

การพัฒนาระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสภาวะ
ทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

Development of Control-Assisting System for Electric Arc Furnace Based on Thermal Condition of the Ladle

กิจติศักดิ์ ไร่ไพรัชพงศ์¹, ชัชวาลย์ วุฒิศิริศาสตร์, สันหพศ จันทรานูวัฒน์ และ พงษ์ธร จรรย์ญาณกรณ

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330
ติดต่อ: โทรศัพท์: 022 186 610 โทรสาร: 022 522 889
E-mail: armkittisak@hotmail.com

บทคัดย่อ

การควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะการทำงานในกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก บทความนี้นำเสนอผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตรวจวัดสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดวัฏจักรการทำงานของโรงงานตัวอย่าง โดยอาศัยข้อมูลอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดและบันทึกค่าอย่างต่อเนื่อง 6 จุด ได้แก่ ตำแหน่ง 20 50 และ 100 มิลลิเมตร จากผิวด้านในของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ณ ความสูงที่ระดับกลาง และ ความสูงระดับล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก จากผลการวัดอย่างต่อเนื่องในสภาวะทำงานจริงในโรงงานตัวอย่าง พบว่า ในกรณีที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่องและเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูง มีความเป็นไปได้ที่จะลดอุณหภูมิหน้าเหล็กลงได้อีก 31.3°C ซึ่งเทียบเท่ากับ การลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 22.5 kWh/ตันน้ำเหล็กนอกจากนี้ ผลการศึกษาแสดงว่า สภาวะทางความร้อนเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็กมีผลต่อสภาวะทางความร้อนตลอดทั้งกระบวนการของเบ้ารับน้ำเหล็ก

คำหลัก: เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า, การผลิตเหล็กกล้า, อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก, เบ้ารับน้ำเหล็ก

Abstract

Control of tapping temperature in steelmaking process requires information related to process conditions, especially the ladle thermal condition. This article presents comparison between experimental results and the mathematical model and the thermal condition measurements during the entire operation cycle of the case-study factory. Thermal conditions of the ladle are represented by temperatures measured at 6 locations including measurement at 20 mm, 50 mm, 100 mm from the ladle inner surface at the middle level and bottom level on ladle wall. The experimental results indicate that when the process proceeds uninterruptedly, the average temperature, i.e., thermal energy content of the ladle remains relatively high. As a result, it is possible to reduce the tapping temperature of the molten steel by 31.3°C leading to the electric power saving of 22.5 kWh/ton of molten steel. The results also indicate that initial temperature of the ladle has significant influence on ladle thermal condition during the entire cycle.

Keywords: Electric Arcs Furnace, Steelmaking, Tapping temperature, Ladle

ETM-2026

1. บทนำ

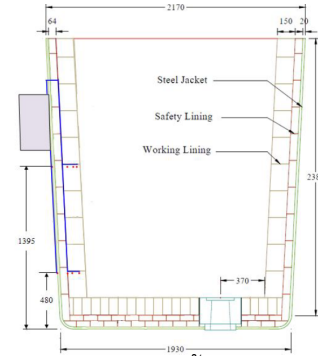
การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF) มีการใช้พลังงานที่สูงเป็นอันดับต้นๆ ของการใช้ไฟฟ้าภายในประเทศ[1] การจัดการการใช้พลังงานในการผลิตเหล็กให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจะช่วยลดการใช้ทั้งปริมาณและค่าใช้จ่ายของพลังงานในกระบวนการผลิตได้

ชัชวาลส์ [2] ศึกษาการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในโรงงานตัวอย่าง โดยการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Tapping Temperature) ด้วยการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสอบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดที่ตำแหน่ง 20 50 และ 100 มิลลิเมตร จากผิวด้านในของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ณ ความสูงที่ระดับกลาง และ ความสูงระดับล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังรูปที่ 1 พบว่าสามารถลดอุณหภูมิน้ำเหล็ก (Tapping Temperature) ลงได้ แต่พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เมื่อมีการใช้งานไปหลายรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กเกิดค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น

