

การปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ

Performance Improvement of Copper Melting Furnace using Air Preheater

ทวีชัย สิทธิธรรม¹ และ สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์²

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เขต ปทุมวัน กรุงเทพฯ, 10330

โทร 0-2218-6637 โทรสาร 0-2252-2889 E-mail: twcsd@yahoo.com¹, fmespt@eng.chula.ac.th²

Tawatchai Sittiradoo¹ and Sompong Putivisutisak²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

Patumwan Bangkok, 10330, Thailand

Tel: 0-2218-6637 Fax: 0-2252-2889 E-mail: twcsd@yahoo.com¹, fmespt@eng.chula.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้ (Air Preheater) โดยทำการทดลองที่บริษัทผลิตสายไฟฟ้าทองแดงแห่งหนึ่ง ก่อนการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอมทองแดงที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 47.11% โดยมีความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสียประมาณครึ่งหนึ่งของพลังงานที่เข้าสู่เตาหลอมทองแดง หลังการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศพบว่า ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสียลดลงเหลือ 32.54% และประสิทธิภาพทางความร้อนของทั้งระบบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 50.44% (โดยมีประสิทธิผลทางความร้อนของอุปกรณ์อุ่นอากาศประมาณ 42.51%) ทั้งนี้ เนื่องจากปริมาณออกซิเจนในน้ำทองแดงมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิอากาศเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในลวดทองแดงลดลง ซึ่งนอกจากจะลดความร้อนสูญเสียที่ไปกับอากาศส่วนเกินในก๊าซไอเสียแล้ว ยังทำให้ลวดทองแดงที่ผลิตมีคุณภาพดีขึ้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การทำให้อากาศเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศจะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟอะเดียแบติกสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้เตาหลอมทองแดงมีสมรรถนะสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการผลิตเพิ่มขึ้น และการควบคุมปริมาณออกซิเจนในน้ำทองแดงดีขึ้นกว่าเดิม

Abstract

The aim of this research is to improve the performance of copper melting furnace using air preheater at a copper cable manufacturing factory. Before installation of the air preheater, the thermal efficiency of the copper furnace is approximately 47.11% where heat loss in the exhaust gas is nearly half of the energy input of copper melting furnace. After installation of air preheater, the accumulated oxygen in melting copper decreases with higher air temperature, thus, the amount of oxygen in flue gas also decreases (heat loss in exhaust gas reduces to 32.54%) and the thermal efficiency of system is increased to 50.44% (thermal

สาขาการอนุรักษ์พลังงานในโรงงาน

efficiency of air preheater from measurement is about 42.51 %). It can be shown that the adiabatic flame temperature is higher when the temperature of combustion air is increased. As a result, the capacity of furnace is enhanced and the accumulated oxygen in melting copper can be easily controlled.

1. บทนำ

จากการพัฒนาด้านเศรษฐกิจและสังคมที่ผ่านมา ประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงทางด้านเทคโนโลยี เศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะการสนับสนุนส่งเสริมให้ประเทศไทยเป็นแหล่งอุตสาหกรรมที่สำคัญของภูมิภาคเอเชีย ส่งผลให้มีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นหลายแห่งทั่วประเทศ ซึ่งหากขาดการควบคุมดูแลที่ดีแล้ว ก็จะทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม และการใช้พลังงานได้

โรงงานอุตสาหกรรมหลอมโลหะ เป็นกลุ่มอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยเชื้อเพลิงที่ใช้มีทั้งน้ำมันเตาและก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งสถานการณ์ราคาเชื้อเพลิงที่เพิ่มสูงขึ้นทุกวัน ทำให้ปัจจุบันโรงงานต่างๆ หันมาสนใจในการประหยัดพลังงานด้วยวิธีการต่างๆ มากขึ้น โดยเฉพาะการใช้เทคนิคทางด้านวิศวกรรมเพื่อลดต้นทุนการผลิตและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

