การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25
19-21 ตุลาคม 2554 จังหวัดกระบี่

การศึกษาเชิงตัวเลขของการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กบริเวณทางออกของเตาเผาเหล็กโดยคำนึงถึงผลจากการสูญเสียความร้อนที่ช่องเปิด

A Numerical Study of the Temperature Distribution in a Billet at the Reheating Furnace Discharge Doors Taking the Doors Heat Loss into Account

เอกรัชฎ์ สมเรียววงศ์กุล*, จิตติน แตงเที่ยง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท กรุงเทพฯ 10330
*ติดต่อ: eakarach_som@hotmail.com, 086 984 9468

บทคัดย่อ

การสูญเสียความร้อนออกจากเตาเผาเหล็กผ่านช่องเปิดเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่ประตูเตาเปิดจะสูญเสียความร้อนมากที่สุด การสูญเสียความร้อนดังกล่าวก่อให้เกิดผลเสียคือสิ้นเปลืองพลังงาน และการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดความเสียหายอื่นๆ ตามมา งานวิจัยนี้จึงศึกษาการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กบริเวณช่องเปิดโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแก้สมการกำกับด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก และศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิเพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาดังกล่าว

เตาเผาเหล็กที่ศึกษาเป็นเตาแบบผลักดัน (pusher type reheating furnace) ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาปัญหาเป็นแบบสองมิติในสภาวะคงตัว และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจากสภาพการทำงานจริงของเตาเผาเหล็ก กล่าวคือมีการแผ่รังสีความร้อนจากผนังเตา การแผ่รังสีจากแก๊สการพาความร้อน และถ่ายเทความร้อนจากการเปิดและปิดประตูเตา ใช้การคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล (Gauss-Seidel Iteration) ทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้จากโรงงานด้วยกล้องถ่ายภาพทางความร้อน ศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กโดยจำลองสภาพการทำงานของระบบด้วยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่างๆ ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นแล้ววิเคราะห์ผลที่ได้ว่าตัวแปรใดมีความสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิ

จากการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขกับค่าที่วัดได้จากโรงงานพบว่ามีความสอดคล้องกันด้านคุณภาพ การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตามีค่ามากที่สุด ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิมากที่สุดคืออุณหภูมิภายในของพื้นเตา จึงควรติดฉนวนที่พื้นเตาเพื่อให้การสูญเสียความร้อนส่วนใหญ่มีค่าลดลงส่งผลให้อุณหภูมิภายในของพื้นเตาสูงขึ้น นอกจากนี้การหุ้มฉนวนที่ประตูเตาเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดการสูญเสียความร้อนที่ไม่จำเป็นและช่วยให้การแจกแจงอุณหภูมิสม่ำเสมอมากขึ้น

คำหลัก: ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, การแจกแจงอุณหภูมิ, ช่องเปิด, เตาเผาเหล็ก

Abstract

Heat loss through reheating furnace openings is difficult to prevent, especially when the furnace doors are open. The heat loss leads to inefficient energy consumption and non-uniformity of temperature distribution in a billet resulting in low production yield. Therefore, this research is conducted to study the heat transfer of the billet at the openings by formulating a mathematical model and solving the governing equation by a numerical method to predict the temperature distribution in the billet. The effects of the most crucial factor on the temperature distribution in the billet are investigated to prevent the mentioned problems.

The studied reheating furnace is a pusher type using fuel oil as fuel. The mathematical model is developed by assuming two dimensional and steady state problem. The boundary conditions according to the practical condition are surface radiation, gaseous radiation, convection and heat transfer resulted from opening and closing furnace doors. The Gauss-Seidel iteration technique is employed to predict the temperature distribution in the billet. The results are verified by comparing the numerical prediction with the thermal images taken by a thermal infrared imaging camera. Investigation of the significant factors affecting the temperature distribution is performed by simulating working condition of the furnace by varying those factors.

The comparison between the numerical prediction and the measured values shows a qualitative agreement. The major heat loss is the loss through the furnace floor. Consequently, the most crucial factor affecting the temperature distribution is furnace floor inner temperature. Therefore the furnace floor must be insulated to decrease the majority of the heat loss resulting in increasing of furnace floor inner temperature. In additions, insulating the furnace doors is another method to prevent heat loss and to improve uniformity of temperature distribution in the billet.