ต่อมา กิจจิตศักดิ์[3] ได้ศึกษาเพื่อหาวิธีการทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชัชวาลส์ลดน้อยลง โดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเข้ามาร่วมทำนายโดยวิธีประมาณค่าโดยใช้ตัวประมาณค่าคาลมาน (Kalman Filter) ซึ่งพบว่าสามารถทำให้ช่วงก่อนรับน้ำเหล็กสามารถทำนายได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

ในการเก็บข้อมูลครั้งนี้ ทางโรงงานที่ร่วมโครงการได้ลดปริมาณเหล็กที่หลอมต่อ 1 รอบการทำงาน ส่งผลให้ระยะเวลาในกระบวนการต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็กเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นบทความนี้จึงเป็นการนำเสนอผลการเก็บข้อมูลเปรียบเทียบกับผลการเก็บข้อมูลของครั้งที่ไม่มีผลการลดปริมาณน้ำเหล็ก เพื่อดูผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเหล็กที่หลอมในแต่ละรอบการทำงาน นอกจากนี้จะแสดงผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขียนขึ้นเพื่อทำนาย

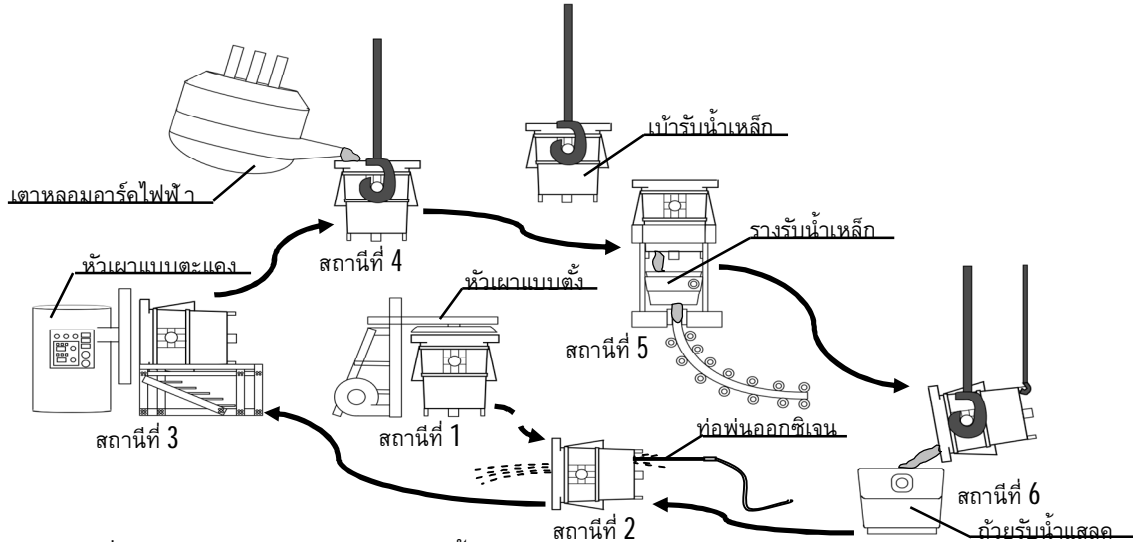
อุณหภูมิน้ำเหล็กมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำเหล็กที่แท้จริงในแต่ละรอบการทำงานเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนในการลดการใช้พลังงานในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า



รูปที่ 1 ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็กและตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ล [2]

2. วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีกระบวนการดังรูปที่ 2 เริ่มจากเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่ออิฐเสร็จใหม่จะถูกนำมาเผาด้วยหัวเผาตั้งที่สถานีที่ 1 เพื่อให้วัสดุที่ใช้ก่ออิฐแข็งตัว หลังจากอุ่นได้ระยะหนึ่ง เบ้ารับน้ำเหล็กก็就会被นำไปที่สถานีที่ 2 เพื่อใส่แผ่นเลื่อนเปิด - ปิด การถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้าเมื่อเสร็จสิ้นที่กระบวนการนี้แล้ว แล้วเบ้ารับน้ำเหล็กก็就会被นำไปเผาด้วยหัวเผาตอนที่สถานีที่ 3 จนอิฐทนไฟมีอุณหภูมิเพียงพอที่จะไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากความเค้นทางอุณหภูมิ (Thermal shock) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 712°C [4] พร้อมกันนั้นน้ำเหล็กที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า หลอมเสร็จพอดีกับกระบวนการของเบ้ารับน้ำเหล็กที่นำมาประกอบการเทน้ำเหล็กที่สถานีที่ 4 หลังจากนั้นน้ำเหล็กจะถูกเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก หลังจากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กก็就会被เคลื่อนย้ายมายังสถานีที่ 5 เพื่อถ่ายน้ำเหล็กออกสู่อ่างรับน้ำเหล็ก เพื่อนำไปหล่อเป็นเหล็กแท่งต่อไป ที่สถานีนี้ น้ำเหล็กที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กต้องมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 1550°C เพื่อไม่ให้ น้ำเหล็กแข็งตัวก่อนถ่ายออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นระยะเวลาระหว่างสถานีที่ 4 และ 5 ถ้าใช้เวลานาน อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ต้องเทออกจากเตาหลอมอาร์ค

