

การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้หินแห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง



นายจตุพล ปัทมวิชัยพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2692-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

14 ก.ย. 2548

I 2104 398x

AN EFFICIENCY IMPROVEMENT OF STEAM GENERATOR
USING CASSAVA-RHIZOME CHIPS AS FUEL

Mr. Jatuphol Pattamavichaiorn

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 2002

ISBN 974-17-2692-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้ฉนวน
สำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง

โดย

นายจตุพล ปัทมวิชัยพร


สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

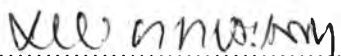
อาจารย์ที่ปรึกษา


รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ขงเจริญ

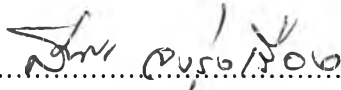
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

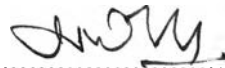

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานิจ ทองประเสริฐ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ขงเจริญ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศรี จงรุ่งเรือง)


..... กรรมการ
(ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

จดุผล ปีทมิวชัษพร : การปรับปรุงประสิทธิภพของระบบกำเนดไอน้ำที่ใช้ซันเหงำมัน
สำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง (AN EFFICIENCY IMPROVEMENT OF STREAM
GENERATOR USING CASSAVA-RHIZOME CHIPS AS FUEL)

อ.ที่ปรักษา : รศ.ดร. วิทยา ขงเจริญ, 204 หน้า.

ISBN 974-17-2692-9.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การปรับปรุงประสิทธิภพของระบบกำเนดไอน้ำที่ใช้ซัน
เหงำมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง

การปรับปรุงประสิทธิภพของระบบกำเนดไอน้ำ ทำโดยเพิ่มอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบ
สกรู เพื่อเปลี่ยนจากการป้อนเชื้อเพลิงแบบทีละครั้งเป็นแบบต่อเนื่อง และอุปกรณ์เครื่องอบแห้งซัน
เหงำมันสำปะหลังแบบเบดนิ่ง เพื่อลดความชื้นซันเหงำมันสำปะหลัง ก่อนป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ต่อ
ไป เครื่องกำเนดไอน้ำ ผลิตไอน้ำที่อัตราการผลิตไอน้ำ 25 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่ความดันสัมบูรณ์
เท่ากับ 4 บาร์ อุณหภูมิ 144.5 °C ที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงเหงำมันสำปะหลังเท่ากับ 10 กิโลกรัมต่อ
ชั่วโมง และใช้ค่าปริมาณอากาศส่วนเกิน 40% และ 120% ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของระบบผลิตไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็น 45% และ 55% เมื่อ
ใช้อากาศส่วนเกิน 40% และ 120% ตามลำดับ และเครื่องอบแห้งซันเหงำมันสำปะหลังแบบเบดนิ่ง
สามารถลดความชื้นของซันเหงำมันสำปะหลังลงได้ 8% และ 18% เมื่อใช้อากาศส่วนเกิน 40% และ
120% ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรักษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรักษาพร้อม

4270242321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEER
 KEY WORD: BIOMASS / CASSAVA-RHIZOME / BOILER EFFICIENCY
 / EFFICIENCY IMPROVEMENT
 JATUPHOL PATTAMAVICHAIPORN : AN EFFICIENCY
 IMPROVEMENT OF STREAM GENERATOR USING CASSAVA-
 RHIZOME CHIPS AS FUEL.
 THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. WITHAYA YONGCHAREON, Ph.D.
 204 pp. ISBN 974-17-2692-9.

The objective of this research is to improvement the efficiency of the stream generator using cassava-rhizome chips as a fuel.


The improvement was done by adding the fuel screw feeder in order to change the fuel feed from batch process to continuous process. And a dryer to reduce the moisture content in the fuel before feeding to combustion chamber. The steam generator can produce steam at the rate of 25 kilogram per hour at the absolute pressure of 1 bar and the temperature of 145 °C. The cassava-rhizome chips was feeded at the rate of 10 kilogram per hour at 40% and 120% excess air respectively.

The result from the experiment shows that the efficiency of the steam generator is increased to 45% and 55% when using 40% and 120% excess air respectively. Also, the dryer can remove moisture content in the cassava-rhizome by 8% and 18% when the excess air is 40% and 120% respectively.

