

การจำลองแบบเชิงตัวเลขสำหรับการแจกแจงอุณหภูมิในเหล็กแท่ง ในระหว่างการลำเลียง

Numerical simulation of temperature distribution of a billet during conveyance

ปวร สุภชัยพานิชพงศ์ และ จิตติน แดงเที่ยง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E-mail: pavon.sup@gmail.com, tchittin@chula.ac.th

บทคัดย่อ

เนื่องจากการตรวจสอบอุณหภูมิเหล็กแท่งในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าในระหว่างการลำเลียงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตแต่สามารถทำได้ยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สามารถทำนายการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็กแท่งในระหว่างการลำเลียงได้ รวมถึงการตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิเหล็กแท่งจริงด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบสองมิติในการแก้ปัญหาคำนวณการนำความร้อนภายในเหล็กแท่ง เพื่อกำหนดการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็กแท่ง ซึ่งเหล็กแท่งในแบบจำลองจะถูกพิจารณาว่ามีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีการนำผลการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็กแท่งที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณความร้อนที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมต่อเวลา เปรียบเทียบกับปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการอุ่นเหล็กแท่งที่ถูกลำเลียงมาเป็นเวลาต่างๆ ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการแจกแจงอุณหภูมิเหล็กแท่งที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดจริงด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนในช่วงไม่เกิน ± 9.827 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งงานวิจัยนี้อาจเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิ รวมถึงการสูญเสียพลังงานความร้อนของเหล็กแท่งในกระบวนการผลิตเหล็กได้ในอนาคต

คำสำคัญ :

การจำลองเชิงตัวเลข; การแจกแจงอุณหภูมิ; เหล็กแท่ง; ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

Abstract

The temperature measurement of billets in iron and steel industry during conveyance is important to the production but difficult. Thus, the purpose of this research was to develop a numerical simulation model in order to predict the temperature distribution of a billet during conveyance and verified the result from simulation with billet temperature data from a thermal camera.

In this research two-dimensional finite-difference fully implicit method was applied to solve the heat conduction inside the billet to calculate billet temperature distribution. The billet in the model was considered to have heat loss to surrounding from only convection and radiation. The temperature distribution of billet from the simulation was used to calculate the heat loss rate compared to the heat energy consumption needed to heat a billet after conveyance for various times to 1250 degree Celsius.

The research results indicated that the temperature distribution of a billet from the simulation was differed to the data from the thermal camera within the range of ± 9.827 %. This research would possibly benefit the improvement of temperature measurement and control system including heat loss control system of billets in the production line.

Keywords :

Numerical simulation; temperature distribution; billet; finite-difference

คำอธิบายสัญลักษณ์

Bi finite difference form of Biot number:

$$Bi = \frac{h_{total}\Delta x}{k}$$

c_p specific heat capacity ($Jkg^{-1}K^{-1}$)

Fo Finite difference form of Fourier number:

$$Fo = \frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2}$$

h สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($Wm^{-2}K^{-1}$)

k thermal conductivity ($Wm^{-1}K^{-1}$)

∂ partial differential operator

L characteristic length of billet (m)

$\dot{q}_{loss}$ thermal flux ที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม (Wm^{-2})

Pr Prandtl number

Re_L Reynolds number

t เวลา (s)

Δt ช่วงระยะเวลาในการคำนวณ (s)

T อุณหภูมิ (K)

x, y แกนสองมิติในระบบ cartesian coordinate

$\Delta x, \Delta y$ ขนาด element ของ billet ที่ถูกแบ่งในแนวแกน x และ y (m)

α Thermal diffusivity ของ billet:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

ε emissivity ของ billet

ρ ความหนาแน่นของ billet (kgm^{-3})

σ Stefan-Boltzmann constant ($Wm^{-2}K^{-4}$)