Keywords*:* numerical method, mathematical model, temperature distribution, opening, reheating furnace

1. บทนำ

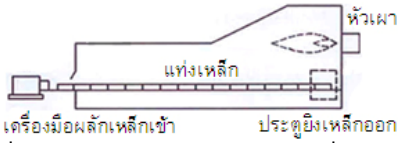
อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำของอุตสาหกรรมหลักอื่นๆ อีกทั้งกระบวนการผลิตเหล็กยังเป็นกระบวนการที่มีสัดส่วนการใช้พลังงานต่อมูลค่าการผลิตหรือความเข้มข้นของการใช้พลังงาน (energy intensity) สูงมากเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุตสาหกรรมอื่นโดยรวม

เตาเผาเหล็ก (reheating furnace) เป็นอุปกรณ์หลักในการให้ความร้อนแก่เหล็กเพื่อให้เหล็กอ่อนตัวก่อนนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กอื่นๆ พลังงานที่ใช้ในเตาเผาเหล็กเป็นพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้แก๊สธรรมชาติหรือน้ำมันเตา โดยทั่วไปอุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าอยู่ในช่วง 1,100-1,250°C (ศุภณัฐ เจริญ [1]) จึงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมากเพื่อทำความร้อนให้ได้ถึงอุณหภูมิดังกล่าว การป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากเตาจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ผู้ผลิตต้องพิจารณาเนื่องจากการสูญเสียความร้อนออกจากเตานอกจากจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานแล้วยังมีผลทำให้ชิ้นเหล็กภายในเตามีอุณหภูมิลดลงส่งผลให้การแจกแจงอุณหภูมิของชิ้นเหล็กไม่สม่ำเสมอหรือไม่เหมาะสมต่อการนำไปแปรรูปทำให้เกิดความเสียหายในกระบวนการแปรรูปได้ ความเสียหายดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมากทั้งในเรื่องสูญเสียวัตถุดิบ อัตราการผลิตลดลงและใช้พลังงานเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิในชิ้นเหล็กเป็นอย่างยิ่ง

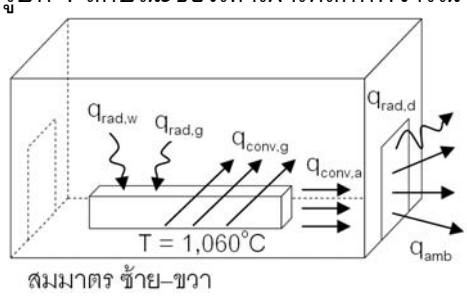
งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลจากการสูญเสียความร้อนออกจากเตาที่มีต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก โดยจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กและศึกษาหาปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก เพื่อเป็นแนวทางในการป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อแท่งเหล็กอันจะนำมาซึ่งความสูญเสียดังที่กล่าวมา

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เตาเผาเหล็กที่ศึกษาเป็นเตาแบบผลักดันใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 การถ่ายเทความร้อนบริเวณทางออกของเตาแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ลักษณะของเตาเผาเหล็กที่พิจารณา



รูปที่ 2 แสดงการถ่ายเทความร้อนบริเวณทางออกเตา

งานวิจัยนี้เป็นการหาการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กยาว 2.42 m กว้าง (W) 0.1 m และสูง (H) 0.1 m สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่า 30 W/m.K และสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนมีค่า 0.9 กำหนดปริมาตรควบคุมของปัญหานี้เป็นแท่งเหล็กดังแสดงในรูปที่ 3 มีสมมติฐานดังนี้

1) พิจารณาปัญหาในสภาวะคงตัว
2) พิจารณาปัญหาในสองมิติโดยกำหนดให้อุณหภูมิในแนวแกน z คงที่
3) รูปร่างความเร็วของแก๊สไอเสียคงตัวในแนวแกน x
4) การถ่ายเทความร้อนมีความสมมาตรในแนวแกน x จึงวิเคราะห์แท่งเหล็กเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวทั้งหมด (L = 1.21 m)
5) พิจารณาแก๊สเป็นแก๊สเทา (gray gas, $\varepsilon_g = \alpha_g$)
6) พิจารณาผนังเตาและแท่งเหล็กเป็นพื้นผิวเทา (gray surface, $\varepsilon_s = \alpha_s$)
7) คุณสมบัติทางความร้อนของแท่งเหล็กคงที่
8) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแก๊สคงที่
9) อุณหภูมิแก๊สไอเสียคงที่มีค่า 1,250°C
10) อุณหภูมิผนังเตาคงที่มีค่า 1,150°C
11) ผิวล่างของแท่งเหล็กอุณหภูมิคงที่ 1,060°C เท่ากับอุณหภูมิพื้นเตา