กระบวนการผลิตของโรงงานหลอมโลหะทั่วไปมีอุปกรณ์ที่สำคัญคือเตาหลอม สำหรับโรงงานผลิตสายไฟฟ้าทองแดงซึ่งทำการทดลองในที่นี้ มีเตาหลอม 2 เตา คือเตาหลอมอลูมิเนียมที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง และเตาหลอมทองแดงที่ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว ซึ่งเตาหลอมทั้งสองจะทำการหลอมทองแดงและอลูมิเนียม โดยมีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงก๊าซปิโตรเลียมเหลว 1,427,800 กิโลกรัม และก๊าซธรรมชาติ 43,549 MMBTU

เพื่ออนุรักษ์พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต โรงงานได้เคยทดลองเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดงจากก๊าซปิโตรเลียมเหลวมาเป็นก๊าซธรรมชาติ โดยได้รับความร่วมมือจากการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย แต่ก็ไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากประสบปัญหาคือ

กำลังการผลิตตกลง ซึ่งไม่สามารถสรุปสาเหตุได้ว่าเกิดจากอะไร และไม่ได้มีการบันทึกข้อมูลต่างๆไว้ เป็นเหตุให้โรงงานกลับไปใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตเช่นเดิม แต่เมื่อคำนึงถึงผลในระยะยาว โรงงานจึงได้ขอความร่วมมือไปยังทบวงมหาวิทยาลัยเพื่อเข้าร่วมในโครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชนในเชิงพาณิชย์กับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเพื่อดำเนินงานวิจัยการใช้ก๊าซธรรมชาติในเตาหลอมทองแดง ซึ่งจากการตรวจสอบภาพโรงงานเบื้องต้นพบว่าโรงงานมีอุปกรณ์อุ่นอากาศ แต่ยังไม่อยู่ในสภาพที่ไม่สามารถใช้งานได้ ต้องทำการซ่อมแซมและปรับปรุง ซึ่งอุปกรณ์อุ่นอากาศนี้จะเป็นตัวที่อุ่นอากาศเผาไหม้ก่อนที่จะทำการเผาไหม้ โดยการอุ่นอากาศให้ร้อนมีส่วนดีคืออากาศที่ถูกอุ่นจะเป็นตัวเร่งการเผาไหม้ทำให้เชื้อเพลิงเผาไหม้ได้ง่ายขึ้น ช่วยลดอากาศส่วนเกินลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช [1] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเตาชนิดท่อไฟ ซึ่งในงานวิจัยได้สร้างอุปกรณ์ทดลองและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนไปยังผนังท่อไฟที่สภาวะต่างๆกัน โดยเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการทำนายการถ่ายเทความร้อนและเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดลองจริง จากผลการทดลองพบว่าอัตราความร้อนที่ดูดกลืนไว้โดยผนังท่อไฟคือผลรวมของอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนจากก๊าซร้อนไปยังผนังท่อไฟ และพบว่าที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง LPG ต่างๆ ที่ 1 kg/hr ปริมาณอากาศส่วนเกิน 10% และอุณหภูมิผนังท่อไฟ 650 R จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี 57% การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน 43% แต่เมื่อใช้อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 5 kg/hr สำหรับปริมาณอากาศส่วนเกิน และอุณหภูมิผนังท่อไฟเท่าเดิมจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสี 80% และอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน 20% และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่ามีความสอดคล้องกันดี Wibuswas and Ajson [2] ได้ศึกษาและวิเคราะห์พลังงานและอเนลิมิตีของเตาหลอมแก้ว พบว่าประสิทธิภาพตามกฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์มีค่าประมาณ 18.2-20.2% และ 13.3-14.5% ตามลำดับ และการนำไอเสียกลับมาให้ความร้อนแก่น้ำมันเตาแทนไฟฟ้าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณปีละ 1.13 ล้านบาท Morita and Tanigawa [3] ได้ทำการศึกษาออกแบบเตาหลอมสมรรถนะสูงโดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้อากาศที่อุณหภูมิสูง พบว่าสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 30% และลดมลภาวะอันเนื่องมาจากสาร NO_x ลงได้ถึง 20% สมรัฐ เกิดสุวรรณ [4] ได้นำเสนอบทความเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเผาไหม้ด้วยอากาศที่อุณหภูมิสูงโดยใช้ Recuperator หรือ Regenerator ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ทำให้สามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิงได้ถึง 30% (และทำให้ลดการปล่อย CO₂ ลงด้วย) รวมทั้งลดขนาดของอุปกรณ์การเผาไหม้ลงได้ถึง 25% เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่มีใช้อยู่ทั่วไป และลดความเข้มข้นของมลพิษลงได้ถึง 50% ในขณะที่ยังคงสามารถรักษาสมรรถนะของระบบได้เท่าเดิม ในประเทศญี่ปุ่นมีการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวกับเตาเผาอุตสาหกรรมมากกว่าหนึ่งร้อยแห่ง และเริ่มมีการประยุกต์เทคโนโลยีดังกล่าวกับ

