เกิดปัญหาอุณหภูมิลดต่ำลงส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาในสตีมน้ำแก๊สซิฟิเคชัน (Steam Gasification) ที่ต้องอาศัยความร้อนจากนอกระบบเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ การควบแน่นของไอน้ำยังส่งผลให้เกิดการท่วมขังภายในท่อทั้งท่อส่งไอน้ำและท่อฟลูอิดไคซ์แก๊ส โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังจบช่วงการทดลองที่อุณหภูมิของทั้งระบบจะลด

ต่ำลงมา น้ำที่ท่วมขังอยู่ปริมาณมากส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องอัดไปทิ้งในแง่ของความชื้นที่เพิ่มขึ้น การสูญเสียแรงดัน การสูญเสียพลังงาน รวมถึงอันตรายจากการรั่วไหลของน้ำ ปัญหาทั้งหมดแก้ไขด้วยการเปลี่ยนจากการใช้ไอน้ำอิ่มตัว (Saturated Steam) เป็นไอน้ำยิ่งยวด (Superheated Steam) และในการปฏิบัติงานต้องเปิดวาล์วและคลายน็อตท่อฟลูอิดไคซ์แก๊สเพื่อระบายน้ำออกจากท่อทั้งก่อนและหลังการทดลอง เมื่อจะทำการป้อนไอน้ำ ควรเปิดวาล์วท่อไอน้ำให้ไหลทิ้งไปก่อนป้อนเข้าไปในระบบ เพื่อให้ความร้อนจากไอน้ำจะได้ถูกถ่ายเทไปยังท่อเหล็กและวาล์วทองเหลือง จนกระทั่งท่อเหล็กและวาล์วนั้นมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับไอน้ำมากที่สุด



รูปที่ 5.3 การเปิดวาล์วปล่อยน้ำที่ควบแน่นอยู่ในท่อไอน้ำทิ้ง



รูปที่ 5.4 น้ำที่ท่วมขังอยู่ในท่อฟลูอิดไคซ์แก๊สไหลออกมาหลังจากการคลายน็อต

**5.2.6 ปัญหาการวัดปริมาตรแก๊สที่ผลิตได้** เนื่องจากแก๊สซิฟายเออร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องมีการปรับปรุงแก้ไขหลายครั้ง และในการทดลองนี้ แก๊สที่หมุนเวียนอยู่ในระบบจะมีการรั่วไหล

ออกไปในหลายตำแหน่ง ได้แก่ ท่อสกรูป้อน ท่อทางออกของเต้าที่ส่วนล่างของแก๊สซิฟายเออร์ และทางออกของเต้าของไซโคลน ประกอบกับแก๊สที่ผลิตได้นั้น ไม่มีความดันมากพอที่จะดันตัวออกไปยังส่วนบนของไซโคลน ทำให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากระบบทำความสะอาดมีปริมาณน้อยซึ่งนับเป็นเพียงส่วนหนึ่งของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จริง เมื่อไม่สามารถวัดปริมาณแก๊สที่ผลิตได้ก็ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่าพลังงานของแก๊สรวมถึงคำนวณกำลังผลิตของแก๊สซิฟายเออร์ได้ ควรแก้ไขด้วยการปรับปรุงระบบป้อนให้ปิดทึบมากขึ้น ทางออกของเต้าที่ส่วนล่างของแก๊สซิฟายเออร์และไซโคลนควรมีการติดตั้งประตูแล้วเพื่อกักเก็บเต้าแทนการปล่อยทั้งเต้าและแก๊สออกไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก และในการเก็บแก๊สผลิตภัณฑ์ อาจใช้ปั๊มช่วยดูดแก๊สออกจากทางออกแก๊สของไซโคลนมาเก็บไว้ในถังเก็บแก๊ส