สมการกำกับของปัญหาที่พิจารณาคือ

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0 \qquad (1)$$

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังรูปที่ 4 โดยมีการแผ่รังสีจากแก๊สไอเสีย ($q_{rad,g}$) การแผ่รังสีจากผนังเตา ($q_{rad,w}$) และการพาความร้อนจากแก๊สไอเสีย ($q_{conv,g}$) เป็นความร้อนถ่ายเทเข้าสู่แท่งเหล็ก (Yu Jin Jang และ Sang Woo Kim [2]) ส่วนความร้อนสูญเสียออกจากแท่งเหล็กประกอบด้วยการนำความร้อนออกทางพื้นเตา (Anton Jaklic, Franci Vode และTomaz Kolenko [3]) การแผ่รังสีผ่านประตูเตาขณะปิดประตูเตา ($q_{rad,d}$) การแผ่รังสีกับสิ่งแวดล้อมภายนอก (q_{amb}) และการพาความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา ($q_{conv,a}$) ขณะเปิดประตูเตา (ศุภณัฐ เจริญ [1])

จากรูปที่ 4 เงื่อนไขขอบเขตเขียนได้ดังนี้

1) x=0;

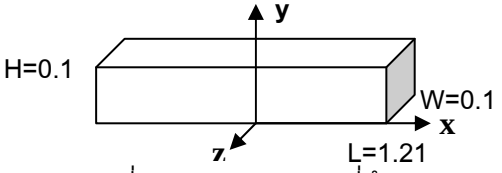
$$\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0}=0 \qquad (2)$$

2) x=L;

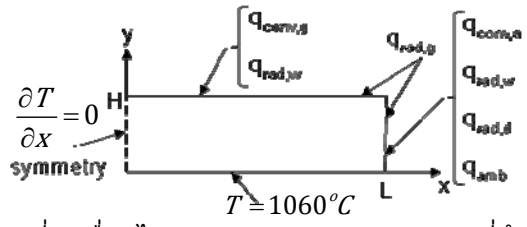
$$k\Delta y W\left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=L}=q_{conv,a}+q_{rad,g}+q_{rad,w}+q_{rad,d}+q_{amb} \qquad (3)$$

3) y=0;

$$T\big|_{y=0}=1060^{o}C \qquad (4)$$



รูปที่ 3 ปริมาตรควบคุมที่ศึกษา



รูปที่ 4 เงื่อนไขขอบเขตของปริมาตรควบคุมที่ศึกษา

4) y=H;

$$k\Delta xW\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=H}=q_{rad,w}+q_{rad,g}+q_{conv,g} \quad (5)$$

สมการการถ่ายเทความร้อนต่างๆ เขียนได้ดังนี้

1) การแผ่รังสีจากแก๊ส ($q_{rad,g}$) (Hottel [4])

การแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่แท่งเหล็กหาได้จาก

$$q=A_s\left[\frac{\varepsilon_s+1}{2}\left(4+a+b-c\right)\varepsilon_{g,av}\sigma T_{av}^3\right]\left(T_g-T_s\right) \quad (6)$$

สมการนี้จะมีความแม่นยำเมื่อสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิวมีค่ามากกว่า 0.8 และอุณหภูมิแก๊สมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิพื้นผิวอยู่ในช่วง $7/9 < T_g/T_s < 9/7$ โดยที่ค่า a และb หาได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [4] ค่า c เป็นค่าคงที่มีค่า 0.5 และค่า ε_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สหาจาก

$$\varepsilon_g=\varepsilon_w+\varepsilon_c-\Delta\varepsilon \quad (7)$$

โดยที่ ε_w, ε_c และ $\Delta\varepsilon$ สามารถหาได้จากเอกสารอ้างอิงที่ [5]

2) การแผ่รังสีจากผนังเตา ($q_{rad,w}$)

พิจารณาให้การแผ่รังสีจากผนังเตาเป็นการแผ่รังสีภายในผิวปิดสองผิว (two surfaces enclosure) ระหว่างแท่งเหล็กกับผนังและเพดานของเตา อัตราการแผ่รังสีหาได้จาก (Incropera et al. [5])

$$q_{rad,w}=q_{ws}=\frac{\sigma\left(T_w^4-T_s^4\right)}{\frac{1-\varepsilon_w}{\varepsilon_w A_w}+\frac{1}{A_w F_{ws}}+\frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s A_s}} \quad (8)$$

3) การพาความร้อนจากแก๊สไอเสีย ($q_{conv,g}$)

เป็นปัญหาการพาความร้อนแบบบังคับผ่านแผ่นราบ มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ หาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จาก (Incropera et al. [5])

$$q_{conv,g}=h_g A_s\left(T_g-T_s\right) \quad (9)$$

4) การแผ่รังสีกับประตูเตา ($q_{rad,d}$)

เป็นการแผ่รังสีระหว่างแท่งเหล็กกับประตูเตาขณะปิดประตูเตา แต่เนื่องจากพิจารณาให้เป็นปัญหาสภาวะคงตัวจึงต้องคูณสัดส่วนเวลาการปิดประตู (C_{ct}) เข้าไปในสมการการถ่ายเทความร้อนด้วย

$$q_{rad,d}=A_c C_{ct} F_{sd}\sigma\varepsilon_s\left(T_d^4-T_s^4\right) \quad (10)$$

