

การจำลองแบบเชิงตัวเลขสำหรับการแจกแจงอุณหภูมิในเหล็กแท่งในระหว่างการลำเลียง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Numerical simulation of temperature distribution of a billet during conveyance



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2019


Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองแบบเชิงตัวเลขสำหรับการแจกแจงอนุกรมใน เหล็กแท่งในระหว่างการล้าเลียง
โดย	นายปวร สุภชัยพานิชพงศ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)
.....	กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรัด ศาลากิจ)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญาณ)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปวร สุภชัยพานิชพงศ์ : การจำลองแบบเชิงตัวเลขสำหรับการแจกแจงอุณหภูมิในเหล็กแท่งในระหว่างการลำเลียง. ( Numerical simulation of temperature distribution of a billet during conveyance) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.จิตติน แดงเที่ยง

เนื่องจากการตรวจสอบอุณหภูมิเหล็กแท่งในอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าในระหว่างการลำเลียงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตแต่สามารถทำได้ยาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สามารถทำนายการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็กแท่งในระหว่างการลำเลียงได้ รวมถึงการตรวจสอบผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิเหล็กแท่งจริงด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบสองมิติในการแก้ปัญหาการนำความร้อนภายในเหล็กแท่ง เพื่อคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็กแท่งภายใต้สภาวะที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนและมีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียง ซึ่งเหล็กแท่งในแบบจำลองจะถูกพิจารณาว่ามีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีการนำผลการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็กแท่งที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณความร้อนที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมต่อเวลารวมถึงปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการอุ่นเหล็กแท่งที่ถูกลำเลียงมาเป็นเวลาต่าง ๆ ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเหล็กแท่งที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดจริงด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอยู่ที่ร้อยละ 9.827 เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดและความหนาของฉนวนกันความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของเหล็กแท่งในระหว่างการลำเลียง ซึ่งงานวิจัยนี้อาจเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิรวมถึงการสูญเสียพลังงานความร้อนของเหล็กแท่งในกระบวนการผลิตเหล็กได้ในอนาคต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิติต .....

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6070394421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: Numerical simulation, temperature distribution, billet, finite-difference

Pavon Supachaipanichpong : Numerical simulation of temperature distribution of a billet during conveyance. Advisor: Assoc. Prof. CHITTIN TANGTHIENG, Ph.D.

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 under varied condition of insulation thickness during conveyance. 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 and the heat energy consumption needed to heat a billet after conveyance for various times to 1250 degree Celsius.

The research results indicated that the average temperature of a billet from the simulation was differed to the data from the thermal camera at 9.827 percent of the data from the thermal camera and the insulation thickness is significant factor that affect the temperature distribution of billet during conveyance. This research would possibly benefit the improvement of temperature measurement and control system including heat loss control system of billets in

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านให้โอกาสที่สำคัญแก่ข้าพเจ้าในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงท่านได้ให้ความกรุณาในการถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ คำแนะนำตลอดจนข้อคิดต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ยิ่ง อันเป็นแรงบันดาลใจให้แก่ข้าพเจ้าในการมุ่งมั่นทำงานจนสำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรัล ศาลากิจ และ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่สละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษาและให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยชิ้นนี้จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณหน่วยงานสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเพื่อข้อมูลการตรวจวัดคุณสมบัติของเหล็กแท่งด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่ถูกใช้พิจารณาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อน ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา อันคุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแก่ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
3.1 เหล็กแท่งยาว (billet).....	10
3.1.1 การผลิตเหล็กแท่งยาว (billet).....	10
3.1.2 การใช้งานของเหล็กแท่งยาว (billet).....	11
3.2 การถ่ายเทความร้อน.....	11

3.2.1 การนำความร้อน.....	12
3.2.2 การพาความร้อน .....	12
3.2.2.1 การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection) .....	13
3.2.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection).....	14
3.2.2.3 การพาความร้อนร่วมระหว่างการพาความร้อนแบบอิสระและแบบบังคับ .....	14
3.2.3 การแผ่รังสีความร้อน .....	15
3.3 Transient conduction: finite different methods.....	15
3.4 การแผ่รังสีความร้อนระหว่าง opaque, diffuse, gray surfaces ในพื้นที่ปิดล้อม.....	16
3.4.1 การแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่พื้นผิว.....	17
3.4.2 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างหลายพื้นผิว .....	18
3.4.3 ระบบพื้นที่ปิดล้อมแบบสองพื้นผิว.....	19
<b>บทที่ 4 ระบบที่ประกอบด้วย billet ที่พิจารณา .....</b>	<b>21</b>
4.1 ข้อมูลทางกายภาพและคุณสมบัติของ billet และ สภาพแวดล้อมโดยรอบ.....	21
4.2 การถ่ายเทความร้อนของ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียง .....	25
4.3 การถ่ายเทความร้อนของ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียง .....	26
<b>บทที่ 5 การประมาณเชิงไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของสมการความร้อน .....</b>	<b>27</b>
5.1 การสร้างกริดของ billet ที่ใช้ในการคำนวณ .....	27
5.2 การสร้างระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์.....	28
5.2.1 สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งมุม billet.....	28
5.2.2 สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งขอบ billet .....	31
5.2.3 สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งภายใน billet.....	35
<b>บทที่ 6 วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ .....</b>	<b>36</b>
6.1 การกำหนดรูปแบบสมการเมทริกซ์ที่ใช้ในการหาคำตอบ .....	36



6.1.1 ค่าคงที่และค่าคุณสมบัติของสารที่ใช้ในแบบจำลอง .....	36
6.2 การหาคำตอบเชิงตัวเลขของระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง.....	38
6.3 การหาคำตอบเชิงตัวเลขของระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง .....	42
6.3.1 การพิจารณาระบบการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียงเพื่อคำนวณค่า $h_{\text{effective}}$ .....	43
6.3.2 การหาอุณหภูมิของพื้นผิวภายในและพื้นผิวภายนอกของฉนวนกันความร้อนที่สอดคล้องกับการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลาต่าง ๆ.....	47
6.4 ผลการหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลอง .....	53
6.5 การตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิผิวของ billet และขั้นตอนการสอบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลอง.....	54
6.5.1 รายละเอียดของข้อมูลที่ทำกรตรวจวัด.....	54
6.5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	55
6.5.3 การสอบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการตรวจวัด .....	55
<b>บทที่ 7 ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ผล.....</b>	<b>56</b>
7.1 ตัวอย่างการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนที่เวลาต่าง ๆ.....	57
7.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลอง .....	60
7.3 พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของ billet ที่ได้จากแบบจำลอง.....	61
7.4 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆที่ได้จากแบบจำลองไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียง เป็นระยะเวลาต่าง ๆ .....	62

7.5 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนเทียบกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ.....	63
7.6 ผลการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่แต่ละความหนาถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ เทียบกับกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนในระหว่างการลำเลียง.....	65
7.7 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนมีแผ่น สเตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง.....	68
7.8 ผลการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนมีแผ่นสเตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง.....	72
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต.....	78
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิ billet.....	81
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	85
ข.1 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม.....	86
ข.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่ต่าง ๆ ของ billet ที่ใช้ในการคำนวณ.....	92
ข.3 ตัวอย่างการสร้างสมการ finite difference จากการพิจารณาสมดุลความร้อนที่ตำแหน่งบน billet.....	93
ภาคผนวก ค โค้ดโปรแกรมคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย.....	100
ค.1 โค้ดโปรแกรมคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง.....	101
ค.2 โค้ดโปรแกรมคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิ Billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง.....	105
ภาคผนวก ง บทความตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร มก. (Kasetsart Engineering Journal) ISSN : 0857-4154 ปีที่ 32 ฉบับที่ 107 (2562) : มกราคม - มิถุนายน 2562.....	111

ภาคผนวก จ ข้อมูลพลังงานความร้อนที่ได้จากการคำนวณในกรณีต่าง ๆ .....	122
จ.1 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิตั้งที่ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนและมีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ .....	123
จ.2 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิตั้งที่ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่ฉนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง.....	124
จ.3 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิตั้งที่ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่ฉนวนกันความร้อนมีแผ่นเซรามิกไฟเบอร์หนา 0.5 นิ้ว 1 นิ้ว และ 2 นิ้ว และมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง.....	125
บรรณานุกรม.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	128

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่ $C$ และ $n$ ในสมการที่ 3.3 สำหรับการพาความร้อนแบบอิสระบนทรงกระบอก ยาวในแนวนอน.....	13
ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของ billet ที่ใช้ในแบบจำลอง .....	22
ตารางที่ 4.2 ค่าตัวอย่างคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศแวดล้อมในแบบจำลอง .....	22
ตารางที่ 4.3 ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของฉนวนกันความร้อนที่ใช้ในแบบจำลอง .....	23
ตารางที่ 6.1 ค่าคงที่ต่าง ๆ ภายในแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ.....	37
ตารางที่ 6.2 ค่าคงที่ต่าง ๆ ในแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณ .....	37

## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิของผิว Billet ระหว่างภาพที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองกับภาพที่ถ่ายผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน [1] .....	6
รูปที่ 2.2 อุณหภูมิของ billet A) ผลการจำลองที่พิจารณาผลของ ความหนาของ oxide-scale และ air gap ต่ออุณหภูมิ billet B) ผลการจำลองที่เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความหนาของ oxide-scale ต่ออุณหภูมิ billet [1] .....	7
รูปที่ 2.3 Convective and radiative heat fluxes บน billet ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ reheating furnace [3] .....	8
รูปที่ 2.4 อุณหภูมิที่ผิวของ billet ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บน reheating furnace (a) 4.9 m; (b) 7.6 m; (c) 10.3 m; (d) 13.8 m; (e) 15.1 m; (f) 17 m [3] .....	9
รูปที่ 3.1 ทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิ $T_1$ ไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิ $T_2$ .....	12
รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในสองมิติของ billet ที่ใช้ในการสร้างสมการ .....	16
รูปที่ 3.3 แผนภาพตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม .....	17
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างวงจรการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว $i$ และพื้นผิวอื่น ๆ ในพื้นที่ปิดล้อม ....	19
รูปที่ 3.5 แผนภาพตัวอย่างของพื้นที่ปิดล้อมที่ประกอบด้วยสองพื้นผิว .....	20
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรการแผ่รังสีความร้อนของพื้นที่ปิดล้อมที่ประกอบด้วยสองพื้นผิว .....	20
รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขนาดของ billet ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ .....	21
รูปที่ 4.2 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียง .....	25
รูปที่ 4.3 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียง .....	26
รูปที่ 5.1 ขนาดกริดที่ถูกแบ่งบนหน้าตัดของ billet ในแบบจำลอง .....	27

รูปที่ 5.2 แบบจำลองที่ตำแหน่งมุมซ้ายบนของ billet.....	28
รูปที่ 5.3 แบบจำลองที่ตำแหน่งมุมขวาบนของ billet.....	29
รูปที่ 5.4 แบบจำลองที่ตำแหน่งมุมซ้ายล่างของ billet.....	30
รูปที่ 5.5 แบบจำลองที่ตำแหน่งมุมขวาล่างของ billet.....	30
รูปที่ 5.6 แบบจำลองที่ตำแหน่งขอบบนของ billet.....	31
รูปที่ 5.7 แบบจำลองที่ตำแหน่งขอบล่างของ billet.....	32
รูปที่ 5.8 แบบจำลองที่ตำแหน่งขอบซ้ายของ billet.....	33
รูปที่ 5.9 แบบจำลองที่ตำแหน่งขอบขวาของ billet.....	34
รูปที่ 5.10 แบบจำลองที่ตำแหน่งภายในของ billet.....	35
รูปที่ 6.1 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของระบบ สมการของการแจกแจงอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet.....	39
รูปที่ 6.2 แผนภาพแสดงการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ที่ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ไปที่ 1250 องศาเซลเซียส และพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลา ต่าง ๆ.....	42
รูปที่ 6.3 ตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อนที่แต่ละตำแหน่งบนผิว billet ถ่ายทอดไปสู่พื้นผิวด้านในของ ฉนวนกันความร้อนเฉพาะของตำแหน่งตัวเอง.....	44
รูปที่ 6.4 วงจรการถ่ายเทความร้อนจากตำแหน่งผิวด้านในของฉนวนกันความร้อนเฉพาะผ่านฉนวน กันความร้อนจนไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก.....	45
รูปที่ 6.5 แผนภาพแสดงโครงสร้างและวงจรการถ่ายเทความร้อนของฉนวนที่ใช้ในแบบจำลอง..	48
รูปที่ 6.6 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิของ พื้นผิวภายในและพื้นผิวภายนอกของฉนวนกันความร้อนที่สอดคล้องกับการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลาต่าง ๆ.....	50
รูปที่ 6.7 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของระบบ สมการของการแจกแจงอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet.....	51

รูปที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 10x10 และ 20x20.....	53
รูปที่ 6.9 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมซ้ายบนของ billet ที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 10x10 และ 20x20.....	54
รูปที่ 6.10 กล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR รุ่น P640 ที่ใช้ในการตรวจวัด.....	55
รูปที่ 7.1 แผนภาพของอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 300 วินาที และ 600 วินาที .....	57
รูปที่ 7.2 แผนภาพของอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 900 วินาที และ 1200 วินาที .....	58
รูปที่ 7.3 แผนภาพของอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน Billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 1800 วินาที และ 3600 วินาที.....	59
รูปที่ 7.4 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของ billet ที่ได้จากแบบจำลองกับ ค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้อง.....	60
รูปที่ 7.5 การเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมจากการพาความร้อนกับการแผ่รังสีความร้อน และพลังงานความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด.....	61
รูปที่ 7.6 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส และพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียง เป็นระยะเวลาต่าง ๆ .....	62
รูปที่ 7.7 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนเทียบกับกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ.....	63
รูปที่ 7.8 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงที่ได้จากแบบจำลองไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส .....	65
รูปที่ 7.9 ผลการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ระหว่างกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ กับกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง.....	66

รูปที่ 7.10 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง .....	68
รูปที่ 7.11 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนมีความหนา 0.5 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง .....	69
รูปที่ 7.12 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนมีความหนา 1 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง .....	70
รูปที่ 7.13 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนมีความหนา 2 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง .....	70
รูปที่ 7.14 พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง .....	72
รูปที่ 7.15 พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง .....	73
รูปที่ 7.16 พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 1 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง .....	73
รูปที่ 7.17 พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง .....	74



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$Bi$	finite difference form of Biot number: $Bi = \frac{h_{total}\Delta x}{k}$	
$c_p$	ค่าความจุความร้อนจำเพาะของ billet	J/kg.K
$Fo$	Finite difference form of Fourier number: $Fo = \frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2}$	
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s <sup>2</sup>
$h$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน	W/m <sup>2</sup> .K
$k$	thermal conductivity	W/m.K
$L$	characteristic length of billet	m
$\overline{Nu}_L$	ค่า Nusselt number	
$Pr$	ค่า Prandtl number	
$q$	พลังงานความร้อน	J
$\dot{q}_{loss}$	thermal flux ที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม	W/m <sup>2</sup>
$Re_L$	Reynolds number	
$Ra_D$	ค่า Rayleigh number	
$T$	อุณหภูมิ	K
$t$	เวลา	s
$\Delta t$	ช่วงระยะเวลาในการคำนวณ	s
$x, y$	แกนสองมิติในระบบ cartesian coordinate	
$\Delta x, \Delta y$	ขนาด element ของ billet ที่ถูกแบ่ง ในแนวแกน x และ y	m
$\alpha$	ค่าการแพร่กระจายทางความร้อนของ billet: $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$	m <sup>2</sup> /s
$\beta$	ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงปริมาตร	K <sup>-1</sup>

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\epsilon$	emissivity ของ billet	
$\rho$	ความหนาแน่นของ billet	$\text{kg/m}^3$
$\nu$	ค่า kinematic viscosity	$\text{m}^2/\text{s}$
$\sigma$	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
$\partial$	partial differential operator	

### Subscripts

<i>air</i>	อากาศ
<i>force</i>	การพาความร้อนแบบบังคับ
<i>free</i>	การพาความร้อนแบบอิสระ
<i>conv</i>	การพาความร้อน
<i>rad</i>	การแผ่รังสีความร้อน
<i>total</i>	รวม
<i>effective</i>	สุทธิ (ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนครอบ)
<i>s</i>	ตำแหน่งผิวของ billet
$\infty$	อากาศแวดล้อม
<i>sur</i>	พื้นผิวแวดล้อม
<i>m</i>	ดัชนีในแนวแกน x
<i>n</i>	ดัชนีในแนวแกน y
<i>i</i>	ที่ตำแหน่ง i บน billet
<i>t</i>	สุทธิ

### Superscripts

<i>p</i>	ที่เวลา p
<i>p + 1</i>	ที่เวลา p+1

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาทางเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากเหล็กเป็นวัตถุดิบที่มีความจำเป็นต่อการผลิตของอุตสาหกรรมอื่น ๆ ที่มีส่วนสำคัญในระบบเศรษฐกิจ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเหล็กส่วนใหญ่จะถูกนำมาให้ความร้อนผ่านเตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) เพื่อให้เหล็กมีความอ่อนตัวและง่ายต่อการขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่าง ๆ ต่อไป