Subscripts

force การพาความร้อนแบบบังคับ

free การพาความร้อนแบบอิสระ

rad การแผ่รังสีความร้อน

total การพาความร้อนรวม

s ตำแหน่งผิวของ billet

∞ อากาศแวดล้อม

sur พื้นผิวแวดล้อม

m ดัชนีในแนวแกน x

n ดัชนีในแนวแกน y

Superscripts

p ที่เวลา p

$p + 1$ ที่เวลา $p+1$

1. คำนำ



อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่มีความจำเป็นต่อการผลิตของอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่มีส่วนสำคัญในระบบเศรษฐกิจ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเหล็กส่วนใหญ่จะถูกนำมาให้ความร้อนผ่านเตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) เพื่อให้เหล็กมีความอ่อนตัวและง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ ต่อไป

โดยทั่วไปนั้นเหล็กที่ออกจากเตาเผาจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 1100-1250 °C ซึ่งเหล็กเหล่านี้จะถูกลำเลียงไปยังเครื่องรีดเหล็กเพื่อทำการขึ้นรูป โดยในระหว่างการลำเลียง เหล็กจะมีการสูญเสียความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม ผ่านการแผ่รังสีความร้อนรวมถึงการพาความร้อนโดยอากาศโดยรอบ ทำให้แท่งเหล็กมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาการแก้ไขปัญหาการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกของแท่งโดยการสร้างอุโมงค์ฉนวนกันความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียงแท่งเหล็ก โดยถ้าเหล็กมีอุณหภูมิลดลงมากอาจทำให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กระหว่างการลำเลียงไปจนถึงก่อนเข้าเครื่องรีดเหล็ก เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น

การตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการวัดผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน การวัดด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมมากเนื่องจากสามารถวัดได้สะดวก เพียงการถ่ายรูปผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนจากระยะไกล ถือเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากความร้อนของแท่งเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1100-1250 °C ได้ แต่การวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นจะสามารถวัดอุณหภูมิ

ของแท่งเหล็กได้เพียงแค่ที่พื้นผิวรอบนอกที่สามารถมองเห็นได้เท่านั้น ไม่สามารถวัดอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กได้ ดังนั้นการตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาทำการแจกแจงอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กจึงถูกนำมาพิจารณามากขึ้นในปัจจุบัน ดังเช่นในงานวิจัยของ [1-4]

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนนั้น จำเป็นต้องใช้ความรู้ความเข้าใจในด้านการถ่ายเทความร้อนอย่างมากเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองที่มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับสถานะของการถ่ายเทความร้อนจริงที่สุด นอกจากนี้การแก้ปัญหาระบบสมการของแบบจำลองเพื่อคำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็กนั้น จำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นตัวคำนวณ ซึ่งระเบียบวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาระบบสมการก็จะมีหลากหลายวิธีแตกต่างกันออกไป เช่น ในงานวิจัย [1,2,4] จะเลือกใช้ระเบียบวิธีแบบ finite-difference ในการแก้ปัญหการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็ก โดยที่ [1] จะพิจารณาแท่งเหล็กในสามมิติในขณะที่ [2] เลือกใช้ Crank-Nicholson method พิจารณาแท่งเหล็กในสองมิติ

งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียง รวมถึงการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็ก รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เพื่อทำการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียงในตำแหน่งที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิโดยตรงได้ นอกจากนี้ยังมีการนำข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมต่อเวลารวมถึงพลังงานที่ต้องจ่ายเพิ่มเพื่ออุ่นแท่งเหล็กไปที่

อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส หากแท่งเหล็กถูกทำให้เย็นลงผ่านการลำเลียงที่เวลาต่างๆ โดยระเบียบวิธีที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Finite difference implicit method

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

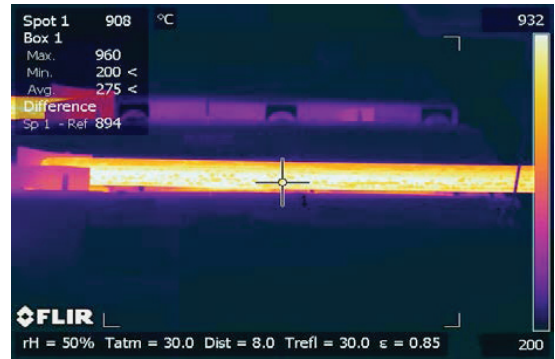
2.1 ขั้นตอนการกำหนดปัญหา

billet ที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีขนาดหน้าตัด 130*130 มิลลิเมตรและมีความยาว 6 เมตรซึ่งเป็นขนาดของ billet ที่ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อมาใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