5) การแผ่รังสีกับสิ่งแวดล้อมภายนอก (q_{amb})

เป็นการแผ่รังสีระหว่างแท่งเหล็กกับสิ่งแวดล้อมภายนอกขณะเปิดประตูเตา แต่เนื่องจากพิจารณาให้เป็นปัญหาสภาวะคงตัวจึงต้องคูณสัดส่วนเวลาการเปิดประตู (C_{ot}) เข้าไปในสมการการถ่ายเทความร้อนด้วย

$$q_{amb}=A_c C_{ot} F_{sa}\sigma\varepsilon_s\left(T_{amb}^4-T_s^4\right) \quad (11)$$

6) การพาความร้อนจากอากาศรั่วเข้าสู่เตา ($q_{conv,a}$)

พิจารณาให้เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับที่มีการไหลแบบขวางและราบเรียบ เป็นการถ่ายเทความร้อนขณะเปิดประตูเตา จึงต้องคูณสัดส่วนเวลาการเปิดประตู (C_{ot}) ในสมการการถ่ายเทความร้อนด้วย (Incropera et al. [5])

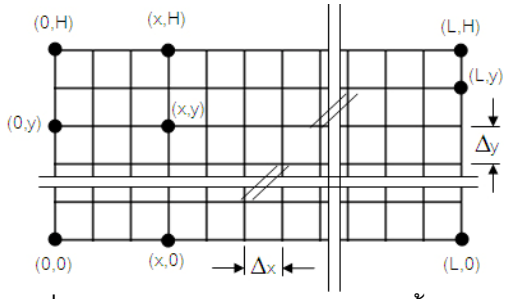
$$q_{conv,a}=h_a A_c C_{ot}\left(T_a-T_s\right) \quad (12)$$

3. ขั้นตอนการคำนวณซ้ำ

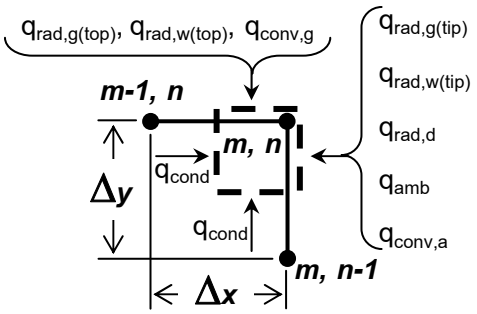
จากการกำหนดปริมาตรควบคุมเป็นแท่งเหล็กและพิจารณาเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวทั้งหมด แบ่งปริมาตรควบคุมดังกล่าวเป็นชิ้นเล็กๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยกำหนดให้แต่ละจุดมีระยะห่างในแนวดิ่ง (Δx) และแนวนอน (Δy) เท่ากับ 0.01 m จากรูปที่ 5 พิจารณาจุด (L,H) เป็นตัวอย่างเนื่องจากเป็นจุดที่มีการถ่ายเทความร้อนครบทุกรูปแบบในปัญหานี้ เมื่อพิจารณาให้จุด (L,H) เป็นจุด (m,n) ใดๆ เขียนสมดุลความร้อนได้ดังแสดงในรูปที่ 6 และสมการที่ 13

$$\begin{pmatrix} q_{(m,n-1)\to(m,n)}+q_{(m-1,n)\to(m,n)} \\ +q_{rad,g(top)}+q_{rad,g(tip)} \\ +q_{rad,w(top)}+q_{rad,w(tip)} \\ +q_{rad,d}+q_{amb}+q_{conv,g}+q_{conv,a} \end{pmatrix}=0 \quad (13)$$

เนื่องจากวิธีคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดลสามารถใช้ได้กับสมการเชิงเส้นเท่านั้น แต่สมการการแผ่รังสีเขียนอยู่ในรูปผลต่างกำลังสี่ของอุณหภูมิซึ่งไม่ใช่สมการ



รูปที่ 5 แบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็นชิ้นเล็กๆ



รูปที่ 6 สมดุลพลังงานที่จุด (L,H)

เชิงเส้น จึงต้องจัดรูปให้อยู่ในรูปตัวแปร h_r คูณกับผลต่างของอุณหภูมิ เช่นสมการที่ 10 จัดรูปได้เป็น

$$q_{rad,d} = A_c h_{r,d}\left(T_d - T_s\right) \qquad (14)$$

โดยที่

$$h_{r,d} = C_{ct} F_{sd} \sigma \varepsilon_s \left(T_d^2 + T_s^2\right)\left(T_d + T_s\right) \qquad (15)$$

