

การออกแบบหม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหล็กกล้าสำหรับเป็นเชื้อเพลิง

นาย จีรวุฒิ จิตตโสภณ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-681-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11925276X

**DESIGN OF A LOW-PRESSURE BOILER  
USING CASSAVA-RHIZOME CHIPS AS FUEL**


**Mr. Jiravut Jittasopon**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 1999  
ISBN 974-334-681-3**

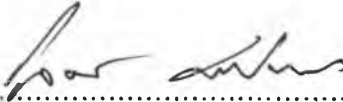
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การออกแบบหม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง  
โดย                              นาย จิรภูมิ จิตตโสภณ  
ภาควิชา                            วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ

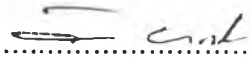
---

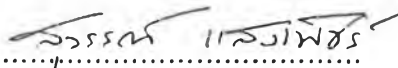
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

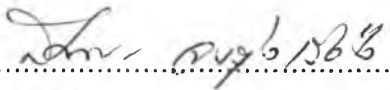
.....  ..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
( ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....  ..... ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. กุลธร ศิลปบรรเลง )

.....  ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ )

.....  ..... กรรมการ  
( ศาสตราจารย์กิตติคุณ สุวรรณ แสงเพชร )

.....  ..... กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี จรุงเรือง )

จิรวุฒิ จิตตโสภณ : การออกแบบหม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง  
( DESIGN OF A LOW PRESSURE BOILER USING CASSAVA-RHIZOME CHIPS AS  
FUEL ) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิทยา ยงเจริญ ; 153 หน้า  
ISBN 974-334-681-3

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบหม้อไอน้ำแรงดันต่ำ ที่สามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลัง เพื่อผลิตไอน้ำใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดกลางที่เกี่ยวกับการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร

หม้อไอน้ำแรงดันต่ำที่ออกแบบเป็นหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ ส่วนของตัวหม้อไอน้ำกับห้องเผาไหม้แยกออกจากกัน การไหลของแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้เป็นแบบ 2 กลับ หม้อไอน้ำแรงดันต่ำนี้สามารถผลิตไอน้ำที่มีความดันสัมบูรณ์เท่ากับ 2 บาร์ ที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  โดยใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลังเท่ากับ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง การทดลองได้ใช้เชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลัง 2 รูปคือแบบชิ้นและแบบท่อน และการทดลองได้ปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศส่วนเกินจาก 40%-160%

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้เหง้ามันสำปะหลังแบบท่อนเป็นเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพรวมของหม้อไอน้ำได้เพียง 20% มีอัตราการผลิตไอน้ำเท่ากับ 23 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องเผาไหม้เท่ากับ  $454^{\circ}\text{C}$  โดยมีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ  $780^{\circ}\text{C}$  และใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 80% แต่เมื่อใช้เหง้ามันสำปะหลังแบบชิ้นเป็นเชื้อเพลิง ได้ประสิทธิภาพรวมของหม้อไอน้ำเท่ากับ 47% และมีอัตราการผลิตไอน้ำเท่ากับ 55 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิเฉลี่ยในห้องเผาไหม้เท่ากับ  $470^{\circ}\text{C}$  โดยมีอุณหภูมิในห้องเผาไหม้สูงสุดเท่ากับ  $755^{\circ}\text{C}$  และใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินเท่ากับ 120% ซึ่งเป็นจุดที่ดีที่สุดจากทุกกรณีอากาศส่วนเกินที่ได้ทำการทดลอง

ในการใช้เหง้ามันสำปะหลัง ไม่เกิดปัญหาการระเบิดหรือ detonation ที่จะเป็นอันตรายกับหม้อไอน้ำ แต่ในการใช้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่เปอร์เซ็นต์สูงๆ ทำให้ความดันในเตาสูงขึ้นและมีเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้สามารถลุกลามออกมาจากห้องเผาไหม้ได้ ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 2600 ppm ซึ่งเกินค่ามาตรฐานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 870 ppm สำหรับปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 5 ppm ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 500 ppm และปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 73 ppm ก็ต่ำกว่าค่ามาตรฐานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเช่นกัน ที่กำหนดไว้ไม่เกิน 200 ppm

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือชื่อนิสิต.....จิรวุฒิ จิตตโสภณ.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4070232921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEER

KEY WORD: BIOMASS / CASSAVA-RHIZOME / BOILER EFFICIENCY  
 JIRAVUT JITTASOPON : DESIGN OF A LOW PRESSURE BOILER  
 USING CASSAVA-RHIZOME CHIPS AS FUEL. THESIS ADVISOR:  
 ASSOC. PROF. WITHAYA YONGCHAREON, Ph.D. 153 pp.  
 ISBN 974-334-681-3

The objective of this research is to design a low pressure boiler using Cassava-Rhizome Chips as fuel. This low pressure boiler can be considered as a prototype of low pressure boiler to be used in small and medium manufacturing industries in the country.