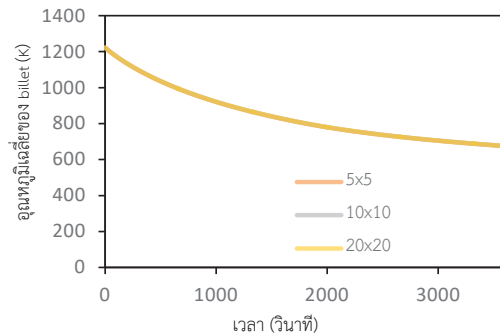
โดยในงานวิจัยนี้พิจารณาว่า billet ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแนวตามยาวหรือแนวการเคลื่อนที่ จึงพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของ billet ในสองมิติหรือในแนวหน้าตัดของ billet เท่านั้น ซึ่ง billet ในแบบจำลองจะมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเหมือนกันทั้ง 4 ด้าน

2.2 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิของ billet ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์และขั้นตอนการเก็บข้อมูล ทำให้สามารถทำการทดลองเก็บข้อมูลได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้ผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้น มีเพียงแค่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวนอกของแท่งเหล็กเท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้นั้นเป็นข้อมูลอุณหภูมิผิวของแท่งเหล็กหลังจากออกจาก Continuous Casting Machine และถูกนำมาตั้งพักอยู่หนึ่งๆ แล้วทำการวัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา 60 นาที รวมทั้งสิ้น 60 ข้อมูล โดยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่ใช้ในการทดลองยี่ห้อ FLIR รุ่น P640 มีช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ -40 °C ถึง +2000 °C และมีค่า accuracy อยู่ที่ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ หรือ 2% ของค่าที่อ่านได้



ภาพที่ 1 แสดงภาพตัวอย่างการทดลองที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน



ภาพที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 10x10 และ 20x20

2.3 การหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลอง (Grid independent)

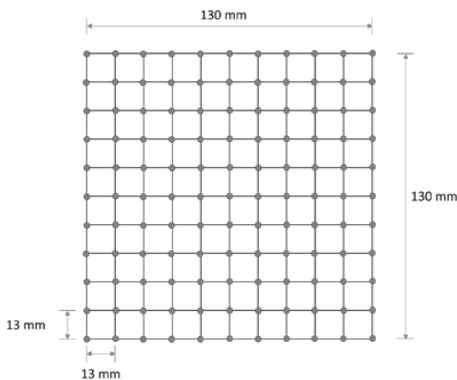
จากการสร้างแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์แตกต่างกัน ได้แก่ ขนาด 5x5, 10x10 และ 20x20 เซลล์ เพื่อเปรียบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิของเซลล์แต่ละขนาด พบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายใน billet ของแบบจำลองที่แต่ละขนาดเซลล์มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยเมื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 และ 10x10 เทียบกับแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 20x20 พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 0.1793 และร้อยละ 0.0229 ตามลำดับ

2.4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของ billet

ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการแจกแจงอุณหภูมิของ billet คือการนำความร้อนซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการเชิงอนุพันธ์ของการนำความร้อนภายใต้ภาวะ transient ในสองมิติ [5] ดังนี้

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \dot{q}_{loss}$$

เนื่องจาก billet ถูกพิจารณาในแนวหน้าตัดสองมิติ ดังนั้น แบบจำลอง finite-difference ในสองมิติจึงถูกนำมาใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายใน billet ซึ่ง billet จะถูกแบ่งออกเป็น Grid สี่เหลี่ยมขนาด 13 mm x 13 mm จำนวน 100 Grid เพื่อทำการ discretize สมการการถ่ายเทความร้อนในแต่ละจุดทั้งหมด 121 จุด ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงรูปหน้าตัดของ billet ในแบบจำลอง