จากสมการที่ 13 จะเขียนสมการที่ใช้คำนวณซ้ำเพื่อหาอุณหภูมิ ณ จุดนั้นๆได้คือ

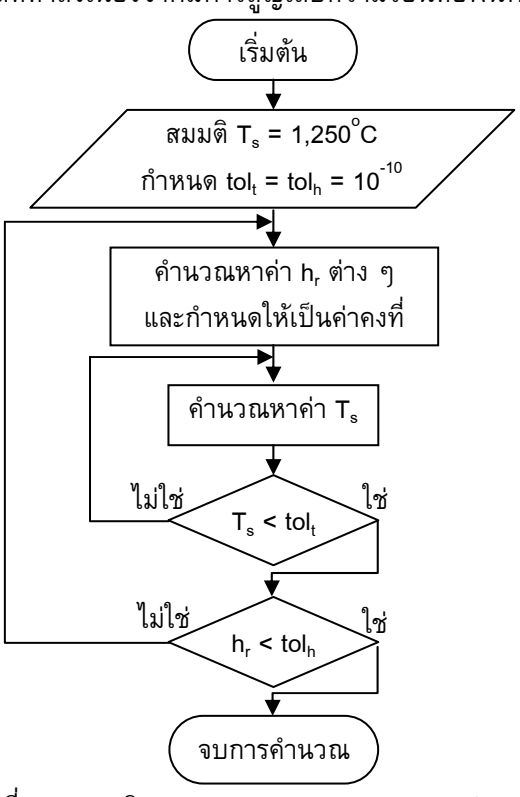
$$T_{m,n} = \frac{\left(\begin{array}{l} k\left(T_{m-1,n} + T_{m,n-1}\right) \\ +\Delta x \left(\begin{array}{l} \left(h_{r,g(top)} + h_{r,g(tip)}\right)\cdot T_g \\ +\left(h_{r,w(top)} + h_{r,w(tip)}\right)\cdot T_w \\ +h_{r,d}\cdot T_d + h_{r,amb}\cdot T_{amb} \\ +h_g \cdot T_g + h_a \cdot T_a \end{array}\right) \end{array}\right)}{2k + \Delta x \left(\begin{array}{l} h_{r,g(top)} + h_{r,g(tip)} \\ +h_{r,w(top)} + h_{r,w(tip)} \\ +h_{r,d} + h_{r,amb} + h_g + h_a \end{array}\right)} \qquad (16)$$

โดยที่ทุกๆจุดจะมีสมการลักษณะนี้แต่มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการถ่ายเทความร้อนที่จุดนั้นๆ อย่างไรก็ตามตัวแปร h_r จะยังคงมีพจน์ผลบวกกำลังสองของอุณหภูมิซึ่งไม่ใช่สมการเชิงเส้นเช่นกัน จึงจำเป็นต้องทำให้เป็นเชิงเส้น (linearize) โดยเริ่มจากสมมติอุณหภูมิผิวเริ่มต้นเพื่อคำนวณหาค่า h_r ต่างๆ แล้วกำหนดให้เป็นค่าคงที่ทำให้สมการการแผ่รังสีเป็นสมการเชิงเส้นส่งผลให้สามารถใช้วิธีคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดลคำนวณหาอุณหภูมิได้ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้ใหม่กลับไปแทนหาค่า h_r ต่างๆ อีกครั้ง ทำเช่นนี้ซ้ำไปจนกว่าคำตอบจะลู่เข้าดังแสดงในรูปที่ 7 กำหนดค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (tolerance) เท่ากับ 10^{-10} ค่าตัวประกอบน้ำหนัก (weighting factor) เท่ากับ 1 และอุณหภูมิผิวแท่งเหล็กเริ่มต้น 1,250°C

4. ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

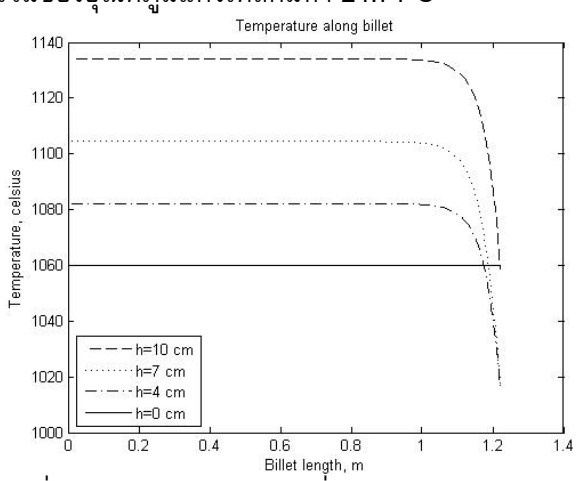
4.1 ผลการคำนวณ

ผลการคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 8 อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็กมีค่า 1,094°C การแจกแจงอุณหภูมิส่วนใหญ่ที่ระยะความยาวของแท่งเหล็กตั้งแต่ 0 ถึง 1 m วัดจากกึ่งกลางแท่งเหล็กอุณหภูมิจะลดลงเป็นเชิงเส้นจากผิวบนสู่ผิวล่าง โดยที่ผิวบนมีอุณหภูมิสูงที่สุด 1,134°C และอุณหภูมิที่ผิวล่างมีค่าคงที่ 1,060°C แต่ที่บริเวณปลายแท่งเหล็กอุณหภูมิจะลดต่ำลงเนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนต่อพื้นที่



