

การศึกษาการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดง



นายพร้อมพันธ์ แสงแก้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

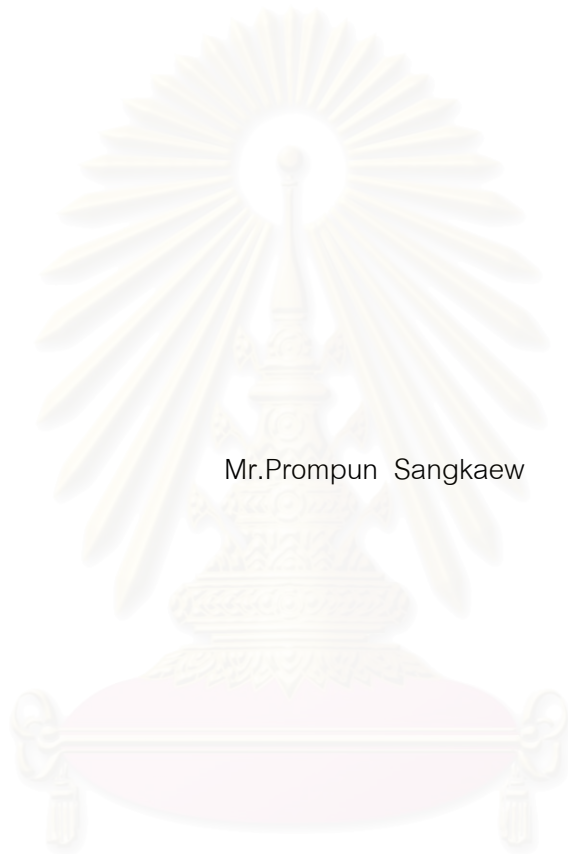
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6513-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF NATURAL GAS UTILIZATION IN COPPER MELTING FURNACE



Mr.Promptun Sangkaew

สถาบันวิทยบริการ

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 974-17-6513-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดง
โดย นายพร้อมพันธ์ แสงแก้ว
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

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

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พร้อมพันธ์ แสงแก้ว : การศึกษาการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดง.

(A STUDY OF NATURAL GAS UTILIZATION IN COPPER MELTING FURNACE)

อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์, 134 หน้า.

ISBN 974-17-6513-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดงของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิลจำกัด โดยจะทำการปรับปรุงระบบหลอมทองแดงเพื่อให้สามารถใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงได้

จากการทดลองในกรณีใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง พบว่าอุณหภูมิของก๊าซเสีย 364.5°C ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย 48.61% และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเตาหลอมทองแดง 41.34% ภายหลังจากเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติพบว่าอุณหภูมิของก๊าซเสีย 406.3°C ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสียลดลงเหลือ 40.25% และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเตาหลอมทองแดงเพิ่มขึ้นเป็น 45.52%

จากการวิจัยสรุปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเตาหลอมทองแดงเพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนสูญเสียในก๊าซเสียน้อยลง โดยที่ปริมาณผลผลิตทองแดงยังเท่าเดิมคือประมาณ 22 ตันต่อชั่วโมง ในด้านของคุณภาพของทองแดงสามารถควบคุมปริมาณออกซิเจนในลวดทองแดงให้ต่ำกว่า 150-250 ppm ซึ่งจัดว่าเป็นทองแดงที่มีคุณภาพดีและทางโรงงานสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนของราคาค่าเชื้อเพลิงประมาณปีละ 986,794 บาท สามารถคำนวณเป็นอัตราการประหยัดได้เท่ากับ 56 บาทต่อตัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา ..2547.....

4470428021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: NATURAL GAS UTILIZATION/ FURNACE / COPPER

PROMPUN SANGKAEW : A STUDY OF NATURAL GAS UTILIZATION IN COPPER MELTING FURNACE. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. SOMPONG PUTIVISUTISAK, Ph.D. 134 pp. ISBN 974-17-6513-4.

The aim of this thesis is to study fuel changing from LPG to NG in copper melting system at Bangkok Cable Co., Ltd. The copper melting furnace is modified in order to use NG as fuel instead of LPG. In addition, Performance of copper melting furnace will be improved.

When LPG is used as fuel for the furnace, the flue gas temperature is 364.5°C. Heat loss from exhaust gas is about 48.61%. And thermal efficiency of copper melting furnace is approximately 41.34%. When NG is used, the flue gas temperature is about 406.3°C; heat loss from exhaust gas is 40.25%, and thermal efficiency of copper melting furnace is approximately 45.52% .

To summarize, when NG is used instead of LPG furnace thermal efficiency is improved. The accumulated oxygen in melting copper is kept lower than 150-250 ppm, the requirement for good copper quality. The company can save the fuel expense of nearly a million baht per year (56 baht per ton).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DepartmentMechanical Engineering.....

Student's signature

Field of study ..Mechanical Engineering.....

Advisor's signature

Academic Year2004.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดที่มีคุณค่ายิ่งในการทำวิจัยรวมทั้งการดำเนินชีวิตของผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านสถานที่ในการเขียนงานวิจัย และเงินทุนอุดหนุนงานวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ที่สนับสนุนเงินทุนในการวิจัยครั้งนี้ ขอขอบคุณ บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ที่ให้ผู้วิจัยได้เข้าไปทำวิจัย ตลอดจนพนักงานของบริษัททุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณเจริญ สุนทรโชติ คุณยุทธพร เรืองโชติ ตลอดจนพี่ ๆ น้อง ๆ ที่แผนกตามหลอมทองแดงของบริษัท ที่ให้ความร่วมมือและให้ความช่วยเหลือผู้วิจัยอย่างยิ่ง

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอด อนึ่งประโยชน์และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแต่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน.....	7
3.1 เชื้อเพลิงก๊าซ.....	7
3.1.1 ก๊าซธรรมชาติ.....	7
3.1.2 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว.....	10
3.1.3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของก๊าซเชื้อเพลิง.....	11
3.2 ปฏิกริยาเคมีของการเผาไหม้.....	12
3.2.1 ปฏิกริยาเผาไหม้ของไฮโดรเจน.....	12
3.2.2 ปฏิกริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนมอนอกไซด์.....	14
3.2.3 การเผาไหม้ของ NG และ LPG.....	16

บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน (ต่อ)

3.3	สภาวะที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา.....	17
3.3.1	องค์ประกอบที่จำเป็น.....	17
3.3.2	พลังงานการจุดไฟและอุณหภูมิการจุดไฟ.....	18
3.3.3	ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ.....	19
3.3.4	เปลวไฟ.....	19
3.3.5	พลังงานความร้อนของการเผาไหม้.....	20
3.3.6	ค่าความร้อน.....	21
3.3.7	อุณหภูมิเปลวไฟแอดิเยเบติก.....	22
3.4	การวิเคราะห์ระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยกฎข้อที่หนึ่ง ทางเทอร์โมไดนามิกส์.....	23
3.4.1	ระบบที่มีการไหลคงตัว.....	23
3.4.2	ระบบปิด.....	24
3.5	กฎการถ่ายเทความร้อน.....	25
3.5.1	การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน.....	25
3.5.2	การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน.....	28
3.5.3	การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน.....	29
3.6	สมดุลความร้อน.....	30
3.6.1	ขอบเขตของสมดุลความร้อน.....	31
3.6.2	หลักเกณฑ์และหน่วยของการทำดุลความร้อน.....	31
3.6.3	ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี.....	31
3.6.4	การหาอัตราส่วนผสม.....	32
3.6.5	วิธีคำนวณความร้อนเข้า.....	32
3.6.5.1	ความร้อนที่นำเข้าโดยเชื้อเพลิง.....	32
3.6.5.2	วิธีคำนวณความร้อนออก.....	33
3.7	ประสิทธิภาพเชิงความร้อน.....	36
3.8	อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ.....	36
3.8.1	หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดัน.....	36
3.8.2	ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ปรับความดันวาล์วควบคุมการไหล.....	37

บทที่ 4	กระบวนการผลิตลวดทองแดง.....	39
4.1	กระบวนการผลิตลวดทองแดงของบริษัท บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด.....	39
4.2	ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงและผลผลิตของเตาหลอมทองแดงตลอดปี พ.ศ. 2544.....	42
4.3	ระบบการทำงาน อุปกรณ์หลัก และอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ ของเตาหลอมทองแดง.....	43
4.3.1	ส่วนประกอบของเตาหลอมทองแดง.....	43
4.3.2	เตาหลอมทองแดง.....	43
บทที่ 5	แนวทางแก้ไขปัญหา.....	52
5.1	ความดันที่เหมาะสมเมื่อใช้ NG.....	53
5.2	การเผาไหม้ของ NG และ LPG.....	56
5.3	การคำนวณปริมาณก๊าซ NG เพื่อให้ได้ความร้อนเท่ากับกรณีใช้ก๊าซ LPG.....	57
5.4	การทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ.....	58
บทที่ 6	การทดลอง.....	62
6.1	เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	62
6.1.1	มาตรวัดความดัน.....	62
6.1.2	อุปกรณ์วิเคราะห์ส่วนประกอบของไอเสีย.....	63
6.1.3	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ.....	64
6.1.4	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด.....	64
6.1.5	อุปกรณ์วัดอัตราการไหล.....	64
6.1.6	อุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้.....	64
6.1.7	อุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิและปริมาณก๊าซ O ₂ ในน้ำทองแดง.....	64
6.1.8	อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ.....	64
6.2	วิธีการทดลอง.....	69
6.2.1	วิธีการทดลองหลอมทองแดงโดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง ที่โรงงานสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล.....	69
6.2.2	วิธีการทดลองหลอมทองแดงโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ที่โรงงานสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล.....	70

บทที่ 7 ผลการทดลอง.....	72
7.1 การทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดง.....	72
7.1.1 กรณีที่ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง.....	72
7.1.2 กรณีที่ใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งแรก).....	75
7.1.3 กรณีที่ใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งที่สอง).....	78
7.2 การคำนวณอัตราการประหยัดเมื่อเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ แทนก๊าซปิโตรเลียมเหลวในเตาหลอมทองแดง.....	82
7.3 แผนภาพ Sankey Diagram ของเชื้อเพลิง LPG.....	83
7.4 แผนภาพ Sankey Diagram ของเชื้อเพลิง NG.....	83
7.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Sleeve ของหัวเผาสำหรับใช้กับก๊าซธรรมชาติ.....	86
7.6 ความดันที่ใช้งานกรณีใช้ก๊าซ LPG และก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง.....	87
บทที่ 8 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	89
8.1 ปริมาณเชื้อเพลิง.....	89
8.2 ปริมาณอากาศที่ใช้.....	89
8.3 การปรับตั้งอุปกรณ์.....	89
8.4 กำลังการผลิต.....	90
8.5 คุณภาพของผลิตภัณฑ์.....	90
8.6 การถ่ายเทความร้อน.....	90
8.6.1 การทดลองโดยใช้ก๊าซ LPGเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง.....	90
8.6.2 การทดลองโดยใช้ก๊าซ NGเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง.....	90
8.7 ประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดง.....	91
8.8 ผลการประหยัดค่าเชื้อเพลิง.....	91
8.9 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม.....	92
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก ก.....	96
ภาคผนวก ข.....	109
ภาคผนวก ค.....	132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	134

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของมีเทนและไฮโดรคาร์บอนเบาตัวอื่น ๆ.....	8
3.2 คุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ จาก ปตท.....	9
3.3 ข้อกำหนดคุณภาพของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG)	11
3.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างก๊าซธรรมชาติและก๊าซปิโตรเลียมเหลว.....	11
3.5 อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ.....	18
3.6 ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ.....	20
3.7 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย.....	29
4.1 การใช้เชื้อเพลิงของเตาหลอมทองแดง เต้าพุก และผลผลิตลวดทองแดงของ บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ในปี พ.ศ. 2544.....	42
7.1 ข้อมูลคุณสมบัติโดยทั่วไปของก๊าซ LPG	72
7.2 ข้อมูลการตรวจวัดสภาวะการสันดาปของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง.....	73
7.3 การคำนวณสมมูลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง.....	74
7.4 สรุปการคำนวณสมมูลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง.....	75
7.5 ข้อมูลคุณสมบัติโดยทั่วไปของก๊าซ NG (การทดลองครั้งแรก).....	76
7.6 ข้อมูลการตรวจวัดสภาวะการสันดาปของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งแรก).....	76
7.7 การคำนวณสมมูลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งแรก).....	77
7.8 สรุปการคำนวณสมมูลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งแรก).....	78
7.9 ข้อมูลคุณสมบัติโดยทั่วไปของก๊าซ NG (การทดลองครั้งที่สอง).....	79
7.10 ข้อมูลการตรวจวัดสภาวะการสันดาปของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งที่สอง).....	79

ตารางที่	หน้า
7.11 การคำนวณสมมูลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งที่สอง).....	80
7.12 สรุปการคำนวณสมมูลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งที่สอง).....	81
7.13 การคำนวณสมมูลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง เปรียบเทียบกับเมื่อใช้ก๊าซ NG.....	82
7.14 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Sleeve ของหัวเผาสำหรับใช้กับก๊าซธรรมชาติ.....	86
7.15 ตารางสภาวะการทำงานของก๊าซ LPG บริเวณ Zone Regulator และ Zero Regulator หลังจากติดตั้งมาตรวัดความดัน.....	87
7.16 ตารางสภาวะการทำงานของก๊าซ NG บริเวณ Zone Regulator และ Zero Regulator หลังจากติดตั้งมาตรวัดความดัน.....	88
ก1 แสดงองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ที่ใช้ในบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด.....	105
ก2 การประมาณแบบเชิงเส้นเพื่อหา Adiabatic flame temperature กรณีใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง.....	106
ก3 การประมาณแบบเชิงเส้นเพื่อหา Adiabatic flame temperature กรณีใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง.....	108
ข1 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 2 กรกฎาคม 2546.....	109
ข2 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 3 กรกฎาคม 2546.....	110
ข3 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 7 กรกฎาคม 2546.....	113
ข4 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 8 กรกฎาคม 2546.....	114
ข5 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 10 กรกฎาคม 2546.....	115
ข6 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 15 กรกฎาคม 2546.....	118

ตารางที่	หน้า
๗7	ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 16 กรกฎาคม 2546.....119
๗8	ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 17 กรกฎาคม 2546.....123
๗9	ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 21 กรกฎาคม 2546.....125
๗10	ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง วันที่ 22 กรกฎาคม 2546.....127

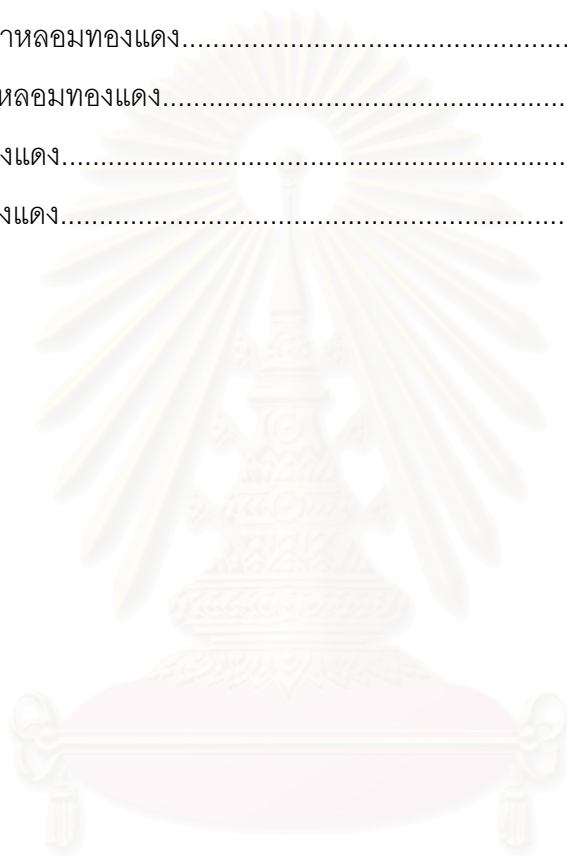


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
3.1	องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้..... 17
3.2	ภาพแสดงเครื่องหมายของค่า dT/dx สำหรับการนำความร้อน และ ทิศทางการนำความร้อน..... 26
3.3	การนำความร้อนผ่านผนังรบบที่มีค่าการนำความร้อน k คงที่..... 27
3.4	ระบบปรับความดันก๊าซ..... 36
3.5	อุปกรณ์ควบคุมความดัน..... 37
3.6	วาล์วควบคุมการไหล..... 37
3.7	แรงดึงในแผ่นไดอะแฟรม..... 38
3.8	ความดันตกคร่อมที่วาล์ว..... 38
4.1	กระบวนการผลิตทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด..... 39
4.2	กระบวนการผลิตลวดทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด..... 41
4.3	ลักษณะของ Shaft melting furnace ที่ใช้งานในปัจจุบัน..... 44
4.4	ระบบผสมอากาศกับเชื้อเพลิงในหัวเผา..... 49
4.5	ระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ..... 51
5.1	อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซที่ทำการปรับตั้งเมื่อเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ..... 55
5.2	Blower ที่ใช้สำหรับจ่ายอากาศ..... 55
5.3	สภาวะการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันเมื่อใช้ LPG..... 60
5.4	สภาวะการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันเมื่อใช้ NG..... 61
6.1	มาตรวัดความดัน..... 63
6.2	เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมของไอเสีย..... 63
6.3	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ..... 65
6.4	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด..... 65
6.5	อุปกรณ์วัดอัตราการไหล..... 66
6.6	อุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้..... 66
6.7	อุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิและปริมาณก๊าซ O_2 ในน้ำทองแดง..... 67
6.8	อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซบริเวณทางเข้าโรงงานหลอมทองแดง..... 67

รูปที่	หน้า
6.9	อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซก่อนเข้า Zone Regulator..... 68
6.10	อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซบริเวณ Zone Regulator..... 68
7.1	Sankey Diagram เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง.....84
7.2	Sankey Diagram เมื่อใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง.....85
ค1	หัวเผาของเตาหลอมทองแดง..... 132
ค2	กระบวนการหลอมทองแดง..... .132
ค3	เตาหลอมทองแดง..... .133
ค4	เตาพักน้ำทองแดง..... .133



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	ปริมาณอากาศจริง	-
A_i	พื้นที่ผิวเตาหลอม	m^2
A_0	ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	-
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะของสาร	$kJ/Nm^3{}^{\circ}C$
C_{pa}	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	$kJ/Nm^3{}^{\circ}C$
C_{pf}	ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง	$kJ/Nm^3{}^{\circ}C$
$C_{p,flue}$	ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย	$kcal/Nm^3 K$
$C_{p,m}$	ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุรับความร้อน	$kJ/kg{}^{\circ}C$
CO	ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสีย	ppm
D_c	เส้นผ่านศูนย์กลางของลำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	m
D_w	เส้นผ่านศูนย์กลางของไอน้ำ	m
DP	เส้นผ่านศูนย์กลางของลำก๊าซ	m
G	ปริมาณก๊าซเสียจริง	Nm^3/Nm^3
G_0	ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	Nm^3/Nm^3
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2{}^{\circ}C$
H_f	เอนทาลปีที่สภาวะสุดท้าย	kJ/kg
h_{gy}	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของก๊าซร้อน	$Btu/ft^2{}^{\circ}C hr$
$h_{gy,real}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของก๊าซร้อนจริง	$Btu/ft^2{}^{\circ}C hr$
$h_{gy,total}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของก๊าซร้อนรวม	$Btu/ft^2{}^{\circ}C hr$
h_y	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	$W/m^2{}^{\circ}C$
ΔH_c^0	ความร้อนของการเผาไหม้	$kJ/kmol$
ΔH_f^0	ความร้อนของการเกิดขึ้นของสาร	$kJ/kmol$
H_0	เอนทาลปีที่สภาวะเริ่มต้น	kJ/kg
ΔH_y^0	ความร้อนของปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน	$kJ/kmol$
HHV	ค่าความร้อนสูงของเชื้อเพลิง	MJ/Nm^3
k	ค่าการนำความร้อนของตัวกลาง	$W/m{}^{\circ}C$
LH	ค่าความร้อนแฝงของวัตถุรับความร้อน	kJ/kg

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	ปริมาณของวัสดุรับความร้อน	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}_{co}	ปริมาณความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	MJ/hr
\dot{Q}_{un}	ปริมาณความร้อนสูญเสียอื่นๆ	MJ/hr
\dot{Q}_{useful}	ปริมาณความร้อนยังผล	MJ/hr
\dot{Q}_{input}	ปริมาณความร้อนป้อนเข้า	MJ/hr

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
\dot{Q}_{total}	อัตราการถ่ายเทความร้อนรวม	W
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	อุณหภูมิอากาศอุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$
$T_{m,in}$	อุณหภูมิวัดรับความร้อนเข้า	$^{\circ}\text{C}$
$T_{m,out}$	อุณหภูมิวัดรับความร้อนออก	$^{\circ}\text{C}$
T_{flue}	อุณหภูมิก๊าซไอเสีย	$^{\circ}\text{C}$
T_y	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	-
$\eta_{th,fumace}$	ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอม	-
ϵ	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน	-
ϵ_c	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	-
ϵ_g	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีรวมของก๊าซ	-
ϵ_w	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำ	-

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบันมีการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว จึงมีการใช้พลังงานมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งถือได้ว่าแหล่งพลังงานเป็นกลไกที่สำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศพลังงานที่ใช้ภายในประเทศนั้นมีทั้งส่วนที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ และส่วนที่ผลิตภายในประเทศ ประเทศไทยมีแหล่งทรัพยากรตามธรรมชาติอยู่มากมาย ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานใช้ในประเทศได้ การใช้เชื้อเพลิงที่มีในประเทศนับว่าเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ตามธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุด และยังประหยัดค่าใช้จ่ายในการนำเข้ามาเพื่อผลิตจากต่างประเทศ

ขณะนี้ราคาเชื้อเพลิงสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อมอย่างยิ่ง จึงมีความสนใจที่จะเปลี่ยนไปใช้เชื้อเพลิงที่มีราคาถูกและส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยที่สุด ก๊าซธรรมชาติก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะมีแหล่งขุดเจาะภายในประเทศ อีกทั้งการใช้งานก็สะดวกเนื่องจากมีระบบท่อก๊าซผ่านโรงงาน และราคาก๊าซธรรมชาติก็ยิ่งถูกกว่าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมอื่นๆ ในด้านคุณภาพก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่นำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ และมีความปลอดภัยเนื่องจากก๊าซธรรมชาติเบากว่าอากาศเมื่อเกิดการรั่วจะไม่สะสมบนพื้น ด้วยคุณประโยชน์ต่างๆ ก๊าซธรรมชาติจึงได้รับความสนใจและมีการเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติกันมาก

บริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ทำการผลิตหลอดทองแดงและหลอดอุมิเนียมโดยใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิดคือ ก๊าซปิโตรเลียมเหลวในเตาหลอมทองแดง และมีการใช้ก๊าซธรรมชาติในเตาพักทองแดงและกระบวนการผลิตหลอดอุมิเนียม บริษัทมีความสนใจที่จะเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในส่วนของเตาหลอมทองแดงแทนการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยทางบริษัทได้ทำการทดลองใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดงปรากฏว่าทองแดงหลอมไม่ทันตามกำลังผลิตที่ต้องการคือ 22-25 ตัน/ชั่วโมง จึงต้องกลับไปใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

งานวิจัยนี้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยร่วมระหว่างสำนักนโยบายและแผนสถาบันอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการกับบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นก๊าซธรรมชาติของระบบหลอมทองแดง โดยที่กำลังผลิตยังคงเท่าเดิม รวมถึงพิจารณาผลของการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับกรณีใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.1.2 เพื่อศึกษาแนวทางการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว เป็นก๊าซธรรมชาติ ในเตาหลอมทองแดง

1.2.2 ศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ทราบถึงการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

1.3.2 ทำการทดลองหลอมทองแดงโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ เพื่อหาการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเตาเปรียบเทียบกับกรณีใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

1.3.3 เปรียบเทียบอัตราการประหยัดเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง กับการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

1.4.1 ทำการศึกษาทฤษฎีทางด้านการเผาไหม้ เพื่อเป็นแนวทางในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นก๊าซธรรมชาติ

1.4.2 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากแหล่งต่างๆ

1.4.3 ทำการศึกษาศมการทางคณิตศาสตร์ของเตาหลอมทองแดง เพื่อศึกษาการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเตาเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

1.4.4 ดำเนินการทดลองหลอมทองแดงโดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงทำสมดุลความร้อนเพื่อหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเตาหลอมทองแดง

1.4.5 ทำการศึกษาและปรับตั้งอุปกรณ์รับความดันก๊าซในระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

1.4.6 ดำเนินการทดลองหลอมทองแดงโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ทำสมดุลความร้อนเพื่อหาอัตราการถ่ายเทความร้อนและประสิทธิภาพเตา

1.4.7 ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงและเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

1.4.8 เปรียบเทียบอัตราการประหยัดเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

1.4.9 สรุปผลการวิจัย

1.4.10 จัดพิมพ์วิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้รับความรู้จากการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดง

1.5.2 สามารถนำความรู้ทางวิศวกรรมในเรื่องของการถ่ายเทความร้อน และการเผาไหม้ไปประยุกต์ใช้กับปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรมได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่ผ่านมา

เนื่องจากงานวิจัยเรื่องการศึกษาการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดงมีขอบเขตค่อนข้างกว้าง จากการศึกษาข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางเลือกในการทำวิจัยพบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Keramida et al. [1] ทำการศึกษาวิจัยการแผ่รังสีความร้อนในเตาหลอมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงโดยใช้แบบจำลอง discrete transfer model และ six-flux radiation model โดยนำผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองทั้งสองมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองพบว่าแบบจำลองทั้งสองให้ผลการทำนายที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง อีกทั้งแบบจำลองทั้งสองยังง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน และจากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าผลของการแผ่รังสีความร้อนมีอิทธิพลต่อการถ่ายเทความร้อนในเตาหลอม และวิธีการ six-flux model ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเตาหลอมที่ใช้ก๊าซอื่น ๆ เป็นเชื้อเพลิงได้ง่ายและให้ผลการทำนายที่ถูกต้องด้วย

Shinoda et al. [2] ได้ทำการศึกษาออกแบบและสร้างหัวเผาเซรามิกส์ที่นำความร้อนหมุนเวียนสำหรับเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำกลับมาใช้ใหม่ ในการออกแบบได้คำนึงถึงควมมีเสถียรภาพของเปลวไฟ ประสิทธิภาพของหัวเผาและการปล่อยสาร NO_x ในปริมาณต่ำ โดยการพิจารณาอิทธิพลของพารามิเตอร์คือ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio, ϕ) ตัวเลข Reynolds number (Re) และรูปร่างหัวเผา พบว่า เมื่อค่า $\phi > 0.2$ และ $\text{Re} < 953$ ประสิทธิภาพของการเผาไหม้จะมีค่าเกือบ 100 % และในช่วงที่ค่า ϕ ต่ำๆ ค่า NO_x มีค่าน้อยกว่า 1 ppm จากการทดลองและการจำลองแบบเชิงตัวเลขพบว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนจะมีค่ามากที่สุดที่ค่า $\text{Re} < 100$ และค่า ϕ ประมาณ 0.1 ส่วนอัตราความร้อนหมุนเวียนจะแปรผันผกผันกับค่า Re

Papanikolaou and Wierzba [3] ได้ศึกษาถึงผลของลักษณะของหัวเผาและองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่มีผลต่อควมมีเสถียรภาพของเปลวไฟ diffusion ซึ่งจากการทดลองใช้ nozzle เป็นรูปวงกลมและวงรี และใช้ก๊าซ methane เป็นเชื้อเพลิงปฐมภูมิ โดยมีสารไฮโดรคาร์บอน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนเป็นสารเติม พบว่าผลของรูปร่างของ nozzle, องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและความเร็วของของผสมที่มีต่อขีดจำกัดที่เปลวไฟยกตัวที่มีความเร็วสูงดันออก (blowout limits) จะขึ้นอยู่กับกลไกของเปลวไฟ ไม่ว่าจะเป็นการยกตัวของเปลวไฟหรือเปลวไฟขีดขอบของหัวเผา โดยพฤติกรรมของเปลวไฟยกตัวที่ความเร็วสูงไม่ได้รับผลกระทบเนื่องจากรูปร่างของ nozzle แต่

จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ในขณะที่เดียวกันควมมีเสถียรภาพของเปลวไฟชนิดขอบขึ้นอยู่กับอิทธิพลของทั้งองค์ประกอบของเชื้อเพลิงและรูปร่างของ nozzle

Krass et al. [4] ได้ศึกษาการออกแบบหัวเผาในหลายทิศทางทางไหล เพื่อเหนี่ยวนำส่วนผสมเชื้อเพลิง พบว่าลักษณะของเปลวไฟจะเปลี่ยนแปลงตามส่วนผสมเชื้อเพลิง โดยจะแตกต่างกันในช่วงของส่วนผสมบางและส่วนผสมหนา โดยอุณหภูมิของเปลวไฟจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของเปลวไฟ

ศิริชัย เทพา และ เดชะ ต้นมีสุข [5] ได้ทำการวิเคราะห์สมรรถนะของเตาเผาเหล็ก โดยการวิเคราะห์พลังงานและอเนลบีลิตีของเตาเผาเหล็ก พบว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานและอเนลบีลิตีมีค่าประมาณ 69.5% และ 40.3% ตามลำดับ จากการศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงานพบว่าการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียกลับมาให้ความร้อนแก่น้ำมันเตา หรืออุณหภูมิที่ใช้ในการสันดาปสามารถลดการใช้พลังงานเคมีในเชื้อเพลิงลงได้ 11.1% ค่าพลังงานที่สูญเสียไปกับไอเสียลดลงประมาณ 19% และเตาเผามีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็น 70-80% ที่อัตราการไหลของเชื้อเพลิง 8.5-9 ลิตร/นาที่ และอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงเป็น 14.2

เศรษฐกร เศรษฐการุณย์ [6] ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิของเปลวไฟ ความเร็วของการเผาไหม้และอุณหภูมิก๊าซเสียที่ได้จากการเผาไหม้สำหรับสภาพแวดล้อม ตัวแปรที่ใช้ควบคุมและปรับค่าเพื่อการทดลองได้แก่ การควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงกับอากาศส่วนที่ 1 ให้คงที่และปรับอากาศส่วนที่ 2 ในการทดลองจะทดลองด้วยหัวเผา 2 แบบ คือหัวเผาแบบ premixed และหัวเผาแบบ diffusion โดยทดลองกับท่อทางออกของเปลวไฟ 3 ขนาดคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2, 89 และ 101.6 มิลลิเมตร พบว่าที่อัตราส่วนสมมูล 1.65-1.75 จะได้ค่าอุณหภูมิและความเร็วของการเผาไหม้สูงสุด ส่วนปริมาณก๊าซเสียที่ได้ในช่วงอัตราส่วนสมมูลนี้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ที่สุด สำหรับรูปแบบของหัวเผาพบว่าเมื่อใช้แบบ premixed จะได้อุณหภูมิและความเร็วการเผาไหม้สูงกว่าแบบ diffusion หลังจากการทดลองที่ท่อทางออกของเปลวไฟขนาดต่างๆพบว่าท่อทางออกของเปลวไฟขนาด 89 มิลลิเมตร จะให้อุณหภูมิและความเร็วของการเผาไหม้สูงสุด

พรชัย ศานต์สุทธิกุล และ อรรถพล ศรีประเสริฐ [7] ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ของการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้ผลผลิตเชื้อเพลิงในเตาเผาแบบหมุน พบว่าอัตราการหมุนของเตาที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 40-50 องศาทุกๆ 3 นาทีซึ่งแม้ว่าการหมุนเตาอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่เร็วกว่า แต่ก็มีปัญหาเรื่องการอุดตันของอากาศและปัญหาปริมาณก๊าซพิษที่เกิดจากการเผาไหม้สูงมากในบางเวลา

บัณฑิต พงษ์ธรรมสาร และ ปุณยศ วลัยกุล [8] ได้ใช้วิธีวิเคราะห์เตาแบบ phenomenological สำหรับเตาหลอมอลูมิเนียมสองเตาที่ทำงานร่วมกันแบบคาบ ในช่วงภาวะการปฏิบัติงานที่จำกัดเพื่อประเมินพฤติกรรมและสมรรถนะทางความร้อนของเตาหลอมอลูมิเนียม พบว่าการออกแบบระบบไม่

เหมาะสมกับระบบการผลิตของผู้ใช้งาน และประสิทธิภาพทางความร้อนค่อนข้างต่ำโดยประสิทธิภาพทางความร้อนสูงสุดคือ 68% โดยเตาทำงานที่ภาระ 300 kW สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนต่ำอาจเกิดจากการสูญเสียจากก๊าซเสียที่เพิ่มขึ้น แนวทางการปรับปรุงคือขยายขอบเขตของแต่ละเตาและการนำก๊าซเสียกลับมาใช้ใหม่

Karim et al. [9] ได้ทำการศึกษาการแพร่ของโมเลกุลก๊าซมีเทนในอากาศพบว่าที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ $16.4 \text{ mm}^2/\text{s}$ จะให้ผลที่สอดคล้องกันทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ ซึ่งการแพร่เกิดเนื่องจากโมเลกุลอย่างเดียวไม่มีผลของการพา การเปลี่ยนแปลงการแพร่แบบหมุนวนขึ้นอยู่กัเวลาของการแพร่จากผลการทดลองพบว่าถ้าเวลาของการแพร่น้อยจะได้ค่าการแพร่แบบหมุนวนมาก ถ้าเวลาของการแพร่มากขึ้นการแพร่แบบหมุนวนจะลดลง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 เชื้อเพลิงก๊าซ

เชื้อเพลิงก๊าซเป็นรูปแบบที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันทั้งในธุรกิจ อุตสาหกรรม และบ้านเรือน ทั้งนี้เพราะความสะดวกและสะอาด ที่มาของก๊าซเชื้อเพลิงอาจได้จากใต้พิภพโดยตรงในรูปของก๊าซธรรมชาติ หรือ จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมในรูปของก๊าซปิโตรเลียมเหลว ในต่างประเทศมีอุตสาหกรรมการผลิตเชื้อเพลิงก๊าซจากถ่านหิน หรือ จากเตาถลุงเหล็ก ที่มาอีกแหล่งหนึ่งคือจากการเผาเปื่อยของขยะและชีวมวลซึ่งทำให้ได้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) อย่างไรก็ตามก็กล่าวได้ว่าเชื้อเพลิงก๊าซที่มีความสำคัญเชิงอุตสาหกรรมและเชิงพาณิชย์ในประเทศไทย คือ ก๊าซธรรมชาติ และก๊าซปิโตรเลียมเหลว ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นไฮโดรคาร์บอนผสมหลายชนิด

