

การปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ



นายรัชชัย สิทธิสระดู๋

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6282-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF COPPER MELTING FURNACE USING AIR PREHEATER

Mr. Tawatchai Sittisradoo

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 2004

ISBN 974-17-6282-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ

โดย

นายธวัชชัย สิทธิสระคู่

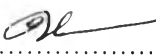
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

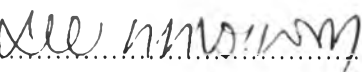
อาจารย์ที่ปรึกษา

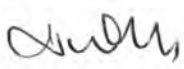
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญาณ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล)

วิทยานิพนธ์ วิทยานิพนธ์ : การปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ.
(PERFORMANCE IMPROVEMENT OF COPPER MELTING FURNACE USING AIR
PREHEATER) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ : 143 หน้า. ISBN 974-176-282 -8.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ โดยทำการซ่อมแซมอุปกรณ์อุ่นอากาศและใช้งานจริงที่บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า ก่อนการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศและใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ปริมาณผลผลิตที่ได้มีค่าประมาณ 22 ตันต่อชั่วโมง อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่บริเวณปล่องไอเสียประมาณ 406 °C ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย 44.47% และประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอมทองแดง 47.11% ซึ่งเมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสียพบว่ายังมีปริมาณสูงคือ ประมาณครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้าสู่เตาหลอมทองแดง

หลังการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศพบว่า ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้นเป็น 22.2 ตันต่อชั่วโมง โดยอุณหภูมิก๊าซไอเสียที่บริเวณปล่องไอเสียประมาณ 341.8°C มีความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย 30.58% เนื่องจากมีค่าออกซิเจนในก๊าซไอเสียลดลง และประสิทธิภาพทางความร้อนของทั้งระบบมีค่า 50.44%

ปริมาณออกซิเจนในน้ำทองแดงมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิอากาศเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในลวดทองแดงลดลง ซึ่งทำให้โรงงานสามารถที่จะผลิตลวดทองแดงที่มีคุณภาพดีได้

ในการทดลองหาค่าประสิทธิภาพทางความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศพบว่า มีประสิทธิภาพทางความร้อนประมาณ 42.51 % เมื่อเปรียบเทียบกับการหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่แนะนำโดย Shires ซึ่งมีค่าประมาณ 46.21 % พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

จากการวิจัยสรุปได้ว่า การทำให้อากาศเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศจะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการผลิตของโรงงานเพิ่มขึ้น และสามารถที่จะควบคุมปริมาณออกซิเจนในน้ำทองแดงได้ดี ทำให้เตาหลอมทองแดงมีสมรรถนะสูงขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

G4470344921: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FURNACE/ AIR PREHEATER/ PERFORMANCE/ IMPROVEMENT/

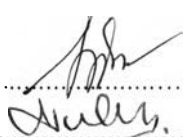
TAWATCHAI SITTISRADOO : PERFORMANCE IMPROVEMENT OF COPPER MELTING FURNACE USING AIR PREHEATER. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D. 143 pp. ISBN 974-17-6282-8.

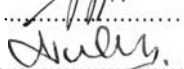
The aim of this thesis is to improve the performance of copper melting furnace using air preheater at Bangkok Cable Co., Ltd. Heat balance of the copper melting furnace is obtained. Before installing the air preheater, the natural gas is used as fuel for the furnace. The capacity is about 22 ton per hour. The flue gas temperature is about 406 °C. Heat loss from exhaust gas is about 44.47% and the thermal efficiency of copper furnace is approximately 47.11%. It is shown that heat loss from the exhaust gas is nearly half of the heat input. When air preheater is used to heat combustion air. The capacity of the furnace is increased to 22.2 ton per hour. The flue gas temperature is reduced to 341.8 °C because of the decreased amount of oxygen in flue gas. Thus, the thermal efficiency of system is increased to 50.44%.

The accumulated oxygen in melting copper has decreased with higher temperature combustion air, thus the quality of the product is improved.