รูปที่ 5.13 ตัวอย่างปัญหาฝุ่นควันและแก๊สที่ออกมาจากระบบ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยวัฒน์ พรหมภูเบศร์ “การเผาไหม้เชื้อเพลิงผสมถ่านหินและชีวมวลในฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547
- [2] นายพิเชษฐ ขุมทรัพย์, ผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อการผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากเตาผลิตแก๊สจากไม้แบบอากาศไหลลง, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2528
- [3] ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) [ออนไลน์]เข้าถึงได้จาก URL :  
[www.rmutphysics.com/charud/oldnews/94/index94.htm-388k](http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/94/index94.htm-388k)
- [4] มหาดไทย,กระทรวง. กรมโยธาธิการ. เตาผลิตแก๊สเชื้อเพลิงประสิทธิภาพสูง. กรุงเทพมหานคร: กรมโยธาธิการ กระทรวงมหาดไทย, 2522
- [5] วรเดช เจริศพรายวงศ์. “การเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไคซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- [6] ศศิวิมล สูงสว่าง. “การเผาไหม้แกลบในฟลูอิดไคซ์เบด” วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2526
- [7] นายศักดิ์ แสนสุภา, การผลิตแก๊สชีวมวลจากแกลบในเครื่องกำเนิดแก๊สแบบฟลูอิดไคซ์เบด, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2529
- [8] สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ, ฟลูอิดไคซ์ชัน, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี พ.ศ. 2528
- [9] สินีนาฏ รอดจัน “ไพโรไลซิสของชีวมวลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน”วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547
- [10] Asia Institute of Thailand. “Fluidized Bed Biomass Gasification.” Proceeding of the FAO Second Expert Consultant on Producer Gas Development in Asia and the Pacific Region, August 9-11, 1983
- [11] Coovattanachai, N. “Milling Performance of Small Rice Milling Unit Fuled by Producer Gas” Proceeding of the FAO Second Expert Consultant on Producer Gas Development in Asia and the Pacific Region, August 9-11, 1983

- [12] Cruz, I.E. “ **Development of Rice Husk Producer Gas System in the Philippines.**” Proceeding of the FAO Second Expert Consultant on Producer Gas Development in Asia and the Pacific Region, August 9-11, 1983
- [13] **Producer Gas Technology for Rural Applications.** Philippines National Oil Company Energy Research and Development Center, Philippine, 1983
- [14] Gumz, W. **Gas Producers and Blast Furnances.** pp. 1-30, John Wiley & Sons, New York, 1950
- [15] Jenkins, B.M. and Ebeling, J.M. “**Correlation of Physical and Chemical Properties of Terrestrial Biomass with Conversion.**” Agricultural Engineering Department University of California, Undated (Typewritten)
- [16] Kaupp, A. **Gasification of Rice Hull Theory and Praxis.** German Appropriate Technology Exchange, Germany, 1983
- [17] Kim HyunYong , **Method of gasification in IGCC system , 2007**
- [18] “**Energy Requirements for Gasification and an Optimum System for Coal Conversion to clean Fuels.**” The University of Tokyo, Tokyo, Undated (Typedwritten)
- [19] Pitakarnnop, N. “**Fuel from Rice Husks in Thailand.**” Proceeding on the National Conference on Energy. Energy Institute of Thailand, Bangkok, 1983
- [20] Boonrowd, C. “ **Conversion of Rice Husks to Pyrolytics Gas for Rice Mill Application in Thailand**” Proceeding of the FAO Second Expert Consultant on Producer Gas Development in Asia and The Pacific Region, August 9-11, 1983
- [21] FAO Regional Office and The Pacific “**Second Expert Consulation and Producer Gas**” Develop in Asia and The Pacific Region” FAO Regional Pffice and The Pacific, Bangkok, Thailand, 1983
- [22] Probststein, R.F. and Hicks, R.E. **Synthetic Fuels.** pp. 111-115, Mcgraw-Hill, Auckland, 1982
- [23] Reed, T.B. **Biomass Gasification Principles and Technology.** Noyes Data Corporation, New Jersey, 1981
- [24] Levi, B. and Das, A “ **Understanding, Operating, and testing Fixed Bed Gasifier.**” Undated (Typewritten)
- [25] Rajeev Jorapur and Anil K. Rajvanshi, “**SUGARCANE LEAF-BAGASSE GASIFIERS FOR**