2.5 เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition)

ในระหว่างการลำเลียงนั้น เงื่อนไขขอบเขตของ billet ที่ถูกพิจารณาในแบบจำลองจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งจะแสดงในรูปของ thermal fluxes $\dot{q}_{loss}$ โดยค่านี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ถูกพิจารณาและอุณหภูมิที่ตำแหน่งนั้นๆ thermal fluxes จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่

การพาความร้อนแบบบังคับในขณะที่ billet เคลื่อนที่ ซึ่งอ้างอิงจาก [5] :

$$\dot{q}_{loss} = h_{force}(T_{\infty} - T_s),$$

$$h_{conv} = \frac{k}{L} 0.664 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}},$$

$$Re_L = \frac{VL}{\nu}$$

การพาความร้อนแบบอิสระในขณะที่ billet อยู่นิ่งแสดงดังสมการ:

$$\dot{q}_{loss} = h_{free}(T_{\infty} - T_s)$$

การแผ่รังสีความร้อน อ้างอิงจาก Stefan-Boltzmann law:

$$\dot{q}_{loss} = \varepsilon \sigma (T_{sur}^4 - T_s^4)$$

ซึ่ง $\dot{q}_{loss}$ จากการแผ่รังสีความร้อนจะถูกจัดรูปสมการใหม่เป็น

$$\dot{q}_{loss} = h_{rad}(T_{sur} - T_s)$$

โดยที่ $h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{sur} + T_s)(T_{sur}^2 + T_s^2)$ ซึ่ง h_{rad} จะถูกคำนวณด้วยวิธีการ Lag coefficient โดยจะใช้ T_s ที่เวลาก่อนหน้าที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลอง ($*T_{sur} = T_{\infty}$)

ในแต่ละตำแหน่งค่า $\dot{q}_{loss}$ จะเกิดจากผลรวมของการสูญเสียความร้อนทั้งสามแบบข้างต้น ดังแสดงในสมการ

$$\dot{q}_{loss} = h_{total}(T_{\infty} - T_s);$$

$$h_{total} = h_{force} + h_{free} + h_{rad}$$

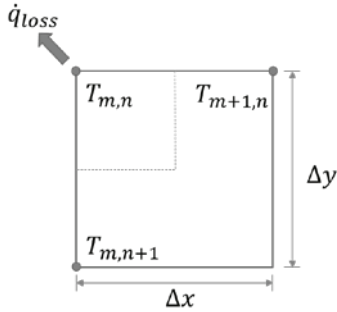
2.6 การ Discretization ของสมการ

การถ่ายเทความร้อนของแต่ละตำแหน่งภายใน billet

จากแบบจำลองของ billet ที่กล่าวไปข้างต้น สมการการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละตำแหน่งจะถูกพิจารณาและจัดรูปใหม่เพื่อสร้างระบบสมการที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่ง ซึ่งใช้คำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ต่อไป

2.6.1 สมการ finite difference ของ

การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งมุม



ภาพที่ 4 แสดงตำแหน่งมุมของ billet ในแบบจำลอง

เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

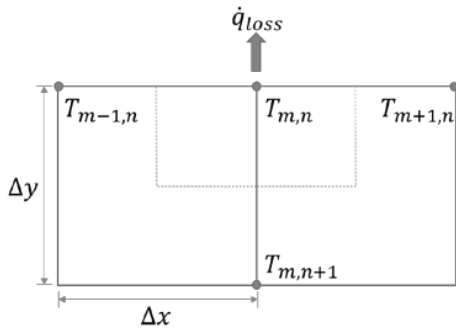
$$T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p = 4 \frac{h_{total} \Delta x \alpha \Delta t}{k \Delta x^2} (T_\infty - T_{m,n}^{p+1}) + 2 \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + 2 \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1})$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$(1 + 4BiFo + 4Fo)T_{m,n}^{p+1} - 2FoT_{m+1,n}^{p+1} - 2FoT_{m,n+1}^{p+1} = T_{m,n}^p + 4BiFoT_\infty$$