The thermal efficiency of air preheater from measurement is about 42.51 % compared with the thermal efficiency suggested by Shires (46.21%). It can be seen that both results are in good agreement.

The adiabatic flame temperature is higher when the temperature of combustion air is increased. As a result, the capacity of furnace is enhanced and also the accumulated oxygen in melting copper can be easily controlled.

Department.....Mechanical Engineering.....Student's signature.....

Field of study...Mechanical Engineering...Advisor's signature.....

Academic year...2004..... Co-advisor's signature.....-

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ด้วยคำแนะนำ ช่วยเหลือ และชี้แนะอย่างดียิ่ง จากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ตลอดจนคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน คือ รองศาสตราจารย์ ดร. มานิจ ทองประเสริฐ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ กรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ก่อเกียรติ บุญชูกุล กรรมการ ที่ได้ร่วมให้คำปรึกษาและแนวความคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์ และสามารถนำไปปรับใช้ในการทำงานของผู้วิจัยต่อไปได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านสถานที่ในการเขียนงานวิจัย และเงินทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่สนับสนุนเงินทุนในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด ที่ให้ผู้วิจัยได้เข้าไปทำวิจัย ตลอดจนพนักงานของบริษัททุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณ จริญญา สุนทรโชติ คุณยุทธพร เรืองโชติ ตลอดจนพี่น้องๆที่แสนน่ารักและน่ารักของพวกเราทุกคน ที่ให้ความร่วมมือและให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยอย่างดียิ่ง

ผู้วิจัยขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือผู้วิจัยตลอดมา ขอขอบคุณคุณอาจารย์ พี่ๆ เพื่อนๆ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา ขอขอบคุณอาจารย์ ณัฐเดช เพ็ญวรรณวงศ์ ผู้เป็นเสมือนทั้งครูอาจารย์ พี่ชาย และเพื่อนร่วมงาน ขอขอบคุณคุณประพันธ์ พิกุลทอง ที่ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง คุณอมรภพ มั่นสกุล ที่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี คุณชูจิตร แสงพงศ์ชวาล ที่ช่วยตรวจทานต้นฉบับและแก้ไขวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้กำลังใจและคำปรึกษาที่ดีตลอดมา

ท้ายที่สุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา น้องชาย อันเป็นที่รักยิ่งของผู้วิจัย ที่ให้ทุกสิ่งทุกอย่างแก่ผู้วิจัย ประโยชน์อันใดอันจะเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขออุทิศแด่ บิดา มารดา ผู้ให้กำเนิด ครูอาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฐ
รายการสัญลักษณ์	ฒ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทำวิจัย.....	4
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา	7
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน	
3.1 การถ่ายเทความร้อน.....	10
3.1.1 การนำความร้อน (Conduction heat transfer)	10
3.1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)	12
3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)	13
3.1.4 การแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากก๊าซร้อน (Gas radiation)	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การเผาไหม้ (Combustion)	23
3.2.1 สภาวะที่จำเป็นในการเริ่มปฏิกิริยาการเผาไหม้	23
3.2.2 พลังงานการจุดไฟและอุณหภูมิการจุดไฟ	24
3.2.3 เปลวไฟ (Flames)	25
3.2.4 อุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติก (Adiabatic flame temperature)	27
3.2.5 พลังงานความร้อนของการเผาไหม้	29
3.2.6 ค่าความร้อน (Heating value or Calorific value)	29
3.3 การคำนวณการเผาไหม้	30
3.3.1 ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี (A_0)	31
3.3.2 ปริมาณก๊าซสันดาป.....	32
3.4 การทำสมดุลความร้อน (Heat balance).....	33
3.4.1 ความสำคัญของสมดุลความร้อน.....	33
3.4.2 ขอบเขตของการทำสมดุลความร้อน.....	34
3.4.3 หลักเกณฑ์และหน่วยของการทำสมดุลความร้อน.....	34
3.4.4 วิธีคำนวณความร้อนเข้า.....	35
3.4.5 วิธีคำนวณความร้อนออก.....	36
3.5 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหลอม.....	39