Department Mechanical Engineering

 Field of study Mechanical Engineering

 Academic year 2002

Student's signature 

 Advisor's signature *Withaya Yongchareon*

 Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ขจรเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาหาทุนวิจัยและให้คำแนะนำถ่ายทอดความรู้ต่างๆ อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือวัด ตลอดจนดูแลและควบคุมการศึกษาค้นคว้าจนสำเร็จไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมศรี จรุงเรือง ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ให้คำปรึกษา คอยเป็นห่วงเป็นใย และคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ และ อาจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ และคำแนะนำตลอดระยะเวลาในการศึกษา

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนสำหรับงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร ที่ให้การสนับสนุนเครื่องหั่นย่อยซากพืช สำหรับหั่นย่อยเหง้ามันสำปะหลังให้เป็นชิ้น

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการให้ความร่วมมือการใช้อุปกรณ์เครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ สำหรับหาค่าความชื้นในเหง้ามันสำปะหลัง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ธุรการภาคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินเรื่องต่างๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการเครื่องมือกล ที่ให้ความช่วยเหลือในการยืมอุปกรณ์เครื่องมือช่าง ตลอดจน พี่ เพื่อน และน้องนิสิตปริญญาโททุกคน ที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือที่ดีมาโดยตลอด

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ซึ่งให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งน้องสาวที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาไทย	ง
บทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 นิยามคำศัพท์เฉพาะ.....	4
บทที่ 2 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	17
3.1 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	17
3.2 เชื้อเพลิง.....	18
3.2.1 ลักษณะเฉพาะของเชื้อเพลิงที่ดี.....	18
3.2.2 ประเภทของเชื้อเพลิง.....	19
3.2.3 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง.....	19
3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเผาไหม้.....	19
3.4 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง.....	20
3.5 ตัวประกอบที่มีอิทธิพลต่อการเผาไหม้.....	25
3.5.1 ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.2 อากาศส่วนเกิน (Excess air).....	25
3.5.3 อัตราส่วนผสม (Mixture ratio).....	25
3.6 ส่วนประกอบและปริมาณของแก๊สไอเสีย.....	26
3.7 การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง.....	28
3.8 ความรู้พื้นฐานการอบแห้ง.....	31
3.8.1 กลไกการอบแห้ง.....	33
3.8.2 ทฤษฎีการแพร่ของของเหลว (Liquid diffusion theory).....	37
3.9 ประเภทของเครื่องอบแห้ง.....	39
บทที่ 4 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบกำเนิดไอน้ำ	44
4.1 ส่วนประกอบหลักของหม้อไอน้ำ.....	44
4.2 การแบ่งประเภทของหม้อไอน้ำ.....	45
4.3 ข้อดี ข้อเสียของหม้อไอน้ำแบบท่อน้ำเปรียบเทียบกับหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ.....	46
4.3.1 ข้อดีของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ.....	46
4.3.2 ข้อเสียของหม้อไอน้ำแบบท่อไฟ.....	46
4.4 ลักษณะหม้อไอน้ำที่ดี.....	46
4.5 การคำนวณประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ.....	47
4.5.1 พิกัดหม้อไอน้ำ.....	47
4.5.2 สมดุลความร้อนในระบบหม้อไอน้ำ.....	48
4.5.3 ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ.....	50
4.6 การใช้ประโยชน์ของความร้อนจากแก๊สไอเสีย (Flue gas Recovery).....	51
บทที่ 5 การออกแบบ.....	52
5.1 การออกแบบอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิง.....	54
5.2 การออกแบบอุปกรณ์อุ่นเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้.....	63
5.3 การออกแบบระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้หินเหนียวสำหรับปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	67
5.4 การคำนวณหาความดันตกในระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้หินเหนียวสำหรับปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและวิธีดำเนินการทดลอง.....	77
6.1 เชื้อเพลิงที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	77
6.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	78
6.3 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในระบบกำเนิดไอน้ำ.....	92
6.4 วิธีดำเนินการทดลองและการบันทึกผลข้อมูล.....	96
บทที่ 7 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	99
7.1 ตารางแสดงผลการทดลอง.....	99
7.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	113
7.3 แสดงภาพถ่ายของการทดลอง.....	155
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	159
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	159
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	163
รายการอ้างอิง.....	165
ภาคผนวก.....	168
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณเกี่ยวกับระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้หินแห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	169
ภาคผนวก ข ผลการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีแห้งมันสำปะหลัง.....	198
ภาคผนวก ค คุณสมบัติทางอุณหพลวัตของแก๊สต่างๆ ความดันบรรยากาศ.....	200
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	204