The boiler was designed to be a fire-tube type. Its combustion chamber and boiler shell is separated distinctly. Hot gas from combustion reaction has 2 passes flow. This boiler can generate steam at an absolute pressure of 2 bar (or at steam temperature about 120°C). Fuel consumption rate is 20 kg/hr. Cassava-rhizome fuel has 2 forms, chunks and chips. Excess air used in experiment was found to be 40%-160%.

From the experiments, when using cassava-rhizome in chunk form as fuel, it found that the overall efficiency of boiler was only 20% at steam generation rate of 23 kg/hr, the average temperature in combustion chamber was 454°C with the highest temperature recorded as 780°C at 80%EA. But when using cassava-rhizome in chip form as fuel, the overall efficiency of boiler was increased to 47% at steam generation rate of 55 hg/hr, the average temperature in combustion chamber was 470°C with highest temperature at 755°C at 120%EA, which was the optimum case.

No phenomenon relating to explosion or detonation was recorded in boiler while doing experiments. But when using high excess air, the flame of combustion can sneak from the charging door. The quantity of carbonmonoxide in combustion gas was found to be well in excess of the industrial standard figure, namely at 2600 ppm as against 870 ppm. The quantity of sulfur dioxide in combustion gas was found to be under industrial standard figure at 5 ppm, in which the regulated figure is not over 500 ppm. The quantity of nitrogenmonoxide in combustion gas was also under the industrial standard, being at 73 ppm was against 200 ppm.

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
 ปีการศึกษา..... 2542.....

ลายมือชื่อนิสิต.....จิราวุฒิ จิตต์โถกณ.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วย ความช่วยเหลืออย่างยิ่งจาก รศ.ดร.วิทยา ยงเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ สุวรรณ แสงเพชร ซึ่งท่านอาจารย์ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนถ่ายทอดความรู้ จินงานวิจัยได้สำเร็จออกมา

กราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สมศรี จรุงเรือง และ รศ. ดร. กุลธร ศิลปบรรเลง ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการศึกษา

ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ที่กรุณามอบทุนสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณ กำธร เลิศธรรมกุล ที่ได้ช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ ปริญญาโท และบุคคลที่เกี่ยวข้อง ที่ให้กำลังใจ คำแนะนำ และการช่วยเหลือมาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย .....                            | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....                         | จ    |
| กิตติกรรมประกาศ .....                            | ฉ    |
| สารบัญ .....                                     | ช    |
| สารบัญตาราง .....                                | ญ    |
| สารบัญภาพ .....                                  | ฎ    |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....                  | ด    |
| บทที่  |      |
| 1 บทนำ .....                                     | 1    |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย ..... | 1    |
| 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                  | 4    |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....                | 6    |
| 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย .....                      | 6    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....              | 6    |
| 2 ทฤษฎี .....                                    | 7    |
| 2.1 ทฤษฎีการเผาไหม้ .....                        | 7    |
| 2.2 เชื้อเพลิง .....                             | 8    |
| 2.2.1 ลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงที่ดี .....        | 8    |
| 2.2.2 ประเภทของเชื้อเพลิง .....                  | 9    |
| 2.2.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง .....              | 9    |
| 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้ .....             | 9    |
| 2.4 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง .....               | 10   |
| 2.5 ตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้ .....     | 14   |
| 2.6 ส่วนประกอบและปริมาณของแก๊สไอเสีย .....       | 16   |
| 2.7 การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง .....     | 17   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับหม้อไอน้ำ .....  | 20   |
| 3.1 ส่วนประกอบหลักของหม้อไอน้ำ .....  | 20   |
| 3.2 การแบ่งประเภทของหม้อไอน้ำ .....   | 21   |
| 3.3 ข้อดี ข้อเสียของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำเปรียบเทียบกับ<br>หม้อไอน้ำแบบท่อไฟ .....       | 22   |
| 3.4 ลักษณะหม้อไอน้ำที่ดี .....  | 22   |
| 3.5 การคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ .....   | 23   |
| 3.5.1 พิกัดหม้อไอน้ำ .....  | 23   |
| 3.5.2 สมดุลความร้อนในระบบหม้อไอน้ำ .....  | 24   |
| 3.5.3 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ .....   | 26   |
| 4 การออกแบบ .....   | 27   |
| 4.1 ผลการออกแบบ .....   | 27   |
| 4.2 การคำนวณการออกแบบ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง ..... | 43   |
| 5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิธีดำเนินการทดลอง .....                               | 53   |
| 5.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....  | 53   |
| 5.2 วิธีดำเนินการทดลอง .....  | 65   |
| 6 การวิเคราะห์ผล .....  | 67   |
| 6.1 ตารางแสดงผลการทดลอง .....   | 67   |
| 6.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง .....  | 81   |
| 7 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....   | 113  |
| 7.1 สรุปผลการทดลอง .....  | 113  |
| 7.2 ข้อเสนอแนะ .....  | 116  |
| รายการอ้างอิง .....   | 117  |



## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณเกี่ยวกับ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ำมันล่าปะหลังเป็นเชื้อเพลิง ..... | 119  |
| ภาคผนวก ข ผลการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีเหง้ำมันล่าปะหลัง .....   | 144  |
| ภาคผนวก ค คุณสมบัติทางอุณหพลวัตของแก๊สต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ .....                                 | 146  |
| ภาคผนวก ง หลักการถนอมอาหาร .....   | 150  |
| ประวัติผู้เขียน .....  | 153  |

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ค่าประมาณขององค์ประกอบของอากาศ .....  | 11   |
| 2.2 สมการการเผาไหม้ของธาตุที่เผาไหม้ได้ในเชื้อเพลิง .....                                   | 13   |
| 6.1 แสดงผลการทดลองที่ 40%EA .....   | 68   |
| 6.2 แสดงผลการทดลองที่ 80%EA .....   | 71   |
| 6.3 แสดงผลการทดลองที่ 120%EA .....  | 75   |
| 6.4 แสดงผลการทดลองที่ 160%EA .....  | 78   |
| 6.5 แสดงผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบของ<br>แก๊สไอเสียที่ได้จากการทดลอง .....  | 99   |
| 6.6 แสดงน้ำหนักซีเถ้าที่ได้จากการทดลอง .....  | 102  |
| ก.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหง้ามันสำปะหลัง<br>และการคำนวณ mole fraction .....             | 123  |
| ก.2 แสดงการคำนวณหาค่า relative mass ของแก๊สไอเสียเปียก .....                                | 125  |
| ก.3 สมดุลพลังงานความร้อนของ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง ..... | 143  |
| ค.1 แสดงคุณสมบัติทางอุณหพลวัตของแก๊สต่างๆที่ความดันบรรยากาศ .....                           | 147  |