- INDUSTRIAL HEATING APPLICATIONS”, Nimbkar Agricultural Research Institute (NARI), Maharashtra, INDIA 1997.
- [26] Sitthiphong, N. “ **Fluidized Bed Gasification of Rice Husk for electricity Generation.**” Proceeding of the Biomass Gasification Workshop, May 30 –June 1, 1984.
- [27] Skov,N.A. and Papwarth,M.L. “**The Pegasus Unit**” Pegasus Publisher.Inc.,Olympia, Washington, 1975
- [28] Wikipedia the free encyclopedia, **Gasification**  
[ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก URL: <http://wikipedia.org/wiki/gasification>
- [29] Xu, B.Y., Huang, W.E., Flanigan, V.J., and Sitton, O.C. “**Design and Operation of a 6.0 inch fluidized Bed Gasifier for rice Hulls.**” Department of Mechanical and Chemical Engineering University of Missouri, 1983

**ภาคผนวก ก**

## ภาคผนวก ก

การหาความสัมพันธ์ระหว่างความถี่มอเตอร์ของเครื่องเป่าอากาศ (Blower)

กับอัตราการไหลของอากาศ (Flow rate)

### ความสำคัญ

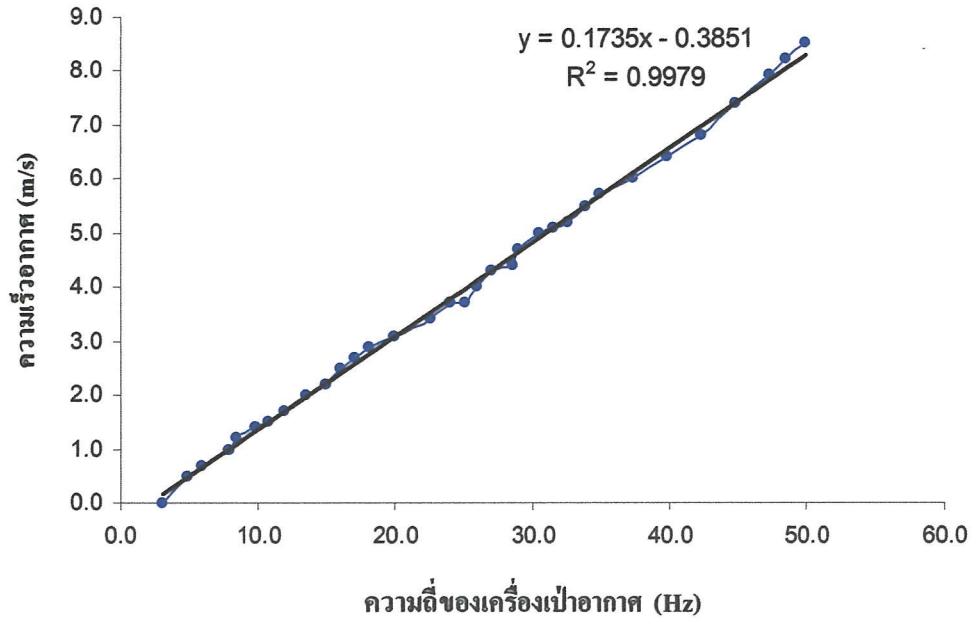
เครื่องเป่าอากาศที่ใช้ในโครงการ เป็นอุปกรณ์ของบริษัท อัลเทอร์เนทีฟ เอ็นเนอร์ยี จำกัด ซึ่งไม่มีเครื่องมือวัดความเร็ว หรืออัตราการไหลของอากาศ จึงต้องทำการทดลองเทียบความเร็วของอากาศเทียบกับการปรับรอบความเร็วของมอเตอร์ เพื่อหาความสัมพันธ์ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ตาราง ก.1 ผลการทดลองวัดความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งทางเข้าของเครื่องเป่าอากาศ เทียบกับความถี่ของมอเตอร์