3.1.1 ก๊าซธรรมชาติ

ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงจากซากดึกดำบรรพ์ชนิดหนึ่ง มีต้นกำเนิดจากซากพืชและสัตว์ที่ตายทับถมกันบริเวณริมฝั่งหรือทะเลแล้วถูกทับด้วยดินและโคลนเลนจมลึกลงไปตามเวลา ภายใต้อุณหภูมิความดัน และการเคลื่อนตัวของชั้นหินเป็นเวลาหลายล้านปี สารอินทรีย์ของซากสิ่งมีชีวิตจะกลายเป็นของเหลวและก๊าซ ถูกพัดพาโดยกระแส น้ำใต้ดินเคลื่อนที่ไปสะสมตัวกันและกักเก็บไว้ภายใต้โครงสร้าง หรือรอยเลื่อนของชั้นหินกลายเป็นแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมหรือแหล่งก๊าซธรรมชาติในที่สุด ส่วนประกอบโดยทั่วไปของก๊าซธรรมชาติ คือ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) หรือพาราฟินิก ไฮโดรคาร์บอน (paraffinic hydrocarbons) โดยเฉพาะ มีเทน (methane, CH_4) และอีเทน (ethane, C_2H_6) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้มีก๊าซเฉื่อย ที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ COS_2 , H_2S และก๊าซเฉื่อย (inert and permanent gases) ได้แก่ He, Ar, N_2 , CO_2 และความชื้น ซึ่งมักมีเกลือของโซเดียมเฉื่อย

ในแหล่งกักเก็บ อาจพบก๊าซธรรมชาติอยู่ร่วมกับแหล่งน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งเรียกว่า ก๊าซอยู่ร่วมกับน้ำมัน (associated gas) ส่วนแหล่งธรรมชาติที่พบเดี่ยวๆ อาจเป็นก๊าซเปียกที่มีไฮโดรคาร์บอนหนักแขวนลอยอยู่ในก๊าซทำให้เป็นสภาพก๊าซเปียก หรือพบเป็นก๊าซธรรมชาติแห้งที่มีไฮโดรคาร์บอนเบาคือมีเทน และอีเทนเป็นส่วนใหญ่

ในก๊าซธรรมชาติเราจะไม่พบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbons หรือ naphthenic hydrocarbons) อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbons) หรือไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวชนิดวงแหวน (naphthenic ring hydrocarbons) ยกเว้น ในก๊าซที่อยู่ร่วมกับ

น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติที่พบบนบกมีทั้งที่เป็นก๊าซอยู่ร่วมกับน้ำมันที่แหล่งสิริกิติ์ อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร และที่เป็นก๊าซแห้งที่แหล่งน้ำพอง จังหวัดขอนแก่น

เนื่องจากก๊าซธรรมชาติที่พบในแหล่งต่างๆมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ก่อนจะนำมาใช้งาน จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการแยกก๊าซ (natural gas processing หรือ natural gas separation) เพื่อทำความสะอาดก๊าซ เช่น กำจัดน้ำ ก๊าซที่เป็นกรด ก๊าซเจือปน และแยกไฮโดรคาร์บอนหนักออกจากมีเทน เราอาจยอมให้มีมีเทนและโพรเพนติดอยู่ในก๊าซธรรมชาติได้บ้าง แต่ตัวอื่นที่หนักกว่าจะต้องทำการแยกออกเพื่อป้องกันปัญหาในการใช้และการขนส่ง การซื้อขายนั้นจะคิดราคาตามค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเช่น เป็น 100 บาทต่อล้านบีทียู ดังนั้นค่าความร้อนของก๊าซจึงมีความหมายมาก ส่วนค่ากำหนดอื่นๆ จัดเป็นส่วนประกอบที่จะช่วยให้เกิดความมั่นใจในความสะดวกและปลอดภัย การวัดปริมาณมักนิยามวัดเป็น standard cubic feet (scf) ที่ 60°F และ 14.7 psia หรือเป็น normal cubic meters (Nm³) ที่ 15.6°C และ 1 bar คุณสมบัติของมีเทนและไฮโดรคาร์บอนเบาตัวอื่นๆ แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของมีเทนและไฮโดรคาร์บอนเบาตัวอื่นๆ [11]

	C _n	Boiling point (°F)	Specific gravity (-)	Heating value (Btu/scf)
Methane	1	-258.7	0.30	1014
Ethane	2	-128.5	0.356	1788
Propane	3	-43.7	0.508	2569
Iso-Butane	4	10.9	0.563	3360
n-Butane	4	31.1	0.584	3382

ตัวอย่างข้อกำหนดคุณภาพของก๊าซธรรมชาติที่การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทยผลิตได้จากโรงแยกก๊าซโรงที่หนึ่งเป็นไปตามตารางที่ 3.2

ตาราง 3.2 คุณสมบัติของก๊าซธรรมชาติ จาก ปตท. [11]

องค์ประกอบ	Treated gas (Mole %)
N ₂	1.96
CO ₂	0.45
CH ₄	95.72
C ₂ H ₆	1.85
C ₃ H ₈	0.02
Average Molecular Weight	16.7
LHV, kcal/Nm ³	8480
LHV, Btu/scf	952
H ₂ S, ppm vol	5
S other than H ₂ S, ppm	10
Conditions at PTT Battery Limit	
Pressure, kg/cm ² (min)	40
Temperature, °C (max)	49

ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด และมีกำมะถันต่ำมาก ทำให้ปราศจากปัญหามลภาวะเมื่อนำมาใช้ โดยนิยมใช้มากในการผลิตไฟฟ้า เพราะมีการพัฒนาเครื่อง gas turbine ที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้สามารถผลิตไฟฟ้าได้มากกว่าเชื้อเพลิงอื่นที่มีพลังงานเท่ากัน โดยเฉพาะเมื่อใช้เทคโนโลยี co-generation หรือ combined cycle

ก๊าซธรรมชาติจะถูกขนส่งตามท่อในรูปของก๊าซภายใต้ความดันสูง จึงไม่เหมาะสำหรับการส่งไกลๆ (ถ้ามีการขนส่งตามท่อเป็นระยะทางไกลต้องมีการปรับลดหรือเพิ่มความดันให้เหมาะสมกับระยะทาง) ปัจจุบันมีการส่งก๊าซธรรมชาติในรูปของเหลวโดยการทำก๊าซให้เย็นลงถึง -160°C จะได้ของเหลวที่เรียกว่า Liquefied Natural Gas (LNG) ซึ่งอาจขนส่งทางเรือไปที่ไกล ๆ ได้ เมื่อไปถึงปลายทางก่อนใช้ก็จะทำกลับให้เป็นก๊าซใหม่

ในบางประเทศรวมทั้งประเทศไทยด้วย ได้นำก๊าซธรรมชาติไปใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์แทนน้ำมัน ในการใช้นี้ต้องอัดก๊าซใส่ถังภายใต้ความดันสูง เพื่อนำติดไปกับรถซึ่งเราเรียกว่า Compressed Natural Gas (CNG) การใช้ CNG จะทำให้ได้การเผาไหม้ที่สะอาดซึ่งเป็นการลดมล

พิษในอากาศ แต่ข้อเสียก็คือถึงก๊าซต้องทนความดันสูงจึงหนัก จุได้ไม่มากนัก จึงวิ่งไปได้ไม่ไกล อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการสร้างสถานีก๊าซก็สูง

ก๊าซธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการแล้ว ซึ่งมีค่าความร้อนและคุณสมบัติอื่นตามที่กำหนดเป็น ก๊าซธรรมชาติที่นำไปจำหน่ายได้ เรียกว่า ก๊าซธรรมชาติทางการค้า (commercial natural gas) ตัวอย่างเช่น ก๊าซธรรมชาติทางการค้าที่จำหน่ายในประเทศประกอบด้วย มีเทน 86% อีเทน 7% คาร์บอนไดออกไซด์ 5% และไนโตรเจน 2% เป็นต้น คุณสมบัติหลักที่ควบคุม คือ ค่าความร้อนรวม อยู่ที่ประมาณ 1,000 บีทียู/ลูกบาศก์ฟุต (37,250 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร) ส่วนปริมาณอีเทนนั้น ถ้ามี อุตสาหกรรมการปิโตรเคมีรองรับ จะถูกแยกออกเพื่อนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อผลิตเอทิลีน

3.1.2 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นก๊าซที่บรรจุอยู่ในถังขนาดต่างๆ ที่สามารถจัดส่งไปยังผู้ใช้ได้สะดวก ซึ่งเรียกก๊าซชนิดนี้ว่า Liquefied Petroleum Gases หรือ แอลพีจี (LPG) ประกอบไปด้วย ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวสองชนิดหลัก คือ โพรเพน (propane, C_3H_8) และบิวเทน (butane, C_4H_{10}) เป็นส่วนใหญ่ในอัตราส่วนต่างๆ กัน เช่น โพรเพน 65% และบิวเทน 35% เนื่องจากก๊าซไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่โพรเพนขึ้นไปสามารถกลายเป็นของเหลวได้ที่บรรยากาศปกติ ดังนั้นขณะที่อยู่ในถังจึงเป็นของเหลว เมื่อเปิดวาล์ว ส่วนที่เป็นไอจะไหลออกมาให้ใช้งาน และส่วนที่เป็นของเหลวจะระเหยออกมาตลอดเวลา

LPG ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงทั้งในครัวเรือน และในอุตสาหกรรม โดยบรรจุเป็นของเหลวใส่ถังที่ทนความดันเพื่อขนถ่ายง่าย การเปลี่ยนจากก๊าซมาเป็นของเหลวทำให้ปริมาตรลดลงอย่างมาก (240 เท่าสำหรับบิวเทน และ 270 เท่าสำหรับโพรเพน) ถึงจึงบรรจุก๊าซเหลวไว้ได้มาก ทำให้ใช้ได้นานพอสมควร นอกจากนี้ยังนิยมใช้แทนน้ำมันเบนซินในรถยนต์เพราะราคาถูก มีค่าออกเทนสูงไม่มีสารตะกั่วจึงทำให้การเผาไหม้ที่สะอาด ก๊าซดังกล่าวนี้ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมในโรงกลั่นน้ำมัน หรือจากการกลั่นก๊าซในโรงแยกก๊าซธรรมชาติ

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อกำหนดคุณสมบัติของ LPG ซึ่งจะเน้นความดันไอไม่ให้สูงเกินไป เพื่อความปลอดภัยในการเก็บและการขนส่ง และการระเหยเป็นไอ เพื่อให้มั่นใจว่าเวลาใช้งานของเหลวจะกลายเป็นไอได้เพียงพอ นอกจากนี้มีข้อกำหนดเรื่องปริมาณสารตกค้างที่ไม่สามารถระเหยเป็นไอให้ค้างอยู่ในถังน้อยที่สุด และต้องจำกัดปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนที่หนักกว่าบิวเทนไม่ให้มีมากเกินไปเช่นกัน ในด้านการกักตุนก็มีข้อกำหนดการทดสอบด้านการกักตุนทองแดง เพราะมีการใช้ท่อทองแดงกับ LPG กันอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ก็ต้องจำกัดปริมาณกำมะถันไว้ด้วย โดยที่ตัว LPG เองไม่มีสีและกลิ่น ถ้ารั่วออกมาจะไม่มีใครรู้ และจะเป็นอันตรายเกิดไฟไหม้และ

ระเบิดได้ จึงมีข้อกำหนดให้เติมสารมีกลิ่น (Ethyl Mercaptan) ซึ่งระเหยออกไปพร้อมกับ LPG ได้เป็นการเตือนภัย

ตารางที่ 3.3 ข้อกำหนดคุณภาพของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) [11]

คุณสมบัติ	หน่วย	วิธีทดสอบ ASTM-D	ขีดจำกัด	
			ไทยออยล์	กระทรวงพาณิชย์
กลิ่น			Easily Detectable	
ความดันไอที่ 37.8 °C	Psig	1267	สูงสุด 100 ต่ำสุด 60	สูงสุด 192
จุดเดือด 95%vol ที่ 760 mmHg	°C	1837	สูงสุด 2.2	สูงสุด 2.2
ส่วนเหลือหลังจากการระเหย	ml/100ml	2158	สูงสุด 0.05	สูงสุด 0.05
Oil Stain	-	2158	-	
ความถ่วงจำเพาะที่ 15.6 °C	-	165	-	-
Pentane และไฮโดรคาร์บอนที่หนักกว่า	%vol	2163	สูงสุด 2.0	สูงสุด 2.0
Volatile Sulphur ที่ 15.6 °C 760 mmHg	mg/m ³	3246	สูงสุด 343	สูงสุด 343
Copper Strip Corrosion	-	1838	สูงสุด No.1	สูงสุด No.1
Free Water , Entrained	-	-	ไม่มี	

3.1.3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของก๊าซเชื้อเพลิง

การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างก๊าซธรรมชาติ และก๊าซปิโตรเลียมเหลวแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างก๊าซธรรมชาติ และก๊าซปิโตรเลียมเหลว

ข้อเปรียบเทียบ	ก๊าซธรรมชาติ	ก๊าซปิโตรเลียมเหลว
1. ความปลอดภัย	เบากว่าอากาศ เมื่อรั่วไหลจะลอยขึ้นสู่ที่สูงกระจายไปในอากาศ	ปลอดภัยน้อย เนื่องจากหนักกว่าอากาศเมื่อรั่วไหลจะสะสมอยู่ระดับพื้น
2. ความพร้อมในการนำมาใช้งาน	สถานะเป็นก๊าซนำไปใช้ได้เลย	สถานะเป็นของเหลวต้องทำให้เป็นก๊าซก่อนนำไปใช้งาน
3. ประสิทธิภาพของการเผาไหม้	เผาไหม้ได้สมบูรณ์ สถานะเป็นก๊าซสามารถผสมกับอากาศได้ดีกว่า	เผาไหม้ได้สมบูรณ์กว่าน้ำมันเตา ผสมกับอากาศได้ดีกว่าน้ำมันเตา
4. ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการเผาไหม้	เผาไหม้ได้สมบูรณ์กว่า สะอาด ปราศจากเขม่า ไม่เกิดมลภาวะ	เผาไหม้ได้สมบูรณ์ สะอาด ปราศจากเขม่า ไม่เกิดมลภาวะ

ตารางที่ 3.4 (ต่อ) การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียระหว่างก๊าซธรรมชาติ และก๊าซปิโตรเลียมเหลว

ข้อเปรียบเทียบ	ก๊าซธรรมชาติ	ก๊าซปิโตรเลียมเหลว
5. คุณลักษณะของเชื้อเพลิง	ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เผาไหม้ได้สมบูรณ์ ไม่เกิดผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ เป็นการเผาไหม้แบบ Direct fired ปราศจากกำมะถัน	ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น แต่โดยทั่วไปจะเติมสารที่มีสี และกลิ่นเพื่อความปลอดภัย
6. คุณลักษณะทางเคมี	มีกำมะถันน้อย และไม่มีวานาเดียม ทำให้ไม่เกิดการกัดกร่อน	มีกำมะถันน้อยแต่เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์
7. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	<ul style="list-style-type: none"> - ขนส่งโดยระบบท่อเข้าสู่โรงงาน - ไม่ต้องมีถังเก็บเชื้อเพลิง - ไม่ต้องมีการสำรองเชื้อเพลิง - ไม่ต้องเสียเนื้อที่สำหรับเก็บเชื้อเพลิง - ต้องมีการสร้างsubstation 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีถังเก็บเพื่อสำรองก๊าซปิโตรเลียมเหลว - ต้องเสียเนื้อที่ในการสร้างถังเก็บและบริเวณโดยรอบ - ต้องสั่งซื้อเชื้อเพลิงล่วงหน้า

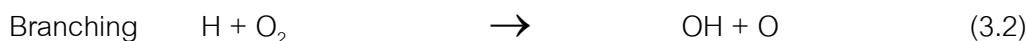
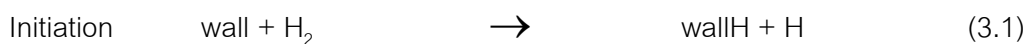
3.2 ปฏิริยาเคมีของการเผาไหม้

ปฏิริยาเคมีการเผาไหม้ หมายถึงปฏิริยาที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและมีความเร็วมาก โดยออกซิเจนซึ่งโดยทั่วไปใช้อากาศจะทำให้โมเลกุลของเชื้อเพลิงแตกตัว

ปฏิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิริยาลูกโซ่ (chain reaction) ไม่ใช่ปฏิริยาระหว่างโมเลกุลโดยตรง แต่จะเริ่มต้นด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลขั้นกลางอื่นๆ (intermediate radicals) ซึ่งก็จะทำปฏิริยาต่อลูกโซ่ (chain propagation) ทั้งที่เกิดขึ้นพร้อมๆกัน (simultaneous) และที่เกิดเป็นลำดับก่อนหลังกัน (consecutive) ทำให้เกิดทั้งผลผลิต และอนุมูลอิสระอื่นๆ (free radicals) อีกมาก สุดท้ายคือปฏิริยาที่ให้ผลผลิตสุดท้ายและอนุมูลที่ไม่ว่องไว ตามด้วยการสิ้นสุดปฏิริยาลูกโซ่ (chain termination)

3.2.1 ปฏิริยาเผาไหม้ของไฮโดรเจน

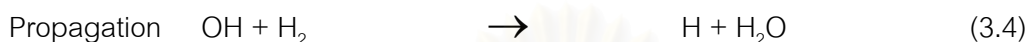
เปลวไฟของไฮโดรเจนกับอากาศหรือออกซิเจนจะไม่มีแสงสี แต่จะมีการปล่อยพลังงานในช่วงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งเกิดจากอนุมูลอิสระ OH ได้อุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ยเบตริกสูงสุดประมาณ 3,100K และความเร็วของเปลวไฟก็สูงสุดด้วยเช่นกัน ในผลผลิตมีน้ำประมาณ 57% ส่วนที่เหลือประมาณหนึ่งในสี่อยู่ในรูปอนุมูลอิสระ ปฏิริยาเริ่มต้นด้วยการแยกตัวของไฮโดรเจน โดยชนกับผนังกลายเป็นอนุมูลอิสระไฮโดรเจน ซึ่งจะไปทำปฏิริยากับออกซิเจน เกิดอนุมูลอิสระ และปฏิริยาลูกโซ่อื่นๆ ซึ่งปฏิริยาที่สำคัญมีดังนี้



$$k = 2.00 \times 10^{14} \exp(-8,455/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

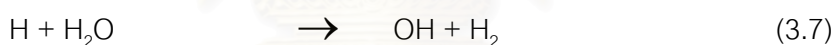
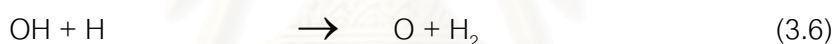
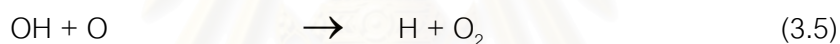


$$k = 2.126 \times 10^{14} \exp(-6,860/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

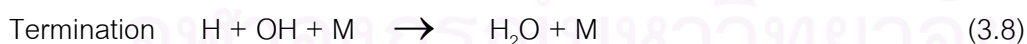


$$k = 5.94 \times 10^{14} \exp(-3,880/T) \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

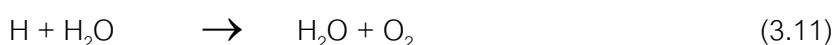
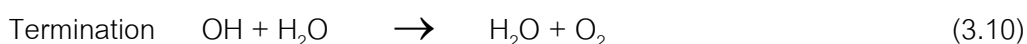
ดังนั้นถ้าทั้งสามสมการเกิดขึ้นตามลำดับ จากอนุมูลอิสระไฮโดรเจนการเกิดอนุมูลจะได้ อนุมูลอิสระไฮโดรเจนถึงสามอนุมูลที่อุณหภูมิต่ำ สมการ (3.2) – (3.4) มีอัตราการเกิดเร็วต่างกัน แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าคงที่ของปฏิกิริยาจะเข้าใกล้กันมากขึ้นอัตราเร็วจึงไม่ต่างกันมากนัก ในเปลวไฟ หนึ่งๆปฏิกิริยา (3.2) – (3.4) สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับดังนี้



ทำให้เกิดสภาวะกึ่งสมดุลขึ้นในขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ประมาณสามในสี่ แต่อนุมูลอิสระและอะตอมต่างๆ ยังมีเอนทัลปีอยู่ พลังงานนี้ถูกใช้ในปฏิกิริยาการรวมตัวอันดับสาม (third-order) ซึ่งใช้เวลาเกิดมากกว่าอันดับสอง เปลวไฟของก๊าซมีเชื้อเพลิงเข้มข้นจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของอนุมูล H เป็นหลัก คือ

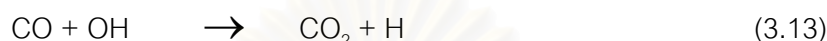


ส่วนก๊าซที่มีเชื้อเพลิงเจือจางจะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวโดยอนุมูล H_2O เป็นหลัก คือ

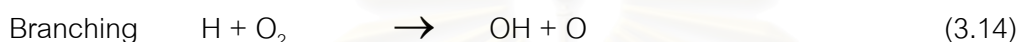


3.2.2 ปฏิริยาการเผาไหม้ของคาร์บอนมอนอกไซด์

ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีสารที่มีไฮโดรเจนเจือปนอยู่เสมอ เช่น ในถังก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีก๊าซมีเทนปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ดังนั้นในการออกซิไดซ์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงมีอนุมูลอิสระ OH และ HO₂ เข้ามามีบทบาทสำคัญในปฏิริยาลูกโซ่ดังต่อไปนี้



เกิดต่อเนื่องด้วยปฏิริยา



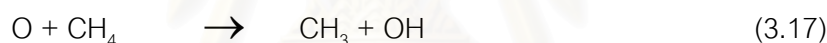
หรือ



และในที่สุด



นอกจากนี้ยังเกิดปฏิริยาเพิ่มเติมเนื่องจากก๊าซมีเทนที่เจือปน คือ

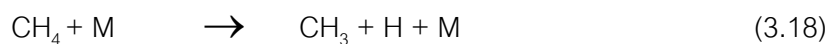


ปฏิริยาเหล่านี้ถึงแม้จะเริ่มต้นจากอนุมูลจำนวนน้อยแต่มีผลสำคัญ เนื่องจากอนุมูลหมุนเวียนกลับมาเกิดปฏิริยาได้อีกดังแสดงในสมการที่ (3.12) และ (3.13)

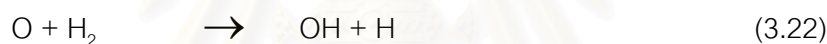
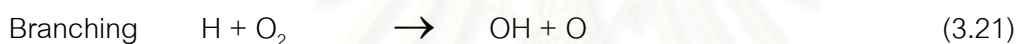
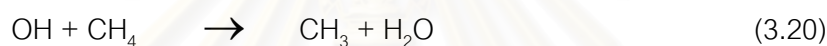
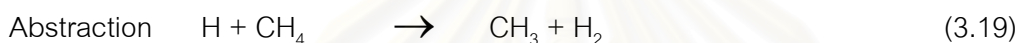
สมการที่ (3.12), (3.13) และ (3.16) มีความสำคัญที่สุดในการออกซิไดซ์ก๊าซ CO ไปเป็น CO₂ และเป็นปฏิริยาสำคัญในการออกซิไดซ์เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนและไฮโดรคาร์บอนด้วย โดยเฉพาะสมการที่ (3.13) มีความสำคัญที่สุด นั้นหมายความว่าไม่สามารถเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นได้โดยตรงที่ไม่ผ่านขั้นตอนการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ก่อน ดังนั้นถ้ามีสถานะที่ทำให้อนุมูลอิสระทำปฏิริยากับ CO ได้น้อยลง ก็จะมีผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง และเกิดการปลดปล่อยก๊าซ CO ออกสู่บรรยากาศ

เนื่องจากสมการที่ (3.13) เกิดได้ช้า เมื่อเทียบกับการที่อนุมูลอิสระ OH จะดึงไฮโดรเจนออกจากไฮโดรคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 1,500 K ค่าคงที่ของปฏิริยาระหว่างอนุมูล OH และ CH₄ เร็วกว่าค่าคงที่ของปฏิริยาระหว่างอนุมูล OH และ CO 9 เท่า ดังนั้นเมื่อต้องมีการแข่งขันกัน จะทำให้มี CO เหลืออยู่รอบๆ เรายังมีเชื้อเพลิงเหลืออยู่ในระบบ และภายใต้สภาวะเชื้อเพลิงเข้มข้น จะได้ CO เป็นผลผลิตสุดท้ายเสมอ

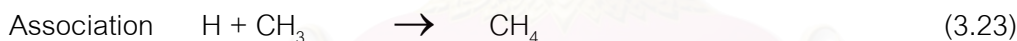
สำหรับโมเลกุลอย่างง่ายของเชื้อเพลิง (ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่) เช่น มีเทน ปฏิกิริยาเริ่มต้นจากการแตกตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) ก่อน ซึ่งเป็น ปฏิกิริยาดูดความร้อน ดังสมการ



จากปฏิกิริยาได้อนุมูลอิสระ คือ เมทิล (CH_3) และไฮโดรเจน (H) ต้องมีเวลาเพียงพอสำหรับช่วงเริ่มต้นปฏิกิริยานี้เพื่อที่จะผลิตอนุมูลอิสระจำนวนหรือความเข้มข้นมากพอที่จะไปทำให้เริ่มเกิดกระบวนการเผาไหม้อย่างแท้จริงได้ ช่วงเวลานี้เรียกว่า ช่วงเหนี่ยวนำ (induction delay) จากนั้นอนุมูลอิสระโดยเฉพาะ ไฮโดรเจน ซึ่งว่องไวมากกว่า จะไปทำปฏิกิริยาต่างๆ รวมทั้ง abstraction, branching และ association ดังสมการ



ปฏิกิริยา Association นี้เป็นปฏิกิริยาที่ควบคุมอัตราเร็วโดยรวมของปฏิกิริยาการออกซิไดซ์

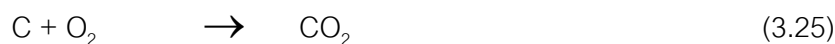


โอกาสที่อนุมูลอิสระตั้งแต่สองอนุมูลขึ้นไปจะมาชนกัน น้อยกว่าโอกาสที่อนุมูลจะไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ ปฏิกิริยานี้จึงช้ากว่า แต่เป็นปฏิกิริยาหลักสำหรับการรวมตัวของอนุมูลที่อุณหภูมิสูง

ถ้าเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนอื่นที่เกิดการเผาไหม้ในวัฏภาคก๊าซ มีปฏิกิริยาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องมากมาย ทั้งที่เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (ซึ่งเกิดต่อเนื่อง) และปฏิกิริยาอื่นๆ (ซึ่งเกิดเดี่ยวๆ ไปพร้อมกัน) เส้นทางของการเกิดปฏิกิริยาจึงมีความซับซ้อนมาก

กลไกและไดนามิกส์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ แม้แต่ของโมเลกุลเล็กๆ มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นไปกว่านั้น ที่อุณหภูมิต้องพิจารณาสถานะที่ผ่นของอุปกรณ์ ซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ด้วยและเนื่องจากกระบวนการเผาไหม้มีเทอร์โมไดนามิกส์กลศาสตร์ของไหล และการถ่ายโอนความร้อนเข้ามามีส่วนร่วมสำคัญด้วย

ถ้าพิจารณาในภาพรวมแล้ว ไม่ว่าจะเชื้อเพลิงนั้นจะมีโครงสร้างโมเลกุลและสถานะใดเมื่อเกิดการเผาไหม้จนสมบูรณ์แล้ว สามารถเขียนปฏิกิริยารวมของการเผาไหม้ได้ ดังนี้
ถ้ามีการเผาไหม้สมบูรณ์ จะเกิดปฏิกิริยา



ถ้ามีการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (บางส่วน) จะเกิดปฏิกิริยา



ได้ คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำ สำหรับเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันอยู่ด้วยจะเกิดปฏิกิริยา

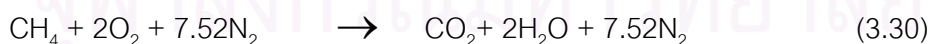
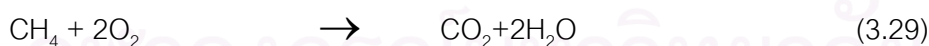


ได้ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ถ้าเชื้อเพลิงมีไนโตรเจน จะเกิดไนโตรเจนออกไซด์ และถ้าใช้อากาศ ไนโตรเจนจากอากาศส่วนหนึ่ง ก็จะกลายเป็นไนโตรเจนออกไซด์ด้วย แต่เนื่องจากปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ไนโตรเจนใช้พลังงานสูงมาก จึงเกิดปฏิกิริยาน้อยเนื่องจากปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ในไอเสียมีค่าน้อย อยู่ในระดับต่ำกว่าพันส่วนในล้านส่วน ในการพิจารณาทั่วไปจะไม่นำมาคิดยกเว้นในกรณีที่ต้องการคำนวณผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อม

3.2.3 การเผาไหม้ของ NG และ LPG

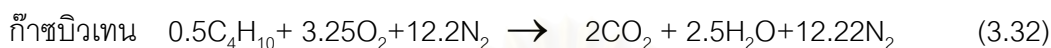
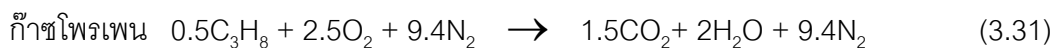
สารที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของ NG และ LPG จะประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งในอากาศประกอบด้วยก๊าซออกซิเจนประมาณ 21% และก๊าซไนโตรเจนประมาณ 79% หรือสัดส่วน $\text{O}_2:\text{N}_2 = 1:3.76$ โดยปริมาตร ดังนั้นในกรณีของก๊าซมีเทนสมการเผาไหม้สามารถเขียนได้ดังนี้



อัตราการเผาไหม้ของอากาศที่ใช้ในการสันดาปหรือการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เทียบกับปริมาณของก๊าซ ที่เรียกว่า Stoichiometric ratio จากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของก๊าซมีเทน 1 ส่วนจะใช้ก๊าซออกซิเจน 2 ส่วน ซึ่งก๊าซออกซิเจนจะถูกดึงจากอากาศ 9.52 ส่วน (ออกซิเจน 2 ส่วนและไนโตรเจน 7.52 ส่วน) ดังนั้น Stoichiometric ratio ของก๊าซมีเทนจะเท่ากับ 9.52 Vol air / Vol fuel แต่ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้พอดี โดยทั่วไปจึงพยายามควบคุม

คุมให้ปริมาณอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงมากกว่า Stoichiometric ratio เล็กน้อยเพื่อให้มั่นใจว่าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมบูรณ์

เมื่อสมมุติให้ก๊าซ LPG มีส่วนประกอบของก๊าซในอัตราส่วนโพรเพนและบิวเทน 50:50 การเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะต้องใช้ปริมาณอากาศดังนี้



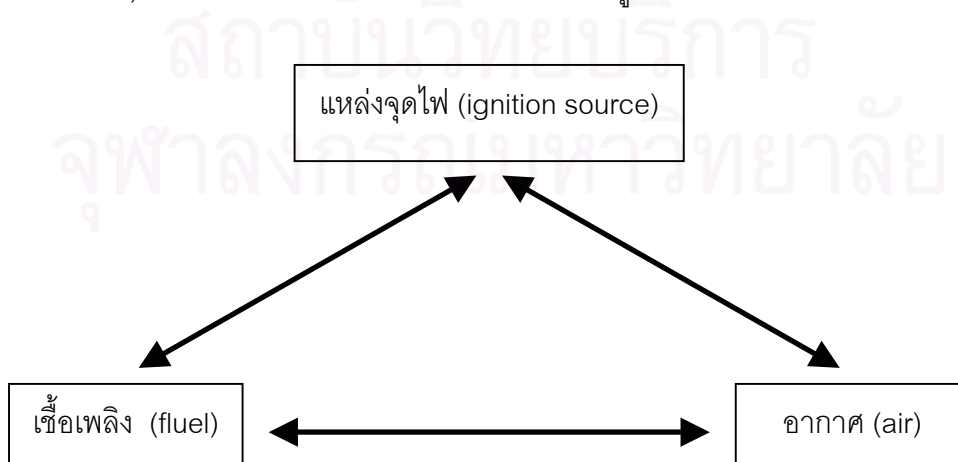
จึงได้ปริมาณของอากาศที่ใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของก๊าซ LPG หรือ Stoichiometric ratio เท่ากับ $2.5+9.4+3.25+12.22= 27.37 \text{ Vol air / Vol gas}$

จะเห็นได้ว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของ NG จะน้อยกว่า LPG แต่ในขณะเดียวกันค่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากก๊าซ LPG จะมากกว่าก๊าซ NG ดังนั้นในการที่นำก๊าซ NG มาทดแทน LPG โดยให้อัตราของพลังงานความร้อนเท่าเดิมจะต้องเพิ่มปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ผ่านหัวฉีดหรือรูของหัวเผา โดยเพิ่มขนาดของหัวฉีดให้ใหญ่ขึ้น และในขณะเดียวกันต้องปรับอุปกรณ์ปรับความดันเพื่อเพิ่มอากาศให้สัมพันธ์กับปริมาณก๊าซ NG ที่ไหลผ่านสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

3.3 สภาวะที่จำเป็นในการเริ่มเกิดปฏิกิริยา

3.3.1 องค์ประกอบที่จำเป็น

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อมีตัวทำปฏิกิริยา และสภาวะที่เหมาะสม ปฏิกิริยาการเผาไหม้คือ ปฏิกิริยาออกซิไดซ์เชื้อเพลิงให้กลายเป็นออกไซด์ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดต่อเนื่องจนสมบูรณ์ สำหรับการเผาไหม้ทั่วไป ตัวทำปฏิกิริยา คือ เชื้อเพลิง (ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่) และอากาศ ซึ่งจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้ต่อเมื่อมีสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ แหล่งให้ความร้อนเพื่อจุดไฟ (ignition source) ดังนั้นอาจแสดงองค์ประกอบทั้งสามได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 องค์ประกอบที่จำเป็นในการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ [12]

ปฏิกิริยาการเผาไหม้แบบลูกโซ่ เริ่มด้วยการแตกตัวของโมเลกุลของเชื้อเพลิงเป็นอนุมูลอิสระ ก่อน แหล่งจุดไฟจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะจะทำให้พลังงานส่วนแรกแก่ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำให้เชื้อเพลิงเกิดการแตกตัวเป็น อนุมูลอิสระ จำนวนมากพอที่จะไปทำให้เริ่มเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการเผาไหม้ เมื่อเริ่มเกิดการเผาไหม้แล้วก็ไม่ต้องใช้แหล่งจุดไฟอีก เพราะพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนต้นมากเกินพอที่จะไปทำให้เชื้อเพลิงที่เหลืออยู่เกิดการแตกตัวและการเผาไหม้ต่อเนื่องกันไปได้เองจนสมบูรณ์ (spontaneous reaction)

3.3.2 พลังงานการจุดไฟและอุณหภูมิการจุดไฟ

พลังงานส่วนแรกที่ต้องให้เพื่อเริ่มต้นเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่นี้ เรียกว่า พลังงานการจุดไฟ (ignition energy) ซึ่งอาจไม่ใช้วิธีวัดโดยตรง แต่มักจะวัดอุณหภูมิการจุดไฟ (ignition temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศที่ต่ำที่สุดที่จะจุดติดไฟได้เอง อุณหภูมิการจุดไฟจึงเป็นเครื่องบ่งชี้ระดับพลังงานที่ต้องใช้แก่ส่วนผสมของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ซึ่งมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ ดังนั้นเราสามารถทำให้ส่วนผสมติดไฟได้ โดยให้พลังงานการจุดไฟในบริเวณเล็กๆเพียงบริเวณเดียวก็เพียงพอแล้ว ยกตัวอย่างเช่นการใช้ไม้ขีดไฟจุดหัวเตาแก๊สหุงต้มหรือการใช้ประกายไฟจากหัวเทียนจุดระเบิดส่วนผสมในกระบอกสูบของเครื่องยนต์ อุณหภูมิการจุดไฟแสดงถึงความยากง่ายที่เชื้อเพลิงจะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งหมายถึงความปลอดภัยในการใช้งานด้วย ประโยชน์ของค่านี้อุตสาหกรรม คือ ใช้เป็นอุณหภูมิจำกัดในการอุ่นเตาก่อนจุดหัวเผา