## สารบัญภาพ

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.1 แสดงส่วนเก็บไอน้ำ ส่วนเก็บน้ำและส่วนที่เป็น<br>เตาเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ .....                                   | 20   |
| 4.1 แสดงการไหลของแก๊สร้อนแบบ 2 กลับ .....   | 28   |
| 4.2 แสดงตำแหน่งของท่อไฟบนตัวหม้อไอน้ำ .....   | 31   |
| 4.3 แสดงภาพตัดด้านข้างของ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....                         | 32   |
| 4.4 แสดงภาพตัดขยายด้านข้างของส่วนของเตาเผาไหม้ของ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง ..... | 33   |
| 4.5 แสดงภาพด้านหน้าของ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....                            | 34   |
| 4.6 แสดงภาพตัดด้านหน้าของ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....                         | 35   |
| 4.7 แสดงภาพด้านหลังของ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....                            | 36   |
| 4.8 แสดงภาพด้านหน้าของปล่องควัน .....   | 37   |
| 4.9 แสดงภาพด้านบนของปล่องควัน .....   | 38   |
| 4.10 แสดงภาพไอโซเมตริกของปล่องควัน .....  | 39   |
| 4.11 แสดงภาพถ่ายด้านหน้าของ<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....                       | 40   |
| 4.12 แสดงภาพถ่ายด้านข้าง<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....                          | 41   |
| 4.13 แสดงภาพถ่ายด้านหลัง<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....                          | 42   |
| 4.14 แสดงระดับน้ำในตัวหม้อไอน้ำ<br>เพื่อทำการอินทิเกรตหาปริมาตรน้ำในตัวหม้อไอน้ำ .....                            | 47   |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.15 แสดงส่วนต่างๆในหม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเห็นเชื้อเพลิง<br>ที่คำนวณหาความดันลดที่เกิดขึ้น .....                                    | 52   |
| 5.1 แสดงตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแบบ probe สำหรับวัดอุณหภูมิของ<br>แก๊สไอเสียในหม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....        | 55   |
| 5.2 แสดงตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิที่ผิวของผนัง<br>หม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....                    | 56   |
| 5.3 แสดงเครื่องเป่าอากาศ .....  | 58   |
| 5.4 แสดงท่อส่งอากาศ .....   | 58   |
| 5.5 แสดงเครื่องปั้มน้ำ .....  | 59   |
| 5.6 แสดงชุดอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำในหม้อไอน้ำ .....   | 59   |
| 5.7 แสดงชุดออริฟิส .....  | 60   |
| 5.8 แสดง pitot-static probe .....   | 60   |
| 5.9 แสดงมาโนมิเตอร์แบบเอียง .....   | 61   |
| 5.10 แสดงเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบสายและแบบ probe .....  | 61   |
| 5.11 แสดงเครื่องอ่านอุณหภูมิชนิดตัวเลข .....  | 62   |
| 5.12 แสดงอุปกรณ์ตัวเลือก .....  | 62   |
| 5.13 แสดงเกจวัดความดันในตัวหม้อไอน้ำ .....  | 63   |
| 5.14 แสดงวาล์วนิรภัย .....  | 63   |
| 5.15 แสดงเครื่องวิเคราะห์แก๊สไอเสีย ยี่ห้อ Testo 350 .....  | 64   |
| 5.16 แสดงเครื่องชั่งน้ำหนัก .....   | 64   |
| 6.1 กราฟแสดงอุณหภูมิแก๊สไอเสียที่จุดต่างๆในหม้อไอน้ำที่ 40%EA .....   | 83   |
| 6.2 กราฟแสดงอุณหภูมิแก๊สไอเสียที่จุดต่างๆในหม้อไอน้ำที่ 80%EA .....   | 83   |
| 6.3 กราฟแสดงผลการตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ 40%EA .....  | 84   |
| 6.4 กราฟแสดงผลการตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ 80%EA .....  | 84   |
| 6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียที่ถ่ายเทผ่านผนังหม้อไอน้ำ,<br>อุณหภูมิแก๊สไอเสียเฉลี่ยในเตาเผาไหม้กับค่าเปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน ..... | 87   |

## สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 6.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียเนื่องจากแก๊สไอเสียออกทางปล่องควัน กับปริมาณอากาศส่วนเกิน .....  | 89   |
| 6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สออกซิเจนในแก๊สไอเสีย กับปริมาณอากาศส่วนเกิน .....   | 92   |
| 6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สออกซิเจนในแก๊สไอเสีย กับปริมาณอากาศส่วนเกิน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับทฤษฎี .....                             | 93   |
| 6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทางทฤษฎีในแก๊สไอเสีย กับปริมาณอากาศส่วนเกิน .....   | 96   |
| 6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสีย กับปริมาณอากาศส่วนเกิน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับทฤษฎี .....                    | 97   |
| 6.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไอเสีย กับปริมาณอากาศส่วนเกิน เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับทฤษฎี .....                    | 98   |
| 6.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้และประสิทธิภาพรวมของหม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง กับปริมาณอากาศส่วนเกิน ..... | 105  |
| 6.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้และความร้อนในไอน้ำ กับปริมาณอากาศส่วนเกิน .....  | 106  |
| 6.14 แสดงภาพถ่ายเปลวไฟที่ลุกไหม้ออกมาจากช่องป้อนเชื้อเพลิง .....   | 107  |
| 6.15 แสดงภาพถ่ายไอน้ำที่หม้อไอน้ำแรงดันต่ำผลิตออกมา .....  | 108  |
| 6.16 แสดงภาพถ่ายของควันที่ได้จากการเผาไหม้ที่ออกมาจากหม้อไอน้ำ .....   | 110  |
| 6.17 แสดงเหง้ามันสำปะหลังแบบชิ้นที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง .....   | 112  |
| 6.18 แสดงเหง้ามันสำปะหลังแบบท่อนที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง .....   | 112  |
| ก.1 สมดุลมวลของหม้อไอน้ำแรงดันต่ำโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง .....  | 142  |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| สัญลักษณ์       | ความหมาย   |
|-----------------|--|
| $A_o$           | ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี<br>เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์, $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$ หรือ $\text{Nm}^3/\text{kg}_{\text{fuel}}$        |
| $A$             | ปริมาณอากาศที่ใช้จริง<br>ในปฏิกิริยาการเผาไหม้, $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$ หรือ $\text{Nm}^3/\text{kg}_{\text{fuel}}$                    |
| $A_G$           | พื้นที่ของตะแกรง, $\text{m}^2$   |
| $c$             | อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนในเชื้อเพลิง  |
| $c_{p,dg}$      | ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียแห้ง, $\text{kJ/kg K}$   |
| $\bar{c}_{p,g}$ | ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของแก๊สไอเสียเปียก, $\text{kJ/kg K}$  |
| $c_{p,v}$       | ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ, $\text{kJ/kg K}$   |
| $CO$            | ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์<br>ในแก๊สไอเสีย, $\text{mol}/100\text{mol dry gas}$  |
| $CO_2$          | ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดร็อกไซด์<br>ในแก๊สไอเสีย, $\text{mol}/100\text{mol dry gas}$   |
| $d_i$           | เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อไฟ, $\text{m}$   |
| $d_o$           | เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อไฟ, $\text{m}$  |
| %EA             | เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน   |
| $f$             | ตัวประกอบความเสียดทานของมูดี (Moody's diagram)   |
| $F$             | องค์ประกอบเชิงมุม (view factor)  |
| $G_o$           | ปริมาณแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้<br>โดยใช้ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี: $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$ หรือ $\text{Nm}^3/\text{kg}_{\text{fuel}}$ |
| $G$             | ปริมาณแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้<br>โดยใช้ปริมาณอากาศจริง, $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$ หรือ $\text{Nm}^3/\text{kg}_{\text{fuel}}$      |
| $h$             | อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง   |
| $h_s$           | เอนทัลปีของไอน้ำในสภาวะที่พิจารณา, $\text{kJ/kg}$  |
| $h_w$           | เอนทัลปีของน้ำป้อนที่เข้าหม้อไอน้ำ, $\text{kJ/kg}$   |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| สัญลักษณ์          | ความหมาย  |                                     |
|--------------------|---|-------------------------------------|
| $h_v$              | เอนทัลปีของไอน้ำในแก๊สไอเสีย,                     | $\text{kJ/kg}$                      |
| $h_f$              | เอนทัลปีของน้ำเหลวอิ่มตัวที่อุณหภูมิบรรยากาศ,     | $\text{kJ/kg}$                      |
| $h_i$              | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวด้านใน,            | $\text{W/m}^2 \text{K}$             |
| $h_o$              | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวด้านนอก,           | $\text{W/m}^2 \text{K}$             |
| $H$                | ความสูงของห้องเผาไหม้,                            | $\text{m}$                          |
| $\text{HHV}$       | ค่าความร้อนสูง,                                   | $\text{MJ/kg}_{\text{fuel}}$        |
| $K$                | สัมประสิทธิ์การสูญเสีย                            |                                     |
| $\text{LHV}$       | ค่าความร้อนต่ำ,                                   | $\text{MJ/kg}_{\text{fuel}}$        |
| $\text{LG}$        | ค่าภาระของตะกรับ,                                 | $\text{lb}_m/\text{ft}^2 \text{hr}$ |
| $m$                | อัตราส่วนอากาศ                                    |                                     |
| $m_a$              | มวลของอากาศแห้ง,                                  | $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$        |
| $m_c$              | มวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิง,                        | $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$        |
| $m_{c,ub}$         | มวลของคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้,                    | $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$        |
| $m_{dg}$           | มวลของแก๊สไอเสียแห้ง,                             | $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$        |
| $m_{H_2}$          | มวลของไฮโดรเจนทั้งหมดในเชื้อเพลิง,                | $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$        |
| $m_m$              | มวลของน้ำในเชื้อเพลิง,                            | $\text{kg/kg}_{\text{fuel}}$        |
| $\dot{m}_f$        | อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง,                     | $\text{kg/hr}$                      |
| $\dot{m}_s$        | มวลของไอน้ำที่หม้อไอน้ำสามารถผลิตได้ต่อหน่วยเวลา, | $\text{kg/hr}$                      |
| $M$                | มวลของผนังหม้อไอน้ำในชั้นที่พิจารณา,              | $\text{kg}$                         |
| $n$                | อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิง    |                                     |
| $o$                | อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุออกซิเจนในเชื้อเพลิง    |                                     |
| $\Delta p$         | ความดันลุดที่เกิดขึ้นในระบบ,                      | $\text{Pa}$                         |
| $q''$              | พลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อน,     | $\text{kW/m}^2$                     |
| $Q$                | ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำในตัวหม้อไอน้ำ,         | $\text{kW}$                         |
| $Q_{\text{steam}}$ | ความร้อนที่ถูกดูดกลืนโดยน้ำในหม้อไอน้ำ,           | $\text{kJ/kg}_{\text{fuel}}$        |