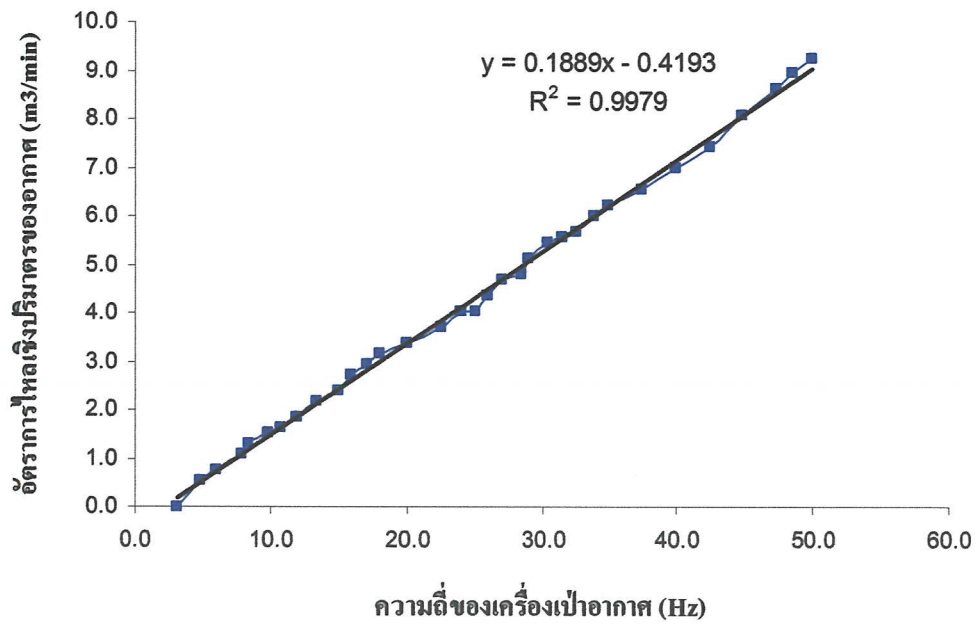
ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความเร็วอากาศ (เมตร/วินาที)	อัตราการไหลเชิง ปริมาตร (ลบ.ม./นาที)
0.0	0.0	0.00
3.1	0.0	0.00
4.9	0.5	0.54
6.0	0.7	0.76
7.9	1.0	1.09
8.5	1.2	1.31
9.9	1.4	1.52
10.8	1.5	1.63
12.0	1.7	1.85
13.5	2.0	2.18
15.0	2.2	2.40
16.0	2.5	2.72
17.1	2.7	2.94
18.1	2.9	3.16
20.0	3.1	3.38
22.5	3.4	3.70
24.0	3.7	4.03

ความถี่ (เฮิรตซ์)	ความเร็วอากาศ (เมตร/วินาที)	อัตราการไหลเชิง ปริมาตร (ลบ.ม./นาที)
25.0	3.7	4.03
26.0	4.0	4.36
27.0	4.3	4.68
28.5	4.4	4.79
29.0	4.7	5.12
30.5	5.0	5.44
31.5	5.1	5.55
32.6	5.2	5.66
33.9	5.5	5.99
34.9	5.7	6.21
37.4	6.0	6.53
39.9	6.4	6.97
42.4	6.8	7.40
44.9	7.4	8.06
47.4	7.9	8.60
48.5	8.2	8.93
50.0	8.5	9.25

หมายเหตุ : แอนิเมเตอร์ และท่ออากาศเข้าของเครื่องเป่าอากาศ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร และ 15.2 เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของเครื่องเป่าอากาศและความเร็วอากาศ



รูปที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของเครื่องเป่าอากาศและการไหลเชิงปริมาตร