โดยทั่วไปนั้นเหล็กที่ออกจากเตาเผาจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 1100-1250 °C ซึ่งเหล็กเหล่านี้จะถูกลำเลียงไปยังเครื่องรีดเหล็กเพื่อทำการขึ้นรูป โดยในระหว่างการลำเลียงเหล็กจะมีการสูญเสียความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการแผ่รังสีความร้อนรวมถึงการพาความร้อนโดยอากาศโดยรอบทำให้แท่งเหล็กมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาการแก้ไขปัญหาการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกของแท่งโดยการสร้างอุโมงค์ฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียงแท่งเหล็ก โดยถ้าเหล็กมีอุณหภูมิต่ำลงมากอาจทำให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กระหว่างการลำเลียงไปจนถึงก่อนเข้าเครื่องรีดเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น

การตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กนั้นสามารถทำได้หลายวิธีไม่ว่าจะเป็นการวัดผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน การวัดด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมมากเนื่องจากสามารถวัดได้สะดวกเพียงการถ่ายรูปผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนจากระยะไกล ถือเป็นวิธีการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากความร้อนของแท่งเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1100-1250 °C ได้ แต่การวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นจะสามารถวัดอุณหภูมิของแท่งเหล็กได้เพียงแค่ที่พื้นผิวนอกที่สามารถมองเห็นได้เท่านั้น ไม่สามารถวัดอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กได้ ดังนั้นการตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาทำนายการแจกแจงอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กจึงถูกนำมาพิจารณามากขึ้นในปัจจุบัน ดังเช่นในงานวิจัยของ [1]

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนนั้นจำเป็นต้องใช้ความรู้ความเข้าใจในด้านการถ่ายเทความร้อนอย่างมากเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองที่มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับสถานะของการถ่ายเทความร้อนจริงที่สุด นอกจากนี้การแก้ปัญหาระบบสมการของแบบจำลองเพื่อคำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็กนั้นจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นตัวคำนวณ ซึ่งระเบียบวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาระบบสมการก็จะมีหลากหลายวิธีแตกต่างกันออกไป

วิทยานิพนธ์นี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียง รวมถึงการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็ก รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียงในตำแหน่งที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิโดยตรงได้ โดยระเบียบวิธีที่ถูกนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ Finite difference implicit method นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กภายใต้สถานะที่ไม่มีแผ่นฉนวนความร้อนครอบระหว่างการลำเลียงที่ความหนาต่าง ๆ กับสถานะที่ไม่มีแผ่นฉนวนความร้อนครอบระหว่างการลำเลียงที่ได้จากแบบจำลองอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการแจกแจงอุณหภูมิของของแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียง
2. สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สามารถทำนายการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียงได้
3. เปรียบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กภายใต้สถานะที่ไม่มีแผ่นฉนวนความร้อนกั้นระหว่างการลำเลียงเทียบกับสถานะที่มีความหนาฉนวนต่าง ๆ รวมถึงเปรียบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กจากแบบจำลองกับข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจริงด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. แท่งเหล็กที่ใช้ในการศึกษาเป็นเหล็กแท่ง (billet) ที่มีขนาดหน้าตัด 130\*130 มิลลิเมตร ยาว 6 เมตร
2. ลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็กในระหว่างการขนส่งจะถูกพิจารณาเป็นแบบ Transient heat conduction
3. เลือกใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ Finite difference (implicit) ในการคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียง
4. เปรียบเทียบข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กที่ได้จากแบบจำลองภายใต้สภาวะที่ไม่มีผลวนกันความร้อนรอบกับข้อมูลอุณหภูมิที่ผิวของแท่งเหล็กที่ได้จากการวัดจริงด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน
5. เปรียบเทียบผลการแจกแจงของอุณหภูมิ และความร้อนสูญเสียของแท่งเหล็กที่ได้จากแบบจำลองภายใต้สภาวะที่มีผลวนกันความร้อนระหว่างการลำเลียงที่มีความหนาแตกต่างกัน ตั้งแต่ 0.5 - 2 นิ้ว

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองเชิงตัวเลขที่สามารถทำนายการแจกแจงของอุณหภูมิแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียงภายใต้สภาพแวดล้อมต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง
2. สามารถทำนายความร้อนสูญเสียของแท่งเหล็กในแบบจำลองภายใต้สภาวะที่มีผลวนกันความร้อนที่ความหนาต่างๆ ได้

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

ขั้นตอนการทำวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนก่อนการสร้างแบบจำลองการแจกแจงอุณหภูมิ
  - 1.1. ศึกษาข้อมูลและรายละเอียดของการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กที่เกิดขึ้นในระหว่างการลำเลียง

- 1.2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก การออกแบบแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก และการคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิภายในแท่งเหล็ก จากทั้งในประเทศและต่างประเทศ
  - 1.3. ทำการตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิผิวของแท่งเหล็กที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก รวมถึงใช้เป็นตัวแทนเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง
  - 1.4. วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กเพื่อสร้างสมการที่ใช้ในแบบจำลองการแจกแจงอุณหภูมิ
2. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการแจกแจงอุณหภูมิ
    - 2.1. ออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาระบบสมการของการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กที่สถานะที่มีฉนวนกันความร้อน และไม่มีฉนวนกันความร้อนระหว่างการลำเลียง
    - 2.2. เปรียบเทียบข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็กที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการตรวจวัดจริง
    - 2.3. เปรียบเทียบข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็กที่ความหนาของฉนวนกันความร้อนแตกต่างกัน
  3. วิเคราะห์ สรุปผล และจัดทำรายงานวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

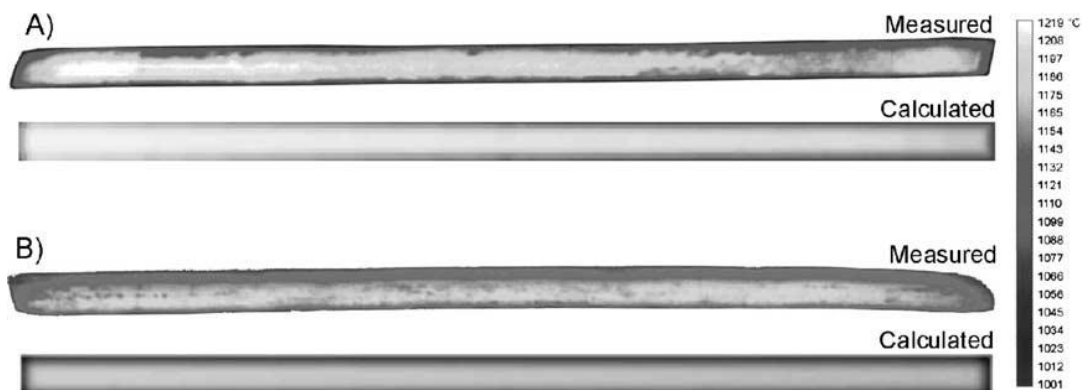
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายใน billet

Jaklić, Glogovac, Kolenko, Zupančić, and Težak (2002) [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายใน billet ในระหว่างการขนส่ง billet จากเตาอุ่นเหล็ก (Reheating furnace) ไปยังเครื่องรีดเหล็ก (Rolling mill) โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ Three-dimensional finite-difference model ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายใน billet เพื่อนำมาหาการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ไม่สามารถวัดค่าอุณหภูมิโดยตรงได้

ในแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของ billet ระหว่างการขนส่งนั้น billet จะมี boundary conditions ที่ขึ้นกับ อุณหภูมิ เวลา และตำแหน่งของ billet โดยระบบจะถูกแบ่งออกเป็น 7 ช่วงย่อย ซึ่งในแต่ละช่วงก็จะมี boundary conditions ที่เหมาะสมของตัวเอง ปัจจัยในการสูญเสียความร้อนของ billet ที่ถูกนำมาพิจารณาในงานวิจัยนี้ได้แก่ การสูญเสียความร้อนผ่านการแผ่รังสีความร้อนของ billet ในระหว่างการขนส่ง การสูญเสียความร้อนผ่านการพาความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ billet ผ่านอากาศโดยรอบ การสูญเสียความร้อนจากการที่ billet สัมผัสกับรางขนส่ง และการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนผ่านน้ำระหว่างกระบวนการกำจัด scale โดยในแบบจำลองดังกล่าวนี้มี boundary conditions ที่ครอบคลุมทุกกระบวนการที่ได้กล่าวมา นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังคำนึงถึงผลของ oxide scale ต่อการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ซึ่งเป็นผลมาจากค่า emissivity และค่า thermal conductivity ที่แตกต่างจากเนื้อวัสดุของ billet และความหนาของ scale

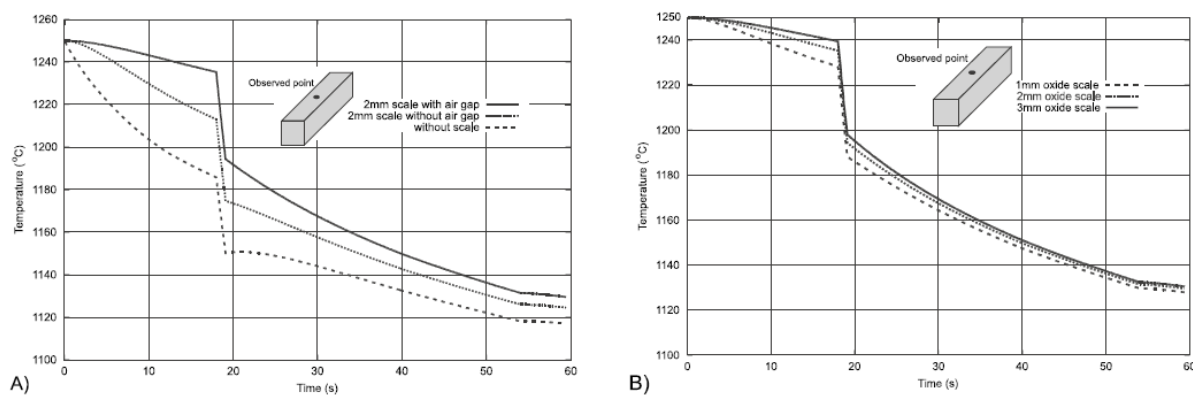
ซึ่งผลการแจกแจงอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำมาตรวจสอบกับการวัดอุณหภูมิของผิว billet จริงผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนซึ่งได้ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 2.1 พบว่าภาพที่ได้จากการวัดจริงนั้นการแจกแจงอุณหภูมิมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลอง โดยในรูปที่ 1 A เป็นการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ที่วินาทีที่ 24 ของการขนส่ง และรูปที่ 1 B เป็นการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ที่วินาทีที่ 50 ของการขนส่ง



รูปที่ 2.1 การเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิของผิว Billet ระหว่างภาพที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลองกับภาพที่ถ่ายผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน [1]

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังมีการแสดงผลของ oxide-scale ต่ออุณหภูมิของ billet โดยมีการละเอียดแสดงในรูปที่ 2.2 จากกราฟดังกล่าวเห็นได้ว่า ในภาพ A) ในช่วง 18 วินาทีแรกซึ่งเป็นช่วงก่อนเกิดกระบวนการกำจัด oxide-scale ตัวอย่างทั้ง 3 กรณี ได้แก่ 1) ความหนา scale 2 มิลลิเมตร และมี air gap ระหว่าง billet และ scale 2) ความหนา scale 2 มิลลิเมตร และไม่มี air gap และ 3) ไม่มี scale มีอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด รวมถึงหลังจากช่วงวินาทีที่ 18 ไปจนถึงจุดสุดท้าย ก็มีความแตกต่างของอุณหภูมิ billet อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนในภาพ B) แสดงผลของความหนาของ oxide-scale ที่ 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร ต่ออุณหภูมิของ billet พบว่า อุณหภูมิของ billet ในช่วงก่อน 18 วินาทีแรก หรือ ก่อนกระบวนการกำจัด oxide-scale นั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่จุดสุดท้ายของการจำลองพบว่ามีอุณหภูมิสุดท้ายที่ใกล้เคียงกันมากในทั้ง 3 กรณี ซึ่งอาจสรุปได้ว่าความหนาของ scale ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิสุดท้ายของ billet ในระหว่างการขนส่ง





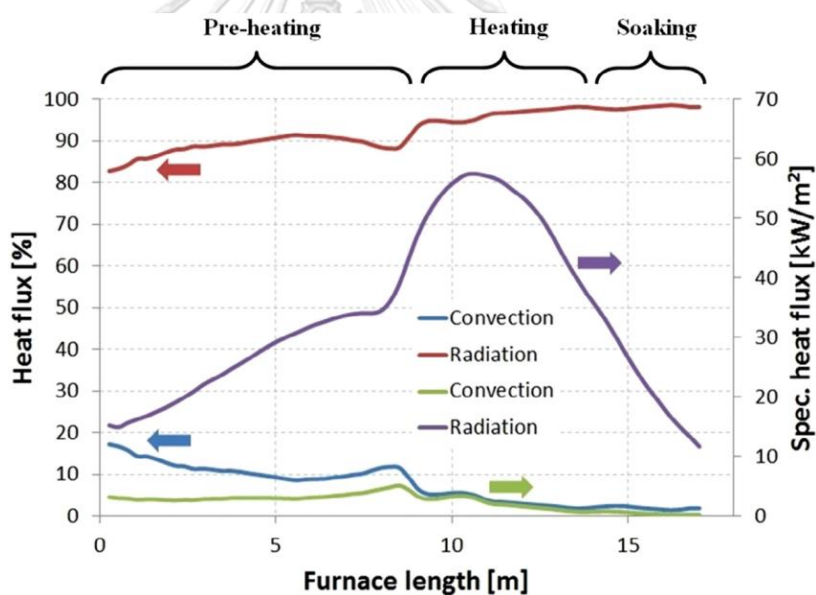
รูปที่ 2.2 อุณหภูมิของ billet A) ผลการจำลองที่พิจารณาผลของ ความหนาของ oxide-scale และ air gap ต่อ อุณหภูมิ billet B) ผลการจำลองที่เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความหนาของ oxide-scale ต่ออุณหภูมิ billet[1]

ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายใน billet ในการทำนายผลการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ซึ่งมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ รวมถึงแสดงให้เห็นถึงผลของ oxide-scale ที่มีผลต่ออุณหภูมิของ billet ซึ่งเป็นปัจจัยที่ควรคำนึงถึงอย่างยิ่งในการถ่ายเทความร้อนภายใน billet

Ramírez-López, Aguilar-López, Palomar-Pardavé, Romero-Romo, and Muñoz-Negrón (2010) [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของ billet เพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิของ billet เช่นเดียวกับ [1] แต่ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการถ่ายเทความร้อนของ billet ในระหว่างกระบวนการ continuous casting ของ billet โดยในงานวิจัยนี้ยังมีการพิจารณาผลของการนำความร้อน พาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ต่อการสูญเสียความร้อนของ billet เช่นเดียวกับ [1] แต่ไม่ได้พิจารณาผลของ oxide-scale ต่อการถ่ายเทความร้อนของ billet โดยการสูญเสียความร้อนของ billet จากปัจจัยดังกล่าวจะถูกคำนวณโดยการเปรียบเทียบกับ kinematics model ที่ถูกพัฒนาขึ้น ส่วนการคำนวณแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ finite difference method ที่มีชื่อว่า Crank-Nicholson ในการแก้ปัญหาในรูปแบบของ two-dimensional computational array (2D model) โดยผลของอุณหภูมิที่ผิวของ billet ที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากโรงงานผลิตจริงทั้ง 3 โรง โดยในแต่ละโรงก็จะมี casting conditions

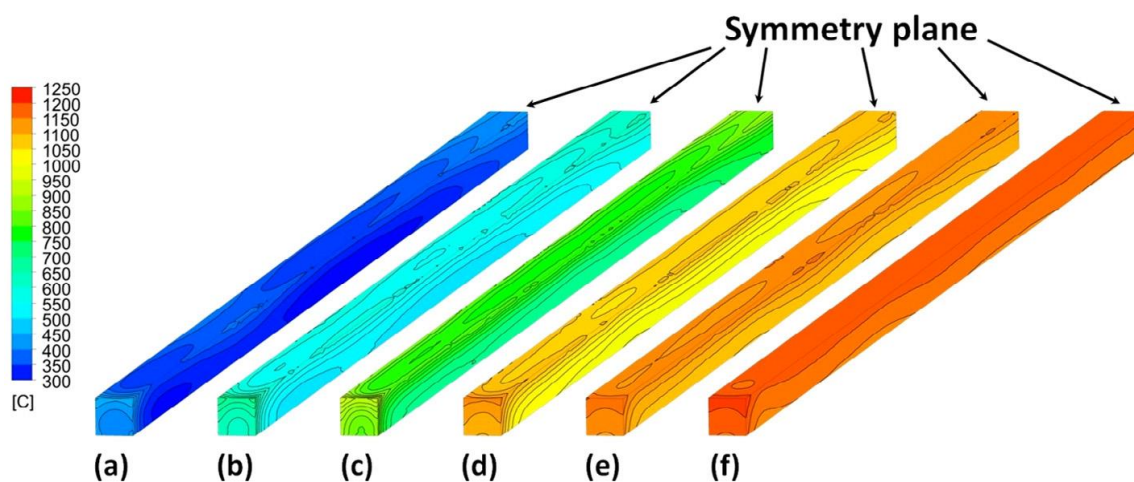
ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งผลการเปรียบเทียบพบว่าอุณหภูมิที่ผิวของ billet จากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับการวัดจริงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