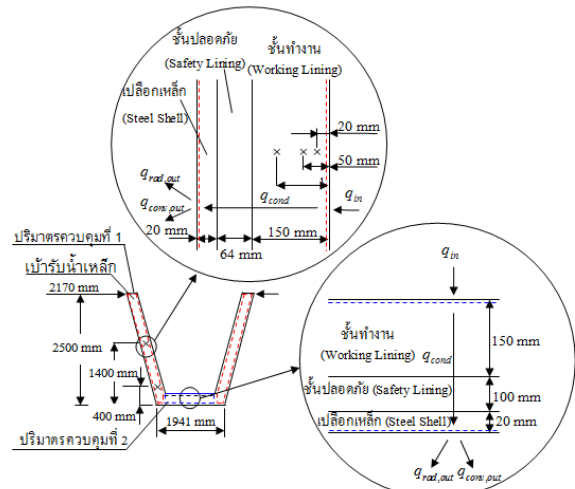


รูปที่ 2 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเต้าหลอมอาร์คไฟฟ้า

ไฟฟ้าต้องมีอุณหภูมิสูงกว่าระยะเวลาระยะเวลาช่วงที่ที่สั้นเนื่องจากการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กที่น้อยกว่า นอกจากนี้สภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนรับน้ำเหล็กก็มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเต้าหลอมเช่นเดียวกัน กล่าวคือถ้าเบ้ามีสภาวะทางความร้อนที่ต่ำ อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกจากเต้าหลอมจะต้องสูงกว่าปกติไม่เช่นนั้นอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบการทำงาน เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กสู่เบ้ารับน้ำเหล็กที่สูงเป็นผลทำให้อุณหภูมิของน้ำเหล็กลดลงอย่างรวดเร็วในทางกลับกันถ้าเบ้ารับน้ำเหล็กมีสภาวะทางความร้อนที่สูงน้ำเหล็กที่สามารถเทออกจากเต้าหลอมควรจะต่ำกว่ารอบการทำงานปกติ ด้วยเหตุผลที่ใกล้เคียงกัน ไม่เช่นนั้นจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานจากการหลอมน้ำเหล็กที่มากเกินไป[4] หลังจากนั้นน้ำเหล็กที่เหลือน้ำเหล็กที่มากเกินจะถูกนำไปเททิ้ง จากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กจะเข้าสู่กระบวนการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็กต่อไป

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ชัชวาลส์ [2] ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามกระบวนการต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็กสอบเทียบกับผลการตรวจวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็ก และตั้งอยู่บนสมมติฐานดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุม (และตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple) ในเบ้ารับน้ำเหล็ก

1. ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นผนังทรงกระบอกเนื่องจากมีความลาดเอียงของผนังน้อยมาก
2. การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้เป็นฟังก์ชันที่เขียน เนื่องจากรัศมีของเบ้ารับน้ำเหล็กมากกว่าความหนาของผนังถึง 10 เท่า
3. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ 1 มิติตามแนวรัศมี
4. ไม่มีความต้านทานความร้อนที่เกิดบริเวณหน้าสัมผัสระหว่างชั้นต่างๆภายในผนังเบ้า

ETM-2026

3.1 ปริมาตรควบคุม

ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซิวส์ส ได้แบ่งการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กออกเป็น 2 ส่วนได้แก่การถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังข้าง และผนังกันของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งในบทความนี้จะพิจารณาปริมาตรควบคุมล้อมรอบผนังข้างเป็นปริมาตรควบคุมที่ 1 และปริมาตรควบคุมล้อมรอบผนังกันเป็นปริมาตรควบคุมที่ 2 ตามรูปที่ 3

3.2 สมการควบคุม

จากข้อสมมติต่าง ๆ ข้างต้นเมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่เกิดขึ้นในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งใดๆ จะได้สมการควบคุมดังสมการที่ (1)

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

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

เมื่อ ρ แทนความหนาแน่นของอิฐทนไฟ

c แทนความจุความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ

k แทนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอิฐทนไฟ

3.3 เงื่อนไขค่าขอบ

เงื่อนไขค่าขอบของผิวผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะเกิดขึ้นจากการถ่ายเทความร้อนผ่านการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อน จะมีลักษณะดังสมการที่ (2)

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

ในฝั่งขวามือของสมการที่ (2) ปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่ถ่ายเทออกจากผิวภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นการถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศซึ่งในที่นี้พิจารณาให้บรรยากาศมีลักษณะเป็นวัตถุดำที่มีอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิบรรยากาศ (T_o) สามารถหาได้จากสมการที่ (3) และ (4)

$$q_{a,rad,out} = \varepsilon_{a,b} \sigma (T_{a,out}^4 - T_o^4) \quad (3)$$

$$q_{a,conv,out} = h_{a,out} (T_{a,out} - T_o) \quad (4)$$

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหาได้จากสมการที่ (5) - (11)

สำหรับผนังข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก: $, 0.1 < Pr < 40$

$$Gr > 10^9; Nu = 0.138 Gr^{0.36} (Pr^{0.175} - 0.55) \quad (5)$$

$$Gr < 10^9; Nu = 0.683 Gr^{0.25} Pr^{0.25} \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{0.25} \quad (6)$$

สำหรับกันเบ้าผนังรับน้ำเหล็ก:

$$Nu = 0.54 (Gr Pr)^{0.25} \quad (7)$$

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

$$Nu = 0.14 (Gr Pr)^{0.25} \quad (8)$$

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

$$\text{เมื่อ} \quad Nu_a = \frac{h_a L_e}{k_{a,b}} \quad (9)$$

$$Gr_a = \frac{g \rho_o (T_{a,out} - T_o) L_e^3}{\mu_o^2} \quad (10)$$

$$Pr_a = \frac{(c_{p,o} \mu_o)}{k_o} \quad (11)$$

สำหรับเงื่อนไขค่าขอบของผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก ($x=0$) จะเป็นไปตามวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยพบว่า มี 5 กระบวนการที่เกี่ยวข้องคือ

3.3.1 กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ที่กระบวนการนี้มีการรับความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเข้ามา ดังนั้น การถ่ายเทความร้อนจะเป็นไปตามสมการ

$$-k_{a,b} \frac{dT_{a,b}}{dx} = F \sigma (T_{fl}^4 - T_{a,b_ladle,surf}^4) \quad , x = 0 \quad (12)$$

โดยที่ F คือตัวประกอบการแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก สามารถหาได้จาก Mohanty และ Satayayut [5]

$$T_{fl} \text{ คืออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (K)}$$

$T_{a,b_ladle,surf}$ คืออุณหภูมิของผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

3.3.2 กระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

ที่กระบวนการนี้จะมีความซับซ้อนเนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนในพื้นที่ผิวปิด โดยสามารถหาค่าได้จากการแก้ระบบสมการที่ 13

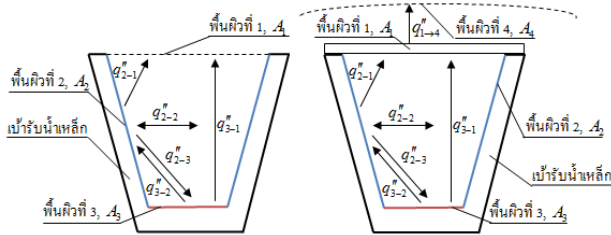
$$\sum_{j=1}^N \left(\frac{\delta_{ij} - F_{i-j}}{\varepsilon_j} - F_{i-j} \frac{1 - \varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right) \frac{q_{j,rad}}{A_j} = \sum_{j=1}^N (\delta_{ij} - F_{j-i}) \sigma T_j^4 \quad (13)$$

โดยที่ i และ j แทนหมายเลขของพื้นผิวแต่ละพื้นผิวตามรูปที่ 4 (ซ้าย) และเครื่องหมาย δ_{ij} คือ

ETM-2026

ฟังก์ชันโคเนคเตอร์ เดลตาซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (14)

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



รูปที่ 4 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ไม่มีฝาปิด(ซ้าย) และมีฝาปิด(ขวา)

3.3.3 กระบวนการรับน้ำเหล็ก

ที่กระบวนการนี้ มีน้ำเหล็กเต็มอยู่เต็มเบ้ารับน้ำเหล็กและกำลังเคลื่อนย้ายไปถ่ายน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการนี้เบ้ารับน้ำเหล็กจะได้รับความร้อนจากการพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าเข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก

$$-k_{a,b} \frac{dT_{a,b}}{dx} = h_{st} (T_{st} - T_{a,b_ladle,surf}) \quad , x = 0 \quad (15)$$

ในขณะที่เดียวกันน้ำเหล็กก็สูญเสียความร้อนด้วยการพาความร้อนให้กับผนังเบ้ารับน้ำเหล็กและกับเบ้ารับน้ำเหล็ก และมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนผ่านผิวแสลกที่ปกคลุมอยู่ด้านบนน้ำเหล็ก

3.3.4 กระบวนการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก

ที่กระบวนการนี้จะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนคล้ายกับหัวข้อที่ 3.3.3 แต่แตกต่างกันตรงที่ปริมาณน้ำเหล็กจะมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ และที่เวลามากกว่า 0.5 เท่าของเวลาที่ใช้ถ่ายน้ำเหล็กนั้นทางโรงงานมีการนำฝาปิดเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนออกจากน้ำเหล็ก โดยมีการถ่ายเทความร้อนภายในผิวปิดเช่นเดียวกัน และในที่นี้จะสมมติให้ฝาปิดมีลักษณะเกาะก้ำบังรังสีซึ่งจะลดทอนการแผ่รังสีที่ออกสู่บรรยากาศโดยที่ไม่มีการเก็บสะสมความร้อนภายในฝาทำให้การถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เข้าสู่พื้นผิวที่ 1 ในรูปทางขวาของรูปที่ 4 จะต้องเท่ากับปริมาณความร้อนที่อีกด้านหนึ่งของฝาถ่ายเท

ออกสู่บรรยากาศจะสามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ได้โดยสมการที่ (16)

$$\frac{(q_{o,1i}^* - E_{b,1})}{(1 - \varepsilon_{1i}) / \varepsilon_{1i} A_1} = \frac{(E_{b,1} - q_{o,1o}^*)}{(1 - \varepsilon_{1o}) / \varepsilon_{1o} A_1} = \frac{(q_{o,4}^* - E_{b,4})}{(1 - \varepsilon_4) / \varepsilon_4 A_4} = \frac{(q_{o,1o}^* - q_{o,4}^*)}{1 / F_{1o \rightarrow 4} A_1} \quad (16)$$

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

3.3.5 กระบวนการเทแสลก

ที่กระบวนการนี้เบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะมีการถ่ายเทความร้อนคล้ายกับหัวข้อที่ 3.3.2

3.4 ตัวประมาณค่าคาลมาล

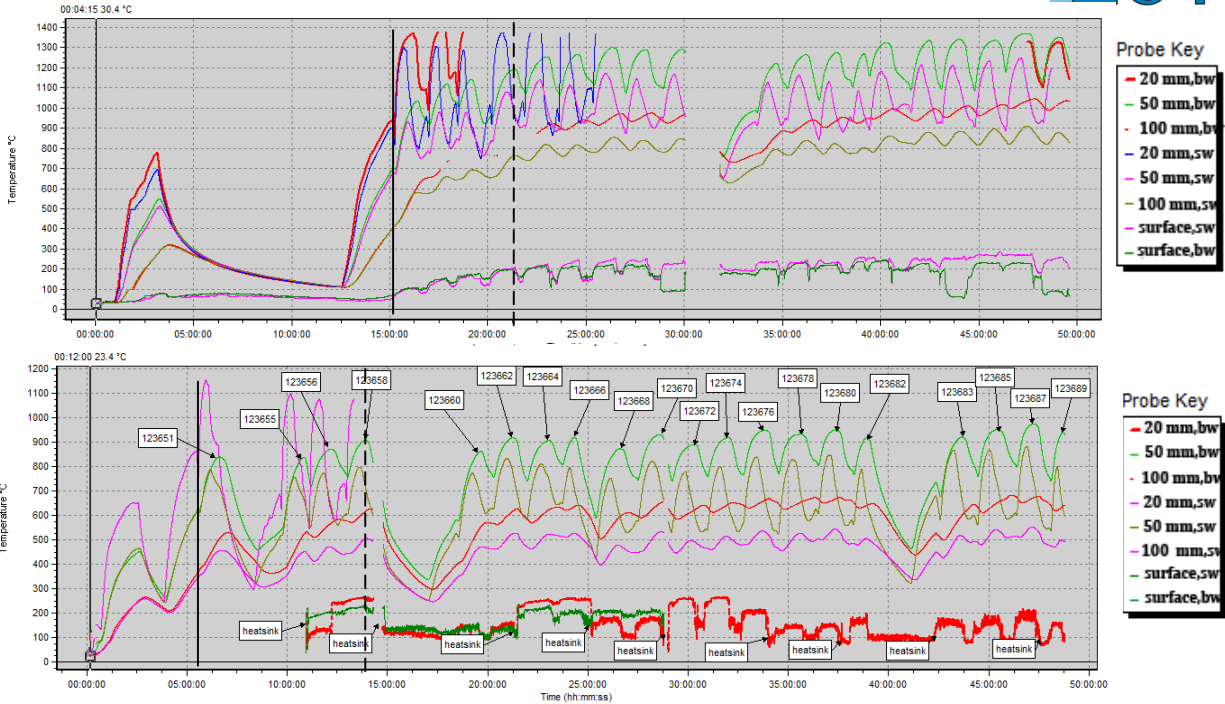
จากการใช้แบบจำลองของซัซวัสส์ไปหลายรอบการทำงานพบว่าแบบจำลองที่ได้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นจึงตัดสินใจ [3] ได้พยายามทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก่อนการเทน้ำเหล็กมีความแม่นยำมากขึ้น โดยใช้ตัวประมาณค่าคาลมาล ซึ่งต้องมีการปรับเปลี่ยนแบบจำลองเล็กน้อยเพื่อให้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบปริภูมิสเตตได้ โดยมีเงื่อนไขค่าขอบเป็นดังที่กล่าวมาแล้ว และสามารถทำนายอุณหภูมิในกระบวนการก่อนการเทน้ำเหล็กได้แม่นยำมากขึ้น ก่อนนำไปทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็ก

4. ผลการศึกษาวิจัย

4.1 ผลการตรวจวัด

ผลการตรวจวัดทั้ง 2 ครั้งการทำงานที่ได้กล่าวมาแล้ว แสดงได้ดังรูปที่ 5 จากรูปแสดงผลการตรวจวัดที่ตำแหน่ง 20 50 และ 100 mm. จากผนังด้านในของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งกึ่งกลางและทางด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยที่ (รูปบน) แสดงผลการตรวจวัดของครั้งล่าสุดโดยที่ทางโรงงานลดปริมาณการหลอมเหล็กต่อหนึ่งรอบการทำงานลง ในขณะที่ (รูปล่าง) แสดงผลการตรวจวัดของครั้งก่อนหน้า เมื่อไม่มีการลดปริมาณน้ำเหล็กลง โดยการลดปริมาณน้ำเหล็กจะลดจากจาก 23 ตัน เหลือ 20 ตัน แต่สำหรับทั้ง 2 กรณีนั้นน้ำเหล็กที่ถูกเทออกจากเตาหลอมมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันคืออุณหภูมิ

ETM-2026



รูปที่ 5 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็กในสภาวะทำงานจริง รูปบนเป็นกรณีที่มีการลดปริมาณการหลอมเหล็กลง (การเก็บข้อมูลล่าสุด) รูปล่างเป็นกรณีปริมาณน้ำเหล็กปกติ (การเก็บข้อมูลครั้งก่อน) 1687.7 °C และ 1685 °C สำหรับการเก็บข้อมูลครั้งก่อน และการเก็บข้อมูลครั้งล่าสุด ตามลำดับ ซึ่งแสดงรายละเอียดอุณหภูมิหน้าเหล็กแต่ละรอบการทำงานได้ดังตารางที่ 1

จากรูปที่ 5 (บน) พบว่า พลังงานที่สะสมอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ จะมีค่าสูงกว่ารูปที่ 5 (ล่าง) เช่นที่วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กหลังจากการเทน้ำเหล็กเสร็จแล้ว (เส้นประในรูปแสดงตำแหน่งหลังเทน้ำเหล็กเสร็จแล้วของรอบการทำงานที่ 4) ซึ่งการแจกแจงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เช่นตำแหน่งที่ 50 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งอิฐแถวที่ 1 (50 mm, bw) ของรูปบนและล่างจะเท่ากับ 1200 °C และ 900 °C ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนกระบวนเทน้ำเหล็กในรอบแรก(เส้นทึบ)ไม่เท่ากันซึ่งผลดังกล่าวมีผลกระทบต่อการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งวัฏจักรการทำงาน

จากการวิเคราะห์เวลาช่วงเวลาที่น้ำเหล็กมีการถ่ายเทความร้อนให้แก่เบ้ารับน้ำเหล็กทั้งสองครั้งมีเวลาไม่เท่ากัน คือจะแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ช่วงเวลา

ของการถ่ายเทความร้อนออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ดังตารางที่ 2 จึงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้พลังงานที่สะสมอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าสูง

นอกจากนี้อีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลทำให้อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงคือลักษณะการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก กล่าวคือจากการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในการเก็บข้อมูลครั้งล่าสุด ลักษณะการทำงานจะต่อเนื่องกันไป แต่ลักษณะการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กของการเก็บข้อมูลครั้งก่อนหน้าจะรับน้ำเหล็กแล้วปล่อยให้มีการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเกิดขึ้นบ่อยเกินไป

นอกจากนี้จากตารางที่ 2 นั้นจะพบว่า เบ้ารับน้ำเหล็กสามารถทำงานได้ 19 รอบการทำงาน โดยการใช้เวลาในการรับน้ำเหล็กเฉลี่ย 58 นาทีและ 61 นาทีของการเก็บข้อมูลครั้งล่าสุดและผลการเก็บข้อมูลครั้งก่อนหน้า ตามลำดับ นั้นหมายความว่าในการเทปริมาณน้ำเหล็กที่น้อยกว่าเดิมนั้น ส่งผลให้ช่วงระยะเวลาการทำงานในแต่ละรอบการทำงานน้อยลงกว่าเดิม ดังนั้นหากพิจารณาเวลาที่ใช้ทำงานเท่ากัน

ETM-2026

การหลอมเหล็กด้วยการลดปริมาณน้ำเหล็กลงเหลือ 20 ตัน จาก 23 ตัน จะก่อให้เกิดผลผลิตที่มากขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 1 อุณหภูมิหน้าเหล็กที่เทจาก EAF จากผลการปฏิบัติงานจริง

รอบการทำงาน ที่	อุณหภูมิหน้าเหล็ก (°C)	
	ผลการเก็บ ข้อมูลครั้งก่อน	ผลการเก็บ ข้อมูลครั้ง ล่าสุด
1	1696	1690
2	1676	1686
3	1663	1697
4	1695	1675
5	1680	1688
6	1682	1692
7	1707	1677
8	1705	1670
9	1707	1682
10	1705	1717
11	1691	1665
12	1676	1671
13	1689	1688
14	1685	1668
15	1693	1682
16	1677	1688
17	1677	1713
18	1682	1691
19	1681	1675

4.2 ผลการทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กโดยการใช้แบบจำลอง

สำหรับผลการทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กที่สามารถทำได้ โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น โดยที่ไม่ก่อให้เกิดการแข็งตัวของน้ำเหล็กก่อนกระบวนการสุดท้ายที่เกิดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่หลงในบารับหน้าเหล็กจริงจากการเก็บข้อมูลในครั้งล่าสุด (มีการลดปริมาณน้ำเหล็กจาก 23 ตัน เหลือ 20 ตัน) พบว่า

สามารถลดอุณหภูมิการเทหน้าเหล็กเฉลี่ยได้ 31.3 °C ต่อ 1 รอบการทำงาน ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3 ตารางที่ 2 แสดงเวลาที่ใช้ในแต่ละกระบวนการของบารับหน้าเหล็ก

กระบวนการ	เวลา(นาที)		
	ผลการเก็บ ข้อมูลครั้ง ล่าสุด	ผลการเก็บ ข้อมูลครั้ง ก่อน	ผลต่าง
รับความร้อน*	1106	1158	52
คายความร้อน*	380	545	165

หมายเหตุ * "รับความร้อน" เป็นเวลาของกระบวนการที่มีน้ำเหล็กอยู่ภายในบารับหน้าเหล็ก ส่วนกระบวนการ "คายความร้อน" เป็นเวลาของกระบวนการที่ไม่มีน้ำเหล็กบรรจุอยู่ภายในบารับหน้าเหล็ก

ตารางที่ 3 ผลการทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กที่เทออกจากเตาหลอมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับอุณหภูมิการเทจริงเมื่อมีการลดปริมาณการหลอมเหล็ก

รอบการทำงานที่	อุณหภูมิหน้าเหล็ก (°C)		
	การเก็บ ข้อมูลจริง	ทำนาย	ผลต่าง
1	1696	1675	21
2	1676	1648	28
3	1663	1626	37
4	1695	1680	15
5	1680	1676	4
6	1682	1650	32
7	1707	1653	54
8	1705	1655	50
9	1707	1655	52
10	1705	1651	54
11	1691	1652	39
12	1676	1638	38

ETM-2026

รอบการ ทำงานที่	อุณหภูมิหน้าเหล็ก ($^{\circ}C$)		
	การเก็บ ข้อมูลจริง	ทำนาย	ผลต่าง
13	1689	1607	82
14	1685	1672	13
15	1693	1654	39
16	1677	1662	15
17	1677	1686	-9
18	1682	1682	0
		เฉลี่ย	31.3

5. สรุปผลการศึกษาราย

จากข้อมูลที่ได้ออกมาจากการตรวจวัดและบันทึกในการทำงานจริง โดยการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ตำแหน่ง 20 50 และ 100 มิลลิเมตร จากผิวด้านในของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ณ ความสูงที่ระดับกลาง และ ความสูงระดับล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก พบว่าเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นการทำงานอย่างต่อเนื่องทำให้เบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะลดอุณหภูมิหน้าเหล็กที่เทลงได้เฉลี่ย 31.3 $^{\circ}C$ ซึ่งเทียบเท่ากับการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าได้ 22.5 kWh/ตันน้ำเหล็ก [6]

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ศึกษาวิจัยขอขอบขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย บริษัท สยามสตีล ซินดิเกท จำกัด (มหาชน) และคุณศักดิ์สิทธิ์ พุ่มพฤษย์ บริษัท พีพี ซีเอส เต็ม จำกัด ที่สนับสนุนการศึกษารายนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สถาบันพลังงานเพื่ออุตสาหกรรม. สถิติการใช้พลังงาน, URL: <http://www.iie.or.th/iie2003/survey/ratioByIndustrial.aspx>, access on 10/04/2555.

[2] ชัชวาลล์ วุฒิศิริศาสตร์. การควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

[3] การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, 9th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT), 8-10 พฤษภาคม 2556, ชลพฤกษ์ รีสอร์ท อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง การประมาณการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้าเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้ตัวประมาณค่าเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กของกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Kalman Filter Estimation in Steelmaking Process for Estimate Steel Temperature before Tapping)

[4] การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, The 26th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), 24-27 ตุลาคม 2555, ดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง การลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าโดยการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างรอการเทน้ำเหล็ก (Energy Reduction in steelmaking process by covering the ladle with a shield during delay time for the next tapping)

[5] B. Mohanty and J. Satayayut.. Dynamic Model for Ladle Preheater Performance Evaluation. International journal of energy research 16 (1992): 51 - 60.

[6] ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น, การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (2552), วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