บทที่ 4 เตาหลอมทองแดงและระบบการหลอมทองแดง

4.1 การใช้พลังงานภายในโรงงาน.....	40
4.2 กระบวนการผลิตเส้นลวดทองแดงของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด.....	45
4.3 เตาหลอมทองแดง (Shaft melting furnace).....	47
4.3.1 การเตรียมอุปกรณ์เครื่องจักรก่อนทำการหลอม.....	50
4.3.2 ขั้นตอนการสตาร์ทเตาพัก.....	50
4.3.3 ขั้นตอนการหยุดเตาพัก.....	51
4.3.4 ขั้นตอนการสตาร์ท Launder.....	53
4.3.5 ขั้นตอนการหยุด Launder หลังการหลอม.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.6 ขั้นตอนการสตาร์ทเตาหลอมทองแดง.....	55
4.4 เชื้อเพลิงที่ใช้กับระบบเตาหลอมทองแดง.....	59
4.4.1 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (Liquefied Petroleum Gas).....	59
4.4.2 ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas).....	64
บทที่ 5 อุปกรณ์อุ่นอากาศ	
5.1 อุปกรณ์ทางความร้อน.....	75
5.2 อุปกรณ์อุ่นอากาศ (Air Preheater).....	84
5.2.1 อุปกรณ์อุ่นอากาศที่ใช้ในงานวิจัย.....	84
5.2.2 ปัญหาและอุปสรรคในการซ่อมแซมอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	86
5.2.3 หัวเผาที่ใช้ในอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	87
5.3 ขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	90
5.4 สมมติฐานที่ใช้ในการพิจารณาอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	92
5.5 การทำสมดุลความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	92
5.6 การอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้.....	94
5.6.1 เทอร์โมไดนามิกส์สำหรับการเผาไหม้.....	94
5.6.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา.....	95
บทที่ 6 การวิเคราะห์ผลการวิจัย	
6.1 ขั้นตอนการทดลอง.....	97
6.2 สมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง....	98
6.3 สมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ).....	99
6.4 สมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (หลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ).....	100
6.5 สมดุลความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	103
6.6 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	104

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย	
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	113
7.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม.....	114
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	119
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	131
ภาคผนวก ค รูปเตาหลอมและอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	141
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	143