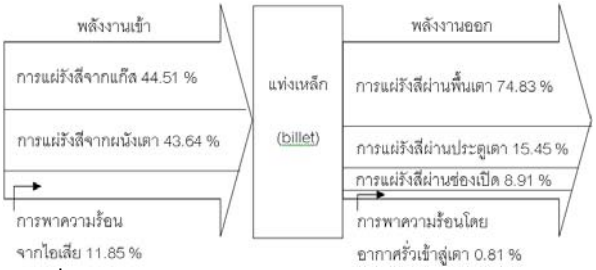
รูปที่ 7 แผนภูมิสายงาน (flow chart) ของการคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล

มากในบริเวณดังกล่าว อุณหภูมิในแนวระดับที่ความสูง 7 cm ลดลงมากที่สุดประมาณ 87°C และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของอุณหภูมิในแนวระดับมีค่ามากที่สุด 12.8°C ที่ความสูงเดียวกัน จุดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่บริเวณปลายแท่งเหล็กที่ความสูง 4 cm มีค่าประมาณ 1,016°C และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กมีค่า 24.71°C



รูปที่ 8 การแจกแจงอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ

ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กแสดงในรูปที่ 9 จากผลการคำนวณพบว่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กโดยการแผ่รังสีมีค่า 88% ของความร้อนที่ถ่ายเทเข้าทั้งหมด แบ่งเป็นการแผ่รังสีจากแก๊ส 44% และการแผ่รังสีจากผนังเตา 44% ส่วนการพาความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กมีค่า 12% การสูญเสียความร้อนออกจากแท่งเหล็กประกอบด้วยการแผ่รังสีผ่านช่องเปิดของประตูเตามีค่า 9% ของการสูญเสียทั้งหมด การพาความร้อนจากอากาศเย็นที่รั่วเข้าสู่เตาทางช่องเปิดของประตูเตามีค่า 1% การสูญเสียความร้อนผ่านประตูเตาที่ไม่ได้หุ้มฉนวนมีค่าถึง 15% และการสูญเสียผ่านพื้นเตาเป็นการสูญเสียความร้อนที่มากที่สุดมีค่าถึง 75%



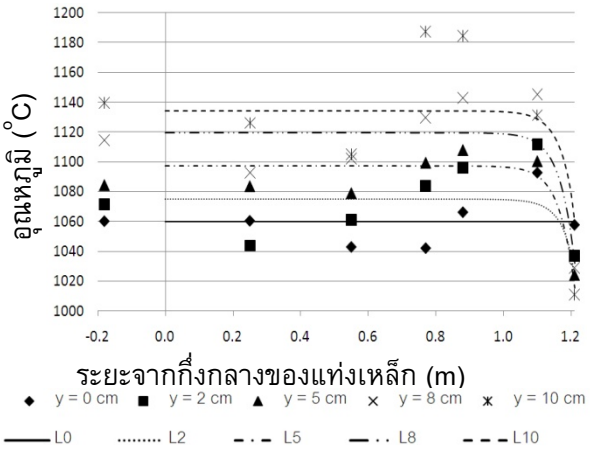
รูปที่ 9 แผนผังการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากแท่งเหล็ก

4.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่าที่วัดได้

วัดค่าอุณหภูมิแท่งเหล็กด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนรุ่น VarioCAM high resolution มีความคลาดเคลื่อนในการวัด ± 2% นำผลการคำนวณอุณหภูมิในแท่งเหล็กมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากโรงงานโดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะความยาวของแท่งเหล็กที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ ของแท่งเหล็กดังแสดงในรูปที่ 10 โดยที่กราฟจุดแสดงข้อมูลผลจากการตรวจวัดและกราฟเส้นแสดงผลจากการคำนวณที่ระดับความสูงตามตัวเลขที่กำกับไว้หลังชื่อ จากกราฟพบว่าผลจากการคำนวณและค่าที่วัดได้มีความสอดคล้องกันเชิงคุณภาพ มีแนวโน้มการแจกแจงอุณหภูมิเป็นไปในทางเดียวกัน และเมื่อคำนวณหาความคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งการวัดต่างๆ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดมีค่า 4.89% และค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดมีค่า 0.06% เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดมีค่าไม่เกิน 5% จึงเชื่อมั่นได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการแจกแจงอุณหภูมิได้จริงและมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