Prieler, Mayr, Demuth, Holleis, and Hochenauer (2016) [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนของ billet ภายใน reheating furnace โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ในการคำนวณ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อน และพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนของ billet ภายใน reheating furnace ผ่าน CFD (Computational fluid dynamics) โดยในงานวิจัยนี้มีการพิจารณาผลของการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนต่อพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนของ billet ภายใน reheating furnace เท่านั้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.3 โดยจะเห็นได้ว่าความร้อนที่ billet ได้รับส่วนใหญ่มาจากการแผ่รังสีความร้อน โดยคิดเป็นร้อยละ 93 ของปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ billet ได้รับ ส่วนอุณหภูมิที่ผิวของ billet ที่ได้จากการคำนวณจะถูกแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.3 Convective and radiative heat fluxes บน billet ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ reheating furnace

[3]



รูปที่ 2.4 อุณหภูมิที่ผิวของ billet ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บน reheating furnace (a) 4.9 m; (b) 7.6 m; (c) 10.3 m; (d) 13.8 m; (e) 15.1 m; (f) 17 m [3]

Dubey and Srinivasan (2014) [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขของการนำความร้อน ที่ใช้ในการทำนายการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ในสามมิติ โดยแบบจำลองดังกล่าวถูกนำไปใช้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของ billet ภายใน reheating furnace ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับ [3] แต่เลือกใช้กระบวนการ implicit scheme of finite difference ในการแก้ปัญหาผ่านโปรแกรม MATLAB โดยแบบจำลองดังกล่าวสามารถทำนายการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet รวมถึงการเกิดของ scale บนผิวของ billet ได้อีกด้วย ซึ่ง scale ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของ billet ด้วยเช่นกันดังที่ถูกระบุไว้ใน [1]

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 เหล็กแท่งยาว (billet)

เหล็กแท่งยาว หรือ billet คือเหล็กแท่งที่ถูกผลิตโดยการหล่อหรือรีด โดยมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดประมาณ 90-160 มิลลิเมตร (เทียบเท่ากับขนาด 6 นิ้วหรือน้อยกว่า) ความยาวประมาณ 5 - 9 เมตร ซึ่งถือเป็นเหล็กที่ถูกผลิตขึ้นอย่างมากมายในปัจจุบัน โดยมักถูกนำไปแปรรูปเป็นเหล็กแผ่น หรือ เหล็กเส้นในอุตสาหกรรมเหล็ก

##### 3.1.1 การผลิตเหล็กแท่งยาว (billet)

การผลิตเหล็กแท่งยาว (billet) นั้นแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนหลักได้แก่

- 1) การผลิตน้ำเหล็ก โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการหลอมเพื่อผลิตแท่งเหล็กยาวนั้นจะเป็นเศษเหล็ก (scrap) ซึ่งจะถูกป้อนลงในเตาหลอมเหล็กด้วยไฟฟ้า Electric Arc Furnace (EAF) จากนั้นน้ำเหล็กจะถูกส่งไปปรับปรุงคุณภาพของน้ำเหล็กเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ
- 2) การปรับปรุงคุณภาพและส่วนประกอบของน้ำเหล็ก น้ำเหล็กที่ถูกส่งมาจาก เตาหลอมเหล็กด้วยไฟฟ้า Electric Arc Furnace (EAF) จะถูกส่งต่อไปที่ เตาอุ่นน้ำเหล็ก (Ladle furnace) เพื่อลดปริมาณสารมลทินในน้ำเหล็ก เช่น คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส ไททานเนียม ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ ด้วยการใส่สารสร้างตะกอนจำพวก หินฟันม้าหรือปูนขาว ลงไป โดยตะกอนที่ได้จะเป็นสารประกอบโลหะที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา หินปูน แมกนีเซียมเหล็กออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งจะถูกคูดออกจากน้ำเหล็กต่อไป
- 3) การหล่อเหล็กแท่ง น้ำเหล็กที่ถูกปรับปรุงคุณภาพแล้วจะถูกส่งที่ไปยังเครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง Continuous Casting Machine ซึ่งจะมีอ่างรับน้ำเหล็ก (tundish) ที่ถูกส่งมาจากนั้นจึงปล่อยให้เหล็กไหลผ่านแม่พิมพ์ทองแดงที่มีการหล่อเย็น โดยโลหะที่กำลังแข็งตัวจะถูกดึงอย่างต่อเนื่องผ่านเครื่องจักรซึ่งช่วยในการลดอุณหภูมิ และจะถูกตัดเพื่อให้ได้แท่งเหล็กที่มีความยาวตามที่ต้องการ

### 3.1.2 การใช้งานของเหล็กแท่งยาว (billet)

เหล็กแท่งยาว (billet) ส่วนใหญ่นั้นจะถูกนำไปใช้เป็นตัวุดิบหลักในการผลิตเหล็ก รูปพรรณชนิดต่างๆ เช่น เหล็กแท่ง เหล็กแผ่น หรือเหล็กเส้น ผ่านกระบวนการรีดร้อน หรือรีดเย็น ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามแต่ละผลิตภัณฑ์ โดยในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การผลิตด้วยกระบวนการรีดร้อนเป็นหลักเนื่องจากเหล็กรูปพรรณส่วนใหญ่จะถูกผลิตขึ้นผ่านกระบวนการรีดร้อนซึ่งมีคุณสมบัติในเปลี่ยนรูปร่างได้มากกว่าการรีดเย็น

ในการผลิตเหล็กรูปพรรณผ่านกระบวนการรีดร้อนนั้น เหล็กแท่งยาว (billet) ที่จะถูกป้อนเข้าเครื่องรีดนั้นจะต้องมีอุณหภูมิที่สูงกว่า recrystallization temperature ที่ประมาณ 500 - 900 องศาเซลเซียส โดยปกติแล้ว เหล็กแท่งยาว (billet) ที่ออกมาจาก เครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง Continuous Casting Machine จะถูกส่งตรงไปยังเครื่องรีดโดยตรง (Direct Rolling) เนื่องจากมีอุณหภูมิที่เหมาะสมพอดี (ออกจากเครื่อง Continuous Casting Machine ที่ 1050 องศาเซลเซียส) แต่ถ้าหากเป็นเหล็กแท่งยาว (billet) ที่ถูกพักไว้ในบ่อพักจนมีอุณหภูมิลดลงไปถึงอุณหภูมิห้องแล้ว จำเป็นต้องทำการอุ่นแท่งเหล็กอีกครั้งผ่านเตาอุ่นเหล็ก (Reheating furnace) ให้ เหล็กแท่งยาว (billet) มีอุณหภูมิที่สูงพอต่อการรีดร้อนอีกครั้ง

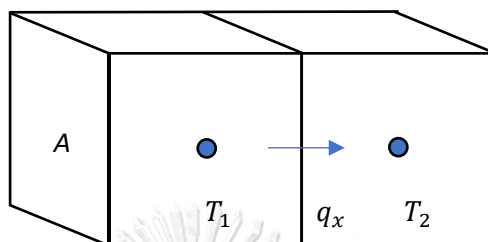
นอกจากนี้ในระหว่างการรีดร้อนยังจำเป็นต้องมีการตรวจวัดอุณหภูมิของเหล็กแท่งยาว (billet) อย่างสม่ำเสมอเพื่อให้แน่ใจว่าเหล็กแท่งยาว (billet) มีอุณหภูมิสูงกว่า recrystallization temperature ตลอดการรีดร้อน หากอุณหภูมิของเหล็กแท่งยาว (billet) ลดลงจนต่ำกว่า recrystallization temperature เหล็กแท่งยาว (billet) นั้นจำเป็นต้องทำการอุ่นใหม่อีกครั้งก่อนทำการรีดร้อนต่อ เพื่อรักษาคุณภาพและความปลอดภัยในการรีดร้อน

### 3.2 การถ่ายเทความร้อน

หลังจากที่ billet ออกจากเครื่อง CCM (Continuous Casting Machine) billet จะมีอุณหภูมิประมาณ 1050 องศาเซลเซียสและจะถูกลำเลียงต่อไปตามสายพาน ซึ่งในระหว่างการลำเลียงนั้น billet จะมีการถ่ายเทความร้อนทั้งภายในbillet และกับสิ่งแวดล้อมภายนอกผ่านกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

### 3.2.1 การนำความร้อน

การนำความร้อน คือการถ่ายเทพลังงานผ่านตัวกลางเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยที่ตัวกลางไม่มีการเคลื่อนไหว ตามกฎของ Fourier's law โดยที่ทิศทางการถ่ายเทความร้อนจะเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากจุดที่มีอุณหภูมิ  $T_1$  ไปสู่จุดที่มีอุณหภูมิ  $T_2$

กำหนดให้  $T_1 > T_2$ ,  $\Delta T = T_1 - T_2$

เมื่อ  $\Delta T$  คือผลต่างของอุณหภูมิของทั้งสองตำแหน่ง  $\Delta x$  คือระยะห่างระหว่างสองตำแหน่ง และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของการถ่ายเทความร้อน จะได้ว่าอัตราการนำความร้อน หรือ  $q_x$  จะมีค่าดังสมการ

$$Q_{cond} \text{ หรือ } q_x \equiv kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.1)$$

โดยที่  $k$  คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแท่งโลหะ ( $W/mK$ )

### 3.2.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเกิดการที่ billet ที่มีอุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ผ่านอากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนภายใน billet ให้แก่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อน โดยการพาความร้อนออกจาก billet จะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่

### 3.2.2.1 การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection)

เกิดจากการที่ billet มีการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศภายนอกโดยที่พิจารณาว่าอากาศภายนอกไม่มีการเคลื่อนที่โดยการพาความร้อนแบบอิสระในแบบจำลองจะถูกพิจารณาเป็นการพาความร้อนแบบอิสระบนทรงกระบอกยาวในแนวนอนซึ่งจะมีรูปร่างใกล้เคียงกับ billet โดยจะใช้ค่า hydraulic diameter ( $D_h$ ) ของ billet ในการคำนวณแทนเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอกซึ่งจะมีค่า Average Nusselt number ของการพาความร้อนดังสมการที่ (3.2) ซึ่งอ้างอิงจาก Incropera, Dewitt, Bergman, and Lavine (2013) [5]

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_{D_h}^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad Ra_D \leq 10^{12} \quad (3.2)$$

หรือสามารถคำนวณ Average Nusselt number ของการพาความร้อนได้จากสมการในรูปแบบอย่างง่ายดังสมการที่ (3.3)

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = C Ra_D^n \quad (3.3)$$

ซึ่งค่าคงที่  $C$  และ  $n$  ในสมการ(3.3) จะขึ้นอยู่กับค่า Rayleigh number ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าคงที่  $C$  และ  $n$  ในสมการที่ 3.3 สำหรับการพาความร้อนแบบอิสระบนทรงกระบอกยาวในแนวนอน

Rayleigh number ( $Ra_D$ )	$C$	$n$
$10^{-10} - 10^{-2}$	0.675	0.058
$10^{-2} - 10^2$	1.020	0.148
$10^2 - 10^4$	0.850	0.188
$10^4 - 10^7$	0.480	0.250
$10^7 - 10^{12}$	0.125	0.333

โดยค่า Rayleigh number ( $Ra_D$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.4)

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D_h^3}{\nu\alpha} \quad (3.4)$$

โดยที่  $g$  คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )  $\beta$  คือ expansion coefficient โดย  $\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{T_s + T_\infty}$   $T_s$  คืออุณหภูมิที่พื้นผิว  $T_\infty$  คืออุณหภูมิของอากาศแวดล้อม  $L$  คือความยาวของพื้นผิว  $\nu$  คือ kinematic viscosity ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) และ  $\alpha$  คือ thermal diffusivity

### 3.2.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection)

เกิดจากการที่ billet มีการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศภายนอกโดยที่พิจารณาว่าอากาศภายนอกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่าหนึ่งโดยการพาความร้อนที่ผิว billet จะถูกพิจารณาเป็นแบบการไหลภายนอก การพิจารณาการไหลภายนอกกว่าเป็นการไหลแบบ Laminar หรือ Turbulent จะพิจารณาจากค่า Reynold number ซึ่งมีค่าดังสมการ

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $V$  คือความเร็วของอากาศแวดล้อม  $L$  คือ ความยาวของพื้นผิว และ  $\nu$  คือ kinematic viscosity ซึ่งค่า Reynold number ที่ 500000 การไหลจะเริ่มเข้าสู่การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent)

อัตราส่วนของโมเมนต์และการแพร่ความร้อนมีอีกชื่อว่า Prandtl number มีสมการดังนี้

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.6)$$

ซึ่ง Prandtl number สามารถหาค่าได้จากตารางเทอร์โมไดนามิกส์

จากสมการการไหลแบบ Laminar flow over an isothermal flat plate สามารถแก้สมการด้วยวิธี similarity solution เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวกับการพาความร้อนได้เป็น ค่า Average Nusselt number ดังสมการที่ (3.7) [5]

$$\overline{Nu}_x \equiv \frac{\bar{h}_{xx}}{k} = 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0.6 \quad (3.7)$$

### 3.2.2.3 การพาความร้อนร่วมระหว่างการพาความร้อนแบบอิสระและแบบบังคับ

ค่า Average Nusselt number จากการพาความร้อนทั้งสองแบบจะถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่า Average Nusselt number รวม ด้วยสมการที่ (3.8) [5]

$$\overline{Nu}^n = \overline{Nu}_F^n + \overline{Nu}_N^n \quad (3.8)$$

โดยที่  $\overline{Nu}$  คือ Average Nusselt number รวม  $\overline{Nu}_F$  คือ Average Nusselt number ของการพาความร้อนแบบบังคับ และ  $\overline{Nu}_N$  คือ Average Nusselt number ของการพาความร้อนแบบอิสระ ซึ่ง ค่า  $n$  ที่ใช้ในสมการนี้กำหนดให้เป็น 3.5

จากนั้นจึงสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม หรือ  $h_t$  ได้จากสมการ

$$h_t = \bar{h} = \frac{\overline{Nu}k}{L} \quad (3.9)$$



จากกฎ Newton's law of cooling จะได้ว่าพลังงานความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนทั้งหมดถูกแสดงดังสมการที่ (3.10) [5]

$$Q_{conv} = h_t A (T_s - T_\infty) \quad (3.10)$$

### 3.2.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนของ billet เกิดจากการที่ผิว billet มีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นผิวของสิ่งแวดล้อมภายนอกทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานความร้อนผ่านการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากพื้นผิวหนึ่งที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่อีกพื้นผิวหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนมีค่าดังสมการที่ (3.11) [5]

$$Q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) A \quad (3.11)$$

เมื่อ  $\varepsilon$  คือ ค่า emissivity  $\sigma$  คือค่าคงที่ Stefan-Boltzmann  $T_s$  คืออุณหภูมิของพื้นผิวที่สนใจ  $T_{sur}$  คืออุณหภูมิของพื้นผิวแวดล้อม และ  $A$  คือ พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อน

## 3.3 Transient conduction: finite different methods

จากสมการเชิงอนุพันธ์ของการนำความร้อนในระบบสองมิติ ภายใต้ภาวะ transient โดยที่ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารคงที่ และไม่มีการผลิตความร้อนเองภายใน [5] ซึ่งคือ

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3.12)$$

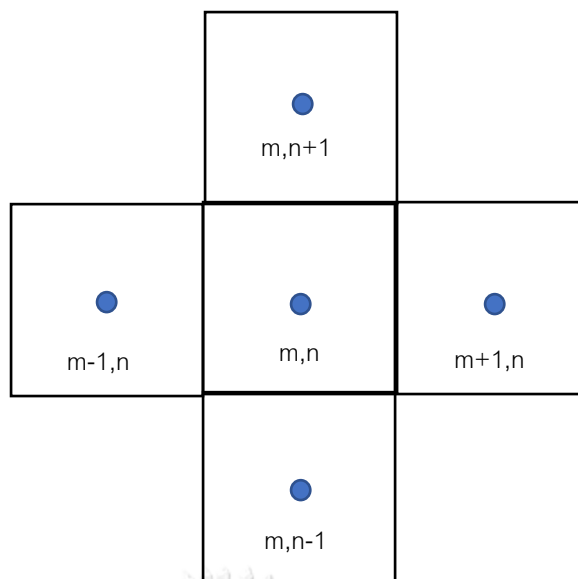
### 3.3.1 discretization of heat equation: The implicit method

จากการประมาณค่า time derivative ด้วยวิธีทาง finite different จะได้

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \quad (3.13)$$

แทนค่า time derivative (3.13) จากสมการ ลงในสมการ (3.12) โดยพิจารณาเป็นแบบ central-different approximation ในระบบพิกัดจะได้

$$\frac{1}{\alpha} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = \frac{T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} - 2T_{m,n}^{p+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1} - 2T_{m,n}^{p+1}}{(\Delta y)^2} \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในสองมิติของ billet ที่ใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

ทำการจัดรูปสมการใหม่ โดยกำหนดให้  $\Delta x = \Delta y$

$$(1 + 4Fo)T_{m,n}^{p+1} - Fo(T_{m+1,n}^{p+1} + T_{m-1,n}^{p+1} + T_{m,n+1}^{p+1} + T_{m,n-1}^{p+1}) = T_{m,n}^p \quad (3.15)$$

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

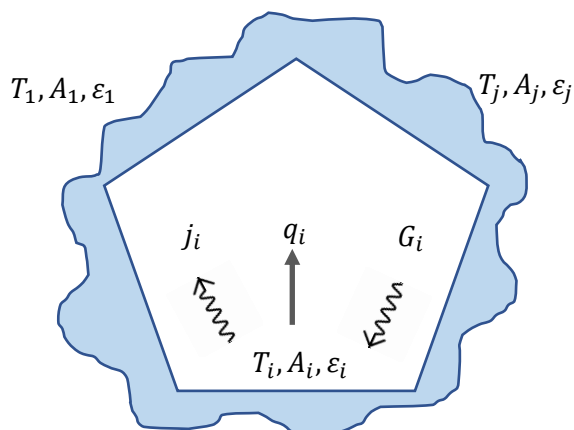
### 3.4 การแผ่รังสีความร้อนระหว่าง opaque, diffuse, gray surfaces ในพื้นที่ปิดล้อม