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความยาวสมมูลของลำก๊าซ (L_e)	19
3.2 อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ.....	24
3.3 ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ	26
3.4 ค่าความร้อนและอุณหภูมิเปลวไฟของก๊าซเชื้อเพลิง.....	28
3.5 องค์ประกอบของอากาศ (บนผิวโลก).....	30
3.6 ค่าประมาณขององค์ประกอบของอากาศ.....	30
3.7 การเผาไหม้ของก๊าซต่างๆ ซึ่งประกอบเป็นก๊าซเชื้อเพลิง.....	32
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนต่ำ LHV, A_o และ G_o	33
4.1 การใช้พลังงานของโรงงานในปี 2545.....	41
4.2 การใช้เชื้อเพลิงของเตาหลอมทองแดง เตापัททองแดง และผลผลิตลวดทองแดงของ โรงงานในปี 2544.....	42
4.3 ปริมาณผลผลิตลวดทองแดงและชั่วโมงการทำงานของโรงงานในปี 2544.....	43
4.4 ปริมาณผลผลิตลวดอลูมิเนียมและชั่วโมงการทำงานของโรงงานในปี 2544.....	43
4.5 ปริมาณผลผลิตลวดอลูมิเนียมและชั่วโมงการทำงานของโรงงานในปี 2545.....	44
4.6 คุณสมบัติของ LPG โดยทั่วไป.....	60
4.7 ข้อกำหนดคุณภาพของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG).....	61
4.8 ความร้อนจำเพาะของ LPG (kcal/kg- $^{\circ}$ C).....	63
4.9 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตได้โดยตรงจากแหล่งผลิตต่างๆ	65
4.10 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ได้จากการกลั่นน้ำมันที่แหล่งผลิตต่างๆ.....	66
4.11 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย.....	67
4.12 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติแห้ง และก๊าซธรรมชาติเปียก (%โดยโมล).....	68
4.13 คุณสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติ.....	69
4.14 ค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติจากแหล่งผลิตต่างๆ.....	73
4.15 ค่าความร้อนของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย.....	74
6.1 ปริมาณความร้อนที่เข้าและออกเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง..	98
6.2 ปริมาณความร้อนที่เข้าและออกเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ).....	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.3 ค่าเปรียบเทียบความร้อนเข้าและออกจากเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว และก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงก่อนการใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ	100
6.4 ปริมาณความร้อนที่เข้าและออกจากเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (หลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ).....	101
6.5 ค่าเปรียบเทียบความร้อนเข้าและออกจากเตาหลอมทองแดงก่อนและหลังการใช้อุปกรณ์ อุ่นอากาศ (เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง).....	101
6.6 ปริมาณความร้อนที่เข้าและออกจากระบบเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (หลังติดตั้ง อุปกรณ์อุ่นอากาศ).....	102
6.7 ปริมาณความร้อนที่เข้าและออกอุปกรณ์อุ่นอากาศเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง.....	103
ก1 ปริมาณทองแดงที่ใช้ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG).....	119
ก2 ปริมาณทองแดงที่ใช้ในการหลอมหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG).....	121
ก3 การตรวจวัดเตาหลอมทองแดงก่อนใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ (LPG).....	122
ก4 การตรวจวัดเตาหลอมทองแดงก่อนใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG).....	122
ก5 การตรวจวัดเตาหลอมทองแดงหลังใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG).....	123
ก6 ข้อมูลการทดลองเฉลี่ยของเตาหลอม (LPG).....	124
ก7 ข้อมูลการทดลองเฉลี่ยของเตาหลอม (NG).....	125
ก8 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสมมูลความร้อน (LPG).....	126
ก9 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสมมูลความร้อนก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG).....	127
ก10 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสมมูลความร้อนหลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG).....	128
ก11 การทดลองอุ่นอากาศในอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	129
ก12 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณสมมูลความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศ (NG).....	129
ก13 อุณหภูมิอากาศเผาไหม้กับปริมาณออกซิเจนในทองแดง.....	130
ข1 องค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติของบริษัทการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน).....	131

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องมือวิเคราะห์ก๊าซไอเสีย (Flue gas analyzer).....	4
1.2 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบสัมผัส (Contact thermometer).....	5
1.3 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด (Infrared thermometer).....	5
1.4 เครื่องมือวัดความเร็วลม (Anemometer).....	6
1.5 เครื่องมือวัดอัตราการไหลน้ำหล่อเย็น (Ultrasonic flow meter).....	6
3.1 (ก) การนำความร้อนผ่านผนังหนา Δx	11
(ข) ทิศทางการไหลของความร้อน.....	11
3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา.....	12
3.3 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวและสิ่งแวดล้อม.....	13
3.4 การแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่างผิวของวัตถุเล็ก ๆ และสิ่งแวดล้อม.....	15
3.5 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของ CO_2 ที่ความดันรวม 1 atm	17
3.6 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของไอน้ำที่ความดันรวม 1 atm	18
3.7 แผ่คเตอร์ปรับแก้ค่าการแผ่รังสีของก๊าซ CO_2	20
3.8 แผ่คเตอร์ปรับแก้ค่าการแผ่รังสีของ H_2O	20
3.9 แผ่คเตอร์ปรับแก้ค่าการแผ่รังสีเมื่อเกิด CO_2 และ H_2O ในรูปทรงปิด.....	21
3.10 แผนภูมิสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของก๊าซ.....	21
3.11 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้.....	23
4.1 การใช้พลังงานของโรงงาน.....	40
4.2 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตลวดทองแดง.....	45
4.3 กระบวนการผลิตลวดทองแดงของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด.....	46
4.4 เตาหลอมทองแดงก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	48
4.5 เตาหลอมทองแดงหลังจากติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	49
4.6 ระบบควบคุมเตาพักทองแดง.....	52
4.7 สวิตช์ควบคุม Launder	54
4.8 สวิตช์ควบคุมเตาหลอมทองแดง.....	57
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอกับอุณหภูมิส่วนผสมต่างๆ กัน.....	61
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับความถ่วงจำเพาะในสถานะของเหลว.....	62

สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	ความหนืดขององค์ประกอบต่างๆ ของก๊าซธรรมชาติที่ความดันบรรยากาศ.....	72
5.1	Fire heater ที่จัดวางกลุ่มท่อในแนวตั้ง.....	76
5.2	Fire heater ที่จัดวางกลุ่มท่อในแนวนอน.....	78
5.3	รีคูเปอเรเตอร์ชนิดแผ่รังสี.....	81
5.4	รีคูเปอเรเตอร์ชนิดพาความร้อน.....	82
5.5	รีคูเปอเรเตอร์ชนิดผสม.....	83
5.6	(ก) อุปกรณ์อุ่นอากาศที่ใช้ในงานวิจัย.....	85
	(ข) อุปกรณ์อุ่นอากาศและท่ออากาศเย็นเข้า.....	85
	(ค) อุปกรณ์อุ่นอากาศและท่ออากาศร้อนออก.....	86
5.7	(ก) หัวเผาที่ติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	88
	(ข) หัวเผาลังติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	88
5.8	Blower ของเตาหลอมทองแดงและอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	89
5.9	ท่อก๊าซและท่ออากาศของหัวเผาในอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	89
5.10	ตู้ควบคุมของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	90
5.11	การทำงานของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	91
5.12	สมดุลความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	93
5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าคงตัวอัตราการเกิดปฏิกิริยาจำเพาะ.....	96
6.1	Sankey diagram เมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง.....	108
6.2	Sankey diagram ของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ).....	109
6.3	Sankey diagram ของเตาหลอมเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (หลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ).....	110
6.4	Sankey diagram ของระบบเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง (หลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่น อากาศ).....	111
6.5	กราฟแสดงอุณหภูมิอากาศเผาไหม้กับปริมาณออกซิเจนในน้ำทองแดง.....	112
ค1	หัวเผา Row A, B ของเตาหลอมทองแดง.....	141
ค2	หัวเผา Row C ของเตาหลอมทองแดง.....	141
ค3	อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซของเตาหลอมทองแดง (Zone regulator).....	142
ค4	ท่ออากาศร้อนภายในอุปกรณ์อุ่นอากาศ.....	142

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	พื้นที่ผิว, ปริมาณอากาศจริง	m^2 , -
A_i	พื้นที่ผิวเตาหลอม	m^2
A_o	ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	-
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะของสาร	$kJ/Nm^3 \text{ } ^\circ C$
C_{pu}	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	$kJ/Nm^3 \text{ } ^\circ C$
C_{pf}	ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง	$kJ/Nm^3 \text{ } ^\circ C$
$C_{p,flue}$	ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย	$kcal/Nm^3 \text{ } K$
$C_{p,m}$	ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุรับความร้อน	$kJ/kg \text{ } ^\circ C$
CO	ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสีย	ppm
D_c	เส้นผ่านศูนย์กลางของลำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	m
D_w	เส้นผ่านศูนย์กลางของไอน้ำ	m
DP	เส้นผ่านศูนย์กลางของลำก๊าซ	m
G	ปริมาณก๊าซเสียจริง	Nm^3/Nm^3
G_o	ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	Nm^3/Nm^3
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
H_f	เอนทาลปีที่สภาวะสุดท้าย	kJ/kg
h_{gr}	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของก๊าซร้อน	$Btu/ft^2 \text{ } ^\circ C \text{ } hr$
$h_{gr,real}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของก๊าซร้อนจริง	$Btu/ft^2 \text{ } ^\circ C \text{ } hr$
$h_{gr,total}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของก๊าซร้อนรวม	$Btu/ft^2 \text{ } ^\circ C \text{ } hr$
h_r	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	$W/m^2 \text{ } ^\circ C$
ΔH_c°	ความร้อนของการเผาไหม้	$kJ/kmol$
ΔH_f°	ความร้อนของการเกิดขึ้นของสาร	$kJ/kmol$
H_o	เอนทาลปีที่สภาวะเริ่มต้น	kJ/kg
ΔH_r°	ความร้อนของปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน	$kJ/kmol$
HHV	ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง	MJ/Nm^3
k	ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง	$W/m \text{ } ^\circ C$
LH	ค่าความร้อนแฝงของวัตถุรับความร้อน	kJ/kg