4.3 ศึกษาผลจากการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิพื้นเตา

เนื่องจากการสูญเสียความร้อนออกจากแท่งเหล็กทางพื้นเตามีค่ามากที่สุดส่งผลให้มีความสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กเป็นอย่างมาก จึงควรหุ้มฉนวนพื้นเตาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิพื้นเตา ลดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตา และช่วยให้การแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กมีความ

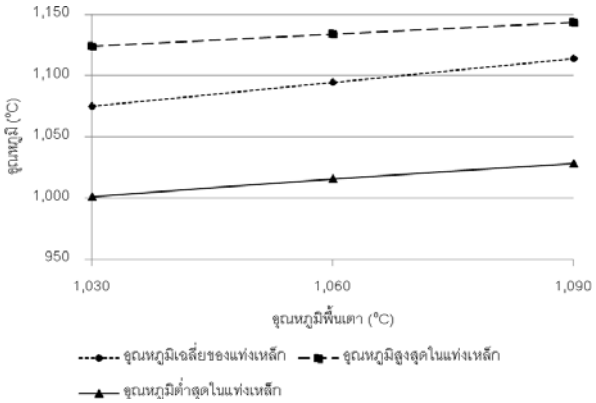


รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวยาวของแท่งเหล็กที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ

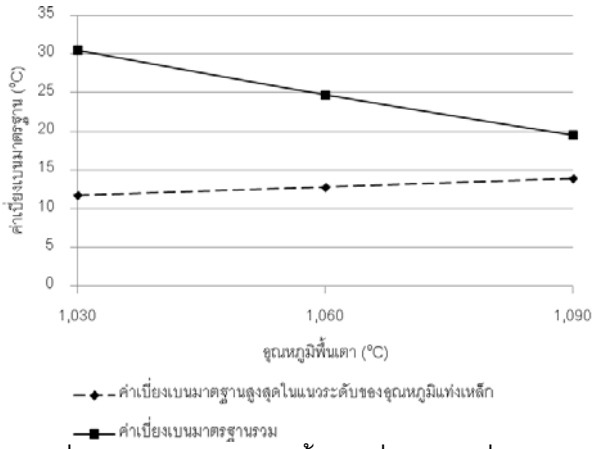
สม่ำเสมอมากขึ้น ในการศึกษาผลจากการหุ้มฉนวนพื้นเตาจึงทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิภายในของพื้นเตาในแบบจำลองได้ผลดังนี้

เมื่อหุ้มฉนวนพื้นเตาจะช่วยลดความร้อนสูญเสียออกจากพื้นเตาได้ ทำให้อุณหภูมิพื้นเตาและอุณหภูมิผิวล่างของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น และเนื่องจากความร้อนไม่สามารถถ่ายเทออกจากแท่งเหล็กทางผิวล่างได้ จึงทำให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิพื้นเตาเพิ่มขึ้นจากสภาพการทำงานปกติ 1,060°C เป็น 1,090°C อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็กเพิ่มขึ้น 20°C อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดของแท่งเหล็กเพิ่มขึ้น 10°C และ 13°C ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 11 และเนื่องจากอุณหภูมิผิวล่างของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้การแจกแจงอุณหภูมิในแนวดิ่งของแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอมากขึ้นและส่งผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิส่วนใหญ่ของแท่งเหล็กเนื่องจากการแจกแจงอุณหภูมิในแนวดิ่งจะกินพื้นที่ตลอดความยาวของแท่งเหล็กดังแสดงในรูปที่ 8 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กจึงลดลงถึง 5.24°C เมื่อเทียบกับสภาพการทำงานปกติดังแสดงในรูปที่ 12 ในทางตรงกันข้ามเมื่อความร้อนไม่สามารถถ่ายเทออกทางด้านล่างของแท่งเหล็กได้ ความร้อนจึงต้องถ่ายเทออกทางปลายแท่งเหล็กแทน แต่เนื่องจากบริเวณปลายแท่งเหล็กมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าผิวล่างของแท่งเหล็กมาก เมื่ออัตราการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิที่ปลายแท่งเหล็กลดลงมาก ส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับมีค่าเพิ่มขึ้น 1.08°C

การหุ้มฉนวนพื้นเตาเป็นการลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมของพื้นเตาทำให้อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นเตามีค่าลดลง ดังนั้นการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาจึงมีค่าลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กสูงขึ้น ผลต่างระหว่างอุณหภูมิผิวของแท่งเหล็กกับอุณหภูมิผนังเตาและอุณหภูมิแก๊สจึงมีค่าลดลงทำให้อัตราการพาความร้อนจากไอเสียรวมทั้งอัตราการแผ่รังสีจากจากแก๊สและผนังเตาเข้าสู่แท่งเหล็กมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 13 เมื่ออุณหภูมิพื้นเพิ่มขึ้น