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3.1 ค่าประมาณขององค์ประกอบของอากาศ.....	21
ตารางที่ 3.2 สมการการเผาไหม้ของธาตุที่เผาไหม้ได้.....	24
ตารางที่ 5.1 แสดงรายละเอียดตัวแปรที่มีผลต่อการเลือกใช้อุปกรณ์ป้อนแบบต่างๆ.....	55
ตารางที่ 5.2 แสดงอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ข้อดี ข้อเสีย และความเหมาะสมในการใช้งานของอุปกรณ์ป้อนประเภทต่างๆ.....	58
ตารางที่ 6.1 แสดงค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง.....	77
ตารางที่ 7.1 แสดงข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 40%EA.....	100
ตารางที่ 7.2 แสดงข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 120%EA.....	106
ตารางที่ 7.3 แสดงผลข้อมูลการค่าความชื้นในเหง้ามันสำปะหลัง เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งที่ 40%EA.....	112
ตารางที่ 7.4 แสดงผลข้อมูลการค่าความชื้นในเหง้ามันสำปะหลัง เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งที่ 120%EA.....	112
ตารางที่ 7.5 แสดงผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานขององค์ประกอบของแก๊สไอเสีย ที่ได้จากการทดลอง.....	130
ตารางที่ 7.6 แสดงน้ำหนักเชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้เหง้ามันสำปะหลัง.....	132
ตารางที่ 7.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงของเชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลัง เมื่อผ่านกระบวนการอบแห้งภายในห้องอบลดความชื้น.....	134
ตารางที่ 7.8 แสดงสัดส่วนการใช้พลังงานความร้อนภายในอุปกรณ์ลดความชื้น เชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลัง.....	143
ตารางที่ 7.9 แสดงสมดุลพลังงานความร้อนของระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้ชื้นเหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง ที่การทดลอง 40%EA.....	151
ตารางที่ 7.10 แสดงสมดุลพลังงานความร้อนของระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้ชื้นเหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง ที่การทดลอง 120%EA.....	152
ตารางที่ 1ก แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเหง้ามันสำปะหลัง และการคำนวณ Mole fraction.....	173
ตารางที่ 2ก แสดงการคำนวณหาค่า Relative Mass ของแก๊สไอเสียเปียก.....	176
ตารางที่ 1ค แสดงคุณสมบัติทางอุณหพลวัตของแก๊สต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ.....	201
ตารางที่ 2ค แสดงคุณสมบัติทางอุณหพลวัตของแก๊สต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ.....	202

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3ค แสดงคุณสมบัติทางอุณหพลวัตของแก๊สต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ.....	203