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
LHV	ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง	MJ/Nm ³
\dot{m}_f	ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้	Nm ³ /hr
\dot{m}_a	ปริมาณอากาศ	Nm ³ /hr
\dot{m}_m	ปริมาณของวัตถุรับความร้อน	kg/hr
\dot{m}_w	ปริมาณน้ำหล่อเย็น	m ³ /hr
n_{H_2O}	จำนวนโมลของน้ำ	mol
Nu	ตัวเลขนัสเซลท์ (Nusselt Number)	-
P_c	ความดันไอของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	atm
P_w	ความดันไอของไอน้ำ	atm
Pr	ตัวเลขพรานด์เทิล (Prandtl Number)	-
Q_a	พลังงานที่เพิ่มเข้า	kJ/kg
Q_c	ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี	kJ/kg
\dot{Q}_{cond}	อัตราการนำความร้อน	MJ/hr
\dot{Q}_{conv}	อัตราการพาความร้อน	MJ/hr
\dot{Q}_{rad}	อัตราการแผ่รังสีความร้อน	MJ/hr
\dot{Q}_f	ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิง	MJ/hr
\dot{Q}_{sf}	ปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง	MJ/hr
\dot{Q}_{sa}	ปริมาณความร้อนสัมผัสของอากาศ	MJ/hr
\dot{Q}_m	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัตถุ	MJ/hr
\dot{Q}_{flue}	ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย	MJ/hr
\dot{Q}_w	ปริมาณความร้อนที่น้ำหล่อเย็นได้รับ	MJ/hr
\dot{Q}_{wall}	ปริมาณความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	MJ/hr
\dot{Q}_{ca}	ปริมาณความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	MJ/hr
\dot{Q}_{un}	ปริมาณความร้อนสูญเสียอื่นๆ	MJ/hr
\dot{Q}_{useful}	ปริมาณความร้อนยังผล	MJ/hr
\dot{Q}_{input}	ปริมาณความร้อนป้อนเข้า	MJ/hr
\dot{Q}_{total}	อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม	W

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)	-
T_{ave}	อุณหภูมิเฉลี่ย	$^{\circ}\text{C}$
T_s	อุณหภูมิของพื้นผิว	$^{\circ}\text{C}$
T_{∞}	อุณหภูมิของของไหลที่อยู่ห่างจากพื้นผิว	$^{\circ}\text{C}$
T_{surr}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	$^{\circ}\text{C}$
T_f	อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$
T_{amb}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	$^{\circ}\text{C}$
T_a	อุณหภูมิอากาศอุ่น	$^{\circ}\text{C}$
$T_{m,in}$	อุณหภูมิวัดรับความร้อนเข้า	$^{\circ}\text{C}$
$T_{m,out}$	อุณหภูมิวัดรับความร้อนออก	$^{\circ}\text{C}$
T_{fluc}	อุณหภูมิก๊าซไอเสีย	$^{\circ}\text{C}$
T_r	อุณหภูมิอ้างอิง	$^{\circ}\text{C}$
$T_{w,in}$	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า	$^{\circ}\text{C}$
$T_{w,out}$	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก	$^{\circ}\text{C}$
T_{wall}	อุณหภูมิผิวเตา	$^{\circ}\text{C}$
ρ_f	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	kg/Nm^3
ρ_w	ความหนาแน่นของน้ำหล่อเย็น	kg/m^3
η_{comb}	ประสิทธิภาพการเผาไหม้	-
$\eta_{th, furnace}$	ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอม	-
ε	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	-
ε_c	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	-
ε_g	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีรวมของก๊าซ	-
ε_w	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำ	-