กระบวนการทางความร้อนอื่นๆไม่ว่าจะเป็น gasification, incineration, การผลิตกำลัง และการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้โรงงานสามารถประหยัดพลังงาน และลดต้นทุนการผลิตในระยะยาว โดยจะต้องมีการปรับปรุงระบบเตาหลอมทองแดงของโรงงานให้สามารถใช้ก๊าซธรรมชาติได้ และเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและปรับปรุงสมรรถนะของระบบเตาหลอมทองแดงโดยการใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่อให้เกิดการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพและมีกำลังการผลิตตามที่โรงงานต้องการต่อไป โดยเตาหลอมทองแดงที่ใช้ในงานวิจัยเป็นเตาหลอมทรงกระบอกสูง (Shaft Furnace) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเตามีหัวเผารอบเตาซึ่งแบ่งเป็น 3 แถว คือแถว A มีหัวเผา 8 หัว แถว B มีหัวเผา 9 หัว และแถว C มีหัวเผา 9 หัว รวมทั้งหมด 26 หัว และอุปกรณ์อุ่นอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ก เตาหลอมทองแดงที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 1 ข หัวเผาแถว A และ B



รูปที่ 1ค หัวเผาแกว C



รูปที่ 2 อุปกรณ์อุ่นอากาศ

2. ทฤษฎี

2.1 อุปกรณ์อุ่นอากาศ (Air Preheater)

เทคโนโลยีการเผาไหม้โดยการอุ่นอากาศและเชื้อเพลิงเป็นวิธีการที่ก่อให้เกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพ อากาศที่เข้าสู่กระบวนการเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งทำให้การใช้พลังงานเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการลดลง และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้สูงขึ้นด้วย ดังนั้นถ้าสามารถที่จะทำให้อากาศเผาไหม้ (Combustion air) มีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้และเพิ่มความสามารถในการผลิต

เนื่องจากระบบเตาหลอมทองแดงของโรงงานผลิตสายไฟฟ้าทองแดงแห่งนี้ เป็นระบบที่ซื้อต่อมาจากต่างประเทศ ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหลอมทองแดงคือ ก๊าซธรรมชาติ แต่เมื่อนำมาติดตั้งที่โรงงาน ในปี 2537 ได้ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมแทน ซึ่งก๊าซปิโตรเลียมเหลวมีค่าความร้อนสูง สามารถที่จะทำให้ทองแดงหลอมได้โดยที่ไม่ต้องอุ่นอากาศเผาไหม้ แต่เมื่อโรงงานหันมาใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีค่าความร้อนน้อยกว่าก๊าซปิโตรเลียมเหลว

สาขาการอนุรักษ์พลังงานในโรงงาน

การใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศช่วยอุ่นอากาศก่อนเผาไหม้จะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ และประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถที่จะเพิ่มกำลังการผลิตเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมในอนาคตด้วย

2.2 อุปกรณ์อุ่นอากาศที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับอุปกรณ์อุ่นอากาศที่ใช้ในโรงงาน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ อุปกรณ์อุ่นอากาศมีลักษณะเป็นทรงกระบอก สูง 13.17 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 250 มิลลิเมตร ผังด้านในทำด้วยอิฐทนไฟ ซึ่งด้านในอุปกรณ์อุ่นอากาศประกอบไปด้วยท่อโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร เรียงแถวเดียวโดยรอบทรงกระบอกทั้งหมด 30 ท่อ อัตราการไหลสูงสุดของอากาศภายในอุปกรณ์เท่ากับ $12,000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ และสามารถอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 400°C ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวนี้สร้างโดยบริษัท Dr-Ing Schack&Co. เมือง Dusseldorf ประเทศเยอรมนี โดยอุปกรณ์อุ่นอากาศดังกล่าวเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับอุ่นอากาศโดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้จากหัวเผาโดยตรง

2.3 สมมติฐานที่ใช้ในการพิจารณาอุปกรณ์อุ่นอากาศ

1. สมมุติว่าการทำงานอยู่ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady State)
2. พิจารณาว่าพลังงานศักย์และพลังงานจลน์มีผลต่อระบบน้อยมากและจากข้อสมมติฐานที่ว่าการไหลอยู่ในสภาวะคงตัว ดังนั้นความเร็วของของไหลที่ไหลผ่านอุปกรณ์อุ่นอากาศจึงมีค่าคงที่ตลอดอุปกรณ์อุ่นอากาศ
3. ไม่คิดแหล่งให้ความร้อน (Source) และแหล่งรับความร้อน (Sink) ในผนังของอุปกรณ์อุ่นอากาศหรือในของไหล
4. อุณหภูมิของของไหลที่ไหลผ่านหน้าตัดใดๆของอุปกรณ์อุ่นอากาศมีค่าคงที่
5. คุณสมบัติต่างๆของของไหลมีค่าคงที่และแทนได้ด้วยค่าเฉลี่ยของของไหลที่เข้าและออกอุปกรณ์อุ่นอากาศ
6. ความเร็วของของไหลที่หน้าตัดใดๆมีความสม่ำเสมอ (Uniform velocity)
7. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอื่นๆมีค่าคงที่ตลอดทั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

2.4 การอุ่นอากาศสำหรับการเผาไหม้

โดยส่วนใหญ่แล้วอุตสาหกรรมที่มีพลังงานความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องจะมีการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบให้ดีขึ้นและช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยความร้อนที่นำกลับมาใช้ใหม่นี้ จะถูกนำกลับมาเพื่ออุ่นอากาศและเชื้อเพลิง หรืออุ่นวัตถุดิบก่อนที่จะทำการเผาไหม้ แต่เนื่องจากเหตุผลทางด้านความปลอดภัย และการเกิดเขม่า ทำให้การอุ่นเชื้อเพลิงให้มีอุณหภูมิสูงไม่ได้รับความนิยมมากนัก โดยมากจะทำการอุ่นอากาศที่จะเข้าทำการเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงก่อนที่จะทำการเผาไหม้แทน เพราะอากาศที่ถูกอุ่น

ให้มีอุณหภูมิสูงจะเป็นตัวเร่งให้เกิดการเผาไหม้ได้ง่ายขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น เปลวไฟที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพมากกว่าอากาศที่ไม่ได้อุ่น รวมทั้งทำให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงขึ้น ซึ่งอุณหภูมิเปลวไฟเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปสู่วัสดุ โดยอุณหภูมิเปลวไฟจะสูงมากถ้าตัวออกซิไดซ์เป็นออกซิเจนบริสุทธิ์ เช่น ก๊าซมีเทน (CH₄) เมื่อเผาไหม้กับอากาศจะมีอุณหภูมิเปลวไฟประมาณ 2300 K ในขณะที่เมื่อเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์จะมีอุณหภูมิเปลวไฟประมาณ 3000 K เนื่องจากในอากาศจะมีส่วนผสมของก๊าซไนโตรเจน ซึ่งจะเป็นตัวเจือจางทำให้อุณหภูมิเปลวไฟลดลง นอกจากนี้การอุ่นอากาศยังทำให้มีฟลักซ์ความร้อนที่มีค่าสูงกว่าอากาศธรรมดาที่ไม่ผ่านกระบวนการอุ่น อีกทั้งยังทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน และลดการปล่อยก๊าซ CO₂ ลง เทคโนโลยีการเผาไหม้ด้วยอากาศที่อุณหภูมิสูงนี้ เป็นวิธีหนึ่งที่ทำให้สามารถประหยัดการใช้เชื้อเพลิง รวมทั้งลดขนาดความเข้มข้นของมลพิษลงได้ ในขณะที่ยังคงสามารถรักษาสมรรถนะของระบบได้สูงเท่าเดิม กล่าวโดยสรุป ก็คือการเผาไหม้ด้วยอากาศที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีขึ้นนั่นเอง

2.4.1 เทอร์โมไดนามิกส์ของกระบวนการเผาไหม้

กระบวนการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง เป็นกระบวนการที่อากาศเผาไหม้ถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิอากาศปกติ เพื่อช่วยให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี เพราะพลังงานที่อยู่ในอากาศที่อุ่นจะเป็นตัวเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้เร็ว ทำให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ดีขึ้น โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ แสดงได้ดังสมการ

$$f_{T_0}^{T_f} C_p dT = Q_c + Q_a = H_f + H_0 \quad (1)$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น
 T_f คือ อุณหภูมิสุดท้าย
 Q_c คือ ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี
 Q_a คือ พลังงานที่เพิ่มเข้า
 H_0 คือ เอนทาลปีที่สภาวะเริ่มต้น
 H_f คือ เอนทาลปีที่สภาวะสุดท้าย

โดยพลังงานความร้อนเนื่องจากก๊าซร้อนจากการเผาไหม้จะช่วยให้อุณหภูมิเปลวไฟมีค่าสูงขึ้น โดยพลังงานบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) จะมีค่าสูงกว่าพลังงานในระดับปกติ ซึ่งเรียกพลังงานส่วนเกินนี้ว่า การเผาไหม้ของเอนทาลปีส่วนเกิน (Excess enthalpy combustion) ซึ่งโดยทั่วไปการนำเอนทาลปีไหลวนกลับมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้ จะทำให้เปลวไฟมีเสถียรภาพมากขึ้น สามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย และเป็นการประหยัดพลังงาน นอกจากนี้ฟลักซ์ความร้อนของเปลวไฟจากอากาศที่ถูกอุ่นจะมีค่าสูงทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถนิยามประสิทธิภาพการเผาไหม้ดังนี้

$$\eta_{\text{comb}} = \frac{(\text{CO}_2)_{\text{flue gas}}}{(\text{CO}_2 + \text{CO})_{\text{flue gas}}} \quad (2)$$

เมื่อ η_{comb} คือ ประสิทธิภาพการเผาไหม้
 CO_2 คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซไอเสีย
 CO คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซไอเสีย

2.5 การทำสมดุลความร้อน (Heat Balance)

(รายละเอียดของสมการต่างๆสามารถดูได้จาก [5])

2.5.1 วิธีคำนวณความร้อนเข้า

1) ความร้อนของเชื้อเพลิง (\dot{Q}_f)

ความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นปริมาณความร้อนที่ได้จากการสันดาปก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งคำนวณจาก

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f \times \text{LHV} \quad (3)$$

เมื่อ \dot{Q}_f คือ ความร้อนของเชื้อเพลิง (MJ/hr)

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

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/Nm³)

2) ปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง (\dot{Q}_{sf})

ถ้าไม่มีการอุ่นเชื้อเพลิงด้วยความร้อนจากแหล่งภายนอก เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าโดยอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายนอก ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงจึงเป็นศูนย์ แต่ในกรณีที่มีการอุ่นเชื้อเพลิง สามารถคำนวณปริมาณความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{sf} = \dot{m}_f \times C_{pf} \times (T_f - T_{\text{amb}}) \quad (4)$$

เมื่อ \dot{Q}_{sf} คือ ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิง (MJ/hr)

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

C_{pf} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (kJ/Nm³ °C)

T_f คือ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงที่ถูกอุ่น (°C)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

3) ปริมาณความร้อนสัมผัสของอากาศ (\dot{Q}_{sa})

ถ้าไม่มีการอุ่นอากาศโดยแหล่งความร้อนภายนอก ความร้อนสัมผัสของอากาศสำหรับการสันดาปจะเป็นศูนย์ แต่ในกรณีที่มีการอุ่นอากาศโดยแหล่งความร้อนภายนอก ปริมาณความร้อนสัมผัสของอากาศสามารถคำนวณจาก

$$\dot{Q}_{sa} = \dot{m}_a \times C_{pa} \times (T_a - T_{\text{amb}}) \quad (5)$$

เมื่อ \dot{Q}_{sa} คือ ความร้อนสัมผัสของอากาศ (MJ/hr)

\dot{m}_a คือ ปริมาณอากาศ (Nm³/hr)

C_{pa} คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ถูกอุ่น (kJ/Nm³ °C)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศที่ถูกอุ่น (°C)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

2.5.2 วิธีคำนวณความร้อนออก

1) ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัตถุ (\dot{Q}_m)

ขณะที่วัตถุได้รับความร้อนออกจากอุปกรณ์ ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัตถุมีปริมาณดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_m = \dot{m}_m \times C_{p,m} \times (T_{m,out} - T_{m,in}) + \dot{m}_m \times LH \quad (6)$$

เมื่อ \dot{Q}_m คือ ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับวัตถุ (MJ/hr)

\dot{m}_m คือ ปริมาณของวัตถุได้รับความร้อน (kg/hr)

$C_{p,m}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะเฉลี่ยของวัตถุได้รับความร้อน (kJ/kg °C)

$T_{m,out}$ คือ อุณหภูมิของวัตถุได้รับความร้อนออกจากระบบ (°C)

$T_{m,in}$ คือ อุณหภูมิของวัตถุได้รับความร้อนเข้าสู่ระบบ (°C)

LH คือ ความร้อนแฝงของวัตถุได้รับความร้อน (kJ/kg)

2) ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย (\dot{Q}_{flue})

การคำนวณความร้อนที่ถูกพาออกไปโดยก๊าซไอเสียอย่างถูกต้องจะต้องแยกการคำนวณออกเป็นของก๊าซสันดาปแห้งและของไอน้ำในก๊าซเสีย แต่เนื่องจากตามปกติไอน้ำจากความร้อนในอากาศที่ใช้สันดาปและไอน้ำที่พ่นเข้าไปในเตาที่มีปริมาณน้อย ดังนั้นจึงคำนวณความร้อนที่มีอยู่ในก๊าซเสียแห้งเพียงอย่างเดียว ดังสมการ

$$\dot{Q}_{flue} = \dot{m}_f \times G \times C_{p,flue} \times 4.187 \times (T_{flue} - T_r) \quad (7)$$

เมื่อ \dot{Q}_{flue} คือ ความร้อนสูญเสียในก๊าซไอเสีย (MJ/hr)

\dot{m}_f คือ ปริมาณเชื้อเพลิง (Nm³/hr)

G คือ ปริมาณก๊าซเสียจริง (Nm³/Nm³)

$C_{p,flue}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของก๊าซไอเสีย (kcal/Nm³ K)

T_{flue} คือ อุณหภูมิของก๊าซไอเสีย (°C)

T_r คือ อุณหภูมิอ้างอิง (°C)

3) ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น (\dot{Q}_w)

ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็นเป็นความร้อนที่เตาหรืออุปกรณ์ให้ความร้อนถ่ายเทสู่น้ำหล่อเย็นที่ทำการหล่อเย็นเตาหรืออุปกรณ์ให้ความร้อน ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w \times \rho_w \times C_{p,w} \times (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (8)$$

เมื่อ \dot{Q}_w คือ ปริมาณความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น (MJ/hr)

\dot{m}_w คือ ปริมาณน้ำหล่อเย็น (m³/hr)

ρ_w คือ ความหนาแน่นของน้ำหล่อเย็น (kg/m³)

$C_{p,w}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น (kJ/kg °C)

สาขาการอนุรักษ์พลังงานในโรงงาน

$T_{w,out}$ คือ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก (°C)

$T_{w,in}$ คือ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า (°C)

4) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา (\dot{Q}_{wall})

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตาเป็นความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตาหรืออุปกรณ์ให้ความร้อน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{wall} = \frac{1}{1,000} \left[\sum_r^N \left[2.2(T_{wall} - T_{amb})^{5/4} + 4.88 \times \varepsilon \times \left[\left(\frac{T_{wall} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{amb} + 273}{100} \right)^4 \right] \right] \right] \times A_f \times 4.186 \quad (9)$$

เมื่อ \dot{Q}_{wall} คือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียผ่านผนังเตา (MJ/hr)

T_{wall} คือ อุณหภูมิผนังเตา (°C)

T_{amb} คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (°C)

A_f คือ พื้นที่ผิวเตา (m²)

ε คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของผิวเตา

5) ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (\dot{Q}_{CO})

ความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ สามารถหาได้จาก

$$\dot{Q}_{CO} = \dot{m}_f \times \rho_f \times G \times CO \times 13.76 \times \frac{1}{10^6} \quad (10)$$

เมื่อ \dot{Q}_{CO} คือ ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (MJ/hr)

\dot{m}_f คือ ปริมาณเชื้อเพลิง (Nm³/hr)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/Nm³)

G คือ ปริมาณก๊าซเสียจริง (Nm³/Nm³)

CO คือ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเสีย (ppm)

6) ปริมาณความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (\dot{Q}_{un})

ปริมาณความร้อนสูญเสียอื่น ๆ ที่ไม่สามารถวัดค่าได้ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q}_{un} = (\dot{Q}_f + \dot{Q}_{sf} + \dot{Q}_{sa}) - (\dot{Q}_{sm} + \dot{Q}_{flue} + \dot{Q}_w + \dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{co}) \quad (11)$$

เมื่อ \dot{Q}_{sm} คือ ความร้อนสัมผัสของวัตถุ (MJ/hr)

2.5.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหลอม

ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นค่าที่ใช้ในการประเมินสมรรถนะของอุปกรณ์ให้ความร้อน ซึ่งสามารถคำนวณได้ถ้าทำสมดุลความร้อน ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าจำกัดความดังนี้

ประสิทธิภาพเชิงความร้อน = อัตราส่วนของความร้อนยังผลต่อความร้อนที่ป้อน

$$\eta_{th, furnace} = \frac{\dot{Q}_m}{\dot{Q}_f + \dot{Q}_{sa}} = \frac{\dot{Q}_{useful}}{\dot{Q}_{input}} \quad (12)$$

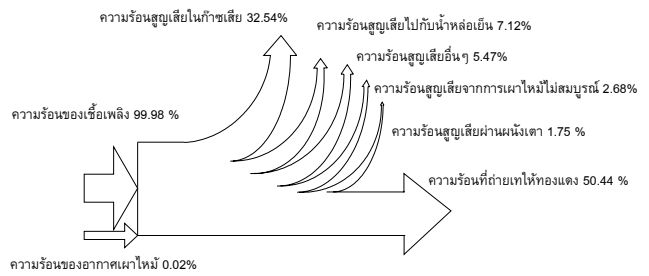
เมื่อ $\eta_{th, furnace}$ คือ ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอม
 \dot{Q}_{useful} คือ ปริมาณความร้อนยังผล (MJ/hr)
 \dot{Q}_{input} คือ ปริมาณความร้อนป้อนเข้า (MJ/hr)

3. ผลการทดลอง

ผลลัพธ์จากการวัดค่าและคำนวณปริมาณความร้อนที่เข้าและออก จากเตาหลอมทองแดงก่อนและหลังการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในเตาหลอมทองแดง แสดงในตารางที่ 1 และแสดงเป็นแผนภาพ Sankey diagram ได้ดังรูปที่ 3

ตารางที่ 6.5 ค่าเปรียบเทียบความร้อนเข้าและออกจากเตาหลอมทองแดงก่อนและหลังการใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ (เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง)

รายการ	หน่วย	ก่อนใช้		หลังใช้	
		ค่า	%	ค่า	%
ความร้อนเข้า					
ความร้อนของเชื้อเพลิง	MJ/hr	27,838	99.83	26,274	99.98
ความร้อนของอากาศช่วยเผาไหม้	MJ/hr	48	0.17	4.61	0.02
ความร้อนเข้ารวม	MJ/hr	27,887	100.00	26,279	100.00
ความร้อนออก					
ความร้อนที่ถ่ายเทให้กับทองแดง	MJ/hr	13,138	47.11	13,255	50.44
ความร้อนสูญเสียในก๊าซเสีย	MJ/hr	12,401	44.47	8,551	32.54
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	MJ/hr	744	2.67	1,872	7.12
ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	MJ/hr	424	1.52	460	1.75
ความร้อนสูญเสียจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์	MJ/hr	971	3.48	704	2.68
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	MJ/hr	208	0.75	1,436	5.47
ความร้อนออกรวม	MJ/hr	27,887	100.00	26,279	100.00



รูปที่ 3x Sankey diagram ของเตาหลอมทองแดงหลังการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

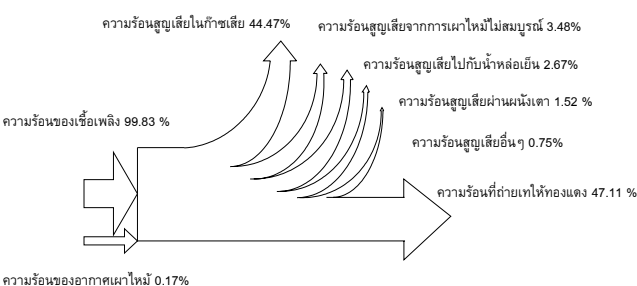
4. วิเคราะห์และสรุปผล

จากการทดลองใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอมทองแดงเมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงสายไฟฟ้าบางกอกเคเบิล จำกัด พบว่า

1. ประสิทธิภาพทางความร้อนของทั้งระบบการหลอมทองแดงมีค่าประมาณ 50.44 % หลังติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ
2. ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซไอเสียลดลงจาก 44.47 % เป็น 32.54 % เนื่องจากเมื่อติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศช่วยอุ่นอากาศเผาไหม้แล้วทำให้ปริมาณออกซิเจนในก๊าซไอเสียลดลงจาก 14.25 % เป็น 13.03 % ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนอากาศลดลงจาก 3.11 เป็น 2.63 ซึ่งปริมาณออกซิเจนดังกล่าวจะเป็นตัวพาความร้อนในระบบออกไปกับไอเสีย ดังนั้นเมื่อค่าออกซิเจนในก๊าซไอเสียลดลงจึงทำให้ปริมาณก๊าซไอเสียที่ออกจากระบบมีค่าลดลงด้วย จึงเห็นได้ว่าการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้มีผลให้ปริมาณอากาศส่วนเกินที่ป้อนลดลง ซึ่งจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณออกซิเจนที่เจือปนในน้ำทองแดง ทำให้การผลิตลวดทองแดงของโรงงานมีคุณภาพมากขึ้น
3. ปริมาณการไหลของน้ำทองแดงเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2 ตันต่อชั่วโมง ทั้งนี้เนื่องจากทองแดงในเตาละลายได้ดีขึ้น ช่วยลดปัญหาการละลายของทองแดงไม่ทันต่อการหล่อ ปัญหา น้ำทองแดงอุดตันหัวเผา เพราะอากาศเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเปลวไฟสูงขึ้น เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงทำให้ทองแดงละลายได้ดี

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจาก ทบวงมหาวิทยาลัยสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ และขอขอบคุณ ผศ.ดร.ก่อเกียรติ บุญชูกุล อ.ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์ คุณพร้อมพันธ์ แสงแก้ว และบุคลากรของบริษัทผลิตสายไฟฟ้าทองแดงทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำระหว่างทำการทดลอง



รูปที่ 3n Sankey diagram ของเตาหลอมทองแดงก่อนการติดตั้งอุปกรณ์อุ่นอากาศ

เอกสารอ้างอิง

1. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเตาชนิดท่อไฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
2. Wibulswas, P., and Ajson, K. Energy Recovery and Cogeneration in a Thai Glass Factory. การประชุมทางวิชาการร่วมสาขาวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมเคมี, การถ่ายเทความร้อน มวลและโมเมนตัม '32 (ภาคกระบวนการความร้อนและเคมี), วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ 12-13 ธันวาคม 2532 : 13-1 – 13-18.
3. Morita, M., and Tanigawa, T. Optimal Design for High Performance Industrial Furnace Applied High Temperature Air Combustion Technology. Kagaku Kogaku Ronbunshu 27 (2000): 227 – 235.
4. สมรัฐ เกิดสุวรรณ. เทคโนโลยีการเผาไหม้ด้วยอากาศที่อุณหภูมิสูง. วารสารวิศวกรรมสาร (กรกฎาคม 2546): 92 – 94.
5. ธวัชชัย สิทธิสระดี. การปรับปรุงสมรรถนะของเตาหลอมทองแดงโดยใช้อุปกรณ์อุ่นอากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.