2.6.2 สมการ finite difference ของ

การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งขอบ



ภาพที่ 5 แสดงตำแหน่งขอบของ billet ในแบบจำลอง

เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

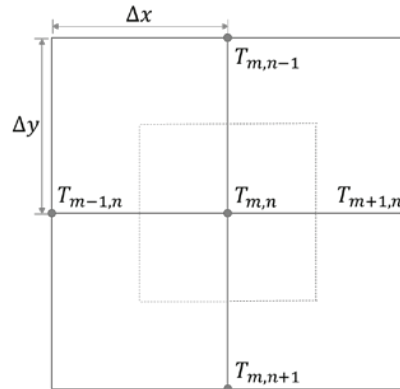
$$T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p = 2 \frac{h_{total} \Delta x \alpha \Delta t}{k \Delta x^2} (T_\infty - T_{m,n}^{p+1}) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + 2 \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1})$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$(1 + 2BiFo + 4Fo)T_{m,n}^{p+1} - FoT_{m+1,n}^{p+1} - FoT_{m-1,n}^{p+1} - 2FoT_{m,n+1}^{p+1} = T_{m,n}^p + 2BiFoT_\infty$$

2.6.3 สมการ finite difference ของ

การถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งภายใน billet



ภาพที่ 6 แสดงตำแหน่งภายในของ billet ในแบบจำลอง

เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

$$T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1})$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} (1 + 4Fo)T_{m,n}^{p+1} - FoT_{m+1,n}^{p+1} - FoT_{m-1,n}^{p+1} \\ - FoT_{m,n+1}^{p+1} - FoT_{m,n-1}^{p+1} \\ = T_{m,n}^p \end{aligned}$$

2.7 การแก้ระบบสมการการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละตำแหน่งของ billet

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่าน MATLAB R2018a เพื่อแก้ระบบสมการ finite difference ของแต่ละตำแหน่งภายใน billet ซึ่งมีทั้งหมด 121 จุด หรือก็คือระบบสมการ 121 สมการ 121 ตัวแปร โดยระบบสมการที่เวลา P+1 จะถูกแก้โดยอาศัยข้อมูลอุณหภูมิที่เวลาก่อนหน้า หรือ P ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ billet มีอุณหภูมิตั้งต้นที่ 950 องศาเซลเซียสในทุกตำแหน่ง ภายใน billet อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม T_∞ และพื้นผิวแวดล้อม T_{sur} เท่ากันที่ 32 องศาเซลเซียส และมีช่วงระยะเวลาในแต่ละขั้นการคำนวณ 1 วินาที

2.7.1 ค่าคงที่และค่าคุณสมบัติของสารที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 1 แสดงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของ billet ที่ใช้ในแบบจำลอง

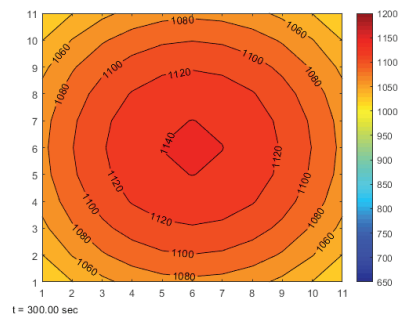
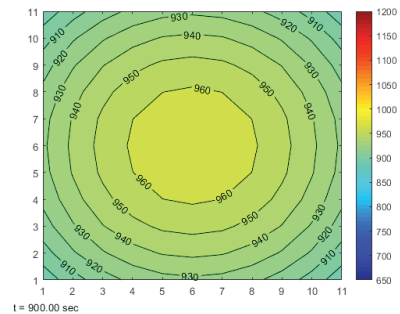
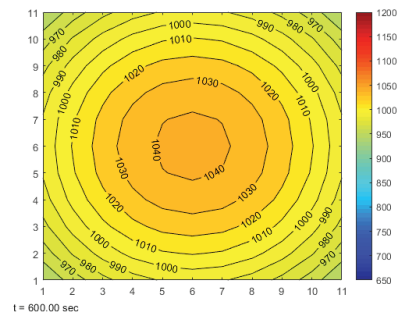
ค่าคุณสมบัติของสาร	ตัวแปร	ค่า
Thermal conductivity ของ billet	k	30 W/m K
Density ของ billet	ρ	7600 kg/m^3
Specific heat ของ billet (constant pressure)	c_p	$670 \text{ J/kg} - \text{K}$
ระยะห่างระหว่าง node ภายใน billet	$\Delta x, \Delta y$	0.013 m
Emissivity ของ billet	ε	$\varepsilon = 0.28 ; T < 380^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0.00304T - 0.888 ; 380^\circ\text{C} \leq T < 520^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0.69 ; T \geq 520^\circ\text{C}$

* ค่าคุณสมบัติของ billet อ้างอิงจากงานวิจัย [6] และ [7]

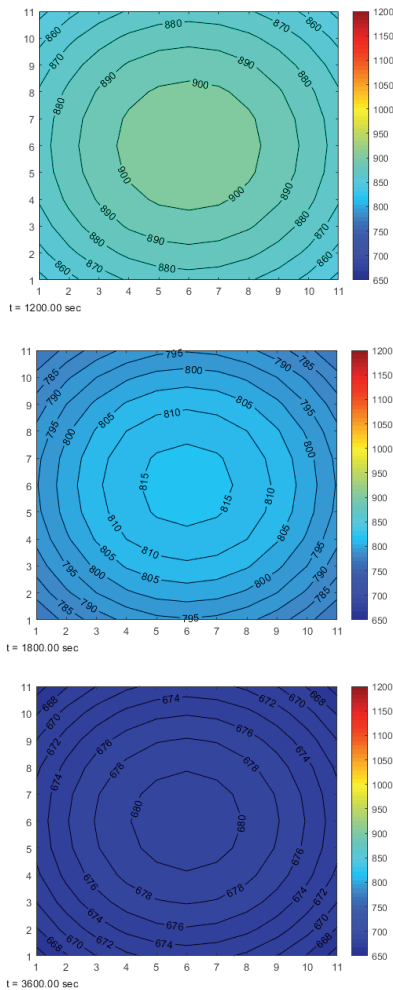
ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศที่ใช้ในการคำนวณถูกพิจารณาที่ film temperature (T_f) โดย $T_f = 491^\circ\text{C} = 764.15 \text{ K}$ และความดันอากาศเท่ากับ 1 atm

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

ตัวอย่างการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองจะถูกแสดงในภาพที่ 7 โดยจะถูกแสดงออกมาในรูปของคอนทัวร์ของอุณหภูมิที่หน้าตัดของ billet



ภาพที่ 7 ตัวอย่างแผนภาพการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 300, 600, 900, 1200, 1800 และ 3600 วินาที

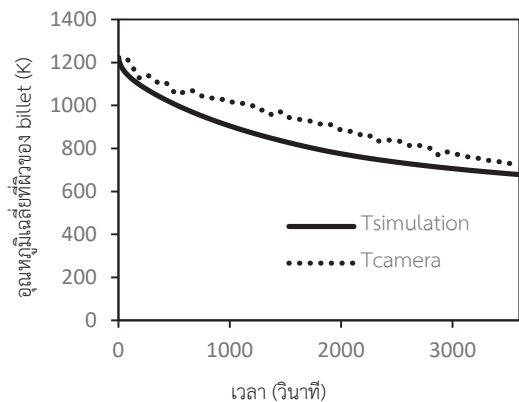


ภาพที่ 7 ตัวอย่างแผนภาพการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 300, 600, 900, 1200, 1800 และ 3600 วินาที (ต่อ)

จากนั้นข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจริงผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 8 เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นเป็นข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของแท่งเหล็กที่ถูกตั้งพักอยู่หนึ่งๆ ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงนั้น จึงต้องถูกพิจารณาที่สถานะเดียวกันซึ่งคือสถานะที่มีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบอิสระกับการแผ่รังสี

ความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิจากแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบกับคำนวณจากค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวนอกของ billet เท่านั้น ไม่รวมที่ตำแหน่งภายในของ billet

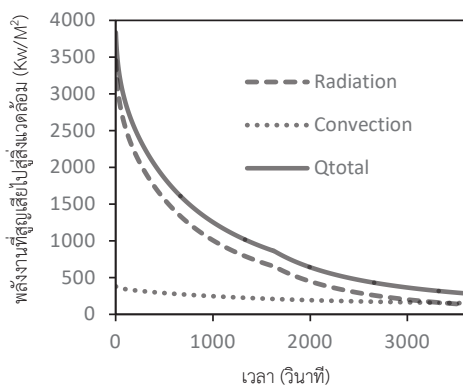
จากแผนภูมิจะเห็นว่าอุณหภูมิของ billet มีแนวโน้มในการลดลงใกล้เคียงกันและมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ เฉลี่ยที่ 9.827 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติต่างๆ ของ billet ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งไม่สามารถระบุค่าได้อย่างแม่นยำ และรวมถึงความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมในระหว่างการทำลายของ billet ในแบบจำลอง ซึ่งอาจถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณเมื่อเทียบกับสภาวะจริง



ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของ billet ที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

นอกจากนี้ยังมีการนำข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณกลับเพื่อหาพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน เปรียบเทียบกับพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งพบว่าในช่วงแรกที่ billet มีอุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส หรือที่เวลาก่อนนาที่ 18 ของการลำเลียงพลังงาน

ความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่าร้อยละ 80 จะเป็นผลมาจากการแผ่รังสีความร้อน แต่เมื่ออุณหภูมิของ billet ลดลง ผลของการพาความร้อนต่อความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนเมื่ออุณหภูมิของ billet อยู่ที่ประมาณ 700 องศาเซลเซียสหรือที่เวลาประมาณนาที่ที่ 50 ของการลำเลียงผลของการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนต่อความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดจะมีค่าใกล้เคียงกัน จนผลจากการพาความร้อนจะเริ่มสูงกว่าการแผ่รังสีความร้อนที่อุณหภูมิ 686 องศาเซลเซียส หรือที่เวลาประมาณนาที่ที่ 56 ของการลำเลียง

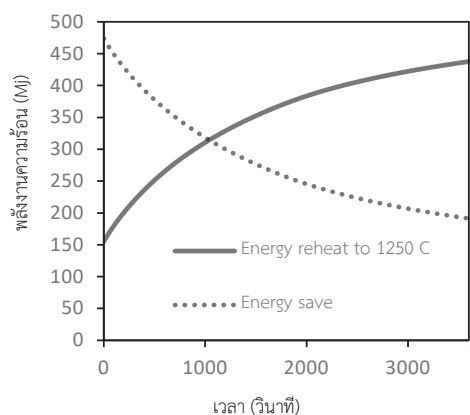


ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมจากการพาความร้อนกับการแผ่รังสีความร้อนและพลังงานความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด

ภายในกระบวนการผลิตเหล็ก billet ที่ออกจาก Continuous Casting Machine จะถูกลำเลียงไปสู่ Reheating furnace เพื่อทำการอุ่น billet ให้มีอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ก่อนส่งไปสู่กระบวนการรีดขึ้นรูปต่อไป โดยพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ถือเป็นต้นทุนส่วนสำคัญในกระบวนการผลิต ดังนั้นการลดพลังงานในส่วนนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้จึงมีการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่ผ่านการลำเลียงมาเป็นเวลาต่างๆ ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส รวมถึงพลังงานที่สามารถ

ประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงไปสู่ Reheating furnace เป็นระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 10