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ [12]

Combustible	Formula	Temperature	
		°F	°C
Sulfur	S	470	245
Chacoal	C	650	345
Fixed carbon (bituminous coal)	C	765	405
Fixed carbon (semibituminous coal)	C	870	465
Fixed carbon (anthracite)	C	840-1115	450-600
Acetylene	C ₂ H ₂	580-825	305-440

ตารางที่ 3.5 (ต่อ) อุณหภูมิการจุดไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ [12]

Combustible	Formula	Temperature	
		°F	°C
Ethane	C ₂ H ₆	880-1165	470-630
Ethylene	C ₂ H ₄	900-1020	480-550
Hydrogen	H ₂	1065-1095	575-590
Methane	CH ₄	1170-1380	630-765
Carbon monoxide	CO	1130-1215	610-665
Kerosene	-	490-560	255-295
Gasoline	-	500-800	260-425

3.3.3 พลังงานความร้อนของการเผาไหม้

ปฏิกิริยาการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (exothermic reactions) จากความรู้เบื้องต้นทางด้านความร้อนของปฏิกิริยา (thermochemistry) สามารถคำนวณปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาที่สภาวะมาตรฐาน (standard heat of reaction, ΔH°) คือ ความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส ความร้อนของการเกิดที่สภาวะมาตรฐานดังกล่าวสามารถหาค่าได้จากตารางในหนังสือและคู่มือทางเคมีฟิสิกัล และ เทอร์โมไดนามิกส์ทั่วไปสำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งจะแสดงค่าเป็นความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐาน (standard heat of combustion, ΔH°_c)

3.3.4 ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ (flammability limits of flammability)

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เป็นเนื้อเดียวกัน สามารถเกิดได้ในช่วงความดันและอุณหภูมิกว้าง ถ้าส่วนผสมระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศเกิดปฏิกิริยาภายใต้ความดันสูง จะเป็นปฏิกิริยาที่มีความเร็วเหนือเสียง (supersonic reactions) เรียกว่าการระเบิด (detonations) และถ้าส่วนผสมระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศเกิดปฏิกิริยาที่ความดันบรรยากาศ หรือภายใต้ความดันต่ำ จะเป็นปฏิกิริยาที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียง (subsonic reactions) เรียกว่าการเผาด้วยความร้อน (deflagrations) แต่คำที่นิยมใช้มากกว่า คือ การเกิดเปลวไฟ (flames) เพราะที่ความดันปกติ แนวหรือขอบเขตของการเผาไหม้ปรากฏเป็นแสงสว่างที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

3.3.5 เปลวไฟ

เปลวไฟเป็นบริเวณการเผาไหม้ (combustion zone) ที่เคลื่อนที่ (propagate) เข้าหาส่วนผสมระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศ (หรือสารออกซิไดซ์) การที่จะเกิดเปลวไฟขึ้นได้นั้น ต้องเริ่มจากส่วนผสมที่เหมาะสม ถ้าเริ่มจากเชื้อเพลิงอย่างเดียว การเผาไหม้จะเกิดขึ้นไม่ได้ ถ้าเริ่มจากอากาศหรือสารออกซิไดซ์อย่างเดียว การเผาไหม้ก็จะเกิดขึ้นไม่ได้ เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมี ช่วงส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะเกิดเปลวไฟขึ้นได้ โดยอยู่ระหว่างส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเจือจางที่สุด (lean mixture) ที่จะเกิดเปลวไฟขึ้นได้ เรียกว่าขีดจำกัดขั้นต่ำของการเกิดเปลวไฟ (lower limit of flammability) และส่วนผสมที่มีเชื้อเพลิงเข้มข้นที่สุด (rich mixture) ที่ยังคงเกิดเปลวไฟได้ เรียกว่าขีดจำกัดขั้นสูงของการเกิดเปลวไฟ (upper limit of flammability) ช่วงกว้างของส่วนผสมนี้เรียกว่าขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟ (limits of flammability) เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟแตกต่างกันทั้งช่วงกว้างและค่าของขีดจำกัดทั้งขั้นต่ำและขั้นสูงดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ

Fuel	Leanest (%)	Richest (%)
Acetone (C ₃ H ₆ O)	3.10	11.15
Acetylene(C ₂ H ₂)	2.50	80.00
Ammonia (NH ₃)	16.10	26.60
Benzene (C ₆ H ₁₀)	1.41	7.10
Butane (C ₄ H ₁₀)	1.86	8.41
Butyl (C ₄ H ₁₀ O)	1.45	11.25
Butylene (C ₄ H ₈)	1.98	9.65
Carbon monoxide (CO)	12.50	74.20
Ethane (C ₂ H ₆)	3.22	12.45
Ethyl (C ₂ H ₆ O)	4.25	18.95
Ethylene (C ₂ H ₄)	3.05	28.60
Heptane (C ₇ H ₁₆)	1.00	6.70
Hexane (C ₆ H ₁₄)	1.27	6.90
Hydrogen (H ₂)	4.00	74.20
Methane (CH ₄)	5.00	14.00

ตารางที่ 3.6 (ต่อ) ขีดจำกัดของการเกิดเปลวไฟของเชื้อเพลิงบางชนิดผสมอากาศที่ความดัน 1 บรรยากาศ [12]

Fuel	Leanest %	Richest %
Methyl (CH_4O)	7.10	36.50
Octane (C_8H_{18})	0.95	-
Pentane (C_5H_{12})	1.42	7.80
Propane (C_3H_8)	2.37	9.50
Propyl ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$)	2.15	13.50
Propylene (C_3H_6)	2.40	10.30
Propylene oxide ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$)	2.10	21.50
Toluene (C_7H_8)	1.45	6.75

3.3.6 ค่าความร้อน

ในการคำนวณ เนื่องจากพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ให้ค่าเป็นลบ ซึ่งไม่สะดวกแก่การใช้งาน จึงนิยมใช้เทอม ค่าความร้อน (heating value หรือ calorific value) ซึ่งมีค่าเท่ากับความร้อนของการเผาไหม้ที่สภาวะมาตรฐานแต่มีค่าเป็นบวก สำหรับเชื้อเพลิงธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็น ถ่านหิน น้ำมัน และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม หรือชีวมวล ไม่ใช่สารประกอบบริสุทธิ์ ไม่สามารถคำนวณจากความร้อนของปฏิกิริยา หรือความร้อนของการเกิดมาตรฐานของสารหรือธาตุบริสุทธิ์ได้ จำเป็นต้องทำการทดลองในเครื่องมือเฉพาะที่เรียกว่า บอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งและของเหลว และแคลอริมิเตอร์ที่มีน้ำไหลผ่าน (water flow calorimeter) สำหรับเชื้อเพลิงที่เป็นก๊าซ ซึ่งการแสดงค่าความร้อนมี 2 วิธี คือ

1. ค่าความร้อนรวม (Total heating value, THV)

ค่าความร้อนรวมของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่ง หมายถึงปริมาณความร้อนที่จะให้ออกมา หลังการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยที่ตัวทำปฏิกิริยาเริ่มต้นและผลผลิตสุดท้ายทั้งหมดอยู่ภายใต้ความดันหนึ่งบรรยากาศ และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เมื่อน้ำที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดเป็นผลผลิตจากการเผาไหม้อยู่ในรูปของน้ำ (ของเหลว) อาจเรียกว่า ค่าความร้อนขั้นสูง (Higher heating value, HHV) หรือค่าความร้อนทั้งหมด (Gross heating value, GHV)

2. ค่าความร้อนสุทธิ (Net heating value, NHV)

ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งคือความแตกต่างระหว่างค่าความร้อนรวมและค่าความร้อนของการระเหยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในผลผลิตของการเผาไหม้ หรือแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$\text{HHV} = \text{NHV} + n \text{H}_2\text{O} \Delta H_{\text{vap.25}^\circ\text{C}}^\circ \quad (3.33)$$

โดยค่า NHV ของ LPG เท่ากับ 90.02 MJ/Nm³ และของ NG เท่ากับ 33.99 MJ/Nm³

3.3.7 อุณหภูมิเปลวไฟแอดิยาเบติก (adiabatic flame temperature)

ในเตาเผาและหม้อไอน้ำ จำเป็นต้องทราบถึงอุณหภูมิในเตาเผาและอุณหภูมิของก๊าซผลิต หรือ ก๊าซไอเสีย (flue gas) ที่ได้จากการเผาไหม้ เพื่อใช้ในการออกแบบเกี่ยวกับอุปกรณ์การถ่ายเทความร้อน หรือการคำนวณเกี่ยวกับปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายโอนให้แก่วัสดุภายในเตาเผา หรือให้แก่ไอน้ำ ในระบบดังกล่าว ผลผลิตทั้งหมดเป็นก๊าซหรือ ก๊าซไอเสีย จะออกจากระบบด้วยกันทั้งหมด เป็นกระแสเดียว อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย ทั้งหมดจะสูงขึ้นเรียกว่า อุณหภูมิเปลวไฟ (flame temperature) ถ้าปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศเป็นไปตามทฤษฎีอย่างสมบูรณ์ และไม่มีการสูญเสียความร้อนจากระบบ อุณหภูมิของเปลวไฟจะเป็นอุณหภูมิเปลวไฟสูงสุดแอดิยาเบติก (maximum adiabatic flame temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟที่เชื้อเพลิงชนิดหนึ่งๆ จะให้ได้

ที่อุณหภูมิสูง โมเลกุลของผลผลิตจากการเผาไหม้ ได้แก่ ก๊าซไอเสีย คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ไนโตรเจน และออกซิเจนเกินพอที่มีอยู่ในช่วงขณะนั้น จะเกิดการแตกตัวกลายเป็นอะตอม และอะตอมที่ว่องไว ตัวอย่าง เช่น



และที่อุณหภูมิสูงยิ่งขึ้น จะเกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนกลายเป็นอะตอม



ปฏิกิริยาการแตกตัวเป็น ปฏิกิริยาคูดความร้อน จึงมีผลให้ปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในระบบลดลงและอุณหภูมิเปลวไฟจึงลดลง เราสามารถใช้ ค่าคงที่สมดุลการแตกตัว (dissociation equilibrium constant) คำนวณอุณหภูมิของเปลวไฟที่คำนึงถึงการแตกตัวของโมเลกุลที่อุณหภูมิสูง

ได้ และเรียกอุณหภูมินี้ว่า อุณหภูมิของเปลวไฟแอดิยาเบติกที่แก้ค่าแล้ว (corrected adiabatic flame temperature)

ข้อสังเกตคือ ค่าอุณหภูมิเปลวไฟแอดิยาเบติกของเชื้อเพลิงจะมีค่าไม่แน่นอน กล่าวคือค่าของอุณหภูมิจะขึ้นอยู่กับ

1. สภาวะของสารตั้งต้น
2. ระดับความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา
3. ปริมาณอากาศที่ใช้

อุณหภูมิเปลวไฟแอดิยาเบติกจะมีค่าสูงสุดเมื่อกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ด้วยปริมาณอากาศตามทฤษฎี

3.4 การวิเคราะห์ระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์

3.4.1 ระบบที่มีการไหลคงตัว

ในระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี ค่าเอนทัลปีที่ใช้จะเปรียบเทียบกับค่าที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐานโดยแสดงในเทอมของเอนทัลปีของการก่อเกิด \bar{h}_f° ที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าต่อหนึ่งหน่วยโมลดังนี้คือ

$$\text{เอนทัลปี} = \bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}^\circ) \quad (\text{kJ/kmol}) \quad (3.39)$$

เมื่อเทอมที่อยู่ภายในวงเล็บหมายถึงค่าเอนทัลปี sensible ของสารที่เปรียบเทียบกับค่าเอนทัลปีที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่าง \bar{h} (ค่าเอนทัลปี sensible ที่สภาวะใดๆ ที่กำหนด) กับ \bar{h}° (ค่าเอนทัลปี sensible ที่สภาวะอ้างอิงมาตรฐานที่ 25°C และ 1 atm) ซึ่งสามารถใช้ได้ที่สภาวะอ้างอิงใดๆ

ถ้าระบบมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์น้อยมาก สมการที่ใช้คำนวณกฎอนุรักษ์พลังงานสำหรับระบบที่เกิดปฏิกิริยาเคมีและมีการไหลคงตัว (chemically reacting steady-flow system) สามารถเขียนได้ดังนี้คือ

$$Q - W = \sum \dot{n}_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p - \sum \dot{n}_r (\bar{h}_f^\circ - \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad (\text{kJ/s}) \quad (3.40)$$

เมื่อ \dot{n}_p และ \dot{n}_r คืออัตราการไหลเชิงโมลของผลิตภัณฑ์ (product) และสารตั้งต้น (reactant) ตามลำดับ หรือสามารถเขียนได้เป็น

$$Q - W = H_{\text{prod}} - H_{\text{react}} \quad (\text{kJ/kmol fuel}) \quad (3.41)$$

เมื่อ
$$H_{\text{prod}} = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p \quad (\text{kJ / kmol fuel}) \quad (3.42)$$

$$H_{\text{react}} = \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad (\text{kJ / kmol fuel}) \quad (3.43)$$

3.4.2 ระบบปิด

สมการของกฎอนุรักษ์พลังงานของระบบปิดที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นสามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$Q - W = U_{\text{prod}} - U_{\text{react}} \quad (\text{kJ / kmol fuel}) \quad (3.44)$$

เมื่อ U_{prod} คือ พลังงานภายในของผลิตภัณฑ์

U_{react} คือ พลังงานภายในของสารตั้งต้น

เมื่อ $\bar{u} = \bar{h} - P\bar{v}$ หรือ $\bar{u}_r + \bar{u} - \bar{u}^\circ = \bar{h}_r + \bar{h} - \bar{h}^\circ - P\bar{v}$

หรือสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$Q - W = \sum N_p (\bar{h}_r + \bar{h} - \bar{h}^\circ - P\bar{v})_p - \sum N_r (\bar{h}_r + \bar{h} - \bar{h}^\circ - P\bar{v})_r \quad (\text{kJ/kmol fuel}) \quad (3.45)$$

ในกรณีที่มิงานเข้าไปเกี่ยวข้อง และไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์หรือพลังงานศักย์ในกระบวนการเผาไหม้แล้ว พลังงานเคมีที่ถูกปล่อยออกจากกระบวนการอาจจะสูญเสียออกมาในรูปของความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม หรือถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ภายในระบบ ดังนั้น ถ้าความร้อนยังสูญเสียอยู่น้อยเท่าใดอุณหภูมิก็ยังมีค่าเพิ่มมากขึ้น ถ้าระบบไม่มีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเลย ($Q = 0$) อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะมีค่าสูงที่สุดซึ่งเราจะเรียกอุณหภูมินี้ว่าอุณหภูมิเปลวไฟแอดิเอแบติกหรืออุณหภูมิการเผาไหม้แอดิเอแบติก (adiabatic flame หรือ adiabatic combustion temperature)

อุณหภูมิเปลวไฟแอดิเอแบติกของกระบวนการเผาไหม้ของระบบการไหลคงตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ (3.41) โดยกำหนดให้ $Q = 0$ และ $W = 0$ จะได้

$$H_{\text{prod}} = H_{\text{react}} \quad (3.46)$$

$$\text{หรือ} \quad \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \sum N_r (\bar{h}_f^\circ - \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r \quad (3.47)$$

ถ้าสารตั้งต้นและสภาวะของสารตั้งต้นถูกกำหนด เราสามารถคำนวณหาค่าเอนทัลปีของสารตั้งต้น H_{react} ได้โดยง่าย แต่เราจะไม่สามารถคำนวณหาค่าเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์ H_{prod} ได้โดยตรง ถ้าเราไม่ทราบค่าอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น การคำนวณหาค่าอุณหภูมิเปลวไฟแอดิเอแบติกจะต้องใช้เทคนิคการคำนวณซ้ำ กล่าวคือ อุณหภูมิของก๊าซผลิตภัณฑ์จะถูกสมมติขึ้นก่อน หลังจากนั้นค่า H_{prod} จะถูกคำนวณที่อุณหภูมินี้ ถ้าค่าที่คำนวณได้ไม่เท่ากับ H_{react} ก็จะต้องทำการคำนวณซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิอื่น หลังจากนั้นค่าอุณหภูมิเปลวไฟแอดิเอแบติกจะถูกคำนวณหาโดยวิธีการ interpolation จากผลลัพธ์ที่ได้ทั้งสอง ถ้าตัวออกซิไดซ์คืออากาศแล้ว ก๊าซผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย N_2 เพราะฉะนั้นอุณหภูมิเปลวไฟแอดิเอแบติกสามารถคาดเดาได้โดยการพิจารณาว่าก๊าซผลิตภัณฑ์ทั้งหมดคือ N_2

อุณหภูมิสูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ มักจะถูกจำกัดโดยวัสดุที่ใช้ในการทำห้องเผาไหม้นั้น ดังนั้นอุณหภูมิเปลวไฟแอดีเยเบติกจึงเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในขณะที่ยังออกแบบห้องเผาไหม้ทั้งห้องแก๊สและหัวฉีด อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เหล่านี้มักจะต่ำกว่าอุณหภูมิเปลวไฟแอดีเยเบติกค่อนข้างมาก เนื่องจากการเผาไหม้ มักจะเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์และความร้อนบางส่วนมักจะสูญเสียออกจากห้องเผาไหม้ นอกจากนี้แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ มักจะแตกตัวที่อุณหภูมิสูงๆ โดยอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้สามารถควบคุมได้โดยการปรับปริมาณอากาศให้มากเกินไปเพราะอากาศมีหน้าที่เป็นตัว coolant

3.5 กฎการถ่ายเทความร้อน

เมื่อไรก็ตามที่จุดสองจุดมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ก็จะมีพลังงานถ่ายเทจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานที่เคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกันนี้เรียกว่า ความร้อน รายละเอียดที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์และการถ่ายเทความร้อนนั้น พิจารณาได้จากแหล่งที่ก่้างร้อนขึ้นจากการแช่ทิ้งไว้ในน้ำร้อน จากกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ จะทำให้สามารถหาอุณหภูมิของแหล่ง และของน้ำร้อน ภายหลังจากที่แหล่งและน้ำร้อนอยู่ในสภาวะสมดุลแล้วได้ แต่ก็ไม่สามารถบอกให้ทราบถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิในช่วงเวลาที่กำหนดให้ นั้นและไม่สามารถบอกให้ทราบว่า จะต้องใช้เวลานานเท่าไร แหล่งและน้ำจึงจะมีอุณหภูมิที่ต้องการ ส่วนการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะสามารถทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำไปยังแหล่งได้ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังสามารถคำนวณหาอุณหภูมิของแหล่งและของน้ำเป็นฟังก์ชันของเวลาได้อีกด้วย

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่สมบูรณ์แบบนั้น จำเป็นจะต้องทราบถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ

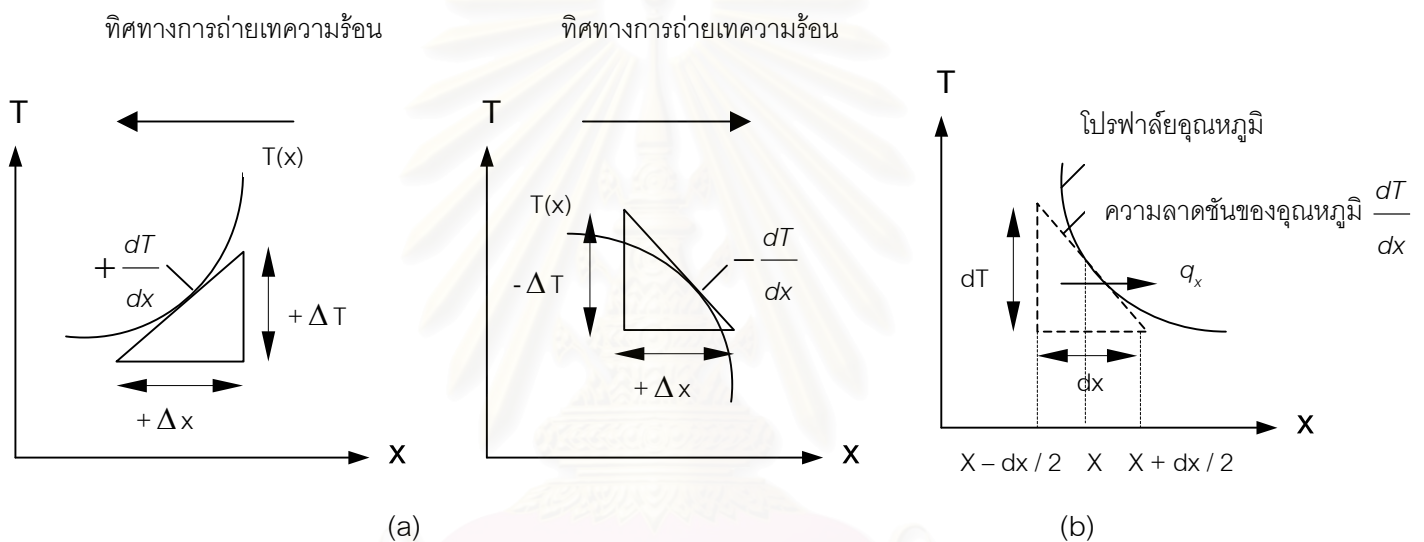
1. การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (conduction)
2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (convection)
3. การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (radiation)

3.5.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางที่บดบัง เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัตถุก้อนนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำซึ่งใช้สัญลักษณ์ว่า q_x นี้จะเป็นสัดส่วนกับค่าความลาดชันของอุณหภูมิ dT/dx คูณกับพื้นที่ A ที่ความร้อนไหลผ่าน (รูป 3.2a) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการแล้วได้ดังนี้

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.48 a)$$

- เมื่อ:
- q_x = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (W)
 - k = ค่าการนำความร้อน (W/m.K)
 - A = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน (m^2)
 - T = อุณหภูมิ (K)
 - x = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน (m)



รูปที่ 3.2 (a) ภาพแสดงเครื่องหมายของค่า dT/dx สำหรับการนำความร้อน [14]

(b) ทิศทางการนำความร้อน [14]

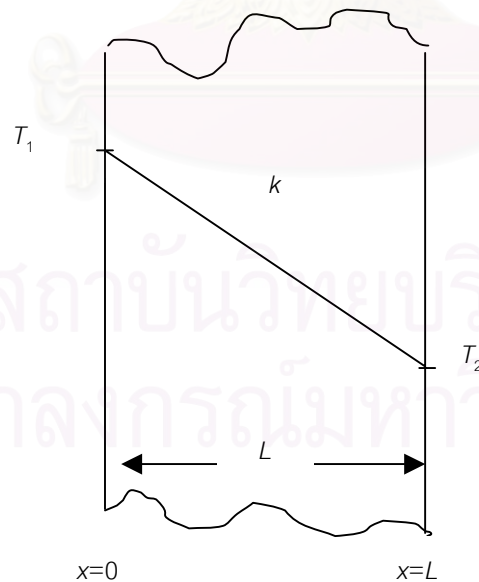
สมการ (3.48 a) นี้มีชื่อเรียกว่ากฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's law of conduction) เครื่องหมายลบที่อยู่ทางด้านขวาของสมการเป็นผลที่เนื่องมาจากกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำแต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิที่อยู่ในรูป 3.2 (b) นั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้เป็นเพราะอุณหภูมิจะลดน้อยลงเมื่อระยะทาง x เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนไหลในทิศทางที่เป็นบวก มีค่าเป็นบวกแล้ว ก็จะต้องเติมเครื่องหมายลบไว้ที่ด้านขวาของสมการ (3.48 a)

1. การนำความร้อนในผนังราบ (plane wall)

ให้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังราบที่ผิวมีอุณหภูมิคงที่ และมีขนาดสม่ำเสมอ ทั้งผิว ดังรูปที่ 3.3 เนื่องจากผิวทั้งสองมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีความร้อนไหลจากผิวที่มีอุณหภูมิสูงไปยังผิวที่มีอุณหภูมิต่ำ การนำความร้อนของผนังได้จากการอินทิเกรตสมการ (3.48 a) แล้วอินทิเกรต ก็จะได้อัตราการนำความร้อนเป็น :

$$q_x = \frac{kA}{L}(T_2 - T_1) \quad (3.48 \text{ b})$$

- เมื่อ:
- q_x = อัตราความร้อนที่ไหลผ่านผนัง (W)
 - k = ค่าการนำความร้อนของผนัง (W/m.K) ของความร้อน (m^2)
 - L = ความหนาของผนัง (m)
 - A = พื้นที่ของผนังที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล
 - T_1 = อุณหภูมิผิวทางด้านซ้าย (ที่ $x = 0$) (K)
 - T_2 = อุณหภูมิผิวทางด้านขวา (ที่ $x = L$) (K)



รูปที่ 3.3 การนำความร้อนผ่านผนังราบที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนคงที่ [14]

3.5.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

เมื่อของไหลสัมผัสผิวดินของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลของวัตถุเกิดขึ้น กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection)
2. การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection)

แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวของการพาความร้อนแบบอิสระนั้น เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิของไหล ที่เนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสผิวดินของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นและทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างของการพาความร้อนแบบอิสระนี้ได้แก่การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านในวันที่อากาศสงบนิ่ง การพาความร้อนภายในกาต้มน้ำที่มีขดลวดให้ความร้อนหรือการถ่ายเทความร้อนจากผิวของตัวเก็บความร้อนจากดวงอาทิตย์ในช่วงที่ไม่มีลมพัด

การพาความร้อนแบบบังคับ จะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุร้อนหรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วที่สูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากมีความแตกต่างของอุณหภูมิขนาดเท่าๆ กัน การพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า แต่ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบไหนก็ตาม ต่างก็จะมีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการระบายความร้อนของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (3.49)$$

เมื่อ: \bar{h}_c = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (average convective heat transfer coefficient) ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุหรือ

\bar{h}_c = หนึ่งหน่วยการนำจากการพาความร้อน (unit thermal convective conductance) ($W/m^2 \cdot K$)

A = พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล (m^2)

T_s = อุณหภูมิของผิววัตถุ (K)

$T_{f,\infty}$ = อุณหภูมิของไหลอิสระที่อยู่ห่างไปจากผิว (K)

ค่า \bar{h}_c นี้หาได้ทั้งโดยวิธีวิเคราะห์ และโดยวิธีทดลอง ตาราง 3.7 ที่แสดงค่าโดยประมาณของ \bar{h}_c รวมทั้งค่า \bar{h}_c จากการเดือด และการกลั่นตัวของน้ำด้วย

ตารางที่ 3.7 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย [14]

ประเภทการพาความร้อนและชนิดของของไหล	\bar{h}_c (W/m ² .k)
การพาความร้อนแบบอิสระ, อากาศ	5-25
การพาความร้อนแบบอิสระ, น้ำ	20-100
การพาความร้อนแบบบังคับ, อากาศ	10-200
การพาความร้อนแบบบังคับ, น้ำ	50-10,000
น้ำกำลังเดือด	3,000-100,000
ไอของน้ำที่กำลังกลั่นตัว	5,000-100,000

3.5.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน

ความร้อนจากการนำ และการพาความร้อน จะเคลื่อนที่ผ่านได้เฉพาะในกรณีที่มีวัตถุเป็นตัวกลาง (medium) เท่านั้น แต่สำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีนั้น จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านได้โดยไม่ต้องมีตัวกลาง เช่น ในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีอินฟราเรด

จำนวนพลังงานที่ส่งออกจากผิววัตถุในรูปรังสีความร้อน (radiant heat) นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์และลักษณะของผิว วัตถุที่สามารถแผ่รังสีได้สูงสุด หรือที่เรียกว่า วัตถุดำ (black body) จะมีอัตราการแผ่รังสีความร้อนดังนี้

$$q_r = \sigma A T^4 \quad (3.50 a)$$

เมื่อ: q_r = อัตราความร้อนจากการแผ่รังสี (W)

A = พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (m²)

T = อุณหภูมิผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน (K)

σ = ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant) มีค่าเท่ากับ

$$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

จะเห็นได้จากสมการ (3.50 a) ว่า อัตราความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุดำแปรโดยตรงกับกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ ส่วนสมการที่ (3.50 b) อัตราถ่ายเทความร้อนสุทธิของการแผ่รังสี ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น ถ้าวัตถุดำแผ่รังสีความร้อนไปยังวัตถุดำอัตรา

การถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ T_1 ไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบๆ และมีอุณหภูมิเป็น T_2 ก็จะมีค่าเป็น :

$$q_r = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.50 \text{ b})$$

เมื่อ : T_1 = อุณหภูมิของผิววัตถุดำ (K)
 T_2 = อุณหภูมิของผิวที่อยู่รอบๆ (เป็นวัตถุดำด้วย) (K)

วัตถุจริงจะไม่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้มากเท่ากับวัตถุดำ ถ้าหากที่อุณหภูมิเท่าๆ กัน ถ้าวัตถุจริงสามารถแผ่รังสีความร้อนในอัตราส่วนที่คงที่ทุกความยาวคลื่นแล้วนั้นก็เรียกว่า “วัตถุเทา” วัตถุเทาจะแผ่รังสีความร้อนในอัตรา

$$q_r = \sigma \epsilon AT^4 \quad (3.50 \text{ c})$$

ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุเทาที่มีอุณหภูมิ T_1 ไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบๆ และมีอุณหภูมิ T_2 จะมีค่าเป็น:

$$q_r = \sigma \epsilon A(T_1^4 - T_2^4) \quad (3.50 \text{ d})$$

เมื่อ : ϵ = สภาพการแผ่รังสี (Emissivity)

3.6 สมดุลความร้อน

ความร้อนที่ป้อนให้กับอุปกรณ์สันดาปมีทั้งส่วนความร้อนที่ใช้ประโยชน์ได้ และส่วนของความร้อนที่ปล่อยทิ้งไป ดังนั้นจึงต้องทำการดุลความร้อนเพื่อคำนวณปริมาณความร้อนเข้าและความร้อนออกของอุปกรณ์อย่างละเอียด เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาลดความสูญเสียความร้อนและใช้ความร้อนให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ภายในเวลาคงที่ ถ้าความร้อนที่เข้าสู่อุปกรณ์เป็นความร้อนเข้า และความร้อนที่ออกจากอุปกรณ์เป็นความร้อนออก จากกฎของการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า

$$\text{ความร้อนเข้า} = \text{ความร้อนออก}$$

ความร้อนเข้าหมายถึงความร้อนที่เข้าอุปกรณ์ และความร้อนที่เกิดภายในอุปกรณ์เนื่องจากปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น ในขณะที่ความร้อนออกหมายถึง ความร้อนที่ปล่อยออกจากอุปกรณ์ และความร้อนที่ถูกดูดไว้ในอุปกรณ์

3.6.1 ขอบเขตของสมดุลความร้อน

เนื่องจากในทางปฏิบัติระบบความร้อนที่พิจารณาจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลายอย่าง ดังนั้นจำเป็นต้องกำหนดให้ชัดเจนว่า ดุลความร้อนมีขอบเขตเพียงใด ความร้อนปริมาณเดียวกัน อาจถือว่าเป็นความร้อนเข้า แต่เมื่อเปลี่ยนขอบเขตแล้วอาจไม่ถือว่าเป็นความร้อนเข้าก็ได้ จึงจำเป็นต้องพิจารณาให้รอบคอบ

3.6.2 หลักเกณฑ์และหน่วยของการทำดุลความร้อน

1. สำหรับอุณหภูมิมาตรฐาน อาจใช้ที่ 0°C ก็ได้แต่โดยปกติจะใช้อุณหภูมิอากาศภายนอก (อุณหภูมิห้อง)

2. ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ประกอบด้วยค่าความร้อนสูง (Higher Calorific Value) กับค่าความร้อนต่ำ (Low Calorific Value) การจะเลือกใช้อย่างใดนั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสีย แต่ตามปกติเนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซที่ระบายออกจะสูงกว่า 100°C ส่วนใหญ่ จึงไม่อาจใช้ประโยชน์ความร้อนแฝงของการควบแน่นไอน้ำในก๊าซที่ระบายออกได้ ดังนั้นจึงใช้ค่าความร้อนต่ำในการคำนวณ

3.6.3 ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี (A_0)

การที่จะผสมอากาศและเชื้อเพลิงในห้องสันดาปให้ผสมกันอย่างสม่ำเสมอเป็นไปได้อย่างนั้นก็คือ การใช้เพียงแต่ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเท่านั้นจะก่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ได้ยาก ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วจึงต้องป้อนปริมาณอากาศเข้าห้องสันดาปมากกว่าปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเล็กน้อย อัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศที่ใช้จริงกับปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีเรียกว่า สัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกิน (excess air coefficient) หรืออัตราส่วนอากาศ (air ratio) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ m

ถ้าปริมาณอากาศที่ใช้จริงเป็น A จะได้

$$A = m A_0 \quad (3.51)$$

เมื่อ A = ปริมาณอากาศที่ใช้จริง

A_0 = ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี

m = สัมประสิทธิ์อากาศส่วนเกินหรืออัตราส่วนอากาศ

ปริมาณอากาศส่วนที่เกินจากค่าทฤษฎีคือ $(m-1) A_0$

ถ้าอัตราส่วนอากาศน้อยเกินไปก็จะเกิดการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ ถ้ามากเกินไปก็จะเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ แต่อากาศส่วนเกินก็ถูกทำให้ร้อนขึ้นด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนโดยไม่จำเป็น

3.6.4 การหาอัตราส่วนสมมูล

เพื่อความสะดวกในการแสดงปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้จริง จึงกำหนดให้อยู่ในรูปของอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงค่าอัตราส่วนของอากาศ-เชื้อเพลิง (air-fuel ratio) ซึ่งเขียนย่อด้วย A/F เป็นค่าที่แสดงในรูปของอัตราส่วนของมวลอากาศต่อมวลของเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ นั่นคือ

$$A/F = \frac{\text{มวลของอากาศ}}{\text{มวลของเชื้อเพลิง}} \quad (3.52)$$

และอัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio) หมายถึง อัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เผาไหม้จริงต่ออัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี

$$\phi = \frac{(m_a / m_f)_{act}}{(m_a / m_f)_{stoi}} \quad (3.53)$$

เมื่อค่า $\phi = 1$ หมายถึงปริมาณอากาศที่ใช้จริงเท่ากับปริมาณอากาศทางทฤษฎีและเรียกอัตราส่วนนี้ว่า stoichiometric ratio

เมื่อค่า $\phi > 1$ หมายถึงปริมาณอากาศที่ใช้จริงมากกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี หรืออัตราส่วนผสมบาง

และเมื่อค่า $\phi < 1$ หมายถึงปริมาณอากาศที่ใช้จริงน้อยกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎีหรืออัตราส่วนผสมหนา

3.6.5 วิธีคำนวณความร้อนเข้า

3.6.5.1 ความร้อนที่นำเข้าไปโดยเชื้อเพลิง

1. ปริมาณความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง (\dot{Q}_f)

เป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการสันดาปก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งคำนวณจาก

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f \times HV \quad (3.54)$$

เมื่อ

\dot{Q}_f = ปริมาณความร้อนที่ได้จากการสันดาป (MJ/hr)

\dot{m}_f = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Nm^3/hr)

HV = ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/Nm^3)

2. ปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง

ปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง สามารถคำนวณจาก

$$\dot{Q}_{sf} = \dot{m}_f \times C_{p,f} \times (T_f - T_{surr}) \quad (3.55)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{sf} = ปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง (MJ/hr)

\dot{m}_f = ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ (Nm³/hr)

$C_{p,f}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (kJ/Nm³°C)

T_f = อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่อุ่น (°C)

T_{surr} = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

ถ้าไม่มีการอุ่นเชื้อเพลิงด้วยความร้อนจากแหล่งภายนอก เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าโดยมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายนอก ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงจึงเป็นศูนย์

3. ความร้อนที่อากาศสำหรับการสันดาปนำเข้ามา

$$\dot{Q}_{sa} = \dot{m}_a \times C_{p,a} \times (T_a - T_{surr}) \quad (3.56)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{sa} = ปริมาณความร้อนสัมผัสของอากาศ (MJ/hr)

\dot{m}_a = ปริมาณอากาศ (Nm³/hr)

$C_{p,a}$ = ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/Nm³°C)

T_a = อุณหภูมิอากาศที่อุ่น (°C)

T_{surr} = อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

ถ้าไม่มีการอุ่นอากาศโดยแหล่งความร้อนภายนอก ความร้อนสัมผัสของอากาศสำหรับการสันดาปจะเป็นศูนย์

3.6.5.2 วิธีคำนวณความร้อนออก

1. ความร้อนที่ออกไปกับผลิตภัณฑ์

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมทองแดง ประกอบด้วยพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของทองแดงจนถึงจุดหลอมเหลว และพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะทองแดงดังสมการ

$$\dot{Q}_{Cu} = \dot{m}_{Cu} \times C_{p,Cu} \times (T_{out} - T_{in}) + \dot{m}_{Cu} \times LH \quad (3.57)$$

เมื่อ

\dot{Q}_{Cu}	= ความร้อนสัมผัสของวัตต์รับความร้อน (MJ/hr)
\dot{m}_{Cu}	= ปริมาณของวัตต์รับความร้อน (Nm^3/hr)
$C_{p,Cu}$	= ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของวัตต์รับความร้อน ($\text{kJ}/\text{Nm}^3\text{ }^\circ\text{C}$)
T_{out}	= อุณหภูมิออกของวัตต์รับความร้อน ($^\circ\text{C}$)
T_{in}	= อุณหภูมิเข้าของวัตต์รับความร้อน ($^\circ\text{C}$)
LH	= ความร้อนแฝงของวัตต์รับความร้อน (kJ/kg)

2. ความร้อนที่ออกไปกับก๊าซไอเสีย

พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากก๊าซที่ปล่อยทิ้งจากเตาหลอม ซึ่งเป็นพลังงานสูญเสียหลักของเตาหลอมทองแดงสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_{flue} = G \times C_{p,flue} \times (T_{flue} - T_{amb}) \quad (3.58)$$

$$G = G_0 + (m - 1)A_0 \quad (3.59)$$

เมื่อ

Q_{flue}	= พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสีย (W)
$C_{p,flue}$	= ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย ($\text{kJ}/\text{Nm}^3 \text{ K}$)
T_a	= อุณหภูมิก๊าซไอเสียที่ออกจากเตาเผา ($^\circ\text{C}$)
T_{amb}	= อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ($^\circ\text{C}$)
G	= ปริมาณก๊าซไอเสียจริง
G_0	= ปริมาณก๊าซไอเสียเชิงทฤษฎี
m	= อัตราส่วนอากาศ
A_0	= ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี

3. ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น

เป็นพลังงานที่สูญเสียจากน้ำระบายความร้อนของเตาหลอม ซึ่งใช้เพื่อยืดอายุของเตาหลอม สามารถคำนวณจากสมการ

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w \times C_{p,w} (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (3.60)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_w &= \text{ความร้อนที่น้ำหล่อเย็นได้รับ (MJ/hr)} \\ \dot{m}_w &= \text{ปริมาณน้ำหล่อเย็นที่ใช้ (kg/hr)} \\ C_{p,w} &= \text{ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น (kJ/kg °C)} \\ T_{w,out} &= \text{อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก (°C)} \\ T_{w,in} &= \text{อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า (°C)} \end{aligned}$$

4. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา

เป็นความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตาของเตาหลอม โดยมีสมการดังนี้

$$\dot{Q}_r = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^N \left\{ \left[2.2(T_c - T_a)^{5/4} + 4.88E \left(\frac{(T_c + 273)^4}{100} - \frac{(T_a + 273)^4}{100} \right) \right] \times A_i \times 4.186 \right\} \quad (3.61)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \bar{h}_c & \\ \dot{Q}_r &= \text{ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา (MJ/hr)} \\ T_c &= \text{อุณหภูมิผนังเตา (°C)} \\ T_a &= \text{อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)} \\ A_i &= \text{พื้นที่ผิวเตาแต่ละด้าน (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

5. ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{co} = (\dot{m}_f \times D_f \times G \times CO \times 13.76) / 10^6 \quad (3.62)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{co} &= \text{ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (MJ/hr)} \\ \dot{m}_f &= \text{ปริมาณก๊าซเชื้อเพลิง (Nm}^3\text{/hr)} \\ D_f &= \text{ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/Nm}^3\text{)} \\ G &= \text{ปริมาณก๊าซเสียจริง} \\ CO &= \text{คาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย (ppm)} \end{aligned}$$

6. ความร้อนสูญเสียอื่นๆที่ไม่สามารถวัดได้ (Q)

เป็นความร้อนที่สูญเสียอื่นๆที่ไม่สามารถวัดได้ตั้งนั้น ความร้อนสูญเสียอื่นจึงหาจากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ความร้อนสูญเสียอื่นๆ} = \text{ผลรวมของความร้อนเข้าทั้งหมด} - \text{ผลรวมของความร้อนออกทั้งหมด} \quad (3.63)$$

3.7 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

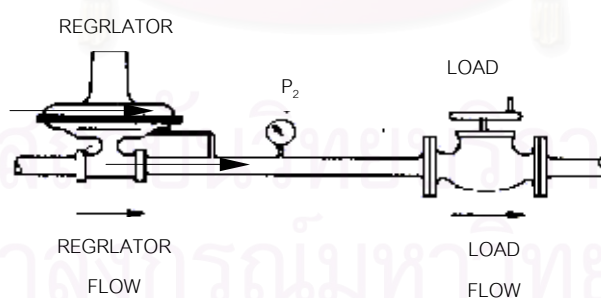
ตามปกติจะใช้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนในการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ใช้ความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสามารถคำนวณได้ถ้าทำสมดุลความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหลอมแสดงได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพเตา} = \frac{\text{ปริมาณความร้อนวัดที่ทางออก} - \text{ปริมาณความร้อนวัดที่ทางเข้า}}{\text{ผลรวมความร้อนเข้า}} \quad (3.64)$$

3.8 อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ (Zone Regulator)

3.8.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดัน

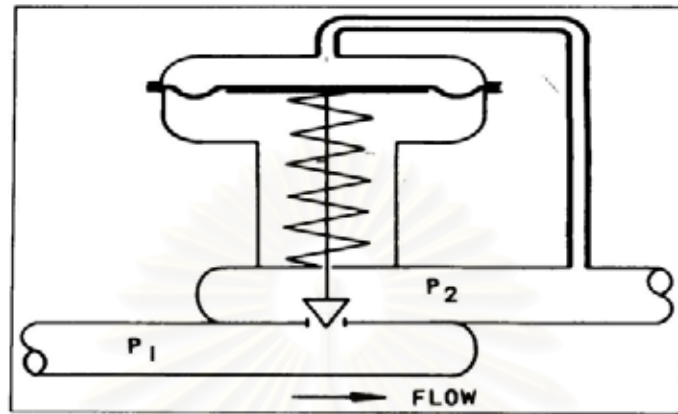
อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ (รูปที่ 3.4) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้อัตราการไหลของก๊าซผ่านอุปกรณ์ปรับความดันเหมาะสมกับปริมาณก๊าซที่ต้องใช้ในระบบ โดยเมื่อต้องการปริมาณก๊าซน้อยอุปกรณ์ปรับความดันจะลดอัตราการไหลของก๊าซ แต่เมื่อต้องการปริมาณก๊าซมากอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซจะปรับให้อัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้น



รูปที่ 3.4 ระบบปรับความดันก๊าซ [15]

จากรูปที่ 3.5 เมื่อวาล์วเปิดให้ก๊าซไหลเข้าไปในระบบมากขึ้นความดันที่ทางออกจะสูงขึ้น และถูกส่งกลับมาควบคุมอุปกรณ์ปรับความดัน โดยความดันจะกดลงบนแผ่นไดอะแฟรมเกิดแรงกดสปริงลง วาล์วจะเปิดน้อยลงเพื่อลดปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านอุปกรณ์ปรับความดัน ในทางกลับกันถ้า

ก๊าซไม่เพียงพอในระบบ ความดันจะลดลงและแรงของความดันจะไม่สามารถกดสปริงได้ทำให้วาล์วเปิดมากขึ้นและก๊าซจะไหลเข้าสู่ระบบมากขึ้น

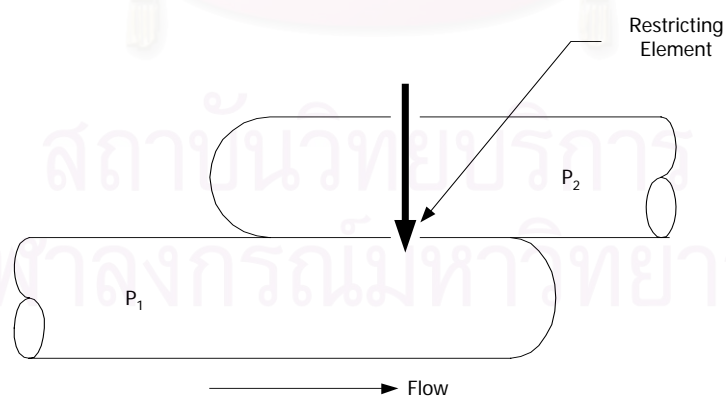


รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ควบคุมความดัน [15]

3.8.2 ส่วนประกอบที่สำคัญของอุปกรณ์ปรับความดัน

วาล์วควบคุมการไหล

รูปที่ 3.6 แสดงวาล์วควบคุมการไหลซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งในสายธารการไหลเพื่อควบคุมอัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านอุปกรณ์ปรับความดัน ตามรูปที่ 3.5 เมื่อความดัน P_2 มากกว่า P_1 วาล์วจะเคลื่อนที่ลงทำให้ก๊าซไหลผ่านวาล์วได้น้อยลง

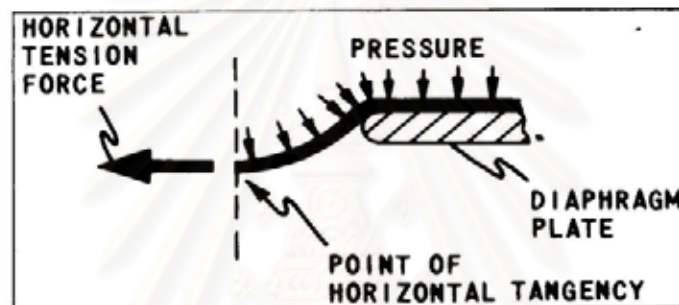


รูปที่ 3.6 วาล์วควบคุมการไหล [15]

อุปกรณ์รับและส่งถ่ายแรง (loading element)

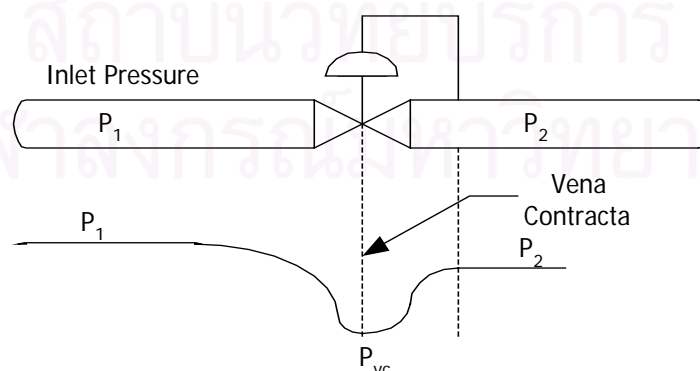
อุปกรณ์รับและส่งถ่ายแรงเป็นอุปกรณ์ควบคุมวาล์วที่ใช้ควบคุมการไหล ตัวอย่างเช่นสปริงและแผ่นไดอะแฟรม ซึ่งโดยส่วนใหญ่สปริงและไดอะแฟรมจะถูกใช้ร่วมกันโดยแผ่นไดอะแฟรมจะถูกความดันกระทำทำให้เกิดแรงเป็นผลทำให้วาล์วควบคุมการไหลปิดลง แต่สปริงจะทำให้เกิดแรงต้านซึ่งมีมากกว่าแรงที่เกิดจากความดัน จึงทำให้วาล์วควบคุมการไหลเปิดให้ก๊าซไหลผ่านอุปกรณ์ปรับความดันได้

ในรูปที่ 3.7 ความดันที่กระทำตามแนวระดับทางด้านซ้ายของแผ่นไดอะแฟรมซึ่งเป็นแรงดึงสำหรับพื้นที่ซึ่งใช้ในการคำนวณ (Effective area) จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างจุดที่เกิดแรงดึงกระทำ



รูปที่ 3.7 แรงดึงในแผ่นไดอะแฟรม [15]

ในรูปที่ 3.8 ความดันจะลดลงต่ำสุดที่บริเวณส่วนที่แคบที่สุดของสายธารการไหล (Vena contracta) ซึ่งจะเป็นบริเวณที่มีความเร็วมากที่สุด ถ้าเพิ่มความแตกต่างความดันอัตราการไหลก็จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดวิกฤตซึ่งอัตราการไหลจะไม่เพิ่มอีกต่อไป



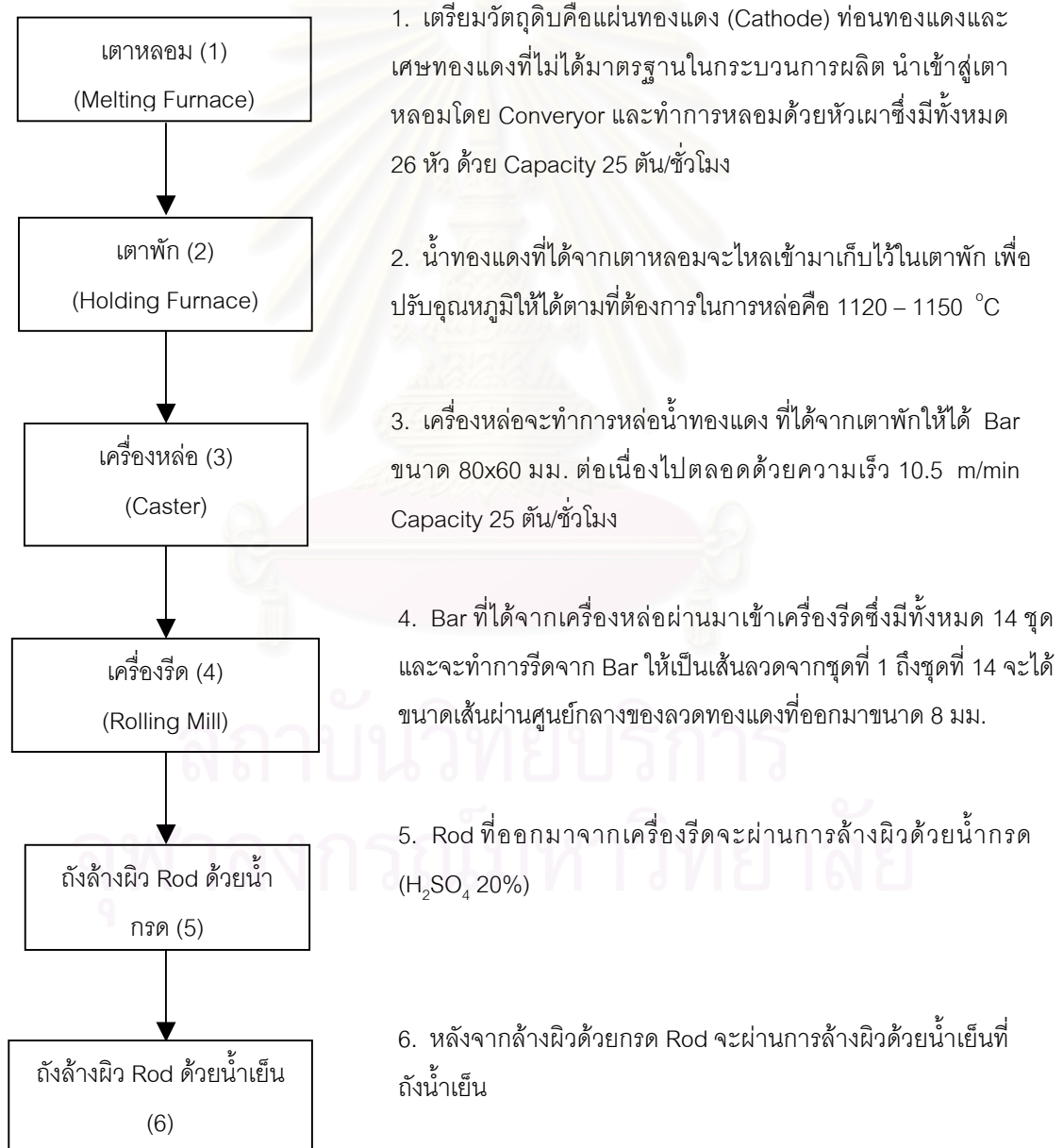
รูปที่ 3.8 ความดันตกคร่อมที่วาล์ว [15]

บทที่ 4

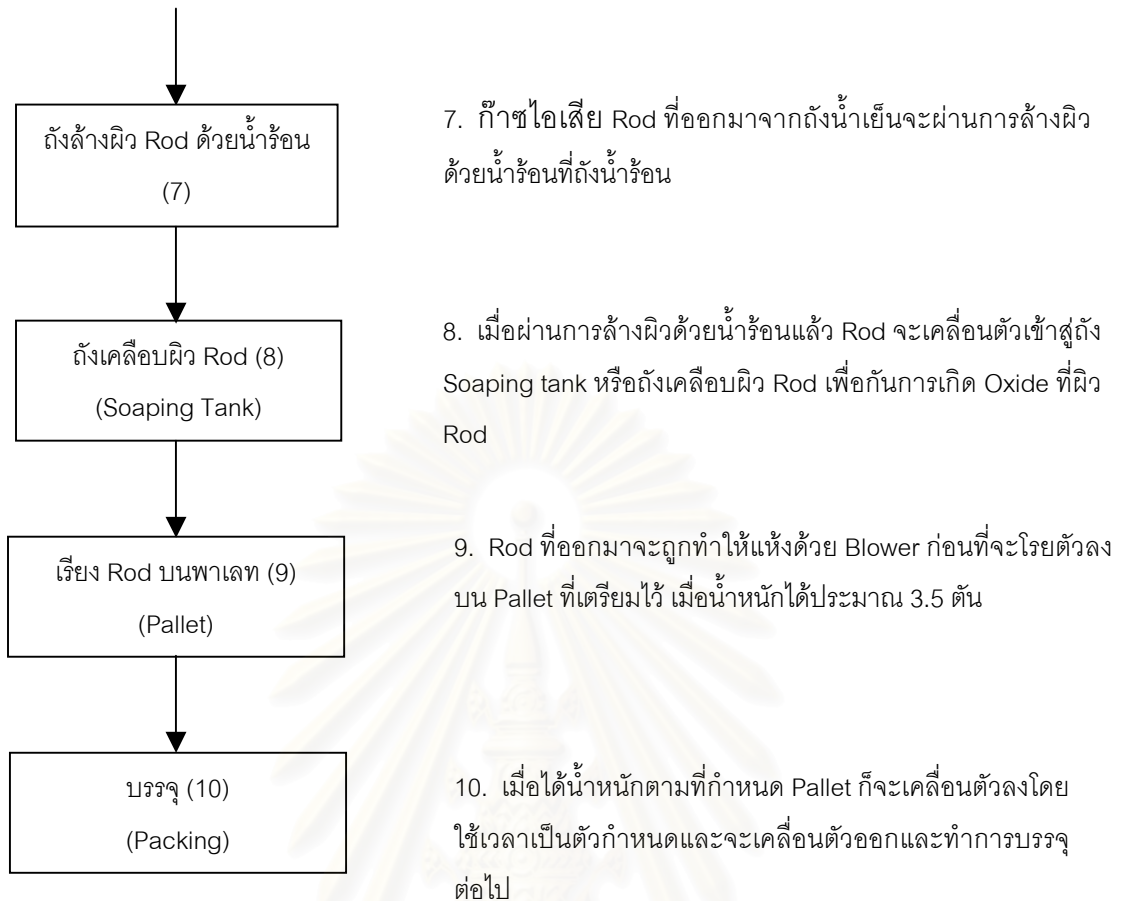
กระบวนการผลิตลวดทองแดง

4.1 กระบวนการผลิตเส้นลวดทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

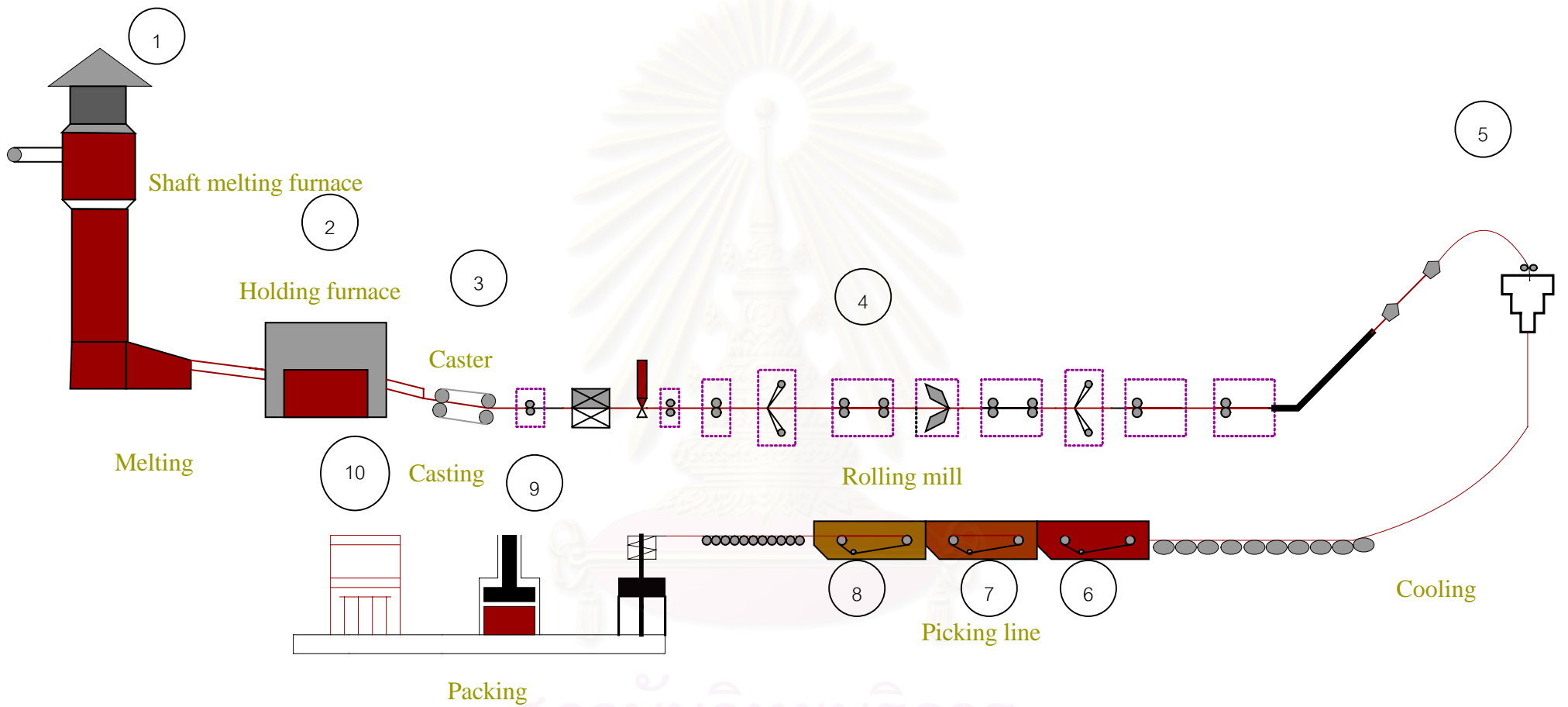
รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการผลิตเส้นลวดทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด โดยแสดงกระบวนการผลิตลวดทองแดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 กระบวนการผลิตลวดทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด



รูปที่ 4.1 (ต่อ) กระบวนการผลิตทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด



รูปที่ 4.2 กระบวนการผลิตลวดทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

4.2 ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงและผลผลิตของเตาหลอมทองแดงตลอดปี พ.ศ. 2544

ในการผลิตลวดทองแดง ต้องใช้เชื้อเพลิง 3 จุดหลัก ๆ คือ ที่เตาหลอมทองแดง ใช้เชื้อเพลิง LPG ที่ Launder ใช้เชื้อเพลิง NG และที่เตาพักใช้เชื้อเพลิง NG โดยข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงและผลผลิต ลวดทองแดงที่ได้ตลอดทั้งปี 2544 แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การใช้เชื้อเพลิงของเตาหลอมทองแดง เตาพัก และผลผลิตลวดทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด ในปี พ.ศ. 2544

ปริมาณการใช้ก๊าซ LPG และ NG ของส่วนผลิตลวดทองแดงในปี 2544			ปริมาณการผลิตลวดทองแดงขนาด 8.00 mm และ 12.4 mm. ในปี 2544 (ตัน)	อัตราส่วนผลผลิตลวดทองแดงที่ได้ต่อ LPG ที่ใช้ (kg/Nm ³)
เดือน	LPG (kg)	NG (Nm ³)		
มกราคม	55,080.00	112,030.00	1,111.87	41.99
กุมภาพันธ์	94,370.00	128,358.00	2,648.79	58.38
มีนาคม	21,120.00	41,515.00	574.83	56.61
เมษายน	41,140.00	84,835.00	920.48	46.54
พฤษภาคม	87,020.00	93,481.00	2,545.15	60.83
มิถุนายน	30,220.00	48,814.00	768.55	52.90
กรกฎาคม	53,610.00	110,894.00	1,484.23	57.58
สิงหาคม	74,580.00	90,977.00	2,221.22	61.95
กันยายน	10,820.00	26,079.00	204.65	39.34
ตุลาคม	101,280.00	137,573.00	2,025.08	41.59
พฤศจิกายน	58,032.00	101,910.00	1,991.08	71.36
ธันวาคม	54,790.00	75,259.00	1,315.79	49.95
เฉลี่ย				53.25

หมายเหตุ ความหนาแน่นของ LPG มีค่า 2.08 kg/Nm³ จากตารางข้างต้นจะได้สัดส่วนการใช้เชื้อเพลิง LPG ต่อปริมาณลวดทองแดงมีค่าเฉลี่ยที่ 53.25 kg_{ลวดทองแดง}/Nm³_{LPG} ดังนั้นถ้าต้องการผลิตลวดทองแดงให้ได้ 25 ตัน/ชั่วโมง ต้องให้เชื้อเพลิง LPG แก่เตาหลอมทองแดงประมาณ 470 Nm³/hr

4.3 ระบบการทำงาน อุปกรณ์หลัก และอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ ของเตาหลอมทองแดง

4.3.1 ส่วนประกอบของเตาหลอมทองแดง

ส่วนประกอบหลัก

- ระบบอากาศ (Combustion air system)
- ระบบเชื้อเพลิง (Fuel system)
- ระบบหัวเผา (Furnace burner)

ส่วนประกอบเสริม

- ระบบการตรวจสอบและวิเคราะห์เชื้อเพลิง (Gas sampling and analyzing system)
- ระบบอุ่นอากาศ (Air preheater)

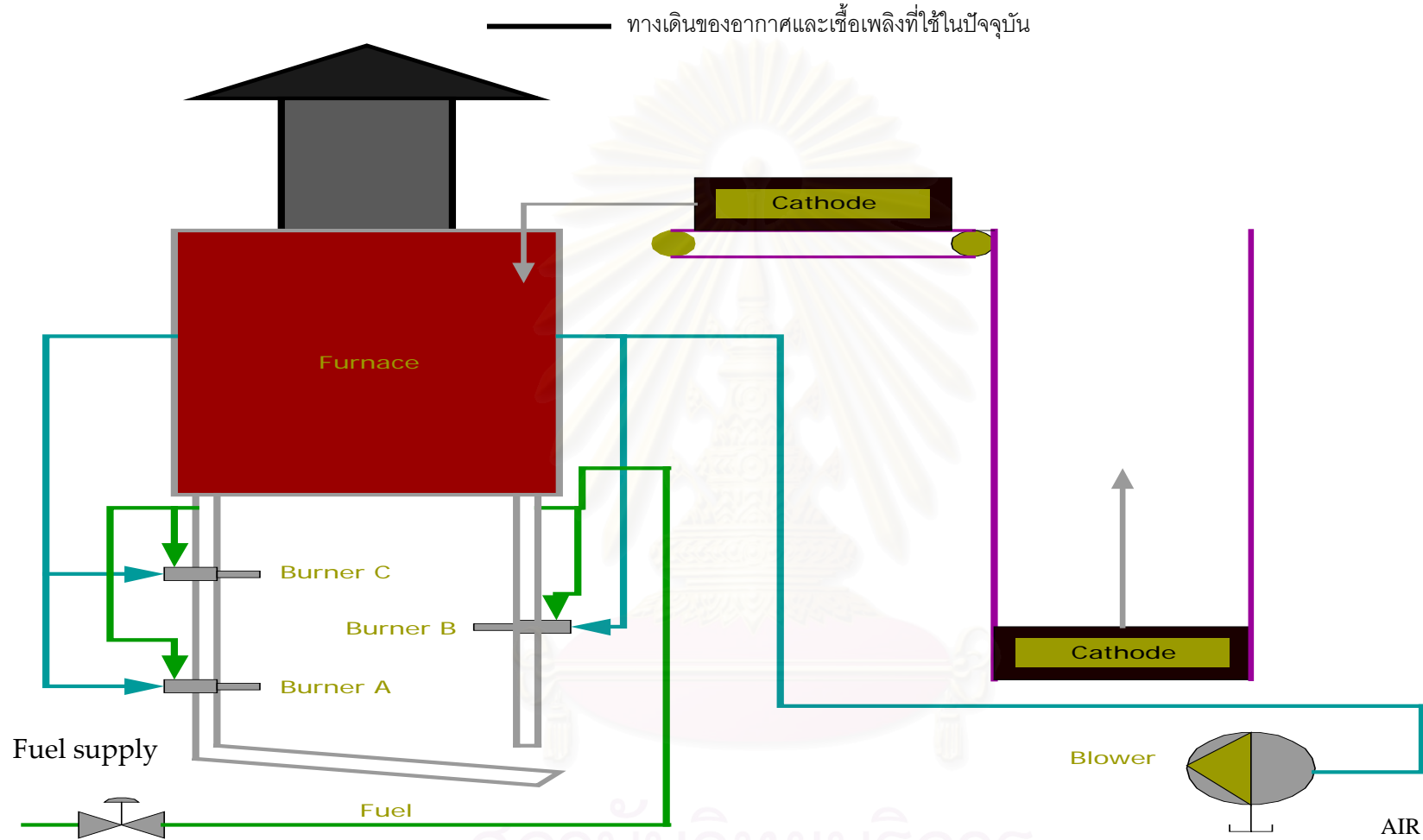
4.3.2 เตาหลอมทองแดง (Shaft melting furnace)

ลักษณะโดยทั่วไป

เตาหลอมทองแดง (Shaft melting furnace) ยี่ห้อ ASARCO เป็นเตาหลอมทรงกระบอกวางในแนวตั้ง โดยมีหัวเผา (Burner) ติดตั้งรอบตัวเตาซึ่งอาจจะเป็นแบบ Gas หรือ Vaporized liquid fuel burner โดยเป็นแบบหนึ่งแถวหรือมากกว่า (เตาหลอมทองแดงในโรงงานปัจจุบันใช้หัวเผาแบบ Gas ดังแสดงในรูปที่ 4.3)

โดยทั่วไปเตาหลอมทองแดงถูกออกแบบให้หลอมทองแดงในรูปแผ่นทองแดงหรือท่อนทองแดงที่คุณภาพต่ำกว่ามาตรฐานได้ อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงให้หลอมวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) สูงได้ โดยเตาหลอม ASARCO นี้มีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น สามารถหลอมวัสดุที่มีขนาดและรูปร่างต่าง ๆ ได้ ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย มีรูปแบบการทำงานที่ง่าย ให้ความร้อนสูงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเตา และมีประสิทธิภาพทางความร้อนสูง การเปิดให้เตาทำงานและการหยุดทำงานทำได้รวดเร็ว เตาหลอมสามารถทำการหลอมได้อย่างต่อเนื่อง การควบคุมการทำงานเป็นไปได้ง่ายและยังสามารถปรับอัตราการหลอมได้อีกด้วย

การเผาไหม้ภายในเตาหลอมทองแดงจะเป็นการเผาไหม้ด้วยหัวเผาที่ให้พลังงานสูง ถ่ายเทความร้อนให้กับทองแดงที่มีขนาดพื้นผิวและค่าการนำความร้อนสูง หลอมละลายเป็นของเหลวไหลลงไปที่ Tap-hole ขนาดของเปลวไฟที่สั้นจะทำให้สะดวกต่อการควบคุมการเผาไหม้เพื่อป้องกันออกซิเจนที่อาจเพิ่มขึ้นในน้ำทองแดง



รูปที่ 4.3 ลักษณะของ Shaft melting furnace ที่ใช้งานในปัจจุบัน

ลักษณะเด่นของระบบเตาหลอมทองแดง (Shaft melting furnace) ยี่ห้อ ASARCO

1. มีความปลอดภัย การสะสมของน้ำทองแดงที่ส่วนล่างของเตาน้อย ช่วยยืดอายุการใช้งานของ อิฐทนไฟและ Tab-hole
2. ประสิทธิภาพการใช้งานเชื้อเพลิงสูงได้ถึง 60%
3. สามารถปรับปรุงให้ทำการหลอมวัสดุได้หลายชนิด
4. ค่าใช้จ่ายต่ำ
5. สามารถที่จะทำการผลิตได้เกิน 200,000 ตัน ในสายการผลิตเดียว
6. ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับฝุ่นละออง
7. ใช้พนักงานในการทำงานน้อย (ประมาณ 1-4 คน)
9. มีพื้นที่การทำงานสะดวกอุปกรณ์ทำงานน้อย

การทำงาน

ชั้นแรกทองแดงจะถูกลำเลียงลงในเตาหลอมผ่านทางช่องลำเลียง จากนั้นเปิดหัวเผาใหม่ให้เผาไหม้จนกระทั่งทองแดงเริ่มหลอมแล้วจึงเพิ่มอัตราการเผาไหม้ ทำการปรับอัตราการป้อนทองแดงไปพร้อมกับการเผาไหม้จนได้อัตราการหลอมที่ต้องการ

ระหว่างการหลอมต้องคอยตรวจสอบปรับค่าต่างๆ คือ อัตราการหลอมทองแดง อัตราการป้อนทองแดง และอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง

การหยุดการไหลของน้ำทองแดงทำได้โดยปิดวาล์วจ่ายก๊าซแต่ยังคงปล่อยให้อากาศไหลเข้าไปได้จนกระทั่งอุณหภูมิของทองแดงต่ำกว่าจุดหลอมเหลวและไม่สามารถที่หลอมได้อีกจึงปิดอากาศได้ ส่วนรางลำเลียงน้ำทองแดงนั้นจะต้องรักษาระดับอุณหภูมิไว้สูงกว่าจุดหลอมเหลวเพื่อให้ น้ำทองแดงไหลไปสู่เตาพักก่อนจะแข็งตัว

การควบคุมการเผาไหม้

การเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงจะต้องถูกควบคุมที่อัตราส่วนคงที่ สำหรับเตาหลอมที่มีขนาดใหญ่ ประมาณ 30 ตัน/ชั่วโมง อากาศเผาไหม้จะถูกอุ่น (Preheat) ที่อุณหภูมิประมาณ 204-260 °C เตาหลอมที่มีขนาดเล็กจะถูกควบคุมเฉพาะส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิง (ปัจจุบันโรงงานไม่ได้ใช้ Air preheater)

ความดันของเชื้อเพลิงและอากาศจะถูกควบคุมแยกแต่ละหัวเผา ซึ่งหัวเผาจะต้องผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้ได้อย่างเหมาะสม โดยตรวจสอบการเผาไหม้สมบูรณ์โดยการวัดค่าคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ของแต่ละหัวเผา ซึ่งแต่ละหัวต้องมีค่า CO อยู่ระหว่าง 1.800 - 3.000 ppm

ระบบอากาศ (Combustion Air System)

Main Blower

ลักษณะโดยทั่วไป

Main blower จะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอากาศสำหรับการเผาไหม้ให้กับหัวเผา ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการเลือก Blower ก็คือความดันใช้งาน และปริมาณการไหลของอากาศ ซึ่งต้องมีปริมาณเหมาะสมเพียงพอกับอัตราการเผาไหม้ Blower จะต้องจ่ายอากาศให้หัวเผาแต่ละหัวที่ความดันประมาณ 4.5 psig โดยตำแหน่งสภาวะของอากาศที่จ่ายต้องมีอัตราการไหลสูงกว่า Surge point (Maximum pressure point) อัตราการเปลี่ยนแปลงความดันของอากาศไม่ควรจะเกิน 10% อีกทั้งอุณหภูมิของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเสียดทานในระบบท่อก็เป็นปัจจัยที่จะต้องให้ความสำคัญ โดยทั่วไป Blower จะเป็นแบบ Centrifugal ความเร็วรอบ 3600 rpm ความดันส่งออกประมาณ 5-6 psig

การติดตั้ง

Blower ควรติดตั้งให้ใกล้กับตัวเตาหลอมเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการเดินท่อและลดความเสียดทานในระบบท่อ อากาศที่ Blower ดูดเข้าไปควรมีแผ่นกรองไว้กรองฝุ่นละอองป้องกันฝุ่นเกาะที่หัวเผาและทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ตำแหน่งที่ติดตั้ง Blower ก็จะต้องมีอากาศเพียงพอที่จะจ่ายให้กับ Burner

การควบคุมการไหลของอากาศ

สำหรับการไหลของอากาศที่จ่ายโดย Blower ถ้าสภาวะตรงกับ “Surge point” จะทำให้อากาศเกิดคลื่นเป็นผลทำให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ และเกิดความเสียหายต่อ Blower จึงต้องให้ Blower ทำงานที่อัตราการไหลสูงกว่า Surge point ตลอดเวลา เมื่อเผาไหม้ที่อัตราต่ำ อากาศที่ส่งไปจะอยู่ต่ำกว่า Surge point ฉะนั้นเมื่อต้องการเผาไหม้ที่อัตราต่ำจะต้องทำการระบายอากาศบางส่วนออกโดยจะส่งสัญญาณควบคุมไปที่ Blower surge system เพื่อเปิดวาล์วระบายอากาศ การปรับการไหลของอากาศจะมีการตรวจสอบที่ทางออกของ Blower เพื่อวัดสภาวะของอากาศและควบคุมอัตราส่วนการผสมกับเชื้อเพลิงที่เหมาะสม

ระบบเชื้อเพลิง (Fuel system)

เป็นระบบจ่ายปริมาณเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสมให้แก่หัวเผาเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

องค์ประกอบเชื้อเพลิงที่เหมาะสมคือ

1. องค์ประกอบของเชื้อเพลิงและค่าความถ่วงจำเพาะต้องคงที่
2. ค่าความร้อนเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1% จากปกติ
3. ปริมาณซัลเฟอร์ไม่เกิน 0.03 ppm.
4. เชื้อเพลิงไม่ปนเปื้อนฝุ่น น้ำมัน น้ำและสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ

เชื้อเพลิงที่ใช้ได้แก่ Natural Gas (Methane), Propane และ Butane ซึ่งข้อกำหนดความเหมาะสมของเชื้อเพลิงจะถูกกำหนดโดย ASARCO melting furnace โดยจะต้องตรวจสอบเกี่ยวกับความเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ ความดันและปริมาตร ปริมาณซัลเฟอร์ ฝุ่นละออง น้ำหรือไอน้ำ ถ้าเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์และจะเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำทองแดง

ระบบการจ่ายเชื้อเพลิง (Fuel supply system)

ระบบการจ่ายเชื้อเพลิงประกอบไปด้วย Main blower, Safety shut-off valve system, Metering, Orifices และ Pressure regulator ซึ่งจะรักษาระดับความดันของหัวเผาไว้ที่ 5-7 psig

Main blower มีหน้าที่จ่ายเชื้อเพลิงให้กับเตาหลอมทองแดง

Safety shut-off valve system เป็นระบบย่อยที่ทำหน้าที่หยุดการจ่ายเชื้อเพลิงเมื่อเกิดสภาวะฉุกเฉิน

Metering ทำหน้าที่วัดค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

Orifices ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง

Pressure regulator ทำหน้าที่รักษาความดันของเชื้อเพลิงให้คงที่

ระบบหัวเผา (Furnace burner)

ลักษณะโดยทั่วไป

หัวเผาที่ใช้ใน shaft melting furnace ยี่ห้อ ASARCO ผลิตโดยบริษัท Trane Thermal, Brook Road, Conshohocken, Pennsylvania, USA 19428 ซึ่งมีข้อดีคือ ความเร็วสูง ให้พลังงานความร้อนสูง ขนาดของเปลวไฟสั้น ผสมกับเชื้อเพลิงได้ดีและมีขนาดเล็ก

การเผาไหม้จะเกิดที่ combustion tile chamber โดยจะมี sleeve combination เป็นตัวทำให้เปลวไฟกระจายตัวเป็นวงแหวนและป้องกัน combustion noise ส่วนประกอบที่จำเป็นของ burner จะประกอบไปด้วยระบบย่อย 2 ส่วนคือ ระบบผสมเชื้อเพลิงกับอากาศซึ่งจะมี orifice plate, elbow, mixer section, water cooled mounting plate, flame holding section และ combustion tile โดยระบบจุดระเบิดประกอบด้วย หม้อแปลงแรงดันและหัวเทียนจุดระเบิด

ระบบผสมเชื้อเพลิงกับอากาศ (แสดงในรูปที่ 4.4)

Air orifice plate

มีลักษณะเป็นแผ่น stainless steel ความหนาขนาด 1/16" ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดของหัวเผา จะทำการปรับหาตำแหน่ง section และทำการยึดติดอย่างถาวรหลังจากหาตำแหน่งที่เหมาะสมกับ elbow ได้ เมื่ออากาศร้อนวิ่งผ่านจะมีความเร็วสูงและจะผ่าน elbow เข้าสู่ mixing section ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่เชื้อเพลิงทำการผสมกับอากาศ

Elbow

ลักษณะทางเดินภายใน elbow จะเป็นแบบพิเศษเพื่อกำหนด section ที่ง่าย ตรงช่องของ elbow จะมีช่องที่สามารถมองเข้าไปเห็นการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ combustion tile และจะมีปะเก็นป้องกันการรั่วไหลของอากาศ

Mixer

มีหน้าที่ผสมอากาศกับเชื้อเพลิง โดย mixer sleeve จะถูกเคลือบด้วย molybdenum disulfide มีข้อดีคือสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงและสามารถถอดประกอบได้ง่าย

Throat

เป็นตำแหน่งตรงส่วนปลายของ mixer section ที่ตำแหน่งนี้จะมีการนำตัวอย่างของส่วนผสมไปทำการวิเคราะห์

Mounting plate

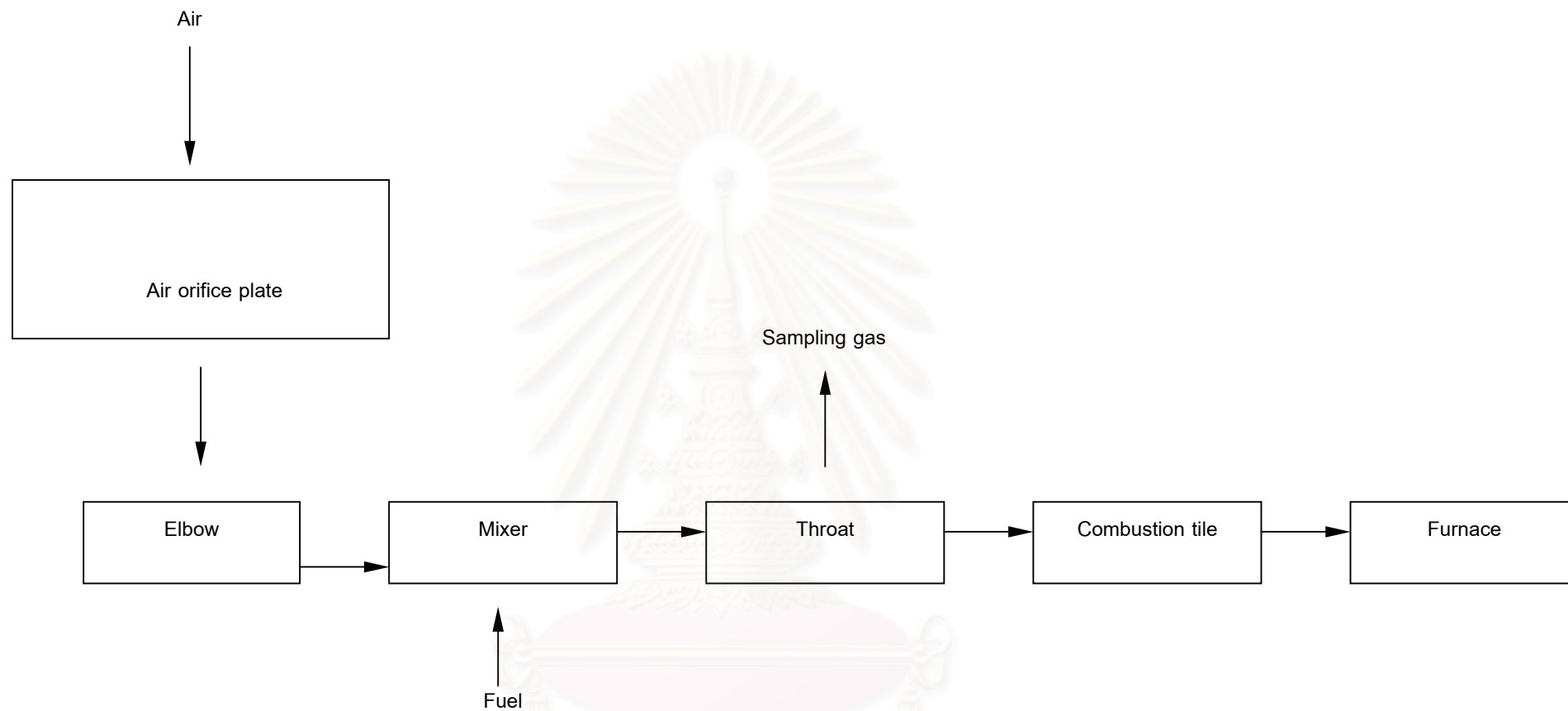
เป็นตัวที่ใช้ยึดหัวเผากับผนังของเตาหลอม ซึ่งจะมีน้ำหล่อเย็นตรงตำแหน่งระหว่าง mixer section กับ combustion tile

Burner plate cooling

น้ำหล่อเย็นที่ไหลรอบๆ หัวเผาจะไหลที่อัตราประมาณ 2-3 gpm burner plate cooling มีหน้าที่รักษา refractory seal ในห้องเผาไหม้และป้องกันความร้อนให้กับ throat, mixer และ elbow section

Combustion tile

เป็นช่องสี่เหลี่ยมส่วนท้ายมี burner mounting plate ยึดติดกับผนังเตาหลอมเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เข้าสู่เตาหลอม ช่องห้องเผาไหม้จะมีความชันที่เหมาะสมกับหัวเผาแต่ละชุด ซึ่งหัวเผาแถวล่างมีความชันประมาณ 2/12 แถวบนประมาณ 1/12 ความชันนี้จะทำให้หัวเผาให้ความร้อนกับน้ำทองแดงได้ดี



รูปที่ 4.4 ระบบผสมอากาศกับเชื้อเพลิงในหัวเผา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระบบจุดระเบิด (Burner ignition system)

ระบบจุดระเบิดเป็นตัวก่อให้เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่ทำการผสมโดยหัวเผา โดยก่อนการจุดระเบิดจะต้องมีการตรวจสอบความดันของอากาศที่ blower ความเร็วของอากาศที่ไหลผ่าน burner และความดันในเตาหลอมซึ่งจะต้องมีค่าตรงตามมาตรฐาน ซึ่งควบคุมโดยผู้ปฏิบัติงานในห้องควบคุม

เชื้อเพลิงที่ผ่านการผสมโดยหัวเผาเรียบร้อยแล้วจะถูกจุดไฟและเผาไหม้ในเตาหลอม ข้อควรระวังสำหรับหัวเทียน คือหัวเทียนมีแรงดันไฟฟ้าสูงมาก ระวังที่หัวเผากำลังทำงานถ้าหัวเผาดับหรือไม่สามารถติดไฟเองได้ หัวเผาจะต้องถูกจุดระเบิดใหม่อีกครั้ง

ระบบการตรวจสอบและวิเคราะห์เชื้อเพลิง (Gas sampling and analyzing system)

ทำหน้าที่ตรวจสอบและวิเคราะห์การผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเพื่อที่จะสามารถควบคุมการเผาไหม้ให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ โดยจะต้องนำส่วนผสมของเชื้อเพลิงกับอากาศที่ผสมกันแล้วที่ burner มาเผาในเครื่องเผาเพื่อหาค่า CO และปรับให้อัตราส่วนของเชื้อเพลิงกับอากาศเกิดการเผาไหม้ที่ได้ค่า CO ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

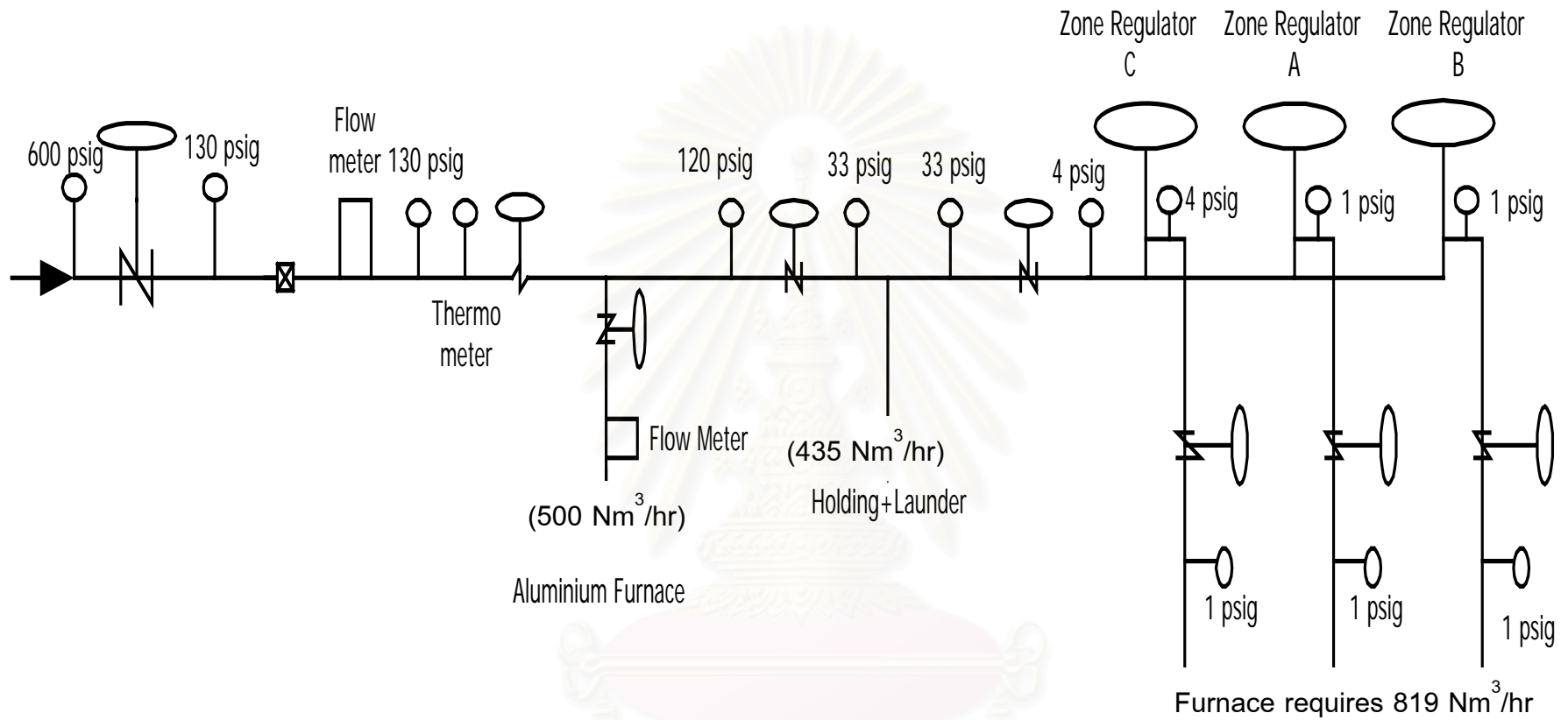
ระบบอุ่นอากาศ (Air preheater)

ทำหน้าที่อุ่นอากาศก่อนเข้าทำการผสมกับเชื้อเพลิง การอุ่นใช้เชื้อเพลิงเป็นตัวอุ่นโดยภายในตัวอุ่นอากาศจะมี burner เผาให้ความร้อนกับอากาศที่ไหลผ่าน เมื่ออากาศร้อนออกจากตัวอุ่นอากาศจะไหลไปยัง Gas-air heat exchanger เพื่อทำการอุ่นเชื้อเพลิง (ปัจจุบันในโรงงานยังไม่มีการใช้งานระบบอุ่นอากาศ)

Gas-Air Heat Exchanger

มีหน้าที่อุ่นเชื้อเพลิงให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยใช้อากาศร้อนที่ผ่านการอุ่นด้วยตัวอุ่นอากาศและ heater ไฟฟ้าเพื่ออุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิเหมาะสม

ระบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดล้วนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเตาหลอมทองแดง (ซึ่งในปัจจุบันโรงงานยังไม่มีกรรมนำระบบอุ่นอากาศมาใช้งาน) และในการใช้งานเตาหลอมทองแดงจะต้องมีการตรวจสอบระบบต่าง ๆ ให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานทุกครั้ง



Burner C Burner A Burner B

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 4.5 ระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

บทที่ 5

แนวทางการแก้ปัญหา

ในการเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซ NG ในครั้งแรกทางบริษัท สายไฟฟ้า บางกอกเคเบิ้ล ได้ทำการทดลองเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซ NG ในเตาหลอมทองแดง โดยทำการเพิ่มความดันของก๊าซ และขยายขนาดรู sleeve ของหัวเผา แต่ทางบริษัทไม่ได้มีการบันทึกข้อมูลการทดลองดังกล่าว อีกทั้งบริเวณอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซแต่ละจุดไม่มีมาตรวัดความดัน จึงไม่สามารถทราบความดันที่ใช้ งานได้ ซึ่งผลการทดลองพบว่าทองแดงสามารถหลอมได้ในตอนเริ่มต้นเท่านั้น แต่ก็ไม่เป็นไปตาม กำลังผลิตที่ต้องการคือประมาณ 22 ตันต่อชั่วโมง และหลังจากนั้นทองแดงจะไม่สามารถหลอมต่อ ไปได้ โดยจะแข็งตัวอยู่ในเตาหลอม และติดอยู่ตามหัวเผา ส่งผลให้ต้องมีการทำความสะอาดหัวเผา ใหม่ทั้งหมด ส่วนทองแดงที่พบว่าสามารถหลอมได้ในช่วงแรกนั้น คุณสมบัติของทองแดงจะไม่ได้ ตามมาตรฐานเนื่องจากปริมาณออกซิเจนมากกว่า 600 ppm จัดเกรดเป็น scrap

จากนั้นผู้วิจัยจึงได้เข้าไปดำเนินการทดลองที่บริษัท สายไฟฟ้า บางกอกเคเบิ้ล เบื้องต้นทาง ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งมาตรวัดความดันที่บริเวณทางเข้า และทางออกของอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ ในแต่ละจุด เพื่อจะได้ทราบความดันที่ใช้งานของก๊าซ LPG จากนั้นจึงทำการคำนวณหาความดันที่ เหมาะสมกรณีเปลี่ยนมาใช้ก๊าซธรรมชาติ รวมทั้งคำนวณหาความดันสูญเสียด้วย จากนั้นจึงทำการ คำนวณหาปริมาณอากาศที่ใช้สำหรับการเผาไหม้กรณีใช้ก๊าซ LPG และ NG เป็นเชื้อเพลิง เมื่อ ทราบปริมาณอากาศที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์แล้วจึงคำนวณหาปริมาณก๊าซ NG ที่ใช้ในการหลอมทองแดง โดยใช้หลักการที่ว่าปริมาณความร้อนที่ทองแดงได้รับต้องเท่าเดิม รวมถึงพิจารณาความสามารถในการจ่ายก๊าซ NG ของหัวเผา เนื่องจากการเปลี่ยนมาใช้ก๊าซ NG นั้น ปริมาณก๊าซที่ผ่านหัวเผาจะเพิ่มขึ้น และสุดท้ายจะแสดงสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ปรับความ ดันก๊าซกรณีใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง และภายหลังจากการปรับตั้งเพื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง โดยจุด ประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้เพื่อให้สามารถเปลี่ยนจากการใช้ก๊าซ LPG มาเป็น NG ได้ในเตาหลอม ทองแดง โดยที่กำลังการผลิตยังคงเดิมคือ ประมาณ 22 ตันต่อชั่วโมง และคุณภาพของทองแดงที่ได้ จะต้องจัดเป็นเกรด 1 คือปริมาณออกซิเจนในลวดทองแดงต้องอยู่ระหว่าง 150 – 250 ppm

5.1 ความดันที่เหมาะสมเมื่อใช้ NG

สำหรับการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจาก LPG เป็น NG เนื่องจากค่าความร้อนและความถ่วงจำเพาะของก๊าซทั้งสองชนิดไม่เท่ากันทำให้ค่า Wobbe Number ของก๊าซทั้งสองไม่เท่ากันด้วย ค่า Wobbe Number ของก๊าซ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างค่าความร้อน กับรากที่สองของความถ่วงจำเพาะของก๊าซ ซึ่งแนวทางในการเปลี่ยนใช้ก๊าซธรรมชาติสามารถทำได้ 2 แนวทางคือ

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Nozzle เท่าเดิม แต่เพิ่มความดันก๊าซ
2. ความดันเท่าเดิม แต่เปลี่ยนขนาดของ Nozzle

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาความดันก๊าซและขนาดของ Nozzle

เส้นผ่านศูนย์กลาง Nozzle สำหรับก๊าซ LPG (D_{LPG})	4	mm
ค่าความร้อน (Heating Value) ของ LPG	90.02	MJ/Nm ³
ค่าความร้อน (Heating Value) ของ NG	33.99	MJ/Nm ³
ค่าความถ่วงจำเพาะของ LPG (SG_{LPG})	1.705	
ค่าความถ่วงจำเพาะของ NG (SG_{NG})	0.800	
ความดันที่ใช้ในหัวเผาเมื่อใช้ก๊าซ LPG (P_{LPG}) เป็นเชื้อเพลิง	8	psig

การคำนวณหาค่า Wobbe Number ของก๊าซสามารถหาดังต่อไปนี้

$$W_{LPG} = \frac{HHV}{SG^{1/2}} \quad (5.1)$$

ค่า Wobbe Number ของ LPG

$$\begin{aligned}
 W_{LPG} &= \frac{HHV_{LPG}}{SG_{LPG}^{1/2}} \\
 &= \frac{90.02 \text{ MJ/Nm}^3}{1.705^{1/2}} \\
 &= 68.94 \text{ MJ/Nm}^3
 \end{aligned}$$

จะได้

ค่า Wobbe Number ของ NG

$$W_{NG} = \frac{HHV_{NG}}{SG_{NG}^{1/2}}$$

จะได้

$$\begin{aligned} &= \frac{33.99 \text{ MJ/Nm}^3}{0.800^{1/2}} \\ &= 38 \text{ MJ/Nm}^3 \end{aligned}$$

ถ้าต้องการให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง Nozzle เท่าเดิม จะต้องเพิ่มแรงดันก๊าซ โดยคำนวณความดันจากสมการ

$$P_{NG} = P_{LPG} \frac{W_{LPG}^2}{W_{NG}^2} \quad (5.2)$$

จะได้

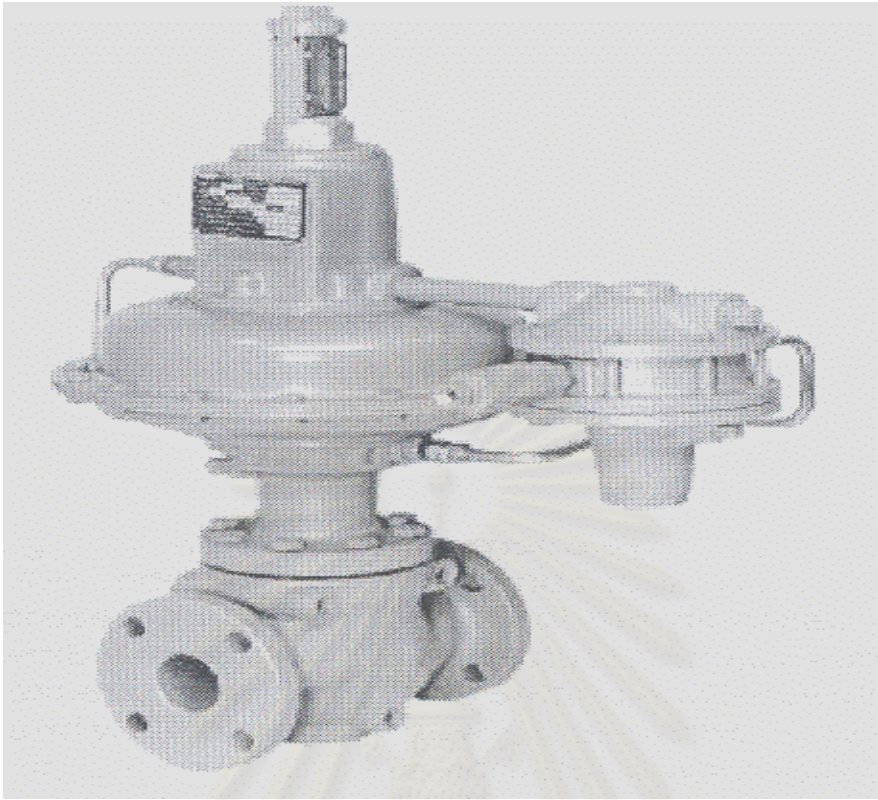
$$\begin{aligned} P_{NG} &= 8 \times \frac{68.94^2}{33.99^2} \\ &= 32.91 \text{ psig} \end{aligned}$$

ดังนั้นแรงดันก๊าซสำหรับก๊าซ NG มีค่าเท่ากับ 32.91 psig (ในทางปฏิบัติอาจจะต้องคำนึงผลกระทบเนื่องจากความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งความดันที่ใช้จริงอาจจะต้องสูงกว่าค่าที่คำนวณได้)

จากการคำนวณค่าความดันสูญเสียในระบบท่อ

- เมื่อใช้ LPG เกิดความดันสูญเสีย 0.836 psig
- เมื่อใช้ NG เกิดความดันสูญเสีย 3.663 psig

จากข้อมูลข้างต้นจำเป็นต้องใช้ความดันที่ทางเข้าอุปกรณ์ปรับความดันเมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมมีค่าประมาณ $32.91 + 3.66 = 36.57$ psig



รูปที่ 5.1 อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซที่ทำการปรับตั้งเมื่อเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ [15]



รูปที่ 5.2 Blower ที่ใช้สำหรับจ่ายอากาศ [15]

ถ้าต้องการให้ความดันเท่าเดิม ดังนั้นต้องเปลี่ยนขนาดของ Nozzle

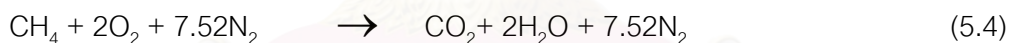
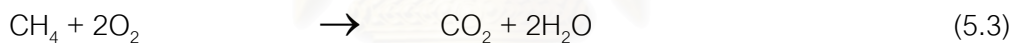
$$D_{NG} = D_{LPG} \times \sqrt{\frac{W_{LPG}}{W_{NG}}}$$

จะได้

$$\begin{aligned} D_{NG} &= 4.8 \times \sqrt{\frac{68.94}{33}} \\ &= 7 \text{ mm} \end{aligned}$$

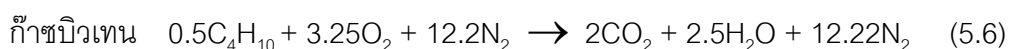
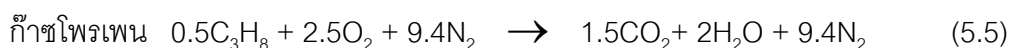
5.2 การเผาไหม้ของ NG และ LPG

สารที่ได้จากปฏิกิริยาของการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของ NG และ LPG จะประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งในอากาศประกอบด้วยก๊าซออกซิเจนประมาณ 21% และก๊าซไนโตรเจนประมาณ 79% หรือสัดส่วน $O_2:N_2 = 1:3.76$ โดยปริมาตร ดังนั้นในกรณีของก๊าซมีเทนสามารถเขียนสมการเผาไหม้ได้ดังนี้



จากอัตราการเผาไหม้ของอากาศที่ใช้ในการสันดาปหรือการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ เทียบกับปริมาณของก๊าซ ที่เรียกว่า Stoichiometric ratio การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของก๊าซมีเทน 1 ส่วนจะใช้ก๊าซออกซิเจน 2 ส่วน ซึ่งก๊าซออกซิเจนจะถูกดึงจากอากาศ 9.52 ส่วน (ออกซิเจน 2 ส่วนและไนโตรเจน 7.52 ส่วน) ดังนั้น Stoichiometric ratio ของก๊าซมีเทนจะเท่ากับ 9.52 Vol air / Vol fuel แต่ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้พอดี โดยทั่วไปจึงพยายามควบคุมให้ปริมาณอากาศต่อปริมาณเชื้อเพลิงมากกว่า Stoichiometric ratio เล็กน้อยเพื่อให้มั่นใจว่าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีลักษณะสมบูรณ์

เมื่อสมมติให้ก๊าซ LPG มีส่วนประกอบของก๊าซในอัตราส่วนโพรเพนและบิวเทน 50:50 การเผาไหม้ที่สมบูรณ์จะต้องใช้ปริมาณอากาศดังนี้



จึงได้ปริมาณของอากาศที่ใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของก๊าซ LPG หรือ Stoichiometric ratio เท่ากับ $2.5+9.4+3.25+12.22= 27.37$ Vol air / Vol gas

จะเห็นได้ว่าปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ของ NG จะน้อยกว่า LPG แต่ในขณะเดียวกัน ค่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากก๊าซ LPG จะมากกว่าก๊าซ NG ดังนั้นในการที่นำก๊าซ NG มาทดแทน LPG โดยให้อัตราของพลังงานความร้อนเท่าเดิมจะต้องเพิ่มปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ผ่านหัวฉีดหรือรูของหัวเผา โดยเพิ่มขนาดของหัวฉีดให้ใหญ่ขึ้น และในขณะเดียวกันต้องปรับอุปกรณ์ปรับความดัน เพื่อเพิ่มอากาศให้สัมพันธ์กับปริมาณก๊าซ NG ที่ไหลผ่านสำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

5.3 การคำนวณปริมาณก๊าซ NG เพื่อให้ได้ความร้อนเท่ากับกรณีใช้ก๊าซ LPG

พลังงานขาเข้าของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง คำนวณได้จากพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Q_f)

$$\begin{aligned} \dot{Q}_f &= \dot{m}_f \times HV & (5.7) \\ &= (340 \text{ Nm}^3/\text{hr}) \times (90.02 \text{ MJ/Nm}^3) \\ &= 30,606.80 \text{ MJ/hr} \end{aligned}$$

พลังงานจากความร้อนสัมผัสอากาศ (Q_{sa})

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{sa} &= \dot{m}_f \times A \times D_a \times C_{p,a} \times (T_a - T_{sur}) & (5.8) \\ &= (340 \text{ Nm}^3/\text{hr}) \times (100.023) \times (1.293 \text{ kg/Nm}^3) \times \\ &\quad (1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}) \times (70-35)^\circ\text{C} \\ &= 1,546.72 \text{ MJ/hr} \end{aligned}$$

พลังงานขาเข้ารวม (Q_{total})

$$\begin{aligned} &= 30,606.80 + 1,546.72 \\ &= 32,153.52 \text{ MJ/hr} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ปริมาณ NG ที่ต้องการเพื่อให้ปริมาณความร้อนเท่ากับ LPG

$$\begin{aligned} \dot{Q}_f &= \dot{m}_f \times HV & (5.9) \\ 32,153.52 &= \dot{m}_f \times 33.99 \\ \dot{m}_f &= 945.97 \text{ Nm}^3/\text{hr} \end{aligned}$$

ปริมาณก๊าซ NG ที่ต้องการคือ 945.97 Nm³/hr ซึ่งหมายความว่าเมื่อเปลี่ยนมาใช้ก๊าซ NG จะต้องเพิ่มปริมาณก๊าซประมาณ 2.78 เท่า

ความสามารถสูงสุดที่หัวเผารุ่น 320 สามารถทำได้

หัวเผา 1 หัวให้ความร้อนได้ 1,800,000 BTU

$$\begin{aligned} \text{ซึ่งมีค่าเท่ากับ } & (1,800,000 \text{ BTU}) \times (1.055 \text{ kJ /BTU}) / (36.94 \times 10^3 \text{ kJ/Nm}^3) \\ & = 48.73 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

หัวเผา 26 หัว

$$\begin{aligned} & = 48.73 \times 26 \\ & = 1,266.92 \text{ Nm}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้นหัวเผาสามารถรับปริมาณเชื้อเพลิงก๊าซ NG 945.97 Nm³/hr ที่ใช้ในการหลอมทองแดงได้

5.4 การทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ

เนื่องจากทางโรงงาน ได้มีการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากก๊าซ LPG เป็นก๊าซ NG ทำให้คุณสมบัติต่างๆเปลี่ยนไปเช่น ความหนาแน่นและค่าความร้อน ซึ่งการที่เราเปลี่ยนมาใช้ก๊าซ NG จะได้ค่าความร้อนที่น้อยกว่าก๊าซ LPG ซึ่งถ้าต้องการให้ได้ค่าความร้อนที่เท่าเดิมต้องเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซทำได้โดยการเพิ่มความแตกต่างของความดันบริเวณทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ

จากสมการ Bernoulli Equation

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \sum \frac{fLV^2}{D2g} + \sum K \frac{V^2}{2g} \quad (5.10)$$

คิดที่สภาวะเข้าออกอุปกรณ์ปรับความดัน และพิจารณาความดันสูญเสียจากการไหลมีค่าน้อยมาก สมการจะลดรูปเหลือ

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \frac{KV^2}{2g} \quad (5.11)$$

กรณีที่ใช้ LPG

$$\frac{\Delta P_{LPG}}{\rho_{LPG} g} = \frac{KV_{LPG}^2}{2g} \quad (5.12)$$

กรณีใช้ก๊าซ NG

$$\frac{\Delta P_{NG}}{\rho_{NG} g} = \frac{KV_{NG}^2}{2g} \quad (5.13)$$

เนื่องจาก K จะแปรผันตาม Valve Sizing และอุปกรณ์ปรับความดันชนิดเดิมไม่มีการเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว ค่า K ของทั้งสองสมการจึงเท่ากัน นำสมการที่ (5.12) หารด้วยสมการที่ (5.13)

$$\frac{\Delta P_{NG}}{\Delta P_{LPG}} = \frac{\rho_{NG} V_{NG}^2}{\rho_{LPG} V_{LPG}^2} \quad (5.14)$$

แทนค่าต่างๆลงในสมการโดยเราสามารถอ่านค่า ΔP_{LPG} ได้จาก Pressure gage ที่บริเวณทางเข้าและทางออกของ Zone Regulator ซึ่งค่าที่อ่านได้มีดังนี้

ความดันที่ทางเข้า = 8 psig

ความดันที่ทางออก = 1 psig

$$\rho_{LPG} = 2.04 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_{NG} = 1.015 \text{ Kg/m}^3$$

เนื่องจากการเปลี่ยนจากก๊าซ LPG เป็น NG เราต้องเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซประมาณ 2.78 เท่า ดังนั้นความเร็วของก๊าซ NG จะเป็น 2.78 เท่าด้วย ตามสมการความต่อเนื่อง

$$V_{NG} = 2.78 V_{LPG}$$

จากสมการจะได้

$$\Delta P_{NG} = \frac{\Delta P_{LPG} \rho_{NG} V_{NG}^2}{\rho_{LPG} V_{LPG}^2} = \frac{7 \times 1.015 \times 2.78^2}{2.04} = 21.3 \text{ psig}$$

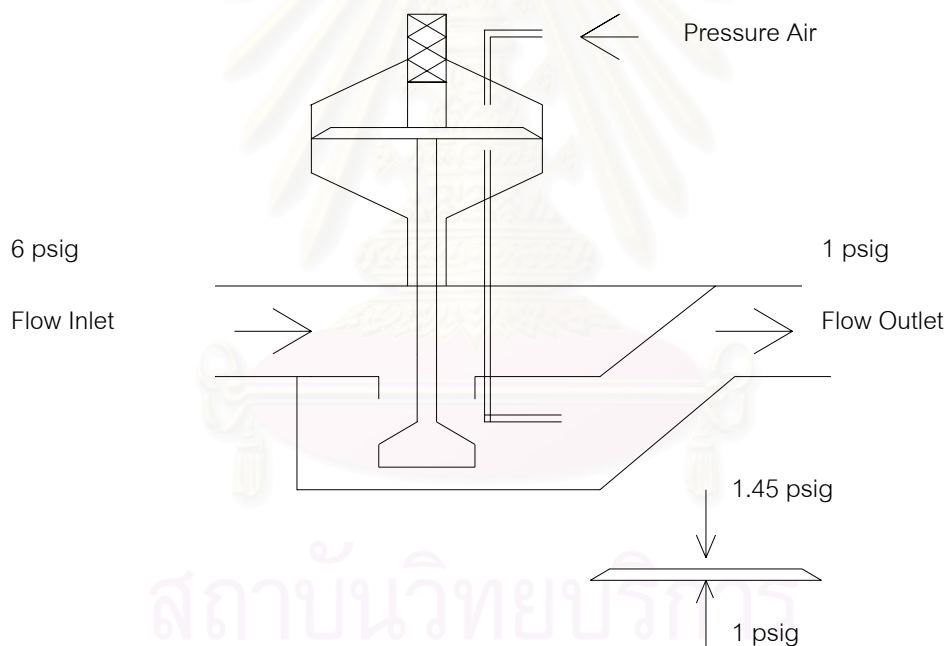
ซึ่งหมายความว่า การที่เปลี่ยนมาใช้ก๊าซ NG ความแตกต่างของความดันที่ทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซจะเปลี่ยนเป็น 21.3 psig

โดยทั่วไปจะใช้ความแตกต่างของความดันระหว่างความดันอากาศกับความดันเชื้อเพลิงที่ทางออกของอุปกรณ์ปรับความดัน เป็นตัวควบคุมการเปิดปิดของวาล์วซึ่งจะเป็นตัวกำหนดอัตราการไหลของเชื้อเพลิงถ้าความดันอากาศมากกว่าความดันเชื้อเพลิง วาล์วจะเปิดให้เชื้อเพลิงไหลได้ ซึ่งปริมาณการไหลของเชื้อเพลิงจะแปรผันกับการเปิดของวาล์วถ้าความดันของเชื้อเพลิงมากกว่าอากาศวาล์วก็จะพยายามปิดเชื้อเพลิงไหลได้น้อยลง

ในกรณีของก๊าซ LPG ความดันของก๊าซที่ส่งมาใช้งานเป็น 8 psig จึงปรับลดความดันลงเหลือ 6 psig จากนั้นจะผ่านอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซอีกตัวหนึ่ง (zone regulator) เพื่อลดความดันลงเหลือ 1 psig เมื่อพิจารณาการทำงานของ (zone regulator) ที่สภาวะการใช้งานของก๊าซ LPG

$$\begin{aligned} \text{ความดันที่ทางเข้า} &= 6 \text{ psig} \\ \text{ความดันที่ทางออก} &= 1 \text{ psig} \\ \text{ความดันอากาศ} &= 40 \text{ นิ้วน้ำ} = 1.45 \text{ psig} \end{aligned}$$

ที่สภาวะนี้ความดันอากาศจะมากกว่า เชื้อเพลิงที่ทางออกจากอุปกรณ์ปรับความดัน คือ $1.45 - 1 = 0.45 \text{ psig}$ ก็จะเปิดให้เชื้อเพลิงไหลได้ ดังแสดงตามรูปที่ 5.3



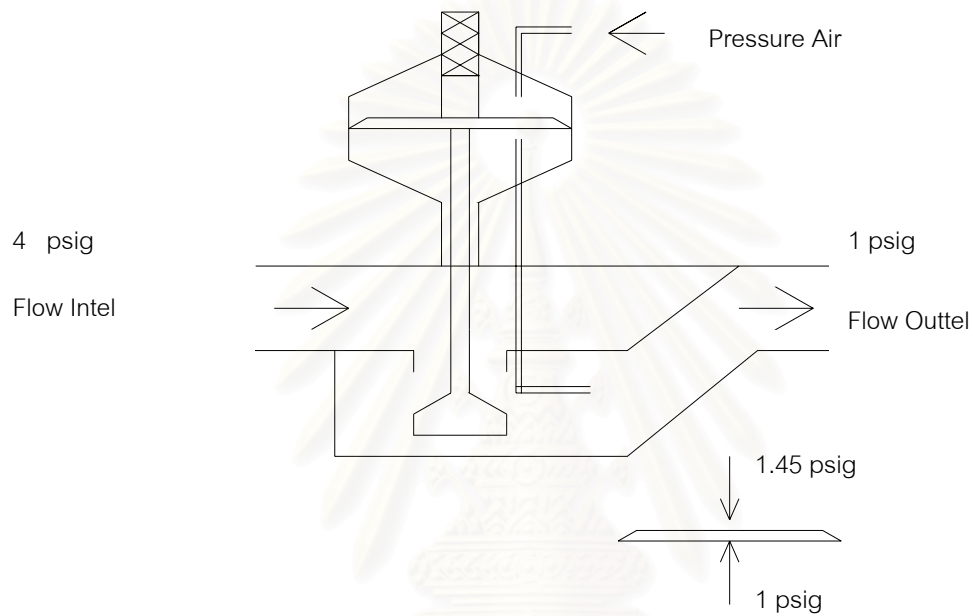
รูปที่ 5.3 สภาวะการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันเมื่อใช้ LPG

เมื่อเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

$$\begin{aligned} \text{ความดันที่ทางเข้า} &= 4 \text{ psig} \\ \text{ความดันที่ทางออก} &= 1 \text{ psig} \\ \rho_{LPG} &= 2.04 \text{ Kg/m}^3 \\ \rho_{LPG} &= 1.015 \text{ Kg/m}^3 \end{aligned}$$

ความดันอากาศ = 40 นิ้วน้ำ = 1.45 psig

สภาวะนี้ความดันอากาศจะมากกว่า เชื้อเพลิงที่ทางออกจากอุปกรณ์ปรับความดัน คือ $1.45 - 1 = 0.45$ psig ก็จะเปิดให้เชื้อเพลิงไหลได้ ดังแสดงตามรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 สภาวะการทำงานของอุปกรณ์ปรับความดันเมื่อใช้ NG

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การทดลอง

ในการทดลองจำเป็นต้องมีการตรวจวัดค่าต่าง ๆ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาการถ่ายเทความร้อน และประสิทธิภาพของเตาโดยจะทำการทดลอง และตรวจวัดค่าทั้งกรณีใช้ก๊าซ LPG และ NG เป็นเชื้อเพลิง โดยในส่วนแรกจะแสดงเครื่องมือที่ใช้ตรวจวัดค่าในงานวิจัย จากนั้นจะแสดงถึงวิธีการทดลอง กรณีใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง และกรณีใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง

6.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

6.1.1 มาตรฐานวัดความดัน

ในการพิจารณาเลือกอุปกรณ์ปรับความดันจำเป็นต้องทราบความดันที่ทางเข้า ความดันที่ทางออกและอัตราการไหล เนื่องจากไม่ทราบค่าความดันที่ทางออกของอุปกรณ์ปรับความดันจึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งมาตรฐานวัดความดันที่บริเวณทางออกของอุปกรณ์ปรับความดัน เพื่อจะได้ทราบความดันที่ทางออกและติดตั้งมาตรฐานบริเวณก่อนเข้าหัวเผาเพื่อให้ทราบสภาวะการทำงานของ LPG เพื่อเป็นข้อมูลในการเปลี่ยนเป็น NG ต่อไป ดังนั้นจึงมีการติดตั้งมาตรฐานวัดความดันที่ทางออกของอุปกรณ์ปรับความดัน และบริเวณก่อนเข้าหัวเผา ทางบริษัทได้จัดซื้อมาตรฐานวัดความดัน (รูปที่ 6.1) เรียบร้อยแล้วจำนวน 15 ตัว โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1 ช่วงความดัน 0-4 bar (0-58 psig) หน้าปัด 4 นิ้ว
- 2 ช่วงความดัน 0-4 bar (0-58 psig) หน้าปัด 2.5 นิ้ว
- 3 ช่วงความดัน 0-2.5 bar (0-36 psig) หน้าปัด 2.5 นิ้ว

การติดตั้ง

1. บริเวณที่ทางออกของอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ (Zone Regulator) 3 ตัว
2. บริเวณก่อนเข้าหัวเผา 12 ตัว แบ่งได้เป็น
 - Row A ติดตั้งที่หัวเผา A3 และ A7 โดยแต่ละหัวเผาจะติดตั้งทั้งท่อของอากาศและเชื้อเพลิงรวมเป็น 4 ตัว
 - Row B ติดตั้งที่หัวเผา B2 และ B4 โดยแต่ละหัวเผาจะติดตั้งทั้งท่อของอากาศและเชื้อเพลิงรวมเป็น 4 ตัว
 - Row C ติดตั้งที่หัวเผา C4 และ C7 โดยแต่ละหัวเผาจะติดตั้งทั้งท่อของอากาศและเชื้อเพลิงรวมเป็น 4 ตัว

6.1.2 อุปกรณ์วิเคราะห์ส่วนประกอบของไอเสีย

รูปที่ 6.2 แสดงอุปกรณ์วิเคราะห์ส่วนประกอบของไอเสียรุ่น Testo 300 ซึ่งสามารถวัดค่า CO, CO₂, O₂ ได้



รูปที่ 6.1 มาตรวัดความดัน



รูปที่ 6.2 อุปกรณ์วิเคราะห์ส่วนประกอบของไอเสีย

6.1.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

รูปที่ 6.3 แสดงอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล Yokogava รุ่น 2455

-ชนิด J ย่านการใช้งาน -170°C ถึง 1000°C

-ชนิด K ย่านการใช้งาน -160°C ถึง 1372°C

6.1.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด

รูปที่ 6.4 แสดงอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ซึ่งสามารถใช้วัดอุณหภูมิและค่า ε ได้

6.1.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล

รูปที่ 6.5 แสดงอุปกรณ์วัดอัตราการไหลซึ่งใช้วัดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ชนิด Fuji electric Portflow

6.1.6 อุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้

รูปที่ 6.6 แสดงอุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้ซึ่งใช้ทดสอบการเผาไหม้โดยจะนำก๊าซและอากาศก่อนจะเข้าเตาหลอมทองแดงมาทำการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เพื่อตรวจสอบปริมาณก๊าซ CO ซึ่งจะควบคุมให้อยู่ระหว่าง 1.80 - 3.00 %Vol ซึ่งเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

6.1.7 อุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิและปริมาณก๊าซ O_2 ในน้ำทองแดง

รูปที่ 6.7 แสดงอุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิและปริมาณก๊าซ O_2 ในน้ำทองแดงซึ่งใช้ในการตรวจสอบอุณหภูมิและปริมาณก๊าซ O_2 ในน้ำทองแดง โดยจะมี probe วัดและแสดงผลทางจอ มอนิเตอร์

6.1.8 อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ

อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซใช้ในการปรับปริมาณก๊าซให้เหมาะสมกับความต้องการของระบบ โดยควบคุมความดันที่ทางเข้าและทางออกของอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ

1. อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซบริเวณทางเข้าโรงงานหลอมทองแดง

รูปที่ 6.8 แสดงอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซบริเวณทางเข้าโรงงานหลอมทองแดงซึ่งเป็นรุ่น Fisher , Type : 99-903 ความดันมากที่สุด 250 psig ความดันน้อยสุด 110 psig สามารถทำอัตราการไหลได้สูงสุด $1,200 \text{ Nm}^3/\text{hr}$

2. อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซก่อนเข้า Zone Regulator

รูปที่ 6.9 แสดงอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซก่อนเข้า Zone Regulator ซึ่งเป็นรุ่น Fisher, 298TEK NO. 6769445 ความดันมากที่สุด 175 psig ความดันน้อยสุด 100 psig สามารถทำอัตราการไหลได้สูงสุด $1,200 \text{ Nm}^3/\text{hr}$

3. อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซบริเวณ Zone Regulator

รูปที่ 6.10 แสดงอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซบริเวณ Zone Regulator ซึ่งเป็นรุ่น Pyronics 5213-SR-500 ความดันทางเข้า 5 psig สามารถทำอัตราการไหลได้สูงสุด 990 Nm³/hr โดยจะมี 3 ตัวแต่ละตัวควบคุมการจ่ายก๊าซแยกไปตาม Row A, Row B, Row C



รูปที่ 6.3 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 6.4 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด



รูปที่ 6.5 อุปกรณ์วัดอัตราการไหล



รูปที่ 6.6 อุปกรณ์ทดสอบการเผาไหม้



รูปที่ 6.7 อุปกรณ์ตรวจสอบอุณหภูมิและปริมาณก๊าซ O_2 ในน้ำทองแดง



รูปที่ 6.8 อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซบริเวณทางเข้าโรงงานหลอมทองแดง



รูปที่ 6.9 อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซก่อนเข้า Zone Regulator



รูปที่ 6.10 อุปกรณ์ปรับความดันก๊าซบริเวณ Zone Regulator

6.2 วิธีการทดลอง

6.2.1 วิธีการทดลองหลอมทองแดงโดยใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงที่โรงงานสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล

1. ทำการตรวจสอบอุปกรณ์ในระบบท่อส่งก๊าซปิโตรเลียมเหลว
2. ตรวจสอบเช็คให้วาล์วก๊าซที่หัวเผารอบเตาหลอมซึ่งมีทั้งหมด 26 หัวอยู่ในตำแหน่งปิด
3. ทำการตรวจเช็คแรงดันที่ท่อ main gas ซึ่งต้องมีแรงดันที่ 120 psig โดยทำการตรวจเช็คที่เกจวัดความดันที่ท่อ main gas
4. เปิดวาล์ว main gas หน้าและหลัง Regulator ชุดที่ 1 เพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่ระบบเตาหลอมและทำการตรวจเช็คแรงดัน ซึ่งต้องมีแรงดันอยู่ที่ 8 psig
5. เปิด Air compressor ให้แรงดันอยู่ที่ 25-30 psig
6. ทำการปรับปุ่ม Blower surge controller ไปที่ตำแหน่งปิด
7. กดปุ่ม Blower start ซึ่งจะมีไฟแสดง
8. ปรับปุ่ม Blower surge controller ไปที่ตำแหน่งเปิด
9. ปรับแรงดัน Air manifold pressure ปุ่ม Low A Low B และ Low C ไปที่ 15-20" water
10. กดปุ่ม ignition start เพื่อทำการจุดระเบิด
11. รอจนกระทั่งไฟ Gas valve latch ติด
12. เปิด safety valve by pass ที่หน้าห้องควบคุม
13. รอจนกระทั่งแรงดันก๊าซหลัง safety valve by pass ขึ้นไปที่ 4-6 psig
14. หลังจากนั้นไฟที่ Gas valve latch จะติด
15. เปิด safety valve main gas ทั้ง 2 ตัวพร้อมกันเพื่อปล่อยให้ก๊าซไปที่เตาหลอมทองแดง
16. หลังจากเปิด safety valve main gas แล้วไฟ Gas valve latch open จะติด
17. ทำการเปิดวาล์วก๊าซที่เตาหลอมโดยเริ่มที่ burner row A และตรวจสอบว่าหัวเผาทุกหัวจะต้องติดโดยการสังเกตที่กระจกแก้วที่หัวเผา
18. เพิ่มแรงดัน Air manifold pressure ของ row A ไปที่ 30" WC
19. รอจนกระทั่งน้ำทองแดงเริ่มละลายแล้วไหลออกมาที่ราง โดยที่ทองแดงที่ใช้หลอมนั้นมาจาก 2 ส่วนคือ ทองแดงที่สังข์ข้อ (Cathode) และ Scrap ซึ่งเป็นทองแดงที่เสียจากกระบวนการผลิต โดยที่จะใส่ทองแดงทั้งสองส่วนนี้เข้าไปในเตาหลอมที่ด้านบน
20. หลังจากนั้นทำการเปิดวาล์วก๊าซที่เตาหลอมของ row B และ row C พร้อมกับเช็คให้หัวเผาทุกหัวต้องติดทุกตัว
21. เพิ่มแรงดัน Air manifold pressure ไปที่ 20" WC และ 15" WC ตามลำดับ

22. รอประมาณ 15-30 นาที น้ำทองแดงจะไหลลงสู่เตาพัก นั้นให้เพิ่มแรงดัน Air manifold pressure โดยกดปุ่ม Rise ให้ row A อยู่ที่ประมาณ 40-45" WC row B ที่ประมาณ 30-35" WC และ row C อยู่ที่ประมาณ 20-25" WC

23. ในขณะที่เริ่มเดินเครื่องนั้นต้องมีการตรวจเช็คค่า CO เนื่องจากที่หัวเผา นั้นจะมีท่ออากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงไปทำการเผาไหม้ที่ห้องควบคุมที่อุณหภูมิประมาณ 900°C โดยจะควบคุมให้ค่า CO อยู่ระหว่าง 1.80-3.00 ppm

24. ทำการบันทึกปริมาณก๊าซออกซิเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์และอุณหภูมิก๊าซเสีย

25. ทำการบันทึกอุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตา, อุณหภูมิทองแดงออกจากเตา, อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้, อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นเข้า, อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นออก, อุณหภูมิ ลังแวดล้อมและ อุณหภูมิผิวเตา

26. ทำการบันทึกปริมาณทองแดง, ปริมาณก๊าซที่ใช้และปริมาณน้ำหล่อเย็น

27. ทำสมมูลความร้อน คำนวณการถ่ายเทความร้อนและหาประสิทธิภาพเตาหลอมทองแดง

6.2.2 วิธีการทดลองหลอมทองแดงโดยใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงที่โรงงานสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล

1. ทำการปรับตั้งอุปกรณ์ในระบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติเพื่อเตรียมใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง
2. ตรวจเช็ควาล์วหลักก๊าซที่หัวเผารอบเตาหลอมซึ่งมีทั้งหมด 26 หัวอยู่ในตำแหน่งปิด
3. ทำการตรวจเช็คแรงดันที่ท่อ main gas ซึ่งต้องมีแรงดันที่ 120 psig โดยทำการตรวจเช็คที่เกจวัดความดันที่ท่อ main gas
4. เปิดวาล์ว main gas หน้าและหลัง Regulator ชุดที่ 1 เพื่อปล่อยก๊าซเข้าสู่ระบบเตาหลอมและทำการตรวจเช็คแรงดัน ซึ่งต้องมีแรงดันอยู่ที่ 33 psig
5. เปิด Air compressor ให้แรงดันที่ 25-30 psig
6. ทำการปรับปุ่ม Blower surge controller ไปที่ตำแหน่งปิด
7. กดปุ่ม Blower start ซึ่งจะมีไฟแสดง
8. ปรับปุ่ม Blower surge controller ไปที่ตำแหน่งเปิด
9. ปรับแรงดัน Air manifold pressure ปุ่ม Low A Low B และ Low C ไปที่ 15-20"
10. กดปุ่ม ignition start เพื่อทำการจุดระเบิด
11. รอจนกระทั่งไฟ Gas valve latch ติด
12. เปิด safety valve by pass ที่หน้าห้องควบคุม

13. รอกจนกระทั่งแรงดันก๊าซหลัง safety valve by pass ขึ้นไปที่ 4-6 psig
14. หลังจากนั้นไฟที่ Gas valve latch จะติด
15. เปิด safety valve main gas ทั้ง 2 ตัวพร้อมกันเพื่อปล่อยให้ก๊าซไปที่เตาหลอมทองแดง
16. หลังจากเปิด safety valve main gas แล้วไฟ Gas valve latch open จะติด
17. ทำการเปิดวาล์วก๊าซที่เตาหลอมโดยเริ่มที่ burner row A และตรวจสอบว่าหัวเผาทุกหัวจะต้องติดโดยการสังเกตที่กระจกแก้วที่หัวเผา
18. เพิ่มแรงดัน Air manifold pressure ของ row A ไปที่ 30" WC
19. รอกจนกระทั่งน้ำทองแดงเริ่มละลายแล้วไหลออกมาที่ราง โดยที่ทองแดงที่ใช้หลอมนั้นมาจาก 2 ส่วนคือ ทองแดงที่สังข์ชื่อ (Cathode และ Scrap) ซึ่งเป็นทองแดงที่เสียจากกระบวนการผลิต โดยที่จะใส่ทองแดงทั้งสองส่วนนี้เข้าไปในเตาหลอมที่ด้านบน
20. หลังจากนั้นทำการเปิดวาล์วก๊าซที่เตาหลอมของ row B และ row C พร้อมกับเช็คหัวเผาทุกหัวว่าติดทุกตัว
21. เพิ่มแรงดัน Air manifold pressure ไปที่ 20" WC และ 15" WC ตามลำดับ
22. รอประมาณ 15-30 นาที น้ำทองแดงจะไหลลงสู่เตาพักนั้นให้เพิ่มแรงดัน Air manifold pressure โดยกดปุ่ม Rise ให้ row A อยู่ที่ประมาณ 40-45" WC row B ที่ประมาณ 30-35" WC และ row C อยู่ที่ประมาณ 20-25" WC
23. ในขณะที่เริ่มเดินเครื่องนั้นต้องมีการตรวจเช็คค่า CO เนื่องจากที่หัวเผานั้นจะมีท่ออากาศที่ผสมกับเชื้อเพลิงไปทำการเผาไหม้ที่ห้องควบคุมที่อุณหภูมิประมาณ 900°C โดยจะควบคุมให้ค่า CO อยู่ระหว่าง 1.80-3.00 ppm
24. ทำการบันทึกปริมาณก๊าซออกซิเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์และอุณหภูมิก๊าซเสีย
25. ทำการบันทึกอุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตา, อุณหภูมิทองแดงออกจากเตา, อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิผิวเตา
26. ทำการบันทึกปริมาณทองแดง, ปริมาณก๊าซที่ใช้และปริมาณน้ำหล่อเย็น
27. ทำสมดุอุณหภูมิ ความร้อน คำนวณการถ่ายเทความร้อนและหาประสิทธิภาพเตาเปรียบเทียบกับกรณีใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

บทที่ 7

ผลการทดลอง

7.1 การทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดง

การทำสมดุลความร้อนเป็นการวัดค่าและคำนวณการใช้พลังงานของเตาหลอมทองแดง เพื่อจะได้ทราบถึงการใช้พลังงานความร้อนและประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดง โดยจะทำสมดุลความร้อนกรณีใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงและกรณีใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบระหว่างสองกรณีรวมถึงคำนวณอัตราการประหยัดเมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง

7.1.1 กรณีที่ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง

จากการตรวจสอบสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงในขณะที่ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงสามารถแสดงข้อมูลได้ดังนี้ ตารางที่ 7.1 แสดงถึงข้อมูลคุณสมบัติทั่วไปของก๊าซ LPG ส่วนตารางที่ 7.2 แสดงข้อมูลที่วัดได้จากการทำงานของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง และตารางที่ 7.3 เป็นการคำนวณความร้อนในส่วนต่างๆที่เกิดขึ้น ส่วนตารางที่ 7.4 สรุปการคำนวณสมดุลความร้อนในส่วนต่างๆที่เกิดขึ้น และประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 7.1 ข้อมูลคุณสมบัติโดยทั่วไปของก๊าซ LPG

ข้อมูลทั่วไป	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	C_{pa}	kJ/kg-C	1.005
ค่าความร้อนจำเพาะของทองแดง	C_{pf}	kJ/kg-C	0.38
ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ	C_{pw}	kJ/kg-C	4.187
ความหนาแน่นของอากาศ	D_a	kg/Nm ³	1.293
ความร้อนต่ำของ LPG	NHV	MJ/Nm ³	90.02
ความหนาแน่นที่ 0 °C	D_{LPG}	kg/Nm ³	2.04
ความร้อนแฝงของทองแดง	LH	kJ/kg	205.4

ตารางที่ 7.2 ข้อมูลการตรวจวัดสภาวะการสันดาปของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า				
			ค่าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ				เฉลี่ย
ข้อมูลจากการตรวจวัด							
เวลา			13:00	13:15	13:30	13:45	
ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	O_2	%	16.6	15.7	15.5	16.2	16.0
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย	CO	ppm	900	753	981	922	889
อุณหภูมิก๊าซเสีย	T_g	$^{\circ}C$	363	367	362	366	364.5
ปริมาณทองแดง	F	Ton/hr	22.06				
ปริมาณ LPG	FH	Nm^3/hr	340				
ปริมาณน้ำหล่อเย็น	FW	m^3/hr	89.4				
อุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตา	T_{ci}	$^{\circ}C$	35				
อุณหภูมิทองแดงออกจากเตา	T_{co}	$^{\circ}C$	1080				
อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้	T_{ai}	$^{\circ}C$	70				
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า	T_{wi}	$^{\circ}C$	32				
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก	T_{wo}	$^{\circ}C$	35				
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	T_{amb}	$^{\circ}C$	35				
อุณหภูมิอ้างอิง	T_r	$^{\circ}C$	35				
อุณหภูมิผิวเตา	T_c	$^{\circ}C$	280	195	280	300	236.75
			273	205	188	250	
			220	182	180	215	
			255	290	215	260	
พื้นที่ผิวเตา	A	m^2	40.24				
Emissivity	E		0.4				

ตารางที่ 7.3 การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	A_o	Nm^3/Nm^3	23.815
$A_o = (1.09 \times NHV - 0.25)/4.187$			
ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	G_o	Nm^3/Nm^3	24.760
$G_o = (1.14 \times NHV + 0.25)/4.187$			
อัตราส่วนอากาศ	m		4.20
$m = 21/(21 - O_2)$			
ปริมาณอากาศจริง	A	Nm^3/Nm^3	100.023
$A = A_o * m$			
ปริมาณก๊าซเสียจริง	G	Nm^3/Nm^3	100.968
$G = G_o + A_o(m - 1)$			
ความร้อนเข้า			
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Q_f	MJ/hr	30,606.80
$Q_f = FH * NHV$			
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Q_a	MJ/hr	1,546.72
$Q_a = FH \times A \times D_a \times C_{pa} \times (T_{ai} - T_r)/1000$			
ความร้อนเข้ารวม		MJ/hr	32,153.52
ความร้อนออก			
ความร้อนไปกับทองแดง	Q_{cu}	MJ/hr	13,291.15
$Q_{cu} = (F * C_{pf} * (T_{co} - T_{ci}) + F * LH)/1000$			
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย	Q_{flue}	MJ/hr	15,629.45
$Q_{flue} = FH \times G \times 0.33 \times 4.187 \times (T_g - T_r)/1000$			
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Q_w	MJ/hr	1,116.54
$Q_w = (FW * C_{pw} * (T_{wo} - T_{wi}))/1000$			
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	$Q_{wall\ loss}$	MJ/hr	474.19
$Q_{wall\ loss} = \sum_{i=1}^N \left[2.2 \times (T_{wall} - T_{amb})^{5/4} + 4.88 \epsilon \left[\frac{(T_{wall} + 273)^4}{100} - \frac{(T_{amb} + 273)^4}{100} \right] \times A_i \times 4.186 \right] / 1000$			
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	Q_{co}	MJ/hr	856.50
$Q_{co} = FH * D_i * G * CO * 13.76/10^6$			
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Q_l	MJ/hr	785.69
$Q_l = Q_f + Q_a - Q_{cu} - Q_{flue} - Q_w - Q_{wall\ loss} - Q_{co}$			
ความร้อนออกรวม			32,153.52

ตารางที่ 7.4 สรุปการคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า	%
ความร้อนเข้า				
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Q_f	MJ/hr	30,606.80	95.19
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Q_{sa}	MJ/hr	1,546.72	4.81
รวม		MJ/hr	32,153.52	100
ความร้อนออก				
ความร้อนไปกับทองแดง	Q_{cu}	MJ/hr	13,291.15	41.34
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย	Q_{flue}	MJ/hr	15,629.45	48.61
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Q_w	MJ/hr	1,116.54	3.47
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	$Q_{wall\ loss}$	MJ/hr	474.19	1.47
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	Q_{co}	MJ/hr	856.5	2.66
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Q_l	MJ/hr	785.69	2.44
รวม		MJ/hr	32,153.52	100

หลังจากทำการศึกษาความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นกับเตาหลอมทองแดงแล้ว จะพบว่าความร้อนได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์และสูญเสียไปในรูปแบบต่างๆตามที่ได้แสดงให้เห็นจากตารางที่ 7.4 ซึ่งข้อสรุปต่อมาจากที่ทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงคือสามารถที่จะหาค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงในสภาวะปัจจุบันที่ใช้เชื้อเพลิง LPG ได้เท่ากับ 41.34 เปอร์เซ็นต์

7.1.2 กรณีที่ใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งแรก)

การทำสมดุลความร้อนเป็นการวัดค่าและคำนวณการใช้พลังงานของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง เพื่อจะได้ทราบถึงการใช้พลังงานความร้อนและประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงในสภาวะที่เปลี่ยนมาใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง โดยแสดงค่าพลังงานความร้อนในส่วนต่างๆที่เข้าและออกจากเตาหลอมทองแดงที่ใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง โดยตารางที่ 7.5 แสดงถึงข้อมูลคุณสมบัติทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณ ตารางที่ 7.6 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทำงานของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง และตารางที่ 7.7 เป็นการคำนวณความร้อนในส่วนต่างๆที่เกิดขึ้น ส่วนตารางที่ 7.8 สรุปสมดุลความร้อนในส่วนต่างๆที่เกิดขึ้น และประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 7.5 ข้อมูลคุณสมบัติโดยทั่วไปของก๊าซ NG (การทดลองครั้งแรก)

ข้อมูลทั่วไป	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	C_{pa}	kJ/kg-C	1.005
ค่าความร้อนจำเพาะของทองแดง	$C_{p,cu}$	kJ/kg-C	0.38
ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ	C_{pw}	kJ/kg-C	4.187
ความหนาแน่นของ NG	D_f	kg/Nm ³	1.015
ความหนาแน่นของอากาศ	D_a	kg/Nm ³	1.293
ความร้อนต่ำของ NG	NHV	MJ/Nm ³	33.99
ความร้อนแฝงทองแดง	LH	kJ/kg	205.4

ตารางที่ 7.6 ข้อมูลการตรวจวัดสภาวะการสันดาปของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งแรก)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า				
			ค่าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ				เฉลี่ย
ข้อมูลจากการตรวจวัด							
เวลา			13.00	13:15	13:30	13:45	
ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	O_2	%	13.5	11.8	15.3	15.4	14
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย	CO	ppm	2900	2800	2800	2700	2800
อุณหภูมิก๊าซเสีย	T_g	°C	407	430	378	404	404.75
ปริมาณทองแดง	F	Ton/hr	22				
ปริมาณ NG	FH	Nm ³ /hr	790				
ปริมาณน้ำหล่อเย็น	FW	m ³ /hr	89.5				
อุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตา	T_{ci}	°C	30.5				
อุณหภูมิทองแดงออกจากเตา	T_{co}	°C	1080				
อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้	T_{ai}	°C	72.14				
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า	T_{wi}	°C	32				
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก	T_{wo}	°C	36				
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	T_{amb}	°C	35				
อุณหภูมิอ้างอิง	T_r	°C	35				
อุณหภูมิผิวเตา	T_c	°C	258	228	231	240	218.13
			274	241	249	251	
			187	167	184	188	
			216	171	210	195	
พื้นที่ผิวเตา	A	m ²	40.24				
Emissivity	E		0.4				