**ภาคผนวก ข**

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณ

#### 1. การคำนวณอัตราการป้อนอากาศที่อัตราการป้อนขาน้อยต่างๆ

##### ข้อมูลการคำนวณ

ร้อยละคาร์บอนในขาน้อย [25]	44.1
ร้อยละออกซิเจน ในอากาศ	20.99
ความดัน (กิโลปาสคัล)	101.325
อุณหภูมิ (เคลวิน)	302.5
ค่าคงที่ของแก๊ส (กิโลปาสคัล.ลบ.ม/กิโลโมล.เคลวิน)	8.3145

1.1 ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ควรใช้ในทางทฤษฎีเพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์  
ปฏิกิริยาคาร์บอนในออกซิเจน



สมมติ แก๊สในระบบเป็นแก๊สอุดมคติ และเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์

Basis 1 นาที่

##### ตัวอย่างการคำนวณ

ขาน้อย 0.5 กิโลกรัม

$$\begin{aligned} \text{จำนวน โมลของคาร์บอนในขาน้อย} &= \frac{0.441 \times 0.5}{12} \frac{(kg)}{(kg / kmol)} \\ &= 0.01838 \quad kmol \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณแก๊สออกซิเจนที่ควรใช้ในทางทฤษฎีเพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

$$= 0.01838 \quad kmol$$

$$\text{คิดเป็นปริมาณอากาศ} = \frac{0.01838}{0.2099} \quad kmol$$

$$= 0.08754 \quad kmol$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรอากาศ} &= \frac{0.08754 \times 8.3145 \times 302.5}{101.325} \\ &= \frac{(kmol)(kPa \cdot m^3 / kmol \cdot K)(K)}{kPa} \end{aligned}$$

$$= 2.1730 \quad m^3$$

ดังนั้น อัตราการป้อนอากาศที่ควรใช้ในทางทฤษฎีเพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ใน ออกซิเดชัน โชนมีค่าเท่ากับ 2.1730 ลบ.ม./นาที่ สามารถนำไปหาความถี่ที่ต้องควบคุมของเครื่องเป่าอากาศได้จากผนวก ก และได้ผลดังตาราง ข.1

ตาราง ข.1 อัตราการป้อนอากาศที่ควรใช้ในทางทฤษฎีเพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ใน ออกซิเดชัน โชนเทียบกับอัตราการป้อนวัตถุดิบและการปรับความถี่ของเครื่องเป่าอากาศ

อัตราการป้อนชานอ้อย (กก./นาที่)	ปริมาตรอากาศ (ลบ.ม./นาที่)	ความถี่ของเครื่องเป่าอากาศ (เฮิร์ตซ์)
0.1	0.4346	4.5203
0.2	0.8692	6.8210
0.3	1.3038	9.1217
0.4	1.7384	11.4224
0.5	2.1730	13.7231
0.6	2.6076	16.0238
0.7	3.0422	18.3245
0.8	3.4768	20.6252
0.9	3.9114	22.9258
1.0	4.3460	25.2265
1.1	4.7806	27.5272
1.2	5.2152	29.8279
1.3	5.6498	32.1286
1.4	6.0844	34.4293
1.5	6.5190	36.7300