โดยพลังงานที่สามารถประหยัดได้จะถูกคำนวณจากพลังงานสูงสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการอุ่น billet ลบด้วยพลังงานที่ใช้จริงในการอุ่น billet ที่ผ่านการลำเลียงมาเป็นเวลาต่างๆ ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้พลังงานสูงสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการอุ่น billet คำนวณจากพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet เย็นจากอุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 32 องศาเซลเซียส ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่ายิ่งใช้ระยะเวลาในการลำเลียงมากขึ้น พลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ไปที่อุณหภูมิต่างๆ จะยิ่งสูงขึ้น และพลังงานที่สามารถประหยัดได้จะลดลงตามเวลาที่ใช้ในการลำเลียงและเมื่อเวลาที่ใช้ในการลำเลียงเท่ากับ 36 นาที พลังงานที่สามารถประหยัดได้จะลดลงเหลือเพียง 50 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่สามารถประหยัดได้ตั้งต้น และเมื่อเวลาที่ใช้ในการลำเลียงเท่ากับ 60 นาที พลังงานที่สามารถประหยัดได้จะลดลงเหลือเพียง 40 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่สามารถประหยัดตั้งต้นเท่านั้น



ภาพที่ 10 แสดงพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่างๆ

4. สรุปผลการวิจัย



จากแบบจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของ billet ในระหว่างการลำเลียงที่ถูกแสดงในงานวิจัยนี้ ทำให้สามารถวิเคราะห์การแจกแจงอุณหภูมิของ billet ในสองมิติได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน พบว่ามีแนวโน้มของการลดลงของอุณหภูมิคล้ายคลึงกันแต่ยังมีความคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งเวลาเดียวกันค่อนข้างสูง ในด้านการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมของ billet พบว่าในช่วงที่ billet มีอุณหภูมิสูง ความร้อนที่สูญเสียส่วนใหญ่จะเป็นผลจากการแผ่รังสีความร้อน แต่ผลของการพาความร้อนต่อความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของ billet ลดลง ซึ่งข้อมูลนี้อาจเป็นตัวช่วยในการพิจารณาถึงปัจจัยในการสูญเสียความร้อนของ billet ในงานวิจัยต่อไปในอนาคตได้

งานวิจัยนี้อาจเป็นพื้นฐานให้กับงานวิจัยในอนาคตเพื่อปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการแจกแจงอุณหภูมิใน billet ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิรวมถึงการสูญเสียพลังงานความร้อนของเหล็กแท่งในกระบวนการผลิตเหล็กได้ในอนาคต

5. เอกสารอ้างอิง



- [1] Jaklič, A., Glogovac, B., Kolenko, T., Zupančič, B., & Težak, B. (2002). A simulation of heat transfer during billet transport. *Applied Thermal Engineering*, 22(7): 873-883.
- [2] Ramírez-López, A., Aguilar-López, R., Palomar-Pardavé, M., Romero-Romo, M. A., & Muñoz-Negrón, D. (2010). Simulation of heat transfer in steel billets during continuous casting. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 17(4): 403-416.
- [3] Prieler, R., Mayr, B., Demuth, M., Holleis, B., & Hochenauer, C. (2016). Prediction of the heating characteristic of billets in a walking hearth type reheating furnace using CFD. *International journal of heat and mass transfer*, 92: 675-688.
- [4] Dubey, S. K., & Srinivasan, P. (2014). Development of three dimensional transient numerical heat conduction model with growth of oxide scale for steel billet reheat simulation. *International Journal of Thermal Sciences*, 84: 214-227.
- [5] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., & Lavine, A.S. (2013). *Foundations of Heat Transfer*. JohnWiley & Sons, Inc.: Singapore.
- [6] Jiaocheng, M., Jun, L., Qiang, Y., & Liangyu, C. (2014). The Temperature Field Measurement of Billet Based on Multi-Information Fusion. *Materials Transactions*, 55(8): 1319-1323.
- [7] Sadiq, H., Wong, M. B., Tashan, J., Al-Mahaidi, R., & Zhao, X. L. (2012). Determination of steel emissivity for the temperature prediction of structural steel members in fire. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(2): 167-173.