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	ควันสีขาวเมื่อ โปะจีนแห้งมันสำปะหลังตากแห้ง.....	10
รูปที่ 2.2	เปลวไฟจากการเผาไหม้แบบสมบูรณ์จากแห้งมันสำปะหลัง.....	10
รูปที่ 2.3	การเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของถ่านไม้.....	11
รูปที่ 2.4	แสดงหม้อไอน้ำความดันต่ำที่ใช้แห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	15
รูปที่ 2.5	แสดงเปลวไฟที่ได้จากการเผาแห้งมันสำปะหลังในเตาเผาแบบสมบูรณ์.....	16
รูปที่ 2.6	แสดงความร้อนที่ได้จากการเผาแห้งมันสำปะหลังในเตาเผาแบบสมบูรณ์.....	16
รูปที่ 3.1	แสดงการเปลี่ยนแปลงมวลและอุณหภูมิของวัสดุอบแห้งกับเวลา.....	32
รูปที่ 3.2	แสดงเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง.....	36
รูปที่ 3.3	เครื่องอบแห้งแบบ tray dryer.....	40
รูปที่ 3.4	เครื่องอบแห้งแบบ rotary dryer with lifters.....	40
รูปที่ 3.5	เครื่องอบแห้งแบบ fluidized bed dryer.....	40
รูปที่ 3.6	เครื่องอบแห้งแบบ Spray dryer.....	41
รูปที่ 3.7	Parallel flow.....	42
รูปที่ 3.8	Perpendicular flow.....	42
รูปที่ 3.9	Through circulation.....	42
รูปที่ 3.10	Concurrent flow.....	43
รูปที่ 3.11	Cross flow.....	43
รูปที่ 4.1	แสดงส่วนเก็บไอน้ำ ส่วนเก็บน้ำ และส่วนที่เป็นเตาเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ.....	44
รูปที่ 5.1	แสดงการไหลของแก๊สไอเสีร้อนภายในระบบกำเนิดไอน้ำ.....	54
รูปที่ 5.2	อุปกรณ์ป้อนแบบ Belt feeder.....	56
รูปที่ 5.3	อุปกรณ์ป้อนแบบ Reciprocating feeder.....	56
รูปที่ 5.4	อุปกรณ์ป้อนแบบ Rotary table feeder.....	56
รูปที่ 5.5	อุปกรณ์ป้อนแบบ Roll feeder.....	56
รูปที่ 5.6	อุปกรณ์ป้อนแบบ Scapler feeder.....	57
รูปที่ 5.7	อุปกรณ์ป้อนแบบ Screw feeder.....	57
รูปที่ 5.8	อุปกรณ์ป้อนแบบ Rotary feeder.....	57
รูปที่ 5.9	แสดงอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบ Screw feeder.....	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 5.10	แสดงอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบ Rotary.....	60
รูปที่ 5.11	แสดงภาพ Drawing ของอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู.....	61
รูปที่ 5.12	แสดงภาพสามมิติของอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู.....	62
รูปที่ 5.13	แสดงอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรูเมื่อติดตั้งเข้ากับชุดควบคุมการทำงาน.....	62
รูปที่ 5.14	แสดงภาพสามมิติของอุปกรณ์อุ่นเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้.....	64
รูปที่ 5.15	แสดง Drawing ของอุปกรณ์อุ่นเชื้อเพลิงก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้.....	65
รูปที่ 5.16	แสดงอุปกรณ์ลดความชื้นเชื้อเพลิงแห้งมันสำปะหลัง.....	66
รูปที่ 5.17	แสดงปล่องปล่อยแก๊สไอเสียออกจากห้องอบลดความชื้น.....	66
รูปที่ 5.18	แสดง Drawing ของระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้ชั้นแห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	68
รูปที่ 5.19	แสดงภาพสามมิติของระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้ชั้นแห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	69
รูปที่ 5.20	แสดงระบบการจ่ายเชื้อเพลิงจากห้องอบลดความชื้นเข้าสู่อุปกรณ์ป้อน เชื้อเพลิงแบบสกรู และท่อลำเลียงแก๊สไอเสียเข้าสู่ห้องอบลดความชื้น.....	69
รูปที่ 5.21	แสดงระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้ชั้นแห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	70
รูปที่ 5.22	แสดงภาพด้านหน้าของระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้ชั้นแห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	71
รูปที่ 5.23	แสดงภาพด้านหลังของระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้ชั้นแห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	71
รูปที่ 5.24	แสดงอุปกรณ์ชุดจ่ายน้ำป้อนเข้าสู่หม้อไอน้ำ.....	72
รูปที่ 5.25	แสดงอุปกรณ์ชุดป้อนอากาศ.....	72
รูปที่ 5.26	แสดงส่วนต่างๆ ในระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้ชั้นแห้งมันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง ในการคำนวณหาความดันลดที่เกิดขึ้น.....	76
รูปที่ 6.1	แสดงแห้งมันสำปะหลังแบบชั้นที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	78
รูปที่ 6.2	แสดงพัดลมเป่าอากาศ.....	78
รูปที่ 6.3	แสดงท่อส่งอากาศ.....	79
รูปที่ 6.4	แสดงชุดออริฟิสและมาโนมิเตอร์.....	80
รูปที่ 6.5	แสดง Airflow anemometer.....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 6.6	แสดงมาตรวัดระดับน้ำแบบหลอดแก้วกลม.....	81
รูปที่ 6.7	แสดงมาตรวัดปริมาตรการไหลแบบปริมาตร.....	81
รูปที่ 6.8	แสดงเครื่องสูบน้ำ.....	82
รูปที่ 6.9	แสดงระบบป้อนอากาศและชุดอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำ.....	83
รูปที่ 6.10	แสดงมาตรวัดความดันไอน้ำ.....	83
รูปที่ 6.11	แสดงวาล์วนิรภัย.....	84
รูปที่ 6.12	แสดงมอเตอร์และชุดเฟืองทด.....	85
รูปที่ 6.13	แสดงชุดอินเวอร์เตอร์.....	85
รูปที่ 6.14	แสดงเครื่องมือวิเคราะห์ห้อยค้ำประกอบของแก๊สไอเสีย.....	86
รูปที่ 6.15	แสดงเครื่องชั่งน้ำหนักแบบหยาบ.....	87
รูปที่ 6.16	แสดงเครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด.....	87
รูปที่ 6.17	แสดงอุปกรณ์วัดค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศ.....	88
รูปที่ 6.18	แสดงเครื่องอบแห้งแบบสุญญากาศ.....	88
รูปที่ 6.19	แสดงเทอร์โมคัปเปิลชนิด K.....	89
รูปที่ 6.20	แสดงอุปกรณ์แสดงผลอุณหภูมิ.....	90
รูปที่ 6.21	แสดงอุปกรณ์ตัวเลือก.....	90
รูปที่ 6.22	แสดงอุปกรณ์ Temperature probe.....	91
รูปที่ 6.23	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิของ แก๊สไอเสียร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ ภายในระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้ชิ้นหาง้ำมันสำหรับปะหลังเป็นเชื้อเพลิง.....	93
รูปที่ 6.24	แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดค่าอุณหภูมิที่ผิว ของผนังด้านในและด้านนอกของเตาเผาไหม้.	95
รูปที่ 7.1	กราฟแสดงอุณหภูมิแก๊สไอเสียที่จุดต่างๆ ในระบบกำเนิดไอน้ำที่ 40%EA.....	115
รูปที่ 7.2	กราฟแสดงอุณหภูมิแก๊สไอเสียที่จุดต่างๆ ในระบบกำเนิดไอน้ำที่ 120%EA....	115
รูปที่ 7.3	กราฟแสดงผลการตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ 40%EA.....	116
รูปที่ 7.4	กราฟแสดงผลการตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สไอเสียที่ 120%EA.....	116
รูปที่ 7.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียที่ถ่ายเทผ่านผนังหม้อไอน้ำ อุณหภูมิแก๊สไอเสียเฉลี่ยในเตาเผาไหม้ กับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	119

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 7.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สออกซิเจนทางทฤษฎี ในแก๊สไอเสียบกับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	122
รูปที่ 7.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สออกซิเจนในแก๊สไอเสียบ กับปริมาณอากาศส่วนเกิน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี.....	123
รูปที่ 7.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทางทฤษฎี ในแก๊สไอเสียบ กับปริมาณอากาศส่วนเกิน	126
รูปที่ 7.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สไอเสียบ กับปริมาณอากาศส่วนเกิน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง กับทางทฤษฎี.....	127
รูปที่ 7.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ในแก๊สไอเสียบทางทฤษฎี กับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	128
รูปที่ 7.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ในแก๊สไอเสียบ กับปริมาณอากาศส่วนเกิน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง กับทางทฤษฎี.....	129
รูปที่ 7.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียเนื่องจาก แก๊สไอเสียบออกทางปล่องควัน ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง กับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	137
รูปที่ 7.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ใช้ในกระบวนการอบแห้ง ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงของเหง้ามันสำปะหลัง กับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	138
รูปที่ 7.14	แสดงประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการอบแห้ง ของอุปกรณ์ลดความชื้นเชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลัง.....	141
รูปที่ 7.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลงของเหง้ามัน สำปะหลัง ประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการอบแห้ง กับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	142
รูปที่ 7.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ ความร้อนในไอน้ำที่ผลิตได้ กับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	146