**ภาคผนวก ค**

**ภาคผนวก ก**  
**ผลการวิเคราะห์**

**1. ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชานอ้อยด้วยเครื่อง TGA**

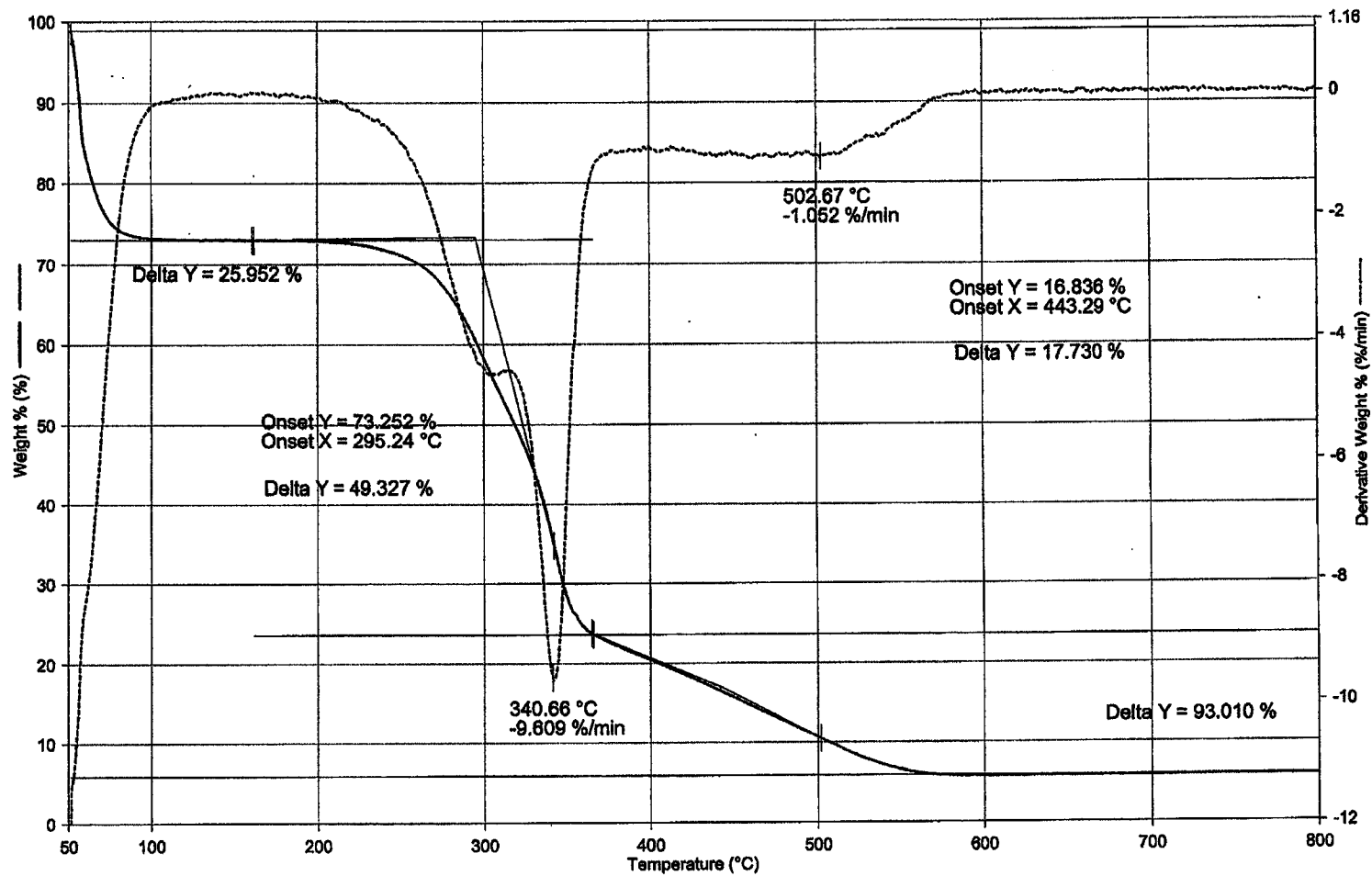
เงื่อนไขที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วย TGA

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ	: 10	องศาเซลเซียส/นาที
ช่วงอุณหภูมิที่ใช้วิเคราะห์	: 50-800	องศาเซลเซียส
น้ำหนักตัวอย่าง	: 7.895	มิลลิกรัม

จากตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชานอ้อย

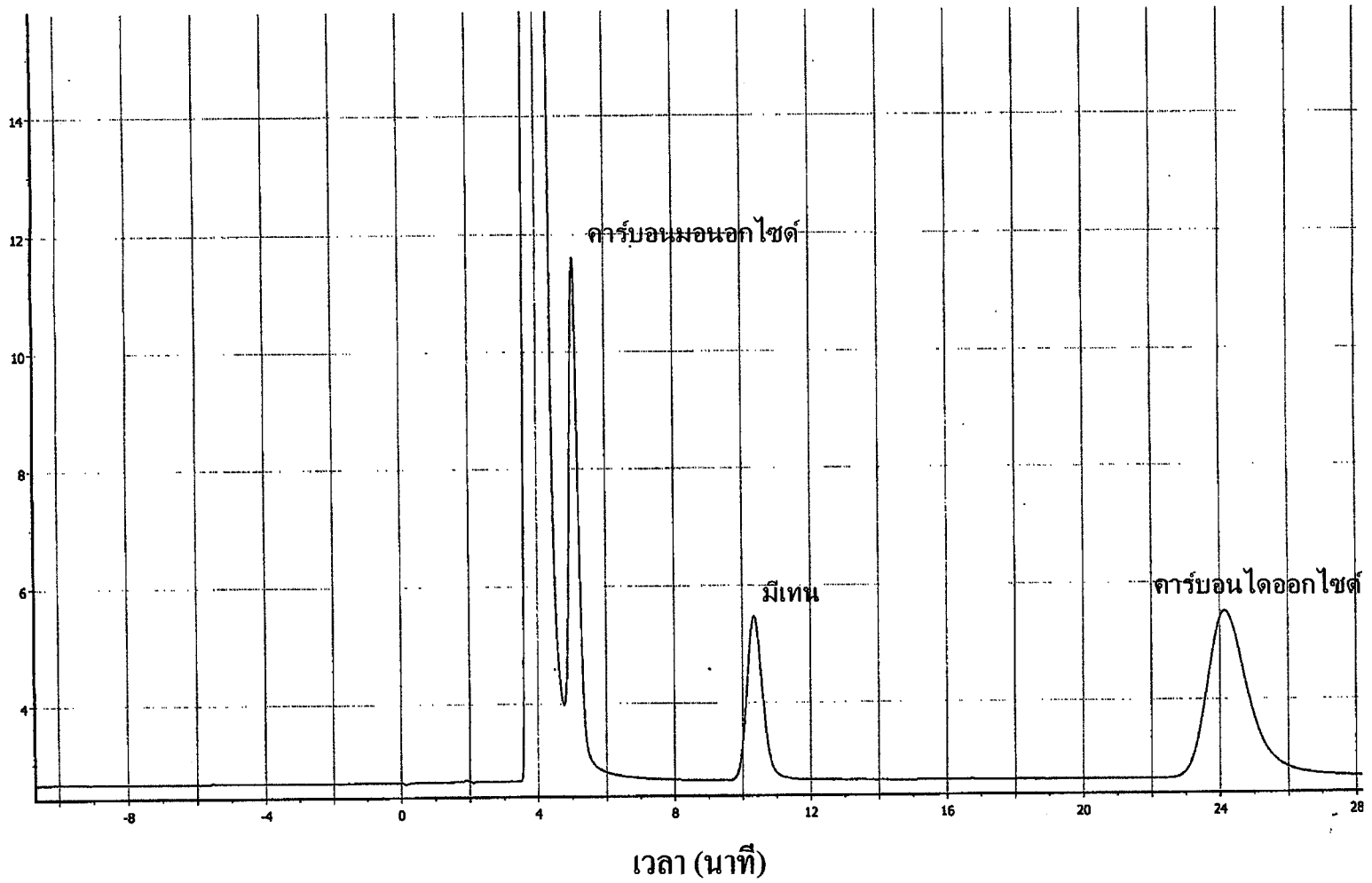
คุณสมบัติ	ร้อยละ โดยน้ำหนัก
ความชื้น	25.952
สารอินทรีย์ระเหยได้	49.327
เกลืออินทรีย์	17.730
เถ้า	6.000

หมายเหตุ : การวิเคราะห์จัดทำโดยศูนย์วิจัยและบริการวิทยาศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รูปที่ ค.1 กราฟผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของขาน้อยด้วย TGA

มิลลิโวลต์



รูปที่ ค.2 โครมาโตแกรมของตัวอย่างแก๊สผลิตภัณฑ์