โดยปกติแล้วจะมีการแผ่รังสีความร้อนออกจาก opaque surfaces ผ่านกระบวนการสะท้อน (reflection) และการปลดปล่อย (emission) และเมื่อแผ่รังสีไปถึงอีก opaque surfaces หนึ่งก็เกิดการดูดซับ (absorption) รังสีรวมถึงการสะท้อนกลับ (reflection) ที่พื้นผิวนั้น ๆ

ในพื้นที่ปิดล้อมนั้นการแผ่รังสีความร้อนอาจเกิดการสะท้อน (reflection) และการดูดซับ (absorption) หลายครั้งผ่านพื้นผิวต่าง ๆ ในพื้นที่ปิดล้อมนั้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์การแผ่รังสีภายในพื้นที่ปิดล้อมจึงจำเป็นต้องมีการตั้งสมมติฐานขึ้นมาได้แก่

1. แต่ละพื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อมถูกกำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่ รวมถึงมีค่า radiosity และ ค่า irradiation คงที่
2. ทุกพื้นผิวจะถูกพิจารณาเป็น opaque surfaces ( $\tau = 0$ ) และมีค่า emissivity, absorptivity และ reflectivity ที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง และความยาวคลื่น (gray surface)



รูปที่ 3.3 แผนภาพตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม

### 3.4.1 การแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่พื้นผิว

ค่าการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่ออกจากพื้นผิว  $i$  คือ พลังงานความร้อนที่จำเป็นต้องถ่ายเทไปสู่พื้นผิวอื่นเพื่อคงอุณหภูมิของพื้นผิวไว้ให้คงที่ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างของ surface radiosity กับ irradiation ดังสมการที่ (3.16) [5]

$$q_i = A_i(J_i - G_i) \quad (3.16)$$

โดยที่ radiosity มีค่าดังสมการ

$$J_i = E_i + \rho_i G_i \quad (3.17)$$

ดังนั้น ค่าการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่ออกจากพื้นผิวจะมีค่าดังสมการ

$$q_i = A_i(E_i - \alpha_i G_i) \quad (3.18)$$

โดยใช้ความสัมพันธ์  $\alpha_i = 1 - \rho_i$  สำหรับ opaque surfaces และด้วยความสัมพันธ์  $E_i = \varepsilon_i E_{bi}$  และ  $\rho_i = 1 - \varepsilon_i$  สำหรับ opaque, diffuse, gray surface ค่า radiosity จะถูกจัดให้อยู่ในรูปดังสมการ

$$J_i = \varepsilon_i E_{bi} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad (3.19)$$

จากนั้นทำการแก้สมการหา  $G_i$  แล้วทำไปแทนในสมการที่ (3.16) ได้เป็น

$$q_i = A_i \left( J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{bi}}{1 - \varepsilon_i} \right) \quad (3.20)$$

หรือ

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i) / \epsilon_i A_i} \quad (3.21)$$

โดยที่

$$E_{bi} = \sigma T_i^4 \quad (3.22)$$

### 3.4.2 การแผ่รังสีความร้อนระหว่างหลายพื้นผิว

ในการหาค่าการแผ่รังสีความร้อนสุทธิของพื้นผิวภายในพื้นที่ปิดล้อมจากสมการที่ (3.21) นั้นเราจำเป็นต้องทราบค่า radiosity ( $J_i$ ) ของพื้นผิวนั้น ๆ

ค่า irradiation ของพื้นผิว  $i$  ( $G_i$ ) นั้นสามารถคำนวณได้จากค่า radiosity ของพื้นผิวอื่น ๆ ภายในพื้นที่ปิดล้อม โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ view factor ระหว่างพื้นผิวต่าง ๆ ( $F_{ij}$ ) ดังแสดงในสมการที่ (3.23) [5]

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N F_{ji} A_j J_j \quad (3.23)$$

จากความสัมพันธ์ของ view factor

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.24)$$

จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$A_i G_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} J_j \quad (3.25)$$

หากล้างพจน์พื้นที่  $A_i$  ในสมการ (3.25) ได้เป็น  $G_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j$  และแทนลงในสมการ (3.16) จะได้

$$q_i = A_i (J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j) \quad (3.26)$$

จาก summation rule ของ view factor ในพื้นที่ปิดล้อม

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (3.27)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$q_i = A_i (\sum_{j=1}^N F_{ij} J_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} J_j) \quad (3.28)$$

$$q_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{ij} (J_i - J_j) = \sum_{j=1}^N q_{ij} \quad (3.29)$$

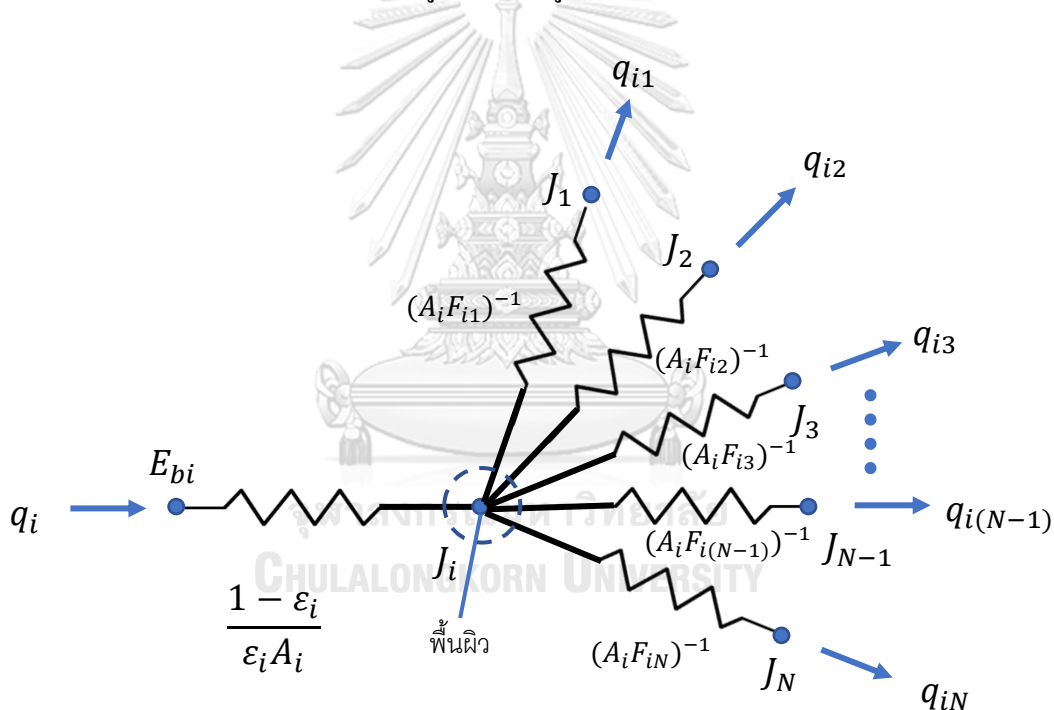
จะเห็นได้ว่าจาก สมการที่ (3.29) ค่าการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่ออกจากพื้นผิวหนึ่งนั้น เท่ากับ ผลรวมของการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวนั้น ไปสู่แต่ละพื้นผิวต่าง ๆ หรือ  $q_{ij}$  โดยแต่ละ component จะถูกแสดงในรูปขององค์ประกอบของวงจรการแผ่รังสีความร้อน โดยที่  $(J_i - J_j)$  แสดงถึงความต่างศักย์ แล้ว  $(A_i F_{ij})^{-1}$  แสดงถึงค่าความต้านทาน

โดยจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$q_i = \sum_{j=1}^N \frac{(J_i - J_j)}{(A_i F_{ij})^{-1}} = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i) / \epsilon_i A_i} \tag{3.30}$$

$$q_i = \frac{E_{bi} - J_i}{(1 - \epsilon_i) / \epsilon_i A_i} \tag{3.31}$$

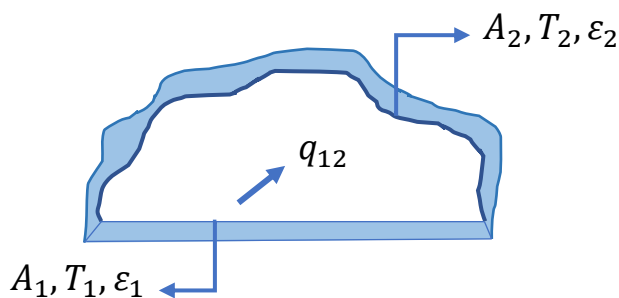
ตัวอย่างวงจรการแผ่รังสีความร้อนจะถูกแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างวงจรการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิวอื่น ๆ ในพื้นที่ปิดล้อม

### 3.4.3 ระบบพื้นที่ปิดล้อมแบบสองพื้นผิว

ตัวอย่างระบบพื้นที่ปิดล้อมที่ง่ายที่สุดคือพื้นที่ปิดล้อมที่ประกอบด้วยพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีการถ่ายเทรังสีความร้อนระหว่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.5

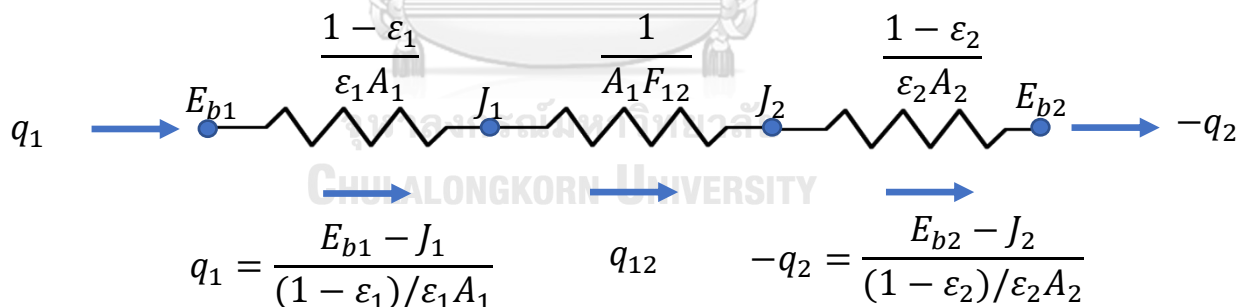


รูปที่ 3.5 แผนภาพตัวอย่างของพื้นที่ปิดล้อมที่ประกอบด้วยสองพื้นผิว

เนื่องจากในพื้นที่ยังปิดล้อมมีเพียงสองพื้นผิวเท่านั้น ดังนั้นค่าการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่ออกจากพื้นผิว 1,  $q_1$  จะต้องเท่ากับค่าการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่เข้าสู่พื้นผิว 2,  $-q_2$  โดยค่าทั้งสองต้องมีค่าเท่ากับค่าการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว 1 กับพื้นผิว 2 ดังสมการ

$$q_1 = -q_2 = q_{12} \quad (3.31)$$

อัตราการแผ่รังสีความร้อนของแต่ละพื้นผิวนั้นสามารถคำนวณจากการแทนสมการ (3.21) ไปที่พื้นผิว 1 และพื้นผิว 2 และแก้สมการทั้งสองเพื่อหาค่า  $J_1$  และ  $J_2$  เพื่อคำนวณหา  $q_1$  และ  $q_2$  ต่อไป โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรการแผ่รังสีความร้อนดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรการแผ่รังสีความร้อนของพื้นที่ปิดล้อมที่ประกอบด้วยสองพื้นผิว

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าความต้านทานรวมของวงจรการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว 1 และ 2 ประกอบไปด้วยพจน์ของ surface resistance สองพจน์ และพจน์ของ geometrical resistance อีกหนึ่งพจน์ ซึ่งหากแทนค่า  $E_{bi}$  จากสมการที่ (3.22) จะสามารถจัดรูปสมการค่าการแผ่รังสีความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิวทั้งสองได้ดังสมการที่ (3.32) [5]

$$q_{12} = q_1 = -q_2 = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (3.32)$$

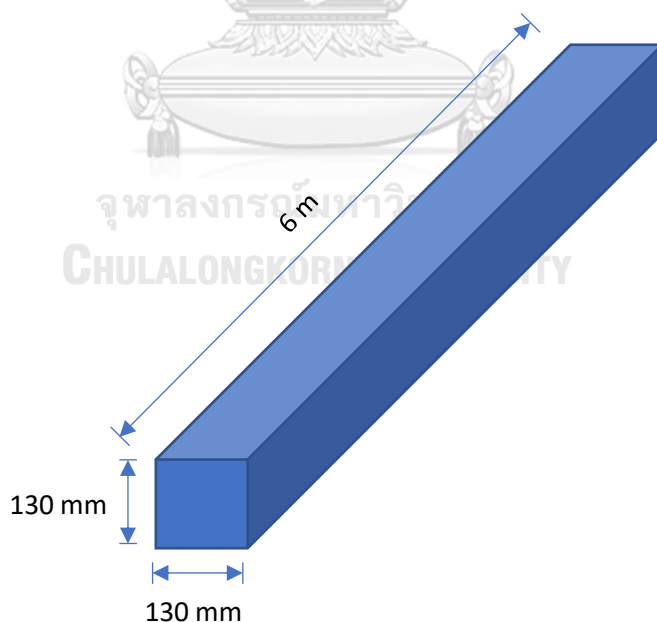
## บทที่ 4

### ระบบที่ประกอบด้วย billet ที่พิจารณา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมมูลพลังงานใน billet เพื่อคำนวณพลังงานความร้อนที่ billet สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมรวมถึงการทำนายการแข็งแรงแจกแฉกอุณหภูมิใน billet ภายใต้สภาวะต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลเกี่ยวกับ billet และสภาพแวดล้อมโดยรอบในระหว่างการลำเลียงของโรงงานตัวอย่างแห่งหนึ่งมาเป็นต้นแบบเพื่อทำการศึกษาและสร้างแบบจำลอง โดยจะมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ข้อมูลทางกายภาพและคุณสมบัติของ billet และ สภาพแวดล้อมโดยรอบ

billet ที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีขนาดหน้าตัด 130x130 มิลลิเมตร และมีความยาว 6 เมตร ซึ่งเป็นขนาดจากโรงงานที่ได้ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง โดย billet จะถูกลำเลียงไปตามรางขนส่งด้วยความเร็วเฉลี่ย 1.5 เมตรต่อวินาที และจะมีค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงขนาดของ billet ที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของ billet ที่ใช้ในแบบจำลอง

ค่าคุณสมบัติของสาร	สัญลักษณ์	ค่า
Thermal conductivity ของ billet	$k$	$30 \text{ W/m K}$
ความหนาแน่น billet	$\rho$	$7600 \text{ kg/m}^3$
ค่าความจุความร้อนจำเพาะของ billet	$c_p$	$670 \text{ J/kgK}$
Emissivity ของ billet	$\varepsilon$	$\varepsilon = 0.28 ; T < 380 \text{ }^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0.00304T - 0.888 ;$ $380^\circ\text{C} \leq T < 520^\circ\text{C}$ $\varepsilon = 0.69 ; T \geq 520 \text{ }^\circ\text{C}$

\*ค่าคุณสมบัติของ billet อ้างอิงจากงานวิจัยของ Jiaocheng, Jun, Qiang, and Liangyu (2014) [6] และ Sadiq, Wong, Tashan, Al-Mahaidi, and Zhao (2013) [7]

อุณหภูมิอากาศแวดล้อม ( $T_\infty$ ) และอุณหภูมิพื้นผิวแวดล้อม ( $T_{sur}$ ) ในงานวิจัยนี้จะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากันที่ 32 องศาเซลเซียสหรือ 305.15 เคลวิน ซึ่งเป็นอุณหภูมิของอากาศในขณะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวของ billet จากโรงงาน โดยจะมีค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวอย่างคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศแวดล้อมในแบบจำลอง

ค่าคุณสมบัติของสาร	สัญลักษณ์	ค่า
ความหนาแน่นของอากาศ	$\rho_{air}$	$0.4561 \text{ kg/m}^3$
ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ	$c_{p \text{ air}}$	$1.090 \text{ kJ/kgK}$
kinematic viscosity ของอากาศ	$\nu$	$78.792 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s})$
Prandtl number ของอากาศ	$Pr$	0.704
Thermal conductivity ของอากาศ	$k_{air}$	$55.58 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$
thermal diffusivity ของอากาศ	$\alpha_{air}$	$112.113 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
ค่าสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงปริมาตรของอากาศ	$\beta$	$1.3086 \times 10^{-3} 1/\text{K}$



\*ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศที่ใช้ในการคำนวณถูกพิจารณาที่ film temperature ( $T_f$ ) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิตั้งต้นที่ผิวของ billet ( $950^{\circ}\text{C}$ ) กับ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ( $32^{\circ}\text{C}$ ) โดย  $T_f = \frac{950+32}{2} = 491^{\circ}\text{C} = 764.15\text{ K}$  และความดันอากาศเท่ากับ 1 บรรยากาศ

ตารางที่ 4.3 ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของฉนวนกันความร้อนที่ใช้ในแบบจำลอง

