

# การปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาดเล็กโดยการใช้อิเล็กทรอนิกส์

มโน จันทร์กระจ่าง<sup>1</sup> และ พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย อาคารสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา

ถนนพระราม 4 แขวงพระโขนง เขตคลองเตย กรุงเทพฯ 10110

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ. พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Mano@isit.or.th , Pongtorn.c@chula.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลการศึกษาคือการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาดเล็ก (Small ladle) ด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า แทนการอุ่นด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล เบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการศึกษามีขนาดความจุ 1 ตันน้ำเหล็ก หัวเผาที่ใช้ในการทดลองมีอัตราการใช้น้ำมัน เท่ากับ 10 ลิตรต่อชั่วโมง ส่วนฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาทำด้วยวัสดุ निकิลโครเมียมซึ่งสามารถใช้งานได้ในช่วง อุณหภูมิที่ต้องการ และให้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 30 kW

จากผลการทดลอง ฮีตเตอร์ไฟฟ้าสามารถอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้ตามต้องการ ประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการอุ่นด้วยหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซลและการอุ่นด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าเท่ากับ 22% และ 39% ตามลำดับ นอกจากนี้ในการอุ่นเบ้ารับ น้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้สภาพแวดล้อมที่สะอาดและอุณหภูมิต่ำกว่าในกรณีที่อุ่นด้วยหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซล

## คำสืบค้น

การอนุรักษ์พลังงาน, การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก, ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

# Improvement of Small Ladle Preheating by using Electricity

***Mano Chankrachang<sup>1</sup> and Pongtorn Charunyakorn<sup>2</sup>***

*Foundation for Industrial Development Iron and Steel Institute of Thailand*

*1st-2nd Fl., Bureau of Industrial Sectors Development Building,*

*Soi Trimitr, Rama IV Rd, Prakanong, Klong-Toey,*

*Bangkok, 10110*

*Department of Mechanical Engineering, Hans Bantli Bldg,*

*Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,*

*Phaya Thai Road, Wang Mai, Pathum Wan,*

*Bangkok, 10330*

*[Mano@isit.or.th](mailto:Mano@isit.or.th) , [Pongtorn.c@chula.ac.th](mailto:Pongtorn.c@chula.ac.th)*

## **ABSTRACT**

This paper presents the experimental results to confirm the feasibility and energy saving in small ladle preheating by employing electric heater in place of diesel oil burner. The ladle in this study has a capacity of 1 ton molten steel. The burner has a firing rate of 10 liters of diesel oil per hour. The electric heater is made of Nickel - Chromium equivalent with working temperature in the range of application. The heating power of the heater is 30 kW.

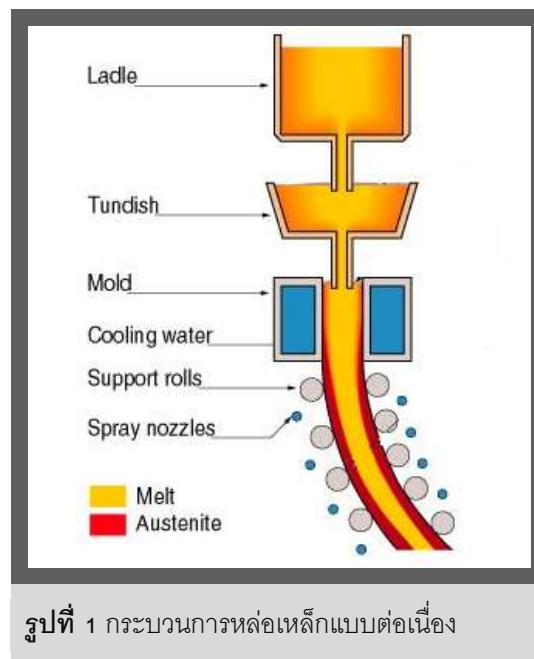
The results show that electric heater preheating is satisfactory. The efficiencies of ladle preheating with diesel oil burner and electric heater are 22% and 39% respectively. Moreover in electric heater preheating, working environment is significantly cleaner and cooler, compared with burner preheating.

## **KEYWORDS**

Energy Conservation, Ladle Preheating, Electric Heater

## I. บทนำ

อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่งที่มีการใช้พลังงานสูงมากในขั้นตอนต่างๆ ดังนั้นการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุปกรณ์และกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเหล็กจึงเป็นสิ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งในขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting) การถ่ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electrical Arc Furnace, EAF) ลงในเบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle) เพื่อเคลื่อนย้ายไปสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง น้ำเหล็กจะถูกถ่ายลงในอ่างพักน้ำเหล็ก (Tundish) แล้วจึงปล่อยให้ไหลผ่านแม่พิมพ์ทองแดง (Mold) ที่มีระบบการหล่อเย็น โดยน้ำเหล็กที่กำลังแข็งตัวจะถูกดึงอย่างต่อเนื่องผ่านเครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machines, CCM) จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนย้ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่องจำเป็นต้องใช้เบ้ารับน้ำเหล็กในการขนถ่ายน้ำเหล็ก ซึ่งในการใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจำเป็นต้องอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อกำจัดความชื้นออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กและปรับอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายจากสภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงฉับพลัน (Thermal shock) นอกจากนี้เพื่อลดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กสู่สิ่งแวดล้อมจึงมีอุณหภูมิต่ำเกินกว่าอุณหภูมิสำหรับการเทหล่อ (Tapping Temperature) ซึ่งทำให้น้ำเหล็กติดอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กและไม่สามารถถ่ายลงในอ่างพักน้ำเหล็กได้



รูปที่ 1 กระบวนการหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น ส่วนมากใช้หัวเผาที่ใช้ น้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยการพ่นเปลวไฟจากหัวเผาเข้าไปในเบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ปะทะกับก้นเบ้ารับน้ำเหล็กหรือพบกับแรงต้านของก๊าซร้อนที่ส่วนก้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก ก็จะแผ่ออกและไหลย้อนไปตามผนังออกมาที่ปากของเบ้ารับน้ำเหล็ก และถูกพ่นทิ้งออกไปจากปากเปิดของเบ้ารับน้ำเหล็กโดยตรง โดยแสดงในรูปที่ 2 โรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้เบ้ารับน้ำเหล็กขนาดใหญ่ สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ในการนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ เช่น การใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด รีคูเปอเรเตอร์ (Recuperator) หรือ หัวเผาชนิดรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burner) ในการนำความร้อนจากไอเสียมาทำการอุ่นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ (Air Preheating) ซึ่งจำเป็นต้องมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนจัดซื้อและติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติม แต่สำหรับโรงงานหล่อเหล็กที่มี

การใช้เข้รับน้ำเหล็กขนาดเล็ก การติดตั้งอุปกรณ์ในการนำไอเสียกลับมาใช้ใหม่อาจไม่เหมาะสมและไม่คุ้มค่ากับการลงทุน จึงทำให้ต้องหาทางเลือกอื่นๆ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กขนาดเล็กต่อไป

งานวิจัยนี้จะเน้นไปที่เข้รับน้ำเหล็กขนาดเล็กซึ่งใช้ในโรงงานหล่อเหล็กส่วนใหญ่ ในการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กขนาดเล็กด้วยน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาตินั้นประสิทธิภาพการใช้พลังงานต่ำมาก เนื่องจากเข้รับน้ำเหล็กขนาดเล็กมีพื้นที่และเวลาในการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซสันดาปไปสู่ผนังของเข้รับน้ำเหล็กน้อย ทำให้มีการปล่อยไอเสียที่อุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพการใช้พลังงานโดยรวมจึงต่ำ



รูปที่ 2 ตัวอย่างการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กขนาดความจุ 1 ตันน้ำเหล็ก (ซ้ายมือ) และ 25 ตันน้ำเหล็ก (ขวามือ)

จากการศึกษาเบื้องต้นพบข้อมูลที่น่าสนใจหลายประการ ตัวอย่างเช่น [1] การตรวจวัดการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กขนาด 25 ตันที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นโครงการศึกษาร่วมกันระหว่างสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย กับคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จักรวูธ และคณะ) พบว่าอุณหภูมิที่ปล่อยทิ้งมีค่าระหว่าง 600-1000°C และ มีการสูญเสียพลังงานถึง 25-45% คาดว่าในการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กขนาดเล็กจะมีการสูญเสียความร้อนมากกว่าการอุ่นด้วยเข้รับน้ำเหล็กขนาดใหญ่

[2] CMP R&D application center รายงานว่าการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยน้ำมันหรือแก๊สมีประสิทธิภาพเพียง 5-15% เท่านั้น และการอุ่นด้วยไฟฟ้ามีโอกาสเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ได้ถึง 80%

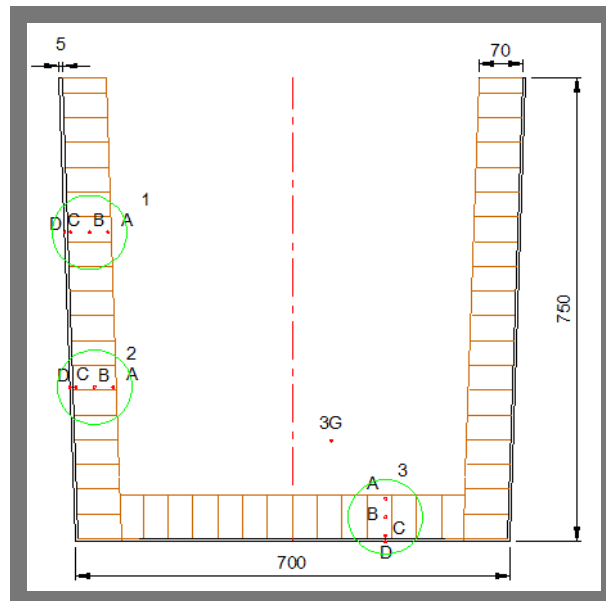
## II. เข้รับน้ำเหล็ก (Ladle)

เข้รับน้ำเหล็กที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีขนาดความจุ 1 ตันน้ำเหล็ก มีลักษณะรูปทรงและมีมิติส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 การก่อผนังด้านข้างของเข้รับน้ำเหล็กก่อด้วยปูนซีเมนต์耐火 ซึ่งมีส่วนผสมอะลูมินา (Alumina) 54% หนา 70 มิลลิเมตรผนังกันเข้รับน้ำเหล็กหนา 80 มิลลิเมตร และถังเหล็กด้านนอกของเข้รับน้ำเหล็กเป็นเหล็กหนา 5 มิลลิเมตร น้ำหนักรวมของเข้รับน้ำเหล็กเปล่าหนักประมาณ 450 กิโลกรัม

เทอร์มอคัปเปิลถูกฝังอยู่ในตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อวัดอุณหภูมิภายในผนังในขณะที่ทำการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กและนำไปคำนวณสภาวะทางความร้อนของเข้รับน้ำเหล็กในขณะที่ทำการอุ่น

นอกจากนี้ อุณหภูมิที่อ่านได้สามารถใช้เป็นตัวแสดงสภาวะทางความร้อนของผนังเข้รับน้ำเหล็กเพื่อควบคุมการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า กล่าวคือ ในการทดลองการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้านั้น จะทำการควบคุมการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กให้ได้สภาวะทางความร้อนใกล้เคียงกับการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้แก๊สดีเซลให้มากที่สุด

เท่าที่จะทำได้ ส่วนเทอร์มอคัปเปิลที่ติดตั้งที่ส่วนกันของเบ้ารับน้ำเหล็ก มีจุดประสงค์เพื่อวัดอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่กันเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ในบริเวณดังกล่าวเป็นตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์มอคัปเปิลในผนังด้านข้างและผนังส่วนกันของเบ้ารับน้ำเหล็ก

### III. ฮีตเตอร์ไฟฟ้า

ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4 เป็นเส้นลวดนิกเกิลโครเมียม เนื่องจากเป็นลวดให้ความร้อนที่มีการใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ทนทาน ราคาไม่แพงและมีช่วงอุณหภูมิใช้งานที่เหมาะสมกับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ฮีตเตอร์ไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้า (Heater Coil) และตัวควบคุม (Controller) ซึ่งขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้าถูกหุ้มด้วยปูนซีเมนต์ทนไฟ เพื่อช่วยในการระบองขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้าและป้องกันการยึดตัวของขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้าในขณะที่ทำการทดลอง โดยมีขาเหล็ก 3 ขา ช่วยในการบังคับตำแหน่งการใส่ฮีตเตอร์ไฟฟ้าลงในเบ้ารับน้ำเหล็ก และในส่วนของตัวควบคุม (Controller) มีหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งสามารถปรับการทำงานได้ทั้งอัตโนมัติและกำหนดเอง โดยบริเวณด้านหน้าของตัวควบคุมจะมีหน้าจอแสดงผลอยู่ 2 จอ หน้าจอแสดงผลที่ 1 แสดงปริมาณกระแสไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนจอแสดงผลที่ 2 แสดงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก



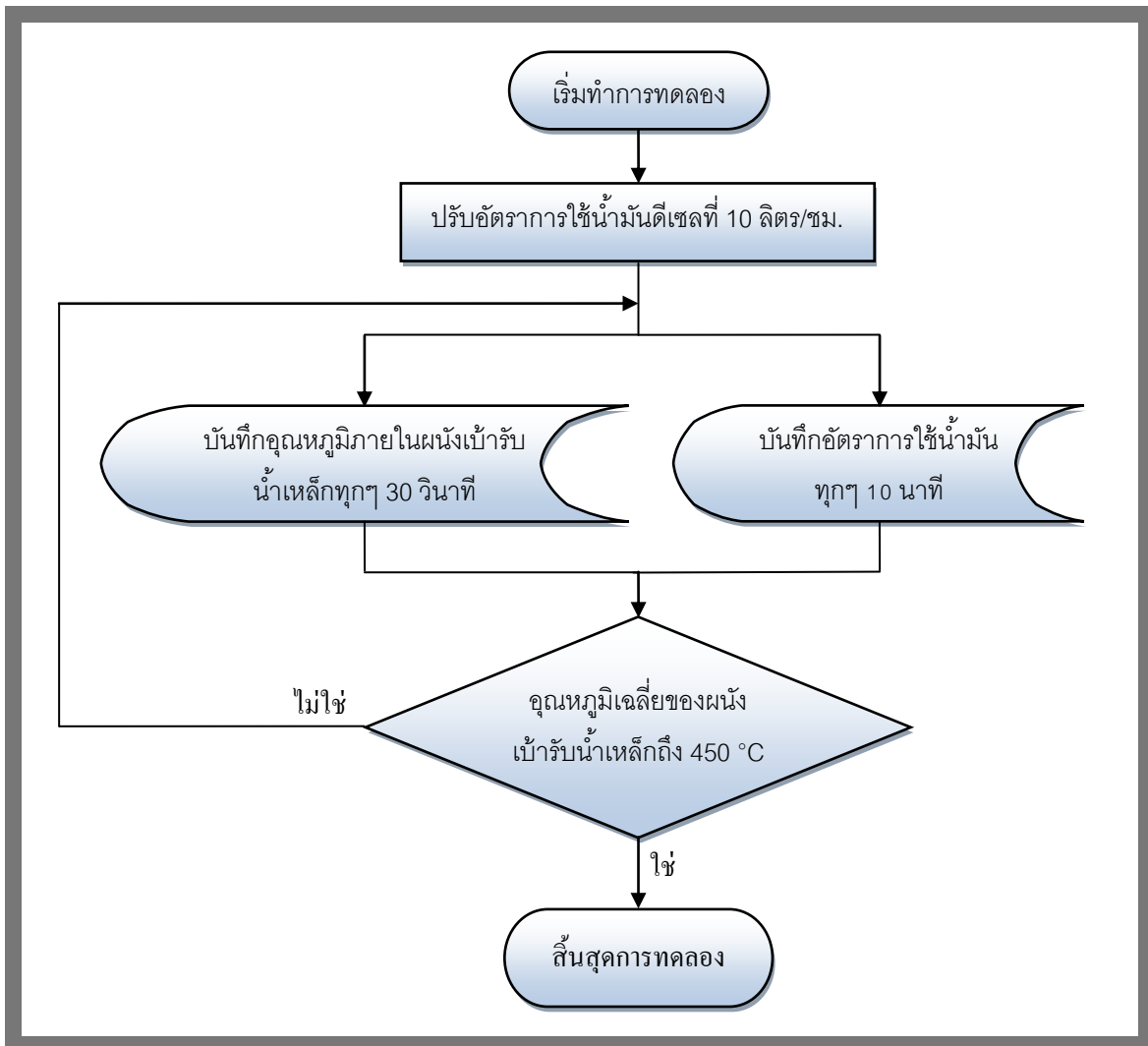
รูปที่ 4 ฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (ซ้ายมือ) และ ตู้ควบคุม (ขวามือ)

#### IV. วิธีการทดลอง

กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กในปัจจุบันมีหลักใหญ่ๆ อยู่ 2 ประการคือ การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่หรือเข้าเย็นและการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วหรือเข้าร้อน

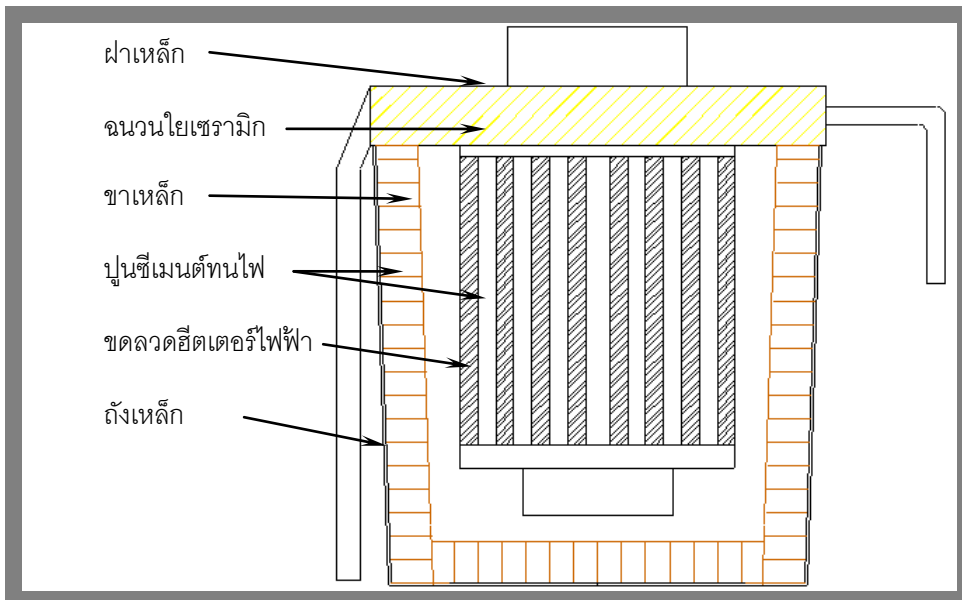
1. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซลในสถานะเข้าเย็น โดยปรับให้มีอัตราการใช้น้ำมันดีเซลอยู่ที่ 10 ลิตรต่อชั่วโมง บันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็กทุกๆ 30 วินาที บันทึกอัตราการใช้น้ำมันที่มิเตอร์ทุกๆ 10 นาที เมื่ออุณหภูมิของผนังด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็กมีค่าเฉลี่ยรวมกันที่  $450^{\circ}\text{C}$  (หรือมีพลังงานสะสมในเข้ารับน้ำเหล็กประมาณ 100 MJ) จึงหยุดการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กและนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็กมาคำนวณสมมูลพลังงาน

2. ทำการทดลองเพื่อจำลองการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าในสถานะเข้าเย็น โดยกำหนดให้อุณหภูมิของเทอร์มอคัปเปิลควบคุมอุณหภูมิการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กอยู่ที่  $1,100^{\circ}\text{C}$  ทำการบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็กเช่นเดียวกับกรณีการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล ทำการบันทึกปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทุกๆ 10 นาที เมื่อสถานะทางความร้อนของเข้ารับน้ำเหล็กเหมือนกับกรณีของการอุ่นด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล จึงหยุดการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กและทำการคำนวณสมมูลพลังงานเพื่อเปรียบเทียบกับกรณีการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล



รูปที่ 5 แผนผังบล็อกไดอะแกรมการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล

สำหรับบล็อกไดอะแกรมของการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะเหมือนกับการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล โดยเปลี่ยนการปรับอัตราการใช้น้ำมันดีเซลที่ 10 ลิตร/ชม. เป็นการเปิดฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ทำงานสูงสุดและตั้งอุณหภูมิควบคุมที่ 1,100 °C ส่วนการบันทึกอัตราการใช้น้ำมันทุกๆ 10 นาที เปลี่ยนเป็นบันทึกอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้าทุกๆ 10 นาที โดยยังคงบันทึกอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทุกๆ 30 นาที และสิ้นสุดการทดลองเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กถึง 450 °C เหมือนกับการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล



รูปที่ 6 แสดงการออกแบบติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าที่เบ้ารับน้ำเหล็กพร้อมทั้งระบบวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้



รูปที่ 7 การติดตั้งฮีตเตอร์ไฟฟ้าขณะใช้งาน (ซ้ายมือ) และการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลในขณะที่ทำการทดลอง (ขวามือ)

## V. สมดุลพลังงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

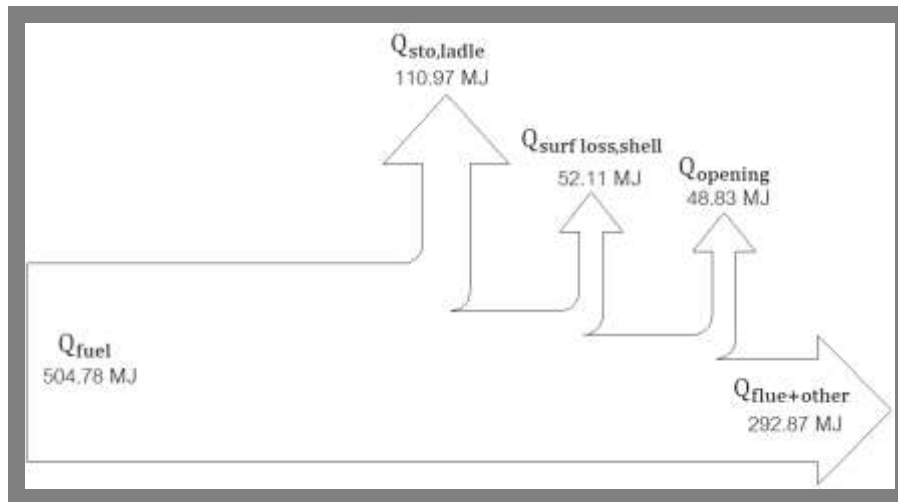
ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ นำเสนอสมดุลพลังงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กทั้ง 2 กรณีคือ 1) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้แก๊สธรรมชาติและ 2) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า โดยสถานะของเบ้ารับน้ำเหล็กที่นำมาศึกษาในครั้งนี้เป็นสภาวะของเบ้ารับน้ำเหล็กในสภาวะเบ้าเย็น (ไม่มีพลังงานสะสมภายใน) และทำการเปรียบเทียบสมดุลพลังงานทั้งในส่วนของพลังงานขาเข้าและพลังงานขาออกในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนพลังงานที่เข้าไปสะสมในเนื้อปูนซีเมนต์ทนไฟ ( $Q_{sto, ladle}$ ) ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานส่วนที่ใช้จริง (Useful energy) โดยเงื่อนไขในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กคือ พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าประมาณ 100 MJ



สำหรับการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้ทำการทดลองทั้งสิ้น 4 ครั้ง โดยแบ่งออกเป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาใช้น้ำมันดีเซล 2 ครั้งและการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า 2 ครั้ง ซึ่งผลการทดลองที่นำมาเสนอนี้ได้เลือกผลการทดลองที่มีความสมบูรณ์มากที่สุดมานำเสนอของทั้ง 2 กรณี

## 5.1 สมดุลพลังงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซล

การตรวจวัดพลังงานแบ่งออกเป็นพลังงานขาเข้าและพลังงานขาออก ซึ่งผลการทดลองการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในครั้งนี้ จะทำการแจกแจงค่าพลังงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้เห็นในรูปแบบของแชนก์ไดอะแกรมโดยแสดงในรูปที่ 8 สำหรับสูตรการคำนวณพลังงานขาออกในส่วนต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 1 และผลการทดลองแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 8 แชนก์ไดอะแกรมแสดงพลังงานขาเข้า-ขาออกในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซล

พลังงานขาออก	สัญลักษณ์	สูตรคำนวณ
O1. พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก	$Q_{sto,ladle}$	$Q_{sto,side} + Q_{sto,bottom}$
พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผนังด้านข้าง	$Q_{sto,side}$	$2\pi\rho_{ladle} C_{p,ladle} z_{side,ladle} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr$
พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก้นเบ้า	$Q_{sto,bottom}$	$\pi\rho_{ladle} C_{p,ladle} r_{bottom}^2 \int_{y_i}^{y_o} T(y) dy$
O2. พลังงานสูญเสียจากผิวตัวถังเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก	$Q_{surfloss,shell}$	$Q_{conv,shell} + Q_{rad,shell}$
พลังงานสูญเสียจากการพาความร้อน	$Q_{conv,shell}$	$\sum_0^t \frac{h_{m,shell} A_{shell} (T_{shell} - T_{\infty})}{10^6}$
พลังงานสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน	$Q_{rad,shell}$	$\sum_0^t \frac{\epsilon_{shell} \sigma A_{shell} (T_{shell}^4 - T_{\infty}^4)}{10^6}$
O3. พลังงานสูญเสียจากช่องเปิด	$Q_{opening}$	$\sum_0^t \frac{\epsilon_{eff} \sigma A_{bottomladle} (T_{3A}^4 - T_{\infty}^4)}{10^6}$
O4. พลังงานสูญเสียจากไอเสียและอื่นๆ	$Q_{flue+other}$	$Q_{fuel} - (Q_{sto,ladle} + Q_{surf loss,shell} + Q_{opening})$

ตารางที่ 1 สูตรคำนวณพลังงานขาออกของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซล

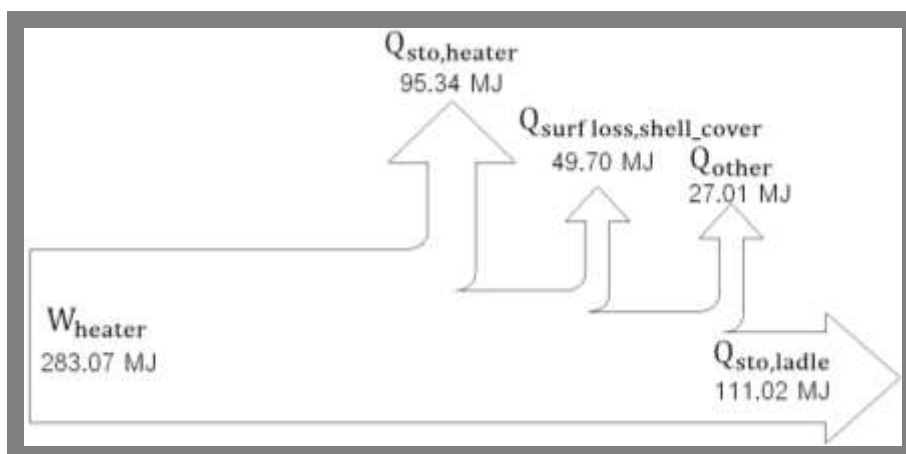
สูตรคำนวณพลังงานขาออกของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซลนั้น พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก (O1.) เป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ในการทดลองนี้ ซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อน นอกจากนี้เป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ได้แก่ พลังงานสูญเสียจากผิวตัวถังเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก (O2.) พลังงานสูญเสียจากไอเสียช่องเปิด (O3.) และพลังงานสูญเสียจากไอเสียและอื่นๆ (O4.)

พลังงานขาเข้า			
	รายการ	ค่า (MJ)	ร้อยละ
I1.	พลังงานเชื้อเพลิง ( $Q_{fuel}$ )	504.78	100.00
พลังงานขาออก			
O1.	พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก ( $Q_{sto,ladle}$ )	110.97	21.98
O2.	พลังงานสูญเสียจากผิวตัวถังเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก ( $Q_{surfloss,shell}$ )	52.11	10.32
O3.	พลังงานสูญเสียจากไอเสียผ่านช่องเปิด ( $Q_{opening}$ )	48.83	9.67
O4.	พลังงานสูญเสียจากไอเสียและอื่นๆ ( $Q_{flue+other}$ )	292.87	58.02
	รวม	504.78	100.00

ตารางที่ 2 สมดุลพลังงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล

## 5.2 สมดุลพลังงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า

การแจกแจงค่าพลังงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นในรูปแบบของแซงก์ไดอะแกรม โดยแสดงในรูปที่ 9 สำหรับสูตรการคำนวณพลังงานขาออกในส่วนต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 3 และผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4 ซึ่ง สิ่งที่แตกต่างระหว่างการอุ่นด้วยหัวเผาและการอุ่นด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าคือไม่ก่อให้เกิดไอเสียและการสูญเสียพลังงานผ่านทางช่องเปิด แต่จะเกิดความร้อนสะสมในชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้าแทน



รูปที่ 9 แซงก์ไดอะแกรมแสดงพลังงานขาเข้า-ขาออกในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า

พลังงานขาออก	สัญลักษณ์	สูตรคำนวณ
O1. พลังงานสะสมในเข้ารับน้ำเหล็ก	$Q_{sto,ladle}$	$Q_{sto,side} + Q_{sto,bottom}$
พลังงานสะสมในเข้ารับน้ำเหล็กที่ผนังด้านข้าง	$Q_{sto,side}$	$2\pi\rho_{ladle} C_{p,ladle} z_{side,ladle} \int_{r_i}^{r_o} T(r) r dr$
พลังงานสะสมในเข้ารับน้ำเหล็กที่ก้นเบ้า	$Q_{sto,bottom}$	$\pi\rho_{ladle} C_{p,ladle} r_{bottom}^2 \int_{y_i}^{y_o} T(y) dy$
O2. พลังงานที่สูญเสียจากผิวของตัวถังเหล็กสู่สิ่งแวดล้อมและฝาปิดเบ้า	$Q_{surf\ loss,shell\&cover}$	$Q_{surf\ loss,shell} + Q_{surf\ loss,cover}$
พลังงานที่สูญเสียจากผิวของตัวถังเหล็ก	$Q_{surf\ loss,shell}$	$Q_{conv,shell} + Q_{rad,shell}$
พลังงานที่สูญเสียจากการพาความร้อนของตัวถังเหล็ก	$Q_{conv,shell}$	$\sum_0^t \frac{h_{m,shell} A_{shell} (T_{shell} - T_{\infty})}{10^6}$
พลังงานที่สูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนของตัวถังเหล็ก	$Q_{rad,shell}$	$\sum_0^t \frac{\varepsilon_{shell} \sigma A_{shell} (T_{shell}^4 - T_{\infty}^4)}{10^6}$
พลังงานที่สูญเสียจากผิวของฝาปิดเบ้า	$Q_{surf\ loss,cover}$	$Q_{conv,cover} + Q_{rad,cover}$
พลังงานที่สูญเสียจากการพาความร้อนของฝาปิดเบ้า	$Q_{conv,cover}$	$\sum_0^t \frac{h_{m,cover} A_{cover} (T_{cover} - T_{\infty})}{10^6}$
พลังงานที่สูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนของฝาปิดเบ้า	$Q_{rad,shell}$	$\sum_0^t \frac{\varepsilon_{cover} \sigma A_{cover} (T_{cover}^4 - T_{\infty}^4)}{10^6}$
O3. พลังงานที่สะสมในชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้า	$Q_{sto, heater}$	$Q_{sto,coil} + Q_{sto,refrac} + Q_{sto,structure} + Q_{sto,fiber} + Q_{sto,cover}$
พลังงานสะสมในขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้า	$Q_{sto,coil}$	$\frac{m_{coil} C_{p,coil} (T_{coil} - T_{\infty})}{10^3}$
พลังงานสะสมในปูนทนไฟ	$Q_{sto,refrac}$	$\frac{m_{refrac} C_{p,refrac} (T_{refrac} - T_{\infty})}{10^3}$
พลังงานสะสมในโครงสร้างเหล็ก	$Q_{sto, struc}$	$\frac{m_{struc} C_{p, struc} (T_{struc} - T_{\infty})}{10^3}$
พลังงานสะสมในฉนวนใยเซรามิก	$Q_{sto, fiber}$	$\frac{m_{fiber} C_{p, fiber} (T_{fiber} - T_{\infty})}{10^3}$
พลังงานสะสมในฝาปิดเบ้า	$Q_{sto, cover}$	$\frac{m_{cover} C_{p, cover} (T_{cover} - T_{\infty})}{10^3}$
O4. พลังงานสูญเสียอื่นๆ	$Q_{other}$	$W_{heater} - (Q_{sto,ladle} + Q_{surf\ loss,shell\&cover} + Q_{sto,heater})$

ตารางที่ 3 สูตรคำนวณพลังงานขาออกของการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า

สูตรคำนวณพลังงานขาออกของการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้านั้น พลังงานสะสมในเข้ารับน้ำเหล็ก (O1.) เป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ในการทดลองนี้ ซึ่งนำมาใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อน นอกจากนี้เป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก ได้แก่ พลังงานที่สูญเสียจากผิวของตัวถังเหล็กสู่สิ่งแวดล้อมและฝาปิดเบ้า (O2.) พลังงานที่สะสมในชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้า (O3.) และพลังงานสูญเสียอื่นๆ (O4.) ซึ่งการคำนวณหาพลังงานสูญเสียในส่วนต่างๆ ของฮีตเตอร์ไฟฟ้านั้นทำได้ยากเนื่องจากการตรวจวัดได้ลำบาก เช่น พลังงานสะสมในชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้าในขณะที่ทำ

การทดลอง ซึ่งไม่อาจทราบอุณหภูมิในส่วนต่างๆของฮีตเตอร์ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง จำเป็นต้องอาศัยการสังเกตและประเมินจากอุณหภูมิที่อ่านได้จากเข้ารับน้ำเหล็กและอุณหภูมิควบคุมขณะนั้นแทน

พลังงานขาเข้า			
	รายการ	ค่า (MJ)	ร้อยละ
I1.	พลังงานไฟฟ้า ( $W_{heater}$ )	283.07	100.00
พลังงานขาออก			
O1.	พลังงานที่สะสมในเข้ารับน้ำเหล็ก ( $Q_{sto, ladle}$ )	111.02	39.22
O2.	พลังงานที่สูญเสียจากผิวของตัวถังเหล็กสู่สิ่งแวดล้อมและฝาปิดเบ้า ( $Q_{surfloss, shell\_cover}$ )	49.70	17.56
O3.	พลังงานที่สะสมในชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้า ( $Q_{sto, heater}$ )	95.34	33.68
O4.	พลังงานสูญเสียอื่นๆ ( $Q_{other}$ )	27.01	9.54
	รวม	283.07	100.00

ตารางที่ 4 สมดุลพลังงานในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า

## VI. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

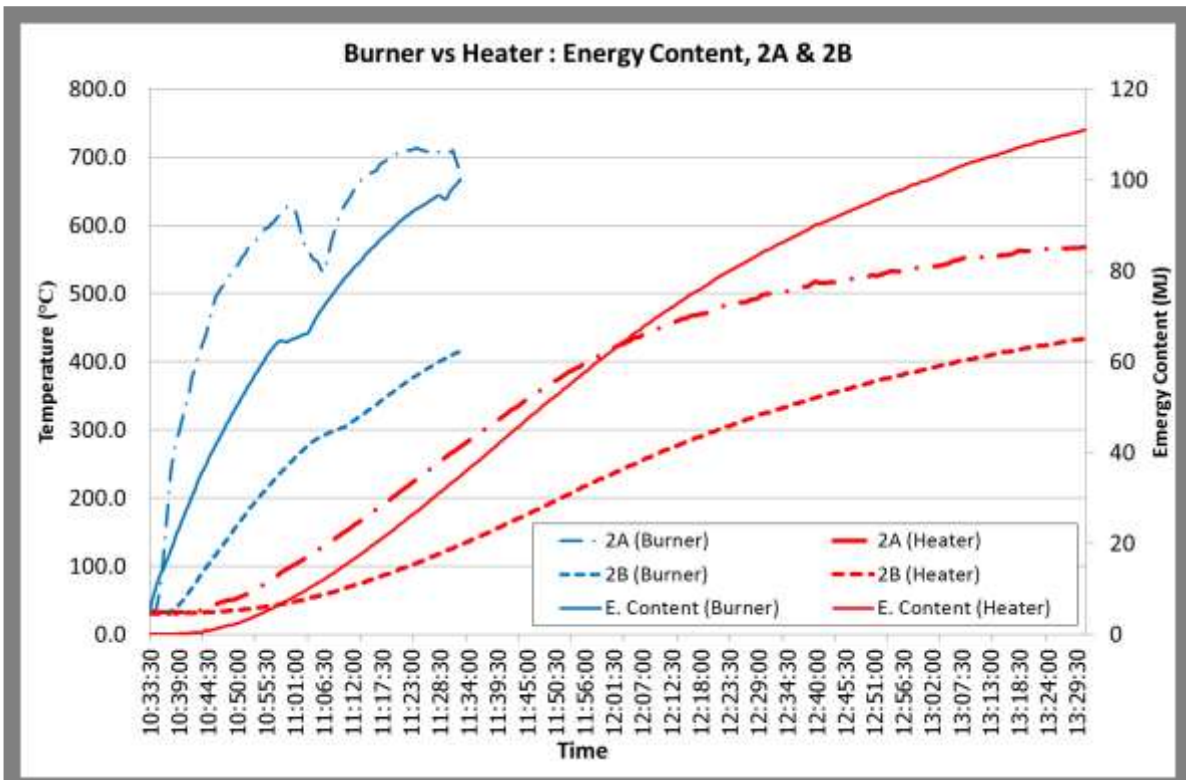
สำหรับตำแหน่งที่ตรวจวัดอุณหภูมิ 2A อยู่ใกล้กับพื้นผิวภายในมาก จึงไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแหล่งให้ความร้อน จึงสามารถใช้บ่งชี้สภาวะการให้ความร้อนภายในเข้ารับน้ำเหล็กได้ ส่วนตำแหน่งที่ตรวจวัดอุณหภูมิ 2B อยู่เข้าไปในเนื้อผนัง ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของแหล่งให้ความร้อนในระยะสั้นน้อย จึงสามารถใช้บ่งชี้ถึงพลังงานสะสมของผนังเข้ารับน้ำเหล็กได้ดี ส่วนความร้อนสะสมในเข้ารับน้ำเหล็กได้มาจากการคำนวณโดยใช้อุณหภูมิที่ตรวจวัด ณ ความลึกต่างๆ ในผนังเข้ารับน้ำเหล็ก

จากรูปที่ 10 การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กทั้ง 2 กรณีนั้นทำให้มีพลังงานสะสมในเข้ารับน้ำเหล็กเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดคือ มีพลังงานสะสมในเข้ารับน้ำเหล็กประมาณ 100 MJ สำหรับการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผา น้ำมันดีเซลจะให้ผลที่เร็วกว่าการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าแต่มีข้อเสียคือทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างตำแหน่งผนังด้านในที่สัมผัสแหล่งความร้อนโดยตรง (ตำแหน่ง 2A) กับตำแหน่งที่อยู่ลึกเข้าไปในผนัง (ตำแหน่ง 2B) เป็นอย่างมาก ซึ่งในกรณีที่เป็นการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กที่ก่อสร้างใหม่ (Sintering) จำเป็นต้องควบคุมการอัตราการเพิ่มอุณหภูมิและความต่อเนื่องในการให้ความร้อน ซึ่งการใช้หัวเผาน้ำมันดีเซลในการอุ่นนั้นอาจทำให้เกิดความเสียหายกับเข้ารับน้ำเหล็กได้ ส่วนการใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กนั้น เห็นได้ชัดว่า สามารถควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิในผนังและความสม่ำเสมอของการให้ความร้อนได้ ซึ่งนับว่าเป็นข้อดีของการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้าประการหนึ่ง

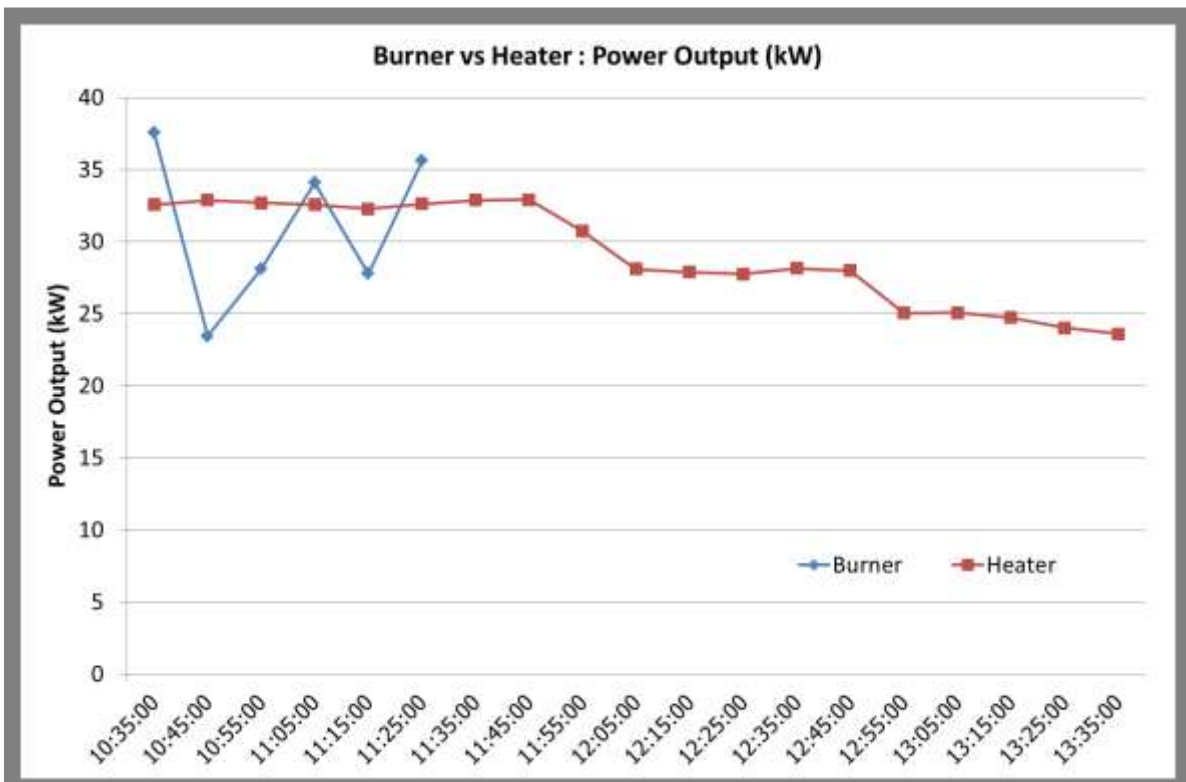
ในการประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของการอุ่นเข้าด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซลและฮีตเตอร์ไฟฟ้าจะนำผลการทดลองของการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กมาเปรียบเทียบกันซึ่งแสดงดังตารางที่ 5

Time of heating (Minutes)		Input (MJ)		Ladle storage (MJ)		Surface loss (MJ)		Efficiency (%)	
Burner	Heater	Burner	Heater	Burner	Heater	Burner	Heater	Burner	Heater
60	180	504.78	283.07	110.97	111.02	52.11	49.70	21.98%	39.22%

ตารางที่ 5 สรุปผลการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 10 พลังงานสะสมในผนังน้ำรับน้ำเหล็กและอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ภายในผนังที่ตำแหน่งที่ 2 ของการอุ่นทั้ง 2 กรณี



รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานขาออกของการอุ่นทั้ง 2 กรณี

ในการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กทั้ง 2 กรณี ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น ในรูปที่ 11 สำหรับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาใช้น้ำมันดีเซล จากกราฟจะเห็นว่าพลังงานที่ได้จากหัวเผาไม่คงที่ เนื่องจากหัวเผาที่ทางโรงงานใช้อยู่ในปัจจุบันค่อนข้างเก่า ทำให้ความต่อเนื่องในการให้ความร้อนรวมทั้งการปรับอัตราการใช้น้ำมันทำได้ยาก ดังนั้น ถ้าปรับอัตราการใช้น้ำมันที่ 10 ลิตรต่อชั่วโมง จะเกิดการติดดับของหัวเผาเป็นระยะๆ ซึ่งจุดที่หัวเผาสามารถทำงานได้ดีนั้น มีอัตราการใช้น้ำมันสูงกว่า 10 ลิตรต่อชั่วโมงเล็กน้อย จึงมีความจำเป็นต้องปรับอัตราการใช้น้ำมันให้สูงขึ้นหรืออีกกรณีหนึ่ง ในวันที่ทำการทดลองนั้นสภาวะอากาศไม่เหมาะสม เช่น อากาศเย็นและลมพัดแรงก็จะส่งผลให้พลังงานสูญเสียจากผิวตัวถังเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าสูงขึ้น เพื่อให้ได้พลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กตามกำหนด จึงต้องใช้พลังงานและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กมากขึ้น เมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะได้ค่าต่ำ

สำหรับในกรณีของฮีตเตอร์ไฟฟ้า เมื่อเทอร์มอสตัทเปิดควบคุมอุณหภูมิการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้ 1,100 °C จะส่งสัญญาณไปยังตู้ควบคุมเพื่อตัดการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อป้องกันการความเสียหายกับตัวขดลวดฮีตเตอร์ไฟฟ้า เมื่ออุณหภูมิที่เทอร์มอสตัทเปิดต่ำกว่า 1,100 °C ก็จะทำให้การจ่ายกระแสไฟฟ้าใหม่อีกครั้ง ทำให้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้กำลังงานเฉลี่ยในช่วงเวลาที่วัดตกลงตามที่ได้แสดงในรูปที่ 11

เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์แสดงให้เห็นว่า พลังงานที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซลทั้งสิ้น 504.78 MJ หรือ เท่ากับ 13.86 ลิตร เมื่อคิดราคาน้ำมันที่ 30 บาทต่อลิตรจะได้เท่ากับ 415.8 บาท ส่วนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กคือ 283.07 MJ หรือเท่ากับ 78.63 kWh เมื่อคิดราคาพลังงานไฟฟ้าหน่วยละ 3 บาทจะได้เท่ากับ 235.89 บาท ฉะนั้นจะได้ผลประหยัดประมาณ 180 บาท สำหรับประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นสามารถเปรียบเทียบจากตารางที่ 6

แม้ว่า การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาดเล็กด้วยไฟฟ้า จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยน้ำมัน แต่ก็ยังให้ผลไม่เป็นที่น่าพอใจนัก ประสิทธิภาพการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยไฟฟ้ายังต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้มาก อีกทั้งเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก็ยังใช้เวลามาก จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการทำงานที่ดีเพื่อแก้ไขปัญหา จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยละเอียดพบว่า การสูญเสียพลังงานที่สำคัญส่วนหนึ่งก็คือ การสูญเสียเป็นพลังงานสะสมในชุดฮีตเตอร์ไฟฟ้าเอง เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีความจุความร้อนสูง ดังนั้น ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยมุ่งไปที่การลดความสูญเสียความร้อนในส่วนนี้ให้น้อยลง

แหล่งพลังงาน	หน่วยวัด	ราคาต่อหน่วย (บาท)	ค่าใช้จ่าย (บาท)	ผลประหยัด (บาท)
ดีเซล	13.86 ลิตร	30	415.80	~180
ไฟฟ้า	78.63 kWh	3	235.89	

ตารางที่ 6 ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในการใช้พลังงานรูปแบบต่างๆ

## VII. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยและสำนักพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม (MIDI) ที่สนับสนุนงบประมาณ อุปกรณ์ และบุคลากรให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกงานวิจัยนี้

## บรรณานุกรม

- [1] จักราวุธ จรุงศารพูล, ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น และ พงษ์ธร จริญญากรณ์ (2553).การปรับปรุงประสิทธิภาพการอุ่นถังถ่ายเหล็กโดยใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 วันที่ 5-7 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร
- [2] Electric Resistance Ladle Preheating Improves Foundry Operations, The Center for Metals Production (CMP) R&D application center (1992). Techcommentary report.
- [3] Electrotechnology Use for Drying of Modern Castable Refractories, The Center for Metals Production (CMP) R&D application center (1999). Techcommentary report.
- [4] Yeshvant, V. Deshmukh,(2005). Industrial Heating Principles : Techniques, Materials, Applications, and Design, Taylor & Francis Group, LLC.
- [5] Hegbom, (1997). Integrating Electrical Heating Elements in Appliance Design (Electrical and Computer Engineering),Marcel Dekker,INC.