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 7.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการเผาไหม้ ประสิทธิภาพรวมของระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้ซินเหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อ กับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	147
รูปที่ 7.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพรวมของระบบกำเนิดไอน้ำ ที่ใช้ซินเหง้ามันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่ลดลง ของเหง้ามันสำปะหลัง กับปริมาณอากาศส่วนเกิน.....	148
รูปที่ 7.19	แสดงสมดุลมวลของระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้ซินเหง้ามันสำปะหลัง เป็นเชื้อเพลิง ที่การทดลอง 40%EA.....	150
รูปที่ 7.20	แสดงสมดุลมวลของระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้ซินเหง้ามันสำปะหลัง เป็นเชื้อเพลิง ที่การทดลอง 120%EA.....	150
รูปที่ 7.21	แสดงแผนภาพสมดุลพลังงานความร้อนของระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้ซินเหง้ามัน สำปะหลังเป็นเชื้อเพลิงที่การทดลอง 40%EA.....	153
รูปที่ 7.22	แสดงแผนภาพสมดุลพลังงานความร้อนของระบบกำเนิดไอน้ำที่ใช้ซินเหง้ามัน สำปะหลังเป็นเชื้อเพลิงที่การทดลอง 120%EA.....	154
รูปที่ 7.23	แสดงการใส่เชื้อเพลิงเหง้ามันสำปะหลังลงในห้องอบลดความชื้น.....	155
รูปที่ 7.24	แสดงการใส่เหง้ามันลงในอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู.....	155
รูปที่ 7.25	แสดงเหง้ามันสำปะหลังแบบชื้นภายในอุปกรณ์ป้อนเชื้อเพลิงแบบสกรู.....	156
รูปที่ 7.26	แสดงไอน้ำที่ระบบกำเนิดไอน้ำผลิตออกมา.....	156
รูปที่ 7.27	แสดงควันที่ได้จากการเผาไหม้ที่ออกมาจากระบบกำเนิดไอน้ำทางปล่องควัน..	157
รูปที่ 7.28	แสดงการเก็บตัวอย่างซินเหง้ามันสำปะหลังที่ออกจากห้องอบลดความชื้น.....	157
รูปที่ 7.29	แสดงการชั่งน้ำหนักของตัวอย่างซินเหง้ามันสำปะหลังที่เก็บ จากห้องอบลดความชื้น.....	158
รูปที่ 7.30	แสดงการอบแห้งตัวอย่างซินเหง้ามันสำปะหลังที่เก็บ จากห้องอบลดความชื้น.....	158

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A_o	ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี เพื่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์	kg/kg_{fuel} หรือ Nm^3/kg_{fuel}
A	ปริมาณอากาศที่ใช้จริงในปฏิกิริยาการเผาไหม้	kg/kg_{fuel} หรือ Nm^3/kg_{fuel}
A_G	พื้นที่ของตะกรับ	m^2
c	อัตราส่วน โดยน้ำหนักของธาตุคาร์บอนในเชื้อเพลิง	
$c_{p,dg}$	ค่าความร้อนจำเพาะของแก๊สไอเสียแห้ง	$kJ/kg K$
$\bar{c}_{p,g}$	ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของแก๊สไอเสียเปียก	$kJ/kg K$
$c_{p,v}$	ค่าความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศ	$kJ/kg K$
CO	ปริมาณของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไอเสีย	$mol/100mol$ dry gas
CO ₂	ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสีย	$mol/100mol$ dry gas
d_i	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อไฟ	m
d_o	เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อไฟ	m
%EA	เปอร์เซ็นต์อากาศส่วนเกิน	
f	ตัวประกอบความเสียดทานของมูดี (Moody's diagram)	
F	องค์ประกอบเชิงมุม (view factor)	
G_o	ปริมาณแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ โดยใช้ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	kg/kg_{fuel} หรือ Nm^3/kg_{fuel}
G	ปริมาณแก๊สไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ โดยใช้ปริมาณอากาศจริง	kg/kg_{fuel} หรือ Nm^3/kg_{fuel}
h	อัตราส่วน โดยน้ำหนักของธาตุไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง	
h_s	เอนทัลปีของไอน้ำในสภาวะที่พิจารณา	kJ/kg
h_w	เอนทัลปีของน้ำป้อนที่เข้าหม้อไอน้ำ	kJ/kg
h_v	เอนทัลปีของไอน้ำในแก๊สไอเสีย	KJ/kg
h_f	เอนทัลปีของน้ำเหลวตัวที่อุณหภูมิบรรยากาศ	KJ/kg
h_i	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวด้านใน	$W/m^2 K$
h_o	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวด้านนอก	$W/m^2 K$
H	ความสูงของห้องเผาไหม้	m
HHV	ค่าความร้อนสูง	MJ/kg_{fuel}

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
K	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย	
LHV	ค่าความร้อนต่ำ	MJ/kg _{fuel}
LG	ค่าภาระของตะกรับ	Ib _m /ft ² hr
m	อัตราส่วนอากาศ	
m _a	มวลของอากาศแห้ง	kg/kg _{fuel}
m _c	มวลของคาร์บอนในเชื้อเพลิง	kg/kg _{fuel}
m _{c,ub}	มวลของคาร์บอนที่ไม่ได้เผาไหม้	kg/kg _{fuel}
m _{dg}	มวลของแก๊สไอเสียแห้ง	kg/kg _{fuel}
m _{H2}	มวลของไฮโดรเจนทั้งหมดในเชื้อเพลิง	kg/kg _{fuel}
m _m	มวลของน้ำในเชื้อเพลิง	kg/kg _{fuel}
m _r	อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง	kg/kg _{fuel}
m _s	มวลของไอน้ำที่หม้อไอน้ำสามารถผลิตได้ต่อหน่วยเวลา	kg/kg _{fuel}
M	มวลของผนังหม้อไอน้ำในชั้นที่พิจารณา	kg
n	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุไนโตรเจนในเชื้อเพลิง	
o	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุออกซิเจนในเชื้อเพลิง	
ΔP	ความดันตกที่เกิดขึ้นในระบบ	Pa
q''	พลังงานความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ถ่ายเทความร้อน	kW/m ²
Q	ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับน้ำในตัวหม้อไอน้ำ	kW
Q _{steam}	ความร้อนที่ถูกดูดกลืนโดยน้ำในหม้อไอน้ำ	kJ/kg _{fuel}
Q _{loss1}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากความชื้นในเชื้อเพลิงติดกับไปกับแก๊สไอเสีย	kJ/kg _{fuel}
Q _{loss2}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวเป็นไอน้ำจากการเผาไหม้ไฮโดรเจนในเชื้อเพลิง	kJ/kg _{fuel}
Q _{loss3}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากแก๊สไอเสียแห้งออกทางปล่องควัน	kJ/kg _{fuel}
Q _{loss4}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากความชื้นในอากาศ	kJ/kg _{fuel}
Q _{loss5}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	kJ/kg _{fuel}
Q _{loss6}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากคาร์บอนเผาไหม้ไม่หมด	kJ/kg _{fuel}
Q _{loss7}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากสาเหตุอื่น	kJ/kg _{fuel}

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
Q_{abs}	ความร้อนสูญเสียเนื่องจากผนังคูชับ	kW
Q_{cond}	ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการนำผ่านผนังของหม้อไอน้ำ	kW
Q_{rad}	ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน	kJ/kg_{fuel}
R	การระเหยสมมูล	kg/hr
R_f	ค่าความต้านทานความร้อน	$\text{m}^2 \text{K/W}$
R_e	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์	
s	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของธาตุกำมะถันในเชื้อเพลิง	
Δt	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
T_{wo}	อุณหภูมิน้ำออก	K
ΔT_{lm}	อุณหภูมิผลต่างล็อกมีน	K
U	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$\text{m}^2 \text{K/W}$
V	ปริมาตรของเตาเผาไหม้	m^3
w	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำในเชื้อเพลิง	
ρ	ความหนาแน่นของการไหล	kg/m^3
ρ_g	ความหนาแน่นของแก๊สไอเสีย	kg/m^3
ϕ	อัตราส่วนสมมูล	
ω	อัตราส่วนความชื้นในอากาศ	$\text{kg}_{vapor}/\text{kg}_{dry air}$
σ	ค่าคงที่ของ Stefan Boltzmann เท่ากับ 5.670×10^{-8}	$\text{W/m}^2 \text{K}^4$
ϵ	ค่าการแผ่รังสี	
μ	ความหนืดพลวัต	$\text{Pa}\cdot\text{m}$
η_B	ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ	