

การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการใช้ห้วเผาประสิทธิภาพสูงในเตาเผาเหล็กของ  
อุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทย

นางสาวมัชชุลิกา คอนเมฆ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

THE FEASIBILITY STUDY FOR USING HIGH-EFFICIENCY BURNERS IN REHEATING  
FURNACE FOR IRON AND STEEL INDUSTRY IN THAILAND

Miss Matchulika Khonmeak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการใช้  
หัวเผาประสิทธิภาพสูงในเตาเผาเหล็กของ  
อุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทย

โดย

นางสาวมัชชุลิกา คอนเมฆ

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์)

มัชชุลิกา คอนเมฆ :การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงในเตาเผาเหล็กของอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทย.(THE FEASIBILITY STUDY FOR USING HIGH-EFFICIENCY BURNERS IN REHEATING FURNACE FOR IRON AND STEEL INDUSTRY IN THAILAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ, 177หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความคุ้มค่าสำหรับการเลือกใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงในเตาเผาเหล็กสำหรับอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้า โดยมีการเก็บข้อมูลค่าพลังงานจากโรงงานผลิตเหล็กที่ใช้เตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) ชนิด Walking beam จำนวน 3 โรงงานได้แก่ โรงงานที่มีกำลังการผลิต 40 ตัน/ชั่วโมง 70 ตัน/ชั่วโมง และ 150 ตัน/ชั่วโมง โดยมีการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยคือการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการใช้พลังงานของหัวเผาประสิทธิภาพสูงชนิดรีเจนเนอเรทีฟและรีคัพเปอร์เรทีฟ โดยสามารถเลือกเลือกอุณหภูมิในการอุ่นอากาศของหัวเผาประสิทธิภาพสูงให้มีความเหมาะสมกับขนาดของเตาเผาเหล็ก

จากผลการศึกษาพบว่าทุกกำลังการผลิตมีการเลือกใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่  $1000^{\circ}\text{C}$  โดยโรงงานที่มีกำลังการผลิตขนาด 40 ตันต่อชั่วโมงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิและระยะเวลาคืนทุนมีค่าเท่ากับ 307,245,055.16 บาท และ 2.22 ปี ตามลำดับ การลดลงของค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงคือ 34.85% หรือ 120,422.39 MMBTU/ปี และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเท่ากับ 76.80%มูลค่าปัจจุบันสุทธิและระยะเวลาคืนทุนที่ได้รับจากโรงงานที่มีกำลังการผลิตขนาด 70 ตันต่อชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 590,655,143.34 บาท และ 1.64 ปี ตามลำดับ ซึ่งนำไปสู่การลดลงของค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงเท่ากับ 47.06% หรือ 208,811.77 MMBTU/ปี และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเท่ากับ 105.02% และโรงงานที่มีกำลังการผลิตขนาด 150 ตันต่อชั่วโมงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 1,501,670,888.39 บาท และระยะเวลาคืนทุน 1.23 ปี การลดลงของค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงคือ 61.80% หรือ 496,472.55 MMBTU/ปี และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเป็น 140.47% สำหรับการวิเคราะห์ความไวของโครงการพบว่าการเปลี่ยนแปลงของราคาเชื้อเพลิง อายุของหัวเผา ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลดและการประหยัดพลังงานไม่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจในการลงทุนของโครงการทั้งหมด

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อนิติ.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2555.....

## 5370325121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : ENERGY BALANCE / RECUPERATIVE BURNER / REGENERATIVE BURNER / REHEATING FURNACE

MATCHULIKA KHONMEAK : THE FEASIBILITY STUDY FOR USING HIGH-EFFICIENCY BURNERS IN REHEATING FURNACE FOR IRON AND STEEL INDUSTRY IN THAILAND. ADVISOR : ASSOC. PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAREON, Ph.D.,177 pp.

This research aims to analyze the regenerative burner and the recuperative burner for the different reheating furnaces in the steel industry, which used the natural gas in the production. The data of energy consumption used in this research is obtained from the 3 plants of the steel industries, which are 40 tons/hour, 70 tons/hour, and 150 tons/hour, respectively. The objective is to analyses the energy balance which is utilized to calculate and compare the energy used in the regenerative burner and the recuperative burner for the different sizes of reheating furnaces.

According to the highnet present value andthe short payback period,which give the same result by using the regenerative burner at the preheating air temperature of 1000°C.The steel productionof 40 tons/hr, which gives the net present value and the payback period about 307,245,055.16baht and2.22 year,respectively. The reduction of the fuel cost is 34.85% or 120,422.39 MMBTU/year, and the furnace efficiency is 76.80%. The net present value and the payback period obtained from the steel production of 70 tons/hr are 590,655,143.34 baht and 1.64 year, respectively, which lead to the reduction of the fuel cost about 47.06% or 208,811.77 MMBTU/year and the furnace efficiency is 105.02%.Forthe steel production of 150 tons/hr,the net present value andthe payback periodare 1,501,670,888.39 baht and 1.23 year,respectively. The reduction of the fuel cost is 61.80% or 496,472.55 MMBTU/year,and the furnace efficiency is 140.47%.The sensitivity analysis for the fuel cost (NG), the burner life, the investment cost, the energy saving, and the discount rate has been discussed, which are not affected the decision of the regenerative burner for all projects.

Department : Industrial Engineering Student's Signature.....

Field of Study : Industrial Engineering Advisor's Signature.....

Academic Year : 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาและการให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของบุคคลและหน่วยงานดังต่อไปนี้

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร รศ.สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน และดร.ณัฐเดช เพื่องวรวงษ์ ซึ่งคอยให้คำปรึกษา คำแนะนำและถ่ายทอดประสบการณ์ความรู้ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ คุณอนันต์ จิตรานุเคราะห์ ผู้ประสานงาน โครงการ และบุคลากรจากสถาบันเหล็ก และเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย คุณนันทวัฒน์ วีระชาติเทวัญ บริษัท อีคลิปส คอมบัสชั่น ประเทศไทย และ คุณวิจิต คุระทองบริษัท สแกนคอร์ป จำกัด ประเทศไทย กรุณาให้ความร่วมมือเอื้อเฟื้อข้อมูลประกอบการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา ครอบครัวและผู้มีพระคุณทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจ และสนับสนุนด้วยดีตลอดมาทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ได้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญรูป .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	7
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	7
1.5 สมมติฐาน .....	7
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	9
2.1 หัวใจประสิทธิภาพสูง.....	9
2.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงาน.....	13
2.3 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	18
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	21
บทที่ 3 การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลพลังงาน .....	26
3.1 ข้อมูลการตรวจวัด.....	26
3.2 จำนวนสมมูลพลังงาน .....	27
บทที่ 4 การวิเคราะห์การเลือกใช้หัวใจประสิทธิภาพสูง.....	33
4.1 วิเคราะห์ปริมาณความต้องการพลังงานและอัตราการใช้เชื้อเพลิง .....	33
4.2 ต้นทุนพลังงานและค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งหัวใจประสิทธิภาพสูง .....	36
4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของราคาต้นทุนเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของหัวใจประสิทธิภาพสูง .....	42

	หน้า
บทที่ 5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	52
5.1 ข้อกำหนดในการวิเคราะห์โครงการ .....	52
5.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ.....	52
5.3 ระยะเวลาคืนทุน.....	53
5.4 โครงการที่อายุโครงการไม่เท่ากัน.....	53
5.5 การวิเคราะห์ความไว.....	56
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	84
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	84
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	86
รายการอ้างอิง .....	88
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก .....	91
ภาคผนวก ข .....	94
ภาคผนวก ค .....	119
ภาคผนวก ง.....	140
ภาคผนวก จ.....	148
ภาคผนวก ฉ .....	158
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	177



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของการได้มาซึ่งข้อมูล.....	27
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของพลังงานในระบบของเตา Reheating furnace ขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....	29
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของพลังงานในระบบของเตา Reheating furnace ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....	30
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของพลังงานในระบบของเตา Reheating furnace ขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....	31
ตารางที่ 3.5 รายละเอียดประสิทธิภาพเตาเผา.....	32
ตารางที่ 4.1 ปริมาณความต้องการพลังงานเชื้อเพลิงและอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงของ เตาเผาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง เมื่อมีการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง.....	35
ตารางที่ 4.2 ปริมาณความต้องการพลังงานเชื้อเพลิงและอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงของ เตาเผาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง เมื่อมีการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง.....	35
ตารางที่ 4.3 ปริมาณความต้องการพลังงานเชื้อเพลิงและอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงของ เตาเผาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง เมื่อมีการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง.....	36
ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟ .....	37
ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาริเจนเนอเรทีฟ. ....	37
ตารางที่ 4.6 ราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ.....	38
ตารางที่ 4.7 ค่าเชื้อเพลิงของหัวเผาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....	38
ตารางที่ 4.8 ค่าเชื้อเพลิงของหัวเผาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....	39
ตารางที่ 4.9 ค่าเชื้อเพลิงของหัวเผาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....	39
ตารางที่ 4.10 ค่าใช้จ่ายในด้านสาธารณูปโภคของหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟ.....	40
ตารางที่ 4.11 ค่าใช้จ่ายในด้านสาธารณูปโภคของหัวเผาริเจนเนอเรทีฟ .....	40
ตารางที่ 4.12 อัตราเงินเดือนของพนักงานในแต่ละตำแหน่ง .....	40
ตารางที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟ .....	41
ตารางที่ 4.14 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหัวเผาริเจนเนอเรทีฟ.....	41
ตารางที่ 4.15 ผลการประหยัดที่ได้รับต่อปีจากการใช้หัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟ .....	49
ตารางที่ 4.16 ผลการประหยัดที่ได้รับต่อปีจากการใช้หัวเผาริเจนเนอเรทีฟ .....	49

ตารางที่ 4.17	สรุปผลค่าใช้จ่ายรวมสำหรับหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟ .....	50
ตารางที่ 4.18	สรุปผลค่าใช้จ่ายรวมสำหรับหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟ.....	51
ตารางที่ 5.1	ผลการวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐศาสตร์ของเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....	54
ตารางที่ 5.2	ผลการวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐศาสตร์ของเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....	55
ตารางที่ 5.3	ผลการวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐศาสตร์ของเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....	56
ตารางที่ 5.4	การเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติของหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟ .....	57
ตารางที่ 5.5	การเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติของหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟ.....	58
ตารางที่ 5.6	การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟในเตาเผาเหล็ก ขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....	59
ตารางที่ 5.7	การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟในเตาเผาเหล็ก ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....	60
ตารางที่ 5.8	การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟในเตาเผาเหล็ก ขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....	61
ตารางที่ 5.9	การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟในเตาเผาเหล็ก ขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....	62
ตารางที่ 5.10	การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟในเตาเผาเหล็ก ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....	63
ตารางที่ 5.11	การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟในเตาเผาเหล็ก ขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....	64
ตารางที่ 5.12	การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนลดของหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟ.....	65
ตารางที่ 5.13	การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนลดของหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟ.....	66
ตารางที่ 5.14	การเปลี่ยนแปลงอายุของหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟ .....	67
ตารางที่ 5.15	การเปลี่ยนแปลงอายุของหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟ.....	68
ตารางที่ 5.16	การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟของเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง.....	69
ตารางที่ 5.17	การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟของเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง.....	70
ตารางที่ 5.18	การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวเหวี่ยงเพอร์เรทีฟของเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง.....	71

ตารางที่ 5.19 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวรีเจนเนอเรทีฟของเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง.....	72
ตารางที่ 5.20 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวรีเจนเนอเรทีฟของเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง.....	73
ตารางที่ 5.21 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวรีเจนเนอเรทีฟของเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง.....	74
ตารางที่ ฉ.1 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเผาไร้คาร์บอนเรทีฟสำหรับเตา ขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....	159
ตารางที่ ฉ.2 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเผารีเจนเนอเรทีฟสำหรับเตา ขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....	162
ตารางที่ ฉ.3 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเผาไร้คาร์บอนเรทีฟสำหรับเตา ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....	165
ตารางที่ ฉ.4 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเผารีเจนเนอเรทีฟสำหรับเตา ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....	168
ตารางที่ ฉ.5 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเผาไร้คาร์บอนเรทีฟสำหรับเตา ขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....	171
ตารางที่ ฉ.6 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเผารีเจนเนอเรทีฟสำหรับเตา ขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....	174

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	กระบวนการต่อเนื่องในการผลิตเหล็ก .....2
รูปที่ 1.2	เตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) .....3
รูปที่ 1.3	ขั้นตอนการเผาเหล็ก .....3
รูปที่ 1.4	การสูญเสียความร้อนในไอเสียที่อุณหภูมิและอากาศส่วนเกินต่างๆสำหรับเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ.....4
รูปที่ 2.1	หัวเผาโรเจเนอเรทีฟแบบติดตั้งเป็นคู่.....10
รูปที่ 2.2	หัวเผาโรเจเนอเรทีฟแบบติดตั้งเป็นหัวเดียว.....10
รูปที่ 2.3	หลักการการทำงานของหัวเผาแบบโรเจเนอเรทีฟ .....11
รูปที่ 2.4	หัวเผาเซลฟ์-รีคัพเปอร์เรทีฟ.....13
รูปที่ 2.5	หลักการการทำงานของหัวเผาเซลฟ์-รีคัพเปอร์เรทีฟ .....13
รูปที่ 4.1	ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ สำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....42
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาโรเจเนอเรทีฟ สำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง .....43
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ สำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....44
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาโรเจเนอเรทีฟ สำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง .....45
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ สำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....46
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาโรเจเนอเรทีฟ สำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง .....47
รูปที่ 4.7	ต้นทุนรวมของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้งสองชนิด .....48
รูปที่ 5.1	การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิงค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลด อายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟขนาดเตา 40 ตัน/ชั่วโมง.....75

รูปที่ 5.2	การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิงค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลดอายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟขนาดเตา 70 ตัน/ชั่วโมง.....	76
รูปที่ 5.3	การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิงค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลดอายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟขนาดเตา 150 ตัน/ชั่วโมง.....	77
รูปที่ 5.4	การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิงค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลดอายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผาไร้เงินเนอเรทีฟขนาดเตา 40 ตัน/ชั่วโมง.....	78
รูปที่ 5.5	การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิงค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลดอายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผาไร้เงินเนอเรทีฟขนาดเตา 70 ตัน/ชั่วโมง.....	79
รูปที่ 5.6	การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิงค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลดอายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผาไร้เงินเนอเรทีฟขนาดเตา 150 ตัน/ชั่วโมง.....	80
รูปที่ ก.1	อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared Thermometer) .....	92
รูปที่ ค.1	แผนผังแสดงการตรวจวัดอุณหภูมิ .....	120
รูปที่ ค.2	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง .....	120
รูปที่ ค.3	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านซ้าย .....	121
รูปที่ ค.4	ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านขวา .....	121

# บทที่ 1

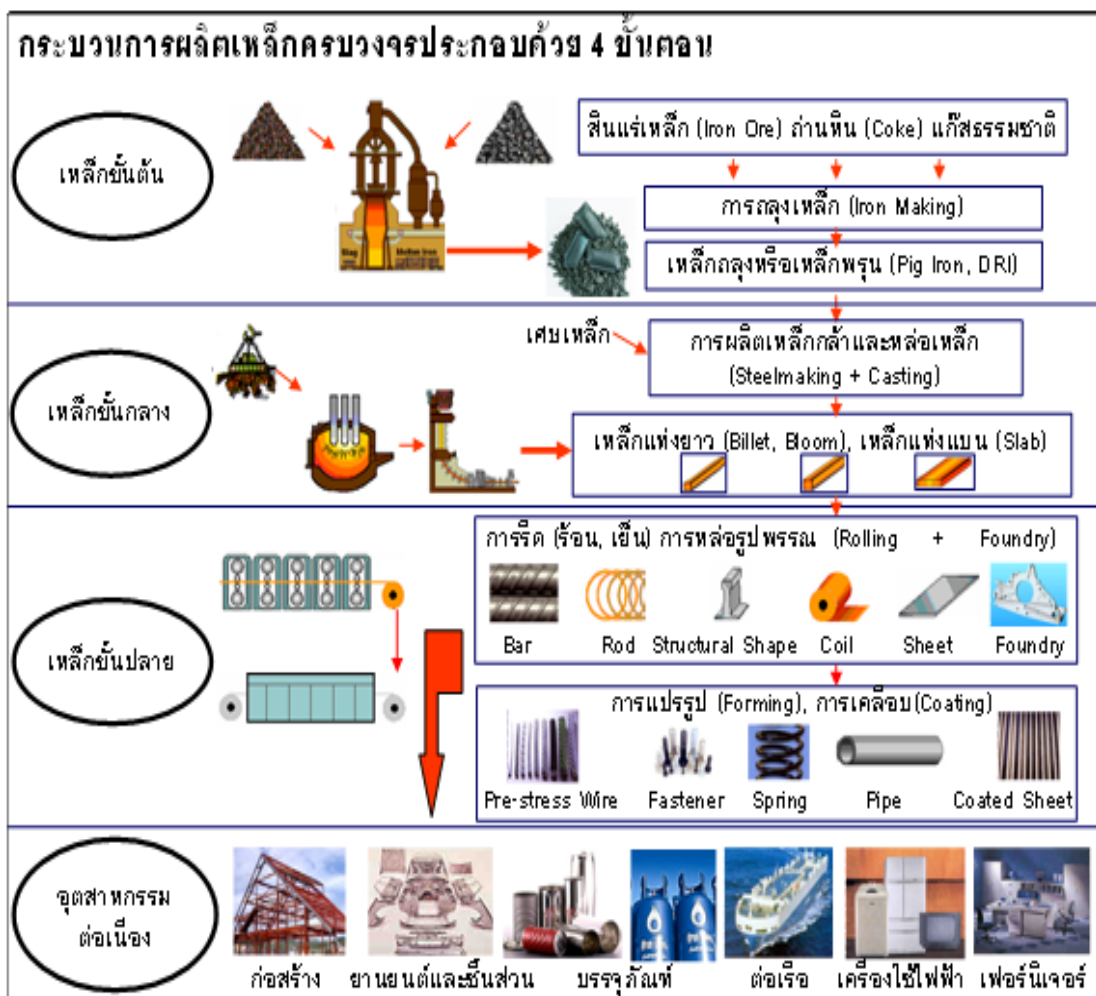
## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศเนื่องจากสามารถสร้างรายได้ให้กับประเทศได้ปีละหลายหมื่นล้านบาท โดยอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ามีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทยทั้งทางด้านการตอบสนองต่อผู้บริโภคทางตรงและด้านอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้างยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ การผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เฟอร์นิเจอร์บรรจุภัณฑ์ภาชนะและเครื่องใช้ต่างๆ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ามีแนวโน้มการขยายตัวอย่างต่อเนื่องทั้งการบริโภคภายในประเทศและการส่งออกไปยังต่างประเทศ เนื่องจากยังมีความต้องการการใช้ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าในปริมาณที่สูง ในมุมมองทางด้านพลังงานอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ปริมาณพลังงานค่อนข้างมากและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มระดับการใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องไปตามการขยายตัวของเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าส่วนใหญ่จะมีการใช้เทคโนโลยีแบบสำเร็จรูป ซึ่งรับทั้งความรู้ (Know-how) และเครื่องจักรมาจากต่างประเทศ แต่มีข้อจำกัดของเทคโนโลยีที่ไม่มีความยืดหยุ่นในการผลิตและเป็นอุตสาหกรรมที่อาศัยปัจจัยทางด้านพลังงานเป็นสำคัญเพราะต้องเดินเครื่องจักรตลอด 24 ชั่วโมง จึงก่อให้เกิดต้นทุนทางด้านพลังงานของอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ามีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 15-30 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางในการส่งเสริมและสนับสนุน ให้อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ามีการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งนอกจากจะส่งผลเรื่องพลังงานที่สามารถประหยัดได้แล้ว ยังเป็นการช่วยเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับต่างประเทศในเวทีการค้าโลกอีกด้วย

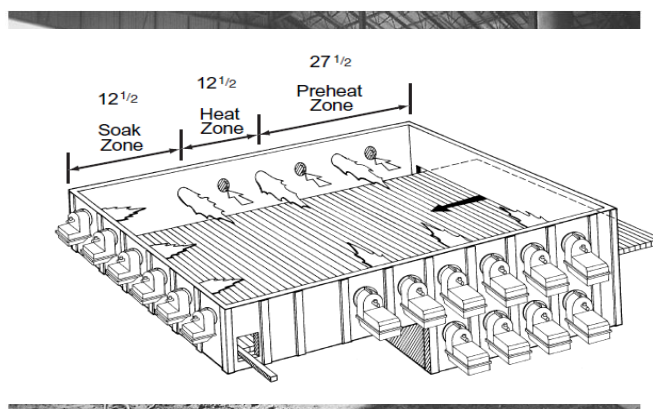
อุตสาหกรรมการผลิตเหล็กสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชั้น คือ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น เป็นอุตสาหกรรมเหล็กถลุง (pig iron) และเหล็กพูน (sponge iron) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้นของอุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางเป็นขั้นนำผลิตภัณฑ์จากการผลิตเหล็กขั้นต้นทั้งที่เป็นของเหลวและของแข็งรวมถึงเศษเหล็ก (scrap) มาหลอมปรับปรุงคุณสมบัติและส่วนผสมทางเคมีให้ได้เป็นเหล็กกล้า (steelmaking) รวมทั้งการหล่อเหล็กกล้าให้เป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่มีอยู่ 3 ประเภท ได้แก่ เหล็กแท่งยาว (billet) เหล็กแท่งแบน (slab) และเหล็กแท่งใหญ่ (bloom) สำหรับประเทศไทย ผู้ผลิตขั้นกลางจะผลิตด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าหรือเตาอินดักชัน โดยใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบหลักใน

การผลิต นอกจากการผลิตเหล็กกล้าแล้วอุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลางนี้ยังรวมไปถึง โดยเหล็กแท่งยาว จะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กเส้น เหล็กหลอด และเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน สำหรับการ ผลิตเหล็กแท่งแบนจะต้องใช้ระดับเทคโนโลยีที่สูงกว่าการผลิตเหล็กแท่งยาว และจะเป็นวัตถุดิบใน การผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนเท่านั้น ส่วนเหล็กแท่งใหญ่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็ก โครงสร้าง รูปพรรณรีดร้อนขนาดใหญ่ และอุตสาหกรรมเหล็กชั้นปลายเป็นขั้นของการแปรรูปผลิตภัณฑ์กึ่ง สำเร็จรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ได้แก่ การรีดร้อน การรีดเย็น การเคลือบผิว การผลิตท่อเหล็ก การตี เหล็กขึ้นรูป ซึ่งจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตทางการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่ต่อเนื่อง เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า อุตสาหกรรมเครื่องใช้ภายในบ้าน เป็นต้น[1]



รูปที่ 1.1 กระบวนการต่อเนื่องในการผลิตเหล็ก[2]

สำหรับกระบวนการอบเหล็ก(Reheating)จะใช้อุปกรณ์หลักได้แก่ เตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace) โดยพลังงานที่ใช้ คือ พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซธรรมชาติ ก๊าซหุงต้ม เป็นต้น ในการให้พลังงานความร้อนแก่ชิ้นเหล็กแท่งแบบต่างๆ โดยทั่วไปอุณหภูมิของเตาจะอยู่ที่ประมาณ 1,100-1250 องศาเซลเซียส ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการรีดด้วยลูกรีด (Roughing Mill) เพื่อลดขนาดให้เป็นเหล็กเส้น เหล็กทวด เหล็กรูปพรรณ และเหล็กแผ่น เพื่อไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ต่อไป กระบวนการอบเหล็กนั้นจะแบ่งเป็นขั้นตอนย่อยๆ 3 ขั้นตอน คือ Preheating, Heating และ Soaking ในขั้นตอนของการPreheating นั้นชิ้นเหล็กจะถูกทำให้ร้อน ขั้นตอนต่อไปคือการHeating โดยการให้ความร้อนแก่เหล็กจนอุณหภูมิสูงตามที่ต้องการ และขั้นตอนสุดท้ายSoakingจะเป็นการบ่มอุณหภูมิเหล็กเพื่อให้มีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั้งชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าในระหว่างกระบวนการผลิต จำเป็นที่จะต้องมีการให้ความร้อนกับเหล็กไปที่ระดับอุณหภูมิมากถึง 1,101-1,250 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงก่อให้เกิดการสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซไอเสียซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้



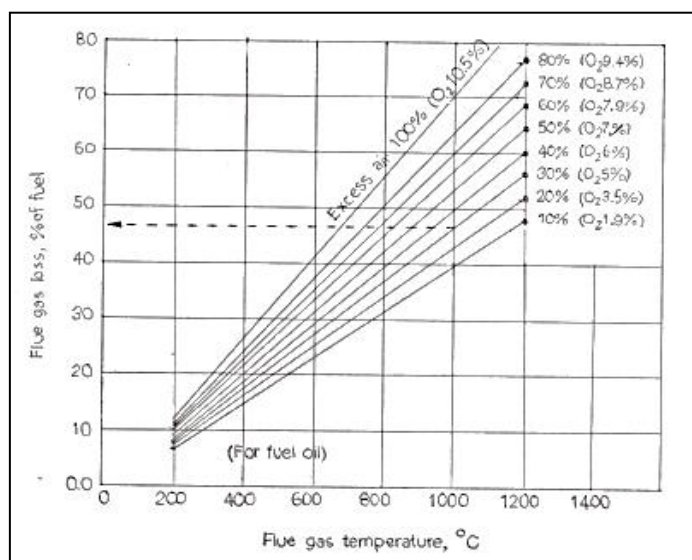
รูปที่ 1.2 เตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) [3]

ในปี 2553 ปริมาณการผลิตเหล็กขั้นปลายหรือผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูป ภายในประเทศมีประมาณ 3,165,115 เมตริกตันซึ่งต้องใช้ต้นทุนในการผลิตเป็นจำนวนเงิน 24,687 ล้านบาท โดยในที่มีสัดส่วนมาจากค่าพลังงานมากถึง 1,234 ล้านบาทแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กขั้นปลายหรือผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปในปริมาณที่มาก จากผลการสำรวจคาดว่าจะมีการใช้พลังงาน 1,600-1,700 MJ/ตันเหล็ก\* ในขณะที่การใช้พลังงานสำหรับกระบวนการผลิตเหล็กขั้นปลายหรือผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปสำหรับประเทศญี่ปุ่นซึ่งจัดได้ว่าเป็นประเทศที่มีการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดนั้น มีการใช้พลังงานเพียง 1,174 MJ/ตันเหล็ก\* ซึ่งเชื้อเพลิงที่เป็นแหล่งให้พลังงานรูปที่ 1.3 ขั้นตอนการเผาเหล็ก [3] มชาติ เป็นต้น มีราคาเพิ่มสูงขึ้น



และมีการผันผวนขึ้นลงตามสภาวะทางเศรษฐกิจ โดยประเทศต่างๆทั่วโลกต่างให้ความสำคัญต่อการใช้พลังงานซึ่งเป็นต้นทุนที่สำคัญในการผลิต ซึ่งอุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานจำนวนมากสาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการใช้พลังงานอย่างไม่มีประสิทธิภาพในการผลิตเหล็กขั้นปลายหรือผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปนั้น คือการสูญเสียพลังงานความร้อนจากก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงในระหว่างการเผาเหล็กหากไม่มีวิธีการที่เหมาะสมในการนำความร้อนจากก๊าซไอเสียไปกลับมาใช้ประโยชน์ ก็จะมีการสูญเสียพลังงานอย่างมหาศาลกับไอเสีย (\*ที่มา: สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย)

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เครื่องจักรต่างๆที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนมักจะมีความร้อนที่ใช้อย่างไม่หมดแล้วปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ โดยมีการสูญเสียในรูปของความร้อนที่ปะปนไปกับก๊าซไอเสีย



รูปที่ 1.4 การสูญเสียความร้อนในไอเสียที่อุณหภูมิและอากาศส่วนเกินต่างๆ สำหรับเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ[4]

จากรูปที่ 1.4 แสดงสัดส่วนการสูญเสียพลังงานออกไปกับก๊าซไอเสียที่ค่าต่างๆ ของอุณหภูมิไอเสียที่ปล่อยทิ้งและอากาศส่วนเกินที่ใช้ในการเผาไหม้ ตัวอย่างเช่น เตาเผาที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงและมีการเผาไหม้ด้วยอากาศส่วนเกิน 30 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีการปล่อยทิ้งไอเสียที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส จากรูปพบว่า จะมีการสูญเสียความร้อนประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์

แนวทางการอนุรักษ์พลังงานที่มีการใช้กันสำหรับการลดการสูญเสียความร้อนไปกับก๊าซไอเสียนั้นคือการนำความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่สำหรับเตาเผาเหล็ก (Reheating Furnance) เช่น การอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ทั้งภายในหัวเผาหรือนำออกไปใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบรีคัฟเพอเรเตอร์ (Recuperator) หรือเครื่องสะสมความร้อน

(Regenerator), การอุ่นแห้งเหล็ก (Stock) ก่อนบรรจุเข้าเตาหลอม, การอุ่นเตาหลอมโดยใช้ความร้อนทิ้งจากเตาหลอมอื่น (Furnace regeneration), การให้ความร้อนกับพื้นที่หรือการผลิตน้ำร้อน, การผลิตไอน้ำสำหรับกระแสไฟฟ้า, การอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา เป็นต้น

เทคโนโลยีหัวเผาประสิทธิภาพสูง ปัจจุบันเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ออกแบบมาเพื่อให้นำความร้อนกลับมาใช้งานได้มากที่สุด โดยยังไม่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทยโดยหัวเผาประสิทธิภาพสูงสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burners) และหัวเผารีคัฟเพอเรทีฟ (Recuperative Burners) หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burners) คือหัวเผาที่ออกแบบมาเพื่อให้มีการนำเอาความร้อนทิ้งกลับมาใช้ให้ได้มากที่สุดซึ่งก๊าซไอเสียจะนำมาเก็บสะสมความร้อนที่ห้องสะสมความร้อนการสะสมความร้อนสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากห้องกักเก็บก๊าซไอเสียถูกออกแบบให้ใช้วัสดุที่สะสมความร้อนได้สูงมากอากาศเย็นที่จะใช้ในการเผาไหม้จะแลกเปลี่ยนความร้อนจากห้องกักเก็บไอเสียทำให้อากาศที่จะใช้เผาไหม้มีอุณหภูมิสูงได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิใช้งานทำให้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากและประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้นนอกจากนี้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟยังออกแบบเพื่อให้อากาศที่ถูกทำให้ร้อนขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านหัวเผาเข้าไปในเตาเผาด้วยความเร็วสูงกว่าหัวเผาทั่วไปทำให้เร่งการหมุนเวียนของก๊าซเผาไหม้ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและยังช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ทำให้การปลดปล่อย  $\text{NO}_x$  สามารถลดลงได้ [5] ส่วนหัวเผารีคัฟเพอเรทีฟ (Recuperative Burners) คือหัวเผาที่มีลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อแผ่งสี โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าวจะถูกสร้างขึ้นมาติดกับหัวเผาเป็นชุดเดียวกันมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยการนำก๊าซไอเสียทิ้งมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศเย็นที่จะใช้เผาไหม้ซึ่งการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวหัวเผาที่ออกแบบให้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในตัวเองเมื่ออากาศเย็นที่จะใช้ในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้นและประหยัดเชื้อเพลิง

เนื่องจากเทคโนโลยีหัวเผาประสิทธิภาพสูงมีความซับซ้อนในการติดตั้งและค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูงมีราคาค่อนข้างสูง เช่นค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา เป็นต้นจึงก่อให้เกิดความไม่มั่นใจของผู้ประกอบการในการตัดสินใจเลือกใช้เทคโนโลยีหัวเผาประสิทธิภาพสูง และจากนโยบายการอนุรักษ์พลังงานตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2554-2573 ที่มีการส่งเสริมให้มีการประหยัดหรือลดการใช้พลังงานที่ไม่จำเป็น โดยการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานซึ่งหมายถึงการทำงานที่ได้ผลลัพธ์ปกติแต่ใช้พลังงานน้อยกว่าปกติ

และมีการสนับสนุนการลงทุนเพื่อใช้เครื่องจักรและอุปกรณ์ประสิทธิภาพสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน

ดังนั้นเพื่อเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้เทคโนโลยีห้วเผาประสิทธิภาพสูงอย่างแพร่หลายและเป็นทางเลือกให้กับผู้ประกอบการ จึงได้มีการจัดทำงานวิจัยนี้ขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของห้วเผาประสิทธิภาพสูงแบบรีเจนเนอเรทีฟและรีคัลเปอร์เรทีฟ รวมถึงวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการนำเทคโนโลยีห้วเผาประสิทธิภาพสูงมาใช้สำหรับอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทย เพื่อตอบสนองนโยบายการอนุรักษ์พลังงานตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบการใช้พลังงานของห้วเผาประสิทธิภาพสูงชนิดรีเจนเนอเรทีฟและรีคัลเปอร์เรทีฟในเตาเผาเหล็ก(Reheating Furnace)สำหรับอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

1.2.2 สามารถเลือกอุณหภูมิในการอุ่นอากาศของห้วเผาประสิทธิภาพสูงให้มีความเหมาะสมกับขนาดของเตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace) เพื่อทดแทนการใช้งานห้วเผาแบบเดิมที่มีการใช้งานในปัจจุบัน

1.2.3. เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบในการลงทุนห้วเผาประสิทธิภาพสูงหากมีการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงและอัตราการผลิต

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1.ศึกษาเตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) แบบคานรับเคลื่อนที่ (walking beam) และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง

1.3.2. ศึกษาระบบการทำงานของเตาแบบต่อเนื่อง โดยมีลักษณะการทำงานแบบปกติหรือมีสภาวะการทำงานที่คงที่ (steady state)

1.3.3 การวิเคราะห์สมดุลพลังงานจะใช้ความดันบรรยากาศที่  $P_0 = 1 \text{ bar}$  (ความดันสมบูรณ์) ที่อุณหภูมิ  $T_{\text{sur}} = 30^\circ\text{C}$  (คืออุณหภูมิที่ความดันบรรยากาศโดยเฉลี่ยของโรงงานผลิตเหล็ก) และอุณหภูมิของเหล็กขณะออกจากเตา  $T_{\text{out}} = 1250^\circ\text{C}$  (คืออุณหภูมิโดยเฉลี่ยของของเหล็กที่ออกจากเตาเผา)

1.3.4 โรงงานตัวอย่างมีกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นแบบคานรับเคลื่อนที่ (walking beam) จำนวน 5 โรงงานซึ่งประกอบไปด้วยเตาขนาด 40ตัน/ชั่วโมง, 70ตัน/ชั่วโมงและ 150 ตัน/ชั่วโมง

1.3.5 กำหนดให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเหล็กมีค่าคงที่

1.3.6 หัวเผาประสิทธิภาพสูง 2ชนิดคือหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burners) เปรียบเทียบกับหัวเผารีคัพเพอเรทีฟ (Recuperative Burners)

1.3.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือค่าอุณหภูมิที่หัวเผาแต่ละชนิดสามารถอุ่นได้ และกำลังการผลิตเหล็ก

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1. ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาสามารถนำมาเป็นแนวทางในการลดการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมตามนโยบายการอนุรักษ์พลังงานตามพระราชบัญญัติส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2554-2573 โดยการนำเทคโนโลยีหัวเผาประสิทธิภาพสูงมาประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า และส่งเสริมให้มีการใช้งานภายในประเทศอย่างแพร่หลาย

1.4.2. ทราบถึงอุณหภูมิการอุ่นอากาศที่เหมาะสมในการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้งสองชนิดได้อย่างเหมาะสมในเตาแบบคานรับเคลื่อนที่ (walking beam) สำหรับอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า

## 1.5 สมมติฐาน

1.5.1. อุณหภูมิที่หัวเผาประสิทธิภาพสูงสามารถอุ่นได้ ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ในการผลิตเหล็กและอัตราการการประหยัดเชื้อเพลิงมีค่าลดลง

1.5.2. การเลือกใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงได้อย่างเหมาะสมส่งผลให้ประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น

1.5.3. การเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตเหล็กส่งผลต่อการเลือกใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า

1.6.2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้ง2ชนิด คือหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burners) และหัวเผารีคัพเพอเรทีฟ (Recuperative Burners)

1.6.3. ทำการเก็บข้อมูลการใช้พลังงานใน โรงงานผลิตเหล็กตัวอย่าง

1.6.4. ศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการใช้เชื้อเพลิง ได้แก่ ความสามารถในการอุ่นอากาศของหัวเผาประสิทธิภาพสูง และกำลังการผลิตของเตาเผาเหล็ก

1.6.5. การวิเคราะห์ข้อมูล

- คำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก

- คำนวณหาปริมาณความต้องการพลังงานและอัตราการใช้เชื้อเพลิง เมื่อใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง

1.6.6. กำหนดอุณหภูมิการอุ่นอากาศที่เหมาะสมในการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการอุ่นอากาศกับต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้งแบบรีเจนเนอเรทีฟ และแบบรีคัพเพอเรทีฟ

1.6.7. เลือกใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง โดยการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

1.6.8. สรุปผลการวิจัย

1.6.9. จัดทำรายงานวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หัวเผาประสิทธิภาพสูง

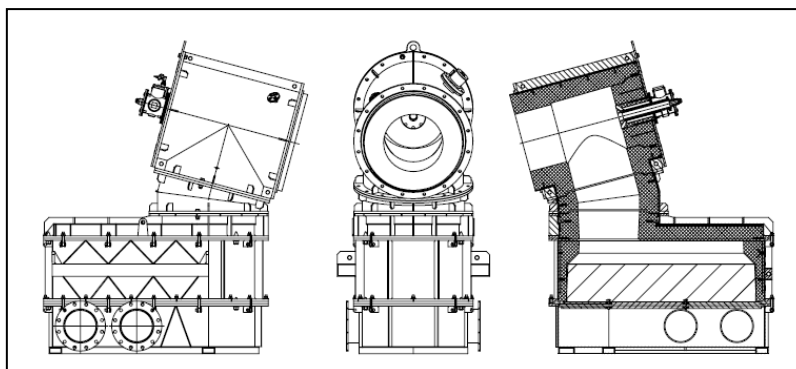
ปัจจุบันได้มีการพัฒนาหัวเผาให้มีประสิทธิภาพสูงเพิ่มมากขึ้น เพื่อใช้กับการเผาไหม้ในกรณีที่อุณหภูมิสูง เช่น เตาอุตสาหกรรม โดยอาศัยหลักการนำความร้อนเหลือทิ้งจากก๊าซไอเสียกลับมาอุ่นอากาศก่อนเข้าเตาเผาไหม้ หัวเผาประสิทธิภาพสูงมี 2 แบบคือ หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burners) และหัวเผารีคัพเพอเรทีฟ (Recuperative Burners)

##### 2.1.1 หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burners)

หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burners) คือหัวเผาที่ออกแบบมาเพื่อให้มีการนำความร้อนที่ปล่อยทิ้งกลับมาไปใช้ในการอุ่นอากาศ ซึ่งก๊าซไอเสียจะนำมาเก็บสะสมความร้อน การสะสมความร้อนสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพเนื่องจากห้องกักเก็บก๊าซไอเสียถูกออกแบบให้ใช้วัสดุที่สะสมความร้อนได้สูงมาก อากาศเย็นที่จะใช้ในการจะแลกเปลี่ยนความร้อนจากห้องกักเก็บก๊าซไอเสียทำให้อากาศที่จะใช้เผาไหม้มีอุณหภูมิสูงได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิใช้งาน ทำให้สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากและประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น นอกจากนี้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟยังออกแบบเพื่อทำให้อากาศที่ถูกทำให้ร้อนขึ้นจนมีอุณหภูมิสูงวิ่งผ่านเข้าไปในเตาเผาด้วยความเร็วที่เร็วกว่าหัวเผาทั่วไป ทำให้แรงการหมุนเวียนของก๊าซเผาไหม้ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และยังช่วยลดอุณหภูมิสูงสุดของเปลวเพลิงในห้องเผาไหม้ ทำให้การปลดปล่อยก๊าซ NO<sub>x</sub> สามารถลดลงได้ หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burners) โดยทั่วไปมี 2 ประเภทตามลักษณะการติดตั้ง คือ

- หัวเผารีเจนเนอเรทีฟแบบติดตั้งเป็นคู่ (Twin Bed Burner)

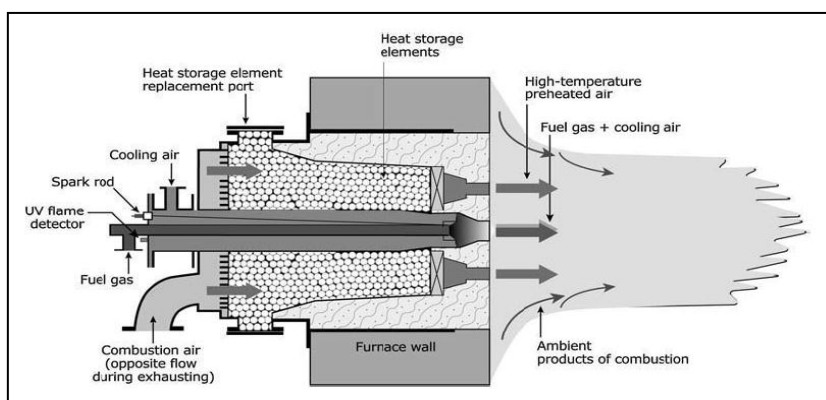
เป็นหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่ติดตั้งใช้งานเป็นคู่และสลับกันทำงาน โดยควบคุมการทำงานวาล์วสลับทางซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาในการสลับกันทำงาน เหมาะสำหรับหัวเผาที่มีความต้องการความร้อนมาก แต่ต้องใช้พื้นที่ติดตั้งมากกว่า



รูปที่ 2.1 หัวเผาเริเจนอเรทีฟแบบติดตั้งเป็นคู่ (Twin Bed Burner) [6]

- หัวเผาเริเจนอเรทีฟแบบติดตั้งเป็นหัวเดียว (Self-Regenerative Burners)

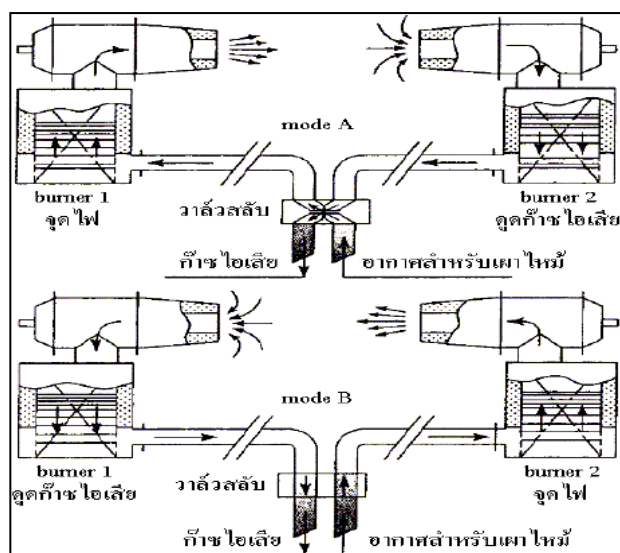
เป็นหัวเผาเริเจนอเรทีฟที่ติดตั้งใช้งานเพียงหัวเดียว โดยในหัวเผาหนึ่งหัวจะประกอบไปด้วยวัสดุสะสมความร้อนสองชุด ซึ่งทำงานสลับกันระหว่างการสะสมความร้อนกับการปลดปล่อยความร้อน



รูปที่ 2.2 หัวเผาเริเจนอเรทีฟแบบติดตั้งเป็นหัวเดียว (Self-Regenerative Burners) [6]

หลักการสำคัญที่ทำให้หัวเผาแบบรีเจนอเรทีฟประหยัดเชื้อเพลิงได้นั้นคือการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศเย็นที่จะใช้เผาไหม้ ซึ่งชุดหัวเผาแบบรีเจนอเรทีฟประกอบไปด้วยหัวเผาและรีเจนอเรเตอร์ อย่างละ 2 ชุด และวาล์วสลับทิศทางอีก 1 ชุด หลักการทำงานคือ หัวเผาชุดที่ 1 ทำงาน อากาศจากภายนอกจะถูกป้อนเข้าที่รีเจนอเรเตอร์ชุดที่ 1 ในขณะเดียวกันก๊าซไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้จะผ่านออกไปทางหัวเผาชุดที่ 2 และไปเก็บสะสมความร้อนที่รีเจนอเรเตอร์ชุดที่ 2 เมื่อวาล์วสลับทิศทางการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าไป อากาศก็จะถูกอุ่น โดยความร้อนที่สะสมในรีเจนอเรเตอร์ก่อนที่จะถึงหัวเผาทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น การเผาไหม้ที่หัวเผาชุดที่ 2 ก็จะประหยัดเชื้อเพลิงได้ การสลับทิศทางของวาล์วจะสลับทุกๆ 10-60 วินาที ขึ้นอยู่กับการออกแบบ ดังนั้นหัวเผาชุดที่ 1 และ 2 จะได้รับการอุ่น

อากาศก่อนการเผาไหม้ตลอดเวลา สำหรับก๊าซร้อนที่ถูกใช้ให้ความร้อนไปแล้วจะถูกดึงออกโดยพัดลมดูดอากาศสำหรับการเผาไหม้ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของหัวเผาแบบปริเจนเนอร์ทิฟ [6]

ส่วนประกอบที่สำคัญของหัวเผาแบบปริเจนเนอร์ทิฟ คือวัสดุสะสมความร้อน (Heat storage element) ซึ่งใช้วัสดุสะสมความร้อนที่ทำโดยลูกบอลเซรามิก วัสดุสะสมความร้อนแบบนี้ นับว่าเป็นแบบที่ใช้ในยุคแรกขงหัวเผาชนิดนี้ เนื่องจากผลิตง่ายทนทานทั้งในเชิงกลและใช้เชิงความร้อนทำความสะอได้ง่ายและเมื่อชำรุดเสียหายสามารถเปลี่ยนได้ง่าย วัสดุสะสมความร้อนอาจแบ่งได้ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือแบบลูกบอลเซรามิกและแบบรังผึ้ง ซึ่งมีทั้งรังผึ้งที่ทำด้วยเซรามิกและเหล็กกล้าโรสนิม

- วัสดุสะสมความร้อนชนิดลูกบอลเซรามิก

วัสดุสะสมชนิดนี้มีข้อดีตรงที่ผลิตง่าย รองรับอุณหภูมิได้สูง ทนทาน ทำความสะอได้ง่าย และเปลี่ยนได้ง่าย เนื่องจากต้องทำงานภายใต้อุณหภูมิสูงจึงต้องเลือกใช้วัสดุที่สามารถทนต่ออุณหภูมิการทำงานได้ เช่น อะลูมินา เป็นต้นขนาดของลูกบอลโดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 13-15 มม. เมื่อผ่านการใช้งานไประยะหนึ่งแล้ว ลูกบอลเซรามิกอาจจะมีฝุ่นผงหรือเขม่าเกาะ ทำให้สมรรถนะทางความร้อนด้อยลง และมีการสูญเสียความดันสูง การฟื้นฟูสภาพของลูกบอลทำได้โดยการขัดด้วยเครื่องขัด อย่างไรก็ตามในการขัดแต่ละครั้งจะทำให้ขนาดของลูกบอลเล็กลง เป็นผลให้การสูญเสียความดันของอากาศหรือแก๊สของไอเสียเมื่อไหลผ่านวัสดุสะสมความร้อนสูงขึ้น ซึ่งถึงจุดหนึ่งจะไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานอีกต่อไปจำเป็นต้องเปลี่ยนลูกบอลใหม่



#### - วัสดุสะสมความร้อนชนิดรังผึ้ง

วัสดุสะสมความร้อนชนิดนี้มีทั้งทำด้วยเซรามิกและทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิดที่ทำด้วยเซรามิกมักจะทำเป็นบล็อกที่มีช่องทางการไหลในการใช้งานจะนำบล็อกเหล่านี้มาเรียงต่อกันให้ได้ขนาดตามต้องการ ซึ่งถือว่าเป็นข้อดีกว่าเหนือกว่าชนิดลูกบอลเซรามิก ข้อคืออีกประการหนึ่งคือ มีการสูญเสียความดันน้อยกว่าชนิดลูกบอลเซรามิกด้วย อย่างไรก็ตามมีข้อด้อย คือ ไม่ทนทานเท่าชนิดลูกบอลเซรามิก และเมื่อเกิดการชำรุดที่จุดใดจุดหนึ่งหรือบล็อกใดบล็อกหนึ่งแล้ว จำเป็นจะต้องรื้อออกมาทั้งหมด ไม่สามารถซ่อมแซมเฉพาะส่วนได้

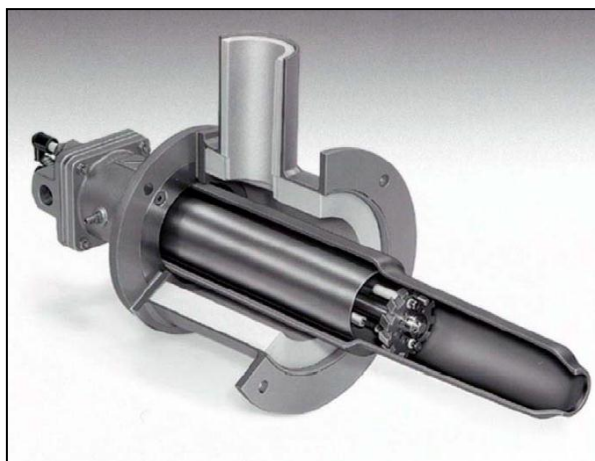
สำหรับวัสดุสะสมความร้อนชนิดรังผึ้งที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมนั้น นับเพียงเป็นรูปแบบที่มีการพัฒนาใช้งานล่าสุด ซึ่งจุดเด่นที่เหนือกว่าชนิดลูกบอลเซรามิกและรังผึ้งเซรามิกคือ มีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมากจึงทำให้สามารถทำงานโดยมีคาบเวลาการสลับสั้นมาก เป็นผลให้มีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามรังผึ้งเหล็กกล้าไร้สนิมที่ข้อจำกัดที่อุณหภูมิการใช้งาน ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส

#### 2.1.2 หัวเผาแบบรีคัพเปอร์เรทีฟ (Regenerative Burners)

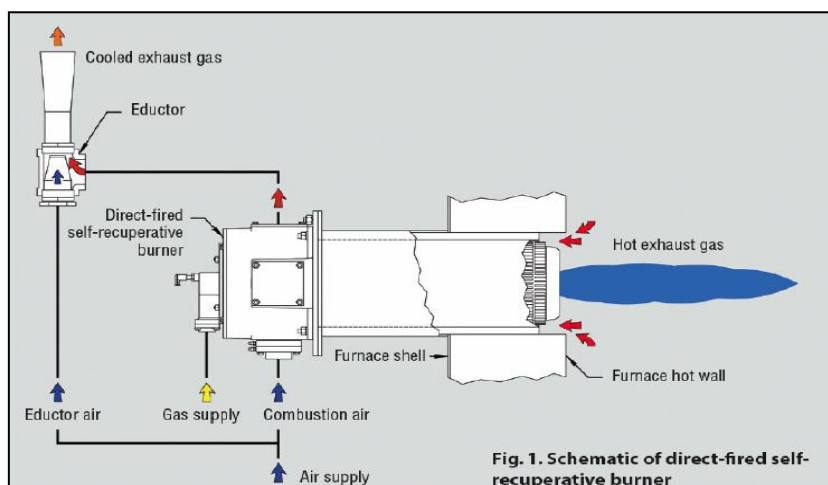
หัวเผาแบบรีคัพเปอร์เรทีฟ (Regenerative Burners) คือหัวเผาที่มีลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบทอแผ่รังสีโดยก๊าซที่ส่งจะถูกส่งผ่านรีคัพเปอร์เรเตอร์ที่ติดตั้งแยกต่างหาก ซึ่งโดยปกติจะต่อเข้ากับปล่องของเตาหลอมเพื่อที่จะใช้อุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้ การพัฒนาที่ตามมาทำให้เกิดหัวเผาแบบเซลฟี่รีคัพเปอร์เรทีฟ (Self-Regenerative Burners) ซึ่งมีลักษณะเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบทอแผ่รังสี โดยจะถูกสร้างขึ้นมาติดกับหัวเผาเป็นชุดเดียวกันมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยการนำก๊าซไอเสียทิ้งมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศเย็นที่จะใช้เผาไหม้ซึ่งการแลกเปลี่ยนความร้อนจะเกิดขึ้นภายในตัวหัวเผาที่ออกแบบให้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในตัวเองเมื่ออากาศเย็นที่จะใช้ในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้นและประหยัดเชื้อเพลิง หัวเผาแบบเซลฟี่-รีคัพเปอร์เรทีฟมีข้อดีตรงที่มีขนาดกระทัดรัดและมีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนที่สูง เนื่องจากการสูญเสียความร้อนจากก๊าซที่น้อยมากและมีความสะดวกในการปรับปรุงให้เข้ากับอุปกรณ์เดิมที่ติดตั้งอยู่แล้ว

การแลกเปลี่ยนความร้อนในหัวเผาเซลฟี่-รีคัพเปอร์เรทีฟ หลักการที่สำคัญที่ทำให้หัวเผาแบบเซลฟี่-รีคัพเปอร์เรทีฟประหยัดเชื้อเพลิงได้ นั่นคือการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศเย็นที่จะเผาไหม้ ซึ่งก๊าซไอเสียจะไหลผ่านหัวเผาที่ติดตั้งอุปกรณ์ดึงก๊าซไอเสีย (Flue Gas Eduction) โดยเหนี่ยวนำให้ก๊าซไอเสียไหลผ่านหัวเผาในส่วนที่เป็นชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดตั้งภายในหัวเผา ก๊าซไอเสียจะ

แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศเย็นที่ใช้ในการเผาไหม้ที่ไหลผ่านช่องรอบนอกตัวหัวเผาหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ติดกับหัวเผาดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 หัวเผาเซลฟ์-รีคัฟเปอเรทีฟ [7]



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานของหัวเผาเซลฟ์-รีคัฟเปอเรทีฟ [7]

## 2.2 ทฤษฎีการวิเคราะห์พลังงาน

การพิจารณาปริมาณควบคุมสำหรับระบบที่มีการถ่ายเทมวลกับสิ่งแวดล้อม ทำให้มีพลังงานส่วนหนึ่งไหลเข้าและออกไปพร้อมกับการถ่ายเทของมวล ซึ่งพลังงานเหล่านี้สามารถวิเคราะห์ได้จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับปริมาณควบคุม โดยอาศัยหลักการของกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) ดังสมการ

$$Q_{cv} - w_{cv} - \sum E_{in} - \sum E_{out} = \Delta E_{CV} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$Q_{cv}$	คือพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ข้ามผิวควบคุมของปริมาตรควบคุม
	$w_{cv}$	คืองานทั้งหมดที่คาบผิวควบคุมของปริมาตรควบคุม
	$\sum E_{in}$	คือพลังงานทั้งหมดของมวลที่ไหลเข้าปริมาตรควบคุม
	$\sum E_{out}$	คือพลังงานทั้งหมดของมวลที่ไหลออกจากปริมาตรควบคุม
	$\Delta E_{CV}$	คือ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานสุทธิในปริมาตรควบคุม

พิจารณาในรูปสมการเชิงอัตรา

$$Q_{cv} - w_{cv} - \sum \dot{m}_i \left( h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gZ_i \right) - \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gZ_e \right) = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (2.2)$$

เนื่องจากความแตกต่างของพลังงานศักย์และพลังงานจลน์มีค่าน้อยมาก สามารถพิจารณาให้เป็นศูนย์ โดยระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) หรือไม่เปลี่ยนแปลงพลังงานสุทธิภายในปริมาตรควบคุม ( $dm_{cv}/dt = 0$ )

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) สามารถคำนวณสมดุลพลังงาน (Energy balance) ดังสมการต่อไปนี้

[พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก] = [พลังงานความร้อนไหลออกจากเตาเผาเหล็ก]

$$\sum \dot{Q}_i = \sum \dot{Q}_o \quad (2.3)$$

ในกรณีที่ความดันภายในเตาเผาเป็นค่าคงที่เมื่อเทียบกับความดันบรรยากาศ และมีสภาวะการทำงานแบบปกติ โดยรายละเอียดของสมดุลความร้อนที่เข้าและออกจากเตาเผามีดังนี้

**พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย**

- (1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
- (2) ความร้อนสัมผัสของอากาศ

**พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย**

- (1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก
- (2) ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย
- (3) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา

(4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด

(5) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

โดยการคำนวณพลังงานความร้อนของแต่ละตัวมีการกำหนดค่าอุณหภูมิอ้างอิง ( $T_0$ ) และความดันอ้างอิง ( $P_0$ ) ไว้ที่  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $1\text{ atm}$  ตามลำดับ การกำหนดเพื่อให้เป็นไปตามหลักเกณฑ์มาตรฐานสากล

### พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาหลัก

1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นพลังงานความร้อนหลักของเตาเผาที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีไปเป็นพลังงานทางความร้อน

$$Q_{in1} = m_{fuel}LHV \quad (2.4)$$

เมื่อ  $m_{fuel}$  คืออัตราการใช้เชื้อเพลิง  
 $LHV$  คือค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ

2) ความร้อนสัมผัสของอากาศ

เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากอุณหภูมิอากาศที่เข้าเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมโดยสำหรับเตาเผาหลักความร้อนสัมผัสของอากาศได้รับมาจากการนำความร้อนกลับจากความร้อนสูญเสียจากไอเสียโดยใช้รีคิฟเปอร์เรเตอร์ (recuperator) ในการนำความร้อนกลับใช้ใหม่

$$Q_{in2} = \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur}) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\dot{m}_{air}$  คืออัตราการไหลของอากาศ  
 $\rho_{air}$  คือความหนาแน่นของอากาศ  
 $c_{air}$  คือค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ  
 $T_{air}$  คืออุณหภูมิของอากาศที่ผ่าน recuperator  
 $T_{sur}$  คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

### พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาหลัก

## 1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก

ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็กเป็นพลังงานความร้อนที่เหล็กสามารถกักเก็บได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้นก่อนกระบวนการรีดเหล็กต่อไป เพื่อให้ง่ายต่อการรีดเหล็ก

$$Q_{out1} = m_{steel} c_{p,s} (T_{out} - T_{sur}) \quad (2.6)$$

เมื่อ	$m_{steel}$	คืออัตราการผลิตเหล็กที่ออกจากเตาเผา
	$c_{p,s}$	คือค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก
	$T_{out}$	คืออุณหภูมิของเหล็กที่ออกจากเตาเผา
	$T_{sur}$	คืออุณหภูมิของเหล็กที่เข้าสู่เตาเผา

## 2) ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย

เป็นค่าความร้อนสัมผัสที่ออกไปพร้อมกับไอเสียที่ออกจากเตาเผาเหล็ก ซึ่งอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิตั้งแวดล้อม

$$Q_{out2} = m_{flue} c_{p,f} (T_{gas} - T_{sur}) \quad (2.7)$$

เมื่อ	$m_{flue}$	คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง
	$c_{p,f}$	คือค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง
	$T_{gas}$	คือค่าอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ปล่อยไอเสีย
	$T_{sur}$	คือค่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

## 3) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผาเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนตามธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน แล้วถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อม เนื่องจากอุณหภูมิของผนังเตาเผาเหล็กมีค่าสูงกว่าสิ่งแวดล้อม

$$Q_{out3} = hA(T_{wall} - T_{sur}) + \sigma A \epsilon \{ (T_{wall})^4 - (T_{sur})^4 \} \quad (2.8)$$

เมื่อ	$h$	คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติเฉลี่ย
	$A$	คือพื้นที่ผิวภายนอกของเตาเผา
	$T_{wall}$	คืออุณหภูมิที่ผิวเตาบริเวณภายนอก

$T_{sur}$	คืออุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
$\varepsilon$	คือค่า Emissivity ของผนังเตา
$\sigma$	คือค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่า $5.67 \times 10^{-8}$

#### 4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด

ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดเป็นพลังงานความร้อนที่สูญเสียที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อนทางช่องเปิดต่างๆ เนื่องจากความร้อนของก๊าซเสียมีความดันสูงหรือต่ำกว่าความดันบรรยากาศ

$$Q_{out4} = C_{rad} C_{rad,black} \varepsilon A_{opening} \quad (2.9)$$

เมื่อ	$C_{rad}$	คือตัวคูณการแผ่รังสีความร้อน
	$C_{rad,black}$	คือพื้นที่ผิวภายนอกของเตาเผา
	$\varepsilon$	คือค่า Emissivity ของผนังเตา
	$A_{opening}$	คือพื้นที่ของช่องเปิดหลัก

#### 5) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

ความร้อนสูญเสียอื่นๆเป็นพลังงานความร้อนสูญเสียที่ไม่สามารถหาค่าได้ เช่น ความร้อนสูญเสียผ่านหลังคาและพื้นเตา เป็นต้น จึงจำเป็นต้องอาศัยหลักการอนุรักษ์พลังงาน เพื่อหาสมดุลพลังงานของเตาเผาดังสมการ

$$Q_{out5} = (Q_{in1} + Q_{in2}) - (Q_{out1} + Q_{out2} + Q_{out3} + Q_{out4}) \quad (2.10)$$

##### 2.2.1 ประสิทธิภาพของเตาเผา (furnace efficiency)

ประสิทธิภาพของเตาเผาหลัก ( $\eta_{furnace}$ ) คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป ในกรณีนี้พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์คือความร้อนที่เข้าสู่หลัก ( $Q_{out1}$ ) เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ ส่วนพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปคือความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ( $Q_{in1}$ ) โดยสามารถคำนวณประสิทธิภาพของเตาได้ดังสมการ

$$\eta_{furnace} = \frac{Q_{out1}}{Q_{in1}} \times 100\% \quad (2.11)$$

เมื่อ	$Q_{out1}$	คือความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่หลัก
-------	------------	---------------------------------

$Q_{in1}$  คือความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

## 2.3 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

การออกแบบทางวิศวกรรม วิศวกรผู้ออกแบบส่วนมากมักมีความมุ่งหวังให้โครงการนั้นเป็นโครงการที่มีประสิทธิภาพและมีผลดีทางด้านอุตสาหกรรม โดยยึดหลักการประยุกต์ให้สามารถเกิดผลงานที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในการออกแบบต่างๆ เช่น การออกแบบเครื่องจักร การออกแบบกระบวนการผลิต หรือการออกแบบหัวเผาประสิทธิภาพสูงนั้น แม้จะพบว่าเป็นการออกแบบที่ดีในเชิงวิศวกรรม แต่บางครั้งพบว่างานออกแบบต่างๆเหล่านั้น ไม่เป็นผลดีในแง่เศรษฐศาสตร์ หรือไม่มีความเหมาะสมในการลงทุนนั่นเอง ในปัจจุบันเนื่องจากความจำกัดของทรัพยากร เช่น วัสดุ แรงงาน ทรัพย์สิ้น และเวลา เป็นต้น ทำให้การออกแบบเพื่อให้เกิดผลดีทางด้านวิศวกรรมอย่างเดียวนั้นเป็นไปได้ยาก การพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ในด้านวิศวกรรมต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายต่างๆและการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า โดยการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์นี้จะช่วยให้การตัดสินใจในการลงทุนทำโครงการต่างๆทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 2.3.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลการประหยัดต้นทุนพลังงาน จากมาตรการติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูง ในรูปตัวเงินที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละปีตลอดอายุของโครงการ กับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไปภายใต้ โครงการที่กำลังพิจารณา ณ อัตราส่วนลด (discount rate)

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad (2.12)$$

โดยที่

$n$	=	อายุของโครงการ (ปี)
$ES_t$	=	ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ (energy cost savings) รายปี ตั้งแต่ปลายปีที่ 1 ถึง $n$
$I_0$	=	เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มโครงการ (total investment)
$i$	=	อัตราส่วนลด (discount rate)

หลักในการตัดสินใจ (Decision Rule) เมื่อ  $NPV > 0$  หรือมีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมที่จะลงทุนได้

### 2.3.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

การคำนวณระยะเวลาคืนทุน เป็นการหาระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าลงทุนของระบบ ซึ่งก็คือระยะเวลาคืนทุนนั่นเอง ซึ่งพิจารณาจำนวนปีที่จะได้รับผลตอบแทนที่คุ้มทุนแต่ข้อเสียของการคำนวณระยะเวลาคืนทุนคือ ไม่ได้มีการพิจารณามูลค่าทางการเงินที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราดอกเบี้ยหรืออัตราเงินเฟ้อต่างๆ และไม่คำนึงถึงผลประโยชน์ที่ได้หลังจากคืนทุนแล้ว อีกทั้งยังไม่การคำนึงถึงมูลค่าของโครงการ ซึ่งอาจจะมีค่าเหลืออยู่เมื่อสิ้นสุดโครงการ ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับโครงการที่มีอายุการคำนวณนานๆ โดยสามารถหาค่าได้ ดังสมการ

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิต่อปี}} \quad (2.13)$$

เมื่อ เงินลงทุนเริ่มต้น ประกอบด้วย ค่าอุปกรณ์ ค่าติดตั้ง และค่าบริหาร โครงการ เป็นต้น ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยสุทธิต่อปี คือ ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ประหยัดได้เฉลี่ยต่อปี หลังจากหักค่าใช้จ่ายจากการดำเนินการแล้ว

### 2.3.3 โครงการที่มีอายุโครงการไม่เท่ากัน

โครงการที่มีอายุโครงการไม่เท่ากัน (Projects with Unequal Lives) จะต้องทำการปรับให้อายุโครงการเท่ากันด้วยวิธีการคูณร่วมหน่วยของอายุโครงการที่ต้องการทำการเปรียบเทียบ เนื่องจาก หากทำการวิเคราะห์โครงการที่มีอายุโครงการที่ไม่เท่ากันแล้ว ส่วนใหญ่จะเลือกทางเลือกที่สั้นกว่า เพราะทางเลือกโครงการที่มีอายุโครงการสั้นกว่าอาจทำให้เกิดต้นทุนที่น้อยกว่า ซึ่งทางเลือกนั้นอาจไม่ใช่ทางเลือกที่ดีที่สุด โดยโครงการที่แยกออกจากกันอย่างเด็ดขาด มีอายุโครงการที่ไม่เท่ากัน และสามารถลงทุนซ้ำได้อีก จะมีวิธีการประเมินโครงการ 2 วิธี คือ Replacement chain method และ Equivalent annual annuity method โดยในการพิจารณาครั้งนี้จะใช้ Replacement chain method โดยจะเปรียบเทียบโครงการตลอดอายุการใช้งานร่วม และเลือกโครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงกว่า



### 2.3.4 การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity analysis)

การวิเคราะห์ความไวเป็นการทดสอบความมั่นคงของข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์บนพิสัยของการประมาณค่าความน่าจะเป็น การใช้คุณพินิจเกี่ยวกับตัวเลขต่างๆ ตลอดจนข้อสมมติพื้นฐานที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ครั้งนั้น ทั้งนี้โดยการแทนที่ข้อสมมติ หรือตัวเลขตัวใหม่ ซึ่งแตกต่างไปจากเดิมในระดับที่กำหนดหรือต้องการทดสอบ ลงไปแทนข้อสมมติหรือตัวเลขที่ใช้อยู่เดิมในการประมาณการงบประมาณ และทำการคำนวณใหม่อีกครั้ง แล้วพิจารณาผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ว่า แตกต่างไปจากเดิมมากน้อยเพียงใด หากผลการวิเคราะห์ไม่แตกต่างไปจากเดิมมากนัก หรือแตกต่างเพียงเล็กน้อยในระดับที่ไม่มีผลในทางปฏิบัติ อาจกล่าวได้ว่า วิธีการที่ใช้วิเคราะห์ต้นทุนหรือประมาณการงบประมาณนั้นมีความมั่นคง ไม่อ่อนไหว ได้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือ และถูกต้อง แต่หากผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างจากเดิมมาก จะทำให้เกิดความไม่มั่นใจในความน่าเชื่อถือ และความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ที่ได้มาก่อนหน้า

การวิเคราะห์ความไวที่นิยมทำกัน มี 3 ประเภท ได้แก่ การวิเคราะห์ความไวแบบทางเดียว (One-way Sensitivity Analysis) การวิเคราะห์ความไวแบบสองทาง (Two-way Sensitivity Analysis) และการวิเคราะห์ความไวแบบสามทาง (Three-way Sensitivity Analysis)

#### 1. การวิเคราะห์ความไวแบบทางเดียว (One-way Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความไวแบบทางเดียวเป็นการวิเคราะห์ความไวที่มีการประเมินการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรหรือองค์ประกอบในการวิเคราะห์ทีละตัว

#### 2. การวิเคราะห์ความไวแบบสองทาง (Two-way Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความไวแบบสองทางเป็นการวิเคราะห์ความไว ที่มีการประเมินการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรหรือองค์ประกอบในการวิเคราะห์ 2 ปัจจัยไปพร้อมๆ กัน ซึ่งการมีส่วนร่วมของปัจจัยทั้งสองในระดับหนึ่ง จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ ได้ตัวเลขผลลัพธ์เท่าเดิม การวิเคราะห์วิธีนี้ มักมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสมดุลของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่สามารถบริหารหรือควบคุมได้ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เช่นเดิม

#### 3. การวิเคราะห์ความไวแบบสามทาง (Three-way Sensitivity Analysis)

การวิเคราะห์ความไวแบบสามทางเป็นการวิเคราะห์โดยการทำการวิเคราะห์ความไวแบบสองทาง ซ้ำหลายๆ รอบ โดยเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรตัวที่ 3 ไปทีละค่า ตามที่ต้องการ แล้วสร้างภาพ แผนภูมิ แสดงเส้นสมดุลหลายๆ เส้น ตามแต่ค่าตัวแปรตัวที่ 3 นั้นเอง

## 2.4งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

W.H.Chen, Y.C.Chung and J.L.Liu [8] ได้ทำการศึกษาอัตราการใช้พลังงาน สมดุลพลังงาน และประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผา โดยเตาเผามีขนาด 250 ton/hr แต่ใช้งานจริงประมาณ 121 ton/hr แบบ walking beam และใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ในการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิภายใน billet เพื่อนำมาพิจารณาหาเวลาสำหรับการกักเก็บ billet ไว้ภายในเตา (retention time) โดยทำการศึกษาอัตราการใช้พลังงาน ความร้อน 3 แบบ คือ high, typical และ low heating rate เพื่อแสดงให้เห็นว่าเตาเผาใช้อัตราการผลิตสูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีกว่าถึงแม้ใช้อัตราการใช้พลังงานความร้อนสูง จะทำให้อัตราการสูญเสียพลังงานของเตาเผามากกว่าก็ตาม แต่เมื่อเทียบกับเวลาที่ billet จะต้องอยู่ภายในเตาตลอดถือว่าความสูญเสียของเตาเผาเป็นสัดส่วนที่น้อยกว่า นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังได้มีการตรวจวัดและเก็บข้อมูล เพื่อนำไปพิจารณาสมดุลพลังงาน และคำนวณประสิทธิภาพการทำงานของเตาเผาอีกด้วย ผลจากการศึกษาพบว่าเตาเผามีประสิทธิภาพเท่ากับ 41.74% และเมื่อพิจารณา recuperator พบว่า ประสิทธิภาพของ heat exchange มีค่าเท่ากับ 86.33% และ heat recovery มีค่าเท่ากับ 47.76%

Wuening J.G. [9] กล่าวว่าเนื่องจากโดยส่วนใหญ่เตาเผาเหล็กที่มีการใช้งานหัวเผาโรเจนเนอเรทีฟจะมีขนาดใหญ่ หากเตาเผาขนาดเล็กหัวเผาโรเจนเนอเรทีฟอาจไม่มีความเหมาะสม ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการคิดค้นหัวเผาโรเจนเนอเรทีฟที่ใช้เพียงหัวเผาเดียวขึ้นเพื่อใช้ในเตาเผาเหล็กขนาดเล็ก และ radiant tube สำหรับเตา Heat Treating Furnace ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาระบบที่เหมาะสมสำหรับหัวเผาโรเจนเนอเรทีฟที่ใช้เพียงหัวเผาเดียว การศึกษาจะประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียก๊าซเชื้อเพลิง ประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนซึ่งแสดงให้เห็นการสูญเสียพลังงานไปกับอากาศเสียและการสูญเสียไปกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างเปล่าประโยชน์ ดังนั้นเทคโนโลยีหัวเผาโรเจนเนอเรทีฟชนิดต่างเช่น Radiant tube fired systems, regenerative fired W-tube และ Self-regenerative จึงถูกเลือกขึ้นมาเป็นเทคโนโลยีทางเลือกเนื่องจากสามารถประหยัดค่าพลังงานได้ถึง 20% และยังส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากมีค่า NOx ที่ต่ำเมื่อเทียบกับการใช้งานหัวเผาธรรมดา

Mitra Kami Delivand, Mirko Barz, Shabbir H. Gheewala, Boonrod Sajakulnukit [10] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

อย่างต่อเนื่องซึ่งมีอยู่ 4 วิธีคือการใช้ต่างหรือกรด เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ร่วมกับการใช้น้ำมันที่เหลือจากการปรุงอาหารหรือพืชบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล การใช้น้ำมันที่เหลือจากการปรุงอาหารร่วมกับการใช้ต่างหรือการเร่งปฏิกิริยา และการใช้น้ำมันที่เหลือจากการปรุงอาหารและการใช้น้ำมันพืชบริสุทธิ์โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้วิธีในการศึกษาประกอบไปด้วยการวิเคราะห์ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ในการจัดตั้งเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าโดยมีอายุโครงการ 20 ปี โดยมีกำลังการผลิตคือ 5,8,10,15 และ 20 MWe ซึ่งผลที่ได้คือ โครงการที่ 5 MWe คือโครงการที่ไม่น่าลงทุนเนื่องจาก มีค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นค่าติดลบแสดงว่าค่าใช้จ่ายสูงกว่าการลงทุน และโครงการที่ 8 MWe มีค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) เป็นค่าบวกแต่เป็นค่าคำตอบแทนที่ไม่น่าสนใจเพราะเอกชนจะมีการกำหนดค่า IRR ขั้นต่ำที่ 11% แต่ผลที่ได้คือที่ 10% และโครงการที่ 15 และ 20 MWe เป็นโครงการที่น่าลงทุน ตามลำดับ

Y.Zhang, M.A.Dube, D.D. McLean, M.Kates [11]งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้กรดและด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน 4 กรณีคือ กรณี 1 ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับน้ำมันปาล์ม, กรณี 2 น้ำมันที่ได้หลังจากการทำอาหารโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, กรณี 3 น้ำมันที่ได้หลังจากการทำอาหาร โดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และ กรณี 4 น้ำมันที่ได้หลังจากการทำอาหารโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแต่มีการใช้เฮกเซนเป็นตัวแยกตัวทำละลาย โดยจะมีการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์โดยการพิจารณาจากค่าใช้จ่ายของเงินทุน (Capital cost) ค่าใช้จ่ายในการผลิต (Manufacturing cost) และการหาจุดคุ้มทุน (Break even point) โดยมีค่าวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ 9 ค่า ประกอบไปด้วย กำลังการผลิต, ราคาของน้ำมันที่ใช้แล้ว, ราคาของเมทานอล, ราคาของกัซโซลิน 85%, ราคาของกัซโซลิน 92%, ชนิดของโมเดลเทอร์โมไดนามิกส์, ราคาไบโอดีเซล, ราคาของกรดซัลฟูริก, เปอร์เซนต์การคืนตัวของเมทานอล และเปอร์เซนต์ความบริสุทธิ์ของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ โดยผลที่ได้จากการศึกษาพบว่ากรณีที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับน้ำมันปาล์มจะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่ต่ำสุด แต่กรณี 2 น้ำมันที่ได้หลังจากการทำอาหารเป็นกรณีที่น่าลงทุนมากที่สุดเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายทางด้านการผลิตที่ต่ำที่สุดและมีความน่าสนใจของอัตราเงินคืนหลังหักภาษีและมีจุดคุ้มทุนที่ต่ำที่สุด และจากการวิเคราะห์ความอ่อนไหวพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดคือกำลังการผลิต และราคาของน้ำมันและไบโอดีเซล

อมรรัตน์ แก้วประดับ และพิชัย นามประกาย[12]งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะ(Specific Energy Consumption : SEC)ซึ่งเป็นค่าที่แสดงการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตโดยเป็นค่าที่สะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และแสดงถึงต้นทุนทางด้านพลังงานของโรงงานอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์การใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะของอุตสาหกรรมประเภท โลหะ เนื่องจากเป็นโรงงานที่มีการใช้ทั้งพลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อนที่สูงมากเพราะเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้ความร้อนสูงในกระบวนการผลิต โดยโรงงานอุตสาหกรรมประเภทโลหะจะมีการแบ่งการใช้พลังงานออกเป็น 2 ส่วนคือพลังงานไฟฟ้า และพลังงานความร้อนที่ได้มาจากเชื้อเพลิง โดยมีแนวทางในการหาค่าดัชนีการใช้พลังงาน 2 วิธีด้วยกัน คือ การหาค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะจากปริมาณการใช้พลังงานต่อปริมาณวัตถุดิบ และการหาค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะจากกระบวนการผลิต โดยจะมีตัวอย่างการวิเคราะห์เตาอลูมิเนียม ซึ่งผลที่ได้มีค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะเท่ากับ 38.97 GJ/Ton<sub>อลูมิเนียม</sub> และได้มีการเสนอแนวทางในการอนุรักษ์พลังงาน โดยมีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ การประหยัดพลังงานสำหรับเครื่องอัดอากาศ ซึ่งผลที่ได้จากการดำเนินการตามแนวทางดังกล่าวพบว่าค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะมีค่าเท่ากับ 31.61 GJ/Ton<sub>อลูมิเนียม</sub> ซึ่งลดลงเท่ากับ 18.89%

ประทีป ช่วยเกิด และวิทยา ขงเจริญ[13]ได้ทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (ระยะเวลาคืนทุน) ต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคล โดยน้ำมันน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-20 ได้ทำการวิเคราะห์รถยนต์ 3 ขนาดคือ ขนาดเล็ก (1,500cc) ขนาดกลาง (1,800cc) และขนาดใหญ่ (2,400cc) และรถยนต์ที่ใช้ น้ำมันน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-85 เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีขนาดเครื่องยนต์ (2,500cc) โดยมีประเด็นที่สำคัญในการวิเคราะห์คือความแตกต่างของราคารถยนต์ที่สามารถใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-20 และ E-85 กับราคารถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันเบนซินปกติ ผลจากการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนพบว่ารถยนต์ขนาดเล็ก (1,500cc) ที่มีการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-20 จะมีระยะเวลาคืนทุนเร็วที่สุด โดยรถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-20 ทุกขนาดจะมีระยะเวลาคืนทุนเร็วกว่ารถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-85 เนื่องจากรถยนต์ที่จะสามารถใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-85 มีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเทียบรถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-20 อีกทั้งโครงสร้างของราคาน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-85 ก็มีความผันผวนทำให้บางช่วงมีราคาสูงกว่าน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-20 รวมถึงสถานีบริการน้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-85 ก็มีจำนวนน้อยกว่า แต่ในแง่ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรถยนต์ที่มีการใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-85 จะมีสัดส่วนการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า

ปรารภนา ปรารภนาดี และศิริวารรณ เสดะจิตติ[14] การศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินของการลงทุนในโครงการกลไกการพัฒนาเทคโนโลยีที่สะอาด (Clean development mechanism : CDM) ในสวนอุตสาหกรรมอาหารเครือเบทาโกร แห่งที่ 2 โดยการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียเป็นระบบก๊าซชีวภาพ เพื่อลดการปล่อยก๊าซมีเทนเข้าสู่ชั้นบรรยากาศและนำผลพลอยได้ คือพลังงานทดแทนจากก๊าซชีวภาพมาใช้ในสวนอุตสาหกรรมอาหาร โดยจะมีการวิเคราะห์การลงทุนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบ High-suspension solid-upflow anaerobic sludge blanket (H-UASB) เพื่อใช้ร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบเดิม โดยมีการวิเคราะห์ผลตอบแทนที่ได้จากการลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานที่ลดได้จากการนำพลังงานทดแทนมาใช้ว่ามีความคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่ การศึกษาความเป็นได้มีการวิเคราะห์เป็น 2กรณี คือ กรณีที่ 1 กรณีลงทุนโดยไม่เข้าร่วมโครงการ CDM และไม่มีการเคลมคาร์บอนเครดิต และกรณีที่ 2 กรณีการลงทุนโดยเข้าร่วมโครงการ CDM และมีการเคลมคาร์บอนเครดิต โดยการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์เพื่อเป็นตัวชี้วัดทางการเงิน คือ ระยะเวลาคืนทุนค่าปัจจุบันสุทธิ อัตราผลตอบแทนจากโครงการ และการวิเคราะห์ความไวโดยมีพารามิเตอร์คือ ปริมาณผลผลิตก๊าซมีเทน ประสิทธิภาพของบ่อบำบัด มูลค่า CER และอัตราแลกเปลี่ยนเงินตรา โดยผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า กรณีที่ 1 กรณีลงทุนโดยไม่เข้าร่วมโครงการ CDM และไม่มีการเคลมคาร์บอนเครดิต เป็นโครงการที่น่าลงทุนมากกว่าเนื่องจาก มีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 3.7 ปี ค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวก และอัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับร้อยละ 27.8 แต่โครงการจะมีค่าความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยความไม่แน่นอนที่สูงกว่า

นคร ทิพย์าวงศ์และวสันต์ จอมภักดี[15]งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมในการสร้างโรงงานสกัดน้ำมันถั่วเหลือง และถั่วลิสงดิบขนาดเล็กสำหรับกลุ่มเกษตรกรในท้องถิ่นภาคเหนือของประเทศไทยโดยใช้เครื่องสกัดน้ำมันแบบบีบอัดด้วยสกรูเป็นเครื่องต้นแบบ โดยวิธีการสกัดน้ำมันพืชเชิงกลสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ชนิดคือวิธีการสกัดโดยการบีบอัดเชิงกล และวิธีการสกัดโดยใช้สารทำละลาย (Solvent Extraction) โดยเพื่อวิเคราะห์หาวิธีการสกัดที่เหมาะสมนั้นพิจารณาจากเทคโนโลยีการใช้งานที่ไม่ซับซ้อนเกินลงทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและซ่อมบำรุงค่า จึงเลือกใช้การบีบอัดเชิงกลเป็นวิธีการสกัดในเครื่องบีบอัดด้วยเครื่องมือสกรู จึงมีการศึกษาคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เป็นเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจ โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นแบ่งออกเป็น 4กรณี คือ type1, type 2, type 3 และ type โดยมีส่วนชี้ทางการเงินคือ การวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนภายใน และจากการศึกษาพบว่าตัวอย่างเครื่องสกัดน้ำมันที่เลือกมาทั้ง 4 รุ่นมีรุ่นที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ป็นเครื่องต้นแบบกับกลุ่มเกษตรกรในท้องถิ่นจังหวัดลำปางได้เนื่องจากอัตราผลตอบแทนและ

ระยะเวลาคืนทุนอยู่ในเกณฑ์ที่ดีกว่ารุ่นอื่นๆทั้งในกรณีลงทุนเองและกู้เงินมาลงทุนคือถ้ำลงทุนเอง มูลค่าปัจจุบันสุทธิประมาณ 1,630,000 บาทและ 15,100,000 บาทอัตราผลตอบแทนภายในประมาณ 64%และ510% และระยะเวลาคืนทุนประมาณ 1.5 ปีและ 0.2 ปีและถ้ำกู้เงินมาลงทุนมูลค่าปัจจุบันสุทธิประมาณ 850,000 บาทและ11,430,000 บาทอัตราผลตอบแทนภายในประมาณ 47 %และ 490 % และระยะเวลาคืนทุนประมาณ 2.1 ปีและ 0.2 ปีสำหรับถ้ำเหลืองและถ้ำลิสงตามลำดับ

ธนิต มหิทรนันท์ [16]ได้ทำการศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่ออุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำของโรงงานฟอกย้อม โดยมีค่าดัชนีการชี้วัดทางการเงินประกอบไปด้วย มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ อัตราส่วนผลประโยชน์ต่อต้นทุน อัตราผลตอบแทนภายในและการวิเคราะห์ความอ่อนไหว โดยแยกเป็นสองโครงการคือ โครงการที่ใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิง และโครงการที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์พบว่าในกรณีที่ใช้กะลาปาล์มเป็นเชื้อเพลิงไม่คุ้มค่าทางการเงิน เนื่องจากมีอัตราส่วนของผลตอบแทนต่อต้นทุนต่ำกว่าอัตราคิดลดที่กำหนดไว้ แต่จะพบว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุนในกรณีที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเกรดซีเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีอัตราผลตอบแทนการลงทุนเท่ากับ 3.41และอัตราผลตอบแทนภายในโครงการเท่ากับ 28ในส่วนของการวิเคราะห์ความไวในกรณีที่ราคาเชื้อเพลิงมีค่าสูงขึ้น การลดต้นทุนของการผลิตลง 20%และมีการเปลี่ยนแปลงอัตราคิดลดลง 6%จะพบว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลประโยชน์ของโครงการ แสดงให้เห็นว่ามีความอ่อนไหวทางการเงินมาก จึงสรุปได้ว่าไม่มีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์

## บทที่ 3

### การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูลพลังงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กหากมีการติดตั้งด้วยหัวเผาประสิทธิภาพสูง 2 ชนิด คือหัวเผารีเจนเนอเรทีฟและหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กต่อไปโดยมีวัตถุประสงค์ในการตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์พลังงานตามทฤษฎีสมดุลพลังงาน โดยทำการตรวจวัดการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กตัวอย่างแบบเตาแบบคานรับเคลื่อนที่ (walking beam) จำนวน 3 โรงงานซึ่งประกอบไปด้วยเตาขนาด 40ตัน/ชั่วโมง 70ตัน/ชั่วโมงและ150 ตัน/ชั่วโมง

#### 3.1 ข้อมูลการตรวจวัด

ในการวิเคราะห์หาอัตราการใช้เชื้อเพลิงนั้น ต้องทำการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กก่อนเพื่อนำค่าที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้ง 2 ชนิดโดยมีการตรวจวัดรายละเอียดของอุปกรณ์การวัดแสดงในภาคผนวกและเก็บข้อมูลเพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อหาปริมาณความร้อนในส่วนต่างๆ โดยข้อมูลดังกล่าวสามารถได้มาโดย 2 วิธี

1) การเก็บข้อมูลโดยตรงจากโรงงาน ซึ่งจะมาจากอุปกรณ์วัดต่างๆที่ทางโรงงานมีอยู่แล้ววิธีการโดยจะต้องมีการเข้าไปบันทึกข้อมูล รายละเอียดการเก็บดังแสดงภาคผนวก ข

2) การเก็บข้อมูลจากการตรวจวัด ซึ่งต้องอาศัยเครื่องมือหรืออุปกรณ์การวัดที่สามารถนำไปวัดได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเตาเผาเหล็ก รายละเอียดการตรวจวัดดังแสดงภาคผนวก ค

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของการได้มาซึ่งข้อมูล

ที่	รายการตรวจวัด	วิธีการได้มาของข้อมูล
1	อัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผา	อ่านจากค่ามิเตอร์วัดก๊าซธรรมชาติของโรงงาน
2	อัตราการไหลของอากาศเข้าเตาเผา	อ่านค่าจากจอแสดงผลที่เตา โดยค่าที่ได้จากการตรวจวัดเป็นค่าอัตราการไหลเข้าของอากาศ
3	อัตราการผลิตเหล็กของเตาเผา	มีข้อมูลการนับจำนวนแท่งของเหล็กที่ออกจากเตาเผา
4	อุณหภูมิของเชื้อเพลิงก่อนเข้าเตาเผา	อ่านค่าจากจอแสดงผลที่เตา โดยการตรวจวัดค่าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงก่อนเข้าหัวเผา
5	อุณหภูมิของอากาศภายนอก	วัด โดยใช้ อุปกรณ์ วัด อุณหภูมิ ( Thermometer Temperature Meter)
6	อุณหภูมิของอากาศออกจากรีคูเพอเรเตอร์ (recuperator)	อ่านค่าจากจอแสดงผลที่เตาโดยวัดอุณหภูมิอากาศออกจากรีคูเพอเรเตอร์ (recuperator)
7	อุณหภูมิในเตาเผา	อ่านค่าจากจอแสดงผลที่เตา โดยค่าที่ได้จากการตรวจวัดเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละโซน
8	อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากปล่องไอเสีย	อ่านค่าจากจอแสดงผลที่เตาโดยการตรวจวัดอุณหภูมิไอเสียที่ออกจากปล่องไอเสีย
9	อัตราการไหลของไอเสีย	คำนวณจากข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์วัดคุณสมบัติไอเสีย
10	อุณหภูมิที่ผิวเตา	วัด โดยใช้ อุปกรณ์ วัด อุณหภูมิ โดยใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared Themometer)
11	ขนาดช่องเปิดของเตาเผาเหล็ก	อ่านค่าจากแบบโครงสร้างของเตา

### 3.2 คำนวณสมมูลพลังงาน

การศึกษาการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กหากมีการติดตั้งด้วยหัวเผาประสิทธิภาพสูง 2 ชนิด คือ หัวเผาเริเจนเนอริฟและหัวเผาริคัพเปอร์เรทิฟเพื่อที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์ความเหมาะสมในการเลือกใช้หัวเผาได้อย่างเหมาะสมนั้น สิ่งที่สำคัญในการได้มาซึ่งข้อมูลการใช้พลังงานของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้ง 2 ชนิดนั้นคืออัตราการใช้เชื้อเพลิงของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้ง 2 ชนิด โดยวิธีที่ใช้ในการคำนวณคือ การวิเคราะห์สมมูลพลังงาน ตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์สำหรับ



ปริมาณควบคุม โดยอาศัยหลักการของกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy) เพื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนพลังงานขาเข้าสู่เตาเผาเหล็ก และพลังงานออกจากเตาเผาเหล็ก โดยนำค่าพลังงานที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพเตา โดยประเภทของพลังงานขาเข้าและออกประกอบด้วย

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- (1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงคำนวณได้จากสมการที่ (2.4)
- (2) ความร้อนสัมผัสของอากาศ คำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย

- (1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก คำนวณได้จากสมการที่ (2.6)
- (2) ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย คำนวณได้จากสมการที่ (2.7)
- (3) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเผา คำนวณได้จากสมการที่ (2.8)
- (4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดคำนวณได้จากสมการที่ (2.9)
- (5) ความร้อนสูญเสียอื่นๆ คำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการหาสมดุลพลังงานของเตาเผา จะนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดพารามิเตอร์ต่างๆ มาทำการคำนวณเพื่อหาปริมาณความร้อนในส่วนต่างๆ ของเตาเผานั้น มีรายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง

### 3.2.1 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของพลังงานในระบบของเตา reheating furnace ขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

รายการ	หน่วย	ค่า	คิดเป็น %
<b>ความร้อนเข้า</b>			
ความร้อนของเชื้อเพลิง	MJ/hr	66,412	88.34
ความร้อนสัมผัสของอากาศ	MJ/hr	8,763	11.66
<b>รวม</b>	MJ/hr	75,174	100
<b>ความร้อนขาออก</b>			
ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	MJ/hr	33,228	44.20
ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย	MJ/hr	29,223	38.90
ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	MJ/hr	171	0.32
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	MJ/hr	239	0.23
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	MJ/hr	10,565	16.38
<b>รวม</b>	MJ/hr	75,174	100

จากตารางที่ 3.2 พบว่าความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่เตาเผา มีค่า 75,174 MJ/hr คิดเป็น 100% ของความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาทั้งหมด โดยความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เท่ากับ 66,412 MJ/hr คิดเป็น 88.34% และความร้อนสัมผัสของอากาศเท่ากับ 8,763 MJ/hr คิดเป็น 11.66% ในส่วนของความร้อนที่ออกจากเตาเผา 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก เท่ากับ 33,228 MJ/hr คิดเป็น 44.20% และความร้อนที่เตาเผาสูญเสียในรูปแบบต่างๆ สามารถแยกย่อยได้เป็น ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียเท่ากับ 29,223 MJ/hr คิดเป็น 38.90% ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดเท่ากับ 171 MJ/hr คิดเป็น 0.32% ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเท่ากับ 239 MJ/hr คิดเป็น 0.23% และความร้อนสูญเสียอื่นๆ เท่ากับ 10,565 MJ/hr คิดเป็น 16.38%

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของพลังงานในระบบของเตา reheating furnace ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

รายการ	หน่วย	ค่า	คิดเป็น %
<b>ความร้อนเข้า</b>			
ความร้อนของเชื้อเพลิง	MJ/hr	85,273	84.88
ความร้อนสัมผัสของอากาศ	MJ/hr	15,193	15.12
<b>รวม</b>	MJ/hr	100,466	100
<b>ความร้อนขาออก</b>			
ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	MJ/hr	47,405	47.19
ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย	MJ/hr	37,677	37.50
ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	MJ/hr	252	0.25
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	MJ/hr	181	0.18
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	MJ/hr	14,950	14.88
<b>รวม</b>	MJ/hr	100,466	100

จากตารางที่ 3.3 พบว่าความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่เตาเผา มีค่า 100,466 MJ/hr คิดเป็น 100% ของความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาทั้งหมด โดยความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เท่ากับ 85,273 MJ/hr คิดเป็น 84.88% และความร้อนสัมผัสของอากาศเท่ากับ 15,193 MJ/hr คิดเป็น 15.12% ในส่วนของความร้อนที่ออกจากเตาเผา 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก เท่ากับ 47,405 MJ/hr คิดเป็น 47.19% และความร้อนที่เตาเผาสูญเสียในรูปแบบต่างๆ สามารถแยกย่อยได้เป็น ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียเท่ากับ 37,677 MJ/hr คิดเป็น 37.50% ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดเท่ากับ 252 MJ/hr คิดเป็น 0.25% ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเท่ากับ 181 MJ/hr คิดเป็น 0.18% และความร้อนสูญเสียอื่นๆ เท่ากับ 14,950 MJ/hr คิดเป็น 14.88%

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของพลังงานในระบบของเตา reheating furnace ขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

รายการ	หน่วย	ค่า	คิดเป็น %
--------	-------	-----	-----------

<b>ความร้อนเข้า</b>			
ความร้อนของเชื้อเพลิง	MJ/hr	154,395	81.04
ความร้อนสัมผัสของอากาศ	MJ/hr	36,123	18.96
<b>รวม</b>	MJ/hr	190,517	100
<b>ความร้อนขาออก</b>			
ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	MJ/hr	82,840	43.48
ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย	MJ/hr	78,291	41.09
ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	MJ/hr	3,391	1.78
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	MJ/hr	391	0.21
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	MJ/hr	25,604	13.45
<b>รวม</b>	MJ/hr	190,517	100

จากตารางที่ 3.4 พบว่าความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่เตาเผามีค่า 190,517MJ/hr คิดเป็น 100% ของความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาทั้งหมด โดยความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เท่ากับ 154,395MJ/hr คิดเป็น 81.04% และความร้อนสัมผัสของอากาศเท่ากับ 36,123 MJ/hrคิดเป็น 18.96% ในส่วนของความร้อนที่ออกจากเตาเผา 2 ส่วนหลัก ได้แก่ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก เท่ากับ 82,840MJ/hr คิดเป็น 43.48% และความร้อนที่เตาเผาสูญเสียในรูปแบบต่างๆสามารถแยกย่อยได้เป็น ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสียเท่ากับ 78,291MJ/hr คิดเป็น 41.09% ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดเท่ากับ 3,391MJ/hr คิดเป็น 1.78% ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเท่ากับ 391MJ/hr คิดเป็น 0.21% และความร้อนสูญเสียอื่นๆ เท่ากับ 25,604MJ/hr คิดเป็น 13.45%

จากตารางที่ 3.2 ถึง 3.4 รายละเอียดของพลังงานในระบบของเตา reheating furnace แต่ละขนาดแสดงให้เห็นว่า แม้มีการนำความร้อนที่กลับมามีใช้ในการอุ่นอากาศใหม่แต่พลังงานสูญเสียในไอเสียยังมีค่าสูงอยู่ ควรพิจารณานำความร้อนกลับให้มากขึ้น โดยการติดตั้งชุดหัวเผาประสิทธิภาพสูงเพื่อให้การเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 3.2.2 ประสิทธิภาพเตาเผา

ประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็ก คืออัตราส่วนของพลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์ต่อพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไป ในกรณีนี้พลังงานความร้อนที่ใช้ประโยชน์คือความร้อนที่เข้าสู่เหล็ก

เพื่อให้ได้อุณหภูมิตามต้องการส่วนพลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปคือความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดประสิทธิภาพของเตาเผา

กำลังการผลิต(ตัน/ ช.ม.)	ประสิทธิภาพของเตาเผา (%)
40	50.03
70	55.60
150	53.65

## บทที่ 4

### การวิเคราะห์การเลือกใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง

#### 4.1 วิเคราะห์ปริมาณความต้องการพลังงานและอัตราการใช้เชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ปริมาณความต้องการพลังงาน และอัตราการใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติหากมีการติดตั้งด้วยหัวเผาประสิทธิภาพสูง 2 ชนิดคือหัวเผาประสิทธิภาพสูงแบบรีคัพเปอร์เรทีฟที่มีความสามารถในการอุ่นอากาศในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่  $400^{\circ}\text{C}$  ถึง  $700^{\circ}\text{C}$  และหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่มีความสามารถในการอุ่นอากาศในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่  $400^{\circ}\text{C}$  ถึง  $700^{\circ}\text{C}$  โดยอ้างอิงปริมาณความร้อนที่ป้อนเข้าสู่ระบบซึ่งใช้เชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ ในกระบวนการเผาเหล็กด้วยหัวเผาเดิมการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ โดยมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 ปริมาณความต้องการพลังงาน

หากมีการติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูงจะต้องนำเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Recuperator) ที่มีการติดตั้งในโรงงานเผาเหล็กเป็นส่วนใหญ่ออกก่อน เพื่อเป็นการคำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่แท้จริงของเตาเผาหากมีการทำงานแบบมาตรฐาน ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้ของเตาเผาแบบไม่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน(Recuperator) คำนวณได้จาก

$$\text{จาก} \quad Q_{in} = Q_{in1} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $Q_{in1}$  คือความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

##### 4.1.2 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเมื่อมีการใช้งานหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

จาก

$$m_{\text{fuel,regen}} = \frac{Q_{in} - m_{\text{air}} \rho_{\text{air}} c_{p,a} (T_{\text{air}} - T_{\text{sur}})}{LHV} \quad (4.2)$$

เมื่อ  $Q_{in}$  คือความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ได้จากการคำนวณค่าในข้อ 1 (เนื่องจากเป็นค่าความร้อนที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ในโรงงานตัวอย่าง)

$LHV$  คือค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ

$\dot{m}_{\text{air}}$  คืออัตราการไหลของอากาศ

$\rho_{\text{air}}$  คือความหนาแน่นของอากาศ

$c_{p,a}$	คือค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ
$T_{air}$	คืออุณหภูมิของอากาศที่ผ่านหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ (regenerative burner) (อ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิตหัวเผา)
$T_{sur}$	คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

#### 4.1.3 จำนวนหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเมื่อมีการใช้งานหัวเผารีคัพเพอเรทีฟ

จาก

$$m_{fuel.recup} = \frac{Q_{in} - m_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV} \quad (4.3)$$

เมื่อ	$Q_{in}$ ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ได้จากการคำนวณค่าในข้อ 1 (เนื่องจาก เป็นค่าความร้อนที่จำเป็นสำหรับการเผาไหม้ในโรงงานตัวอย่าง)
	LHV ค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ
	$\dot{m}_{air}$ คืออัตราการไหลของอากาศ
	$\rho_{air}$ คือความหนาแน่นของอากาศ
	$c_{p,a}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ
	$T_{air}$ คืออุณหภูมิของอากาศที่ผ่านหัวเผารีคัพเพอเรทีฟ (recuperative burner) (อ้างอิงจากข้อมูลผู้ผลิตหัวเผา)
	$T_{sur}$ คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4.1 ปริมาณความต้องการพลังงาน เชื้อเพลิง และอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงของเตาเผา ขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง เมื่อมีการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง

อุณหภูมิอุ่นอากาศก่อนเข้าเผา(°C)		ค่าพลังงาน (MJ)	ปริมาณ เชื้อเพลิง NG (MMBTU)	อัตราการ ประหยัด เชื้อเพลิง (%)
รีคัพเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ			
400	400	55,465	328,343.54	4.97
500	500	51,985	311,140.34	9.95
600	600	48,505	293,937.15	14.93
700	700	45,025	276,733.95	19.90
	800	41,545	259,530.75	24.89
	900	38,065	242,327.55	29.87
	1000	34,585	225,124.35	34.85

ตารางที่ 4.2 ปริมาณความต้องการพลังงาน เชื้อเพลิง และอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงของเตาเผา ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง เมื่อมีการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง

อุณหภูมิอุ่นอากาศก่อนเข้าเผา(°C)		ค่าพลังงาน (MJ)	ปริมาณ เชื้อเพลิง NG (MMBTU)	อัตราการ ประหยัด เชื้อเพลิง (%)
รีคัพเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ			
400	400	64,735.79	413,850.72	6.72
500	500	59,386.14	384,020.47	13.44
600	600	54,036.49	354,190.22	20.18
700	700	48,686.84	324,359.96	26.90
	800	43337.19	294,529.71	33.62
	900	37989.55	264,699.46	40.34
	1000	32637.90	234,869.21	47.06



ตารางที่ 4.3 ปริมาณความต้องการพลังงาน เชื้อเพลิง และอัตราการประหยัดเชื้อเพลิงของเตาเผา ขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง เมื่อมีการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง

อุณหภูมิอุ่นอากาศก่อนเข้าเผา(°C)		ค่าพลังงาน (MJ)	ปริมาณ เชื้อเพลิง NG (MMBTU)	อัตราการ ประหยัด เชื้อเพลิง (%)
รีคัพเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ			
400	400	89914.70	732,397.39	8.83
500	500	79786.40	661,472.74	17.66
600	600	69658.09	590,548.09	26.49
700	700	59529.79	519,623.44	35.32
	800	49401.49	448,698.79	44.15
	900	39273.19	377,774.14	52.97
	1000	29144.89	306,849.49	61.80

#### 4.2 ต้นทุนพลังงานและค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูง

การเลือกความเหมาะสมในการติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูง จะต้องพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการอุ่นอากาศของหัวเผาประสิทธิภาพสูง(°C) กับต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้ง 2 ชนิด ซึ่งประกอบด้วย ราคาหัวเผาประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ และค่าบำรุงรักษาหัวเผาประสิทธิภาพสูง เพื่อให้ได้ความคุ้มค่าในการเลือกลงทุนทั้งทางด้านพลังงานและทางด้านการเงินมากที่สุด โดยทำการวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขนี้

##### 4.2.1 ค่าใช้จ่ายในการลงทุน

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการซื้อหัวเผาประสิทธิภาพสูง ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบหัวเผาประสิทธิภาพสูงในโรงงานทั้งนี้รวมค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและปรับปรุงเตาเผาหลักด้วย และค่าใช้จ่ายอุปกรณ์ ซึ่งรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหรีศ์ฟเปอร์เรทีฟ

ค่าใช้จ่าย	ขนาดเตาเผา(บาท)		
	40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
ค่าหัวเหรีศ์ฟเปอร์เรทีฟ	44,000,000	49,500,000	99,000,000
ค่าอุปกรณ์	6,800,000	11,900,000	11,900,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ	2,000,000	5,500,000	8,000,000
รวม	52,800,000	66,900,000	118,900,000

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหรีศ์เจเนอเรทีฟ

ค่าใช้จ่าย	ขนาดเตาเผา(บาท)		
	40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
ค่าหัวเหรีศ์เจเนอเรทีฟ	65,000,000	78,000,000	149,500,000
ค่าอุปกรณ์	8,000,000	14,000,000	14,000,000
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบ	5,000,000	8,000,000	15,000,000
รวม	78,000,000	100,000,000	178,500,000

#### 4.2.2 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานประกอบด้วยค่าใช้จ่ายหลักๆ 5 ชนิด คือ ค่าเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายสาธารณูปโภค ค่าแรงงาน และค่าบำรุงรักษา

##### 4.2.2.1 ค่าเชื้อเพลิง

ค่าใช้จ่ายทางด้านเชื้อเพลิงจะพิจารณาจากอัตราการใช้ก๊าซธรรมชาติในแต่ละขนาดเตาที่มีการติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูง

ตารางที่ 4.6 ราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ

ราคาขาย (บาท/กิโลกรัม)	ค่าความร้อนต่อ 1 กิโลกรัม (BTU)	ราคาขาย (บาท/MMBTU)
10.50	35.947	292.097

ที่มา : บริษัท ปตท.จำกัด มหาชน

ตารางที่ 4.7 ค่าเชื้อเพลิงของหัวเผาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

อุณหภูมิอุ่นอากาศก่อนเข้าเผา(°C)		ปริมาณเชื้อเพลิง NG (MMBTU)	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/ตัน)	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/ปี)
รีคัฟเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ			
400	400	328,343.54	441.40	95,908,062.26
500	500	311,140.34	418.28	90,883,064.89
600	600	293,937.15	395.15	85,858,067.53
700	700	276,733.95	372.02	80,833,070.17
	800	259,530.75	348.90	75,808,072.80
	900	242,327.55	325.77	70,783,075.44
	1000	225,124.35	302.64	65,758,078.08

ตารางที่ 4.8 ค่าเชื้อเพลิงของหัวเผาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

อุณหภูมิอุ่นอากาศก่อนเข้าเผา(°C)		ปริมาณเชื้อเพลิง NG (MMBTU)	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/ตัน)	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/ปี)
รีคัมเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ			
400	400	413,850.72	342.37	120,884,425.72
500	500	384,020.47	317.69	112,171,107.77
600	600	354,190.22	293.02	103,457,789.81
700	700	324,359.96	268.34	94,744,471.85
	800	294,529.71	243.66	86,031,153.90
	900	264,699.46	218.98	77,317,835.94
	1000	234,869.21	194.30	68,604,517.98

ตารางที่ 4.9 ค่าเชื้อเพลิงของหัวเผาขนาด 150ตัน/ชั่วโมง

อุณหภูมิอุ่นอากาศก่อนเข้าเผา(°C)		ปริมาณเชื้อเพลิง NG (MMBTU)	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/ตัน)	ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท/ปี)
รีคัมเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ			
400	400	732,397.39	380.33	213,930,852.96
500	500	661,472.74	343.50	193,213,997.53
600	600	590,548.09	306.67	172,497,142.10
700	700	519,623.44	269.84	151,780,286.67
	800	448,698.79	233.01	131,063,431.24
	900	377,774.14	196.18	110,346,575.81
	1000	306,849.49	159.35	89,629,720.37

#### 4.2.2.2 ค่าใช้จ่ายสาธารณูปโภค

ค่าใช้จ่ายสาธารณูปโภคในที่นี้คือค่าไฟฟ้า เนื่องจาไม่มีการใช้งานในระบบหัวเผาประสิทธิภาพสูง โดยหลักการในการคิดค่าไฟฟ้าจะเป็นระบบการคิดแบบ TOU โดยมีช่วงที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงมากคือช่วง Peak คือเวลา 09.00 - 22.00 น. ช่วง Off Peak คือเวลา 22.00 – 09.00 น. และวันเสาร์-อาทิตย์ 00.00 – 24.00 น. ดังนั้นต้นทุนในการผลิตจึงมีค่าต่ำกว่าช่วง Peak ในส่วน

อัตราค่าพลังงานไฟฟ้าที่ขายจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีราคาในช่วง Peak เท่ากับ 3.5982 บาท/หน่วยและช่วง Off-Peak เท่ากับ 2.1572 บาท/หน่วยที่มา : อัตราค่าไฟฟ้าการไฟฟ้าแห่งประเทศไทย, 2555

ตารางที่ 4.10 ค่าใช้จ่ายในด้านสาธารณูปโภคของหัวเขาริคัพเปอร์เรทีฟ

ขนาดเตาเผา	ราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	อัตราการใช้จ่ายไฟฟ้าต่อปี	ราคาค่าไฟฟ้าต่อปี
40 ตัน/ชั่วโมง	2.1572	434,560.00	937,432.83
70 ตัน/ชั่วโมง	2.1572	488,880.00	1,054,611.94
150 ตัน/ชั่วโมง	2.1572	977,760.00	2,109,223.87

ตารางที่ 4.11 ค่าใช้จ่ายในด้านสาธารณูปโภคของหัวเขาริเงินเนอเรทีฟ

ขนาดเตาเผา	ราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย	อัตราการใช้จ่ายไฟฟ้าต่อปี	ราคาค่าไฟฟ้าต่อปี
40 ตัน/ชั่วโมง	2.1572	923,440.00	1,992,044.77
70 ตัน/ชั่วโมง	2.1572	1108,128.00	2,390,453.72
150 ตัน/ชั่วโมง	2.1572	2,123,912.00	4,581,702.97

#### 4.2.2.3 ค่าใช้จ่ายแรงงาน

ค่าใช้จ่ายแรงงานในการควบคุมการทำงานของหัวเผาประสิทธิภาพสูงในการปฏิบัติงานใน 1 กะ โดยการเดินเครื่องตลอด 24 ชั่วโมงจำเป็นต้องใช้ 3 กะควบคุม ในการปฏิบัติงานแต่ละหน้าที่จึงต้องมี 3 ตำแหน่ง

ตารางที่ 4.12 อัตราเงินเดือนของพนักงานในแต่ละตำแหน่ง

ตำแหน่ง	จำนวนพนักงาน (คน)	อัตราเงินเดือน (บาท/เดือน)	รวมเงินเดือน (บาท/ปี)
วิศวกร	3	18,000	648,000
เจ้าหน้าที่หัวน้ำกะ	3	14,256	513,216
พนักงานผลิต (เทคนิค)	3	8,123	292,428

ที่มา : รายงานผลการสำรวจอัตราค่าจ้างและสวัสดิการสำหรับการบริหารค่าจ้าง ประจำปี 2554-2555 สมาคมการจัดการงานบุคคลแห่งประเทศไทย, 2555

รวมค่าใช้จ่ายในการจ้างแรงงานในการควบคุมการทำงานของหัวเผาประสิทธิภาพสูงในเตาแต่ละขนาด เป็นเงิน 1,453,644บาท

#### 4.2.2.4 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา

ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยข้อมูลได้มาจากการสัมภาษณ์ผู้ผลิตระบบหัวเผาแสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.13 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ

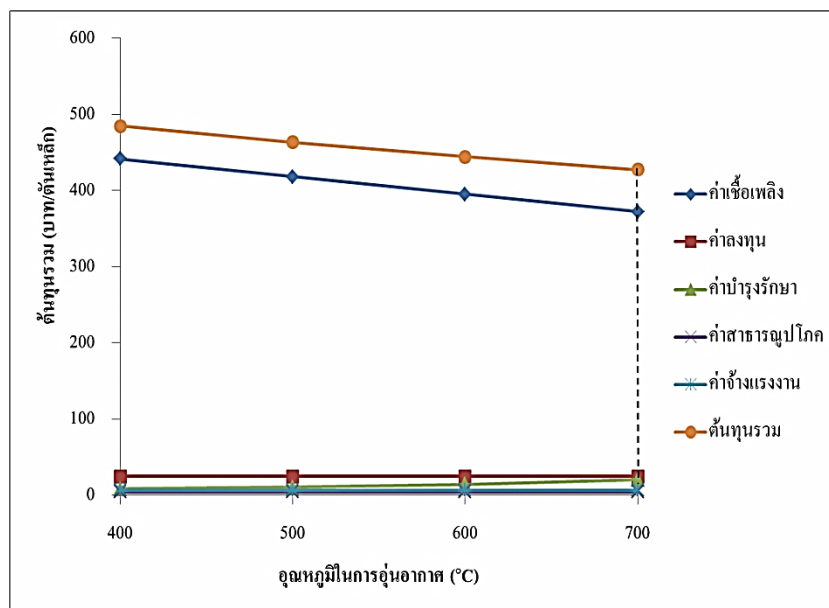
อุณหภูมิอุ่นอากาศ ก่อนเข้าเผา(°C)	ขนาดเตาเผา (บาท)		
	40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
400	1,760,000.00	1,980,000.00	3,960,000.00
500	2,200,000.00	2,475,000.00	4,950,000.00
600	3,080,000.00	3,465,000.00	6,930,000.00
700	4,400,000.00	4,950,000.00	9,900,000.00

ตารางที่ 4.14 ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ

อุณหภูมิอุ่นอากาศ ก่อนเข้าเผา(°C)	ขนาดเตาเผา (บาท)		
	40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
400	3,250,000.00	3,900,000.00	7,475,000
500	3,900,000.00	4,680,000.00	8,970,000
600	4,550,000.00	5,460,000.00	10,465,000
700	5,200,000.00	6,240,000.00	11,960,000
800	6,500,000.00	7,800,000.00	14,950,000
900	7,800,000.00	9,360,000.00	17,940,000
1000	9,750,000.00	11,700,000.00	22,425,000

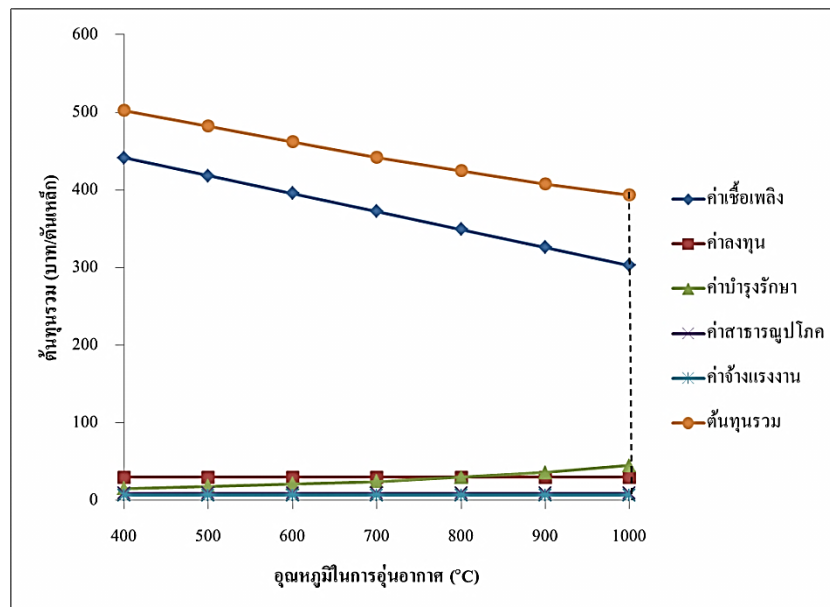
### 4.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของราคาต้นทุนเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของหัวเผาประสิทธิภาพสูง

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของราคาต้นทุนเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอุ่นอากาศ โดยพิจารณาเลือกจากจากราคาต้นทุน ค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาแบบรีคัพเปอร์เรทีฟ สำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

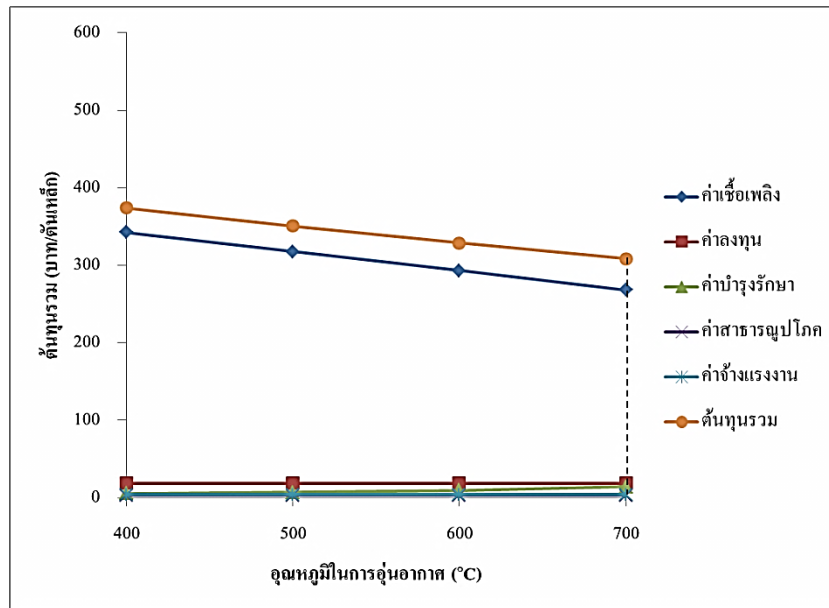
จากรูปที่ 4.1 ในการพิจารณาการเลือกลงทุนที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่มีความเหมาะสมกับต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาแบบรีคัพเปอร์เรทีฟพบว่าควรเลือกติดตั้งหัวเผาที่มีการอุ่นอากาศที่อุณหภูมิเท่ากับ 700°C เนื่องจากมีต้นทุนรวมต่ำที่สุดคือ 427.58 บาทต่อตันเหล็กสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 19.90% และคิดเป็นต้นทุนเชื้อเพลิงเท่ากับ 372.02 บาท/ตัน และต้นทุนอื่นๆรวมเท่ากับ 55.56 บาท/ตัน



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ สำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

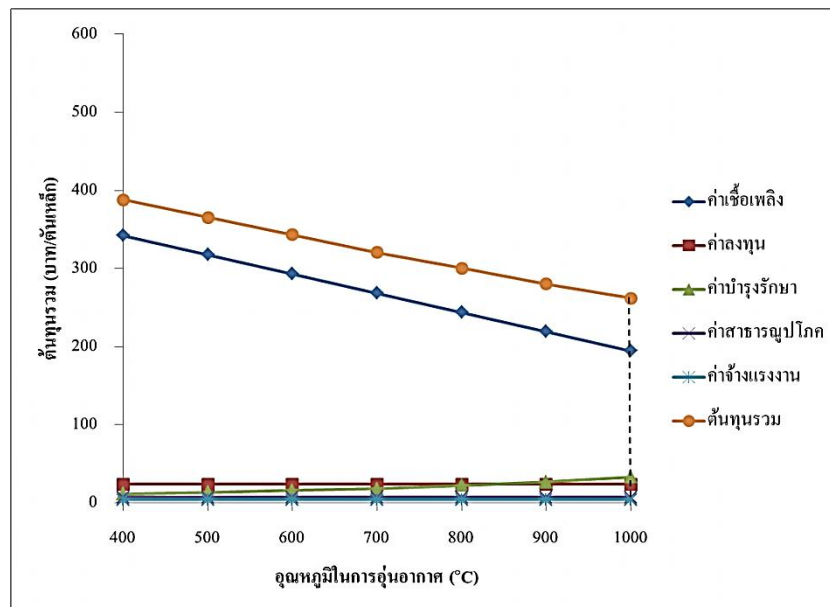
จากรูปที่ 4.2 ในการพิจารณาการเลือกลงทุนที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่มีความเหมาะสมกับต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟพบว่า ควรเลือกติดตั้งหัวเผาที่มีการอุ่นอากาศที่อุณหภูมิเท่ากับ  $1000^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากมีต้นทุนรวมต่ำที่สุดคือ 393.29 บาทต่อตันเหล็ก สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 34.85% และคิดเป็นต้นทุนเชื้อเพลิงเท่ากับ 302.64 บาท/ตัน และต้นทุนอื่นๆรวมเท่ากับ 90.65 บาท/ตัน





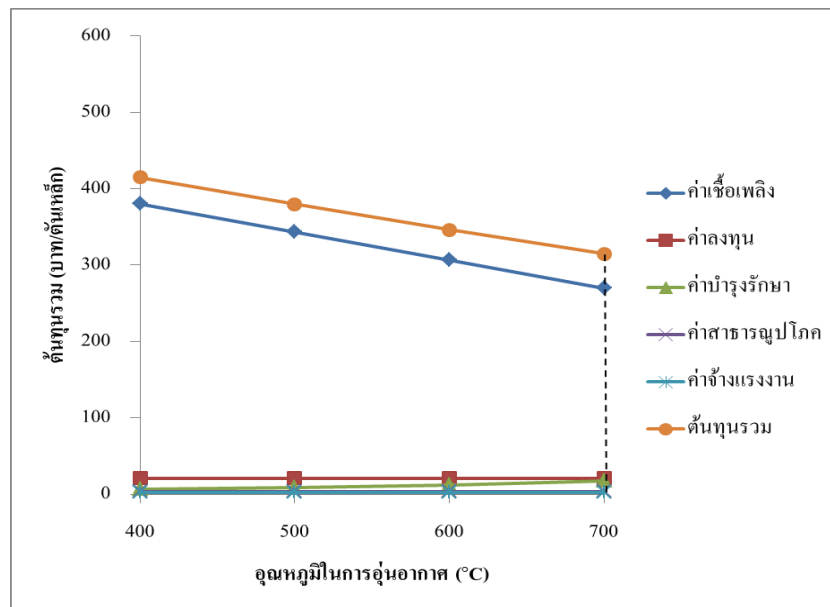
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟ สำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.3 ในการพิจารณาการเลือกลงทุนที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่มีความเหมาะสมกับต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาแบบไร้คัพเปอร์เรทีฟพบว่า ควรเลือกติดตั้งหัวเผาที่มีการอุ่นอากาศที่อุณหภูมิเท่ากับ 700°C เนื่องจากมีต้นทุนรวมต่ำที่สุดคือ 308.41 บาทต่อตันเหล็ก โดยสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 26.90% และคิดเป็นต้นทุนเชื้อเพลิงเท่ากับ 268.34 บาท/ตัน และต้นทุนอื่นๆรวมเท่ากับ 40.07 บาท/ตัน



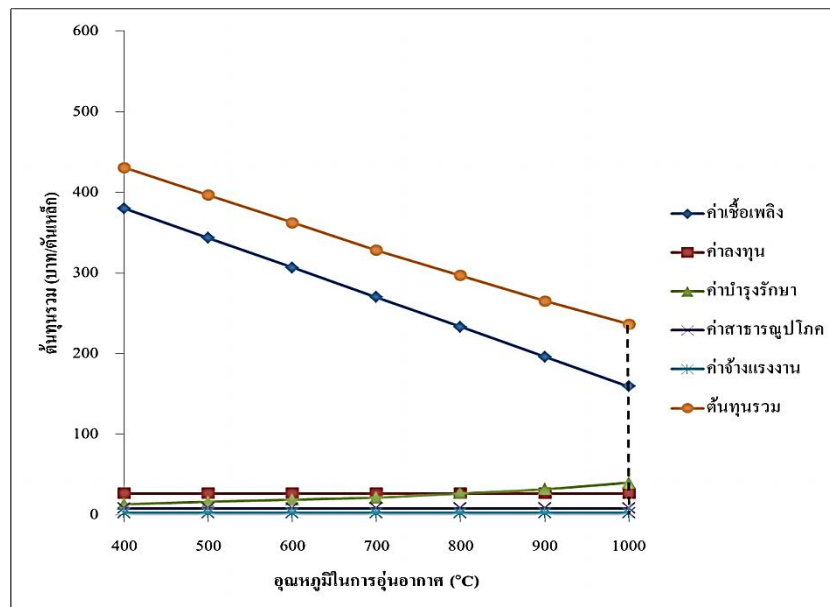
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาบริเจนเนอเรทีฟ สำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.4 ในการพิจารณาการเลือกลงทุนที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่มีความเหมาะสมกับต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาบริเจนเนอเรทีฟพบว่า ควรเลือกติดตั้งหัวเผาที่มีการอุ่นอากาศที่อุณหภูมิเท่ากับ  $1000^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากมีต้นทุนรวมต่ำที่สุดคือ 261.93 บาทต่อตันเหล็ก โดยสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 47.06% และคิดเป็นต้นทุนเชื้อเพลิงเท่ากับ 194.30 บาท/ตัน และต้นทุนอื่นๆรวมเท่ากับ 67.63 บาท/ตัน



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผาแบบคัพเปอร์เรทีฟ สำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

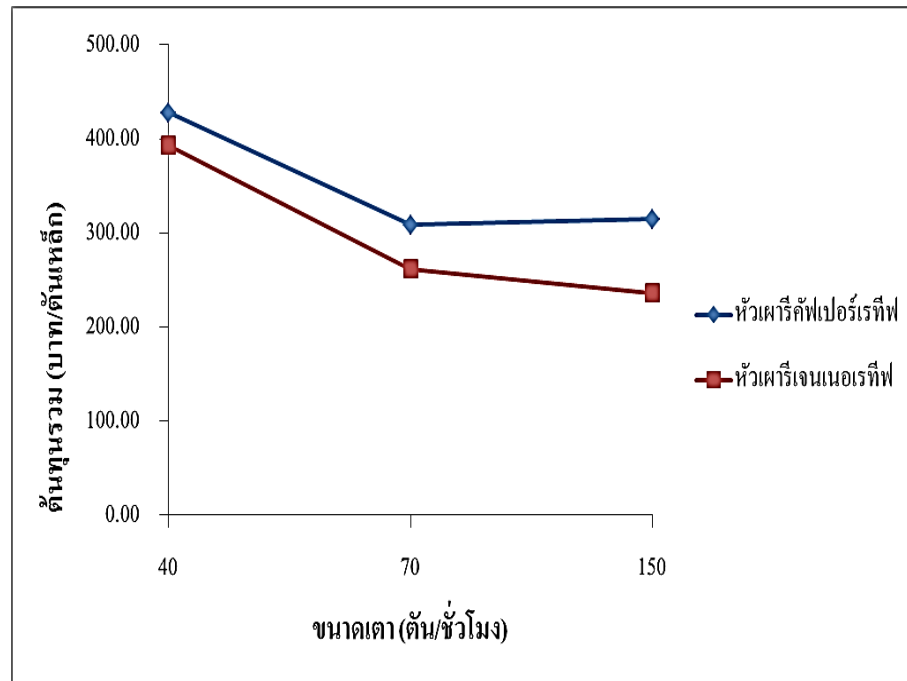
จากรูปที่ 4.5 ในการพิจารณาการเลือกลงทุนที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่มีความเหมาะสมกับต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาแบบคัพเปอร์เรทีฟพบว่า ควรเลือกติดตั้งหัวเผาที่มีการอุ่นอากาศที่อุณหภูมิเท่ากับ 700°C เนื่องจากมีต้นทุนรวมต่ำที่สุดคือ 314.91 บาทต่อตันเหล็ก โดยสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 35.32% และคิดเป็นต้นทุนเชื้อเพลิงเท่ากับ 269.84 บาท/ตัน และต้นทุนอื่นๆรวมเท่ากับ 45.07 บาท/ตัน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ต้นทุนเชื้อเพลิงและค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเผารีเจนเนอเรทีฟ สำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.6 ในการพิจารณาการเลือกลงทุนที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่มีความเหมาะสมกับต้นทุนเชื้อเพลิง และค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟพบว่า ควรเลือกติดตั้งหัวเผาที่มีการอุ่นอากาศที่อุณหภูมิเท่ากับ  $1000^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากมีต้นทุนรวมต่ำที่สุดคือ 236.39 บาทต่อตันเหล็ก โดยสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 61.80% และคิดเป็นต้นทุนเชื้อเพลิงเท่ากับ 159.35 บาท/ตัน และต้นทุนอื่นๆรวมเท่ากับ 77.04 บาท/ตัน

#### 4.3.1 การเปรียบเทียบต้นทุนรวมของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้ง 2 แบบ



รูปที่ 4.7 ต้นทุนรวมของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้งสองชนิด

จากรูปที่ 4.7 แสดงการพิจารณาเปรียบเทียบต้นทุนรวมของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้งสองชนิดสำหรับเตาเผาขนาดต่างๆ พบว่าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟมีค่าต้นทุนรวมต่ำกว่าหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟเนื่องจากหัวเผารีเจนเนอเรทีฟมีการเลือกอุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่สูงส่งผลให้ประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่าหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ แต่หากเปรียบเทียบระหว่างหัวเผาทั้งสองชนิดที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศเท่ากันคือ 700°C หัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟมีต้นทุนรวมน้อยกว่าหัวเผารีเจนเนอเรทีฟแสดงให้เห็นว่าการประหยัดเชื้อเพลิงส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนค่าใช้จ่ายรวม หากยังประหยัดเชื้อเพลิงได้มากเท่าใดส่งผลให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายมีค่าต่ำลง

เมื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงจากเส้นกราฟต้นทุนรวมของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง แต่ในขณะที่หัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่ขนาดเตา 150 ตัน/ชั่วโมง เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ในการประหยัดพลังงานที่อุณหภูมิ 700 °C เปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการลงทุนที่เพิ่มมากขึ้นจากเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมงจึงทำให้ต้นทุนรวมต่อหน่วยมีค่ามากขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ในบทนี้สามารถสรุปได้ว่าควรเลือกลงทุนติดตั้งหัวเผาแบบรีคัพเปอร์เรทีฟที่มีอุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่ 700°C หรือเลือกติดตั้งหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่มีอุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่ 1000°C แต่ทั้งนี้ในการตัดสินใจเลือกติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูงให้กับเตาเผาเหล็กจะต้องตัดสินใจประกอบกับผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป

#### 4.3.2 ผลการประหยัด

ผลประหยัดที่เกิดขึ้นของโครงการเกิดจากผลการประหยัดเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติในกระบวนการเผาเหล็กโดยการใช้เทคโนโลยีหัวเผาเรคัพเปอร์เรทีฟที่มีอุณหภูมิ 700°C และการใช้เทคโนโลยีหัวเผาเรเจนเนอเรทีฟที่มีอุณหภูมิ 1000°C

ตารางที่ 4.15 ผลการประหยัดที่ได้รับต่อปีจากการใช้หัวเผาเรคัพเปอร์เรทีฟ

รายการ	ขนาดเตา		
	40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
อัตราการใช้เชื้อเพลิงก่อนทำการติดตั้งหัวเผาเรคัพเปอร์เรทีฟ (MMBTU/ปี)	345,546.74	443,680.97	803,322.04
อัตราการใช้เชื้อเพลิงจากการใช้หัวเผาเรคัพเปอร์เรทีฟ (MMBTU/ปี)	225,124.35	324,359.96	519,623.44
ประหยัดค่าเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติต่อปี (MMBTU/ปี)	68,812.79	119,321.01	283,698.60
ราคาก๊าซธรรมชาติ(บาท/MMBTU)	292.09	292.09	292.09
การประหยัดพลังงานต่อปี(บาท/ปี)	20,099,989.45	34,853,271.83	82,867,421.73

ตารางที่ 4.16 ผลการประหยัดที่ได้รับต่อปีจากการใช้หัวเผาจีเจนเนอเรทีฟ

รายการ	ขนาดเตา		
	40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
อัตราการใช้เชื้อเพลิงก่อนทำการติดตั้งหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟ(MMBTU/ปี)	345,546.74	443,680.97	803,322.04
อัตราการใช้เชื้อเพลิงจากการใช้หัวเผาจีเจนเนอเรทีฟ (MMBTU/ปี)	225,124.35	234,869.21	306,849.49
ประหยัดค่าเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติต่อปี (MMBTU/ปี)	120,422.39	208,811.77	496,472.55
ราคาก๊าซธรรมชาติ (บาท/MMBTU)	292.09	292.09	292.09
การประหยัดพลังงานต่อปี (บาท/ปี)	35,174,981.54	60,993,225.70	145,017,988.02

ตารางที่ 4.17 สรุปผลใช้จ่ายรวมสำหรับหัวเผาคีพีเปอร์เรทีฟ

ค่าใช้จ่าย	40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
	ราคา (บาท)		
<b>ค่าใช้จ่ายในการลงทุน</b>			
-ค่าหัวเผาคีพีเปอร์เรทีฟ	44,000,000	49,500,000	99,000,000
-ค่าอุปกรณ์	6,800,000	11,000,000	11,900,000
-ค่าติดตั้ง	2,000,000	5,500,000	8,000,000
รวม	52,800,000	66,900,000	118,900,000
<b>ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน</b>			
-ค่าเชื้อเพลิง	80,833,070.17	94,744,471.85	151,780,286.67
-ค่าสาธารณูปโภค	1,944,864.77	2,187,972.86	4,375,946
-ค่าจ้างแรงงาน	1,453,644	1,453,644	1,453,644
-ค่าบำรุงรักษา	4,400,000	4,950,000	9,900,000
รวม	51,032,679.94	55,341,983.14	72,891,638.57
ผลการประหยัดพลังงานต่อสุทธิปี	20,099,989.45	34,853,271.83	82,867,421.73

ตารางที่ 4.18สรุปผลค่าใช้จ่ายรวมสำหรับหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟ

ค่าใช้จ่าย	40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
	ราคา (บาท)		
<b>ค่าใช้จ่ายในการลงทุน</b>			
-ค่าหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟ	65,000,000	78,000,000	149,000,000
-ค่าอุปกรณ์	8,000,000	14,000,000	14,000,000
-ค่าติดตั้ง	5,000,000	8,000,000	15,000,000
รวม	78,000,000	100,000,000	178,500,000
<b>ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน</b>			
-ค่าเชื้อเพลิง	65,758,078.08	68,604,517.98	89,629,720.37
-ค่าสาธารณูปโภค	4,132,837.63	4,959,405.16	9,505,527
-ค่าจ้างแรงงาน	1,453,644	1,453,644	1,453,644
-ค่าบำรุงรักษา	10,075,000	12,090,000	23,172,500
รวม	48,870,894.40	49,842,804.06	62,117,345.72
ผลการประหยัดพลังงานต่อสุทธิปี	35,174,981.54	60,993,225.70	145,017,988.02



## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากผลการวิเคราะห์การเลือกใช้อุณหภูมิในการอุ่นอากาศของหัวเผาประสิทธิภาพสูงในบทที่ 4 นำไปสู่การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์หาหัวเผาประสิทธิภาพสูงที่เหมาะสมในเตาเผาเหล็กแต่ละขนาด และศึกษาว่าโครงการที่จะลงทุนนี้มีความเหมาะสมทางการเงินหรือไม่ โดยพิจารณาดังต่อไปนี้

#### 5.1 ข้อกำหนดในการวิเคราะห์โครงการ

1. อายุโครงการ (n) โดยหัวเผาไร้ฟลูออไรด์เพอร์เรทีฟเท่ากับ 10 ปี และหัวเผารีเจนเนอเรทีฟเท่ากับ 12 ปี โดยอ้างอิงจากการสัมภาษณ์ผู้ผลิตหัวเผาไร้ฟลูออไรด์เพอร์เรทีฟและหัวเผารีเจนเนอเรทีฟซึ่งการกำหนดอายุโครงการจะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 60 ปี ตามหลักการคิดโครงการที่อายุโครงการไม่เท่ากันด้วยวิธี Replacement chain method

2. ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้ต่อปี (EST) ของหัวเผาไร้ฟลูออไรด์เพอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 1000°C อ้างอิงจากตารางที่ 4.15 ถึง 4.16

3. การวิเคราะห์โครงการด้านการเงินจะใช้อัตราส่วนลด (i) เท่ากับ ร้อยละ 8 ต่อปี อ้างอิงจากธนาคารแห่งประเทศไทย

4. เงินจ่ายลงทุนตอนเริ่มต้นโครงการ ( $I_0$ ) ของหัวเผาไร้ฟลูออไรด์เพอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ 700°C และหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 1,000°C อ้างอิงจากตารางที่ 4.18

#### 5.2 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ คือผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลการประหยัดต้นทุนพลังงานจากมาตรการติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูง ในรูปตัวเงินที่คาดว่าจะได้รับในแต่ละปีตลอดอายุของโครงการ กับมูลค่าปัจจุบันของเงินที่จ่ายออกไปภายใต้ โครงการที่กำลังพิจารณา ณ อัตราส่วนลด โดยคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

หลักในการตัดสินใจ (Decision Rule) เมื่อ  $NPV > 0$  หรือมีค่าเป็นบวก แสดงว่าโครงการมีความเหมาะสมที่จะลงทุนได้ กล่าวคือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์รวมมากกว่ามูลค่าปัจจุบันของต้นทุนรวมการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก

### 5.3 ระยะเวลาคืนทุน

การคำนวณระยะเวลาคืนทุน เป็นการหาระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าลงทุนของระบบ ซึ่งก็คือระยะเวลาคืนทุนนั่นเอง ซึ่งพิจารณาจำนวนปีที่จะได้รับผลตอบแทนที่คุ้มทุนแต่ข้อเสียของการคำนวณระยะเวลาคืนทุนคือ ไม่ได้มีการพิจารณามูลค่าทางการเงินที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราดอกเบี้ยหรืออัตราเงินเฟ้อต่างๆ และไม่คำนึงถึงผลประหยัดที่ได้หลังจากคืนทุนแล้ว อีกทั้งยังไม่การคำนึงถึงมูลค่าของโครงการ ซึ่งอาจจะมีค่าเหลืออยู่เมื่อสิ้นสุดโครงการ ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับโครงการที่มีอายุการคำนวณนานๆ โดยสามารถหาค่าได้ ดังสมการ 2.14 การคำนวณแสดงในภาคผนวก จ

### 5.4 โครงการที่มีอายุโครงการไม่เท่ากัน

โครงการที่มีอายุโครงการไม่เท่ากัน (Projects with Unequal Lives) จะต้องทำการปรับให้อายุโครงการเท่ากันด้วยวิธีการคูณร่วมน้อยของอายุโครงการที่ต้องการทำการเปรียบเทียบ เนื่องจากหากทำการวิเคราะห์โครงการที่มีอายุโครงการที่ไม่เท่ากันแล้ว ส่วนใหญ่จะเลือกทางเลือกที่สั้นกว่า เพราะทางเลือกโครงการที่มีอายุโครงการสั้นกว่าอาจทำให้เกิดต้นทุนที่น้อยกว่า ซึ่งทางเลือกนั้นอาจไม่ใช่ทางเลือกที่ดีที่สุด โดยโครงการที่แยกออกจากกันอย่างเด็ดขาด มีอายุโครงการที่ไม่เท่ากัน และสามารถลงทุนซ้ำได้อีก จะมีวิธีการประเมินโครงการ 2 วิธี คือ Replacement chain method และ Equivalent annual annuity method โดยในการพิจารณาครั้งนี้จะใช้ Replacement chain method โดยจะเปรียบเทียบโครงการตลอดอายุการใช้งานร่วม และเลือกโครงการที่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงกว่า การคำนวณแสดงในภาคผนวก จ

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐศาสตร์ของเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

รายการ	40 ตัน/ชั่วโมง
--------	----------------

	รีคัพเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ
อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ (°C)	700	1,000
อายุของโครงการ (ปี)	60	60
ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้(บาท/ปี)	68,812.79	120,422.39
เงินจ่ายลงทุน (บาท)	52,800,000	78,000,000
อัตราส่วนลด (%)	8	8
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)	151,380,482.28	307,245,055.16
ระยะเวลาคืนทุน	2.62	2.22

จากตารางสามารถสรุปได้ว่าที่เตาเผาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมงควรเลือกการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ 1,000°C ด้วยเงินลงทุนเริ่มต้นโครงการเท่ากับ 78,000,000 บาท ซึ่งมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 307,245,055.16บาทและระยะเวลาคืนทุน2.22ปี

ตารางที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐศาสตร์ของเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

รายการ	70 ตัน/ชั่วโมง
--------	----------------

	รีคัฟเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ
อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ (°C)	700	1,000
อายุของโครงการ (ปี)	60	60
ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้(บาท/ปี)	119,321.01	208,811.77
เงินจ่ายลงทุน (บาท)	66,900,000	100,000,000
อัตราลด (%)	8	8
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)	307,968,202.36	590,655,143.34
ระยะเวลาคืนทุน	1.92	1.64

จากตารางสามารถสรุปได้ว่าที่เตาเผาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมงควรเลือกการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ 1,000°C ด้วยเงินลงทุนเริ่มต้นโครงการเท่ากับ 100,000,000 บาท ซึ่งมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 590,655,143.34บาทและระยะเวลาคืนทุน 1.64ปี

ตารางที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์โครงการทางเศรษฐศาสตร์ของเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

รายการ	150 ตัน/ชั่วโมง
--------	-----------------

	รีคัฟเปอร์เรทีฟ	รีเจนเนอเรทีฟ
อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ (°C)	700	1,000
อายุของโครงการ (ปี)	60	60
ต้นทุนพลังงานที่ประหยัดได้(บาท/ปี)	283,698.60	496,472.55
เงินจ่ายลงทุน (บาท)	118,900,000	178,500,000
อัตราลด (%)	8	8
มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (บาท)	806,305,314.89	1,501,670,888.39
ระยะเวลาคืนทุน	1.43	1.23

จากตารางสามารถสรุปได้ว่าที่เตาเผาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมงควรเลือกการติดตั้งหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ 1,000°C ด้วยเงินลงทุนเริ่มต้นโครงการเท่ากับ 178,500,000 บาท ซึ่งมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็น 1,501,670,888.39 บาท และระยะเวลาคืนทุน 1.23 ปี

### 5.5 การวิเคราะห์ความไว

การวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นการวิเคราะห์โครงการภายใต้สภาพความไม่แน่นอนซึ่งจะมีผลทำให้ต้นทุนและผลประโยชน์ของโครงการเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าของเกณฑ์ในการตัดสินใจที่ใช้วัดค่าความคุ้มค่าของโครงการเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นเพื่อจะเป็นการลดอัตราความเสี่ยงของโครงการที่เกิดขึ้น และการคาดคะเนผลตอบแทนของโครงการที่สูงเกินไป จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ความไว ซึ่งผลของการวิเคราะห์ความไวจะแสดงให้เห็นถึงความคล่องตัวและความสามารถในการทนต่อความเสี่ยงของโครงการว่ามากน้อยเพียงใด โดยการวิเคราะห์ความไวของโครงการทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ ประกอบไปด้วยราคาเชื้อเพลิง อัตราส่วนลดค่าใช้จ่ายในการลงทุน อายุของหัวเผา และค่าการประหยัดพลังเชื้อเพลิง

กรณีที่ 1 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติ(Natural Gas)

ราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติมีราคาขายอยู่ที่ 292.097 บาท/MMBTU เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติของหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟ

อัตราการเปลี่ยนแปลง	ราคาก๊าซธรรมชาติ	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ		
		40 ต้น/ชั่วโมง	50 ต้น/ชั่วโมง	150 ต้น/ชั่วโมง
-100%	0	-97,388,078.83	-123,395,122.60	-219,307,624.48
-90%	29.21	-72,511,222.72	-80,258,790.11	-116,746,330.54
-80%	58.42	-47,634,366.61	-37,122,457.61	-14,185,036.61
-70%	87.63	-22,757,510.49	6,013,874.89	88,376,257.33
-60%	116.84	2,119,345.62	49,150,207.38	190,937,551.27
-50%	146.05	26,996,201.73	92,286,539.88	293,498,845.20
-40%	175.26	51,873,057.84	135,422,872.38	396,060,139.14
-30%	204.47	76,749,913.95	178,559,204.87	498,621,433.08
-20%	233.68	101,626,770.06	221,695,537.37	601,182,727.01
-10%	262.89	126,503,626.17	264,831,869.87	703,744,020.95
0%	292.10	151,380,482.28	307,968,202.36	806,305,314.89
10%	321.31	176,257,338.39	351,104,534.86	908,866,608.82
20%	350.52	201,134,194.50	394,240,867.36	1,011,427,902.76
30%	379.73	226,011,050.61	437,377,199.85	1,113,989,196.70
40%	408.94	250,887,906.72	480,513,532.35	1,216,550,490.63
50%	438.15	275,764,762.83	523,649,864.85	1,319,111,784.57
60%	467.35	300,641,618.94	566,786,197.34	1,421,673,078.51
70%	496.56	325,518,475.05	609,922,529.84	1,524,234,372.44
80%	525.77	350,395,331.16	653,058,862.34	1,626,795,666.38
90%	554.98	375,272,187.27	696,195,194.83	1,729,356,960.32
100%	584.19	400,149,043.38	739,331,527.33	1,831,918,254.25

ตารางที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติของหัวเผาไร้เงินเนอเรทีฟ

อัตราการ	ราคาก๊าซ	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
----------	----------	---------------------

เปลี่ยนแปลง	ธรรมชาติ	40 ตัน/ชั่วโมง	50 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
-100%	0	-128,099,926.8	-164,230,675.40	-293,151,755.50
-90%	29.21	-84,565,428.58	-88,742,093.48	-113,669,491.10
-80%	58.42	-41,030,930.39	-13,253,511.61	65,812,773.28
-70%	87.63	2,503,567.806	62,235,070.26	245,295,037.70
-60%	116.84	46,038,066.00	137,723,652.10	424,777,302.10
-50%	146.05	89,572,564.19	213,212,234.00	604,259,566.40
-40%	175.26	133,107,062.4	288,700,815.90	783,741,830.80
-30%	204.47	176,641,560.6	364,189,397.70	963,224,095.20
-20%	233.68	220,176,058.8	439,677,979.60	1,142,706,360.00
-10%	262.89	263,710,557.00	515,166,561.50	1,322,188,624.00
0%	292.10	307,245,055.20	590,655,143.30	1,501,670,888.00
10%	321.31	350,779,553.40	66,6143,725.20	1,681,153,153.00
20%	350.52	394,314,051.50	741,632,307.10	1,860,635,417.00
30%	379.73	437,848,549.70	817,120,888.90	2,040,117,682.00
40%	408.94	481,383,047.90	892,609,470.80	2,219,599,946.00
50%	438.15	524,917,546.10	968,098,052.70	2,399,082,210.00
60%	467.35	568,452,044.30	1,043,586,635.00	2,578,564,475.00
70%	496.56	611,986,542.50	1,119,075,216.00	2,758,046,739.00
80%	525.77	655,521,040.70	1,194,563,798.00	2,937,529,004.00
90%	554.98	699,055,538.90	1,270,052,380.00	3,117,011,268.00
100%	584.19	742,590,037.10	1,345,540,962.00	3,296,493,532.00

กรณีที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุน (Investment Cost)

ค่าใช้จ่ายในการลงทุนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหวี่ยงเฟืองเพอร์เรทีฟในเตาเผาเหล็กขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	248,768,561.10
-90%	5,280,000.00	239,029,753.22
-80%	10,560,000.00	229,290,945.34
-70%	15,840,000.00	219,552,137.46
-60%	21,120,000.00	209,813,329.57
-50%	26,400,000.00	200,074,521.69
-40%	31,680,000.00	190,335,713.81
-30%	36,960,000.00	180,596,905.93
-20%	42,240,000.00	170,858,098.04
-10%	47,520,000.00	161,119,290.16
0%	52,800,000.00	151,380,482.28
10%	58,080,000.00	141,641,674.40
20%	63,360,000.00	131,902,866.51
30%	68,640,000.00	122,164,058.63
40%	73,920,000.00	112,425,250.75
50%	79,200,000.00	102,686,442.87
60%	84,480,000.00	92,947,634.98
70%	89,760,000.00	83,208,827.10
80%	95,040,000.00	73,470,019.22
90%	100,320,000.00	63,731,211.33
100%	105,600,000.00	53,992,403.45

ตารางที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหวี่ยงเฟืองเพอร์เรทีฟในเตาเผาเหล็กขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	431,363,324.97



-90%	6,690,000	419,023,812.71
-80%	13,380,000	406,684,300.45
-70%	20,070,000	394,344,788.19
-60%	26,760,000	382,005,275.93
-50%	33,450,000	369,665,763.67
-40%	40,140,000	357,326,251.40
-30%	46,830,000	344,986,739.14
-20%	53,520,000	332,647,226.88
-10%	60,210,000	320,307,714.62
0%	66,900,000	307,968,202.36
10%	73,590,000	295,628,690.10
20%	80,280,000	283,289,177.84
30%	86,970,000	270,949,665.58
40%	93,660,000	258,610,153.32
50%	100,350,000	246,270,641.06
60%	107,040,000	233,931,128.80
70%	113,730,000	221,591,616.54
80%	120,420,000	209,252,104.28
90%	127,110,000	196,912,592.02
100%	133,800,000	184,573,079.76

ตารางที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเหอซีพีเปอร์เรทีฟในเดาเดาเหล็กขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	1,025,612,939.37

-90%	11,890,000	1,003,682,176.92
-80%	23,780,000	981,751,414.47
-70%	35,670,000	959,820,652.02
-60%	47,560,000	937,889,889.57
-50%	59,450,000	915,959,127.13
-40%	71,340,000	894,028,364.68
-30%	83,230,000	872,097,602.23
-20%	95,120,000	850,166,839.78
-10%	107,010,000	828,236,077.34
0%	118,900,000	806,305,314.89
10%	130,790,000	784,374,552.44
20%	142,680,000	762,443,789.99
30%	154,570,000	740,513,027.54
40%	166,460,000	718,582,265.10
50%	178,350,000	696,651,502.65
60%	190,240,000	674,720,740.20
70%	202,130,000	652,789,977.75
80%	214,020,000	630,859,215.30
90%	225,910,000	608,928,452.86
100%	237,800,000	586,997,690.41

ตารางที่ 5.9 การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเสาเงินนอกรีทีฟในเตาเผาเหล็กขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	435,344,981.93
-90%	7,800,000	422,534,989.26

-80%	15,600,000	409,724,996.58
-70%	23,400,000	396,915,003.90
-60%	31,200,000	384,105,011.22
-50%	39,000,000	371,295,018.55
-40%	46,800,000	358,485,025.87
-30%	54,600,000	345,675,033.19
-20%	62,400,000	332,865,040.51
-10%	70,200,000	320,055,047.84
0%	78,000,000	307,245,055.16
10%	85,800,000	294,435,062.48
20%	93,600,000	281,625,069.80
30%	101,400,000	268,815,077.13
40%	109,200,000	256,005,084.45
50%	117,000,000	243,195,091.77
60%	124,800,000	230,385,099.09
70%	132,600,000	217,575,106.42
80%	140,400,000	204,765,113.74
90%	148,200,000	191,955,121.06
100%	156,000,000	179,145,128.39

ตารางที่ 5.10 การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนของหัวเผาจีเอ็นเอเรทีฟในเตาเผาเหล็กขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	754,885,818.69
-90%	10,000,000	738,462,751.16

-80%	20,000,000	722,039,683.62
-70%	30,000,000	705,616,616.09
-60%	40,000,000	689,193,548.55
-50%	50,000,000	672,770,481.02
-40%	60,000,000	656,347,413.48
-30%	70,000,000	639,924,345.95
-20%	80,000,000	623,501,278.41
-10%	90,000,000	607,078,210.88
0%	100,000,000	590,655,143.34
10%	110,000,000	574,232,075.81
20%	120,000,000	557,809,008.27
30%	130,000,000	541,385,940.74
40%	140,000,000	524,962,873.20
50%	150,000,000	508,539,805.67
60%	160,000,000	492,116,738.13
70%	170,000,000	475,693,670.60
80%	180,000,000	459,270,603.06
90%	190,000,000	442,847,535.53
100%	200,000,000	426,424,467.99

ตารางที่ 5.11 การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุนหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟในเตาเผาเหล็กขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	ค่าใช้จ่ายในการลงทุน	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	1,794,822,643.89
-90%	17,850,000	1,765,507,468.34

-80%	35,700,000	1,736,192,292.79
-70%	53,550,000	1,706,877,117.24
-60%	71,400,000	1,677,561,941.69
-50%	89,250,000	1,648,246,766.14
-40%	107,100,000	1,618,931,590.59
-30%	124,950,000	1,589,616,415.04
-20%	142,800,000	1,560,301,239.49
-10%	160,650,000	1,530,986,063.94
0%	178,500,000	1,501,670,888.39
10%	196,350,000	1,472,355,712.84
20%	214,200,000	1,443,040,537.29
30%	232,050,000	1,413,725,361.74
40%	249,900,000	1,384,410,186.19
50%	267,750,000	1,355,095,010.64
60%	285,600,000	1,325,779,835.09
70%	303,450,000	1,296,464,659.54
80%	321,300,000	1,267,149,483.99
90%	339,150,000	1,237,834,308.44
100%	357,000,000	1,208,519,132.89

กรณีที่ 3 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนลด(Discount Rate)

อัตราส่วนลดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ  
ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.12 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนลดของหัวเหรีศพ์เปอร์เรทิฟ

อัตราการเปลี่ยนแปลง	อัตราส่วนลด	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ		
		40 ต้น/ชั่วโมง	70 ต้น/ชั่วโมง	150 ต้น/ชั่วโมง
-100%	0.00%	889,199,367.25	1,689,796,309.75	4,258,645,303.57
-90%	0.80%	692,843,881.03	1,323,723,641.94	3,346,577,329.68
-80%	1.60%	550,629,287.69	1,057,956,830.01	2,683,464,845.05
-70%	2.40%	445,862,138.51	861,752,592.71	2,193,285,235.33
-60%	3.20%	367,338,627.50	714,423,731.13	1,824,800,180.03
-50%	4.00%	307,458,377.71	601,900,386.27	1,543,105,910.06
-40%	4.80%	261,007,953.97	514,507,034.60	1,324,162,687.69
-30%	5.60%	224,370,001.32	445,513,825.21	1,151,224,513.46
-20%	6.40%	195,004,839.34	390,184,713.49	1,012,489,701.50
-10%	7.20%	171,107,758.06	345,146,700.57	899,541,698.63
0%	8.00%	151,380,482.28	307,968,202.36	806,305,314.89
10%	8.80%	134,877,398.92	276,874,683.15	728,341,737.46
20%	9.60%	120,901,133.96	250,555,103.71	662,368,005.93
30%	10.40%	108,930,970.77	228,028,943.48	605,926,417.80
40%	11.20%	98,573,307.05	208,553,963.77	557,154,914.96
50%	12.00%	89,527,027.85	191,561,606.30	514,626,061.35
60%	12.80%	81,559,062.26	176,611,300.32	477,233,014.02
70%	13.60%	74,486,954.93	163,357,821.86	444,107,974.22
80%	14.40%	68,166,313.33	151,527,743.22	414,563,287.39
90%	15.20%	62,481,674.94	140,902,271.07	388,048,479.40
100%	16.00%	57,339,795.67	131,304,615.55	364,118,607.57

ตารางที่ 5.13 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนลดของหัวเหวี่เงินเนอเรทีฟ

อัตราการเปลี่ยนแปลง	อัตราส่วนลด	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ		
		40 ต้น/ชั่วโมง	70 ต้น/ชั่วโมง	150 ต้น/ชั่วโมง
-100%	0.00%	1,720,498,892.69	3,159,593,542.07	7,808,579,281.25

-90%	0.80%	1,345,891,519.29	2,480,680,978.03	6,145,059,174.55
-80%	1.60%	1,074,032,422.55	1,987,200,894.18	4,934,642,155.72
-70%	2.40%	873,395,338.84	1,622,488,567.54	4,039,242,321.30
-60%	3.20%	722,774,958.71	1,348,362,701.87	3,365,706,822.13
-50%	4.00%	607,755,445.51	1,138,821,429.11	2,850,524,109.23
-40%	4.80%	518,427,994.05	975,961,533.01	2,449,914,613.65
-30%	5.60%	447,903,832.89	847,315,598.57	2,133,357,640.27
-20%	6.40%	391,337,469.32	744,100,063.73	1,879,327,980.59
-10%	7.20%	345,279,657.90	660,052,801.57	1,672,464,107.43
0%	8.00%	307,245,055.16	590,655,143.34	1,501,670,888.39
10%	8.80%	275,420,743.70	532,606,549.80	1,358,837,088.18
20%	9.60%	248,467,925.26	483,466,640.39	1,237,960,537.35
30%	10.40%	225,385,735.60	441,408,983.30	1,134,545,821.98
40%	11.20%	205,416,825.40	405,050,141.70	1,045,185,663.55
50%	12.00%	187,981,260.40	373,329,822.50	967,267,161.70
60%	12.80%	172,629,789.70	345,426,028.20	898,763,644.12
70%	13.60%	159,010,477.70	320,694,394.40	838,085,723.70
80%	14.40%	146,844,639.00	298,624,388.10	783,973,668.21
90%	15.20%	135,909,309.70	278,807,365.10	735,418,854.97
100%	16.00%	126,024,350.70	260,913,046.50	691,605,887.46

กรณีที่ 4 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอายุของหัวเผา

อายุของหัวเผาเมื่อเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิ  
ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.14 การเปลี่ยนแปลงอายุของหัวเผารีก์ฟเปอร์เรทีฟ

อัตราการเปลี่ยนแปลง	อายุ	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ		
		40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
-100%	0	-	-	-
-90%	1	-456,991,930.00	-462,867,297.29	-563,684,833.23
-80%	2	-117,684,001.59	-32,948,728.90	200,400,634.37
-70%	3	-4,804,330.97	110,074,944.67	454,593,680.51
-60%	4	51,468,769.23	181,375,520.49	581,314,733.79
-50%	5	85,099,792.24	223,987,555.32	657,048,230.69
-40%	6	104,748,527.18	248,883,395.61	701,295,097.81
-30%	7	122,994,606.63	272,002,007.65	742,383,333.55
-20%	8	134,752,518.87	286,899,816.90	768,860,904.86
-10%	9	143,944,245.36	298,546,152.17	789,559,698.03
0%	10	151,380,482.28	307,968,202.36	806,305,314.89
10%	11	156,893,536.88	314,953,493.14	818,720,129.13
20%	12	162,054,764.52	321,493,003.16	830,342,666.37
30%	13	165,825,431.12	326,270,609.13	838,833,807.64
40%	14	169,078,848.56	330,392,836.92	846,160,158.66
50%	15	172,422,563.87	334,629,476.20	853,689,850.90
60%	16	174,745,094.56	337,572,228.16	858,919,943.69
70%	17	176,799,197.13	340,174,869.48	863,545,564.81
80%	18	178,621,366.88	342,483,641.37	867,648,897.82
90%	19	180,242,436.10	344,537,609.76	871,299,373.77
100%	20	182,209,982.48	347,030,580.45	875,730,079.54

ตารางที่ 5.15 การเปลี่ยนแปลงอายุของหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟ

อัตราการเปลี่ยนแปลง	อายุ	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ		
		40 ตัน/ชั่วโมง	70 ตัน/ชั่วโมง	150 ตัน/ชั่วโมง
-100.00%	0	-	-	-



-91.67%	1	-607,255,743.57	-581,781,778.10	-591,129,016.39
-83.33%	2	-106,005,394.77	60,846,874.20	555,963,127.98
-75.00%	3	60,748,664.10	274,634,129.16	937,573,378.07
-66.67%	4	143,879,380.30	381,211,970.44	1,127,814,824.76
-58.33%	5	193,561,573.38	444,907,089.78	1,241,510,612.78
-50.00%	6	222,588,113.63	482,120,602.92	1,307,936,733.73
-41.67%	7	249,542,549.18	516,677,571.58	1,369,620,922.79
-33.33%	8	266,912,192.26	538,946,344.76	1,409,370,682.92
-25.00%	9	280,490,879.12	556,354,917.65	1,440,444,985.53
-16.67%	10	291,476,229.12	570,438,699.70	1,465,584,536.49
-8.33%	11	299,620,514.33	580,880,090.99	1,484,222,419.95
0.00%	12	307,245,055.16	590,655,143.34	1,501,670,888.39
8.33%	13	312,815,358.09	597,796,557.35	1,514,418,312.40
16.67%	14	317,621,542.95	603,958,332.82	1,525,417,081.60
25.00%	15	322,561,122.39	610,291,126.97	1,536,721,119.16
33.33%	16	325,992,133.63	614,689,859.33	1,544,572,856.43
41.67%	17	329,026,603.34	618,580,205.11	1,551,517,123.64
50.00%	18	331,718,445.01	622,031,284.17	1,557,677,299.78
58.33%	19	334,113,206.35	625,101,491.03	1,563,157,619.00
66.67%	20	337,019,808.96	628,827,904.62	1,569,809,267.27
75.00%	21	338,771,633.35	631,073,833.33	1,573,818,250.01
83.33%	22	340,358,561.79	633,108,356.98	1,577,449,874.73
91.67%	23	341,797,820.67	634,953,560.66	1,580,743,563.30
100.00%	24	343,104,645.31	636,628,976.86	1,583,734,181.23

กรณีที่ 5 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงาน

การเปลี่ยนแปลงการประหยัดพลังงานในที่นี้คือการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการประหยัดพลังงาน โดยการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.16 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟของเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	อัตราการผลิต	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	-
-90%	4	-72,511,222.72
-80%	8	-47,634,366.61
-70%	12	-22,757,510.49
-60%	16	2,119,345.62
-50%	20	26,996,211.97
-40%	24	51,873,070.13
-30%	28	76,749,928.29
-20%	32	101,626,786.45
-10%	36	126,503,608.46
0%	40	151,380,482.28

ตารางที่ 5.17 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟของเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	อัตราการผลิต	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	-

-90%	6.50	-80,258,790.11
-80%	13.00	-37,122,457.61
-70%	19.50	6,013,874.89
-60%	26.00	49,150,207.38
-50%	32.50	92,286,539.88
-40%	39.00	135,422,872.38
-30%	45.50	178,559,204.87
-20%	52.00	221,695,537.37
-10%	58.50	264,831,869.87
0%	65.00	307,968,202.36
7.79%	70.00	341,571,405.38

ตารางที่ 5.18 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟของเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	อัตราการผลิต	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	-

-90%	10.36	-116,746,330.54
-80%	20.71	-14,185,036.61
-70%	31.07	88,376,257.33
-60%	41.42	190,937,551.27
-50%	51.78	293,498,845.20
-40%	62.13	396,060,139.14
-30%	72.49	498,621,433.08
-20%	82.84	601,182,727.01
-10%	93.20	703,744,020.95
0%	103.55	806,305,314.89
10%	113.91	908,916,131.42
20%	124.26	1,011,427,902.76
30%	134.62	1,114,038,719.29
40%	144.97	1,216,550,490.63
44.86%	150.00	1,266,370,221.05

ตารางที่ 5.19 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวรีเจนเนอเรทีฟของเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

อัตราการเปลี่ยนแปลง	อัตราการผลิต	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	-

-92%	3.2	(91,821,178.28)
-83%	6.8	(55,542,429.79)
-75%	10	(19,263,681.29)
-67%	13.2	17,015,067.20
-58%	16.8	53,293,815.70
-50%	20	89,572,564.19
-42%	23.2	125,851,312.69
-33%	26.8	162,130,061.18
-25%	30	198,408,809.68
-17%	33.2	234,687,558.17
-8%	36.8	270,966,306.66
0%	40	307,245,055.16

ตารางที่ 5.20 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวเผาจีเจนเนอร์ที่ฟองเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

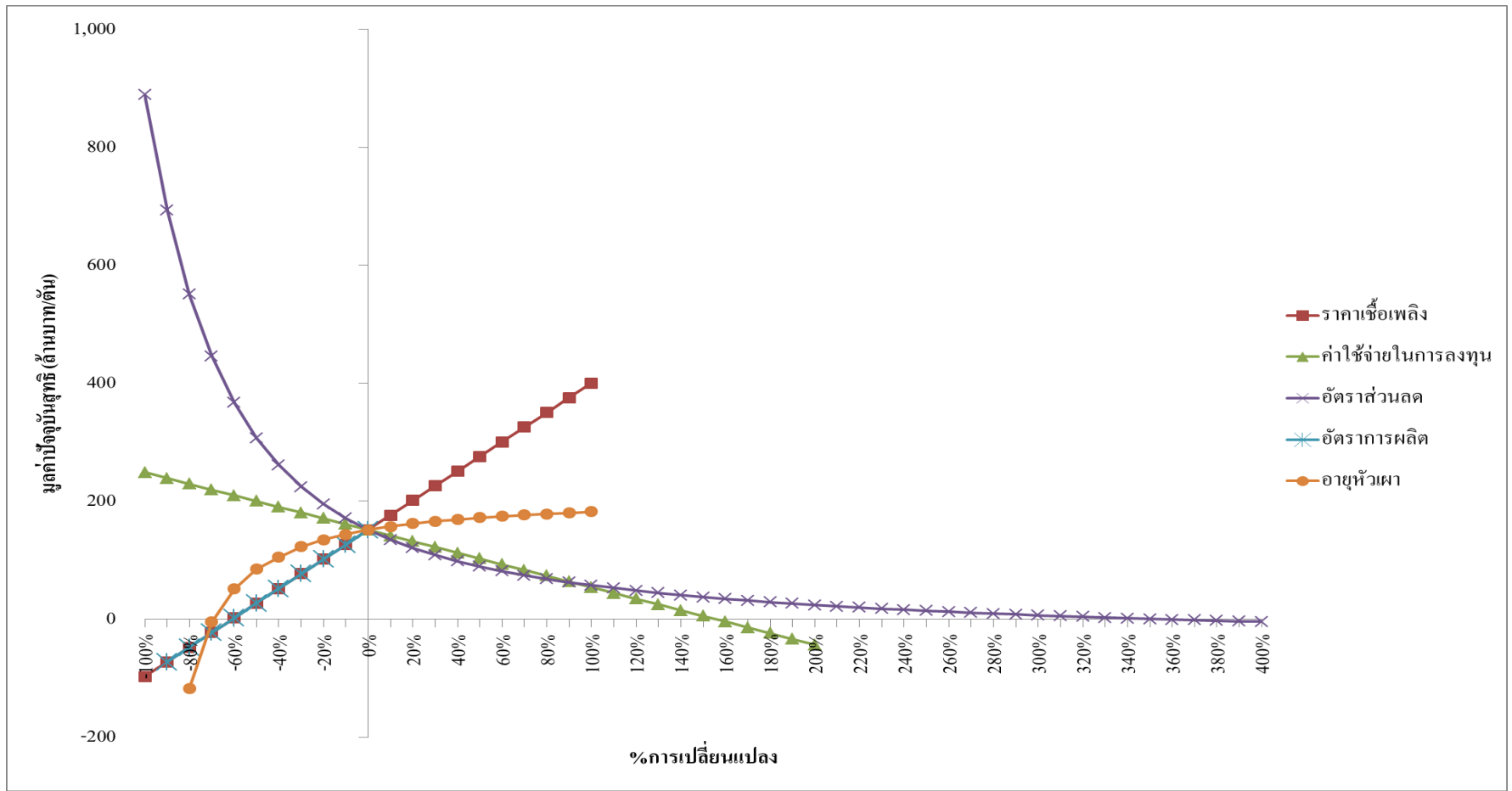
อัตราการเปลี่ยนแปลง	อัตราการผลิต	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	-

-92%	5.2	-101,323,523.79
-83%	11.05	-38,416,372.24
-75%	16.25	24,490,779.32
-67%	21.45	87,397,930.88
-58%	27.3	150,305,082.44
-50%	32.5	213,212,234.00
-42%	37.7	276,119,385.55
-33%	43.55	339,026,537.11
-25%	48.75	401,933,688.67
-17%	53.95	464,840,840.23
-8%	59.8	527,747,991.80
0%	65	590,655,143.30
7.79%	70	635,562,294.90

ตารางที่ 5.21 การเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตเมื่อใช้งานหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟของเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

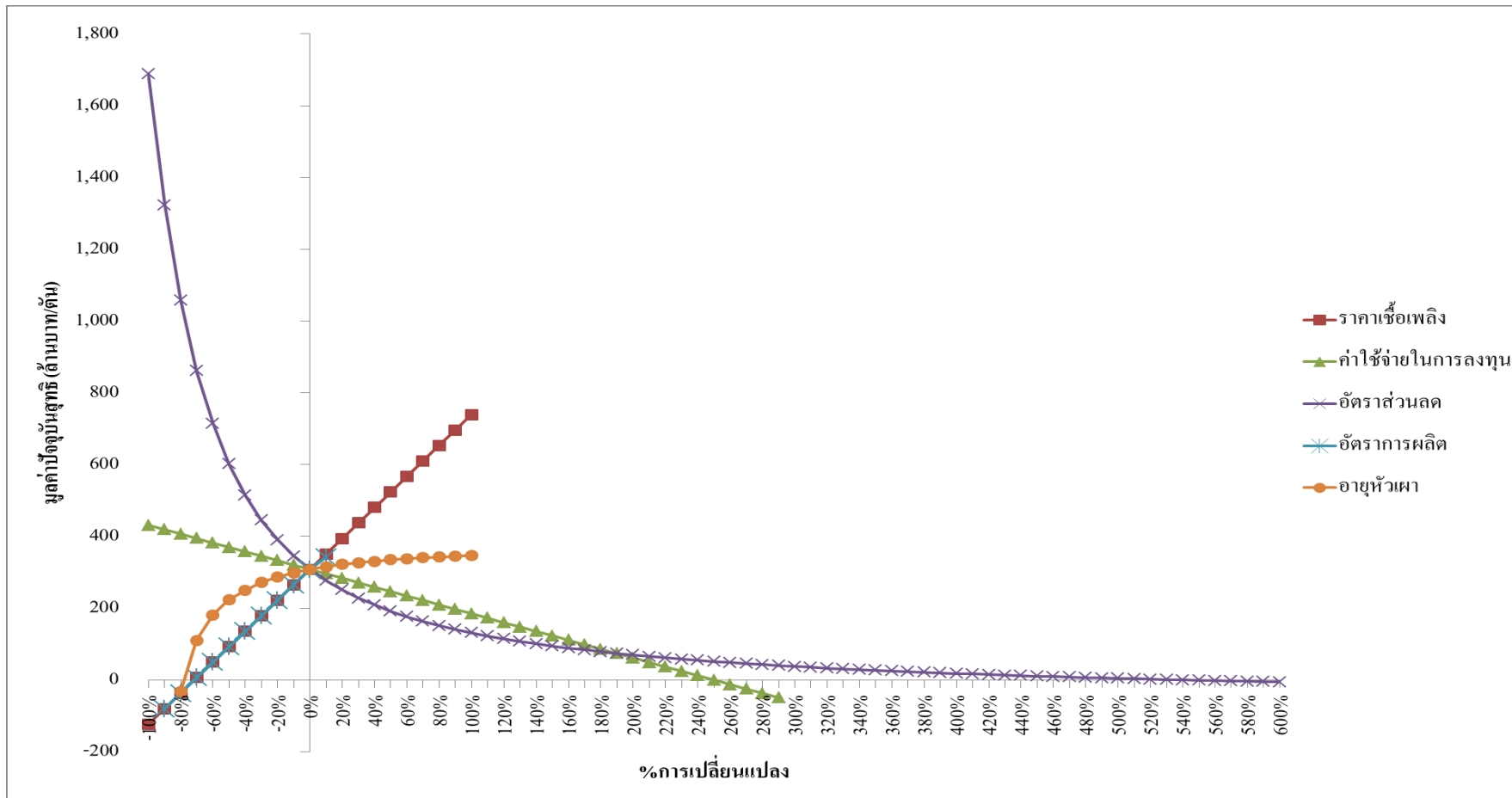
อัตราการเปลี่ยนแปลง	อัตราการผลิต	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
-100%	0	-

-92%	8.28	-143,583,201.84
-83%	17.60	5,985,351.81
-75%	25.89	155,553,905.47
-67%	34.17	305,122,459.13
-58%	43.49	454,691,012.79
-50%	51.78	604,259,566.44
-42%	60.06	753,828,120.10
-33%	69.38	903,396,673.76
-25%	77.66	1,052,965,227.42
-17%	85.95	1,202,533,781.07
-8%	95.27	1,352,102,334.73
0%	103.55	1,501,670,888.39
8%	112.14	1,651,239,442.05
17%	120.74	1,800,807,995.70
25%	129.33	1,950,376,549.36
33%	137.93	2,099,945,103.02
42%	146.52	2,249,513,656.68
44.86%	150	2,398,046,403.05



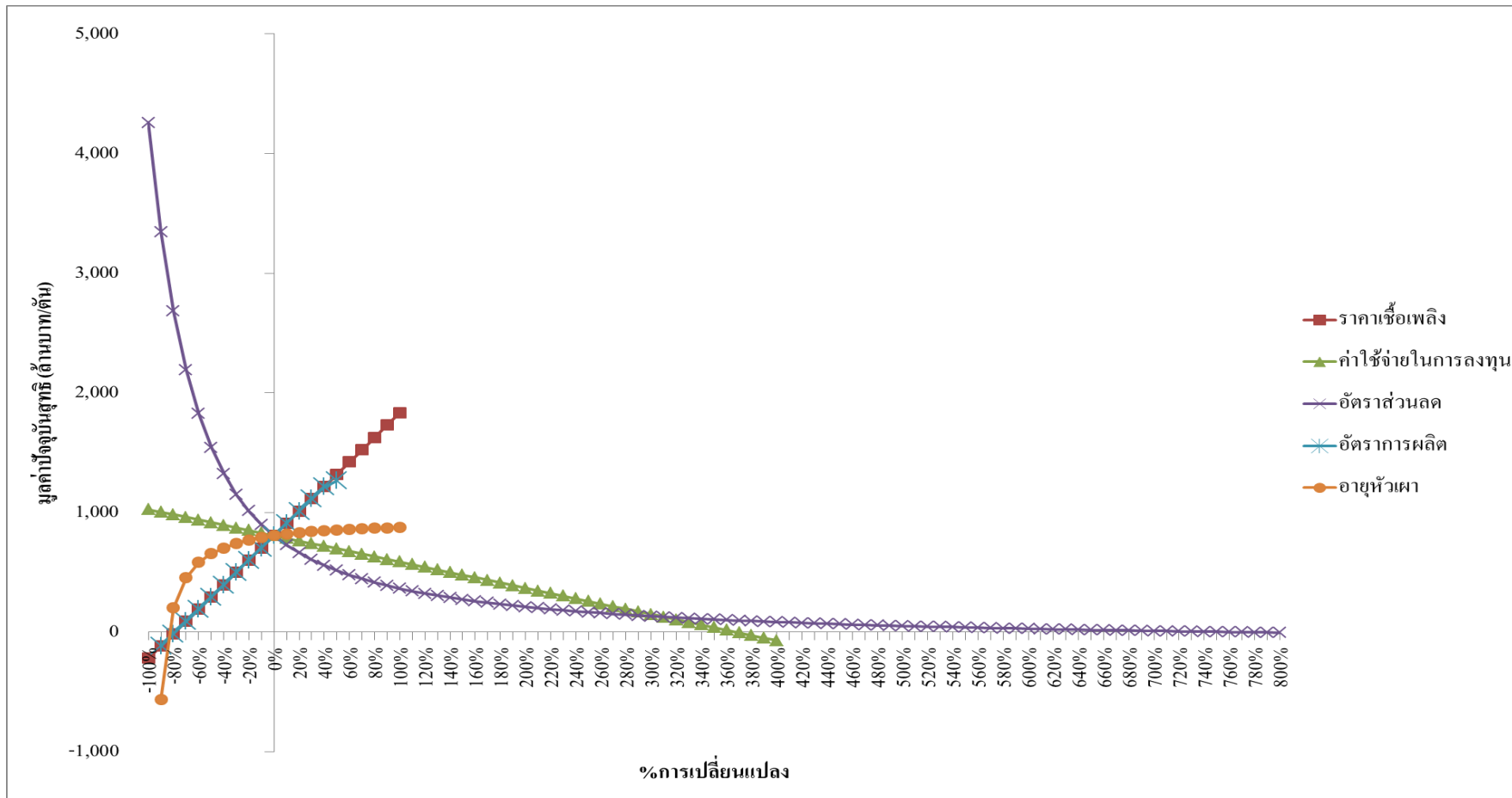
รูปที่ 5.1 การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาซื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลด อายุของหัวเผ่า และอัตราการผลิตของหัวเผ่ารีคัฟเปอร์เรทีฟ ขนาดเตา 40 ตัน/ชั่วโมง





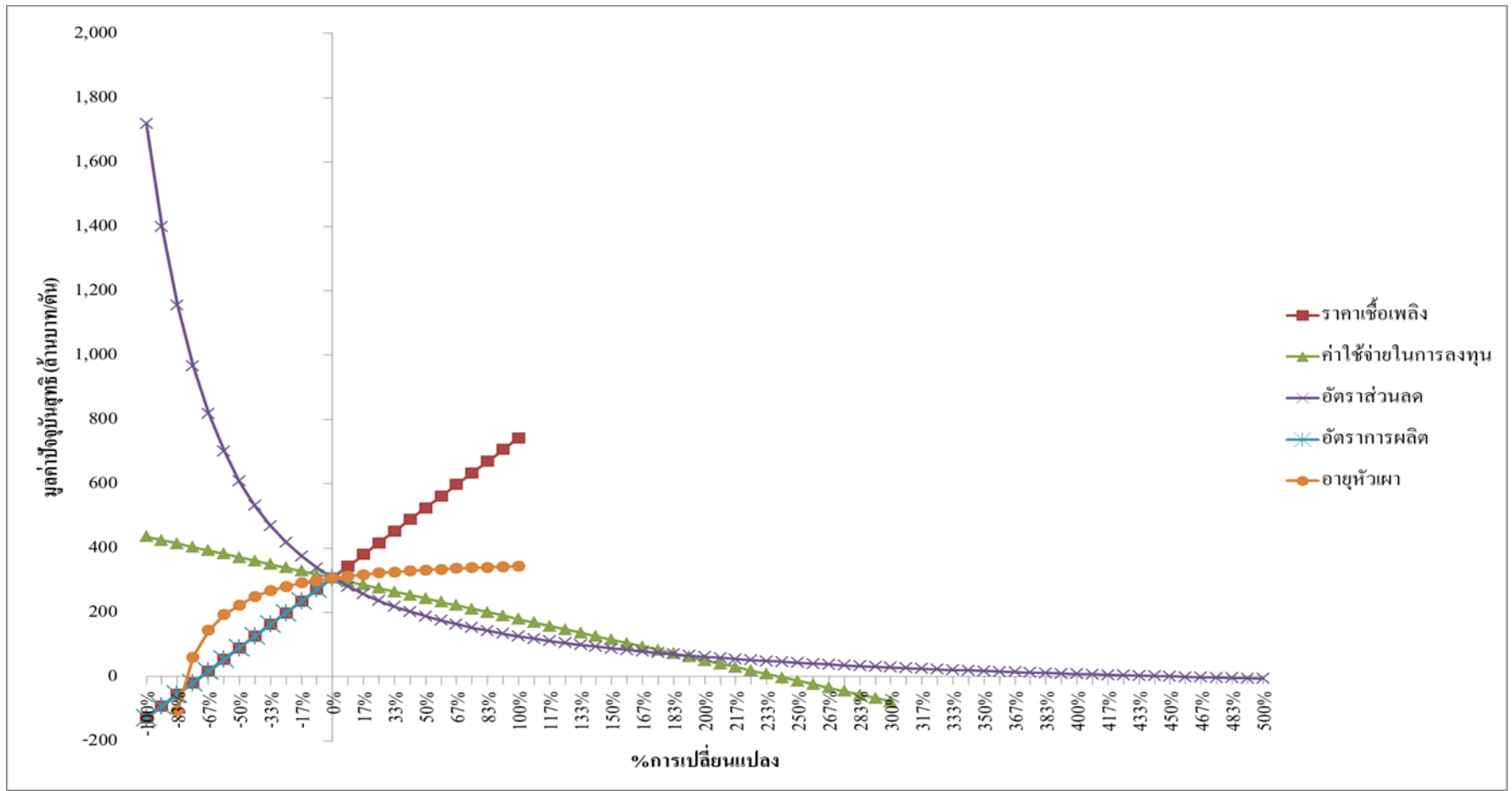
รูปที่ 5.2 การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลด อายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผารีกัฟเปอร์เรทีฟ

ขนาดเตา 70 ตัน/ชั่วโมง



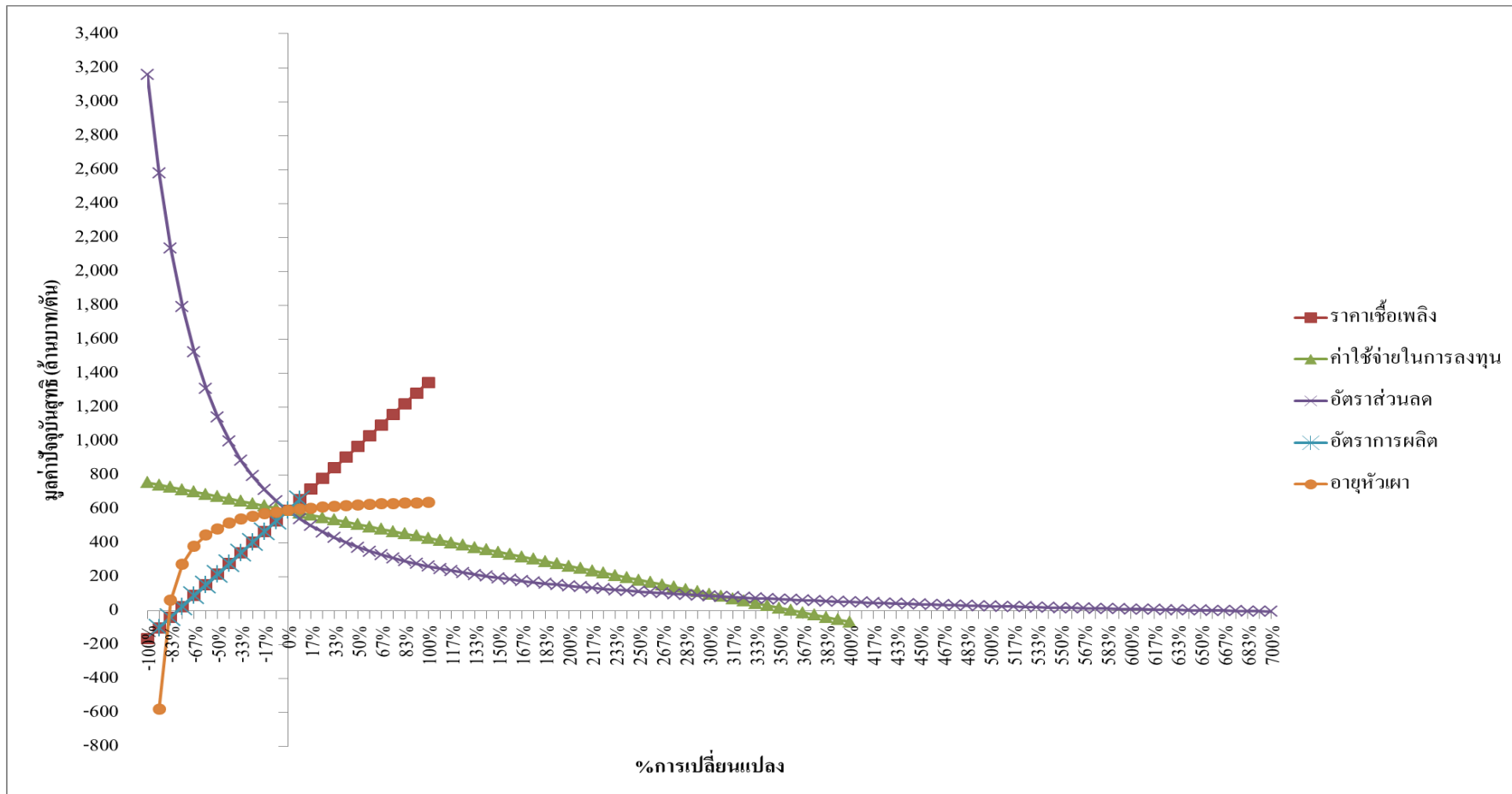
รูปที่ 5.3 การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลด อายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผารีกัฟเปอร์เรทีฟ

ขนาดเตา 150 ตัน/ชั่วโมง



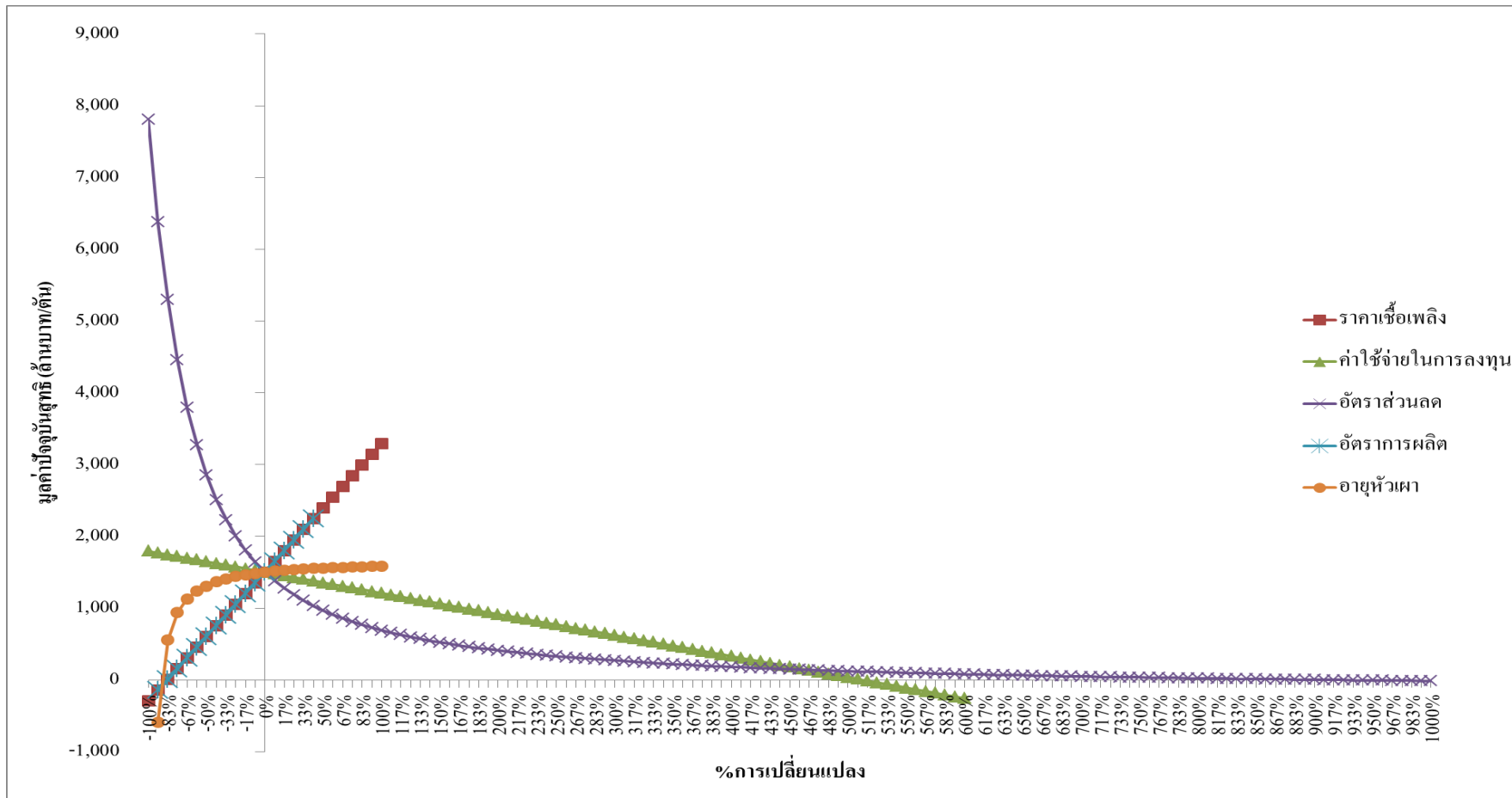
รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาซื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลด อายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผาไร้เงินเนอเรทีฟ

ขนาดเตา 40 ตัน/ชั่วโมง



รูปที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาซื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลด อายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผาเงินเนอเรทไฟ

ขนาดเตา 70 ตัน/ชั่วโมง



รูปที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงความไวของราคาเชื้อเพลิง ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลด อายุของหัวเผา และอัตราการผลิตของหัวเผาริเจนเนอร์ที่ฟ ขนาดเตา 150 ตัน/ชั่วโมง



ผลจากการวิเคราะห์ความไวของโครงการทั้ง 5 กรณีพบว่าในทุกกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของราคาเชื้อเพลิงอายุของหัวเผา ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลดและการประหยัดเชื้อเพลิงไม่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจที่ในการลงทุนโครงการเนื่องจากโดยส่วนใหญ่การวิเคราะห์ความไวของโครงการนั้นเป็นการวิเคราะห์ในเชิงลบหากเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางใดก็ตามแล้วส่งผลกระทบต่อมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการทำให้โครงการนั้นไม่น่าลงทุน

จากตารางที่ 5.4 ถึง 5.21 แสดงให้เห็นว่า ในกรณีการเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิงและอายุของหัวเผาที่มีค่าไปในทิศทางลบคือราคาเชื้อเพลิงถูกลง และอายุของหัวเผาที่สั้นลงนั้น ส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงการที่ไม่น่าลงทุนแทน จากการศึกษาข้อมูลย้อนหลังพบว่าในระยะเวลาดังกล่าวราคาเชื้อเพลิงก๊าซธรรมชาติมีแต่การเพิ่มขึ้นเท่านั้น ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะมีราคาลดลง และสำหรับกรณีอายุของหัวเผานั้น โดยทั่วไปแล้วมักมีแต่แนวโน้มในการพัฒนาให้อายุของหัวเผาใช้งานได้นานมากขึ้นกว่าเดิม การเปลี่ยนแปลงราคาเชื้อเพลิง และอายุหัวเผาจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจเลือกใช้หัวเผาเริเจนเนอร์ทีฟในทุกขนาดเตา

สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุน และอัตราส่วนลดนั้นมีค่าไปในทิศทางบวกคือการเพิ่มขึ้นของค่าใช้จ่ายในการลงทุน และอัตราส่วนลดนั้นมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโครงการที่ไม่น่าลงทุน โดยข้อมูลในอดีตพบว่าในระยะเวลาดังกล่าวมีการลดลงของค่าใช้จ่ายในการลงทุนซึ่งเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงการที่ไม่น่าลงทุน และอัตราส่วนลดที่ในช่วง 5 ปีที่ผ่านมาที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนลดอยู่ที่ประมาณร้อยละ 6-12 (ที่มา: ธนาคารแห่งประเทศไทย) ซึ่งเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงโครงการที่ทำให้โครงการไม่น่าลงทุนส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงค่าใช้จ่ายในการลงทุน และอัตราส่วนลดไม่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจเลือกใช้หัวเผาเริเจนเนอร์ทีฟในทุกขนาดเตา

และในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าการประหยัดพลังงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการอุ่นอากาศในหัวเผาเริคัพเปอร์เรทีฟ และการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิต โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการอุ่นอากาศในหัวเผาเริคัพเปอร์เรทีฟอาจส่งผลกระทบต่อตัดสินใจในการเลือกใช้หัวเผา หากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุณหภูมิในการอุ่นอากาศให้เพิ่มขึ้นได้ ต้นทุนรวมต่อหน่วยของหัวเผาเริคัพเปอร์เรทีฟจะมีค่าต่ำกว่าหัวเผาเริเจนเนอร์ทีฟเนื่องจากหัวเผาเริคัพเปอร์เรทีฟที่มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและราคาหัวเผาที่ถูกกว่าส่งผลให้การตัดสินใจในการเลือกใช้หัวเผาอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงจากหัวเผาเริเจนเนอร์ทีฟเป็นหัวเผาเริคัพเปอร์เรทีฟแทน แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่สามารถทำได้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเทคนิคของลักษณะทางกายภาพและอุปกรณ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการอุ่นอากาศในหัว

เผาเผาไรค์ฟเปอร์เรทีฟไม่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจเลือกใช้หัวเผาไรเจนเนอเรทีฟในทุกขนาดเตาและสำหรับการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตจะส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงาน เนื่องจากอัตราส่วนในการลดลงของเชื้อเพลิงที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลง โดยการลดลงของอัตราการผลิตส่งผลให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการมีค่าไม่น่าลงทุน จากผลการศึกษาข้อมูลพบว่าโดยส่วนใหญ่เตาแต่ละขนาดข้อกำหนดสำหรับการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตที่จำกัด กล่าวคือเตาเผาเหล็กสามารถผลิตได้มากที่สุดคือตามขนาดของเตาเผาเหล็ก และผลิตได้น้อยที่สุดคือลดลงได้ไม่เกินร้อยละ 50 ของกำลังการผลิตของเตาเผา เนื่องจากหากมีการลดลงของอัตราการผลิตที่มากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานในการผลิตที่มากเกินไปเป็นต้นทุนค่าใช้จ่ายรวมต่อตันเหล็กอาจมีค่ามากเพิ่มขึ้น จึงควรเปลี่ยนแปลงขนาดเตาเป็นขนาดอื่นแทน จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอัตราการผลิตเหล็กมีการลดลงเกินร้อยละ 50 ในทุกขนาดเตาดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตไม่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจเลือกใช้หัวเผาไรเจนเนอเรทีฟในทุกขนาดเตา



## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความคุ้มค่าสำหรับการเลือกใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงในเตาเผาเหล็กสำหรับอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้าโดยมีการเก็บข้อมูลค่าพลังงานจากโรงงานผลิตเหล็กที่ใช้เตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) ชนิด Walking beam จำนวน 3 โรงงานได้แก่โรงงานที่มีกำลังการผลิต 40 ตัน/ชั่วโมง 70 ตัน/ชั่วโมง และ 150ตัน/ชั่วโมง โดยมีการใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการวิจัยคือวิเคราะห์และเปรียบเทียบการใช้พลังงานของหัวเผาประสิทธิภาพสูงชนิดรีเจนเนอเรทีฟและรีคัพเปอร์เรทีฟ โดยสามารถเลือกเลือกอุณหภูมิในการอุ่นอากาศของหัวเผาประสิทธิภาพสูงให้มีความเหมาะสมกับขนาดของเตาเผาเหล็ก

โดยการศึกษาความคุ้มค่าสำหรับการเลือกใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงในเตาเผาเหล็กประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ การศึกษาทางด้านพลังงาน จะเป็นการวิเคราะห์การใช้พลังงานในหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟและหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่แตกต่างกัน และในส่วนของ การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ จะเป็นการวิเคราะห์ความคุ้มค่าในการลงทุนของโครงการหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟและโครงการหัวเผารีเจนเนอเรทีฟในเตาเผาเหล็กขนาดต่างๆ โดยใช้ดัชนีชี้วัดคือมูลค่าปัจจุบันสุทธิ และระยะเวลาคืนทุน ซึ่งผลจากการศึกษาและวิจัยสามารถสรุปได้ดังหัวข้อดังต่อไปนี้

##### 6.1.1 การวิเคราะห์การใช้พลังงานในหัวเผาประสิทธิภาพสูง

จากผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กพบว่าที่เตาเผาเหล็กขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง จะทราบว่าพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็กคือ 75,174 MJ/hr ซึ่งคิดเป็น 100% โดยมีความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เท่ากับ 66,412MJ/hr คิดเป็น 88.34% และความร้อนสัมผัสของอากาศ เท่ากับ 8,763 MJ/hr คิดเป็น 11.66% และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเหล็กเท่ากับ 50.03%ที่เตาเผาเหล็กขนาด 70 ตัน/ชั่วโมงพบว่าพลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็กคือ 100,466 MJ/hr ซึ่งคิดเป็น 100%โดยมีความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เท่ากับ 85,273MJ/hr คิดเป็น 84.88% และความร้อนสัมผัสของอากาศเท่ากับ 15,193 MJ/hr คิดเป็น 15.12% และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเหล็กเท่ากับ 55.60% และเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมงความร้อนที่เข้าสู่เตาเผา

เหล็กคือ 190,517 MJ/hr ซึ่งคิดเป็น 100% โดยมีความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เท่ากับ 154,395MJ/hr คิดเป็น 81.04% และความร้อนสัมผัสของอากาศเท่ากับ 36,123 MJ/hr คิดเป็น 18.96% และมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาเหล็กเท่ากับ 53.653% MJ/hr

เมื่อทราบค่าปริมาณการใช้พลังงานในเตาแต่ละขนาดจากการคำนวณสมดุลพลังงานแล้ว ส่งผลให้สามารถคำนวณหาค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงในหัวเผาประสิทธิภาพสูงได้เช่นเดียวกัน โดยอัตราการใช้เชื้อเพลิงของหัวเผาประสิทธิภาพสูงทั้งสองชนิดจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอุ่นอากาศ จากผลการคำนวณพบว่าที่การอุ่นอากาศในอุณหภูมิที่สูงจะให้ค่าประหยัดพลังงานที่ดีกว่า ทำให้อัตราการใช้เชื้อเพลิงในการผลิตมีค่าลดลง ดังนั้นการเลือกอุณหภูมิในการอุ่นอากาศของหัวเผาประสิทธิภาพสูงจะพิจารณาจากประหยัดพลังงานและอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่ให้ค่าต่ำที่สุด

#### 6.1.2 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์โครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนของโครงการหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ และโครงการหัวเผารีเจนเนอเรทีฟในเตาเผาเหล็กขนาดต่างๆ ได้แบ่งองค์ประกอบค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ประเภท คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ส่วนผลประโยชน์ของโครงการได้มาจากผลประโยชน์ที่ได้รับจากการประหยัดพลังงานต่อสุทธิปี ซึ่งสามารถนำไปคำนวณตัวชี้วัดต่างๆ เพื่อช่วยในการตัดสินใจในการลงทุน โดยในการเลือกใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงแต่ละชนิดในเตาเผาแต่ละขนาดพิจารณาจากโครงการที่ให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิมากที่สุดเป็นโครงการที่เหมาะสมแก่การลงทุน มีอัตราส่วนลดร้อยละ 8 ต่อปีและอายุโครงการเท่ากับ 60 ปี จากผลการศึกษาพบว่าเตาเผาเหล็กทุกขนาดมีการใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศที่ 1000°C โดยขนาดเตา 40 ตันต่อชั่วโมงให้ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 307,245,055.16 บาทและระยะเวลาคืนทุน 2.22 ปีตามลำดับ ขนาดเตา 70 ตันต่อชั่วโมงมีค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 590,655,143.34 บาทและระยะเวลาคืนทุน 1.64 ปี และขนาดเตา 150 ตันต่อชั่วโมงโดยให้ค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 1,501,670,888.39 บาทและระยะเวลาคืนทุน 1.23 ปี

จากข้อมูลดังกล่าวเมื่อวิเคราะห์การลงทุนและผลประโยชน์ที่ได้รับ แสดงให้เห็นว่าโครงการที่มีความคุ้มค่าโดยส่วนใหญ่เกิดจากการใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟ เนื่องจากสามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่าหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ แม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของการลงทุนที่มากกว่าหัวเผาแบบรีคัพเปอร์เรทีฟแต่ก็ไม่ส่งผลกระทบต่อผลประโยชน์สุทธิที่ได้รับ และโรงงานที่มีเตาขนาดใหญ่และมีกำลังการผลิตมากนั้นค่าสัดส่วนในการประหยัดพลังงานย่อมมีมากกว่าโรงงานที่มีเตาขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อวิเคราะห์การลงทุนกับผลประโยชน์ที่ได้รับพบว่าการใช้หัวเผารีเจนเนอเรทีฟในเตาเผาขนาดใหญ่มีมูลค่าปัจจุบันสุทธิสูงกว่าเตาเผาขนาดเล็ก

การวิเคราะห์ความไวของโครงการทั้ง 5 กรณีพบว่าทุกกรณีไม่ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของราคาเชื้อเพลิง อายุของหัวเผา ค่าใช้จ่ายในการลงทุน อัตราส่วนลดและการประหยัดเชื้อเพลิง จะไม่ส่งผลกระทบต่อการตัดสินใจที่ในการลงทุนโครงการสำหรับการเลือกใช้หัวเผาจีเจนเนอเรทีฟในทุกขนาดเตา

### 6.1.3 ผลจากการประหยัดพลังงาน

จากผลการการวิเคราะห์โครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์สามารถสรุปได้ว่าควรเลือกใช้หัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ  $1000^{\circ}\text{C}$  สำหรับทุกขนาดเตา โดยมีผลการประหยัดพลังงานดังนี้

เตาเผาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ  $1000^{\circ}\text{C}$  สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 120,422.39 MMBTU/ปี คิดเป็น 34.85% และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาได้เท่ากับ 76.80%

เตาเผาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ  $1000^{\circ}\text{C}$  สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 208,811.77 MMBTU/ปี คิดเป็น 47.06% และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาได้เท่ากับ 105.02%

เตาเผาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิในการอุ่นอากาศ  $1000^{\circ}\text{C}$  สามารถประหยัดเชื้อเพลิงได้ 496,472.55 MMBTU/ปี คิดเป็น 61.80% และเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาได้เท่ากับ 140.47%

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟมีความเหมาะสมกับอุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้ามากกว่าหัวเผารีคัพเปอร์เรทีฟ เนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการผลิตมาก เมื่อเลือกใช้ใช้งานหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟส่งผลให้มีอัตราการประหยัดพลังงานสูง ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าหัวเผาแบบจีเจนเนอเรทีฟเหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการผลิตมาก เช่น อุตสาหกรรมผลิตโลหะ เป็นต้น ส่วนหัวเผาแบบรีคัพเปอร์เรทีฟเหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรมที่มีปริมาณการผลิตน้อย เช่น อุตสาหกรรมผลิตอะลูมิเนียม อุตสาหกรรมผลิตเซรามิก อุตสาหกรรมผลิตแก้ว เป็นต้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับผู้ประกอบการที่ใช้เตาเผาเหล็กชนิด Walking beam และมีความสนใจในการขอรับเงินสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการจัดการด้านการใช้พลังงาน โดยวิธีประกวดราคา (DSM bidding) ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานสามารถนำข้อมูลจากงานวิจัยนี้ไปเขียนในส่วนของรายละเอียดได้ เช่น ข้อมูลพลังงานที่เกิดจากการใช้พลังงานของหัวเผาโรเทนเนอเรทีฟและหัวเผาริฟเปอร์เรทีฟในการอุ่นอากาศในช่วงอุณหภูมิต่างๆ สามารถนำมาประกอบการเลือกใช้หัวเผาให้เหมาะสมกับขนาดเตาโรงงานของตนเองได้ อีกทั้งข้อมูลทางการเงิน เช่น ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ สามารถนำมาเขียนประกอบเป็นแผนงานเพื่อขอประกวดราคาได้

2. งานวิจัยครั้งนี้ไม่ได้มีการติดตั้งการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงในโรงงานจริง ดังนั้นข้อมูลการใช้พลังงานและอัตราเชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงที่ได้จากการคำนวณจะต้องทำการทวนสอบจากผู้เชี่ยวชาญก่อนนำไปใช้หากมีการนำไปติดตั้งจริงอาจมีการคลาดเคลื่อนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแต่ละโรงงานด้วย

3. เตาเผาที่จะนำมาพิจารณาติดตั้งหัวเผาประสิทธิภาพสูงควรเป็นเตาเผาที่ได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพเบื้องต้นมาก่อน โดยการลดการสูญเสียความร้อนในส่วนต่างๆ เช่น ผ่านผนังเตาโดยการฉนวน เป็นต้น เพื่อให้ประสิทธิภาพของหัวเผาเมื่อมีการใช้งานในการอุ่นอากาศที่อุณหภูมิต่างๆเป็นไปตามที่ต้องการ

4. งานวิจัยครั้งนี้ศึกษาเฉพาะ โรงงานผลิตเหล็กที่มีการใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติ หากโรงงานที่มีการใช้เชื้อเพลิงชนิดอื่นสนใจในการลงทุน ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอาจมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีบำรุงรักษาที่แตกต่างกัน

5. งานวิจัยครั้งนี้มีการกำหนดอายุของหัวเผาริฟเปอร์เรทีฟที่ 10 ปีและหัวเผาโรเทนเนอเรทีฟที่ 12 ปีสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าหากมีการเปลี่ยนแปลงการใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมผลิตอะลูมิเนียม อุตสาหกรรมผลิตเซรามิค อุตสาหกรรมผลิตแก้ว เป็นต้น อายุของหัวเผาประสิทธิภาพสูงอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงเนื่องจากลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันในแต่ละอุตสาหกรรม

## รายการอ้างอิง

- [1] คณิต มานะธุระ. การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กที่ใช้หัวเผาโรเจนเนอเรทีฟร่วมกับรีคูเพอเรเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [2] โรงงานอุตสาหกรรม,กรม. กระบวนการต่อเนื่องในการผลิตเหล็ก, [ออนไลน์] แหล่งที่มา [http://www2.diw.go.th/I\\_Standard/Web/pane\\_files/Industry24.asp](http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry24.asp)
- [3] Charles, E. and Baukal, Jr. Industrial burner handbook, ISBN 0-8493-1386-4, CRC PRESS, 2004.
- [4] พงษ์ธร จริญญากรณ์. ลดการใช้พลังงาน ตัดค่าใช้จ่ายด้วย Regenerative Burner (1). วารสารเทคนิคเครื่องกล ไฟฟ้า อุตสาหกรรม 26, 299(มีนาคม 2553): หน้า 97-101
- [5] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,กรม. เทคนิคการนำความร้อนทิ้งจากก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงกลับมาใช้ใหม่. 10. กรุงเทพมหานคร: สำนักพัฒนาทรัพยากรบุคคลด้านพลังงาน.
- [6] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,กรม. โครงการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจ. ข้อมูลเทคโนโลยีเชิงลึกหัวเผาแบบโรเจนเนอเรทีฟ, หน้า 1-7.
- [7] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,กรม. โครงการพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในภาคอุตสาหกรรมและธุรกิจ. ข้อมูลเทคโนโลยีเชิงลึกหัวเผาแบบเซลล์ฟิวรีลไฟเบอร์เรทีฟ, หน้า 1-6.
- [8] Chen W.H., Chung Y.C. and Liu J. L., Analysis on Energy Consumption and Performance of Reheating Furnaces in a Hot Strip Mill, International Communications in Heat and Mass Transfer, 32, 5(2005) : 695-706.
- [9] Wuening J.G., Regenerative Burners for Heat Treating Furnace, 8<sup>th</sup> European Conference on Industrial Furnace and boilers. 25-28 March 2008, Vilamoura, Portugal, 2008.
- [10] Mitra Kami Delivand, Mirko Barz, Shabbir H. Gheewala and Boonrod Sajjakulnukit. Economic feasibility assessment of rice straw utilization for electricity generating through combustion in Thailand. Applied Energy 88 (2011): 3651-3658.

- [11] Zhang. Y, Dube. M.A, D.D. McLean and M.Kates. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. Bioresource Technology 90 (December 2003): 229–240.
- [12] อมรรัตน์ แก้วประดับ และพิชัย นามประกาย. การศึกษาค่าดัชนีการใช้พลังงานจำเพาะในอุตสาหกรรมประเภทโลหะ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย 1, (พฤษภาคม 2548) : 293-298.
- [13] ประทีป ช่วยเกิด และวิทยา ขงเจริญ. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ต่อการตัดสินใจเลือกใช้รถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่ใช้น้ำมันแก๊สโซฮอล์ E-20 และ E-85 เป็นเชื้อเพลิงในเขตกรุงเทพมหานคร. วารสารวิจัยพลังงาน 7 (2553): 55-65.
- [14] ประรณนา ประรณนาดี และศิริวารณ เสดะจิตติ. การศึกษาความเป็นไปได้ทางการเงินของการลงทุน. ใน โครงการกลไกพัฒนาที่สะอาด ณ. สวนอุตสาหกรรมอาหาร เครือเบทาโก แห่งที่ 2, หน้า 157-174: ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552.
- [15] นคร ทิพย์วงศ์ และวสันต์ จอมภักดี. การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการสกัดน้ำมันพืชเชิงกลสำหรับใช้ในชุมชนท้องถิ่น. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร 11 (กันยายน - ธันวาคม 2546) : 9-20.
- [16] ธนิต มหิทรนันท์. การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งเครื่องทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์เพื่ออุ่นน้ำก่อนเข้าหม้อไอน้ำ กรณีศึกษา โรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาพลังงานทดแทน คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2553.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด



## 1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

### 1) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared Thermometer)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ยี่ห้อ CHAUVIN ARNOUX รุ่น C.A 876 ชนิด k มีช่วงอุณหภูมิการวัดตั้งแต่ 0 ถึง 1,350 °C ความละเอียดที่ความละเอียดในการแสดงผลอุณหภูมิ 0.1 °C ระดับความเที่ยงตรง  $\pm 0.5$  °C อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรดจะสามารถวัดค่าอุณหภูมิโดยไม่ต้องมีการสัมผัสระหว่างตัวเครื่องมือและวัตถุที่จะทำการวัดอุณหภูมิ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรดจะถูกชี้ไปที่พื้นผิวและสามารถอ่านค่าได้ทันที เครื่องมือนี้มีประโยชน์มากในวัตถุที่ร้อนภายในเตา และพื้นที่ผิวที่ใช้อุณหภูมิ เป็นต้น หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรด คือวัตถุทั้งหมดจะปล่อยพลังงานอินฟราเรด ไปกระทบกับวัตถุที่มีความร้อน โดยวัตถุที่มีความร้อนจะมีโมเลกุลเคลื่อนตัวมากและจะมีการปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรดจะมีเซนส์ซึ่งเป็นจุดรวมพลังงานอินฟราเรดจากวัตถุเข้าไปสู่เครื่องตรวจจับ ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานนี้ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และจะถูกขยายขนาดแล้วแสดงผลเป็นหน่วยของอุณหภูมิ โดยผลการตรวจวัดจะแสดงผลบริเวณหน้าจอแสดงผล



รูปที่ ก.1 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรด (Infrared Thermometer)

### ข้อควรระวังด้านความปลอดภัย

- หัวแหงจะต้องจมองไปในของไหล และต้องเริ่มวัดค่าหลังจากนั้นประมาณ 1-2 นาที คือหลังจากที่อ่านค่ามีความสม่ำเสมอแล้ว
- ก่อนใช้ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิไอเสีย จะต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของช่วงอุณหภูมิของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิไอเสียที่เลือกมาก่อน

- ไม่ควรให้หัวเหยงของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิไอเสียถูกไฟลน

## ภาคผนวก ข

รายละเอียดการเก็บข้อมูลโดยตรงจากโรงงาน

**ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา**

ขนาดพิกัดทำงานของเตา 40ตัน/ชั่วโมง  
 - วัตถุประสงค์ เหลือกแห้ง (billet)

**ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง**

- ชนิดเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ

**รายละเอียดการทำงาน**

- อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (Reheat) 1,250 องศาเซลเซียส  
 - อัตราการผลิตจริง 12 ตัน/ชั่วโมง  
 - ชั่วโมงการทำงานจริง 11 ชั่วโมง/วัน (จันทร์ – ศุกร์)  
 24 ชั่วโมง/วัน(เสาร์,อาทิตย์,หยุดนักขัตฤกษ์)  
 - วันทำงานจริง 232 วัน/ปี (จันทร์ – ศุกร์)  
 120 วัน/ปี(เสาร์, อาทิตย์,หยุดนักขัตฤกษ์)  
 - ชั่วโมงการทำงานจริง 5,432 ชั่วโมง/ปี

**ลักษณะการทำงาน**

สามารถแบ่งช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วงได้แก่

- ช่วงทำงานปกติ วันธรรมดา(จันทร์ – ศุกร์)22.00 -10.00 น.  
 วันเสาร์-อาทิตย์ และหยุดนักขัตฤกษ์ 00.00 -24.00 น.  
 -ช่วงหยุดเตา วันธรรมดา(จันทร์ – ศุกร์)10.00-22.00 น.

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 40 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด: 7 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. ข้อมูลการผลิต

เวลา	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา		การผลิต (ตัน/ชั่วโมง)
	แท่ง	จำนวนกิโลกรัม/แท่ง	
09.00	95	400	38
10.00	98	400	39.2
11.00	98	400	39.2
12.00	100	400	40
13.00	100	400	40
14.00	100	400	40
15.00	100	400	40
16.00	100	400	40
เฉลี่ย			39.55

2. ข้อมูลเชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง.....ก๊าซธรรมชาติ.....

อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าหัวเผา.....35 °C.....

เวลา	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Nm <sup>3</sup> /hr)
09.00	2,500.56
10.00	2,510.31
11.00	2,510.31
12.00	2,532.42
13.00	2,532.42
14.00	2,528.42
15.00	2,532.42
16.00	2,530.42
เฉลี่ย	2,522.16

3. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้  
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....35 °C.....

เวลา	อัตราการไหลของ อากาศ (m <sup>3</sup> /s)
09.00	6.87
10.00	6.90
11.00	6.29
12.00	7.59
13.00	6.87
14.00	7.90
15.00	7.85
16.00	6.50
เฉลี่ย	7.10

4. ข้อมูลของไอเสีย  
อุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจากปล่องไอเสีย

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของไอเสียออกจากเตา (°C)
09.00	1,099
10.00	1,124
11.00	1,132
12.00	1,152
13.00	1,169
14.00	1,170
15.00	1,172
16.00	1,180
เฉลี่ย	1,149.75

## อุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศ ไอเสียออกจาก recuperator (°C)
09.00	290
10.00	294
11.00	294
12.00	298
13.00	298
14.00	300
15.00	308
16.00	308
เฉลี่ย	298.75

## อุณหภูมิของอากาศไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศไอ เสียก่อนเข้า recuperator (°C)
09.00	705
10.00	712
11.00	718
12.00	723
13.00	725
14.00	725
15.00	725
16.00	728
เฉลี่ย	720.13

## 5. ข้อมูลช่องเปิด

ขนาดช่องเปิด.....18 x 19.56 cm.....



ขนาดเตาเผาเหล็ก : 40 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 8 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. ข้อมูลการผลิต

เวลา	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา		การผลิต (ตัน/ชั่วโมง)
	แท่ง	จำนวนกิโลกรัม/แท่ง	
09.00	100	400	40
10.00	100	400	40
11.00	100	400	40
12.00	100	400	40
13.00	100	400	40
14.00	100	400	40
15.00	100	400	40
16.00	100	400	40
เฉลี่ย			40

2. ข้อมูลเชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง.....ก๊าซธรรมชาติ.....

อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าหัวเผา.....35 °C.....

เวลา	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Nm <sup>3</sup> /hr)
09.00	2,534.49
10.00	2,531.02
11.00	2,517.15
12.00	2,525.62
13.00	2,515.42
14.00	2,529.34
15.00	2,525.11
16.00	2,500.05
เฉลี่ย	2,522.28

3. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้  
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....35 °C.....

เวลา	อัตราการไหลของ อากาศ (m <sup>3</sup> /s)
09.00	6.58
10.00	6.17
11.00	7.22
12.00	7.68
13.00	6.06
14.00	7.58
15.00	7.94
16.00	6.81
เฉลี่ย	7.01

4. ข้อมูลของไอเสีย  
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากปล่องไอเสีย

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของไอเสีย ที่ออกจากเตาเผา (°C)
09.00	1,122
10.00	1,125
11.00	1,132
12.00	1,152
13.00	1,155
14.00	1,165
15.00	1,172
16.00	1,185
เฉลี่ย	1,151

อุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศ ไอเสียออกจาก recuperator (°C)
09.00	279
10.00	288
11.00	305
12.00	311
13.00	301
14.00	307
15.00	308
16.00	312
เฉลี่ย	301.38

อุณหภูมิของอากาศไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศไอ เสียก่อนเข้า recuperator (°C)
09.00	705
10.00	708
11.00	708
12.00	718
13.00	723
14.00	729
15.00	729
16.00	735
เฉลี่ย	719.38

**ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา**

ขนาดพิกัดทำงานของเตา 70ตัน/ชั่วโมง  
 - วัสดุคืบ เหล็กแท่ง (billet)

**ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง**

- ชนิดเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ

**รายละเอียดการทำงาน**

- อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (Reheat) 1,250 องศาเซลเซียส  
 - อัตราการผลิตจริง 12 ตัน/ชั่วโมง  
 - ชั่วโมงการทำงานจริง 11 ชั่วโมง/วัน (จันทร์ – ศุกร์)  
 24 ชั่วโมง/วัน(เสาร์,อาทิตย์,หยุดนักขัตฤกษ์)  
 - วันทำงานจริง 232 วัน/ปี (จันทร์ – ศุกร์)  
 120 วัน/ปี(เสาร์, อาทิตย์,หยุดนักขัตฤกษ์)  
 - ชั่วโมงการทำงานจริง 5,432 ชั่วโมง/ปี

**ลักษณะการทำงาน**

สามารถแบ่งช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วงได้แก่

- ช่วงทำงานปกติ วันธรรมดา(จันทร์ – ศุกร์)22.00 -10.00 น.  
 วันเสาร์-อาทิตย์ และหยุดนักขัตฤกษ์ 00.00 -24.00 น.  
 -ช่วงหยุดเตา วันธรรมดา(จันทร์ – ศุกร์)10.00-22.00 น.

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 70 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 14 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. ข้อมูลการผลิต

เวลา	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา		การผลิต (ตัน/ชั่วโมง)
	แท่ง	จำนวนกิโลกรัม/แท่ง	
09.00	65	928.58	60.36
10.00	65	928.58	60.36
11.00	69	928.58	64.07
12.00	69	928.58	64.07
13.00	71	928.58	65.93
14.00	72	928.58	66.86
15.00	72	928.58	66.86
16.00	75	928.58	69.64
เฉลี่ย			64.77

2. ข้อมูลเชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง.....ก๊าซธรรมชาติ.....

อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าหัวเผา.....35 °C.....

เวลา	อัตราการใช้เชื้อเพลิง(Nm <sup>3</sup> /hr)
09.00	3,221.45
10.00	3,225.39
11.00	3,235.92
12.00	3,240.63
13.00	3,242.43
14.00	3,245.14
15.00	3,244.73
16.00	3,239.99
เฉลี่ย	3,236.96

3. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้  
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....35 °C.....

เวลา	อัตราการไหลของ อากาศ (m <sup>3</sup> /s)
09.00	12.11
10.00	12.35
11.00	10.58
12.00	12.48
13.00	10.19
14.00	12.33
15.00	11.64
16.00	13.32
เฉลี่ย	11.88

4. ข้อมูลของไอเสีย  
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากปล่องไอเสีย

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของไอเสีย ที่ออกจากเตาเผา (°C)
09.00	1,055
10.00	1,062
11.00	1,073
12.00	1,092
13.00	1,080
14.00	1,080
15.00	1,024
16.00	1,150
เฉลี่ย	1,077

อุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศ ไอเสียออกจาก recuperator (°C)
09.00	279.25
10.00	288.11
11.00	305.94
12.00	311.53
13.00	301.87
14.00	307.08
15.00	308.25
16.00	310.01
เฉลี่ย	301.51

อุณหภูมิของอากาศไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศ ไอเสียก่อนเข้า recuperator (°C)
09.00	718
10.00	720
11.00	722
12.00	718
13.00	715
14.00	720
15.00	719
16.00	718
เฉลี่ย	718.75

## 5. ข้อมูลช่องเปิด

ขนาดช่องเปิด.....20 x 20.75cm.....



ขนาดเตาเผาเหล็ก : 70 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 15 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. ข้อมูลการผลิต

เวลา	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา		การผลิต (ตัน/ชั่วโมง)
	แท่ง	จำนวนกิโลกรัม/แท่ง	
09.00	65	928.58	60.36
10.00	65	928.58	60.36
11.00	71	928.58	65.93
12.00	71	928.58	65.93
13.00	71	928.58	65.93
14.00	72	928.58	66.86
15.00	72	928.58	66.86
16.00	75	928.58	69.64
เฉลี่ย			65.23

2. ข้อมูลเชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง.....ก๊าซธรรมชาติ.....

อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าหัวเผา.....35 °C.....

เวลา	อัตราการใช้เชื้อเพลิง(Nm <sup>3</sup> /hr)
09.00	3,230.51
10.00	3,232.39
11.00	3,235.92
12.00	3,242.01
13.00	3,245.61
14.00	3,249.47
15.00	3,245.85
16.00	3,240.63
เฉลี่ย	3,240.30

3. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้  
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....35 °C.....

เวลา	อัตราการไหลของ อากาศ (m <sup>3</sup> /s)
09.00	12.33
10.00	12.67
11.00	12.92
12.00	13.82
13.00	11.48
14.00	12.35
15.00	12.11
16.00	13.03
เฉลี่ย	12.59

4. ข้อมูลของไอเสีย  
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากปล่องไอเสีย

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของไอเสีย ที่ออกจากเตาเผา (°C)
09.00	1,065
10.00	1,083
11.00	1,080
12.00	1,080
13.00	1,085
14.00	1,080
15.00	1,095
16.00	1,100
เฉลี่ย	1,083.50

## อุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศ ไอเสียออกจาก recuperator (°C)
09.00	280.63
10.00	290.66
11.00	295.78
12.00	308.21
13.00	300.63
14.00	304.73
15.00	305.55
16.00	309.10
เฉลี่ย	299.41

## อุณหภูมิของอากาศไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศไอ เสียก่อนเข้า recuperator (°C)
09.00	715
10.00	718
11.00	720
12.00	720
13.00	721
14.00	715
15.00	715
16.00	720
เฉลี่ย	718

**ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผา**

ขนาดพิกัดทำงานของเตา 150ตัน/ชั่วโมง  
 - วัตถุประสงค์ เหลือกแห้ง (billet)

**ข้อมูลการใช้เชื้อเพลิง**

- ชนิดเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ

**รายละเอียดการทำงาน**

- อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (Reheat) 1,250 องศาเซลเซียส  
 - อัตราการผลิตจริง 12 ตัน/ชั่วโมง  
 - ชั่วโมงการทำงานจริง 11 ชั่วโมง/วัน (จันทร์ – ศุกร์)  
 24 ชั่วโมง/วัน(เสาร์,อาทิตย์,หยุดนักขัตฤกษ์)  
 - วันทำงานจริง 232 วัน/ปี (จันทร์ – ศุกร์)  
 120 วัน/ปี(เสาร์, อาทิตย์,หยุดนักขัตฤกษ์)  
 - ชั่วโมงการทำงานจริง 5,432 ชั่วโมง/ปี

**ลักษณะการทำงาน**

สามารถแบ่งช่วงการทำงานเป็น 3 ช่วงได้แก่

- ช่วงทำงานปกติ วันธรรมดา(จันทร์ – ศุกร์)22.00 -10.00 น.  
 วันเสาร์-อาทิตย์ และหยุดนักขัตฤกษ์ 00.00 -24.00 น.  
 -ช่วงหยุดเตา วันธรรมดา(จันทร์ – ศุกร์)10.00-22.00 น.

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 150 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 21 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. ข้อมูลการผลิต

เวลา	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา		การผลิต (ตัน/ชั่วโมง)
	แท่ง	จำนวนกิโลกรัม/แท่ง	
09.00	54	1749.5	94.47
10.00	55	1749.5	96.22
11.00	59	1749.5	103.22
12.00	60	1749.5	104.97
13.00	60	1749.5	104.97
14.00	62	1749.5	108.47
15.00	62	1749.5	108.47
16.00	62	1749.5	108.47
เฉลี่ย			103.66

2. ข้อมูลเชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง.....ก๊าซธรรมชาติ.....

อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าหัวเผา.....35 °C.....

เวลา	อัตราการใช้เชื้อเพลิง(Nm <sup>3</sup> /hr)
09.00	5850.42
10.00	5864.27
11.00	5869.58
12.00	5871.51
13.00	5875.41
14.00	5877.86
15.00	5857.45
16.00	5860.56
เฉลี่ย	5865.88

3. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้  
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....35 °C.....

เวลา	อัตราการไหลของ อากาศ (m <sup>3</sup> /s)
09.00	20.02
10.00	28.38
11.00	22.64
12.00	28.16
13.00	24.22
14.00	29.57
15.00	35.10
16.00	30.25
เฉลี่ย	27.29

4. ข้อมูลของไอเสีย  
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากปล่องไอเสีย

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของไอเสีย ที่ออกจากเตาเผา (°C)
09.00	1,200
10.00	1,198
11.00	1,200
12.00	1,172
13.00	1,188
14.00	1,191
15.00	1,200
16.00	1,220
เฉลี่ย	1,196.13

อุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจาก recuperator (°C)
09.00	265.81
10.00	268.64
11.00	278.14
12.00	305.39
13.00	309.58
14.00	317.72
15.00	316.31
16.00	315.26
เฉลี่ย	297.11

อุณหภูมิของอากาศไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศไอเสียก่อนเข้า recuperator (°C)
09.00	872
10.00	821
11.00	874
12.00	865
13.00	871
14.00	861
15.00	859
16.00	863
เฉลี่ย	860.75

## 5. ข้อมูลช่องเปิด

ขนาดช่องเปิด.....62.5 x 73.6cm.....



ขนาดเตาเผาเหล็ก : 150 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 22 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. ข้อมูลการผลิต

เวลา	จำนวนเหล็กที่ป้อนเข้าเตา		การผลิต (ตัน/ชั่วโมง)
	แท่ง	จำนวนกิโลกรัม/แท่ง	
09.00	56	1749.5	97.97
10.00	56	1749.5	97.97
11.00	57	1749.5	99.72
12.00	58	1749.5	101.47
13.00	60	1749.5	104.97
14.00	62	1749.5	108.47
15.00	62	1749.5	108.47
16.00	62	1749.5	108.47
เฉลี่ย			103.44

2. ข้อมูลเชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง.....ก๊าซธรรมชาติ.....

อุณหภูมิเชื้อเพลิงก่อนเข้าหัวเผา.....35 °C.....

เวลา	อัตราการใช้เชื้อเพลิง (Nm <sup>3</sup> /hr)
09.00	5852.71
10.00	5855.45
11.00	5859.81
12.00	5866.55
13.00	5875.29
14.00	5865.56
15.00	5861.63
16.00	5856.86
เฉลี่ย	5861.73

3. ข้อมูลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้  
อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....35 °C.....

เวลา	อัตราการไหลของ อากาศ (m <sup>3</sup> /s)
09.00	31.06
10.00	33.50
11.00	30.61
12.00	30.33
13.00	26.65
14.00	36.41
15.00	35.17
16.00	22.90
เฉลี่ย	30.83

4. ข้อมูลของไอเสีย  
อุณหภูมิไอเสียที่ออกจากปล่องไอเสีย

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของไอเสีย ที่ออกจากเตาเผา (°C)
09.00	1,189
10.00	1,200
11.00	1,190
12.00	1,188
13.00	1,211
14.00	1,208
15.00	1,225
16.00	1,221
เฉลี่ย	1,204

อุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจาก recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศไอเสียออกจาก recuperator (°C)
09.00	279.63
10.00	284.66
11.00	298.78
12.00	308.21
13.00	315.63
14.00	311.73
15.00	305.55
16.00	318.99
เฉลี่ย	302.90

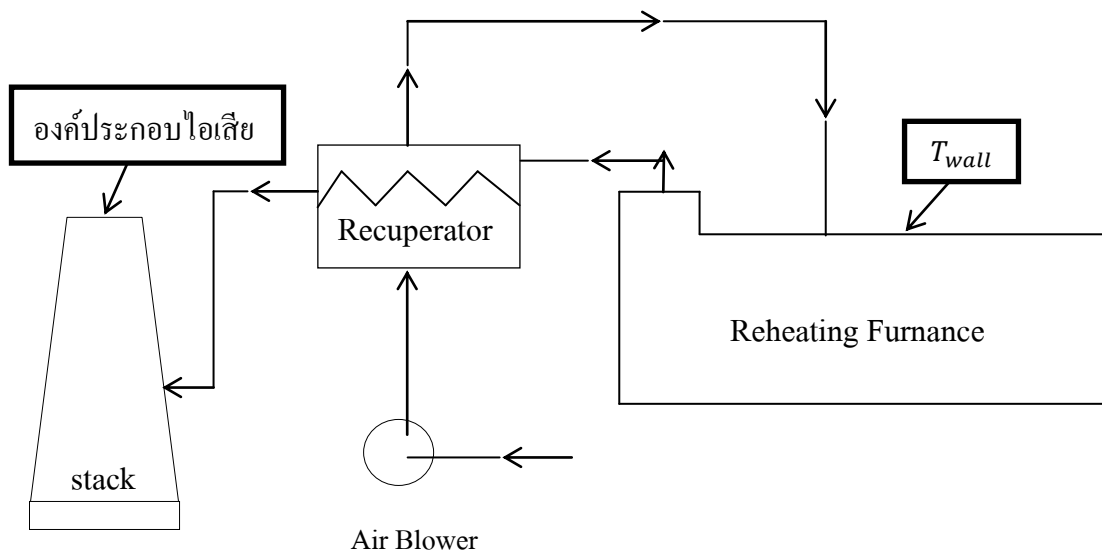
อุณหภูมิของอากาศไอเสียก่อนเข้า recuperator

เวลา	อุณหภูมิอุณหภูมิของอากาศไอเสียก่อนเข้า recuperator (°C)
09.00	872
10.00	874
11.00	865
12.00	878
13.00	865
14.00	869
15.00	866
16.00	865
เฉลี่ย	869.25

## ภาคผนวก ค

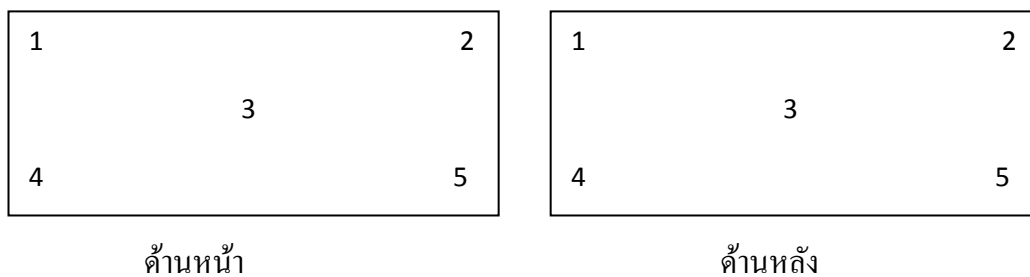
รายละเอียดการเก็บข้อมูลจากการตรวจวัด

รายละเอียดของข้อมูลที่ต้องตรวจวัด

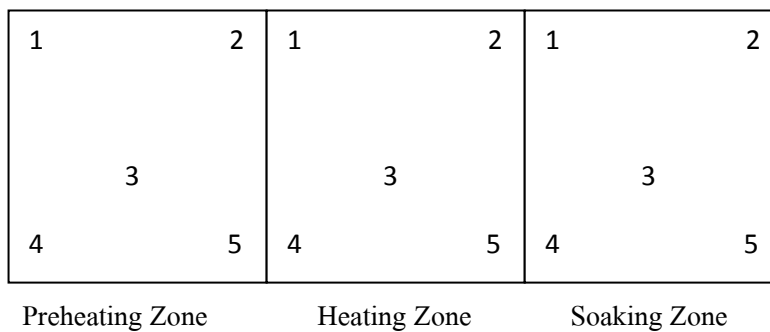


รูปที่ ก.1 แผนผังแสดงการตรวจวัดอุณหภูมิ

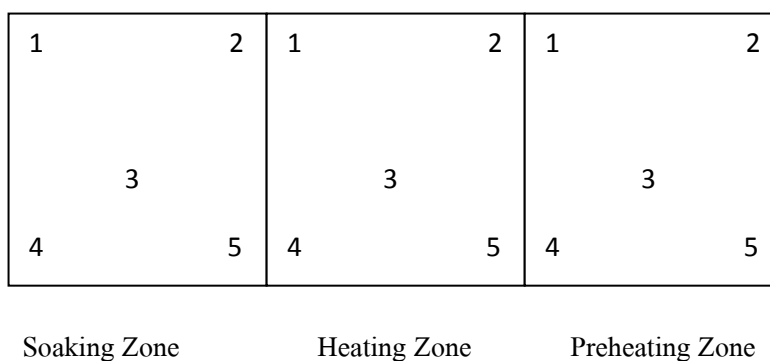
ตรวจวัดอุณหภูมิผิวเตา จากการใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรดวัดที่ตำแหน่งต่างๆรอบเตา ได้แก่ ผนังเตาด้านบน ผนังเตาด้านหน้า ผนังเตาด้านหลัง ผนังเตาด้านซ้าย ผนังเตาด้านขวา โดยทำการวัดแต่ละโซน โซนละ 5 ค่าดังรูปที่ ก.2-ก.5 รายละเอียดการใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิโดยใช้รังสีอินฟราเรดแสดงในภาคผนวก ก



รูปที่ ก.2 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง



รูปที่ ก.3 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านซ้าย



รูปที่ ก.4 ตำแหน่งการตรวจวัดผนังเตาด้านขวา

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 40 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 7 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

### 1. อุณหภูมิที่ผิวเตา

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านหน้า (°C)									
	ด้านหน้า					ด้านหลัง				
09.00	94.99	100.48	158.24	129.37	75.98	76.36	110.55	106.07	90.71	123.58
10.00	97.22	87.63	167.29	138.51	75.45	73.51	92.84	99.19	100.35	108.73
11.00	92.08	98.37	161.59	127.44	80.32	92.68	99.24	113.20	96.21	122.25
12.00	94.42	87.61	169.09	121.17	78.15	83.92	99.94	108.16	89.20	114.80
13.00	90.85	88.36	165.36	126.08	90.33	81.52	108.74	104.46	103.25	125.37
14.00	100.70	93.80	162.92	129.26	79.47	80.40	96.02	105.60	96.19	124.32
15.00	97.80	99.81	173.29	133.10	88.42	86.26	94.27	111.53	100.61	115.74
16.00	101.49	87.66	158.63	121.54	81.54	77.41	98.09	96.98	90.64	116.57
เฉลี่ย	96.19	92.97	164.55	128.31	81.21	81.51	99.96	105.65	95.89	118.92

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	89.16	104.81	93.86	67.56	75.20	107.27	216.38	99.14	143.21	124.36	123.64	110.25	134.97	86.04	140.35
10.00	84.71	97.77	90.26	79.61	86.36	115.62	225.73	108.58	144.22	132.77	112.81	121.89	125.40	95.49	138.91
11.00	83.11	98.91	88.81	71.37	78.00	109.98	217.38	105.75	144.13	120.12	122.83	111.20	141.69	85.73	144.33
12.00	81.41	109.94	94.30	76.40	93.48	117.40	212.70	98.76	145.84	136.87	122.44	126.88	139.62	95.48	139.14
13.00	90.30	98.21	88.65	64.38	79.60	115.66	231.25	92.07	158.35	125.29	126.94	120.74	131.19	98.86	134.15
14.00	81.94	106.70	82.94	79.36	91.01	112.66	222.35	108.18	146.45	123.28	125.59	123.95	131.84	102.05	134.40
15.00	82.91	95.20	98.49	66.44	92.03	112.48	224.34	105.07	160.10	130.39	124.66	122.23	123.50	99.88	144.34
16.00	88.61	102.65	98.33	82.80	89.84	107.77	223.82	100.39	146.86	136.84	120.86	113.44	126.72	86.59	143.26
เฉลี่ย	85.27	101.77	91.96	73.49	85.69	112.36	221.74	102.24	148.65	128.74	122.47	118.82	131.86	93.76	139.86



ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านขวา (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	109.28	53.69	100.33	79.51	55.99	91.79	103.45	111.36	92.15	127.41	101.32	62.45	121.83	69.19	54.12
10.00	101.26	53.04	103.73	74.76	53.71	91.71	92.36	112.41	101.99	125.47	111.54	71.78	119.01	73.51	65.29
11.00	117.79	63.32	90.18	68.66	70.77	97.48	92.73	126.23	95.07	134.23	105.25	74.07	116.24	64.12	55.69
12.00	112.16	57.98	109.49	75.64	62.19	96.44	84.60	112.45	99.84	132.92	117.27	68.85	117.00	60.46	66.19
13.00	108.63	62.60	109.76	71.62	58.61	94.20	92.74	124.52	89.30	132.20	120.77	74.58	108.48	65.56	66.95
14.00	115.67	63.73	100.82	84.59	56.04	103.32	100.24	117.43	88.34	140.28	102.60	57.42	118.76	67.54	63.83
15.00	105.34	73.92	95.77	74.31	69.21	102.56	86.40	114.17	87.62	123.42	101.51	59.39	115.40	59.01	63.18
16.00	99.71	70.56	103.22	79.57	67.34	98.26	103.92	128.03	90.97	126.59	113.74	68.13	121.82	58.87	65.58
เฉลี่ย	108.73	62.35	101.66	76.08	61.73	96.97	94.55	118.32	93.16	130.32	109.25	67.08	117.32	64.78	62.60

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 40 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 8 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. อุณหภูมิที่ผิวเตา

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านหน้า (°C)									
	ด้านหน้า					ด้านหลัง				
09.00	99.52	100.18	177.84	151.21	85.40	66.39	100.31	83.67	103.61	114.88
10.00	88.20	84.51	165.54	147.48	88.77	68.68	104.34	90.30	92.51	118.41
11.00	101.09	100.79	168.61	156.95	75.14	80.56	90.68	92.09	104.11	127.18
12.00	96.82	87.88	165.72	154.98	78.57	65.62	105.24	95.37	100.88	118.99
13.00	87.25	98.07	171.57	150.49	89.83	81.63	103.86	95.22	99.05	124.09
14.00	102.77	100.30	161.22	158.13	89.32	63.28	93.13	94.20	94.92	115.12
15.00	97.66	97.88	163.32	145.67	85.58	80.64	104.21	94.05	101.90	130.58
16.00	87.02	81.51	171.28	151.16	84.96	72.62	88.03	83.22	100.74	122.11
เฉลี่ย	95.04	93.89	168.14	152.01	84.70	72.43	98.73	91.02	99.71	121.42

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	101.13	92.83	96.27	69.30	80.79	121.80	126.77	102.39	124.23	125.17	138.79	112.01	121.08	91.84	128.45
10.00	105.45	88.63	92.61	68.67	73.96	125.60	126.01	106.34	135.18	137.53	122.41	121.69	121.85	89.32	139.81
11.00	91.24	91.95	85.47	74.17	77.62	132.78	130.73	97.95	140.82	125.55	138.21	128.93	139.67	102.37	139.60
12.00	99.57	89.89	93.42	74.98	86.61	118.09	126.89	103.14	125.70	136.10	123.57	122.10	131.50	88.74	131.27
13.00	93.65	104.22	87.49	76.87	90.06	130.36	118.79	100.83	125.17	121.74	121.80	128.09	129.56	103.20	138.02
14.00	88.62	103.56	92.84	65.01	89.59	122.24	122.47	108.18	121.82	124.85	122.54	112.87	130.08	102.41	131.44
15.00	102.20	104.79	87.55	71.09	75.26	131.65	121.49	97.90	124.21	124.75	133.90	124.90	123.82	98.81	132.70
16.00	91.58	100.41	102.73	67.71	83.53	128.99	126.29	109.57	123.27	131.47	129.86	126.40	139.21	88.78	140.16
เฉลี่ย	96.68	97.03	92.30	70.97	82.18	126.44	124.93	103.29	127.55	128.39	128.88	122.13	129.60	95.68	135.18

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านขวา (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	81.91	67.59	104.89	60.16	53.58	75.36	78.77	103.70	93.64	71.38	64.29	49.48	49.60	53.75	38.28
10.00	100.76	62.81	95.55	77.54	50.16	92.23	82.92	117.97	90.70	60.26	60.71	62.54	49.28	52.53	46.52
11.00	87.94	63.29	90.87	61.63	54.85	78.03	79.81	117.93	92.46	59.73	69.13	63.05	60.66	63.90	54.70
12.00	97.14	72.43	95.70	73.53	50.95	90.07	84.07	113.76	80.52	58.70	71.34	63.44	54.36	44.02	40.46
13.00	98.46	64.57	101.87	66.86	59.87	72.57	84.41	118.93	83.86	70.51	61.84	50.85	44.76	44.89	36.31
14.00	82.49	73.49	93.09	76.22	64.04	88.57	88.05	101.74	85.87	76.56	55.21	55.58	47.62	52.54	40.58
15.00	88.86	81.02	107.94	76.92	47.64	82.67	88.75	111.50	84.10	66.94	66.26	51.75	43.35	44.38	46.12
16.00	98.34	76.80	90.92	63.25	65.80	84.79	84.77	116.34	88.62	58.91	67.20	65.08	55.30	61.40	51.48
เฉลี่ย	91.99	70.25	97.60	69.52	55.86	83.03	83.94	112.73	87.47	65.37	64.50	57.72	50.62	52.18	44.31

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 70 ต้น/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 14 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. อุณหภูมิที่ผิวเตา

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านหน้า (°C)									
	ด้านหน้า					ด้านหลัง				
09.00	126.93	90.39	110.76	133.29	95.52	37.01	65.01	78.12	60.78	74.55
10.00	125.93	88.92	118.23	125.67	98.89	37.57	60.95	76.11	58.19	59.02
11.00	128.53	79.50	115.14	130.16	95.11	49.38	64.97	66.54	64.58	66.89
12.00	125.20	86.53	117.76	121.07	106.14	36.15	73.68	68.26	66.29	68.19
13.00	120.31	82.46	122.99	125.92	89.04	43.96	68.26	64.49	64.21	73.87
14.00	113.21	80.14	125.95	122.30	105.84	37.65	63.25	74.91	56.40	69.81
15.00	120.49	91.07	124.92	126.60	97.96	43.66	64.38	63.64	52.64	71.54
16.00	114.07	88.95	110.99	132.94	106.44	32.95	66.96	59.15	65.09	69.66

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	80.02	78.22	97.36	81.28	69.19	89.87	68.49	117.93	102.77	105.82	78.49	86.79	93.44	83.76	105.43
10.00	63.28	88.26	96.43	91.16	71.02	97.07	81.28	124.87	93.71	94.67	67.92	81.30	100.60	81.98	110.65
11.00	65.56	76.16	95.14	78.79	74.09	100.23	71.39	119.39	101.46	89.01	79.03	89.32	95.26	84.13	104.55
12.00	61.65	92.76	93.42	91.92	70.46	84.69	74.28	112.17	84.70	100.35	76.49	91.34	85.70	95.16	101.32
13.00	72.63	73.44	85.23	86.76	72.15	93.66	82.70	120.51	91.60	93.51	69.72	80.73	100.35	88.50	109.90
14.00	73.36	81.20	87.64	75.16	71.29	95.11	81.03	109.61	84.37	95.40	71.37	77.80	93.60	88.47	116.75
15.00	68.25	84.05	86.57	90.32	76.55	91.94	73.07	113.57	90.93	90.29	86.65	79.65	104.62	95.80	113.14
16.00	77.61	87.54	84.60	73.42	67.28	88.25	80.58	108.31	96.52	93.86	79.35	91.93	95.37	85.55	110.95
เฉลี่ย	70.30	82.70	90.80	83.60	71.50	92.60	76.60	115.80	93.26	95.36	76.13	84.86	96.12	87.92	109.09

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านขวา (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	75.05	97.76	86.01	85.04	94.68	106.65	119.69	93.93	116.69	103.35	115.21	111.69	120.57	122.92	126.03
10.00	82.28	85.38	76.80	87.47	95.88	94.65	118.92	81.60	109.72	103.61	117.91	110.36	112.10	116.38	123.58
11.00	76.45	83.95	69.02	90.63	95.49	99.30	111.80	91.99	111.42	107.88	119.80	110.88	115.71	114.89	122.22
12.00	77.92	78.93	69.22	91.85	98.77	101.98	114.31	88.44	114.06	95.22	105.16	111.30	120.31	125.69	126.93
13.00	75.15	81.89	72.99	74.08	104.76	103.08	117.85	96.19	116.47	108.78	106.83	111.66	121.45	124.15	125.77
14.00	78.22	89.00	79.29	87.70	98.88	103.90	126.46	82.51	116.68	101.10	108.18	109.48	116.17	120.84	108.71
15.00	87.54	89.05	84.17	87.92	92.83	104.40	122.06	89.03	107.25	92.92	122.55	119.23	112.70	114.37	124.45
16.00	69.43	82.37	75.81	83.17	105.32	107.63	109.06	99.85	100.63	106.38	113.16	105.51	122.00	123.87	114.67
เฉลี่ย	77.76	86.04	76.67	85.98	98.33	102.70	117.52	90.44	111.62	102.40	113.60	111.26	117.63	120.39	121.55

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 70 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 15 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. อุณหภูมิที่ผิวเตา

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านหน้า (°C)									
	ด้านหน้า					ด้านหลัง				
09.00	127.49	91.70	113.92	125.43	107.91	36.75	73.20	68.85	59.69	68.28
10.00	121.67	97.33	117.68	124.45	97.14	44.59	70.82	65.29	53.38	59.99
11.00	122.27	93.16	112.15	138.05	99.80	49.89	77.38	59.64	53.31	62.52
12.00	125.51	97.09	117.61	138.49	97.33	35.21	72.47	75.12	57.42	62.25
13.00	127.15	89.48	123.15	128.73	92.66	40.82	73.83	72.43	64.31	66.68
14.00	115.91	95.31	116.49	125.96	107.60	38.83	63.75	71.75	55.06	69.61
15.00	112.66	90.10	122.27	132.15	95.49	40.28	65.49	61.41	57.50	69.50
16.00	110.86	96.20	116.73	120.33	103.00	51.52	62.76	75.71	54.35	63.56
เฉลี่ย	120.44	93.80	117.50	129.20	100.12	36.75	73.20	68.85	59.69	68.28



ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	74.54	80.45	91.36	77.55	75.13	89.44	81.83	108.79	96.48	93.89	70.82	82.95	94.77	84.32	101.14
10.00	75.08	81.67	90.55	85.54	69.16	92.55	78.95	121.98	90.70	91.61	78.16	87.43	94.90	94.64	101.37
11.00	69.62	85.71	96.41	92.73	71.66	96.97	68.06	117.09	89.23	99.16	80.36	82.59	91.99	97.56	101.63
12.00	67.40	90.73	89.95	83.79	74.88	87.20	76.78	106.30	100.00	95.46	80.61	89.42	95.82	93.05	117.79
13.00	79.54	73.64	95.68	82.82	64.90	85.46	77.72	114.21	99.50	105.98	75.45	89.40	103.56	97.61	118.40
14.00	63.55	79.32	91.00	79.31	63.32	91.58	81.48	108.03	91.35	91.42	76.52	82.04	96.84	93.65	103.47
15.00	79.92	91.02	91.08	83.64	78.52	92.97	80.17	108.84	92.91	96.51	76.91	77.66	88.61	92.98	106.55
16.00	67.37	80.53	87.28	74.15	68.46	83.05	75.35	107.45	84.49	95.28	80.92	94.50	104.96	89.88	112.54
เฉลี่ย	72.13	82.88	91.66	82.44	70.75	89.90	77.54	111.59	93.08	96.16	77.47	85.75	96.43	92.96	107.86

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านขวา (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	82.15	91.24	86.70	83.83	97.75	101.00	121.66	90.40	106.97	93.65	104.49	105.57	125.45	120.24	120.09
10.00	81.13	94.97	82.73	77.63	95.81	109.75	126.15	97.59	113.89	94.08	117.29	115.43	119.41	128.64	112.39
11.00	80.14	86.34	85.39	74.52	105.90	96.17	126.88	100.32	111.58	96.70	111.62	111.64	114.57	128.16	107.19
12.00	88.49	92.07	71.54	90.86	97.92	97.21	119.27	90.03	114.69	108.53	112.72	121.55	126.64	123.14	125.01
13.00	78.41	95.70	77.12	81.42	101.45	105.46	128.01	97.83	115.94	102.13	103.12	113.88	121.68	123.09	113.75
14.00	74.28	96.43	75.31	92.80	100.57	97.33	127.23	81.82	114.17	106.26	106.25	106.32	125.17	115.53	111.55
15.00	80.30	86.38	86.76	81.98	94.67	107.26	111.12	91.61	114.90	108.99	108.98	105.36	108.21	125.27	109.39
16.00	74.44	92.20	76.06	78.03	93.82	97.01	124.65	83.92	114.09	104.10	103.60	112.66	118.34	121.82	121.21
เฉลี่ย	79.92	91.92	80.20	82.63	98.49	101.40	123.12	91.69	113.28	101.80	108.51	111.55	119.93	123.24	115.07

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 150 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 21 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. อุณหภูมิที่ผิวเตา

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านหน้า (°C)									
	ด้านหน้า					ด้านหลัง				
09.00	141.38	103.54	133.85	130.36	134.54	82.45	83.73	109.75	92.83	92.53
10.00	134.38	121.94	133.85	132.64	123.47	79.12	91.20	95.82	85.94	87.86
11.00	139.60	107.62	132.75	129.90	140.24	71.29	97.01	109.50	85.79	76.53
12.00	132.00	118.01	143.99	129.26	128.59	78.69	93.15	108.45	91.04	85.60
13.00	133.91	103.54	131.44	124.43	134.66	84.97	90.51	97.52	97.23	74.65
14.00	136.57	111.98	150.36	134.10	140.00	86.89	92.06	95.27	91.01	74.99
15.00	136.02	112.97	136.38	122.43	121.96	76.78	89.50	100.81	96.53	73.81
16.00	129.67	104.71	150.54	117.50	130.78	82.19	100.59	97.57	86.40	74.24
เฉลี่ย	135.44	110.54	139.14	127.58	131.78	80.30	92.22	101.84	90.85	80.02

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	87.30	102.08	113.99	108.83	99.72	123.52	108.79	145.00	115.79	127.69	111.36	118.74	129.36	127.44	146.90
10.00	87.54	104.47	125.44	104.68	94.42	120.03	106.21	150.25	121.81	121.26	107.34	112.29	134.43	132.86	147.68
11.00	92.26	105.61	122.44	104.54	95.30	128.20	101.05	142.15	116.60	138.03	100.86	118.74	136.78	120.81	134.64
12.00	96.47	112.34	118.40	107.28	102.00	128.98	105.43	141.72	120.18	130.62	94.13	122.45	120.21	117.05	146.16
13.00	95.16	105.70	113.46	107.70	99.24	121.79	98.45	153.91	123.55	134.65	99.38	107.30	127.98	114.12	148.67
14.00	104.26	119.11	121.23	114.78	86.15	121.60	96.48	153.87	116.31	125.54	99.50	116.62	121.93	126.02	150.36
15.00	105.46	105.79	131.27	117.79	91.22	117.62	103.82	139.71	128.19	133.60	107.73	112.42	119.02	130.33	153.79
16.00	95.72	119.11	125.67	109.10	103.47	123.03	104.11	141.34	134.53	126.91	108.22	105.88	132.25	119.26	135.10
เฉลี่ย	95.52	109.28	121.49	109.34	96.44	123.10	103.04	145.99	122.12	129.79	103.56	114.31	127.75	123.49	145.41

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านขวา (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	102.04	119.65	109.67	112.19	126.28	136.82	165.49	129.85	154.53	136.07	149.72	152.04	159.28	162.50	145.06
10.00	111.78	119.95	97.09	101.73	129.57	127.10	170.60	113.07	160.92	132.93	145.14	148.56	159.48	165.96	147.26
11.00	104.16	117.99	99.34	109.40	135.11	134.76	163.84	114.90	156.62	145.76	149.43	149.34	156.06	170.71	163.90
12.00	109.25	118.96	102.81	111.63	135.26	128.48	157.65	128.38	146.55	138.46	142.37	151.51	161.37	163.40	149.74
13.00	103.96	116.09	109.09	105.34	124.73	140.08	160.90	131.81	160.93	138.82	150.34	142.04	158.37	161.76	157.73
14.00	114.04	118.09	112.23	105.14	135.84	128.52	155.67	118.58	161.24	132.26	135.12	139.99	157.60	165.97	147.03
15.00	109.87	130.26	99.34	119.81	124.81	136.01	163.55	132.09	148.48	128.45	151.18	156.23	158.85	173.78	156.28
16.00	102.28	115.58	107.91	117.53	132.48	136.81	168.50	129.96	146.60	134.16	149.89	146.22	152.41	169.07	146.27
เฉลี่ย	107.17	119.57	104.68	110.35	130.51	133.57	163.27	124.83	154.48	135.86	146.65	148.24	157.93	166.64	151.66

ขนาดเตาเผาเหล็ก : 150 ตัน/ชั่วโมง ชนิด Walking beam

วันที่ตรวจวัด : 22 เมษายน 2555 เวลา 09.00 – 17.00 น.

สภาวะการทำงาน : ช่วงรีดเหล็ก

1. อุณหภูมิที่ผิวเตา

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านหน้าและด้านหลัง

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านหน้า (°C)									
	ด้านหน้า					ด้านหลัง				
09.00	138.10	107.09	146.41	134.55	132.68	79.94	100.65	99.15	93.57	92.69
10.00	128.79	104.32	145.46	126.12	134.50	81.73	98.31	96.25	79.10	75.23
11.00	142.86	117.50	139.48	122.89	137.06	75.04	96.54	102.22	80.93	81.45
12.00	137.49	103.62	136.06	116.85	134.79	81.72	98.03	97.40	83.48	78.03
13.00	129.47	112.39	143.53	128.12	123.30	79.93	85.98	98.82	85.41	75.69
14.00	126.13	108.40	137.76	118.82	128.52	76.13	85.84	96.04	81.06	78.03
15.00	127.80	120.46	138.46	131.55	130.31	84.11	102.80	102.14	95.75	78.88
16.00	130.83	108.22	131.74	133.80	135.82	76.49	88.18	98.99	88.08	74.96
เฉลี่ย	132.68	110.25	139.86	126.59	132.12	79.39	94.54	98.88	85.92	79.37

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านซ้าย (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	101.96	107.73	115.76	102.70	88.66	121.47	98.69	139.57	134.24	136.52	100.19	107.35	134.04	127.65	149.08
10.00	96.62	109.07	129.45	100.49	92.45	128.12	110.60	144.55	119.58	122.58	94.21	121.28	132.53	119.01	144.21
11.00	99.70	109.17	114.76	113.48	102.59	123.14	104.27	140.51	128.87	135.42	95.07	106.23	125.28	122.85	137.31
12.00	96.33	108.56	131.34	105.35	89.61	127.03	101.32	149.82	123.98	122.84	108.17	115.84	124.11	128.18	151.76
13.00	93.33	120.38	131.87	116.24	97.95	115.89	103.18	153.25	134.27	130.60	110.55	113.05	130.17	114.79	146.71
14.00	96.79	109.89	113.93	104.82	100.56	116.49	101.11	150.93	130.01	126.78	99.30	123.27	121.02	127.11	135.39
15.00	89.42	116.32	124.30	115.24	87.57	121.30	109.17	156.82	122.23	137.11	94.66	123.23	135.81	133.76	141.81
16.00	97.71	117.74	123.33	117.90	85.48	115.96	94.91	154.91	122.84	134.19	110.35	110.35	136.23	126.06	152.70
เฉลี่ย	96.48	112.36	123.09	109.53	93.11	121.17	102.91	148.80	127.00	130.75	101.56	115.07	129.90	124.93	144.87

ตารางบันทึกอุณหภูมิผนังเตาด้านขวา

เวลา	อุณหภูมิผนังเตาด้านขวา (°C)														
	Preheating Zone					Heating Zone					Soaking Zone				
09.00	110.47	123.37	110.44	102.85	127.54	133.93	164.85	114.98	142.51	135.34	154.10	157.24	157.42	171.59	162.04
10.00	103.23	127.98	112.94	110.78	131.83	134.76	156.62	121.76	155.85	129.45	141.52	143.47	157.95	172.63	161.28
11.00	97.99	117.64	110.81	104.31	131.14	143.09	174.14	130.95	144.05	140.50	136.70	155.43	157.56	159.57	151.03
12.00	107.77	117.53	100.27	113.46	127.96	132.74	158.75	121.92	152.54	143.25	142.00	155.55	156.63	157.35	161.06
13.00	115.04	120.27	102.23	101.98	135.96	137.37	167.79	127.30	147.32	130.13	148.23	152.61	153.78	169.62	155.68
14.00	109.49	123.63	105.93	120.33	137.47	139.56	173.83	130.05	144.21	137.98	143.91	145.98	152.52	155.33	155.75
15.00	100.47	120.08	115.30	116.41	139.90	127.36	169.07	119.98	153.59	135.72	137.97	153.39	156.94	156.41	154.34
16.00	99.56	129.51	99.24	102.32	135.53	140.33	156.80	118.44	142.07	141.46	141.34	152.47	151.94	170.67	163.45
เฉลี่ย	105.50	122.50	107.15	109.05	133.42	136.14	165.23	123.17	147.77	136.73	143.22	152.02	155.59	164.15	158.08



ภาคผนวก ง  
การคำนวณสมดุลพลังงาน

### 1. การคำนวณสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก

การคำนวณสมดุลพลังงานของเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กซึ่งประกอบด้วย

#### 1. ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$$Q_{in1} = m_{fuel} LHV$$

โดยที่  $m_{fuel} = 2,522.28 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  และ  $LHV = 26.33 \text{ MJ/Nm}^3$

ดังนั้น ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง  $Q_{in1} = 66,411.63 \text{ MJ/hr}$

#### 2. ความร้อนสัมผัสของอากาศ

$$Q_{in2} = \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})$$

โดยที่  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ Kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{air} = 300^\circ\text{C}$

และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสัมผัสของอากาศ  $Q_{in2} = 8,762.91 \text{ MJ/hr}$

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็กซึ่งประกอบด้วย

#### 1. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก

$$Q_{out1} = m_{steel} c_{p,s} (T_{out} - T_{sur})$$

โดยที่  $m_{steel} = 40,000 \text{ kg/hr}$ ,  $c_{p,s} = 0.78 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{out} = 1,100^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก  $Q_{out1} = 33,228 \text{ MJ/hr}$

#### 2. ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย

$$Q_{out2} = m_{flue} c_{p,f} (T_{gas} - T_{sur})$$

โดยที่  $m_{flue} = 2,522.22 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ,  $c_{p,f} = 10.39 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{gas} = 1,150.38^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย  $Q_{out2} = 29,222.95 \text{ MJ/hr}$

#### 3. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา

$$Q_{out3} = hA(T_{wall} - T_{sur}) + 4.88A\varepsilon\left\{\left(\frac{273+T_{wall}}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+T_{sur}}{100}\right)^4\right\}$$

โดยที่

ผนังเตาด้านซ้ายเตา

$$T_{wall} = 114^{\circ}\text{C}, T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}, A = 5 \times 11.88\text{m} = 59.4\text{ m}^2, h = 4.6\text{ W/m}^2 \cdot \text{k} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านซ้ายเท่ากับ  $Q_{out3,1} = 78.52\text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านขวาเตา

$$T_{wall} = 81.73^{\circ}\text{C}, A = 5 \times 11.88\text{m} = 59.4\text{ m}^2, h = 4.7\text{ W/m}^2 \cdot \text{k} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านขวาเท่ากับ  $Q_{out3,2} = 47.18\text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านหน้าเตา

$$T_{wall} = 115.7^{\circ}\text{C}, A = 3 \times 6.17\text{m} = 18.5\text{ m}^2, h = 4.8\text{ W/m}^2 \cdot \text{k} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านหน้าเท่ากับ  $Q_{out3,3} = 26.07\text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านหลังเตา

$$T_{wall} = 98.52^{\circ}\text{C}, A = 2.5 \times 7\text{m} = 17.15\text{ m}^2, h = 4.7\text{ W/m}^2 \cdot \text{k} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านหลังเท่ากับ  $Q_{out3,4} = 18.95\text{ MJ/hr}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา } Q_{out3} &= Q_{out3,1} + Q_{out3,2} + Q_{out3,3} + Q_{out3,4} \\ &= 170.72\text{ MJ/hr} \end{aligned}$$

4. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด

$$Q_{out4} = C_{rad} C_{rad,black} \varepsilon A_{opening}$$

โดยที่  $C_{rad} = 1$ ,  $C_{rad,black} = 1.17\text{ MJ/cm}^2 \cdot \text{hr}$ ,  $\varepsilon = 0.58$ , และ  $A_{opening} = 352.2\text{ cm}^2$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด  $Q_{out4} = 239\text{ MJ/hr}$

5. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ได้มาจากความแตกต่างของพลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเท่ากับพลังงาน

ความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก

$$Q_{out5} = (Q_{in1} + Q_{in2}) - (Q_{out1} + Q_{out2} + Q_{out3} + Q_{out4})$$

ดังนั้น  $Q_{out5} = (66,412 + 8,763) - (33,228 + 29,223 + 171 + 239)$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เท่ากับ  $Q_{out6} = 10,565\text{ MJ/hr}$

การคำนวณสมดุลพลังงานของเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กซึ่งประกอบด้วย

1. ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$$Q_{in1} = m_{fuel}LHV$$

โดยที่  $m_{fuel} = 3,238.63 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  และ  $LHV = 26.33 \text{ MJ/Nm}^3$

ดังนั้น ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง  $Q_{in1} = 85,273.13 \text{ MJ/hr}$

2. ความร้อนสัมผัสของอากาศ

$$Q_{in2} = \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})$$

โดยที่  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ Kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{air} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$

และ  $T_{sur} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสัมผัสของอากาศ  $Q_{in2} = 15,192.78 \text{ MJ/hr}$

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็กซึ่งประกอบด้วย

1. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก

$$Q_{out1} = m_{steel} c_{p,s} (T_{out} - T_{sur})$$

โดยที่  $m_{steel} = 65,000 \text{ kg/hr}$ ,  $c_{p,s} = 0.78 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{out} = 970 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก  $Q_{out1} = 47,404.50 \text{ MJ/hr}$

2. ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย

$$Q_{out2} = m_{flue} c_{p,f} (T_{gas} - T_{sur})$$

โดยที่  $m_{flue} = 3238.63 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ,  $c_{p,f} = 11.13 \text{ KJ/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{gas} = 1,080.25 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย  $Q_{out2} = 37,677.03 \text{ MJ/hr}$

3. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา

$$Q_{out3} = hA(T_{wall} - T_{sur}) + 4.88A\varepsilon\left\{\left(\frac{273+T_{wall}}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+T_{sur}}{100}\right)^4\right\}$$

โดยที่

ผนังเตาด้านซ้ายเตา

$$T_{wall} = 88.51^{\circ}\text{C}, A = 6 \times 10.12 \text{ m} = 60.72 \text{ m}^2, h = 4.73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านซ้ายเท่ากับ  $Q_{out3,1} = 55.62 \text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านขวาเตา

$$T_{wall} = 102.55^{\circ}\text{C}, A = 6 \times 10.50 = 63 \text{ m}^2, h = 4.73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านขวาเท่ากับ  $Q_{out3,2} = 73.03 \text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านหน้าเตา

$$T_{wall} = 111.45^{\circ}\text{C}, A = 5 \times 6 = 30 \text{ m}^2, h = 4.73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านหน้าเท่ากับ  $Q_{out3,3} = 39.43 \text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านหลังเตา

$$T_{wall} = 60.06^{\circ}\text{C}, A = 4.95 \times 6.2 \text{ m} = 30.69 \text{ m}^2, h = 4.73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านหลังเท่ากับ  $Q_{out3,4} = 13.12 \text{ MJ/hr}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา } Q_{out3} &= Q_{out3,1} + Q_{out3,2} + Q_{out3,3} + Q_{out3,4} \\ &= 181.2 \text{ MJ/hr} \end{aligned}$$

4. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด

$$Q_{out4} = C_{rad} C_{rad,black} \varepsilon A_{opening}$$

โดยที่  $C_{rad} = 0.8$ ,  $C_{rad,black} = 1.17 \text{ MJ/cm}^2 \cdot \text{hr}$ ,  $\varepsilon = 0.65$ , และ  $A_{opening} = 415 \text{ cm}^2$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด  $Q_{out4} = 252.49 \text{ MJ/hr}$

5. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ได้มาจากความแตกต่างของพลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กกับพลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก

$$Q_{out5} = (Q_{in1} + Q_{in2}) - (Q_{out1} + Q_{out2} + Q_{out3} + Q_{out4})$$

ดังนั้น  $Q_{out5} = (85,273 + 15,193) - (47,405 + 37,677 + 181 + 253)$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เท่ากับ  $Q_{out6} = 14,950 \text{ MJ/hr}$

การคำนวณสมดุลพลังงานของเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

พลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กซึ่งประกอบด้วย

1. ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง

$$Q_{in1} = m_{fuel}LHV$$

โดยที่  $m_{fuel} = 5863.81 \text{ Nm}^3/\text{hr}$  และ  $LHV = 26.33 \text{ MJ/Nm}^3$

ดังนั้น ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง  $Q_{in1} = 154,394.12 \text{ MJ/hr}$

2. ความร้อนสัมผัสของอากาศ

$$Q_{in2} = \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})$$

โดยที่  $\dot{m}_{air} = 29.06 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ Kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{air} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสัมผัสของอากาศ  $Q_{in2} = 36,123.10 \text{ MJ/hr}$

พลังงานความร้อนออกจากเตาเผาเหล็กซึ่งประกอบด้วย

1. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก

$$Q_{out1} = m_{steel} c_{p,s} (T_{out} - T_{sur})$$

โดยที่  $m_{steel} = 103,550 \text{ kg/hr}$ ,  $c_{p,s} = 0.78 \text{ KJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{out} = 1,060.64 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก  $Q_{out1} = 82,839.92 \text{ MJ/hr}$

2. ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย

$$Q_{out2} = m_{flue} c_{p,f} (T_{gas} - T_{sur})$$

โดยที่  $m_{flue} = 5,863.81 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ,  $c_{p,f} = 11.45 \text{ KJ/Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $T_{gas} = 1,200.06 \text{ }^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียไปกับไอเสีย  $Q_{out2} = 78,291.17 \text{ MJ/hr}$

3. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา

$$Q_{out3} = hA(T_{wall} - T_{sur}) + \sigma A \epsilon \{ (T_{wall})^4 - (T_{sur})^4 \}$$

โดยที่

ผนังเตาด้านซ้ายเตา

$$T_{wall} = 118.41^{\circ}\text{C}, A = 8 \times 9.98 \text{ m} = 79.82 \text{ m}^2, h = 4.73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านซ้ายเท่ากับ  $Q_{out3,1} = 114.64 \text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านขวาเตา

$$T_{wall} = 137.17^{\circ}\text{C}, A = 10 \times 12.88 \text{ m} = 122.80 \text{ m}^2, h = 4.73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านขวาเท่ากับ  $Q_{out3,2} = 217.18 \text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านหน้าเตา

$$T_{wall} = 128.60^{\circ}\text{C}, A = 4 \times 6.5 \text{ m} = 25.99 \text{ m}^2, h = 4.52 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านหน้าเท่ากับ  $Q_{out3,3} = 42 \text{ MJ/hr}$

ผนังเตาด้านหลังเตา

$$T_{wall} = 88.33^{\circ}\text{C}, A = 4 \times 4.7 \text{ m} = 18.79 \text{ m}^2, h = 4.52 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ และ } \varepsilon = 0.4$$

ดังนั้นความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาด้านหลังเท่ากับ  $Q_{out3,4} = 17.15 \text{ MJ/hr}$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา } Q_{out3} &= Q_{out3,1} + Q_{out3,2} + Q_{out3,3} + Q_{out3,4} \\ &= 390.97 \text{ MJ/hr} \end{aligned}$$

4. ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด

$$Q_{out4} = C_{rad} C_{rad,black} \varepsilon A_{opening}$$

โดยที่  $C_{rad} = 0.7$ ,  $C_{rad,black} = 1.17 \text{ MJ/cm}^2 \cdot \text{hr}$ ,  $\varepsilon = 0.9$ , และ  $A_{opening} = 4,600 \text{ cm}^2$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด  $Q_{out4} = 3,390.66 \text{ MJ/hr}$

5. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ ได้มาจากความแตกต่างของพลังงานความร้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็กกับพลังงาน

ความร้อนออกจากเตาเผาเหล็ก

$$Q_{out5} = (Q_{in1} + Q_{in2}) - (Q_{out1} + Q_{out2} + Q_{out3} + Q_{out4})$$

ดังนั้น  $Q_{out5} = (154,395 + 36,123) - (82,840 + 78,291 + 391 + 3,391)$

ดังนั้น ความร้อนสูญเสียอื่นๆ เท่ากับ  $Q_{out6} = 25,622 \text{ MJ/hr}$

2. การคำนวณประสิทธิภาพของเตา

จากการทำสมดุลพลังงาน (energy balance) ของเตาเผาเหล็กนอกจากจะทำให้ทราบปริมาณความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็ก และความร้อนที่สูญเสียต่างๆแล้ว สิ่งสำคัญก็คือ ทำให้สามารถหาค่าประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กได้ โดยประสิทธิภาพความร้อนของเตาเผาสามารถคำนวณได้ดังนี้

- ประสิทธิภาพของเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} &= \frac{33,228}{66,411.63} \times 100 \\ &= 50.03 \% \end{aligned}$$

- ประสิทธิภาพของเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} &= \frac{47,404.50}{85,273.13} \times 100 \\ &= 55.60 \% \end{aligned}$$

- ประสิทธิภาพของเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพเชิงความร้อน} &= \frac{82,839.92}{154,394.12} \times 100 \\ &= 53.65 \% \end{aligned}$$



## ภาคผนวก จ

**การคำนวณปริมาณความต้องการพลังงานเมื่อใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูง**

การคำนวณปริมาณความต้องการพลังงานเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วย

1. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่แท้จริงของเตาเผาหากมีการทำงานแบบมาตรฐาน ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้ของเตาเผาแบบ ไม่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Recuperator)

$$Q_{in} = Q_{in1} + Q_{in2}$$

โดยที่  $Q_{in1} = 66,412 \text{ MJ/hr}$ ,  $Q_{in2} = 8,762 \text{ MJ/hr}$

ดังนั้น  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$

2. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟ

- 2.1 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,recup} = 400^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C} = 63,105.79 \text{ MJ/hr}$

- 2.2 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,recup} = 500^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C} = 59,799.43 \text{ MJ/hr}$

- 2.3 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,recup} = 600^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C} = 56,493.07 \text{ MJ/hr}$

- 2.4 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,recup} = 700^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C} = 53,186.72 \text{ MJ/hr}$

### 3. จำนวนหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟ

#### 3.1 จำนวนหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ $400^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,regen} = 400^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C} = 63,105.79 \text{ MJ/hr}$

#### 3.2 จำนวนหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ $500^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,regen} = 500^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C} = 59,799.43 \text{ MJ/hr}$

#### 3.3 จำนวนหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ $600^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,regen} = 600^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C} = 56,493.07 \text{ MJ/hr}$

#### 3.4 จำนวนหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ $700^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,regen} = 700^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C} = 53,186.72 \text{ MJ/hr}$

3.5 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 800°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°C,

$$T_{air,regen} = 800^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 800°C = 49,880.36 MJ/hr

3.6 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 900°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°C,

$$T_{air,regen} = 900^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 900°C = 46,574 MJ/hr

3.7 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 1000°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 75,174$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 7.05$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°C,

$$T_{air,regen} = 1,000^{\circ}\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาจีเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 1,000°C = 43,267.64 MJ/hr

การคำนวณปริมาณความต้องการพลังงานเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง ซึ่งประกอบด้วย

1. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่แท้จริงของเตาเผาหากมีการทำงานแบบมาตรฐาน ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้ของเตาเผาแบบไม่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Recuperator)

$$Q_{in} = Q_{in1} + Q_{in2}$$

โดยที่  $Q_{in1} = 85,273 \text{ MJ/hr}$ ,  $Q_{in2} = 15,193 \text{ MJ/hr}$

ดังนั้น  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$

2. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟ

2.1 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$

$$m_{fuel.regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,recup} = 400^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C} = 79,539.79 \text{ MJ/hr}$

2.2 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$

$$m_{fuel.regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,recup} = 500^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C} = 73,806.58 \text{ MJ/hr}$

2.3 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$

$$m_{fuel.regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,recup} = 600^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C} = 68,073.38 \text{ MJ/hr}$

2.4 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทไฟที่อุณหภูมิ 700°C

$$m_{fuel.regen} = \frac{Q_{in} - m_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,recup} = 700^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้คัพเปอร์เรทไฟที่อุณหภูมิ 700°C = 62,340.17 MJ/hr

3. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจเนอเรทไฟ

3.1 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจเนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 400°C

$$m_{fuel.regen} = \frac{Q_{in} - m_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,regen} = 400^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจเนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 400°C = 79,539.79 MJ/hr

3.2 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจเนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 500°C

$$m_{fuel.regen} = \frac{Q_{in} - m_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,regen} = 500^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจเนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 500°C = 73,806.58 MJ/hr

3.3 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจเนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 600°C

$$m_{fuel.regen} = \frac{Q_{in} - m_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,regen} = 600^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจเนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 600°C = 68,073.38 MJ/hr

3.4 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจเนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 700°C

$$m_{fuel.regen} = \frac{Q_{in} - m_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$$C, T_{air,regen} = 700^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C} = 62,340.17 \text{ MJ/hr}$

3.5 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$$C, T_{air,regen} = 800^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $800^\circ\text{C} = 56,606.96 \text{ MJ/hr}$

3.6 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $900^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$$C, T_{air,regen} = 900^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $900^\circ\text{C} = 50,873.75 \text{ MJ/hr}$

3.7 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $1000^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 100,466 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 12.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ,

$$T_{air,regen} = 1,000^\circ\text{C} \text{ และ } T_{sur} = 35^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ  $1,000^\circ\text{C} = 45,140.55 \text{ MJ/hr}$

การคำนวณปริมาณความต้องการพลังงานเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมงซึ่งประกอบด้วย

1. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงที่แท้จริงของเตาเผาหากมีการทำงานแบบมาตรฐาน ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้ของเตาเผาแบบไม่มีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Recuperator)

$$Q_{in} = Q_{in1} + Q_{in2}$$

โดยที่  $Q_{in1} = 154,394 \text{ MJ/hr}$ ,  $Q_{in2} = 36,123 \text{ MJ/hr}$

ดังนั้น  $Q_{in} = 190,517 \text{ MJ/hr}$

2. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟ

2.1 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,recup} = 400^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $400^\circ\text{C} = 140,762.68 \text{ MJ/hr}$

2.2 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,recup} = 500^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C} = 127,131.36 \text{ MJ/hr}$

2.3 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C}$

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517 \text{ MJ/hr}$ ,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $\rho_{air} = 1.29 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_{p,a} = 1.01 \text{ kJ/kg}^\circ$

$C$ ,  $T_{air,recup} = 600^\circ\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^\circ\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวรีคัพเปอร์เรทีฟที่อุณหภูมิ  $600^\circ\text{C} = 113,500.04 \text{ MJ/hr}$



2.4 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทไฟที่อุณหภูมิ 700°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°

$C, T_{air,recup} = 700^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้คัพเปอร์เรทไฟที่อุณหภูมิ 700°C = 99,868.72 MJ/hr

3. คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของเตาเผาเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนนอเรทไฟ

3.1 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 400°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°

$C, T_{air,regen} = 400^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจนนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 400°C = 140,762.68 MJ/hr

3.2 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 500°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°

$C, T_{air,regen} = 500^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจนนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 500°C = 127,131.36 MJ/hr

3.3 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาไร้เจนนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 600°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°

$C, T_{air,regen} = 600^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาไร้เจนนอเรทไฟที่อุณหภูมิ 600°C = 113,500.04 MJ/hr

3.4 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 700°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°C

$C, T_{air,regen} = 700^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 700°C = 99,868.72 MJ/hr

3.5 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 800°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°C

$C, T_{air,regen} = 800^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 800°C = 86,237.40 MJ/hr

3.6 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 900°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°C

$C, T_{air,regen} = 900^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 900°C = 72,606.08 MJ/hr

3.7 คำนวณหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อมีการใช้งานหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 1000°C

$$m_{fuel,regen} = \frac{Q_{in} - \dot{m}_{air} \rho_{air} c_{p,a} (T_{air} - T_{sur})}{LHV}$$

โดยที่  $Q_{in} = 190,517$  MJ/hr,  $LHV = 26.33$ ,  $\dot{m}_{air} = 29.06$  m<sup>3</sup>/s,  $\rho_{air} = 1.29$  kg/m<sup>3</sup>,  $c_{p,a} = 1.01$  kJ/kg°C

$C, T_{air,regen} = 1,000^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{sur} = 35^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอัตราการใช้เชื้อเพลิงเมื่อใช้หัวเผาเริเจนเนอเรทีฟที่อุณหภูมิ 1,000°C = 58,974.75 MJ/hr

ภาคผนวก ฉ  
การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

โครงการหัวเหวี่ยงเพอร์เรทซ์สำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

จาก 
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0$$

โดยที่

n	=	60 ปี
ES <sub>t</sub>	=	20,099,989.45 ต่อปี
I <sub>0</sub>	=	52,800,000 บาท
i	=	8 %

ตารางที่ ๑.1 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเหวี่ยงเพอร์เรทซ์สำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

ปีที่	ES	(1+i) <sup>t</sup>	Est/(1+i) <sup>t</sup>
0	-52,800,000.00	1	(52,800,000.00)
1	20,099,989.45	1.08	18,611,101.35
2	20,099,989.45	1.1664	17,232,501.25
3	20,099,989.45	1.259712	15,956,019.67
4	20,099,989.45	1.36048896	14,774,092.29
5	20,099,989.45	1.469328077	13,679,715.08
6	20,099,989.45	1.586874323	12,666,402.85
7	20,099,989.45	1.713824269	11,728,150.79
8	20,099,989.45	1.85093021	10,859,398.88
9	20,099,989.45	1.999004627	10,054,998.96
10	-32,700,010.55	2.158924997	(15,146,431.95)
11	20,099,989.45	2.331638997	8,620,540.95
12	20,099,989.45	2.518170117	7,981,982.36
13	20,099,989.45	2.719623726	7,390,724.41
14	20,099,989.45	2.937193624	6,843,263.34

15	20,099,989.45	3.172169114	6,336,354.95
16	20,099,989.45	3.425942643	5,866,995.32
17	20,099,989.45	3.700018055	5,432,403.07
18	20,099,989.45	3.996019499	5,030,002.85
19	20,099,989.45	4.315701059	4,657,410.04
20	-32,700,010.55	4.660957144	(7,015,728.64)
21	20,099,989.45	5.033833715	3,992,978.43
22	20,099,989.45	5.436540413	3,697,202.25
23	20,099,989.45	5.871463646	3,423,335.42
24	20,099,989.45	6.341180737	3,169,755.02
25	20,099,989.45	6.848475196	2,934,958.35
26	20,099,989.45	7.396353212	2,717,554.03
27	20,099,989.45	7.988061469	2,516,253.73
28	20,099,989.45	8.627106386	2,329,864.56
29	20,099,989.45	9.317274897	2,157,282.00
30	-32,700,010.55	10.06265689	(3,249,639.82)
31	20,099,989.45	10.86766944	1,849,521.61
32	20,099,989.45	11.737083	1,712,520.01
33	20,099,989.45	12.67604964	1,585,666.67
34	20,099,989.45	13.69013361	1,468,209.88
35	20,099,989.45	14.78534429	1,359,453.59
36	20,099,989.45	15.96817184	1,258,753.33
37	20,099,989.45	17.24562558	1,165,512.34
38	20,099,989.45	18.62527563	1,079,178.09
39	20,099,989.45	20.11529768	999,238.98
40	-32,700,010.55	21.7245215	(1,505,212.00)
41	20,099,989.45	23.46248322	856,686.36
42	20,099,989.45	25.33948187	793,228.12
43	20,099,989.45	27.36664042	734,470.48

44	20,099,989.45	29.55597166	680,065.26
45	20,099,989.45	31.92044939	629,690.05
46	20,099,989.45	34.47408534	583,046.34
47	20,099,989.45	37.23201217	539,857.73
48	20,099,989.45	40.21057314	499,868.27
49	20,099,989.45	43.42741899	462,840.99
50	-32,700,010.55	46.90161251	(697,204.40)
51	20,099,989.45	50.65374151	396,811.55
52	20,099,989.45	54.70604084	367,418.10
53	20,099,989.45	59.0825241	340,201.94
54	20,099,989.45	63.80912603	315,001.80
55	20,099,989.45	68.91385611	291,668.33
56	20,099,989.45	74.4269646	270,063.27
57	20,099,989.45	80.38112177	250,058.58
58	20,099,989.45	86.81161151	231,535.73
59	20,099,989.45	93.75654043	214,384.93
60	20,099,989.45	101.2570637	198,504.57
NPV			151,380,482.28

ดังนั้นโครงการหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ระยะเวลา 60 ปีเท่ากับ 151,380,482.28 บาท

## 2. ระยะเวลาคืนทุน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิต่อปี}}$$

เมื่อเงินลงทุน = 52,800,000 บาท

ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยสุทธิต่อปี = 20,099,989.45 บาท

ดังนั้นโครงการหัวเผาไร้คัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมงมีระยะเวลาคืนทุน 2.63 ปี

โครงการหัวเหรีเอนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

จาก 
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0$$

โดยที่

n	=	60ปี
ES <sub>t</sub>	=	35,174,981.54ต่อปี
I <sub>0</sub>	=	78,000,000 บาท
i	=	8 %

ตารางที่จ.2 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเหรีเอนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมง

ปีที่	ES	(1+i) <sup>t</sup>	Est/(1+i) <sup>t</sup>
0	-78,000,000.00	1	(78,000,000.00)
1	35,174,981.54	1.08	32,569,427.36
2	35,174,981.54	1.1664	30,156,877.18
3	35,174,981.54	1.259712	27,923,034.43
4	35,174,981.54	1.36048896	25,854,661.51
5	35,174,981.54	1.469328077	23,939,501.40
6	35,174,981.54	1.586874323	22,166,205.00
7	35,174,981.54	1.713824269	20,524,263.88
8	35,174,981.54	1.85093021	19,003,948.04
9	35,174,981.54	1.999004627	17,596,248.19
10	35,174,981.54	2.158924997	16,292,822.40
11	35,174,981.54	2.331638997	15,085,946.66
12	-42,825,018.46	2.518170117	(17,006,404.04)
13	35,174,981.54	2.719623726	12,933,767.71
14	35,174,981.54	2.937193624	11,975,710.85
15	35,174,981.54	3.172169114	11,088,621.15
16	35,174,981.54	3.425942643	10,267,241.81

17	35,174,981.54	3.700018055	9,506,705.38
18	35,174,981.54	3.996019499	8,802,504.98
19	35,174,981.54	4.315701059	8,150,467.57
20	35,174,981.54	4.660957144	7,546,729.24
21	35,174,981.54	5.033833715	6,987,712.26
22	35,174,981.54	5.436540413	6,470,103.94
23	35,174,981.54	5.871463646	5,990,836.98
24	-42,825,018.46	6.341180737	(6,753,477.03)
25	35,174,981.54	6.848475196	5,136,177.11
26	35,174,981.54	7.396353212	4,755,719.55
27	35,174,981.54	7.988061469	4,403,444.02
28	35,174,981.54	8.627106386	4,077,262.99
29	35,174,981.54	9.317274897	3,775,243.51
30	35,174,981.54	10.06265689	3,495,595.84
31	35,174,981.54	10.86766944	3,236,662.81
32	35,174,981.54	11.737083	2,996,910.01
33	35,174,981.54	12.67604964	2,774,916.68
34	35,174,981.54	13.69013361	2,569,367.29
35	35,174,981.54	14.78534429	2,379,043.79
36	-42,825,018.46	15.96817184	(2,681,898.65)
37	35,174,981.54	17.24562558	2,039,646.60
38	35,174,981.54	18.62527563	1,888,561.66
39	35,174,981.54	20.11529768	1,748,668.21
40	35,174,981.54	21.7245215	1,619,137.23
41	35,174,981.54	23.46248322	1,499,201.14
42	35,174,981.54	25.33948187	1,388,149.20
43	35,174,981.54	27.36664042	1,285,323.34
44	35,174,981.54	29.55597166	1,190,114.20
45	35,174,981.54	31.92044939	1,101,957.59



46	35,174,981.54	34.47408534	1,020,331.10
47	35,174,981.54	37.23201217	944,751.02
48	-42,825,018.46	40.21057314	(1,065,018.85)
49	35,174,981.54	43.42741899	809,971.73
50	35,174,981.54	46.90161251	749,973.82
51	35,174,981.54	50.65374151	694,420.20
52	35,174,981.54	54.70604084	642,981.67
53	35,174,981.54	59.0825241	595,353.40
54	35,174,981.54	63.80912603	551,253.15
55	35,174,981.54	68.91385611	510,419.58
56	35,174,981.54	74.4269646	472,610.72
57	35,174,981.54	80.38112177	437,602.52
58	35,174,981.54	86.81161151	405,187.52
59	35,174,981.54	93.75654043	375,173.63
60	35,174,981.54	101.2570637	347,382.99
NPV			307,245,055.16

ดังนั้นโครงการหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ระยะเวลา 60 ปีเท่ากับ 307,245,055.16บาท

## 2. ระยะเวลาคืนทุน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิต่อปี}}$$

เมื่อเงินลงทุน = 78,000,000 บาท

ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยสุทธิต่อปี = 35,174,981.54บาท

ดังนั้นโครงการหัวเหวี่ยงเงินเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมงมีระยะเวลาคืนทุน 1.23 ปี

โครงการหัวเหรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

จาก 
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0$$

โดยที่  $n = 60$  ปี  
 $ES_t = 34,853,271.83$  ต่อปี  
 $I_0 = 66,900,000$  บาท  
 $i = 8\%$

ตารางที่ 3 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเหรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

ปีที่	ES	$(1+i)^t$	$ES_t/(1+i)^t$
0	-118,900,000.00	1	(118,900,000.00)
1	82,867,421.73	1.08	76,729,094.19
2	82,867,421.73	1.1664	71,045,457.58
3	82,867,421.73	1.259712	65,782,831.10
4	82,867,421.73	1.36048896	60,910,028.79
5	82,867,421.73	1.469328077	56,398,174.81
6	82,867,421.73	1.586874323	52,220,532.23
7	82,867,421.73	1.713824269	48,352,344.66
8	82,867,421.73	1.85093021	44,770,689.50
9	82,867,421.73	1.999004627	41,454,342.13
10	-36,032,578.27	2.158924997	(16,690,055.62)
11	82,867,421.73	2.331638997	35,540,416.78
12	82,867,421.73	2.518170117	32,907,793.31
13	82,867,421.73	2.719623726	30,470,178.99
14	82,867,421.73	2.937193624	28,213,128.70
15	82,867,421.73	3.172169114	26,123,267.31

16	82,867,421.73	3.425942643	24,188,210.47
17	82,867,421.73	3.700018055	22,396,491.18
18	82,867,421.73	3.996019499	20,737,491.83
19	82,867,421.73	4.315701059	19,201,381.33
20	-36,032,578.27	4.660957144	(7,730,725.08)
21	82,867,421.73	5.033833715	16,462,089.61
22	82,867,421.73	5.436540413	15,242,675.57
23	82,867,421.73	5.871463646	14,113,588.49
24	82,867,421.73	6.341180737	13,068,137.49
25	82,867,421.73	6.848475196	12,100,127.31
26	82,867,421.73	7.396353212	11,203,821.58
27	82,867,421.73	7.988061469	10,373,908.87
28	82,867,421.73	8.627106386	9,605,471.18
29	82,867,421.73	9.317274897	8,893,954.79
30	-36,032,578.27	10.06265689	(3,580,821.51)
31	82,867,421.73	10.86766944	7,625,132.71
32	82,867,421.73	11.737083	7,060,308.06
33	82,867,421.73	12.67604964	6,537,322.28
34	82,867,421.73	13.69013361	6,053,076.19
35	82,867,421.73	14.78534429	5,604,700.17
36	82,867,421.73	15.96817184	5,189,537.20
37	82,867,421.73	17.24562558	4,805,127.03
38	82,867,421.73	18.62527563	4,449,191.70
39	82,867,421.73	20.11529768	4,119,621.94
40	-36,032,578.27	21.7245215	(1,658,613.21)
41	82,867,421.73	23.46248322	3,531,911.82
42	82,867,421.73	25.33948187	3,270,288.72
43	82,867,421.73	27.36664042	3,028,045.11
44	82,867,421.73	29.55597166	2,803,745.47

45	82,867,421.73	31.92044939	2,596,060.62
46	82,867,421.73	34.47408534	2,403,759.84
47	82,867,421.73	37.23201217	2,225,703.55
48	82,867,421.73	40.21057314	2,060,836.62
49	82,867,421.73	43.42741899	1,908,182.06
50	-36,032,578.27	46.90161251	(768,258.84)
51	82,867,421.73	50.65374151	1,635,958.55
52	82,867,421.73	54.70604084	1,514,776.44
53	82,867,421.73	59.0825241	1,402,570.78
54	82,867,421.73	63.80912603	1,298,676.65
55	82,867,421.73	68.91385611	1,202,478.38
56	82,867,421.73	74.4269646	1,113,405.90
57	82,867,421.73	80.38112177	1,030,931.39
58	82,867,421.73	86.81161151	954,566.10
59	82,867,421.73	93.75654043	883,857.50
60	82,867,421.73	101.2570637	818,386.58
NPV			806,305,314.89

ดังนั้นโครงการหัวเหวรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ระยะเวลา 60 ปีเท่ากับ 806,305,314.89 บาท

## 2. ระยะเวลาคืนทุน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิต่อปี}}$$

เมื่อเงินลงทุน = 66,900,000 บาท

ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยสุทธิต่อปี = 82,867,421.73 บาท

ดังนั้นโครงการหัวเหวรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมงมีระยะเวลาคืนทุน 1.92 ปี

โครงการหัวเหรีเอนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

จาก 
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0$$

โดยที่

n	=	60 ปี
ES <sub>t</sub>	=	60,993,225.70 ต่อปี
I <sub>0</sub>	=	100,000,000 บาท
i	=	8 %

ตารางที่ 4 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเหรีเอนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

ปีที่	ES	(1+i) <sup>t</sup>	Est/(1+i) <sup>t</sup>
0	-100,000,000.00	1	(100,000,000.00)
1	60,993,225.70	1.08	56,475,208.98
2	60,993,225.70	1.1664	52,291,860.17
3	60,993,225.70	1.259712	48,418,389.05
4	60,993,225.70	1.36048896	44,831,841.71
5	60,993,225.70	1.469328077	41,510,964.55
6	60,993,225.70	1.586874323	38,436,078.28
7	60,993,225.70	1.713824269	35,588,961.37
8	60,993,225.70	1.85093021	32,952,742.01
9	60,993,225.70	1.999004627	30,511,798.16
10	60,993,225.70	2.158924997	28,251,664.96
11	60,993,225.70	2.331638997	26,158,949.04
12	-39,006,774.30	2.518170117	(15,490,126.75)
13	60,993,225.70	2.719623726	22,427,082.51
14	60,993,225.70	2.937193624	20,765,817.14
15	60,993,225.70	3.172169114	19,227,608.46
16	60,993,225.70	3.425942643	17,803,341.17

17	60,993,225.70	3.700018055	16,484,575.16
18	60,993,225.70	3.996019499	15,263,495.51
19	60,993,225.70	4.315701059	14,132,866.22
20	60,993,225.70	4.660957144	13,085,987.24
21	60,993,225.70	5.033833715	12,116,654.85
22	60,993,225.70	5.436540413	11,219,124.86
23	60,993,225.70	5.871463646	10,388,078.58
24	-39,006,774.30	6.341180737	(6,151,342.46)
25	60,993,225.70	6.848475196	8,906,103.03
26	60,993,225.70	7.396353212	8,246,391.70
27	60,993,225.70	7.988061469	7,635,547.87
28	60,993,225.70	8.627106386	7,069,951.73
29	60,993,225.70	9.317274897	6,546,251.60
30	60,993,225.70	10.06265689	6,061,344.07
31	60,993,225.70	10.86766944	5,612,355.62
32	60,993,225.70	11.737083	5,196,625.58
33	60,993,225.70	12.67604964	4,811,690.35
34	60,993,225.70	13.69013361	4,455,268.84
35	60,993,225.70	14.78534429	4,125,248.93
36	-39,006,774.30	15.96817184	(2,442,782.72)
37	60,993,225.70	17.24562558	3,536,736.05
38	60,993,225.70	18.62527563	3,274,755.60
39	60,993,225.70	20.11529768	3,032,181.11
40	60,993,225.70	21.7245215	2,807,575.10
41	60,993,225.70	23.46248322	2,599,606.58
42	60,993,225.70	25.33948187	2,407,043.13
43	60,993,225.70	27.36664042	2,228,743.64
44	60,993,225.70	29.55597166	2,063,651.52
45	60,993,225.70	31.92044939	1,910,788.44

46	60,993,225.70	34.47408534	1,769,248.56
47	60,993,225.70	37.23201217	1,638,193.11
48	-39,006,774.30	40.21057314	(970,062.63)
49	60,993,225.70	43.42741899	1,404,486.55
50	60,993,225.70	46.90161251	1,300,450.51
51	60,993,225.70	50.65374151	1,204,120.84
52	60,993,225.70	54.70604084	1,114,926.70
53	60,993,225.70	59.0825241	1,032,339.54
54	60,993,225.70	63.80912603	955,869.94
55	60,993,225.70	68.91385611	885,064.76
56	60,993,225.70	74.4269646	819,504.41
57	60,993,225.70	80.38112177	758,800.38
58	60,993,225.70	86.81161151	702,592.94
59	60,993,225.70	93.75654043	650,549.02
60	60,993,225.70	101.2570637	602,360.21
NPV			590,655,143.34

ดังนั้นโครงการหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 70 ตัน/ชั่วโมงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ระยะเวลา 60 ปีเท่ากับ 590,655,143.34บาท

## 2. ระยะเวลาคืนทุน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิต่อปี}}$$

เมื่อเงินลงทุน = 100,000,000 บาท

ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยสุทธิต่อปี = 60,993,225.70บาท

ดังนั้นโครงการหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมงมีระยะเวลาคืนทุน 1.64ปี

โครงการหัวเหวรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

จาก 
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0$$

โดยที่

n	=	60ปี
ES <sub>t</sub>	=	82,867,421.73ต่อปี
I <sub>0</sub>	=	118,900,000 บาท
i	=	8 %

ตารางที่ 5.5 การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเหวรีคัพเปอร์เรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

ปีที่	ES	(1+i) <sup>t</sup>	Est/(1+i) <sup>t</sup>
0	-118,900,000.00	1	(118,900,000.00)
1	82,867,421.73	1.08	76,729,094.19
2	82,867,421.73	1.1664	71,045,457.58
3	82,867,421.73	1.259712	65,782,831.10
4	82,867,421.73	1.36048896	60,910,028.79
5	82,867,421.73	1.469328077	56,398,174.81
6	82,867,421.73	1.586874323	52,220,532.23
7	82,867,421.73	1.713824269	48,352,344.66
8	82,867,421.73	1.85093021	44,770,689.50
9	82,867,421.73	1.999004627	41,454,342.13
10	-36,032,578.27	2.158924997	(16,690,055.62)
11	82,867,421.73	2.331638997	35,540,416.78
12	82,867,421.73	2.518170117	32,907,793.31
13	82,867,421.73	2.719623726	30,470,178.99
14	82,867,421.73	2.937193624	28,213,128.70
15	82,867,421.73	3.172169114	26,123,267.31



16	82,867,421.73	3.425942643	24,188,210.47
17	82,867,421.73	3.700018055	22,396,491.18
18	82,867,421.73	3.996019499	20,737,491.83
19	82,867,421.73	4.315701059	19,201,381.33
20	-36,032,578.27	4.660957144	(7,730,725.08)
21	82,867,421.73	5.033833715	16,462,089.61
22	82,867,421.73	5.436540413	15,242,675.57
23	82,867,421.73	5.871463646	14,113,588.49
24	82,867,421.73	6.341180737	13,068,137.49
25	82,867,421.73	6.848475196	12,100,127.31
26	82,867,421.73	7.396353212	11,203,821.58
27	82,867,421.73	7.988061469	10,373,908.87
28	82,867,421.73	8.627106386	9,605,471.18
29	82,867,421.73	9.317274897	8,893,954.79
30	-36,032,578.27	10.06265689	(3,580,821.51)
31	82,867,421.73	10.86766944	7,625,132.71
32	82,867,421.73	11.737083	7,060,308.06
33	82,867,421.73	12.67604964	6,537,322.28
34	82,867,421.73	13.69013361	6,053,076.19
35	82,867,421.73	14.78534429	5,604,700.17
36	82,867,421.73	15.96817184	5,189,537.20
37	82,867,421.73	17.24562558	4,805,127.03
38	82,867,421.73	18.62527563	4,449,191.70
39	82,867,421.73	20.11529768	4,119,621.94
40	-36,032,578.27	21.7245215	(1,658,613.21)
41	82,867,421.73	23.46248322	3,531,911.82
42	82,867,421.73	25.33948187	3,270,288.72
43	82,867,421.73	27.36664042	3,028,045.11
44	82,867,421.73	29.55597166	2,803,745.47

45	82,867,421.73	31.92044939	2,596,060.62
46	82,867,421.73	34.47408534	2,403,759.84
47	82,867,421.73	37.23201217	2,225,703.55
48	82,867,421.73	40.21057314	2,060,836.62
49	82,867,421.73	43.42741899	1,908,182.06
50	-36,032,578.27	46.90161251	(768,258.84)
51	82,867,421.73	50.65374151	1,635,958.55
52	82,867,421.73	54.70604084	1,514,776.44
53	82,867,421.73	59.0825241	1,402,570.78
54	82,867,421.73	63.80912603	1,298,676.65
55	82,867,421.73	68.91385611	1,202,478.38
56	82,867,421.73	74.4269646	1,113,405.90
57	82,867,421.73	80.38112177	1,030,931.39
58	82,867,421.73	86.81161151	954,566.10
59	82,867,421.73	93.75654043	883,857.50
60	82,867,421.73	101.2570637	818,386.58
NPV			806,305,314.89

ดังนั้นโครงการหัวเผาไร้คาร์บอนเรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ระยะเวลา 60 ปีเท่ากับ 806,305,314.89 บาท

## 2. ระยะเวลาคืนทุน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิต่อปี}}$$

เมื่อเงินลงทุน = 118,900,000 บาท

ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยสุทธิต่อปี = 82,867,421.73 บาท

ดังนั้นโครงการหัวเผาไร้คาร์บอนเรทีฟสำหรับเตาขนาด 40 ตัน/ชั่วโมงมีระยะเวลาคืนทุน 1.43 ปี

โครงการหัวเหรีเอนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

1. มูลค่าปัจจุบันสุทธิ

จาก 
$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ES_t}{(1+i)^t} - I_0$$

โดยที่

n	=	60ปี
ES <sub>t</sub>	=	145,017,988.02 ต่อปี
I <sub>0</sub>	=	178,500,000 บาท
i	=	8 %

ตารางที่ ๖.การคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการหัวเหรีเอนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมง

ปีที่	ES	(1+i) <sup>t</sup>	Est/(1+i) <sup>t</sup>
0	-178,500,000.00	1	(178,500,000.00)
1	145,017,988.02	1.08	134,275,914.83
2	145,017,988.02	1.1664	124,329,550.77
3	145,017,988.02	1.259712	115,119,954.42
4	145,017,988.02	1.36048896	106,592,550.39
5	145,017,988.02	1.469328077	98,696,805.91
6	145,017,988.02	1.586874323	91,385,931.40
7	145,017,988.02	1.713824269	84,616,603.15
8	145,017,988.02	1.85093021	78,348,706.62
9	145,017,988.02	1.999004627	72,545,098.72
10	145,017,988.02	2.158924997	67,171,387.71
11	145,017,988.02	2.331638997	62,195,729.36
12	-33,482,011.98	2.518170117	(13,296,167.62)
13	145,017,988.02	2.719623726	53,322,813.24
14	145,017,988.02	2.937193624	49,372,975.22
15	145,017,988.02	3.172169114	45,715,717.79

16	145,017,988.02	3.425942643	42,329,368.33
17	145,017,988.02	3.700018055	39,193,859.56
18	145,017,988.02	3.996019499	36,290,610.71
19	145,017,988.02	4.315701059	33,602,417.32
20	145,017,988.02	4.660957144	31,113,349.37
21	145,017,988.02	5.033833715	28,808,656.83
22	145,017,988.02	5.436540413	26,674,682.25
23	145,017,988.02	5.871463646	24,698,779.86
24	-33,482,011.98	6.341180737	(5,280,091.10)
25	145,017,988.02	6.848475196	21,175,222.79
26	145,017,988.02	7.396353212	19,606,687.76
27	145,017,988.02	7.988061469	18,154,340.52
28	145,017,988.02	8.627106386	16,809,574.56
29	145,017,988.02	9.317274897	15,564,420.89
30	145,017,988.02	10.06265689	14,411,500.82
31	145,017,988.02	10.86766944	13,343,982.24
32	145,017,988.02	11.737083	12,355,539.11
33	145,017,988.02	12.67604964	11,440,313.99
34	145,017,988.02	13.69013361	10,592,883.33
35	145,017,988.02	14.78534429	9,808,225.30
36	-33,482,011.98	15.96817184	(2,096,796.82)
37	145,017,988.02	17.24562558	8,408,972.31
38	145,017,988.02	18.62527563	7,786,085.47
39	145,017,988.02	20.11529768	7,209,338.40
40	145,017,988.02	21.7245215	6,675,313.33
41	145,017,988.02	23.46248322	6,180,845.68
42	145,017,988.02	25.33948187	5,723,005.26
43	145,017,988.02	27.36664042	5,299,078.94
44	145,017,988.02	29.55597166	4,906,554.58

45	145,017,988.02	31.92044939	4,543,106.09
46	145,017,988.02	34.47408534	4,206,579.71
47	145,017,988.02	37.23201217	3,894,981.22
48	-33,482,011.98	40.21057314	(832,666.87)
49	145,017,988.02	43.42741899	3,339,318.60
50	145,017,988.02	46.90161251	3,091,961.67
51	145,017,988.02	50.65374151	2,862,927.47
52	145,017,988.02	54.70604084	2,650,858.77
53	145,017,988.02	59.0825241	2,454,498.86
54	145,017,988.02	63.80912603	2,272,684.13
55	145,017,988.02	68.91385611	2,104,337.16
56	145,017,988.02	74.4269646	1,948,460.33
57	145,017,988.02	80.38112177	1,804,129.94
58	145,017,988.02	86.81161151	1,670,490.68
59	145,017,988.02	93.75654043	1,546,750.63
60	145,017,988.02	101.2570637	1,432,176.51
NPV			1,501,670,888.39

ดังนั้นโครงการหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมงมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิที่ระยะเวลา 60 ปีเท่ากับ 1,501,670,888.39บาท

## 2 ระยะเวลาคืนทุน

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (ปี)} = \frac{\text{เงินสดจ่ายลงทุนสุทธิ}}{\text{ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้สุทธิต่อปี}}$$

เมื่อเงินลงทุน= 178,500,000 บาท

ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้เฉลี่ยสุทธิต่อปี = 145,017,988.02 บาท

ดังนั้นโครงการหัวเหวรีเจนเนอเรทีฟสำหรับเตาขนาด 150 ตัน/ชั่วโมงมีระยะเวลาคืนทุน1.23 ปี

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเสาวรา อาสาวะ เกิดเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ.2531ที่อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553