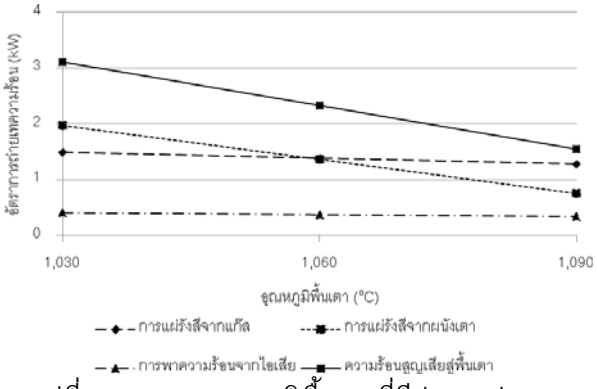


รูปที่ 11 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก



รูปที่ 12 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาที่มีต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก

จาก 1,060°C เป็น 1,090°C ความร้อนสูญเสียสู่พื้นเตามีค่าลดลงถึง 33.82% อัตราการพาความร้อนจากไอเสียลดลง 7.95% อัตราการแผ่รังสีจากแก๊สลดลง 7.64% และอัตราการแผ่รังสีจากผนังเตาลดลงถึง 44.95% เมื่อความร้อนถ่ายเทออกจากแท่งเหล็กทางผิวล่างได้น้อยลง ความร้อนจึงต้องถ่ายเทออกบริเวณปลายแท่งเหล็กแทน แต่เนื่องจากบริเวณปลายแท่งเหล็กมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าผิวล่างมาก อัตราการสูญเสียความร้อนบริเวณนี้จึงไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพื้นเตามากนัก โดยอัตราการสูญเสียความร้อนบริเวณปลายแท่งเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นรวมกันเพียง 11.75% และเมื่อพิจารณาอัตราการสูญเสียความร้อนรวมพบว่ามีค่าลดลงถึง 23.96%



รูปที่ 13 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

5. สรุป

ผลจากแบบจำลองพบว่าการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กส่วนใหญ่เป็นการแจกแจงเชิงเส้นในลักษณะการนำความร้อนหนึ่งมิติจากผิวบนลงสู่ผิวล่างของแท่งเหล็กโดยที่อุณหภูมิสูงสุดมีค่า 1,134°C อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่า 1,094°C ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิมีค่า 24.71°C ส่วนบริเวณปลายแท่งเหล็กการแจกแจงอุณหภูมิจะไม่สม่ำเสมอและมีอุณหภูมิต่ำสุด 1,016°C การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กมีการแผ่รังสีเป็นหลักมีค่า 88% ของการถ่ายเทความร้อนเข้าทั้งหมด โดยที่การแผ่รังสีจากแก๊สมีค่า 44% การแผ่รังสีจากผนังเตามีค่า 44% ส่วนการพาความร้อนจากไอเสียมีค่าเพียง 12% การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตามีค่ามากที่สุดถึง 75% มีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กมากที่สุดจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ควรพิจารณาและแก้ไข การสูญเสียผ่านประตูเตามีค่า 15% มีผลมากที่สุดต่ออุณหภูมิบริเวณปลายแท่งเหล็กและการแจกแจงอุณหภูมิในแนวระดับ สามารถแก้ไขได้โดยการหุ้มฉนวนประตูเตา การสูญเสียผ่านช่องเปิดของประตูเตาส่งผลกระทบเช่นเดียวกับการสูญเสียผ่านประตูเตามีอัตราการสูญเสียความร้อน 9% แต่การสูญเสียผ่านช่องเปิดดังกล่าวเป็นการสูญเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้และป้องกันได้ยาก ส่วนการสูญเสียความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตามีเพียง 1% และแทบไม่ส่งผลกระทบต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กเลย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยที่ให้การสนับสนุนและให้โอกาสเข้าตรวจวัดข้อมูลในโรงงานที่เข้าร่วมโครงการในการทำงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ศุภณัฐ เจริญ (2551). *วิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลดอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา,* วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2] Yu Jin Jang and Sang Woo Kim (2007). An Estimation of a Billet Temperature during Reheating Furnace Operation, *International Journal of Control, Automation, and Systems,* vol.5, Febuary 2007, pp.43-50.

[3] Anton Jaklic, Franci Vode and Tomaz Kolenko (2006). Online simulation model of the slab-reheating process in a pusher-type furnace, *Applied Thermal Engineering,* vol.27, 2007, pp.1105-1114

[4] H.C. Hottel and A.F. Sarofim (1967). *Raditive Transfer,* McGraw-Hill, Inc., United States of America

[5] Frank P. Incropera, David P. Dewitt, Theodore L. Bergman and Adrienne S. Lavine (2007). *Introduction to Heatransfer,* 5th edition, John Wiley & Sons Pte Ltd, Asia