ค่าคุณสมบัติของสาร	สัญลักษณ์	ค่า
Thermal conductivity ของแผ่นฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	$k_{cer}$	0.11 W/m K
Thermal conductivity ของแผ่น stainless steel	$k_{st}$	20 W/m K
ความหนาของแผ่นฉนวนเซรามิกไฟเบอร์	$L_{cer}$	0.5 – 5 inch
ความหนาของแผ่น stainless steel	$L_{st}$	0.001 m
Emissivity ของ stainless steel	$\varepsilon$	0.60
ระยะห่างระหว่างผิว billet ถึงฉนวนกันความร้อนด้านใน	$L_{gap}$	2 inch

โดยภายในงานวิจัยนี้เลือกพิจารณาว่า billet ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแนวตามยาวหรือแนวการเคลื่อนที่ จึงพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของ billet ในสองมิติหรือในแนวหน้าตัดของ billet เท่านั้น ซึ่ง billet ในแบบจำลองจะถูกพิจารณาว่ามีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจะแตกต่างกันในแต่ละกรณี โดยจะถูกแสดงในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 ต่อไป

ภายในงานวิจัยนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของ billet ที่ถูกนำมาพิจารณาได้แก่ การพาความร้อนเนื่องจากอากาศโดยรอบ billet การแผ่รังสีความร้อนที่พื้นผิวของ billet และการนำความร้อนของแต่ละตำแหน่งภายใน billet ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะถูกนำมาพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตของ billet (boundary condition) เพื่อใช้ในการสร้างระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในการคำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิ billet

ในระหว่างการลำเลียงนั้น เงื่อนไขขอบเขตของ billet ที่ถูกพิจารณาในแบบจำลองจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาซึ่งจะแสดงในรูปของ thermal fluxes ( $\dot{q}_{loss}$ ) โดยค่านี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ถูกพิจารณาและอุณหภูมิที่ตำแหน่งนั้น ๆ thermal fluxes ( $\dot{q}_{loss}$ ) จะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่

การพาความร้อนแบบบังคับในขณะที่ billet เคลื่อนที่ ซึ่งอ้างอิงจาก [5] :

$$\dot{q}_{loss} = h_{force}(T_s - T_\infty) , \quad (4.1)$$

$$h_{force} = \frac{k}{L} 0.664 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, \quad Re_L = \frac{vL}{\nu} \quad (4.2)$$

การพาความร้อนแบบอิสระในขณะที่ billet อยู่นิ่งแสดงดังสมการ :

$$\dot{q}_{loss} = h_{free}(T_s - T_\infty) \quad (4.3)$$

การแผ่รังสีความร้อน อ้างอิงจาก Stefan-Boltzmann law :

$$\dot{q}_{loss} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (4.4)$$

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

$$\dot{q}_{loss} = h_{rad}(T_s - T_{sur}) \quad (4.5)$$

โดยที่

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (4.6)$$

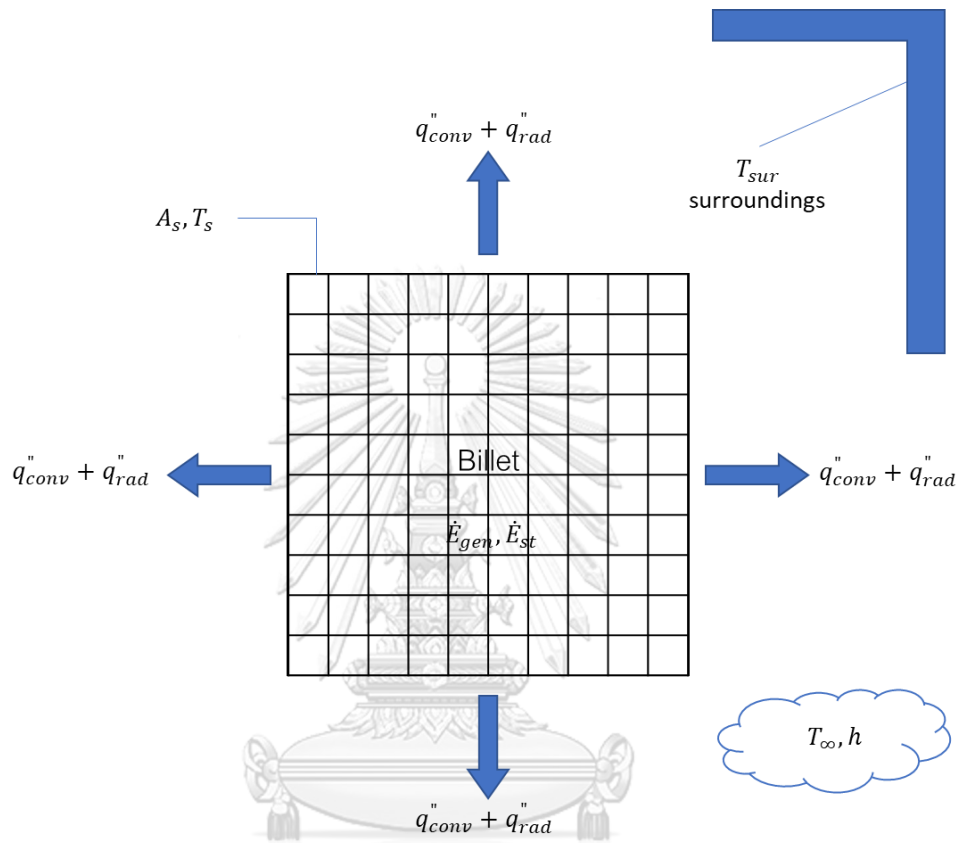
ซึ่ง  $h_{rad}$  จะถูกคำนวณด้วยวิธีการ Lag coefficient โดยจะใช้  $T_s$  ที่เวลาก่อนหน้าที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลอง \*  $T_{sur} = T_\infty$

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

$$\dot{q}_{loss} = h_{total}(T_s - T_\infty); \quad (4.7)$$

$$\text{โดยที่ } h_{total} = h_{conv} + h_{rad} \text{ และ } h_{conv} = h_{force} + h_{free} \quad (4.8)$$

#### 4.2 การถ่ายเทความร้อนของ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง



รูปที่ 4.2 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

จากการถ่ายเทความร้อนของ Billet ดังรูปที่ 4.2 สามารถเขียนเป็นสมการสมดุลพลังงานที่แต่ละตำแหน่งบน billet ได้เป็น

$$\dot{E}_{gen} + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (4.9)$$

โดยที่  $\dot{E}_{gen}$  คือ พลังงานที่สร้างขึ้นภายใน billet ซึ่งในกรณีนี้จะมีค่าเป็น ศูนย์

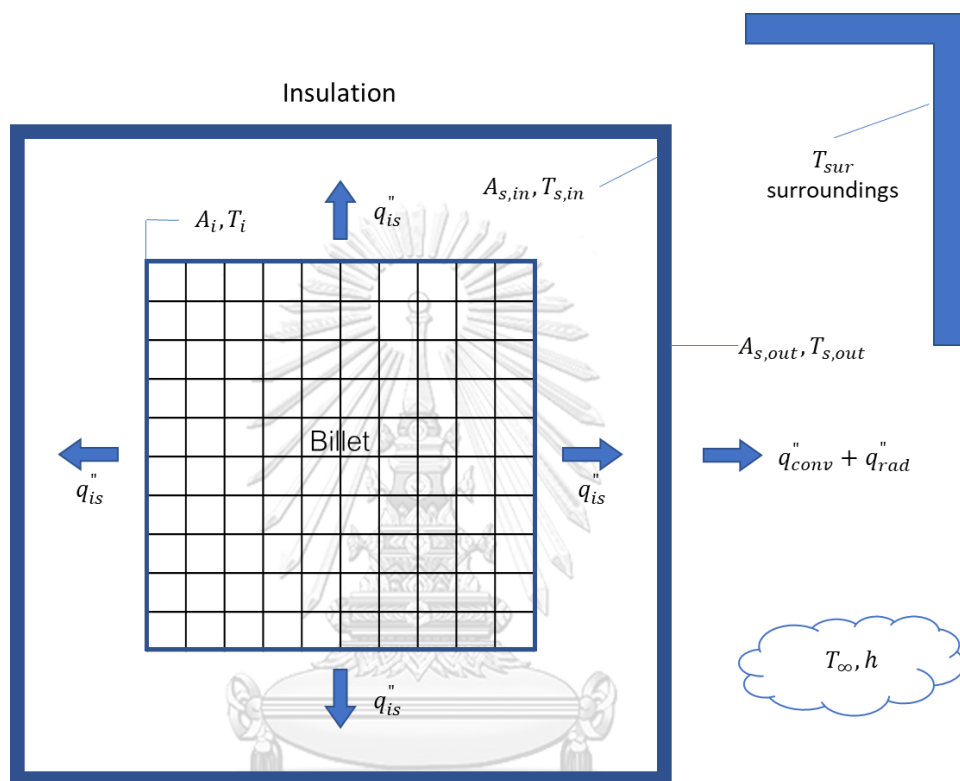
$\dot{E}_{in}$  คือ พลังงานจากการนำความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ billet

$\dot{E}_{out}$  คือ พลังงานจากการนำความร้อนที่ถ่ายเทออกจาก billet ซึ่งในกรณีนี้คือค่า  $\dot{q}_{loss}$

$\dot{E}_{st}$  คือ พลังงานที่กักเก็บอยู่ภายใน billet

ซึ่งสมการ (4.9) จะถูกนำไปพิจารณาแยกที่แต่ละตำแหน่งบน billet ต่อไป

#### 4.3 การถ่ายเทความร้อนของ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง



รูปที่ 4.3 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

โดยในกรณีนี้จะสามารถเขียนสมการสมดุลความร้อนที่แต่ละตำแหน่งบน billet ได้ดังสมการที่ (4.9) เหมือนกับในกรณีที่ไม่มีความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

แต่จะมีความแตกต่างกันที่  $\dot{q}_{loss}$  ที่ใช้คำนวณภายในสมการ

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

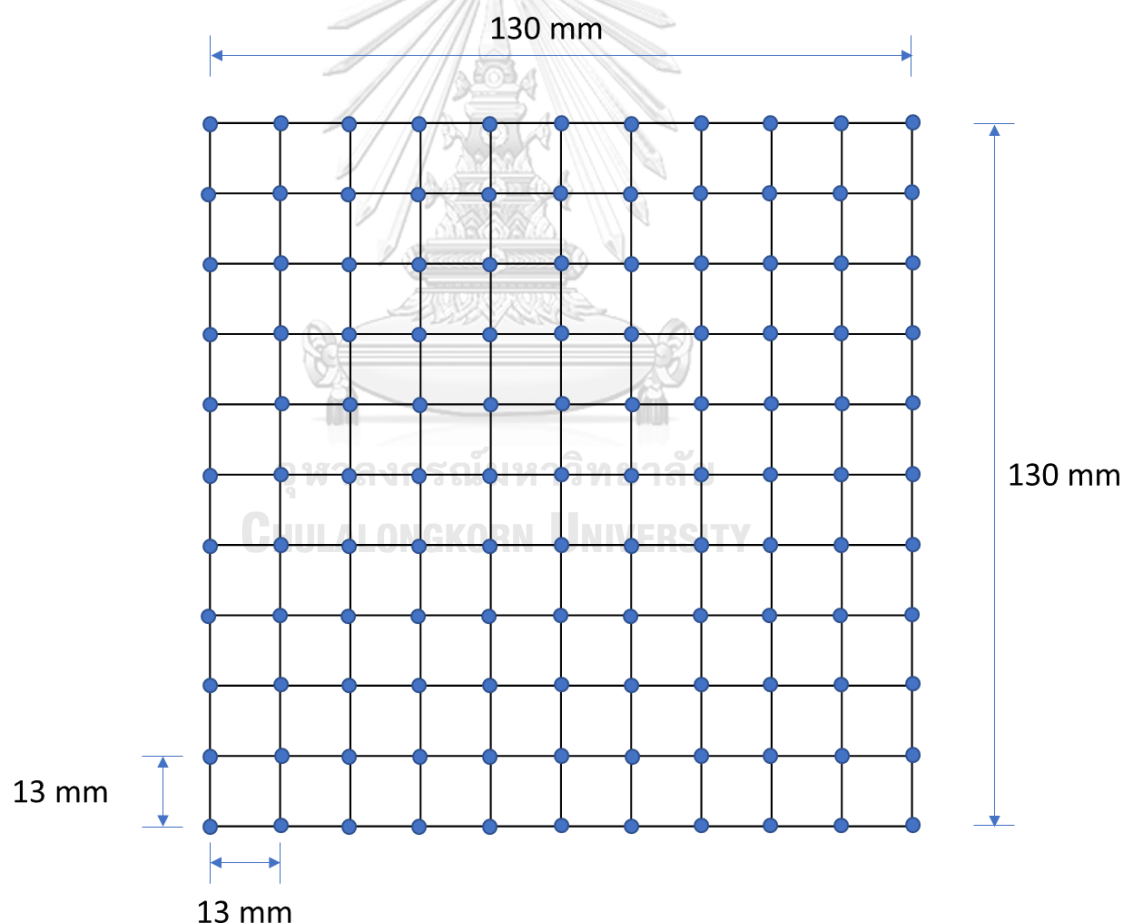
ซึ่งค่า  $h_{effective}$  นั้นจะเกิดจากการคำนวณการถ่ายเทความร้อนรวมทั้งที่ผิว billet ไปสู่ฉนวนกันความร้อน และการถ่ายเทความร้อนจากฉนวนกันความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งจะถูกละเอินอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 6.3

## บทที่ 5

### การประมาณเชิงไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของสมการความร้อน

#### 5.1 การสร้างกริดของ billet ที่ใช้ในการคำนวณ

เนื่องจาก billet ถูกพิจารณาในแนวหน้าตัดสองมิติ ดังนั้น แบบจำลองไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (implicit method) ในสองมิติจึงถูกนำมาใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของ billet ซึ่งหน้าตัดของ billet ขนาด 130 มิลลิเมตร x 130 มิลลิเมตร จะถูกแบ่งเป็นกริดสี่เหลี่ยมขนาด 13 มิลลิเมตร x 13 มิลลิเมตร จำนวน 100 กริดดังแสดงในรูปที่ 5.1 เพื่อทำการ discretize สมการการถ่ายเทความร้อนในแต่ละจุดต่อไป



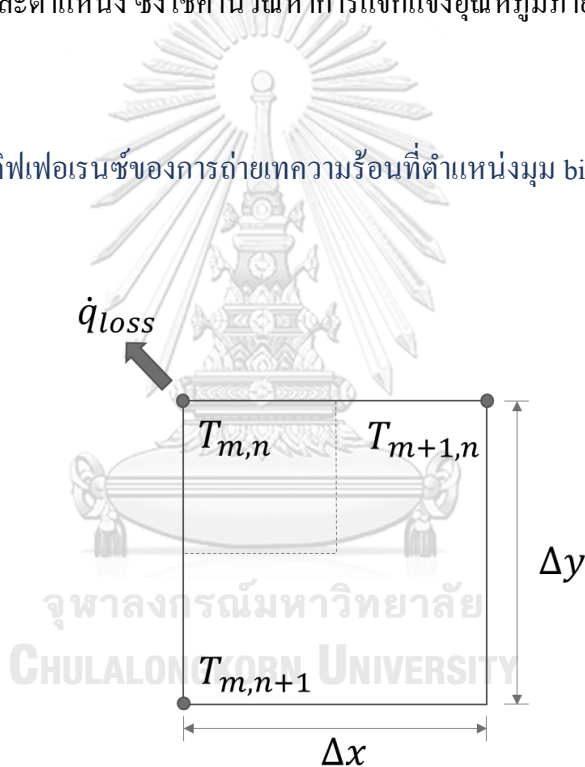
รูปที่ 5.1 ขนาดกริดที่ถูกแบ่งบนหน้าตัดของ billet ในแบบจำลอง

โดยการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของ billet จะถูกพิจารณาจากสมดุลพลังงานของแต่ละจุดที่แสดงในรูปที่ 5.1 ทั้งหมด 121 จุด เพื่อคำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิ billet หรือ อุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet

## 5.2 การสร้างระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

จากแบบจำลองของ billet และเงื่อนไขขอบเขตที่กล่าวไปข้างต้น สมการการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละตำแหน่งจะถูกพิจารณา และจัดรูปใหม่เพื่อสร้างระบบสมการที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่ง ซึ่งใช้คำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ต่อไป

### 5.2.1 สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งมุม billet มุมซ้ายบน



รูปที่ 5.2 แบบจำลองที่ตำแหน่งมุมซ้ายบนของ billet

เขียนสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ได้ดังนี้

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

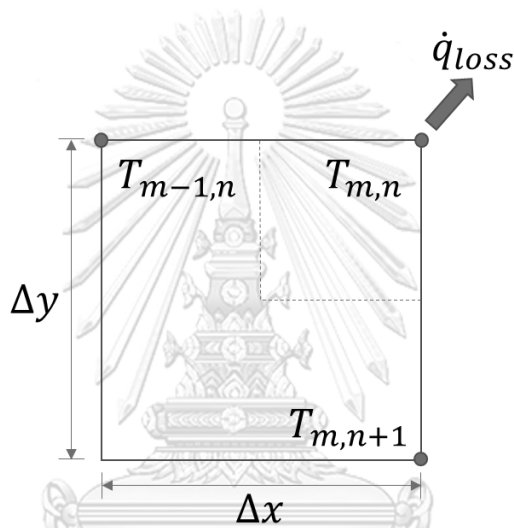
จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

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

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

มุมขวามบน



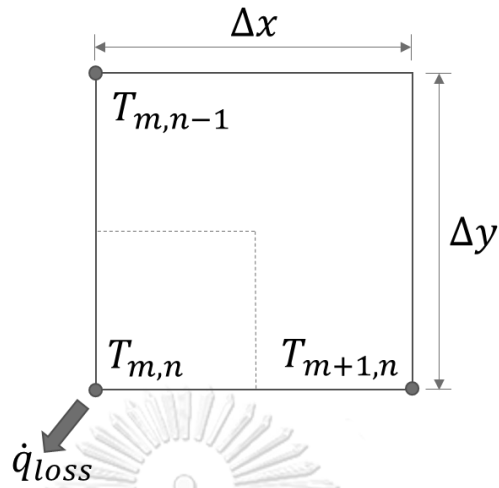
รูปที่ 5.3 แบบจำลองที่ตำแหน่งมุมขวามบนของ billet

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดรูปสมการด้วยแนวทางเดิมจะได้สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ดังนี้

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

มุมซ้ายล่าง

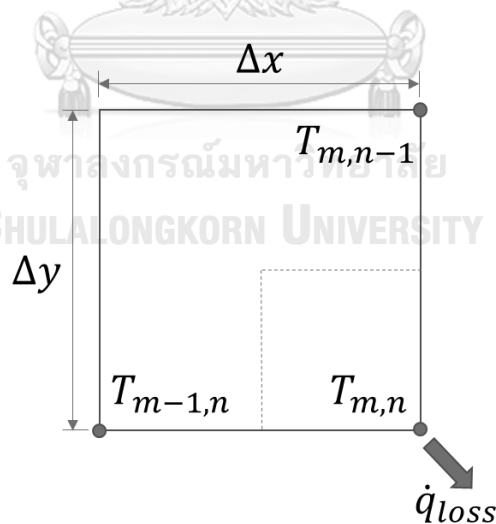


รูปที่ 5.4 แบบจำลองที่ตำแหน่งมุมซ้ายล่างของ billet

จัดรูปสมการด้วยแนวทางเดิมจะได้สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ดังนี้

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

มุมขวาล่าง



รูปที่ 5.5 แบบจำลองที่ตำแหน่งมุมขวาล่างของ billet

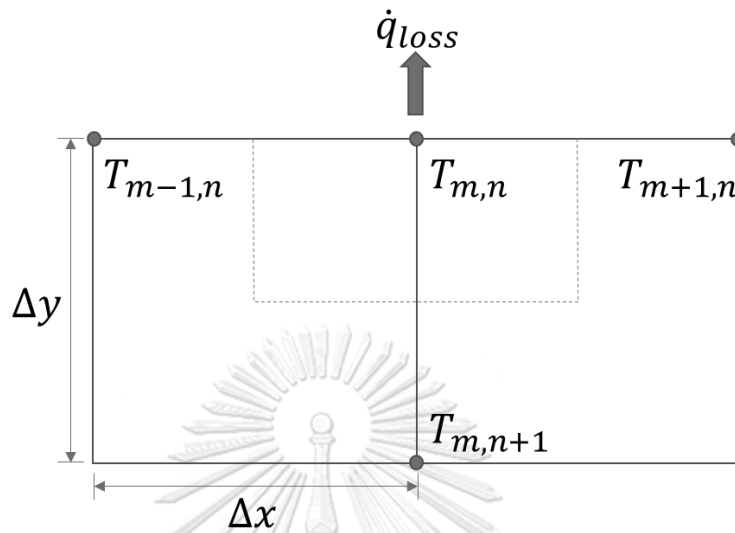
จัดรูปสมการด้วยแนวทางเดิมจะได้สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ดังนี้

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



### 5.2.2 สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งขอบ billet

ขอบบน



รูปที่ 5.6 แบบจำลองที่ตำแหน่งขอบบนของ billet

เขียนสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ได้ดังนี้

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

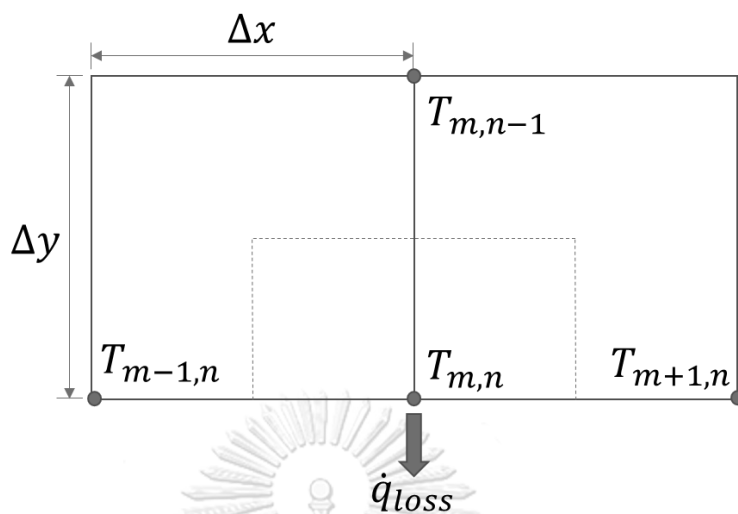
จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

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

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

ขอบล่าง

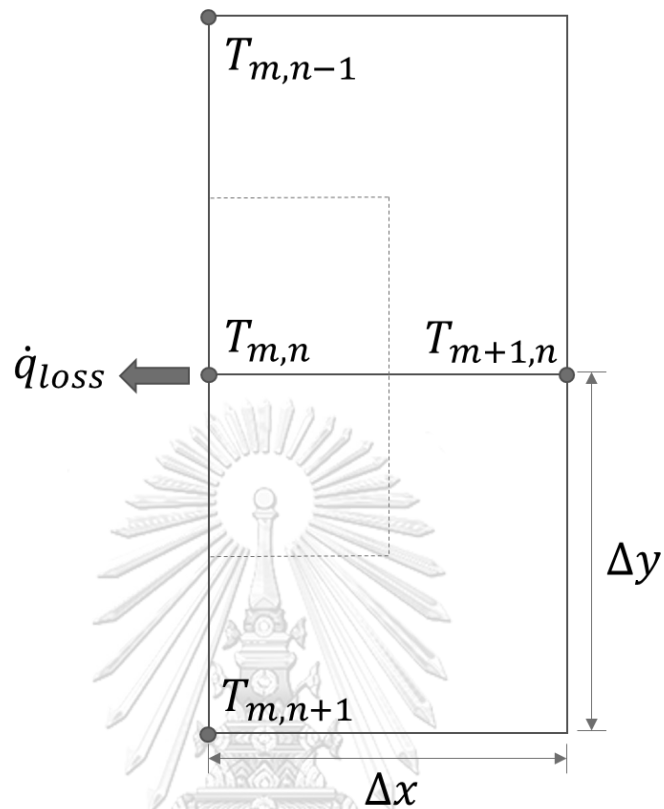


รูปที่ 5.7 แบบจำลองที่ตำแหน่งขอบล่างของ billet

จัดรูปสมการด้วยแนวทางเดิมจะได้สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ดังนี้

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

ขอบซ้าย

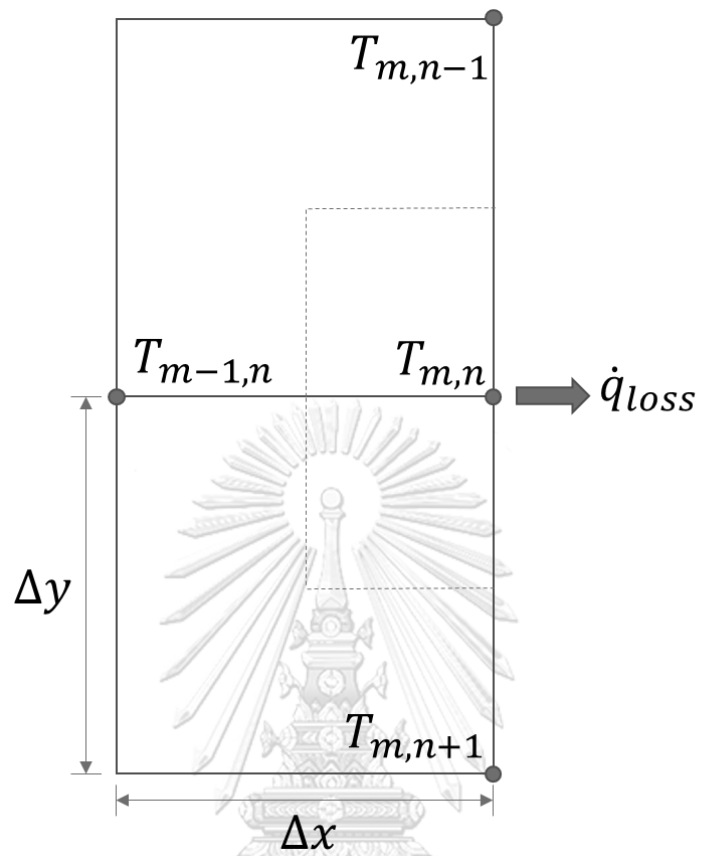


รูปที่ 5.8 แบบจำลองที่ตำแหน่งขอบซ้ายของ billet

จัดรูปสมการด้วยแนวทางเดิมจะได้สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ดังนี้

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

ขอบขวา

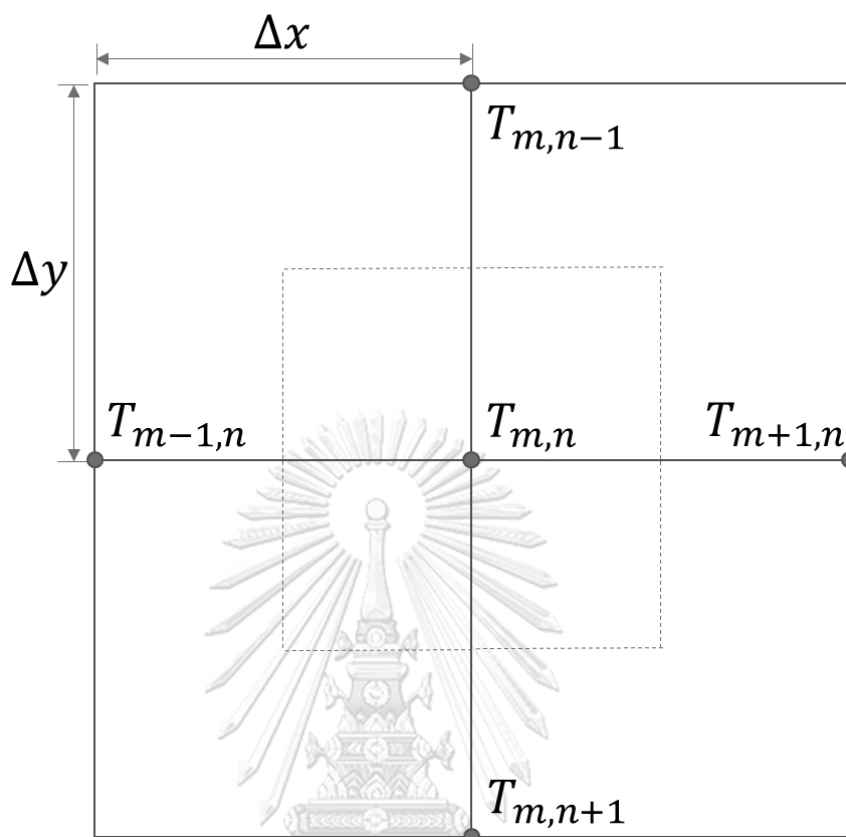


รูปที่ 5.9 แบบจำลองที่ตำแหน่งขอบขวาของ billet

จัดรูปสมการด้วยแนวทางเดิมจะได้สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ดังนี้

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

### 5.2.3 สมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งภายใน billet



รูปที่ 5.10 แบบจำลองที่ตำแหน่งภายในของ billet

เขียนสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ได้ดังนี้

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

จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

$$T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p = Fo(T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + Fo(T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + Fo(T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + Fo(T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1})$$

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

## บทที่ 6

### วิธีการหาคำตอบเชิงตัวเลขของระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

#### 6.1 การกำหนดรูปแบบสมการเมทริกซ์ที่ใช้ในการหาคำตอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเขียนโค้ดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผ่าน MATLAB R2018a เพื่อแก้ระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ของแต่ละตำแหน่งภายใน billet ซึ่งมีทั้งหมด 121 จุด ซึ่งก็คือระบบสมการ 121 สมการ 121 ตัวแปร โดยระบบสมการของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งที่เวลา P+1 จะถูกแก้โดยอาศัยข้อมูลอุณหภูมิที่เวลาก่อนหน้า หรือ P ซึ่งสามารถเขียนระบบสมการให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$[A][B] = [C]$$

โดยที่  $[A]$  คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่เวลา P+1 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ; ขนาด  $[121 * 121]$

$[B]$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ billet ที่เวลา P+1 ทั้ง 121 ตำแหน่ง ; ขนาด  $[121 * 1]$

$[C]$  คือ เวกเตอร์ของตัวแปรอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของ billet ที่เวลา P รวมกับค่าคงที่ต่าง ๆ ภายในสมการ ; ขนาด  $[121 * 1]$

ซึ่ง เวกเตอร์  $[B]$  คือคำตอบของระบบสมการที่เวลาต่าง ๆ ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถแก้สมการที่เวลา P+1 ได้จึงจำเป็นต้องกำหนดข้อมูลอุณหภูมิตั้งต้นของ billet (initial condition) ก่อน โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ billet มีอุณหภูมิตั้งต้นที่ 950 องศาเซลเซียสในทุกตำแหน่งภายใน billet ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เฉลี่ยได้จากการวัดอุณหภูมิของ billet ที่เพิ่งออกมาจากเครื่อง Continuous Casting Machine ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนก่อนที่จะถูกส่งลำเลียงไปตามระบบขนส่ง

##### 6.1.1 ค่าคงที่และค่าคุณสมบัติของสารที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 6.1 ค่าคงที่ต่าง ๆ ภายในแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

ค่าคงที่	ตัวแปร	ค่า
Time step	$\Delta t$	1 s
อุณหภูมิอากาศแวดล้อม	$T_s$	305.15 K
อุณหภูมิตั้งต้นที่ผิวของ billet	$T_{surf}$	1223.15 K
Stefan-Boltzmann constant	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

ตารางที่ 6.2 ค่าคงที่ต่าง ๆ ในแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณ

ค่าคงที่	ตัวแปร	ค่า
Thermal diffusivity ของ billet	$\alpha$	$5.1939 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Finite difference form of Fourier number	$Fo$	0.03073
สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$h_{conv}$	<p>ในกรณีที่ไม่มีย่านกันความร้อนครอบ ระหว่างการลำเลียง</p> $h_{conv} = -9.71830 \times 10^{-16} T^6 + 4.78142 \times 10^{-12} T^5 - 9.59515 \times 10^{-9} T^4 + 1.00518 \times 10^{-5} T^3 - 0.00581 T^2 + 1.76543 T - 204.902 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$ <p>ในกรณีที่มีมีย่านกันความร้อนครอบ ระหว่างการลำเลียง</p> $h_{conv} = -4.82258 \times 10^{-16} T^6 + 2.37098 \times 10^{-12} T^5 - 4.75369 \times 10^{-9} T^4 + 4.97426 \times 10^{-6} T^3 - 0.002871 T^2 + 0.87062 T - 101.90 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$

\*หมายเหตุ รายละเอียดการคำนวณสมการสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่อุณหภูมิผิวต่าง ๆ ของ billet จะถูกแสดงในภาคผนวก ข.1

## 6.2 การหาคำตอบเชิงตัวเลขของระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในกรณีที่ไม่มีฉนวน กันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบเชิงตัวเลขจะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้







รูปที่ 6.1 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของระบบสมการของการแจกแจงอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet

หลังจากได้ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลา 1 ถึง 3600 วินาทีของการลำเลียงจากโปรแกรมคำนวณแล้ว ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ที่เวลาต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียง รวมถึงการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน กับพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมด

โดยพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากการพาความร้อนเกิดจากผลรวมของการพาความร้อนที่ตำแหน่งผิว billet กับอากาศแวดล้อมซึ่งจะคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{conv} = \sum h_{conv}(T_s - T_{\infty}) \quad (6.1)$$

โดยที่  $h_{conv} = h_{force} + h_{free}$

พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อนเกิดจากผลรวมของการแผ่รังสีความร้อนที่ตำแหน่งผิว billet กับพื้นผิวแวดล้อมซึ่งจะคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{rad} = \sum \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (6.2)$$

และพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมดจะคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{q}_{total} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} \quad (6.3)$$

นอกจากนี้ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ยังถูกนำไปใช้ในการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียง เป็นระยะเวลาต่าง ๆ

เนื่องจากภายในกระบวนการผลิตเหล็ก billet ที่ออกจาก Continuous Casting Machine จะถูกลำเลียงไปสู่ reheating furnace เพื่อทำการอุ่น billet ให้มีอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสก่อนส่งไปสู่กระบวนการรีดขึ้นรูปต่อไป โดยพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ถือเป็นต้นทุนส่วนสำคัญในกระบวนการผลิต ดังนั้นการลดพลังงานในส่วนนี้จึงเป็นสิ่งสำคัญต่อกระบวนการผลิต

โดยพลังงานที่สามารถประหยัดได้จะถูกคำนวณจากพลังงานสูงสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการอุ่น billet ลบด้วยพลังงานที่ใช้จริงในการอุ่น billet ที่ผ่านการลำเลียงมาเป็นเวลาต่าง ๆ ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้พลังงานสูงสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการอุ่น billet คำนวณจากพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet เย็นจากอุณหภูมิอ้างอิงหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 32 องศาเซลเซียสไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 6.2

พลังงานเหล่านี้จะถูกคำนวณจากสมการผลต่างของพลังงานความร้อนภายใน billet ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังสมการที่ (6.4)

$$q = \rho V c_p \Delta T \quad (6.4)$$

โดยที่  $\rho$  คือความหนาแน่นของ billet

$V$  คือ ปริมาตรของ billet

$c_p$  คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของ billet

และ  $\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่ต้องการพิจารณาในหน่วยองศาเซลเซียส

ดังนั้น พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ไปที่ 1250 องศาเซลเซียส จะสามารถคำนวณได้จากสมการ (6.5)

$$q_{req,hot\ charge} = \rho V c_p (1250 - T) \quad (6.5)$$

พลังงานความร้อนสูงสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการอุ่น billet จะสามารถคำนวณได้จากสมการ (6.6)

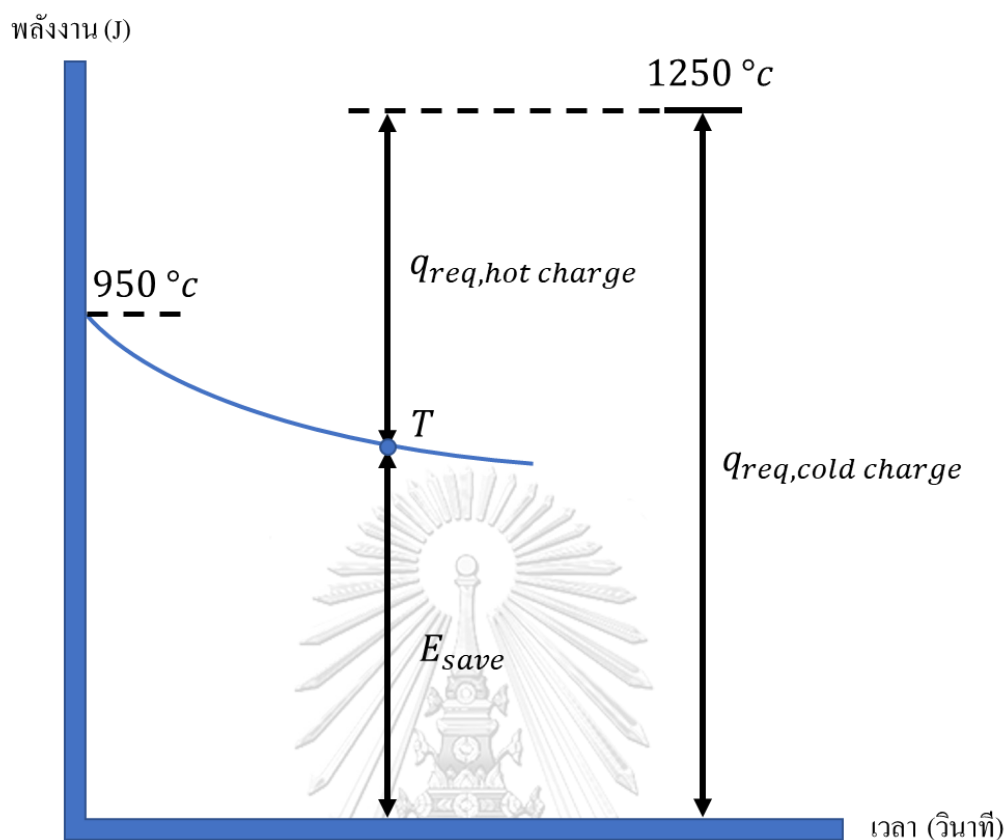
$$q_{req,cold\ charge} = \rho V c_p (1250 - 32) \quad (6.6)$$

เพราะฉะนั้นพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ จะสามารถคำนวณได้จากสมการ (6.7) หรือ (6.8)

$$E_{save} = q_{req,cold\ charge} - q_{req,hot\ charge} \quad (6.7)$$

หรือ

$$E_{save} = \rho V c_p (T - 32) \quad (6.8)$$



รูปที่ 6.2 แผนภาพแสดงการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ที่ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ไปที่ 1250 องศาเซลเซียส และพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 6.3 การหาคำตอบเชิงตัวเลขของระบบสมการ ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

จากหัวข้อที่ 4.3 จะเห็นว่าในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียงจะมีระบบของสิ่งแวดล้อมที่ซับซ้อนกว่าในกรณีที่ไม่มีจำนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับรูปแบบของสมการที่สภาวะขอบให้อยู่ในรูปที่สอดคล้องกันดังสมการที่ 4.7 โดยในส่วนของ  $h_{total}$  ในกรณีนี้จะอยู่ในรูปของ  $h_{effective}$  แทน โดยจะมีขั้นตอนในการคำนวณค่า  $h_{effective}$  ดังนี้

### 6.3.1 การพิจารณาระบบการถ่ายเทความร้อนในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียงเพื่อคำนวณค่า $h_{\text{effective}}$

ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง เพื่อให้สามารถพิจารณาการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ไปสู่สิ่งแวดล้อมร้อนสุทธิ หรือ  $h_{\text{effective}}$  ได้ จึงมีการกำหนดสมมติฐานขึ้นได้แก่

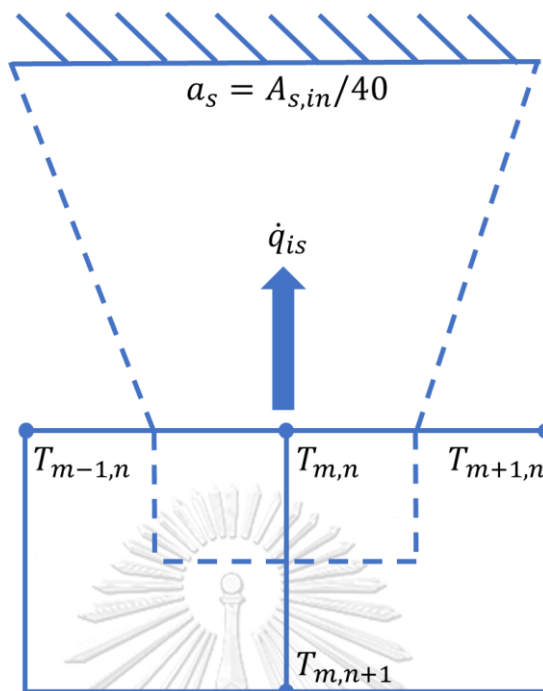
1. ที่แต่ละตำแหน่งที่ผิวของ billet จะถูกพิจารณาว่ามีการแผ่รังสีความร้อนไปสู่ผิวด้านในของฉนวนเท่านั้น ไม่มีการพิจารณาถึงผลของการพาความร้อนภายในรางขนส่งที่ถูกครอบด้วยฉนวน

2. เนื่องจากระยะห่างระหว่างพื้นผิว billet กับฉนวนกันความร้อนด้านในมีค่าน้อยจึงพิจารณาให้พื้นผิว billet มีการแผ่รังสีความร้อนกับพื้นผิวในแนวตั้งฉากที่อยู่ใกล้หรือมีค่าเท่ากับพื้นผิวของฉนวนด้านในเฉพาะของแต่ละตำแหน่งเท่านั้น จะไม่มีการแผ่รังสีความร้อนกับพื้นผิวเฉพาะของตำแหน่งอื่น ๆ บนผิว billet โดยที่พื้นผิวเฉพาะของแต่ละตำแหน่งบนผิว billet จะมีขนาดเท่ากันซึ่งจะมีขนาดเท่ากับพื้นผิวด้านในของฉนวนทั้งหมดหารด้วยจำนวนตำแหน่งที่ผิวของ billet ซึ่งในแบบจำลองนี้กำหนดให้มีทั้งหมด 40 ตำแหน่ง รวมถึงจะไม่มีการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว billet ของแต่ละตำแหน่งกันเองโดยจะมีตัวอย่างแผนภาพการถ่ายเทความร้อนดังแสดงในรูปที่ 6.3

3. กำหนดให้อุณหภูมิของฉนวนกันความร้อนที่ผิวด้านในและด้านนอกมีมีความสม่ำเสมอในทุกตำแหน่งในทิศทางรอบ billet แต่สามารถแปรเปลี่ยนได้ในทิศทางตั้งฉากกับผิว billet และแปรเปลี่ยนได้ตามเวลา

4. การถ่ายเทความร้อนที่ฉนวนกันความร้อนจะถูกพิจารณาเป็นแบบ quasi-steady หรือจะไม่มีความร้อนสะสมภายในฉนวนกันความร้อน

5. พื้นผิวของฉนวนกันความร้อนด้านนอกจะถูกพิจารณาว่ามีการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนแบบอิสระและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น



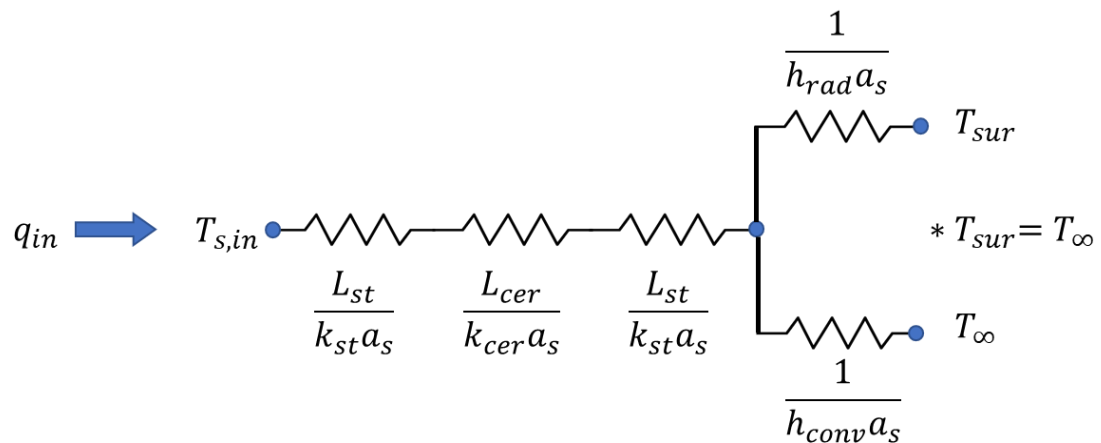
รูปที่ 6.3 ตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อนที่แต่ละตำแหน่งบนผิว billet ถ่ายทอดไปสู่พื้นผิวด้านในของ ฉนวนกันความร้อนเฉพาะของตำแหน่งตัวเอง

ซึ่งจะพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนที่แต่ละตำแหน่งบนผิว billet ถ่ายเทไปสู่พื้นผิวเฉพาะด้านในของฉนวน ( $q_{is}$ ) จะถูกพิจารณาเป็นการแผ่รังสีความร้อนระหว่างสองพื้นที่ปิดล้อมในหัวข้อที่ 3.4.3 โดยจะมีค่าเท่ากับ

$$q_{is} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_s^4)}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{is}} + \frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s a_s}} \quad (6.9)$$

ทำการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากตำแหน่งผิวด้านในของฉนวนกันความร้อนเฉพาะผ่านฉนวนกันความร้อนจนไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งส่วนของฉนวนกันความร้อนจะถูกพิจารณาให้มีขนาดเท่ากับพื้นผิวด้านในเฉพาะของแต่ละตำแหน่งบนผิว billet

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปวงจรรของการถ่ายเทความร้อนได้ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 วงจรการถ่ายเทความร้อนจากตำแหน่งผิวด้านในของฉนวนกันความร้อนเฉพาะผ่านฉนวนกันความร้อนจนไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอก

โดยพลังงานความร้อนที่ถูกถ่ายเทไปตามวงจรจะมีค่าดังสมการที่ (6.10)

$$q_{in} = \frac{T_{s,in} - T_{\infty}}{R_{total}} \quad (6.10)$$

โดยที่  $R_{total} = \frac{L_{st}}{k_{st}a_s} + \frac{L_{cer}}{k_{cer}a_s} + \frac{L_{st}}{k_{st}a_s} + (a_s h_{conv} + a_s h_{rad})^{-1}$  จากรูปที่ 6.4

จากสมดุลความร้อนที่ผิวด้านในของฉนวนจะได้ว่าพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนที่แต่ละตำแหน่งบนผิว billet ถ่ายเทไปสู่พื้นผิวเฉพาะด้านในของฉนวน ( $q_{is}$ ) จะต้องมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่ถูกถ่ายเทภายในวงจรของการถ่ายเทความร้อน ( $q_{in}$ ) ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ (6.11)

$$q_{in} = q_{is} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_{s,in}^4)}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{is}} + \frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s a_s}} \quad (6.11)$$

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$q_{in} = \frac{\sigma(T_i^2 + T_{s,in}^2)(T_i + T_{s,in})}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{is}} + \frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s a_s}} (T_i - T_{s,in}) \quad (6.12)$$

หรือจัดให้อยู่ในรูปการถ่ายเทความร้อนอย่างง่ายได้เป็น

$$q_{in} = h_t (T_i - T_{s,in}) \quad (6.13)$$

$$\text{โดยที่ } h_t = \frac{\sigma(T_i^2 + T_{s,in}^2)(T_i + T_{s,in})}{\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i} + \frac{1}{A_i F_{is}} + \frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s a_s}}$$

จากสมการที่ (6.10) เขียนให้อยู่ในรูปของ  $T_{s,in}$  ได้เป็น

$$T_{s,in} = q_{in} R_{total} + T_{\infty} \quad (6.14)$$

เช่นเดียวกับการพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนในหัวข้อที่ 4.1 เพื่อให้สอดคล้องกับโปรแกรมคำนวณในช่วงแรกจึงเลือกใช้วิธีการ Lag coefficient ในการคำนวณ  $h_t$  โดยจะใช้ข้อมูล  $T_{s,in}$  ที่เวลาก่อนหน้าที่ได้จากการคำนวณผ่านแบบจำลอง

แทนสมการที่(6.14) ลงในสมการที่(6.13) ได้เป็น

$$q_{in} = h_t(T_i - q_{in} R_{total} - T_{\infty}) \quad (6.15)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$q_{in} + h_t q_{in} R_{total} = h_t(T_i - T_{\infty}) \quad (6.16)$$

$$q_{in}(1 + h_t R_{total}) = h_t(T_i - T_{\infty}) \quad (6.17)$$

$$q_{in} = \frac{h_t}{(1+h_t R_{total})} (T_i - T_{\infty}) \quad (6.18)$$

โดย  $q_{in}$  จะเปรียบเสมือน  $\dot{q}_{loss}$  ในหัวข้อที่ 4.2 ดังนั้นพจน์ของ  $\frac{h_t}{(1+h_t R_{total})}$  ในสมการที่ (6.18) ก็จะเปรียบเสมือนพจน์ของ  $h_{total}$  ในสมการที่ (4.7) ซึ่งก็คือพจน์ของ  $h_{effective}$  ที่ถูกพิจารณาในหัวข้อที่ 4.3 ทำให้ได้ว่า  $h_{effective}$  ในส่วนของแบบจำลองที่มีฉนวนกันความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียงมีค่าดังสมการที่ (6.19)

$$h_{effective} = \frac{h_t}{(1+h_t R_{total})} \quad (6.19)$$

ทำให้ในส่วนของการ discretization ของสมการความร้อนที่แต่ละตำแหน่งบน billet เพื่อสร้างระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่ใช้ในการคำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลาต่างๆ ในกรณีที่มีฉนวนและไม่มีความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียงเหมือนกัน ดังแสดงในหัวข้อที่ 5.2 แต่จะมีความแตกต่างกันที่ ค่า  $h_{total}$  หรือค่า  $h_{effective}$  ที่ใช้ในการคำนวณเท่านั้น



### 6.3.2 การหาอุณหภูมิของพื้นผิวภายในและพื้นผิวภายนอกของฉนวนกันความร้อนที่สอดคล้องกับการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลาต่าง ๆ

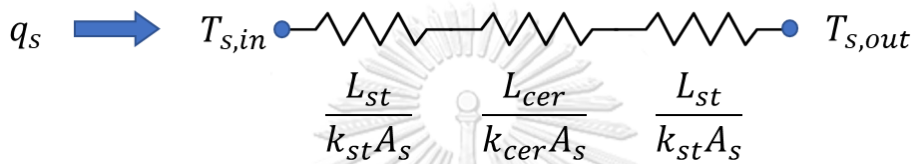
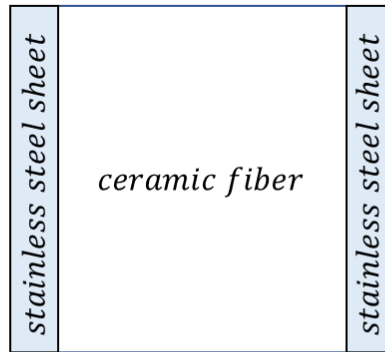
เนื่องจากอุณหภูมิของพื้นผิวภายนอก และพื้นผิวภายในของฉนวนเป็นตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่า ดังนั้นจึงต้องทำการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวภายในของฉนวนที่เวลาตั้งต้น และเวลาต่าง ๆ จากสมการความร้อนในแบบจำลองร่วมกับข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลาตั้งต้น (initial condition) และข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลอง โดย

ในการคำนวณนี้จะพิจารณาจากสมการความร้อนของฉนวนกันความร้อน โดยพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนระหว่างแต่ละตำแหน่งบนผิว billet กับผิวด้านในของฉนวนที่เข้าสู่ฉนวนจะต้องมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่ฉนวนด้านนอกถ่ายเทไปสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งพลังงานความร้อนที่เข้าสู่ฉนวนด้านในจะคำนวณจากการแผ่รังสีความร้อนระหว่างหลายพื้นผิวซึ่งได้แก่พื้นผิวด้านในของฉนวน ( $A_{s,in}$ ) และพื้นผิวของแต่ละตำแหน่งบนผิว billet ( $A_i$ ) ดังรูปที่ 4.3 โดยจะทำการสร้างระบบสมการการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่แต่ละพื้นผิว หรือสมการที่ (3.30) จากนั้นทำการแก้ระบบสมการดังกล่าวเพื่อหาค่า radiosity ที่ผิวด้านในของฉนวน ( $J_s$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่เข้าสู่ผิวด้านในของฉนวน ( $q_s$ ) จากสมการที่ (3.21)