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| สัญลักษณ์   | ความหมาย   |
|-------------|--|
| $Q_{Loss1}$ | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิงติดไปกับแก๊สไอเสีย, $\text{kJ/kg}_{fuel}$              |
| $Q_{Loss2}$ | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวเป็นไอน้ำจากการเผาไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง, $\text{kJ/kg}_{fuel}$ |
| $Q_{Loss3}$ | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากแก๊สไอเสียแห้งออกทางปล่องควัน, $\text{kJ/kg}_{fuel}$                       |
| $Q_{Loss4}$ | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากความชื้นในอากาศ, $\text{kJ/kg}_{fuel}$                                     |
| $Q_{Loss5}$ | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์, $\text{kJ/kg}_{fuel}$                                   |
| $Q_{Loss6}$ | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนเผาไหม้ไม่หมด, $\text{kJ/kg}_{fuel}$                                |
| $Q_{Loss7}$ | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากสาเหตุอื่น, $\text{kJ/kg}_{fuel}$  |
| $Q_{abs}$   | ความร้อนสูญเสียเนื่องจากผนังดูดซับ, $\text{kW}$  |
| $Q_{cond}$  | ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการนำ ผ่านผนังของหม้อไอน้ำ, $\text{kW}$  |
| $Q_{rad}$   | ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน, $\text{kJ/kg}_{fuel}$                                       |
| $R$         | การระเหยสมมูล, $\text{kg/hr}$  |
| $R_f$       | ค่าความต้านทานความร้อน, $\text{m}^2 \text{KW}$   |
| $Re$        | ค่าตัวเลขเรย์โนลด์   |
| $s$         | อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุกำมะถันในเชื้อเพลิง  |
| $\Delta t$  | ผลต่างของเวลา, $s$   |
| $T_a$       | อุณหภูมิบรรยากาศ, $K$  |
| $T_{g1}$    | อุณหภูมิของแก๊สไอเสียในเตาเผาไหม้, $K$   |
| $T_{g2}$    | อุณหภูมิของแก๊สไอเสียก่อนเข้าตัวหม้อไอน้ำ, $K$   |
| $T_{g3}$    | อุณหภูมิของแก๊สไอเสียตรงทางออกตัวหม้อไอน้ำ, $K$  |
| $T_{si}$    | อุณหภูมิผิวด้านในของผนังชั้นในสุดของหม้อไอน้ำ, $K$   |
| $T_{so}$    | อุณหภูมิผิวด้านนอกของผนังชั้นในสุดของหม้อไอน้ำ, $K$  |
| $T_{wi}$    | อุณหภูมิน้ำเข้า, $K$   |



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| สัญลักษณ์       | ความหมาย   |                           |
|-----------------|--|---------------------------|
| $T_{wo}$        | อุณหภูมิน้ำออก,  | K                         |
| $\Delta T_{lm}$ | อุณหภูมิผลต่างล็อกมีน,   | K                         |
| U               | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม,  | $m^2 K/W$                 |
| V               | ปริมาตรของเตาเผาไหม้,  | $m^3$                     |
| w               | อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำในเชื้อเพลิง                                    |                           |
| $\rho$          | ความหนาแน่นของของไหล,  | $kg/m^3$                  |
| $\rho_g$        | ความหนาแน่นของแก๊สไอเสีย,  | $kg/m^3$                  |
| $\phi$          | อัตราส่วนสมมูล   |                           |
| $\omega$        | อัตราส่วนความชื้นในอากาศ,  | $kg_{vapor}/kg_{dry air}$ |
| $\sigma$        | ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann<br>เท่ากับ $5.670 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ |                           |
| $\epsilon$      | ค่าการแผ่รังสี   |                           |
| $\mu$           | ความหนืดพลวัต,   | Pa m                      |
| $\eta_B$        | ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ  |                           |