ตารางที่ 7.7 การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งแรก)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	A_o	Nm^3/Nm^3	9.17
$A_o = (1.09 \times NHV - 0.25)/4.187$			
ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	G_o	Nm^3/Nm^3	10.16
$G_o = (1.14 \times NHV + 0.25)/4.187$			
อัตราส่วนอากาศ	m		3
$m = 21/(21 - O_2)$			
ปริมาณอากาศจริง	A	Nm^3/Nm^3	27.51
$A = A_o \times m$			
ปริมาณก๊าซเสียจริง	G	Nm^3/Nm^3	28.5
$G = G_o + A_o(m - 1)$			
ความร้อนเข้า			
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Q_f	MJ/hr	26,852.10
$Q_f = FH \times NHV$			
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Q_a	MJ/hr	1048.88
$Q_a = FH \times A \times D_a \times C_{pa} \times (T_{ai} - T_r)/1000$			
ความร้อนเข้ารวม	$(Q_{total,in})$	MJ/hr	27,900.98
ความร้อนออก			
ความร้อนไปกับทองแดง	Q_{cu}	MJ/hr	13,292.62
$Q_{cu} = F \times C_{p,cu} \times (T_{co} - T_{ci}) + F \times LH$			
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย	Q_{flue}	MJ/hr	11,502.63
$Q_{flue} = FH \times G \times 0.33 \times 4.187 \times (T_g - T_r)/1000$			
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Q_w	MJ/hr	1490.39
$Q_w = FW \times C_{pw} \times (T_{wo} - T_{wi})$			
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Q_{wall}	MJ/hr	667.75
$Q_{wall} = \sum_{i=1}^n \left[\left[2.2(T_c - T_r)^{1.75} + 4.89E \left[\frac{(T_c + 273)^4}{100} - \frac{(T_r + 273)^4}{100} \right] \right] \times A_i \times 4.186 \right] / 1000$			
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	Q_{co}	MJ/hr	880.47
$Q_{co} = FH \times D_f \times G \times CO \times 13.76/10^6$			
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Q_{un}	MJ/hr	67.12
$Q_{un} = Q_c + Q_a - Q_{cu} - Q_{flue} - Q_w - Q_{wall} - Q_{co}$			
ความร้อนออกรวม	$(Q_{total,out})$	MJ/hr	27,900.98

ตารางที่ 7.8 สรุปการคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งแรก)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า	%
ความร้อนเข้า				
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Q_f	MJ/hr	26,852.10	96.24
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Q_{sa}	MJ/hr	1048.88	3.76
รวม		MJ/hr	27,900.98	100.00
ความร้อนออก				
ความร้อนไปกับทองแดง	Q_{cu}	MJ/hr	13,292.62	47.64
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย	Q_{flue}	MJ/hr	11,502.63	41.23
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Q_w	MJ/hr	1490.39	5.34
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	$Q_{wall\ loss}$	MJ/hr	667.75	2.39
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	Q_{co}	MJ/hr	880.47	3.16
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Q_l	MJ/hr	67.12	0.24
รวม		MJ/hr	27,900.98	100.00

หลังจากทำการศึกษาความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นกับเตาหลอมทองแดงแล้ว พบว่าความร้อนได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์และสูญเสียไปในรูปแบบต่างๆตามที่ได้แสดงให้เห็นจากตารางที่ 7.8 ซึ่งข้อสรุปต่อมาจากที่ทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงคือ สามารถที่จะหาค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงในสภาวะที่ใช้เชื้อเพลิง NG ได้เท่ากับ 47.64 เปอร์เซ็นต์

7.1.3 กรณีที่ใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งที่สอง)

การทำสมดุลความร้อนกรณีใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิงหลังจากทำการทดลองครั้งที่สองสามารถแสดงข้อมูลได้ดังนี้ ตารางที่ 7.9 แสดงถึงข้อมูลคุณสมบัติทั่วไปที่ใช้ในการคำนวณ ตารางที่ 7.10 แสดงข้อมูลที่วัดได้จากการทำงานของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง และตารางที่ 7.11 เป็นการคำนวณความร้อนในส่วนต่างๆที่เกิดขึ้น ส่วนตารางที่ 7.12 สรุปสมดุลความร้อนในส่วนต่างๆที่เกิดขึ้น และประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง ตารางที่ 7.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการทำสมดุลความร้อนระหว่างกรณีใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง กับกรณีใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง

ตารางที่ 7.9 ข้อมูลคุณสมบัติโดยทั่วไปของก๊าซ NG (การทดลองครั้งที่สอง)

ข้อมูลทั่วไป	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	C_{pa}	kJ/kg-C	1.005
ค่าความร้อนจำเพาะของทองแดง	$C_{p, cu}$	kJ/kg-C	0.38
ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำ	C_{pw}	kJ/kg-C	4.187
ความหนาแน่นของ NG	D_f	kg/Nm ³	1.015
ความหนาแน่นของอากาศ	D_a	kg/Nm ³	1.293
ความร้อนต่ำของ NG	NHV	MJ/Nm ³	33.99
ความร้อนแฝงทองแดง	LH	kJ/kg	205.4

ตารางที่ 7.10 ข้อมูลการตรวจวัดสภาวะการสันดาปของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งที่สอง)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า				เฉลี่ย
			ค่าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ				
ข้อมูลจากการตรวจวัด							
เวลา			10:00	10:15	10:30	10:45	
ปริมาณออกซิเจนในก๊าซเสีย	O_2	%	13.8	12.3	15.0	15.9	14.25
ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย	CO	ppm	3000	3000	2800	2700	2875.0
อุณหภูมิก๊าซเสีย	T_g	°C	405	433	381	406	406.3
ปริมาณทองแดง	F	Ton/hr	21.806				
ปริมาณ NG	FH	Nm ³ /hr	819				
ปริมาณน้ำหล่อเย็น	FW	m ³ /hr	89.4				
อุณหภูมิทองแดงก่อนเข้าเตา	T_{ci}	°C	35				
อุณหภูมิทองแดงออกจากเตา	T_{co}	°C	1080				
อุณหภูมิอากาศเข้าห้องเผาไหม้	T_{ai}	°C	71				
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า	T_{wi}	°C	34				
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก	T_{wo}	°C	36				
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	T_{amb}	°C	35				
อุณหภูมิอ้างอิง	T_r	°C	35				
อุณหภูมิผิวเตา	T_c	°C	260	230	232	242	221.875
			275	245	250	252	
			190	170	185	190	
			215	206	212	196	
พื้นที่ผิวเตา	A	m ²	40.24				
Emissivity	E		0.4				

ตารางที่ 7.11 การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งที่สอง)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า
ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี	A_o	Nm^3/Nm^3	8.60
$A_o = (1.09 \times NHV)/4.187 - 0.25$			
ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี	G_o	Nm^3/Nm^3	9.50
$G_o = (1.14 \times NHV)/4.187 + 0.25$			
อัตราส่วนอากาศ	m		3.11
$m = 21/(21 - O_2)$			
ปริมาณอากาศจริง	A	Nm^3/Nm^3	26.746
$A = A_o \times m$			
ปริมาณก๊าซเสียจริง	G	Nm^3/Nm^3	27.646
$G = G_o + A_o(m - 1)$			
ความร้อนเข้า			
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Q_f	MJ/hr	27,837.81
$Q_f = FH \times NHV$			
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Q_a	MJ/hr	1,024.73
$Q_a = FH \times A \times D_a \times C_{pa} \times (T_{ai} - T_r)/1000$			
ความร้อนเข้ารวม	$(Q_{total,in})$	MJ/hr	28,862.54
ความร้อนออก			
ความร้อนไปกับทองแดง	Q_{cu}	MJ/hr	13,138.12
$Q_{cu} = F \times C_{p,cu} \times (T_{co} - T_{ci}) + F \times LH$			
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย	Q_{flue}	MJ/hr	11,616.04
$Q_{flue} = FH \times G \times 0.33 \times 4.187 \times (T_g - T_r)/1000$			
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Q_w	MJ/hr	744.36
$Q_w = FW \times C_{pw} \times (T_{wo} - T_{wi})$			
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	Q_{wall}	MJ/hr	423.66
$Q_{wall} = \sum_{i=1}^n \left[\left[2.2(T_i - T_r)^{1.16} + 4.89E \left[\frac{(T_i + 273)^4}{100} - \frac{(T_r + 273)^4}{100} \right] \right] \times A_i \times 4.186 \right] / 1000$			
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	Q_{co}	MJ/hr	909.16
$Q_{co} = FH \times D_f \times G \times CO \times 13.76/10^6$			
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Q_{un}	MJ/hr	2,031.2
$Q_{un} = Q_c + Q_a - Q_{cu} - Q_{flue} - Q_w - Q_{wall} - Q_{co}$			
ความร้อนออกรวม	$(Q_{total,out})$	MJ/hr	28,862.54

ตารางที่ 7.12 สรุปการคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดง เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง (การทดลองครั้งที่สอง)

รายการ	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่า	%
ความร้อนเข้า				
ความร้อนของเชื้อเพลิง	Q_f	MJ/hr	27,837.81	96.45
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	Q_{sa}	MJ/hr	1,024.73	3.55
รวม		MJ/hr	28,862.54	100.00
ความร้อนออก				
ความร้อนไปกับทองแดง	Q_{cu}	MJ/hr	13,138.12	45.52
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย	Q_{flue}	MJ/hr	11,616.04	40.25
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	Q_w	MJ/hr	744.36	2.58
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	$Q_{wall\ loss}$	MJ/hr	423.66	1.47
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	Q_{co}	MJ/hr	909.16	3.15
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Q_l	MJ/hr	2,031.2	7.04
รวม		MJ/hr	28,862.54	100.00

หลังจากทำการศึกษาความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นกับเตาหลอมทองแดงแล้ว พบว่าความร้อนได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์และสูญเสียไปในรูปแบบต่างๆตามที่ได้แสดงให้เห็นจากตารางที่ 7.12 ซึ่งข้อสรุปจากการทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงคือ สามารถที่จะหาค่าประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงในสภาวะที่ใช้เชื้อเพลิง NG ได้เท่ากับ 45.52 เปอร์เซ็นต์

โดยที่ประสิทธิภาพทางความร้อน (η_{th}) สามารถคำนวณได้จากความร้อนที่ออกไปกับทองแดงดังนี้

$$\eta_{th} = \frac{Q_{cu}}{Q_f + Q_{sa}} \times 100$$

ตารางที่ 7.13 การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงเปรียบเทียบกับเมื่อใช้ก๊าซ NG

รายการ	หน่วย	LPG		NG		
		พลังงาน	%	พลังงาน	%	
ความร้อนเข้า						
ความร้อนของเชื้อเพลิง (Q_f)	MJ/hr	30,606.80	95.19	27,837.81	96.45	
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้ (Q_{sa})	MJ/hr	1,546.72	4.81	1,024.73	3.55	
รวม	MJ/hr	32,153.52	100	28,862.54	100.00	
ความร้อนออก						
ความร้อนไปกับทองแดง (Q_{cu})	MJ/hr	13,291.15	41.34	13,138.12	45.52	
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย (Q_{flue})	MJ/hr	15,629.45	48.61	11,616.04	40.25	
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น (Q_w)	MJ/hr	1,116.54	3.47	744.36	2.58	
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา (Q_{wall})	MJ/hr	474.19	1.47	423.66	1.47	
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{co})	MJ/hr	856.5	2.66	909.16	3.15	
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Q)	MJ/hr	785.69	2.44	2,031.2	7.04	
รวม	MJ/hr	32,153.52	100	28,862.54	100.00	

7.2 การคำนวณอัตราการประหยัดเมื่อเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ แทนก๊าซปิโตรเลียมเหลวในเตาหลอมทองแดง

เราสามารถทำการคำนวณอัตราการประหยัดเมื่อเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{การคำนวณค่าใช้จ่ายในส่วนของเชื้อเพลิงกรณีใช้ก๊าซ NG ระยะเวลา 1 ปี} \\ & = 819 \text{ Nm}^3/\text{hr} \times 80 \text{ hr/month} \times 33.99 \text{ MJ/Nm}^3 \times 1.055 \text{ BTU/kJ} \times 10^3 \\ & = 2,349.511 \text{ MMBTU/month} \end{aligned}$$

$$\text{ราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ} \quad 207 \text{ Baht/MMBTU}$$

$$\text{ราคาเชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว} \quad 249 \text{ Baht/MMBTU}$$

ทางบริษัททำงานปีละ 10 เดือน สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้

$$= 2,349.511 \text{ MMBTU/month} \times 10 \text{ month/year} \times (249-207) \text{ Baht/MMBTU}$$

$$= 986,794.62 \text{ Baht/year}$$

สามารถคำนวณเป็นอัตราการประหยัดได้เท่ากับ 56 Bath/ton

7.3 แผนภาพ Sankey Diagram ของเชื้อเพลิง LPG

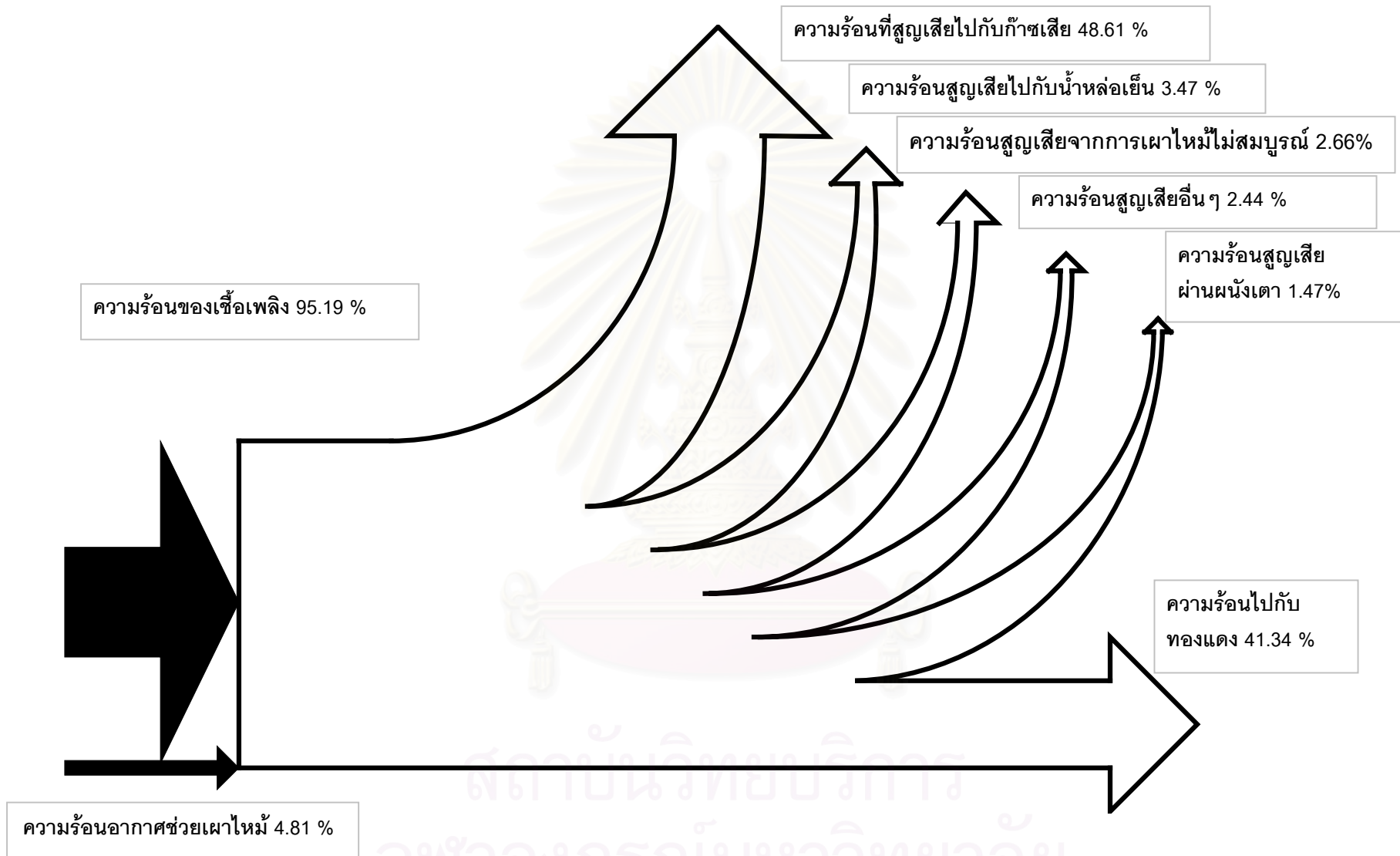
การทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซ LPG แสดงโดย Sankey Diagram ดังรูปที่ 7.1

7.4 แผนภาพ Sankey Diagram ของเชื้อเพลิง NG

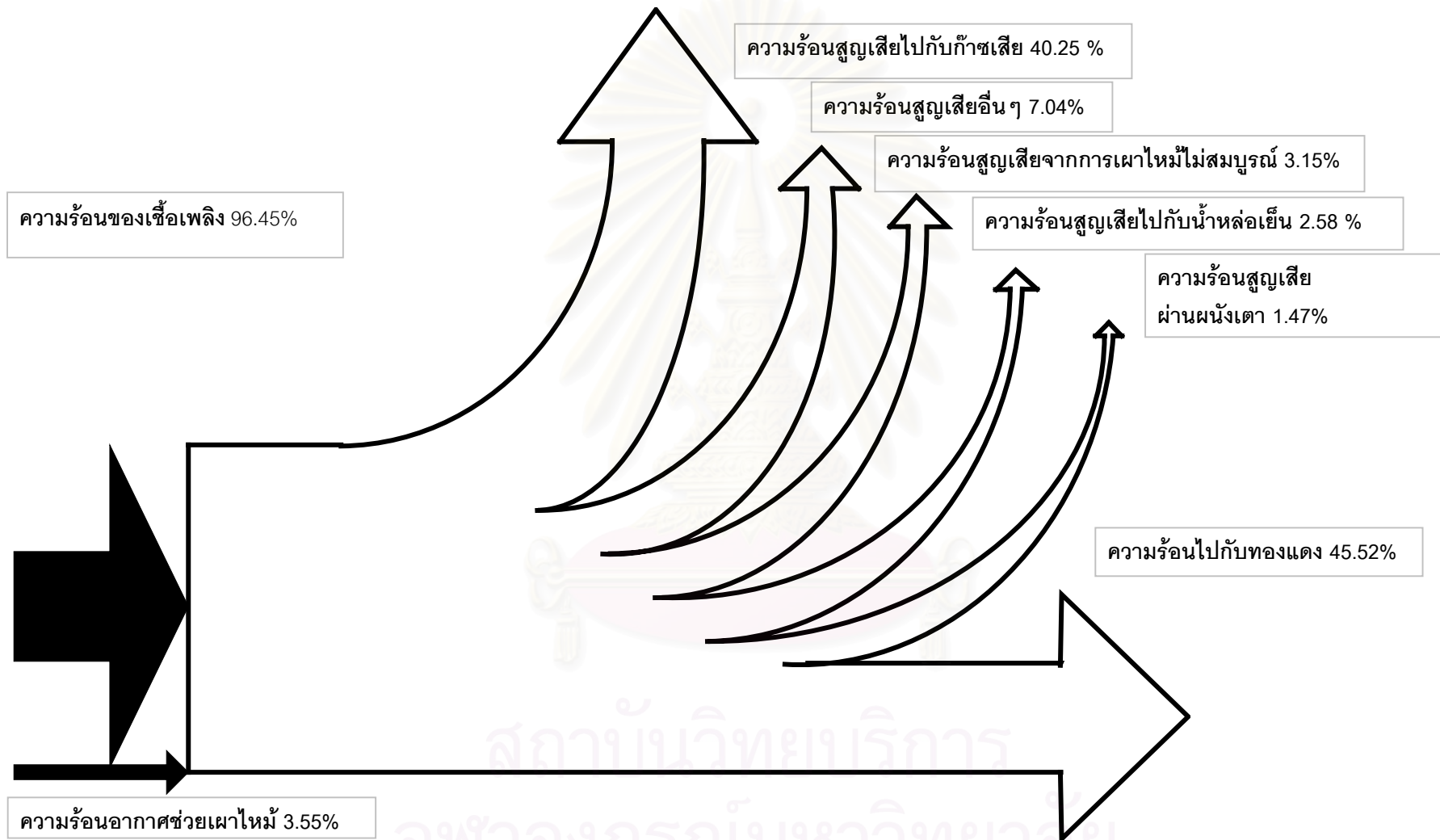
การทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงโดยใช้เชื้อเพลิงก๊าซ NG แสดงโดย Sankey Diagram ดังรูปที่ 7.2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.1 Sankey Diagram เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอม



รูปที่ 7.2 Sankey Diagram เมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

7.5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Sleeve ของหัวเผาสำหรับใช้กับก๊าซธรรมชาติ

จากการคำนวณพบว่าเมื่อเปลี่ยนจากก๊าซ LPG เป็นก๊าซ NG จะต้องมีการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Sleeve จาก 4.8 mm เป็น 7 mm จากการตรวจวัดแสดงข้อมูลได้ตามตารางที่ 7.14

ตารางที่ 7.14 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Sleeve ของหัวเผาสำหรับใช้กับก๊าซธรรมชาติ

หัวเผา/รู	รูที่ 1(mm)	รูที่ 2(mm)	รูที่ 3(mm)	รูที่ 4(mm)	รูที่ 5(mm)
1	7.1	7.0	7.0	7.0	7.0
2	6.8	7.0	7.0	7.0	7.0
3	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
4	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
5	6.9	6.7	7.0	7.0	7.0
6	7.0	7.0	7.0	6.9	7.0
7	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
8	7.0	7.0	7.0	7.7	7.1
9	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
10	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
11	7.0	7.0	6.9	7.0	7.0
12	6.9	7.0	7.0	7.0	7.0
13	6.8	7.0	6.9	7.0	7.0
14	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
15	7.0	7.0	6.9	6.9	7.0
16	7.0	7.0	7.0	6.9	7.0
17	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
18	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
19	6.9	6.9	6.9	6.9	6.8
20	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
21	7.0	7.0	7.0	7.0	6.9
22	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
23	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
24	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8
25	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
26	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0

หมายเหตุ : หัวเผาแต่ละหัวมีทั้งหมด 8 รู

7.6 ความดันที่ใช้งานกรณีใช้ก๊าซ LPG และก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง

จากผลการทดลองได้ทำการตรวจวัดความดันที่ใช้งาน กรณีใช้ก๊าซ LPG และ ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง สามารถแสดงข้อมูลได้ดังตารางที่ 7.15 และ ตารางที่ 7.16

ตารางที่ 7.15 ความดันของก๊าซ LPG บริเวณ Zone Regulator และ Zero Regulator หลังจากติดตั้งมาตรวัดความดัน

	LPG gas	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Zone A	Zone B	Zone C
Time/Pressure	pressure	P _{a3}	P _{a3}	P _{a7}	P _{a7}	P _{b2}	P _{b2}	P _{b4}	P _{b4}	P _{c4}	P _{c4}	P _{c7}	P _{c7}	P(A)	P(B)	P(C)
12:45 น.	6	1	1	1	1	1	1	1	0.5	2	0.5	1	0.5	6	1	1
13:00 น.	6	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	6	1	1
13:15 น.	6	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	6	1	1
13:30 น.	6	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	6	1	1
13:45 น.	6	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	1	6	1	1
14:00 น.	6	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	6	1	1
14:15 น.	6	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	6	1	1
14:30 น.	6	1.5	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	6	1	1
14:45 น.	6	1.5	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	6	1	1
15:00 น.	6	1	2	0.5	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	6	1	1

หมายเหตุ : ความดันมีหน่วยเป็น psig

ตารางที่ 7.16 ความดันของก๊าซ NG บริเวณ Zone Regulator และ Zero Regulator หลังจากติดตั้ง
มาตรวัดความดัน

	LPG gas	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Fuel	Air	Zone A	Zone B	Zone C
Time/Pressure	pressure	P _{a3}	P _{a3}	P _{a7}	P _{a7}	P _{b2}	P _{b2}	P _{b4}	P _{b4}	P _{c4}	P _{c4}	P _{c7}	P _{c7}	P(A)	P(B)	P(C)
13:00 น.	4	1	1	1	1	1	1	1	0.5	2	0.5	1	0.5	4	1	1
13:15 น.	4	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	4	1	1
13:30 น.	4	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	4	1	1
13:45 น.	4	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	4	1	1
14:00 น.	4	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	1	4	1	1
14:15 น.	4	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	4	1	1
14:30 น.	4	1	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	4	1	1
14:45 น.	4	1.5	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	4	1	1
15:00 น.	4	1.5	2	1	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	4	1	1
15:15 น.	4	1	2	0.5	1	1	1	1	1	2	0.5	1	0.5	4	1	1

หมายเหตุ : ความดันมีหน่วยเป็น psig

บทที่ 8

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิงจากก๊าซ LPG เป็น NG ในเตาหลอมทองแดงของบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด สามารถสรุปได้เป็นกรณีดังต่อไปนี้

8.1 ปริมาณเชื้อเพลิง

สำหรับกรณีที่ปริมาณความร้อนที่ให้กับทองแดงเท่ากัน ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในกรณีก๊าซ LPG เท่ากับ $340 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ส่วนกรณีของ ก๊าซ NG ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้คือ $819 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ทั้งนี้เนื่อง จากค่าความร้อนของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนี้ต่างกัน

8.2 ปริมาณอากาศที่ใช้

สำหรับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของก๊าซ NG Stoichiometric ratio ของก๊าซมีเทนจะเท่ากับ $9.52 \text{ Vol air / Vol fuel}$ ส่วนปริมาณของอากาศที่ใช้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของก๊าซ LPG เท่ากับ $27.37 \text{ Vol air / Vol gas}$

8.3 การปรับตั้งอุปกรณ์

ในการเปลี่ยนเชื้อเพลิงจากก๊าซ LPG เป็นก๊าซ NG จะต้องมีการปรับตั้งความดันเพื่อให้ได้ ปริมาณเชื้อเพลิงตามต้องการในกรณีของก๊าซ LPG ค่าความดันขณะเข้าโรงหลอมทองแดงจะเป็น 8 psig จากนั้นจะถูกลดลงโดยอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซจนเหลือ 6 psig จากนั้นจะถูกลดลงเหลือ ประมาณ 1 psig ขณะเข้าเตาหลอมทองแดง ส่วนในกรณีของก๊าซ NG ค่าความดันขณะเข้าโรง หลอมทองแดงจะเป็น 33 psig จากนั้นจะถูกปรับลดลงโดยอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซจนเหลือ 4 psig จากนั้นจะถูกลดลงเหลือประมาณ 1 psig ขณะเข้าเตาหลอมทองแดง โดยค่าความดันที่ใช้ได้ จากการคำนวณเปรียบเทียบกับ specification ของอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ

นอกจากนี้ยังต้องทำการดัดแปลงหัวเผาเก่า ซึ่งใช้งานกับ LPG ให้ใช้ได้กับ NG โดยผู้วิจัย ได้ทำการคำนวณขนาดรูออกที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณการไหลของ NG ที่เหมาะสมตาม Wobbe number และโรงงานเป็นผู้ดำเนินการคว้านรูดังกล่าวให้

ในส่วนของเตาหลอมทองแดงทางโรงงานได้ดำเนินการปรับปรุงเตาหลอมทองแดง เปลี่ยนอิฐฉนวนทนไฟใหม่ การดำเนินการซ่อมแซมดังกล่าวเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเตาโดยลดการสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซที่รั่วไหลเข้าออกช่องเปิดต่างๆ ของเตา

8.4 กำลังการผลิต

จากการทดลองเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิงจาก LPG เป็น NG ในเตาหลอมทองแดงของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด พบว่า เมื่อเปลี่ยนมาใช้ก๊าซ NG แทนก๊าซ LPG ในเตาหลอมแล้วสามารถที่จะทำให้กำลังการผลิตของเตาหลอมทองแดงเท่ากับเมื่อใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงคือมีกำลังการผลิตอยู่ที่ 22-25 ตันต่อชั่วโมง

8.5 คุณภาพของผลิตภัณฑ์

จากข้อกำหนดของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด ที่กำหนดให้มีปริมาณออกซิเจนปนอยู่ในลวดทองแดงได้ประมาณ 150 – 250 ppm จะได้ลวดทองแดงเกรด 1 ถ้าปริมาณออกซิเจนปนอยู่ในลวดทองแดงมากเกินไปเกรดของทองแดงจะต่ำลงแต่ทั้งนี้ต้องไม่เกิน 600 ppm ถ้าเกินกว่านี้ลวดทองแดงจะเสียคุณภาพไม่สามารถนำไปผลิตเป็นสายไฟฟ้าได้ ดังนั้นจากการทดลองเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิงจาก LPG เป็น NG ในเตาหลอมทองแดงและทำการวัดปริมาณออกซิเจนในลวดทองแดงพบว่าสามารถที่จะควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนปนอยู่ในลวดทองแดงได้อยู่ในปริมาณที่ควบคุมคือ 150 – 250 ppm

8.6 การถ่ายเทความร้อน

8.6.1 การทดลองโดยใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง พบว่าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่บริเวณปล่องไอเสียประมาณ 364.5°C สาเหตุที่อุณหภูมิของก๊าซไอเสียค่อนข้างต่ำเนื่องจากจุดที่ทำการวัดอาจมีการผสมกันระหว่างก๊าซไอเสียกับอากาศภายนอก ความร้อนสูญเสียเนื่องจากก๊าซไอเสีย 48.61% ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น 3.47% ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา 1.47% และความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ 2.66%

8.6.2 การทดลองโดยใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง พบว่าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่บริเวณปล่องไอเสียประมาณ 406.3°C สาเหตุที่อุณหภูมิของก๊าซไอเสียค่อนข้างต่ำเนื่องจากจุดที่ทำการวัดอาจมีการผสมกันระหว่างก๊าซไอเสียกับอากาศภายนอก ความ

ร้อนสูญเสียเนื่องจากก๊าซไอเสีย 40.25% ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น 2.58% ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา 1.47% ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ 7.04%

จะเห็นได้ว่าความร้อนสูญเสียเนื่องจากก๊าซไอเสียในกรณีของ LPG จะสูงกว่า ในกรณีของ ก๊าซ NG แต่ความร้อนที่ทองแดงได้รับกรณีของ LPG คือ 41.34% ซึ่งต่ำกว่าปริมาณความร้อนที่ทองแดงได้รับในกรณีของ NG คือ 45.52% ส่วนความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตาส่วนหนึ่งเกิดจากการแตกหักของอิฐทนไฟในเตาหลอมทองแดงซึ่งเกิดจากในขณะที่ไหลผ่านทองแดงมีการกระทบกับผนังเตา

8.7 ประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดง

จากการทำสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซ LPG และก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดงพบว่า เมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงนั้นประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงมีค่าประมาณ 41.34 % ในขณะที่เมื่อใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดงพบว่าประสิทธิภาพของเตาหลอมทองแดงเพิ่มขึ้นเป็น 45.52% เนื่องจากว่าก๊าซ NG มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า ก๊าซ LPG และความร้อนสูญเสียในส่วนต่างๆของก๊าซ LPG มีค่ามากกว่าความร้อนสูญเสียของก๊าซ NG และจากตารางที่ 7.13 ซึ่งแสดงผลการทำสมดุลความร้อนเปรียบเทียบระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดในเตาหลอมทองแดง จะเห็นได้ว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสียเมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงนั้นมีค่ามากกว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสียเมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิงค่อนข้างมากเนื่องจากปริมาณก๊าซ CO ในไอเสียของเชื้อเพลิง LPG มีค่าสูงกว่าไอเสียของก๊าซ NG ทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

8.8 ผลการประหยัดค่าเชื้อเพลิง

เมื่อเปรียบเทียบผลการประหยัดค่าเชื้อเพลิง พบว่า เมื่อเปลี่ยนมาใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดงแทนก๊าซ LPG สามารถที่จะประหยัดค่าเชื้อเพลิงได้เป็นมูลค่า 986,794.62 บาทต่อปี เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงก๊าซ NG มีราคาถูกกว่าก๊าซ LPG

ดังนั้นจากการวิจัยการเปลี่ยนก๊าซเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดงของบริษัทสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด จากก๊าซ LPG เป็น NG พบว่าโรงงานสามารถที่จะเปลี่ยนมาใช้ก๊าซ NG แทนก๊าซ LPG ในเตาหลอมทองแดงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่กำลัการผลิต คุณภาพของผลิตภัณฑ์ เท่าเทียมกับเมื่อใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้แล้วโรงงานยังสามารถที่จะประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงลงได้อีก ทำให้โรงงานมีศักยภาพในการแข่งขันสูงขึ้น และบุคลากรของโรงงานที่เข้าร่วม

โครงการก็มีความรู้ความเข้าใจหลักการทางทฤษฎีมากขึ้นและสามารถนำความรู้ที่ได้นั้นไปทำการพัฒนาอย่างต่อเนื่องต่อไปได้

8.9 ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม

1. จากการทำสมดุลความร้อนพบว่าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียกรณีของก๊าซ LPG 364.5°C และกรณีของก๊าซ NG 406.3°C ซึ่งสามารถนำก๊าซไอเสียไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศก่อนเข้าเผาไหม้เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้

2. ติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่อให้ความร้อนกับอากาศและเชื้อเพลิงก่อนเข้าทำการเผาไหม้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอมทองแดง

3. การเปลี่ยนมาใช้หัวเผาแบบ Recuperative burner ซึ่งให้ความร้อนกับส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงก่อนทำการเผาไหม้ จะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้

4. ทำการปรับปรุงอุปกรณ์ปรับความดันก๊าซ ในปัจจุบันโรงงานทำการควบคุมปริมาณเชื้อเพลิงโดยใช้ความดันที่ทางออกของเชื้อเพลิงกับความดันของอากาศ ซึ่งบางครั้งถ้ามีความต้องการปริมาณเชื้อเพลิงมากขึ้น ระบบอาจมีการตอบสนองช้า ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพทองแดงที่ได้

รายการอ้างอิง

- [1] Keramida, E.P., Liakos, H.H., Founti, M.A., Boudovis, A.G. and Markatos, N.C. Radiative Heat Transfer in Natural Gas-Fired Furnaces. International Journal of Heat and Mass Transfer 43 (2000): 1801-1809.
- [2] Shinoda, M., Tanaka, R. and Arai N. A Heat-Recirculating Ceramic Burner for Stable, High-Efficiency and Low NO_x Emission Combustion of Low-Calorific Fuel. Asian J. Energy Environ 1 (2000): 1-17.
- [3] Papanikolaou, N. and Wierzba, I., The Effects of Burner Geometry and Fuel Composition on the Stability of a Jet Diffusion Flame. Journal of Energy Resources Technology 119 (1997): 265-270.
- [4] Krass, B.J., Zellmer, B.W., Puri, I.K. and Singh, S. Application of Flamelet Profiles to Flame Structure in Practical Burners. Journal of Energy Resources Technology 121 (1999): 66-72.
- [5] ศิริชัย เทพา และ เดชะ ต้นมีสุข. การวิเคราะห์สมรรถนะของเตาเผาเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.
- [6] เศรษฐการ เศรษฐการุณย์. การออกแบบสร้างและทดสอบหัวเผาที่ใช้มันสำปะหลังเป็นเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- [7] พรชัย ศานต์สุทธิกุล และ อรรถพล ศรีประเสริฐ. การศึกษาพารามิเตอร์ของการทำงานที่เหมาะสมสำหรับการเผาไหม้มูลฝอยติดเชื้อในเตาเผาแบบหมุน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2540.
- [8] บัณฑิต ฟุ้งธรรมสาร และ ปุ่มยศ วัลลิกุล. การประยุกต์วิธีวิเคราะห์เตากับเตาหลอมอลูมิเนียม. เอกสารเสนอในการสัมมนาเรื่อง "Energy Conservation in Buildings and Industries", ASEAN WGNCER – Thailand Bangkok, Thailand, 22 – 26 August 1988.

- [9] Karim, G.A., Wierzbza, I. and Soriano, B. Optimal Design for High Performance Industrial Furnace Applied High Temperature Air Combustion Technology. Kagaku Kogaku Ronbunshu 27 (2000): 227 - 235.
- [10] Incropera, F.P. and Dewitt, D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer 4th edition John Wiley & Sons, 1996.
- [11] การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. คู่มือการเปลี่ยนก๊าซ LPG มาเป็น NG. แหล่งที่มา: <http://www.pttplc.com>.
- [12] กัญจนนา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [13] โยชิฮิโกะ ทาคามูระ. เทคนิคการประหยัดความร้อนในอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2543.
- [14] สุรินทร์ ศรีนยนิศย์. การถ่ายเทความร้อน. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2538.
- [15] Floyd, J.D. Fundamentals of Gas Pressure Regulation. Fisher Controls Company, 1972.
- [16] ปราโมทย์ ไชยเวท. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
- [17] Cengel, Y. A. Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer. New York: McGraw-Hill, 1997.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาณ NG ที่ใช้ในการหลอมทองแดง

การคำนวณสมมูลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง

1) ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี (A_o)

$$\begin{aligned} A_o &= \left(\frac{1.09 \times NHV}{4.187} \right) - 0.25 \\ A_o &= \frac{1.09 \times 90.02}{4.187} - 0.25 \\ &= 23.815 \end{aligned}$$

2) ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี (G_o)

$$\begin{aligned} G_o &= \left(\frac{1.14 \times NHV}{4.187} \right) + 0.25 \\ &= 24.760 \end{aligned}$$

3) อัตราส่วนอากาศ (m)

$$\begin{aligned} m &= \frac{21}{21 - O_2} \\ &= \frac{21}{21 - 16} \\ &= 4.20 \end{aligned}$$

4) ปริมาณอากาศจริง (A)

$$\begin{aligned} A &= A_o \times m \\ &= 23.815 \times 4.20 \\ &= 100.63 \end{aligned}$$

5) ปริมาณก๊าซเสียจริง (G)

$$\begin{aligned} G &= G_o + A_o (m - 1) \\ &= 24.760 + 23.815 (4.2 - 1) \\ &= 100.968 \end{aligned}$$

การคำนวณความร้อนเข้า

1) ความร้อนของเชื้อเพลิง (Q_f)

$$\begin{aligned} Q_f &= m_f \times LHV \\ &= 340 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 90.02 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3} \\ &= 30,606.80 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

2) ความร้อนของอากาศเผาไหม้ (Q_a)

$$\begin{aligned} Q_{sa} &= m_f \times A \times \rho_a \times C_{pa} \times (T_{ai} - T_r) \\ &= 340 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 100.023 \times 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (70 - 35)^\circ \text{C} \\ &= 1,546.72 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

การคำนวณความร้อนออก

1) ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับทองแดง (Q_{cu})

$$\begin{aligned} Q_{cu} &= m_{cu} \times C_{p,cu} \times (T_{cu,o} - T_{cu,i}) + m_{cu} \times LH \\ &= 22,060 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 0.38 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (1080 - 35)^\circ \text{C} + 22,060 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 205.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 13,291,150 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \\ &= 13,291.15 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

2) ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย (Q_{flue})

$$\begin{aligned} Q_{flue} &= m_f \times G \times C_{p,flue} \times (T_{flue} - T_r) \\ &= 340 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 100.97 \times 0.33 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3 \text{K}} \times 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (364.5 - 35)^\circ \text{C} \\ &= 15,629.45 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

3) ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น (Q_w)

$$\begin{aligned}
 Q_w &= m_w \times \rho_w \times C_{p,w} \times (T_{w,o} - T_{w,i}) \\
 &= 89.4 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times 994.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (35 - 32)^\circ \text{C} \\
 &= 1,116,541 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \\
 &= 1,116.541 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังตา (Q_{wall})

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{wall}} &= \frac{1}{1,000} \sum_{i=1}^N \left[2.2 (T_{\text{wall}} - T_{\text{amb}})^{\frac{5}{4}} + 4.88 \left(\left(\frac{(T_{\text{wall}} + 273)^4}{100} \right) - \left(\frac{(T_{\text{amb}} + 273)^4}{100} \right) \right) \right] \times A_i \times 1.86 \\
 &= \frac{1}{1,000} \sum_{i=1}^N 2.2 (236.75 - 35)^{\frac{5}{4}} + 4.88 \times 0.4 \left(\frac{509.75^4}{100} - \frac{308^4}{100} \right) \times 40.2 \times 4.186 = 474.19 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

5) ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{co})

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{co}} &= m_f \times \rho_f \times G \times CO \times 13.76 \times \frac{1}{10^6} \\
 &= \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 2.004 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times 102.76 \times \frac{889}{10^6} \times 13.76 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \\
 &= 856.50 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

6) ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (Q_{un})

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{un}} &= Q_f + Q_{\text{sa}} - Q_{\text{cu}} - Q_{\text{flue}} - Q_w - Q_{\text{wall}} - Q_{\text{co}} \\
 &= 30,606.80 + 1,546.72 - 13,291.15 - 15,629.45 - 1,116.54 - 474.19 - \\
 &\quad 856.50 \\
 &= 785.69 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

1) ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี (A_o)

$$\begin{aligned} A_o &= \left(\frac{1.09 \times NHV}{4.187} \right) - 0.25 \\ &= \frac{1.09 \times 33.99}{4.187} - 0.25 \\ &= 8.60 \end{aligned}$$

2) ปริมาณก๊าซเสียเชิงทฤษฎี (G_o)

$$\begin{aligned} G_o &= \left(\frac{1.14 \times NHV}{4.187} \right) + 0.25 \\ &= \frac{1.14 \times 33.99}{4.187} + 0.25 \\ &= 9.5 \end{aligned}$$

3) อัตราส่วนอากาศ (m)

$$\begin{aligned} m &= \frac{21}{21 - O_2} \\ &= \frac{21}{21 - 14.25} \\ &= 3.11 \end{aligned}$$

4) ปริมาณอากาศจริง (A)

$$\begin{aligned} A &= A_o m \\ &= 8.6 \times 3.11 \\ &= 26.746 \end{aligned}$$

5) ปริมาณก๊าซเสียจริง (G)

$$\begin{aligned} G &= G_o + A_o(m-1) \\ &= 9.5 + 8.6(3.11-1) \\ &= 27.646 \end{aligned}$$

การคำนวณความร้อนเข้า

1) ความร้อนของเชื้อเพลิง (Q_f)

$$\begin{aligned} Q_f &= m_f \times LHV \\ &= 819 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 33.99 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3} \\ &= 27,837.81 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

2) ความร้อนของอากาศเผาไหม้ (Q_a)

$$\begin{aligned} Q_{sa} &= m_f \times A \times \rho_a \times C_{pa} \times (T_{ai} - T_r) \\ &= 819 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 26.746 \times 1.293 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times 1.005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} (71 - 35)^\circ\text{C} \\ &= 1,024.73 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

การคำนวณความร้อนออก

1) ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับทองแดง (Q_{cu})

$$\begin{aligned} Q_{cu} &= m_{cu} \times C_{p,cu} \times (T_{cu,o} - T_{cu,i}) + M_{cu} \times LH \\ &= 21,806 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 0.38 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (1080 - 35)^\circ\text{C} + 22,060 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \times 205.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 13,138.12 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

2) ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย (Q_{flue})

$$\begin{aligned} Q_{flue} &= m_f \times G \times C_{p,flue} \times (T_{flue} - T_r) \\ &= 819 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 27.646 \times 0.33 \frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3\text{K}} \times 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (406.3 - 35)^\circ\text{C} \\ &= 11,616.04 \frac{\text{kJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

3) ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น (Q_w)

$$\begin{aligned} Q_w &= m_w \times \rho_w \times C_{p,w} \times (T_{w,o} - T_{w,i}) \\ &= 89.4 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \times 994.29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4.187 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (36 - 34)^\circ \text{C} \\ &= 744.36 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา (Q_{wall})

$$\begin{aligned} Q_{\text{wall}} &= \frac{1}{1,000} \sum_{i=1}^N \left[\left[2.2 (T_{\text{wall}} - T_{\text{amb}})^{\frac{5}{4}} + 4.88 \left(\left(\frac{T_{\text{wall}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{amb}} + 273}{100} \right)^4 \right) \right] \times A_i \times 1.86 \right] \\ &= \frac{1}{1,000} \sum_{i=1}^N \left[2.2 (221.875 - 35)^{\frac{5}{4}} + 4.88 \times 0.4 \left(\frac{494.875^4}{100} - \frac{308^4}{100} \right) \right] \times 40.2 \times 4.186 = 474.19 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

5) ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (Q_{co})

$$\begin{aligned} Q_{\text{co}} &= m_f \times \rho_f \times G \times CO \times 13.76 \times \frac{1}{10^6} \\ &= 819 \frac{\text{Nm}^3}{\text{hr}} \times 1.015 \frac{\text{kg}}{\text{Nm}^3} \times 27.646 \times \frac{287.5}{10^6} \times 13.76 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \\ &= 909.16 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

6) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Q_{un})

$$\begin{aligned} Q_{\text{un}} &= Q_f + Q_{sa} - Q_{cu} - Q_{\text{flue}} - Q_w - Q_{\text{wall}} - Q_{\text{co}} \\ &= 27,837.81 + 10,24.73 - 13,138.12 - 11,616.04 - 747.36 - 909.16 - \\ &\quad 423.66 \\ &= 2,031.2 \frac{\text{MJ}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

การคำนวณความดันสูญเสียในท่อ

จากการคำนวณจะพิจารณาท่อเป็น 2 ขนาด 4" และ 1 $\frac{1}{4}$ "

ขนาดท่อ 4"

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ 4"} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{4 \times 2.54}{100} \right)^2 = 8.17 \times 10^{-3}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของท่อ 1}\frac{1}{4}\text{"} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{5 \times 2.54}{4 \times 100} \right)^2 = 7.92 \times 10^{-4}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของ orifice} = \frac{\pi}{4} (0.02)^2 = 3.1416 \times 10^{-4}$$

ท่อขนาด 4" ยาว 42 m

ผ่าน elbow 90° 14 ตัว $k = 0.31 \times 14 = 4.34$

ผ่าน elbow 45° 2 ตัว $k = 0.17 \times 2 = 0.34$

ผ่าน regulator แบบ zone 1 ตัว $k = 10$

$$\Sigma k = 14.68$$

ท่อขนาด 1 $\frac{1}{4}$ " ยาว 3 m

regulator 1 ตัว $k=10$

reducing 1 ตัว $k=0.4$

elbow 90° 2 ตัว $k=0.31 \times 2=0.62$

$$\Sigma k=11.02$$

$$Q = 470 \text{ nm}^3/\text{hr} \quad V \text{ ของท่อ 4"} = \frac{470}{3600 \times 8.17 \times 10^{-3}} = 16.103 \text{ m/s}$$

$$V \text{ ของท่อ 4"} = V_1$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{470}{3600 \times 7.92 \times 10^{-4} \times 26} = 6.34 \text{ m/s}$$

การคำนวณของ LPG

$$\mu = 8.5 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$$

$$\rho = 2.08 \text{ kg/nm}^3$$

$$\text{Re ของท่อ 4"} = \frac{2.08 \text{ kg/m}^3 \times 16.13 \text{ m/s} \times 10.16 \times 10^2 \text{ m}}{8.5 \times 10^6 \text{ n/m}^2 \cdot \text{s}} = 4.00 \times 10^5$$

$$\text{Re ของท่อ 1"} = \frac{2.08 \times 6.34 \times 3.175 \times 10^2}{8.5 \times 10^6} = 4.96 \times 10^4$$

Re มากกว่า 2,100 เป็น Turbulent

ท่อที่ใช้เป็นแบบ Commercial stellor wrought iron

$$\frac{\epsilon_1}{D_1} = \frac{0.0046}{10.16} = 0.000453 \quad \text{จาก Moody diagram จะได้ } f_1 = 0.017$$

$$\frac{\epsilon_2}{D_2} = \frac{0.0046}{3.175} = 0.0015 \quad \text{จะได้ } f_2 = 0.25$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \frac{\sum fLV^2}{2Dg} + \frac{\sum KV^2}{2g}$$

แทนค่าจะได้

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho g} = \frac{15.94^2}{2 \times 9.8} - \frac{16.103^2}{2 \times 9.8} + (1.80.65) + \left(\frac{0.017 \times 42}{0.1016} + 14.68 \right) \frac{16.03^2}{2 \times 9.8} + \left(\frac{0.02 \times 3}{0.03175} + 11.02 \right) \frac{6.34^2}{2 \times 9.8}$$

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho g} = -29.9 + 1.15 + 284.59 + 26.554 = 282.394$$

$$\Delta P = 282.394 \times 2.08 \times 9.8 = 5,756.32 \text{ Pa}$$

แปลงหน่วย $5,756.32 \times 1.45 \times 10^{-4} = 0.836 \text{ psig}$

ความดันสูญเสียเมื่อใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง = 0.836 psig

การคำนวณ NG

$$\mu = 11 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$$

$$\rho = 0.79$$

$$Q = 1240 \text{ nm}^3/\text{hr}$$

$$\text{สำหรับท่อ 4"} \quad V_1 = V \text{ ท่อขนาด 4"} = \frac{1240}{8.107 \times 10^3 \times 3600} = 42.487 \text{ m/s}$$

$$\text{Re ของท่อขนาด } 4'' = \frac{0.79 \times 42.487 \times 10.16 \times 10^2}{11 \times 10^6} = 3.1 \times 10^5$$

เป็นแบบ Turbulent

$$\frac{\varepsilon_1}{D_1} = \frac{0.0046}{4 \times 2.54} = 0.00453 \quad \text{จาก Moody diagram จะได้ } f_1 = 0.018$$

จากการคำนวณเบื้องต้น

$$\text{พื้นที่หน้าตัด ของท่อ } 1\frac{1}{4}'' = 7.92 \times 10^{-4}$$

$$\text{พื้นที่หน้าตัดของ orifice} = 3.142 \times 10^{-4}$$

$$\text{ความเร็วของท่อ } 1\frac{1}{4}'' = \frac{1240}{7.92 \times 10^{-4} \times 3600 \times 26} = 16.73 \text{ m/s}$$

$$\text{ความเร็วของ orifice ให้เป็น } V_2 = \frac{1240}{3.142 \times 10^{-4} \times 3600 \times 26} = 42.17 \text{ m/s}$$

$$\text{Re ของท่อขนาด } 1\frac{1}{4}'' = \frac{0.79 \times 16.73 \times 0.03175}{11 \times 10^6} = 3.8 \times 10^4$$

$$\frac{\varepsilon_2}{D_2} = \frac{0.0046}{3.175} = 0.00145 \quad f = 0.026$$

$$\frac{\nabla P}{\rho g} = \frac{42.487^2}{2 \times 9.8} + (1.8 - 0.65) + \left(\frac{0.018 \times 42}{0.1016} + 14.68 \right) \frac{42.487^2}{2 \times 9.8} + \left(\frac{0.026 \times 3}{0.03175} + 11.02 \right) \frac{42.487^2}{2 \times 9.8}$$

$$\frac{\nabla P}{\rho g} = 1.369 + 1.15 + 2,037.32 + 1,222.74 = 3,262.579$$

$$\Delta P = 0.79 \times 9.8 \times 3,262.579 = 25,258.887 \text{ Pa}$$

$$\text{แปลงหน่วย } 25,258.887 \times 1.451 \times 10^{-4} = 3.663 \text{ psig}$$

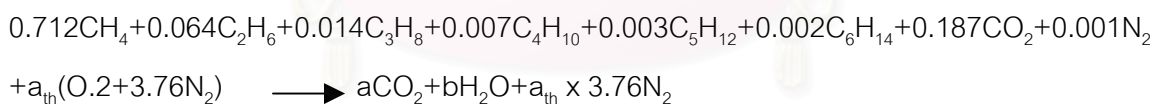
ความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อเมื่อใช้ NG เป็นเชื้อเพลิง = 3.663 psig

การคำนวณหาค่า Adiabatic flame temperature ของ NG

ตารางที่ ก1 แสดงองค์ประกอบของก๊าซธรรมชาติที่ผลิตโดยการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ที่ใช้ในบริษัท สายไฟฟ้าบางกอกเคเบิ้ล จำกัด

Components (Mole%)	Average
C1 Methane	71.239
C2 Ethane	6.149
C3 Propane	1.355
C4 Iso Butane	0.314
C4 Normal Butane	0.369
C5 Iso Pentane	0.198
C5 Normal Pentane	0.113
C6 Hexane Plus	0.182
CO ₂ Carbon Dioxide	18.676
N ₂ Nitrogen	1.105
Total	100

การเผาไหม้สมบูรณ์สำหรับเชื้อเพลิง 1 kmol



สมดุลอะตอม

$$C: \quad 0.712 + 2(0.064) + 3(0.014) + 4(0.007) + 5(0.003) + 6(0.002) + 0.187 = a$$

$$a = 1.124$$

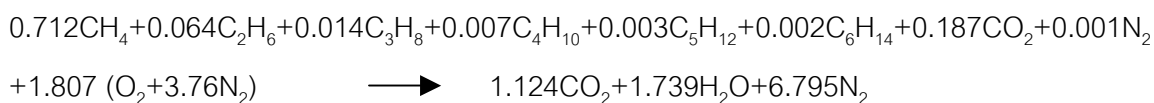
$$H: \quad 4(0.712) + 6(0.064) + 8(0.014) + 10(0.007) + 12(0.003) + 14(0.002) = 2b$$

$$b = 1.739$$

$$O: \quad 2(0.187) + 2a_{\text{th}} = 2a + b$$

$$a_{\text{th}} = 1.807$$

ดังนั้น



ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 298 K

จาก

$$\sum_{i=1}^N N_p h_{f,p}^\circ - \sum_{i=1}^N N_r h_{f,r}^\circ - \sum_{i=1}^N N_r (h_{T_i} - h_{T_{298}}) + \sum_{i=1}^N N_p (h_{T_f} - h_{298}) = \Delta H$$

เมื่อ

$$\Delta H = 0$$

$$T_i = 298 \text{ K} \text{ ดังนั้นเทอมที่ 3 ในสมการจะเท่ากับ 0}$$

$$\Delta H_r = \sum_{i=1}^N N_p h_{f,p}^\circ - \sum_{i=1}^N N_r h_{f,r}^\circ$$

จากการเปิดตารางหาค่า Enthalpy of formation เราจะได้ว่า

$$\Delta H_r = [1.124 \times (-94,054) + 1.739 \times (-57,798)] - [-32285.606] = -173941.812 \text{ cal}$$

เดาค่า $T_f = 2,000 \text{ K}$ จะได้ Thermal enthalpy change จากการเปิดตารางหาผลต่างของ Enthalpy

$$\begin{aligned} &= 1.124 \times (24,110 - 2,238.11) + 1.739 \times (19,630 - 2,367.7) + 6.795 \times (15,494.8 - 2,072.3) \\ &= 145,842.75 \text{ cal} \end{aligned}$$

เดาค่า $T_f = 23,000 \text{ K}$ จะได้ Thermal enthalpy change

$$\begin{aligned} &= 1.124 \times (28,520 - 2,238.11) + 1.739 \times (23,283 - 2,367.7) + 6.795 \times (18,092.3 - 2,072.3) \\ &= 174,768.45 \text{ cal} \end{aligned}$$

การประมาณแบบเชิงเส้นจะได้ (ตาราง ก2)

ตารางที่ ก2 การประมาณแบบเชิงเส้นเพื่อหา Adiabatic flame temperature กรณีใช้ก๊าซ NG เป็นเชื้อเพลิง

T_f (K)	Thermal energy(cal)
2000	145,842.75
$T_{f, \text{desire}}$	173,941.812
2300	174,768.45

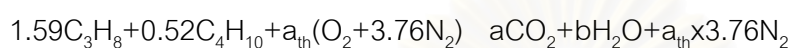
ประมาณ $T_{f, \text{desire}} = 2291.43^\circ \text{K}$ Answer.

Adiabatic flame temperature ของก๊าซ NG คือ 2291.43°K

การคำนวณค่า Adiabatic flame temperature ของ LPG

โดยคิดองค์ประกอบของ Propane 70% โดยมวล และ Butane 30% โดยมวล

การเผาไหม้สมบูรณ์สำหรับเชื้อเพลิง 100 กิโลกรัม



สมดุลอะตอม

$$\text{C: } 3(1.59) + 4(0.52) = a$$

$$a = 6.85$$

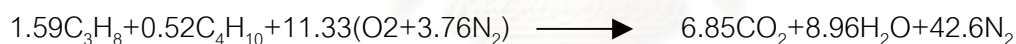
$$\text{H: } 8(1.59) + 10(0.52) = 2b$$

$$b = 8.96$$

$$\text{O: } 2a_{\text{th}} = 2a + b = 2(6.85) + 8.96$$

$$a_{\text{th}} = 11.33$$

ดังนั้น



อุณหภูมิเริ่มต้น 298 K

จาก

$$\sum_{i=1}^N N_p h_{f,p}^\circ - \sum_{i=1}^N N_r h_{f,r}^\circ - \sum_{i=1}^N N_r (h_{T_i} - h_{T_{298}}) + \sum_{i=1}^N N_p (h_{T_f} - h_{298}) = \Delta H$$

เมื่อ $\Delta H = 0$

$$T_i = 298 \text{ K} \text{ ดังนั้นเทอมที่ 3 ในสมการจะเท่ากับ 0}$$

$$\Delta H_r = \sum_{i=1}^N N_p h_{f,p}^\circ - \sum_{i=1}^N N_r h_{f,r}^\circ$$

จากการเปิดตารางหาค่า Enthalpy of formation เราจะได้ว่า

$$\Delta H_r = [6.85(+94,054 + 8.96(-57,798))] - [-54,966.04] = -1,107,073.94 \text{ cal}$$

เดาค่าเริ่มต้น $T_f = 2,500 \text{ K}$ จะได้ Thermal enthalpy change จากการเปิดตารางหาผลต่าง

ของ Enthalpy

$$= 6.85 \times (31,480 - 2,238.11) + 8.96 \times (25,770 - 2,367.7) + 42.6 \times (19,839 - 2,072.3)$$

$$= 1,166,852.975 \text{ cal}$$

เดาค่า $T_f = 2,300 \text{ K}$ จะได้ Thermal enthalpy change

$$= 6.85 \times (28,520 - 2,238.11) + 8.96 \times (23,283 - 2,367.7) + 42.6 \times (18,092.3 - 2,072.3)$$

$$= 1,049,884.035 \text{ cal}$$

การประมาณแบบเชิงเส้นจะได้ (ตาราง ก3)

ตารางที่ ก3 การประมาณค่าแบบเชิงเส้นเพื่อหา Adiabatic flame temperature กรณีใช้ก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิง

T_f (K)	Thermal energy (cal)
2500	116,852.975
$T_{f, \text{desire}}$	1,107,173.94
2300	1,049,884.035

$$\text{ประมาณ } T_{f, \text{desire}} = 2397.96^\circ \text{ K}$$

Adiabatic flame temperature ของก๊าซ LPG คือ 2397.96° K

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

จากการเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองหลอมทองแดง เพื่อเก็บข้อมูลปริมาณทองแดง และ scrap ที่สามารถหลอมได้ในแต่ละวัน ซึ่งสามารถแสดงข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ ข1 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 2 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
06:10	2976							
06:15	3005							
06:20					2086			
06:25	2972							
06:40	116					1310		
06:45					1628			
06:50	3016							
06:53	3021							
06:58	3010							
07:10	3000							
07:20	3001							
07:30	2974							
07:40	3058							
07:50	2478							
07:53	2986							
07:58					2576			
08:00				1040				
น้ำหนักทองแดง (kg)	129,647			1,040	6,290	18,312	1,594	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	156,883							

ตารางที่ ข2 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 3 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
08:08				2000				
08:16	2964							
08:23				1200				
08:29	3011							
08:36	2970			1160				
08:41						1182		
08:55					1210			
09:03				1200				
09:12						1825		
09:18				1160				
09:29	3049							
09:35				1120				
09:41					1491			
09:47	116					1266		
09:51	2990			1080				
09:56				1200				
09:59	2979							
10:15	116					1310		
10:24	2971							
10:30				1160				
10:35	76					1316		

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 3 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
10:40	3543			1120				
10:43				2000			2040	
10:47	76					1769		
10:52	3544			1120				
10:57				1080				
11:05	3014							
11:09				960				
11:12	76					1757		
11:18				1320				
11:24	3021							
11:29	116					1182		
11:31	2993							
11:36	116					1786		
11:40				480				
11:44	3015							
11:47	116					1192		
11:57	2963							
14:45	116					1832		
14:50	3435							
14:53	2996							
14:56	2974							
15:00	3021							
15:04	2512							
15:07	2611							
15:13	2451							

ตารางที่ ข2 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 3 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
15:17	2215							
15:20	2467							
15:24	2596							
15:27	2395							
22:00	2516							
22:30	2675			3920				
22:35	116					1173		
22:40	2561							
22:45	114					1383		
22:50	2557							
03:15						1124		
03:20	2679							
03:25	2617							
น้ำหนักทองแดง (kg)	505,636			25,360	15,281	56,721	5,228	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	608,226							

ตารางที่ ข3 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 7 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
22:45	2539							
23:00					2036			
03:00	2592							
03:10						1167		
03:15	2524							
03:20	2487							
03:25	2714							
03:30	2612							
03:35	2874							
03:40	2586							
03:45	2558							
03:55	2692							
04:05	2578							
04:20	2671							
04:30				1440				
น้ำหนักทองแดง (kg)	31,427			1,440	2,036	1,167		
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	36,070							

ตารางที่ ข4 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 8 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
11:35	2585							
11:45	2345							
12:05	2503							
15:20	2532							
15:30	2515							
15:45	2672							
15:50	2552					1767		
15:55	2820							
16:05						1181		
16:15							2174	
16:25	2562							
16:30						1585		
16:40	159					973		
16:50	2562							
17:15	159					1195		
17:30	2528					1173		
17:40	2636							
17:50	159					974		
18:00	159					1179		
23:25	2970							
น้ำหนักทองแดง (kg)	34,418			0	0	10,027	2,174	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	46,619							

ตารางที่ ข5 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 10 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
23:10	2527							
23:15	2579							
23:25	2605							
05:35	2642							
06:00	2594							
06:10						1180		
06:15	2654							
06:20						1159		
06:30	2598							
06:45						1174		
06:55				1080				
08:15	159					1177		
08:20	60					1183		
08:25	2613							
08:35	2523							
08:45	2611							
08:57	60					1117		
11:29	2676							
11:45	2670							
11:50	2548							
12:30	2605							

ตารางที่ ข5 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 10 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
13:20	114					1118		
13:30	2732							
13:40					2614			
13:48	60					1199		
13:55	2671							
14:05					1520			
14:15	60					970		
14:22	2537							
14:30	60					1182		
14:35	2521							
14:37	2556							
14:42	60					1056		
14:50	2575							
14:57					1966			
15:02	60					1202		
15:10	2608							
15:17					2276			
15:22	159					1180		
15:27	2474							
15:30	60					1171		
15:38	2682							

ตารางที่ ข5 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 10 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
15:40						1175		
15:45	2720							
16:02						1614		
16:12	2579							
23:00	2586							
23:05	2579							
น้ำหนักทองแดง (kg)	71,177	0	0	1,080	8,376	18,857	0	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	99,490							

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข6 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 15 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
		1130						เม็ดทองแดงก่อนที่จะเดินเครื่อง
		1145						
		1125						
		1050						
21:25	2644							
21:30	2540							
21:35	2642							
21:40	2643							
21:45	2578							
21:50	2586							
21:55	2657							
22:00	2557							
22:05	2532							
22:10	2683							
22:15	159					1181		
05:33	2607							
05:35	2507							
05:40	2413							
05:47	2535							
05:52						1049		
06:07	2540							
06:15	2745							
06:30	2877							
08:00	2705							
น้ำหนักทองแดง (kg)	47,150	4,450	0	0	0	2,230	0	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	53,830							

ตารางที่ ข7 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 16 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
08:00	2707							
08:05	2789							
08:10	2406							
08:15	2675							
08:20	2623							
08:25	2941							
08:30	2924							
08:35	2990							
08:45	2635							
12:05	2611							
12:09	2645							
12:15	2507							
12:23	2551							
12:28	2526							
12:39	2807							
13:05	2418							
13:10	2533							
13:15	2829							
13:20	2685							
13:25	2750							
13:30	2628							
13:40	2686							

ตารางที่ ข7 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 16 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
13:50	2684							
14:05	2692							
14:15	2651							
14:20	2699							
14:25	2661							
14:30						964		
14:40						1142		
14:50	2616							
14:58				1080				
15:04				1040				
15:15	2615							
15:25	2669							
15:30	159					1287		
15:40	2615							
15:50	2681							
16:02				920				
16:10	2607							
16:20						1254		
16:30	2625							
16:40	2697							
16:45	2614							
16:50	2726							
16:55	2771							

ตารางที่ ข7 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 16 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
17:00	2625							
17:05	2663							
17:10	2701							
17:15	2605							
17:20	2635							
17:25				1960				
17:30	2710							
17:35	2636							
17:40				2160				
22:25	2631							
22:30	2667							
22:40	2654							
22:50	2665							
23:10	2656					1183		
23:25						1145		
24:10	2663							
24:15	116					1109		
24:20	2597							
24:25						1151		
24:30	2664							
24:40						1154		
24:47	2710							
24:59	159					1197		

ตารางที่ ข7 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 16 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
01:05	2610					1189		
01:15						1181		
01:23	2632							
01:30	2600							
01:40						1212		
01:47	2705							
น้ำหนักทองแดง (kg)	154,952	0	0	7,160	0	15,168	0	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	177,280							

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข8 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 17 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
08:30	2607							
08:35	2682							
08:40	2683							
08:45				800				
08:50	2597							
13:45	2587							
13:50							1176	
13:55				800				
14:45	2605							
24:18	2598							
24:34	2703							
24:43	2666							
24:53	2723							
01:25	2606							
01:37					3146			
06:15	2683							
06:25	116					1167		
06:35	2858							
06:42	2685							
06:50						1117		
07:00	1700							
07:25	2539							

ตารางที่ ข8 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 17 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
07:30						1182		
07:38						1181		
07:48	2620							
08:00	2770							
น้ำหนักทองแดง (kg)	47,028	0	0	1,600	3,146	4,647	1,176	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	57,597							

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข9 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 21 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
23:20	2594							
23:28	2708							
23:39	2660							
23:52	2661							
24:14	2599							
24:28	2683							
24:35	2645							
24:45	2515							
24:58	2526							
01:05	2604							
01:20	2567							
01:27	2615							
01:32	2655							
01:45	2602							
01:50	2568							
01:58	2568							
02:14	2671							
02:25	84					1175		
02:40	2672							
02:47	57				1560			
02:55	2735							
03:08	57					1492		
03:17	2635							
03:20	2551							
03:25	58					1210		

ตารางที่ ข9 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 21 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
03:30	57					1294		
03:35	2677							
03:45	2421							
03:52	116					1298		
03:58	2687							
04:05	2495							
04:10	58					1719		
04:15			2424					
04:20	2629							
04:25	2556							
04:30						1166		
04:40	2586							
06:00	2426							
06:05	2505							
06:08	2690							
06:12	2973							
06:15	2727							
06:20				2240				
06:30	2598							
06:40				880				
น้ำหนักทองแดง (kg)	89,491	0	2,424	3,120	1,560	9,354	0	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	105,949							

ตารางที่ ข10 ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 22 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
11:00	2613							
11:05	2634							
11:10	2592							
11:15	2593							
11:20	2743							
11:30	2590							
11:40	2732							
12:30	2528							
12:40	31		1398					
12:50	2581							
12:57	116					1200		
13:03	31		1201					
13:10	2773							
13:15	58					1130		
13:20	2610							
13:30	52		463					
13:40	58					1241		
13:50	2716							
13:55	77		321					
14:00	58					1129		
14:05	385		352					

ตารางที่ ข10 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 22 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
14:15	2774							
14:26	58					1700		
14:30					1582			
14:35	174					1053		
14:40	385		686					
14:45	2526							
14:48					2080			
14:50	58					1181		
14:52						1800		
15:00					1802			
15:05	2734							
15:08			1570					
15:10	2618							
15:15					1778			
15:20	58					1650		
15:25	116					1159		
15:30	2320							
15:33					2196			
15:35	290					1150		
15:40	2163							
15:50	58					1615		
16:00	58					1150		
16:10	57		1245					

ตารางที่ ข10 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 22 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
16:13	2649							
16:15					1668			
16:38	2400							
16:40	2506							
17:10	2108							
17:15	2405							
17:20	2433							
17:25	2291							
17:30	2306							
17:35	2314							
17:40	2370							
17:45	2276							
17:50	2358							
18:00	2375							
23:00	2334							
23:05	2398							
23:10	2342							
23:15	2336							
23:20	2295							
23:25	2209							
24:45	2391							
24:50	2376							
01:00	2394							

ตารางที่ ข10 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 22 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
01:05				1920				
01:10				1000				
01:15	2383							
01:20				1240				
01:30	2389							
01:40	2316							
01:50	2293							
02:10	2247							
02:20						1182		
02:25	2259							
02:30	2321							
02:35	174					1771		
02:40	2383							
02:45	113		1508					
02:50	2396							
03:05	195					1153		
03:10	2163							
03:15	113		1074					
03:20	2359							
03:25	85					1147		
03:30	2363							
03:40	2327							
03:50	113		1232					

ตารางที่ ข10 (ต่อ) ปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง

วันที่ 22 กรกฎาคม 2546

เวลา	น้ำหนัก (kg)							หมายเหตุ
	Cathode	Scrap BCC 1		Scrap BCC 2				
		เม็ด	กล่อง	Bar	Box	Rod	ML	
04:00	2264							
04:05				1840				
04:15				1560				
น้ำหนักทองแดง (kg)	134,140	0	11,050	7,560	11,106	22,411	0	
รวมน้ำหนักทั้งหมด (kg)	186,267							

จากข้อมูลปริมาณการใช้ Cu Cathode และ Cu Scrap สามารถนำไปประกอบการคำนวณสมดุลความร้อน และจากข้อมูลสามารถสรุปได้ว่าภายหลังจากการเปลี่ยนมาใช้เชื้อเพลิงก๊าซ NG ปริมาณทองแดงที่หลอมได้ประมาณ 22 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งเทียบเท่ากับกรณีใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ค แสดงรูปส่วนต่างๆ ของกระบวนการหลอมทองแดง ของบริษัท สายไฟฟ้า บางกอกเคเบิ้ล จำกัด



รูปที่ ค1 หัวเผาของเตาหลอมทองแดง



รูปที่ ค2 กระบวนการหลอมทองแดง



รูปที่ ค3 เตาหลอมทองแดง



รูปที่ ค4 เตาพักน้ำทองแดง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพร้อมพันธ์ แสงแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 21 เดือนพฤศจิกายน พุทธศักราช 2522 จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปีการศึกษา 2543 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย