

การลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าโดยการปิดฝาเข้ารับน้ำเหล็กในระหว่างรอการเทน้ำเหล็ก

Energy Reduction in steelmaking process by covering the ladle with a shield during delay time for the next tapping

กิตติศักดิ์ ไร่ไพจิพงษ์¹, ชัชวาล ภูมิศิริศาสตร์, สันหพศ จันทรานันท์, พงษ์ธร จรรย์ญาณ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 022 186 610 โทรสาร: 022 522 889

E-mail: armkittisak@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในการกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า มีการใช้พลังงานที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ 1) ใช้พลังงานไฟฟ้าในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และ 2) ใช้น้ำมันเชื้อเพลิง (น้ำมันเตา) ในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก (Ladle) ก่อนรับน้ำเหล็ก การศึกษานี้มุ่งเน้นไปที่การลดการใช้พลังงานในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก ในระหว่างที่รอการเทน้ำเหล็ก ซึ่งโดยเฉลี่ยใช้เวลา 20 นาที จากข้อมูลการตรวจวัดในขณะทำงานจริงในการศึกษานี้ พบว่า มีความเป็นไปได้ที่จะใช้ฝาปิดเข้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการรอ ซึ่งจะสามารถลดการสูญเสียความร้อนออกจากเตาและทำให้เตามีอุณหภูมิสูงพอที่จะรับน้ำเหล็กรอบถัดไป โดยไม่จำเป็นต้องมีการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งสามารถประหยัดการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงได้ 16.2 ลิตรต่อ 1 รอบการทำงาน หรือคิดเป็น 0.70 ลิตรต่อตันน้ำเหล็ก

คำหลัก : เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF), การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก (Ladle Preheating), การผลิตเหล็ก (Steelmaking), ความเค้นทางความร้อน (Thermal Stress)

Abstract

In steelmaking process, energy is consumed in two related sub-process; namely, 1) Consumption of electricity in EAF melting process and 2) Consumption of heavy oil for ladle preheating. This study focuses on reducing energy used in ladle preheating process while waiting for tapping of molten steel. Normally this period takes about 20 minutes. Based on actual field data in a factory it was found that covering the ladle with a shield effectively reduces the radiation loss and it is possible to maintain ladle temperature sufficiently high for the next tapping of molten steel. This method can reduce fuel consumption of 16.2 liters per heat or 0.70 liters per ton of steel.

Keywords: Electric Arc Furnace, Ladle preheating, Steelmaking, Radiation loss.

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้านั้นมีการใช้พลังงานที่สูงเป็นลำดับต้นๆ ของการใช้พลังงานภายในประเทศ [1] ดังนั้นการจัดการการใช้พลังงานในกลุ่มอุตสาหกรรมชนิดนี้ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดจะช่วยลดปริมาณและค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานลงได้ สำหรับประเทศไทยพบว่ามีการใช้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF) มากเป็นอันดับหนึ่งของของเตา

หลอมทั้งหมดที่มีอยู่ภายในประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่าหากนำปริมาณการใช้พลังงานในการผลิตเหล็กต่อ 1 ตันน้ำเหล็กไปเปรียบเทียบกับปริมาณการใช้พลังงานต่อ 1 ตันน้ำเหล็กในประเทศที่มีการพัฒนาด้านการผลิตเหล็กก็จะพบว่ามีส่วนต่างของการใช้พลังงานอยู่มาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับปรุงการจัดการการใช้พลังงานในกระบวนการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

กระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาเผาอาร์คไฟฟ้าจะมีการใช้พลังงานหลักอยู่ 2 ส่วน คือ 1) การใช้พลังงานไฟฟ้าในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าซึ่งทำงานที่อุณหภูมิ 1660°C และ 2) การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle) เพื่อให้รองรับการขยายตัวอย่างฉับพลันเมื่อ สัมผัสกับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหาย(Thermal Shock) ของอิฐทนไฟที่ก่อกำเนิดภายในเบ้ารับน้ำเหล็กได้

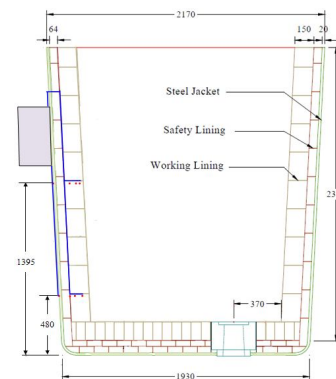
การลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าได้มีการศึกษามาโดยตลอด ศิริพงษ์ ชื่นกลิน[2] ศึกษาพบว่า การลดอุณหภูมิในการเทน้ำเหล็ก (Tapping Temperature) ลง 10°C จะสามารถลดการใช้ไฟฟ้าในเตาหลอมขนาด 25 ตัน ได้ 7 kWh/ton คิดเป็นมูลค่าพลังงานปีละ 2.5 ล้านบาท ต่อมาจักรวาล จรุงศรกุล[3] ศึกษาประสิทธิภาพของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burner) พบว่ามีประสิทธิภาพ 55.81% ซึ่งสูงกว่าหัวเผาแบบธรรมดาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ชัชวีส วัฒนศิริศาสตร์และคณะ[4] พบว่า เมื่อลดพลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยการเพิ่มการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมให้สัมพันธ์กัน จะสามารถลดพลังงานที่ใช้ในเตาหลอมได้และทำให้การใช้พลังงานที่ให้แก่ระบบลดลง 1.88 MJ หรือคิดเป็น 16.75 บาทต่อการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็ก 1°C ต่อมา ชัชวีส วัฒนศิริศาสตร์ และคณะ[5] ได้เสนอแนวทางการสร้างระบบควบคุมอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งจำเป็นต้องทราบสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมอุณหภูมิของการเทน้ำเหล็กต่อไปโดยการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ตำแหน่งต่างๆของอิฐ ทนไฟดังรูปที่ 1 จากการศึกษานี้จะทำให้ทราบถึงสถานะทางความร้อน

ของเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นจริงตลอดวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังรูปที่ 2 เพื่อนำไปใช้ในการสร้างระบบควบคุมต่อไป

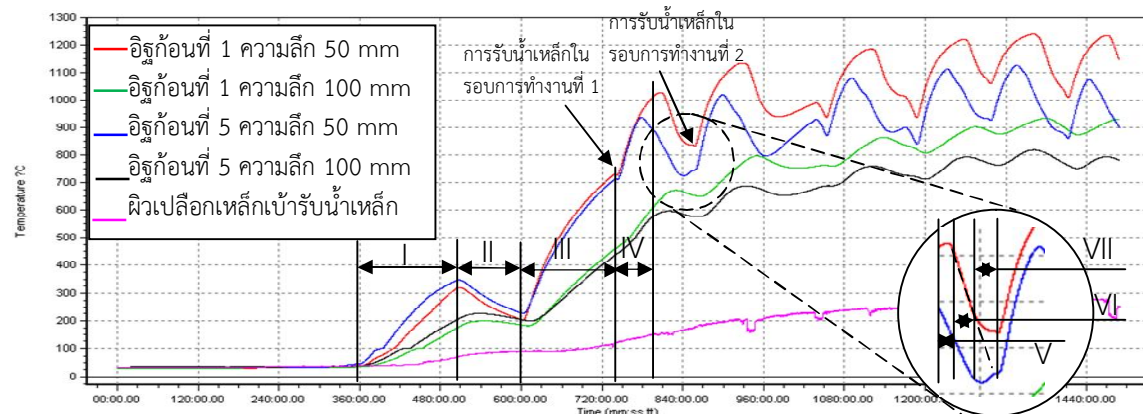
2.วิธีการศึกษาวิจัย

การศึกษานี้ประกอบด้วยการตรวจวัดในสภาพการทำงานจริงในโรงงานตัวอย่าง และ การจำลองทางคณิตศาสตร์

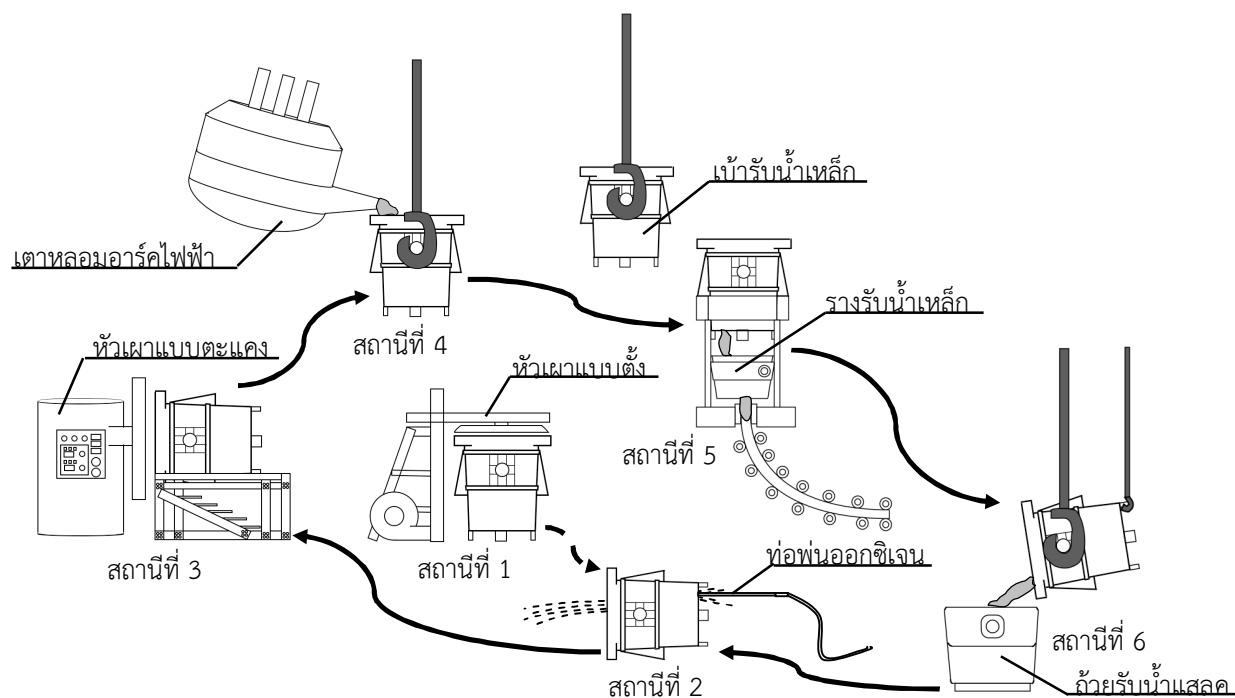
จากการตรวจวัดอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดการทำงานจริง[5] จะพบว่าอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กที่สามารถรับน้ำเหล็กในรอบที่ 1 ได้จะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 712°C เมื่อวัดที่ระดับความลึกจากผิวน้ำเหล็กเข้าไป 50 mm เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการเทน้ำเหล็กแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกนำมาซ่อมแซมประตูเลื่อนและรูเท ณ ช่วงนี้เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเปิดสู่บรรยากาศ หลังจากซ่อมแซมเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกนำไปอุ่นรอบการเทน้ำเหล็กต่อไป ดังจะเห็นว่าช่วงการลดของอุณหภูมิจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่มีการถ่ายเทความร้อนให้สู่บรรยากาศโดยตรง ทำให้การลดลงของ



รูปที่ 1 ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็กและตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล



รูปที่ 2 แสดงผลการตรวจวัดสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ [5]



รูปที่ 3 วัฏจักรการทำงานของเข้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า [5]

อุณหภูมิมีค่ามาก (ความชันของกราฟมาก: เส้นปะสีดำ) และส่วนที่มีการอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ที่ช่วงนี้อัตราการลดลงของอุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลงน้อยกว่า ช่วงแรกจนเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เข้ารับน้ำเหล็ก เนื่องจากมีการให้พลังงานเข้าไป จะสังเกตเห็นว่าในรอบถัดไป (เท้าน้ำเหล็กครั้งที่ 2) อุณหภูมิของเข้ารับน้ำเหล็ก ก่อนที่สัมผัสน้ำเหล็กมีค่าสูงกว่า 712°C เป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กของส่วนที่เกินมา จึงนำไปสู่การศึกษาการลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างระหว่างเข้ารับน้ำเหล็กกับบรรยากาศระหว่างกระบวนการนี้ โดยใช้ฝาปิดเข้ารับน้ำเหล็กเพื่อลดการสูญเสียความร้อน ทำให้การลดลงของอุณหภูมิตลอดทั้งกระบวนการที่พิจารณาน้อยกว่าหรือเท่ากับการปล่อยให้ความร้อนถ่ายเทสู่บรรยากาศโดยตรงแล้วค่อยนำมาอุ่นด้วยหัวเผา

การศึกษาวิจัยนี้มีการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับข้อมูลจากการตรวจวัด ในขณะทำงานจริง โดยการฝังเทอร์โมคัปเปิลในอิฐทนไฟระยะต่างๆ และติดตั้ง datalogger เพื่อบันทึกและส่งข้อมูลผ่านสัญญาณไร้สายไปยังเครื่องรับบนคอมพิวเตอร์ ทำให้รู้ข้อมูลเวลาจริงตลอดการทำงาน

3. วัฏจักรการทำงานของเข้ารับน้ำเหล็ก

เนื่องจากเราสนใจลดการใช้พลังงานในกระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการเทน้ำเหล็กรอบถัดไป ดังนั้นจำเป็นต้องทราบถึงวัฏจักรการทำงานของเข้ารับน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 1

ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 1 วัฏจักรการทำงานของเข้ารับน้ำเหล็ก จะเริ่มจากเข้ารับน้ำเหล็กที่ก่ออิฐเสร็จใหม่จะถูกนำมาเผาด้วยหัวเผาดัง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในช่วงที่ I หลังจากนั้นเข้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกนำไปใส่แผ่นเลื่อนเพื่อเปิด - ปิด การถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้า เกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในช่วงที่ II หลังจากนั้นเบ้าก็จะถูกนำมาอุ่นด้วยหัวเผาตะแคง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิของกราฟในช่วงที่ III หลังจากผ่านช่วงนี้ไปแล้วเข้ารับน้ำเหล็กที่ก่ออิฐมาใหม่จะพร้อมรับน้ำเหล็ก และจะถูกนำไปปรับน้ำเหล็กทำให้อุณหภูมิของเข้ารับน้ำเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเริ่มการถ่ายเทน้ำเหล็ก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกราฟช่วงที่ IV หลังจากถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้าเรียบร้อยแล้วสิ่งที่เหลือภายในเบ้าก็คือสลด และสลดจะถูกนำไปทิ้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วงที่ V หลังจากนั้นเข้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกนำไปซ่อมแซมที่สถานีที่ 2 หลังจากซ่อมแซมเรียบร้อยแล้วเข้ารับน้ำเหล็กจะถูกนำไปอุ่นด้วยหัวเผา

ตะแคงและการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะน้อยลงเรื่อยๆ ไปตลอดจนจบวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

สำหรับการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาลดการใช้พลังงานในช่วงระหว่างสถานีที่ 2 ไปถึงสถานีที่ 4 โดยการใส่ฝาปิดเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่บรรยากาศและลดการใช้พลังงานจากหัวเผาในการเผาตะแคงโดยใช้ฝาปิดระหว่างกระบวนการนี้

ตารางที่ 1 สรุปวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กจากรูปที่ 2 และรูปที่ 3

วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก	ช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (รูปที่ 2)	สถานีการทำงานที่เกี่ยวข้อง (รูปที่ 3)
อุ่นด้วยหัวเผาดั้ง	I	1
ใส่แผ่นเลื่อน (sliding gate)	II	2
อุ่นด้วยหัวเผาดั้ง	III	3
รับน้ำเหล็กและเริ่มการถ่ายเทน้ำเหล็ก	IV	4, 5
เทแอสลค	V	6
ซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็ก	VI	2
อุ่นด้วยหัวเผาดั้ง	VII	3
รับน้ำเหล็ก		4

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาของ ชัชวีส [6] ได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละกระบวนการตลอดวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กและได้มีการสอบเทียบแบบจำลองกับผลการทดลองแล้ว แต่ลักษณะของแบบจำลองของชัชวีสจะนำเสนอการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กไม่ถูกปิดฝาขณะพักเบ้า ในการศึกษาวิจัยนี้จึงจะปรับปรุงแบบจำลองของชัชวีสให้เบ้ารับน้ำเหล็กมีการปิดฝาระหว่างพักเบ้า โดยแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองจะมีข้อสมมติดังนี้

1. ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นผนังทรงกระบอก เนื่องจากมีความลาดเอียงของผนังน้อยมาก
2. การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้เป็นฟังก์ชันที่เขียน เนื่องจากรัศมีของเบ้ารับน้ำเหล็กมากกว่าความหนาของผนังถึง 10 เท่า

3. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติตามแนวรัศมี

4. ไม่มีความต้านทานความร้อนที่เกิดบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างชั้นต่างๆภายในผนังเบ้า

4.1 ปริมาตรควบคุม

ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชัชวีส ได้แบบการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กออกเป็น 2 ส่วนได้แก่การถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังข้าง และผนังกันของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งในบทความนี้จะพิจารณาปริมาตรควบคุมล้อมรอบผนังข้างเป็นปริมาตรควบคุมที่ 1 และปริมาตรควบคุมล้อมรอบผนังกันเป็นปริมาตรควบคุมที่ 2 ตามรูปที่ 4

4.2 สมการควบคุม

จากข้อสมมติต่างๆข้างต้นเมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งใดๆ จะได้สมการควบคุมดังสมการที่ (1)

เมื่อ a ใช้บ่งชี้ถึงปริมาตรควบคุม (ปริมาตรควบคุม 1 หรือ 2) และ b ใช้บ่งชี้ถึงชนิดของวัสดุที่ประกอบเป็นผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละชั้น

$$\rho_{a,b} c_{a,b} \frac{\partial T_{a,b}}{\partial t} = k_{a,b} \frac{\partial^2 T_{a,b}}{\partial x^2} \quad (1)$$

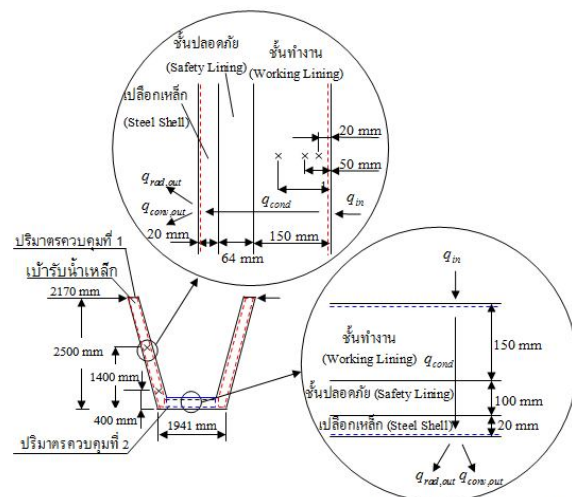
เมื่อ ρ แทนความหนาแน่นของอิฐทนไฟ

c แทนความจุความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ

k แทนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอิฐทนไฟ

4.3 เงื่อนไขค่าขอบ

เงื่อนไขค่าขอบของผิวผนังภายนอกและภายในเบ้า



รูปที่ 4 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม (และตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple) ในเบ้ารับน้ำเหล็ก

รับน้ำเหล็กนั้นจะเกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนผ่านการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน จะมีลักษณะดังสมการที่ (2) และ (3)

$$-k_{a,b} \frac{dT_{a,b}}{dx} = q_{a,rad} + q_{a,conv} \quad (2)$$

$$, x = 0$$

$$-k_{a,b} \frac{dT_{a,b}}{dx} = q_{a,rad,out} + q_{a,conv,out} \quad (3)$$

$$, x = L_a$$

ในฝั่งขวามือของสมการที่ (3) ปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่ถ่ายเทออกจากผิวภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นการถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศซึ่งในที่นี้พิจารณาให้บรรยากาศมีลักษณะเป็นวัตถุดำที่มีอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิบรรยากาศ (T_o) สามารถหาได้จากสมการที่ (4) และ (5)

$$q_{a,rad,out} = \varepsilon_{a,b} \sigma (T_{a,out}^4 - T_o^4) \quad (4)$$

$$q_{a,conv,out} = h_{a,out} (T_{a,out} - T_o) \quad (5)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหาได้จากสมการที่ (6) – (12) [7]

สำหรับผนังข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก:

$$Nu = 0.138 Gr^{0.36} (Pr^{0.175} - 0.55) \quad (6)$$

$$, 0.1 < Pr < 40 \text{ and } Gr > 10^9$$

$$Nu = 0.683 Gr^{0.25} Pr^{0.25} \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{0.25} \quad (7)$$

$$, 0.1 < Pr < 40 \text{ and } Gr < 10^9$$

สำหรับก้นเบ้าผนังรับน้ำเหล็ก:

$$Nu = 0.54 (Gr Pr)^{0.25} \quad (8)$$

$$, 10^5 < Gr Pr < 2 \times 10^7$$

$$Nu = 0.14 (Gr Pr)^{0.25} \quad (9)$$

$$, 2 \times 10^7 < Gr Pr < 3 \times 10^{10}$$

เมื่อ

$$Nu_a = \frac{h_a L_e}{k_{a,b}} \quad (10)$$

$$Gr_a = \frac{g \rho_o (T_{a,out} - T_o) L_e^3}{\mu_o^2} \quad (11)$$

$$Pr_a = \frac{(c_{p,o} \mu_o)}{k_o} \quad (12)$$

ส่วนปริมาณการถ่ายเทความร้อนของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นส่วนที่มีความซับซ้อนเนื่องจากภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนระหว่าง

แต่ละพื้นผิวซึ่งลักษณะการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนแสดงดังรูปที่ 5 ในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กไม่ปิดฝาการแผ่รังสีสุทธิในแต่ละพื้นผิวจะสามารถคำนวณได้จากการแก้ระบบสมการที่สร้างขึ้นจากสมการที่ (13)

$$\sum_{j=1}^N \left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - F_{i-j} \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right) \frac{q_{j,rad}}{A_j} = \sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - F_{i-j}) \sigma T_j^4 \quad (13)$$

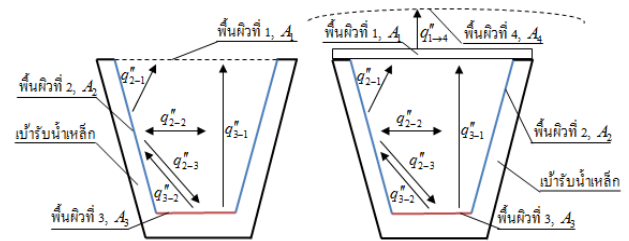
โดยที่ i และ j แทนหมายเลขของพื้นผิวแต่ละพื้นผิวตามรูปที่ 5 และเครื่องหมาย δ_{ij} คือฟังก์ชันโคเนคเตอร์ เดลตาซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (14)

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{when } i = j \\ 0 & \text{when } i \neq j \end{cases} \quad (14)$$

แต่ในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กถูกปิดด้วยฝาในแบบจำลองนี้จะสมมติให้ฝาเบ้ารับน้ำเหล็กประพฤติตัวเป็นเกราะกับังรังสีซึ่งจะลดทอนการแผ่รังสีที่ออกสู่บรรยากาศโดยที่ไม่มีการเก็บสะสมความร้อนภายในฝาทำให้การถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เข้าสู่พื้นผิวที่ 1 ในรูปทางขวาของรูปที่ 5 จะต้องเท่ากับปริมาณความร้อนที่อีกด้านหนึ่งของฝายถ่ายเทออกสู่บรรยากาศจะสามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ได้โดยสมการที่ (15)

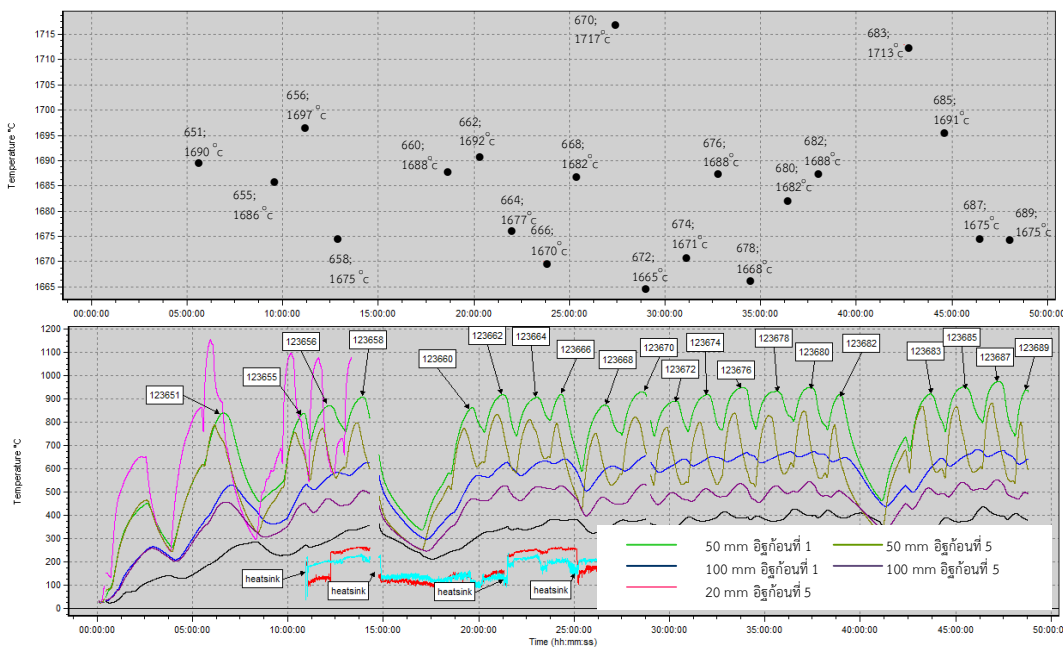
$$\frac{(q_{o,1i}'' - E_{b,1})}{(1 - \varepsilon_{1i}) / \varepsilon_{1i} A_1} = \frac{(E_{b,1} - q_{o,1o}'')}{(1 - \varepsilon_{1o}) / \varepsilon_{1o} A_1} = \frac{(q_{o,4}'' - E_{b,4})}{(1 - \varepsilon_4) / \varepsilon_4 A_4} = \frac{(q_{o,1o}'' - q_{o,4}'')}{1 / F_{1o \rightarrow 4} A_4} \quad (15)$$

เมื่อตัวห้อย $1i$ หมายถึงพื้นผิวที่ 1 ด้านที่หันหน้าเข้าสู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และตัวห้อย $1o$ หมายถึงพื้นผิวที่ 1 ด้านที่หันหน้าออกสู่ภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ไม่มีฝาปิด(ซ้าย) และมีฝาปิด(ขวา)

ซึ่งจากสมการที่ (15) จะเห็นได้ว่าความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนที่ถูกถ่ายเทผ่านฝา (ซึ่งถูกสมมติให้เป็นเกราะกับังรังสี) ออกไปยังบรรยากาศจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของค่าการเปล่งรังสีของพื้นผิวภายในและภายนอกของฝายเบ้ารับน้ำเหล็ก หากค่าการเปล่งรังสีด้านในของฝายมีค่าสูงกว่าค่าการเปล่งรังสีด้านนอกของฝาย จะยิ่งลดทอนการแผ่รังสีออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 6 แสดงผลการเก็บข้อมูลจริง (บน) แสดงอุณหภูมิการเหน้าเหล็กที่รอบการทำงานต่างๆ (ล่าง)แสดงสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดทั้ง 20 รอบการทำงาน

4.4 ระเบียบวิธีเชิงเลขที่ใช้ในการแก้ปัญหา

การใช้ระเบียบเชิงเลขในการแก้ปัญหาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ข้างต้นจะใช้วิธีระเบียบผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) โดยใช้รูปแบบระบบสมการเป็น Explicit Finite Difference และเปลี่ยนสมการในรูปแบบ differential equation กลายเป็นสมการพีชคณิตโดยวิธีการ Forward Different

จากแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นสามารถสรุปได้ว่าในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กไม่มีฝาปิดนั้น ปริมาณการถ่ายเทความร้อนสุทธิของแต่ละพื้นผิวจากการแผ่รังสีความร้อนสามารถหาได้จากระบบสมการที่สร้างขึ้นจากสมการที่ (13) แต่หากพิจารณาให้เบ้ารับน้ำเหล็กมีฝาปิด ปริมาณการถ่ายเทความร้อนสุทธิของแต่ละพื้นผิวจากการแผ่รังสีความร้อนจะต้องผ่านการแก้ระบบสมการที่สร้างขึ้นจากสมการที่ (13) จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ (15) ไปพร้อมกันตลอดการแก้สมการด้วย

5. วิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัดในการทำงานจริง

จากรูปที่ 1 ที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่าที่ตำแหน่งห่างจากน้ำเหล็กเข้าไป 50 mm ของฮีตซิงก์ที่ 1 และฮีตซิงก์ที่ 5 พบว่าสามารถเหน้าเหล็กได้ครั้งแรกเมื่ออุณหภูมิอยู่ที่ 712 °C แต่จากผลการเก็บข้อมูลในครั้งหลัง พบว่า

อุณหภูมิของการเหน้าเหล็กครั้งแรกไม่จำเป็นต้องทำให้อุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กสูงถึง 712 °C ก็สามารถเหน้าเหล็กได้แล้ว ดังแสดงดังรูปที่ 6 นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงของการรับน้ำเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 50mm ของฮีตซิงก์ที่ 1 และ 5 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 740 – 800 °C และ 500 – 650 °C ตามลำดับ โดยพิจารณาว่าหากเหน้าเหล็กเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิในช่วงนี้จะไม่มีผลต่อความเสียหายของเบ้ารับน้ำเหล็ก เป็นผลให้เบ้ารับน้ำเหล็กยังสามารถที่จะทำงานต่อไปได้ในรอบการทำงานจริง

จากการเก็บข้อมูลในช่วงของการร่อนน้ำเหล็กนั้นพบว่าที่ตำแหน่ง 20 mm ของฮีตซิงก์ที่ 1 ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้ครบทั้ง 20 รอบการทำงานจริงทำให้ไม่สามารถนำค่าที่ได้จากการทดลองของข้อมูลที่ตำแหน่งนี้ไปเปรียบเทียบกับค่าคำนวณได้ และนอกจากนี้พบว่าจาก 20 รอบการทำงานจริงของเบ้ารับน้ำเหล็ก ได้มีจำนวน 14 รอบการทำงานที่มีการร่อน และมี 2 รอบที่ไม่มีการร่อนด้วยหัวเผาโรเจนเนอร์เรฟ(ช่วง 655-656 และ 666-668) เนื่องจากช่วงเวลาของการหลอมเหล็กพอดีกับการใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็ก นอกจากนี้ใน 3 รอบการทำงานที่เหล็กจะมี 2 รอบการทำงาน (ช่วง 658-660 และ 682-683) ที่ตรงกับช่วงเวลา on-peak ของการใช้ไฟฟ้าทางโรงงานจึงหยุดการหลอมเหล็ก ทางโรงงานจำเป็นต้องอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่อนช่วงนี้ให้หมดไป ส่วนอีก 1 รอบการ

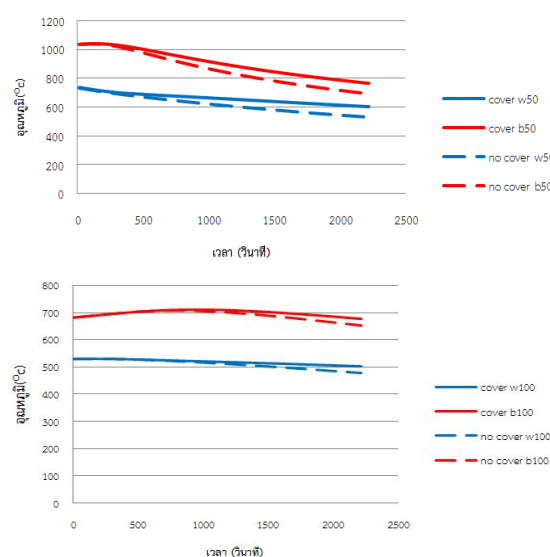
ทำงานที่เหล็กร้อนมีปัญหาเกิดขึ้นจึงขอไม่กล่าวถึงในช่วงนี้ (ช่วง 651-655)

หากพิจารณาถึงสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำ เหล็กพบว่าในช่วงที่เบ้ารับน้ำเหล็กมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สูงก็ไม่ได้จำเป็นต้องหลอมน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงก็ได้ เพราะจะเป็นการสูญเสียพลังงาน เช่นในรอบของการทำงาน 123668-123670 นั้นจะสังเกตได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงอยู่แล้ว หากเห็นว่าเหล็กที่อุณหภูมิสูงลงไปอีกก็ยิ่งทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าสูงเกินไปซึ่งเป็นการสูญเสียความร้อนโดยไม่จำเป็น ในทางตรงกันข้าม สำหรับรอบการทำงานที่ 123682-123683 จะเห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิมีค่าต่ำ ดังนั้นการเห็นว่าเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงลงไปถือเป็นสิ่งที่เหมาะสมจะเห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กจะเพิ่มขึ้น

6. ผลการศึกษาวิจัย

จากการศึกษาผลของการลดลงของอุณหภูมิในกรณีที่มีฝาปิดและไม่มีฝาปิดที่ตำแหน่งต่างๆ ของอิฐทนไฟในเบ้ารับน้ำเหล็กในรูปที่ 7 โดยที่อิฐก้อนที่ 1 คือเส้นกราฟที่แทนด้วยตัว b และอิฐก้อนที่ 5 คือเส้นกราฟที่แทนด้วย w และพิจารณาที่ตำแหน่ง 50 mm และ 100 mm พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเมื่อปิดฝาและไม่ปิดฝา พบว่ามีอุณหภูมิต่างกัน 100 °C และ 10 – 20 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 ดังนั้นอัตราการลดลงของอุณหภูมิภายในอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 50 mm จะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเร็วกว่าที่ 100 mm ดังนั้นในการพิจารณาความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างการใส่ฝาและไม่ใส่ฝาปิดเบ้ารับน้ำเหล็กจึงพิจารณาที่ตำแหน่ง 50 mm

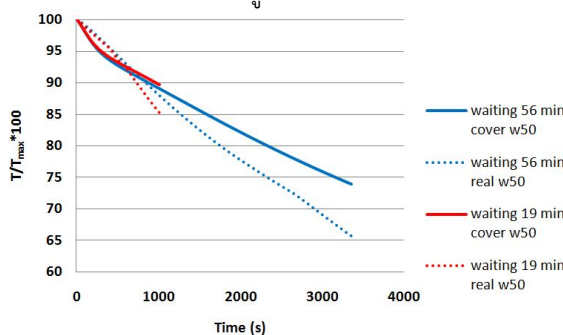
เมื่อพิจารณาในช่วงของรอบการทำงานจริงเมื่อไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและพบว่าช่วงนี้จะใช้เวลา 19 นาที และ 56 นาที เปรียบเทียบกับผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อมีฝาปิดจะพบว่า ไม่ว่าจะใช้เวลาในการรอเท่าใดก็ตามอัตราการลดลงของอุณหภูมิเมื่อมีฝาปิดจะมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิน้อยกว่าเมื่อไม่มีฝาปิดหรือปล่อยให้มีการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศ ตามดังรูปที่ 8



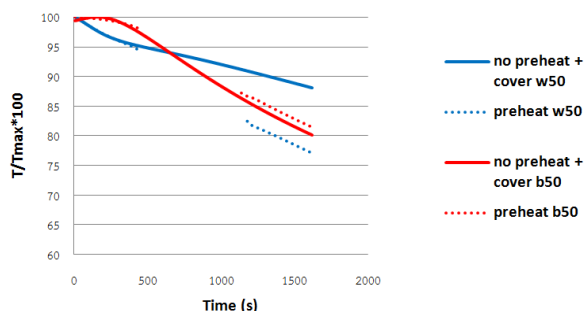
รูปที่ 7 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในของเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อมีเกราะกำบังรังสีปิดปากเบ้าและไม่มีเกราะกำบังรังสีปิดปากเบ้าที่ตำแหน่ง (บน) 50 mm (ล่าง) 100 mm

เมื่อพิจารณาในช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่น้อยหรือกล่าวได้ว่าผลจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเปรียบเทียบกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อไม่มีการอุ่นและมีการปิดฝาโดยใช้เกราะกำบังรังสีพบว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิของการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กยังมีค่าน้อยกว่า

อัตราการลดลงเมื่อมีการอุ่นที่ใช้เวลาในการอุ่นเป็นระยะเวลาที่สั้นเนื่องจากผลของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กยังไม่ส่งผลต่อสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งจะสังเกตได้จากการลดลงของค่าที่ได้จากการวัดยังไม่มีเปลี่ยนแปลงความชัน ดังรูปที่ 9



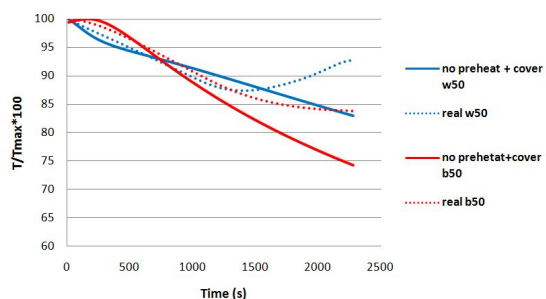
รูปที่ 8 แสดงอัตราการลดลงของอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 50 mm เมื่อไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและมีฝาปิดเมื่อมีเวลารอต่างกัน



รูปที่ 9 แสดงอัตราการลดลงของอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 50 mm เมื่อมีผลของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กน้อยและไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กพร้อมมีฝาปิด

เมื่อพิจารณาในช่วงของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ระยะเวลาในการอุ่นนาน การอุ่นนี้จะมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งจะสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟที่ได้จากการเก็บข้อมูล คือการเปลี่ยนแปลงความชันของอุณหภูมิจากความชันที่เป็นลบสู่ความชันที่เป็นบวกทำให้ในช่วงหลังของการเปลี่ยนแปลงความชันนี้อุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กจะค่อยๆเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อไม่มีการอุ่นเกิดขึ้นแต่มีการปิดเบ้ารับน้ำเหล็กอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กจะค่อยๆลดลงเนื่องจากไม่มีการใส่พลังงานให้แก่เบ้ารับน้ำเหล็ก ดังรูปที่ 10

นอกจากนี้ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากันแต่การอุ่นด้วยหัวเผาเริเจนเนอร์เรทิฟจะมีผลต่อสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 10 แสดงอัตราการลดลงของอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 50 mm เมื่อมีผลของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กมากและไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กพร้อมมีฝาปิด

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่าของอุณหภูมิในขณะที่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจำนวน 14 รอบการทำงานพบว่า ค่าอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เกิดจากการไม่อุ่น

ด้วยหัวเผาแบบเริเจนเนอร์เรทิฟพร้อมด้วยการปิดฝาโดยใช้เกราะกำบังรังสีสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 จากตารางจะพบว่าเมื่ออยู่ 2 รอบการทำงานที่อุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิใช้งานจริง(ตารางที่แรงา) แต่อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณนั้นยังมีค่าอยู่ระหว่างช่วงของอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กที่สามารถทนน้ำเหล็กได้ ดังนั้นจะพบว่าทั้ง 14 รอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีการอุ่นด้วยหัวเผาเริเจนเนอร์เรทิฟสามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่ต้องมีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก นอกจากนี้ยังรวมช่วงตอนที่ไม่ต้องมีการอุ่นด้วยหัวเผาเริเจนเนอร์เรทิฟ อีก 2 รอบการทำงาน รวมทั้งหมด 16 รอบการทำงานใน 1 วัน

เมื่อไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาเริเจนเนอร์เรทิฟแล้วเปลี่ยนมาใช้ฝาปิดเบ้ารับน้ำเหล็กแทนการอุ่นทำให้ลดการใช้ปริมาณน้ำมันเตาได้ 16.2 ลิตร ต่อ 1 รอบการทำงาน สำหรับราคาน้ำมันเตาที่ 23.50 บาทต่อลิตร [8] คิดเป็นเงินที่ประหยัดได้ 2.2 ล้านบาทต่อปี

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลจริงของวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อรอการเทน้ำเหล็กในรอบถัดไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ

รอบการทำงาน 123xxx - 123xxx	ระยะเวลาที่ อุ่นด้วย หัวเผา (นาที)	อุณหภูมิอิฐทนไฟที่ 50 mm (°C)			
		ข้อมูลจริง		ข้อมูลการ คำนวณ	
		ก่อนที่ 1	ก่อนที่ 5	ก่อนที่ 1	ก่อนที่ 5
656-658	27	760.8	602.3	765.1	600.4
660-662	22	757.9	624.7	700.6	546.0
662-664	10	742.3	582.1	792.2	618.8
664-666	19	806.7	648.3	811.3	630.5
668-670	31	751.8	578.8	713.6	536.4
670-672	5	743.9	530.6	838.4	627.3
672-674	16	760.5	642.7	814.3	610.0
674-676	18	767.0	571.1	781.5	614.6
676-678	10	773.6	523.1	843.9	646.2
678-680	16	803.0	608.0	788.7	625.0
680-682	22	771.4	581.9	775.4	621.3
683-685	19	761.6	567.2	708.0	564.8
685-687	28	798.2	604.0	724.3	574.2
687-689	22	740.7	539.4	765.2	603.7

7. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอ

ในช่วงที่มีการอุ่นพบว่าหากผลการอุ่นนั้นยังไม่ทำให้การเปลี่ยนแปลงความชื้นจากความชื้นที่มีค่าเป็นลบไปสู่ความชื้นที่มีค่าเป็นบวก การนำฝามาปิดเข้ารับน้ำหลักจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเข้ารับน้ำหลักน้อยกว่าการอุ่น

การศึกษาผลโดยของการใช้ฝามาปิดเข้ารับน้ำหลักโดยวิธีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสมมติให้ฝามาปิดเข้ารับน้ำหลักเป็นเกราะกักบังรังสีจะสามารถลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กได้ โดยสามารถลดการใช้ไอน้ำในเตา 0.70 ลิตรต่อตันน้ำเหล็ก หรือคิดเป็นมูลค่า 2.2 ล้านบาทต่อปีสำหรับโรงงานที่ร่วมโครงการ

เนื่องจากเกราะกักบังรังสีที่ใช้ในการคำนวณ เราสมมติว่าเป็นวัสดุที่ไม่มีมวล จึงไม่มีการเก็บความร้อนภายในตัวเอง ดังนั้น ในการทำงานจริงฝามาปิดเข้ามีมวลซึ่งสามารถสะสมความร้อนในตัวได้ ซึ่งจะทำให้การสูญเสียความร้อนออกจากเตาน้อยกว่าแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นผลทำให้การแจกแจงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเข้ารับน้ำหลักก็จะจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าที่คำนวณได้ เมื่อการแจกแจงอุณหภูมิของเข้ารับน้ำหลักที่ตำแหน่งต่างๆ มีค่าสูงแล้วจะส่งผลทำให้น้ำเหล็กที่สามารถเทออกจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามีอุณหภูมิที่ต่ำได้เป็นผลทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอุ่นน้ำเหล็กได้

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ศึกษาวิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย บริษัท สยามสตีล ซินดิเกท จำกัด (มหาชน) และคุณศักดิ์ศิริ พุ่มพุกษ์ บริษัท พีพี ซีเอสเอ็ม จำกัด ที่สนับสนุนการศึกษานี้

9. คำอธิบายสัญลักษณ์ (Nomenclature)

T คือ อุณหภูมิ (**K**)

p คือ ความหนาแน่นของอิฐทนไฟ

C คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ
(**J/kg · K**)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน(**W/m² K**)

h อสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(**W/m² K**)

q คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท เข้า – ออกจาก
ปริมาตรควบคุม (**W**)

ε คือ สภาพการแผ่รังสี

F_{i-j} คือ ตัวประกอบการมองเห็นของผิว i ที่เห็นผิว j
(View Factor)

A คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน

Nu คือ Nusselt Number

Gr คือ Grashof Number

Pr คือ Prandtl Number

ตัวห้อย(subscript)

a คือ ปริมาณควบคุมที่พิจารณา

b คือ ชนิดของวัสดุที่ประกอบเป็นผนัง

out คือ บริเวณผิวด้านนอกของผนังladle

conv คือ การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน

rad คือ การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน

10. เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันพลังงานเพื่ออุตสาหกรรม. สถิติการใช้พลังงาน , URL:

<http://www.iie.or.th/iie2003/survey/ratioByIndustrial.aspx>, access on 10/04/2555.

[2] ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น. การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเข้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[3] จักรวาล จรุงคารพูล. การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถึงถ่านน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[4] การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), 19 – 21 ตุลาคม 2554, อ่าวนางวิมลารีสอร์ท จังหวัดกระบี่ นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง การลดใช้พลังงานในการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในกรณีที่อุ่นเข้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผา รีเจนเนอเรทีฟ (Energy Reduction in Steelmaking Process Employing Regenerative Burner for Ladle Preheating)

- [5] การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย
ไทยครั้งที่ 8, 2 – 4 พฤษภาคม 2555, จังหวัด
มหาสารคาม, การควบคุมการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กพร้อมกับ
เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน: ผลการ
ตรวจวัดในวัฏจักรทำงานจริง (Control of Ladle
Preheating Combined with Electric Arc Furnace
Operation for Energy Conservation: Measurement
in Actual Working Cycles)
- [6] ชัชวาลล์ วุฒิศิริศาสตร์. การควบคุมการอุ่นเข้ารับน้ำ
เหล็กพร้อมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัด
พลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชา
วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [7] Perry, R. H and Green D. (1984) Chemical
Engineering Handbook, McGraw-Hill, New
York
- [8] กรมสรรพสามิต. ประกาศกำหนดมูลค่าน้ำมันเตา,
URL : <http://www.excise.go.th/index.php?id=749>,
access on 10/06/2555.