ซึ่งค่าพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่เข้าสู่ผิวด้านในของฉนวน ( $q_s$ ) ที่ได้จะถูกนำไปใช้คำนวณต่อเพื่อหาอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกของฉนวนผ่านสมการความร้อนที่ฉนวนจากสมการ (6.20)

$$T_{s,out} = T_{s,in} - (q_s R_{total}) \quad (6.20)$$

โดยที่  $R_{total}$  คือความต้านทานความร้อนรวมของฉนวนซึ่งคำนวณจากสมการที่ (6.21) ดังแสดงในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 แผนภาพแสดงโครงสร้างและวงจรการถ่ายเทความร้อนของฉนวนที่ใช้ในแบบจำลอง

$$R_{total} = \frac{L_{st}}{k_{st}A_s} + \frac{L_{cer}}{k_{cer}A_s} + \frac{L_{st}}{k_{st}A_s} \quad (6.21)$$

โดยที่  $L_{st}$  คือความหนาของแผ่นสแตนเลสซึ่งในการทดลองนี้กำหนดไว้ที่ 1 มิลลิเมตร

$k_{st}$  คือค่า Thermal conductivity ของแผ่นสแตนเลส

$L_{cer}$  คือความหนาของแผ่นฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

$k_{cer}$  คือค่า Thermal conductivity ของแผ่นฉนวนเซรามิกไฟเบอร์

และ  $A_s = A_{s,in} = A_{s,out}$  คือพื้นที่ผิวของฉนวน โดยในการทำลองนี้จะกำหนดให้มีค่าคงที่หรือเท่ากันทั้งผิวด้านในและผิวด้านนอก

ซึ่งอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกของฉนวน ( $T_{s,out}$ ) จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาพลังงานความร้อนที่ฉนวนด้านนอกถ่ายเทไปสู่สิ่งแวดล้อมต่อไปจากสมการที่ (6.22)

$$q_{out} = q_{rad} + q_{conv} = (A_s \epsilon \sigma (T_{sur}^4 - T_{s,out}^4)) + (A_s h_{conv} (T_{\infty} - T_{s,out})) \quad (6.22)$$

เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวด้านใน และผิวด้านนอกของฉนวนกันความร้อนเป็นค่าที่ยังไม่ทราบค่าทั้งคู่ทำให้ไม่สามารถใช้วิธีการแก้สมการ โดยตรงได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหา โดยจะทำการสมมุติค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านใน ( $T_{s,in}$ ) ตั้งต้นมาก่อน โดยจะให้หมีค่า

เท่ากับอุณหภูมิที่สูงที่สุดบนผิว billet ที่เวลานั้น ๆ ซึ่งเป็นข้อมูลที่เราทราบค่าจากนั้นจะทำการคำนวณค่าพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่เข้าสู่ผิวด้านในของฉนวน ( $q_s$ ) จากการแก้ระบบสมการที่ (3.30) และสมการที่ (3.21) จากนั้นนำค่า  $q_s$  ที่ได้ไปคำนวณหาอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกของฉนวน ( $T_{s,out}$ ) เพื่อใช้ในการคำนวณหาพลังงานความร้อนที่ฉนวนด้านนอกถ่ายเทไปสู่สิ่งแวดล้อม ( $q_{out}$ ) ในสมการที่ (9.3) ต่อไป จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าพลังงานจากการแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่เข้าสู่ผิวด้านในของฉนวน ( $q_s$ ) กับพลังงานความร้อนที่ฉนวนด้านนอกถ่ายเทไปสู่สิ่งแวดล้อม ( $q_{out}$ ) ที่ได้จากการคำนวณ โดยจะทำการปรับลดค่า  $T_{s,in}$  ลงทีละ 0.1 องศาเซลเซียส และคำนวณตามขั้นตอนก่อนหน้าจนกว่าค่า  $q_s$  กับค่า  $q_{out}$  จะมีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งจะทำให้เราได้ค่า  $T_{s,in}$  และ  $T_{s,out}$  ที่เหมาะสมกับอุณหภูมิที่ผิวของ billet ที่เวลานั้น ๆ ซึ่งอุณหภูมิเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ที่เวลาต่อไปเรื่อย ๆ

ในส่วนของการแก้ระบบสมการไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ที่ได้จากการ discretization สมการความร้อนที่แต่ละตำแหน่งบน billet นั้นจะมีขั้นตอนคล้ายกับในรูปที่ 6.1 แต่จะมีการเพิ่มส่วนของการคำนวณอุณหภูมิของพื้นผิวภายใน และพื้นผิวภายนอกของฉนวนกับความร้อนที่สอดคล้องกับการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลาต่าง ๆ ในหัวข้อที่ 6.3.2 เข้ามาในโปรแกรมคำนวณที่แต่ละ time step ด้วย โดยแผนภาพแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในส่วนนี้จะถูกแสดงในรูปที่ 6.6 และรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.6 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิของพื้นผิวภายในและพื้นผิวภายนอกของฉนวนกันความร้อนที่สอดคล้องกับการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 6.7 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการหาคำตอบของระบบ สมการของการแจกแจงอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet

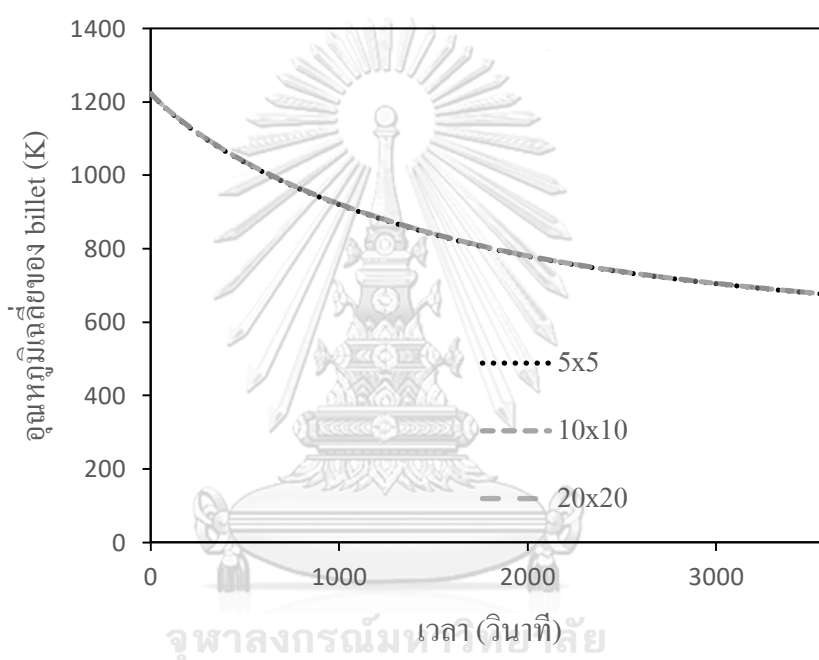
หลังจากได้ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ ครอบคลุมที่เวลา 1 ถึง 3600 วินาทีของการลำเลียง ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียงจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่ไม่มีจำนวนกันความร้อนครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

นอกจากนี้ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียงยังถูกนำไปใช้ในการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 6.2 โดยจะมีวิธีการคำนวณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ (6.5) และพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ดังสมการที่ (6.8)



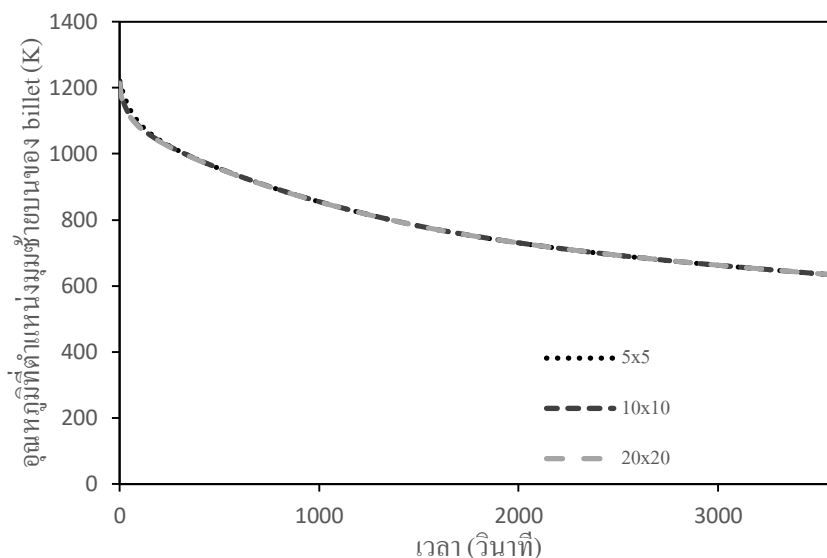
#### 6.4 ผลการหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำลอง

จากการสร้างแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์แตกต่างกันได้แก่ ขนาด 5x5, 10x10 และ 20x20 เซลล์ เพื่อเปรียบเทียบผลการแจกแจงอนุหุมิของเซลล์แต่ละขนาด พบว่าค่าเฉลี่ยของอนุหุมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายใน billet ของแบบจำลองที่แต่ละขนาดเซลล์มีค่าแตกต่างกันน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 6.8 โดยเมื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของอนุหุมิเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 และ 10x10 เทียบกับแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 20x20 พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 0.1793 และ ร้อยละ 0.0229 ตามลำดับ



รูปที่ 6.8 แสดงการเปรียบเทียบอนุหุมิเฉลี่ยของ billet ที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 10x10 และ 20x20

นอกจากนี้จะมีการพิจารณาอนุหุมิที่ตำแหน่งมุมซ้ายบนของ billet ที่เวลาต่าง ๆ ที่ขนาดเซลล์ 5x5, 10x10 และ 20x20 พบว่าอนุหุมิที่ตำแหน่งมุมซ้ายบนที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 และ 10x10 จะมีค่าแตกต่างกับในกรณีที่มีขนาดเซลล์ 20x20 เฉลี่ยที่ร้อยละ 0.1188 และ ร้อยละ 0.0489 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตำแหน่งมุมซ้ายบนของ billet ที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 10x10 และ 20x20

## 6.5 การตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิผิวของ billet และขั้นตอนการสอบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลอง

การเก็บข้อมูลอุณหภูมิผิวของ billet นั้นเป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากจำเป็นต้องทราบค่าอุณหภูมิที่ผิวตั้งต้น เพื่อใช้ในการกำหนดอุณหภูมิที่ผิว billet ตั้งต้นที่จะใช้ในแบบจำลอง (initial condition) รวมถึงค่าอุณหภูมิผิว billet ที่เวลาต่าง ๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองซึ่งใช้ในการสอบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองว่ามีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริงมากน้อยเพียงใด

แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์ และขั้นตอนการเก็บข้อมูลทำให้สามารถทำการตรวจวัดข้อมูลได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้ผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นมีเพียงแค่อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวนอกของ billet เท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้นั้นเป็นข้อมูลอุณหภูมิผิวของ billet หลังจากออกจาก Continuous Casting Machine และถูกนำมาตั้งพักอยู่หนึ่งๆ

### 6.5.1 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้การตรวจวัด

อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของ billet ( $T_s$ ) จะทำการอ่านค่าที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยจะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก ๆ 1 นาที เป็นเวลา 60 นาที รวมทั้งสิ้น 60 ข้อมูล ไม่รวมอุณหภูมิตั้งต้น



อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมในระหว่างการตรวจวัด ( $T_{\infty}$ ) จะทำการอ่านค่าจากเทอร์โมมิเตอร์ภายในโรงงาน

ซึ่งข้อมูลดังกล่าวจะถูกแสดงในภาคผนวก ก

### 6.5.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัด

กล้องถ่ายภาพความร้อนที่ใช้ในการเก็บข้อมูลคือ ยี่ห้อ FLIR รุ่น P640 มีช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ -40 ถึง +2000 องศาเซลเซียส และมีค่า accuracy อยู่ที่  $\pm 2$  องศาเซลเซียสหรือ ร้อยละ 2 ของค่าที่อ่านได้ ซึ่งควรมีอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมขณะใช้งานในช่วง -15 ถึง 50 องศาเซลเซียสและสามารถกำหนดค่าคงที่ปรับแก้เพื่อให้ได้ค่าอุณหภูมิที่แม่นยำขึ้น เช่น ค่า Emissivity และค่าอุณหภูมิแวดล้อม เป็นต้น



รูปที่ 6.10 กล้องถ่ายภาพความร้อน FLIR รุ่น P640 ที่ใช้ในการตรวจวัด

### 6.5.3 การสอบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลจากการตรวจวัด

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นเป็นข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของแท่งเหล็กที่ถูกตั้งพักอยู่นิ่ง ๆ ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงนั้นจึงต้องถูกพิจารณาที่สภาวะเดียวกัน คือสภาวะที่มีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบอิสระกับการแผ่รังสีความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิจากแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบจะคำนวณจากค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวนอกของ billet เท่านั้น ไม่รวมที่ตำแหน่งภายในของ billet โดยในการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยจะคำนวณจากค่าเฉลี่ยของค่าผลต่างสัมบูรณ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่ได้จากแบบจำลองกับอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากการตรวจวัดที่เวลาต่าง ๆ ทุก ๆ 1 นาที

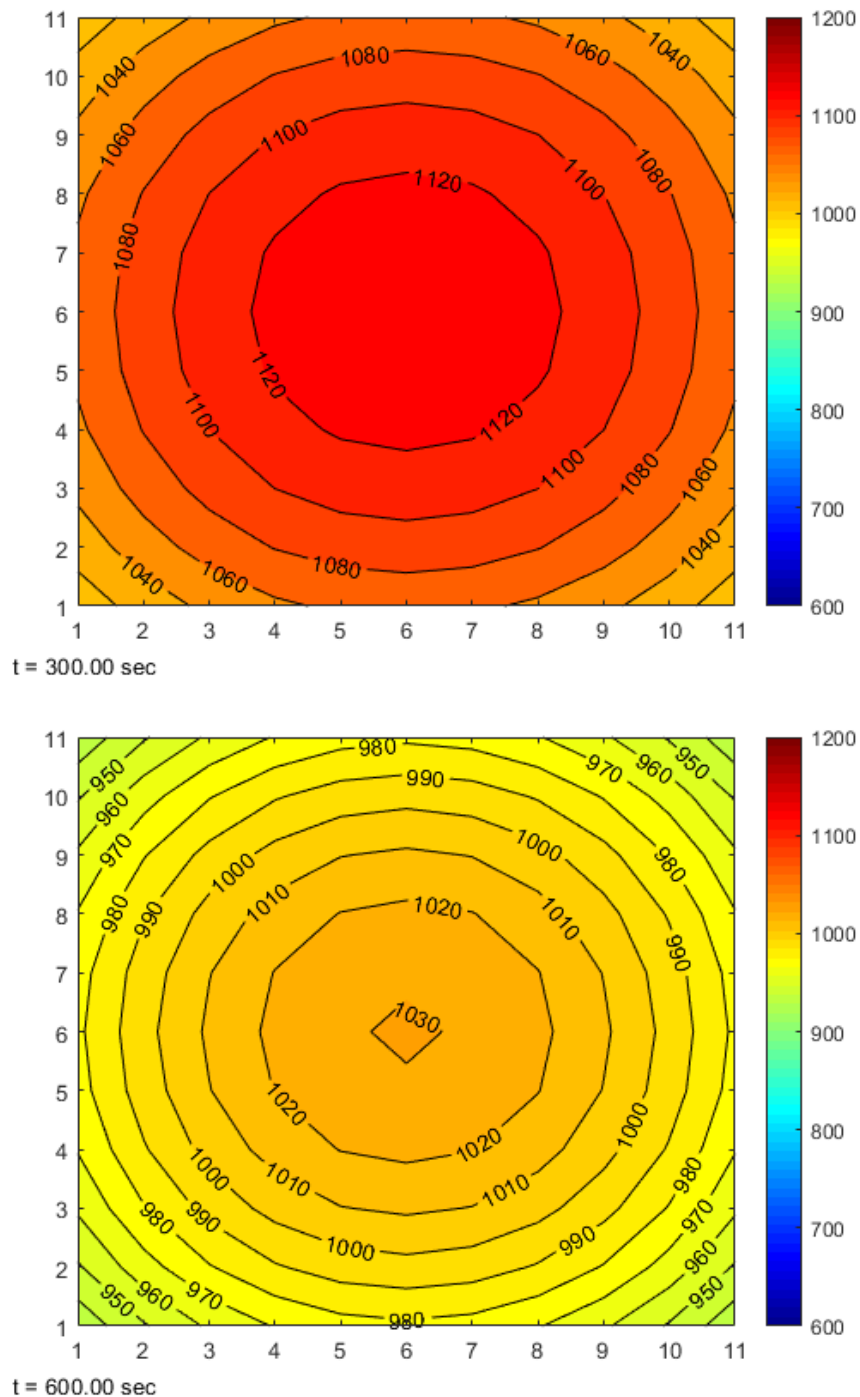
## บทที่ 7

### ผลการดำเนินการและการวิเคราะห์ผล

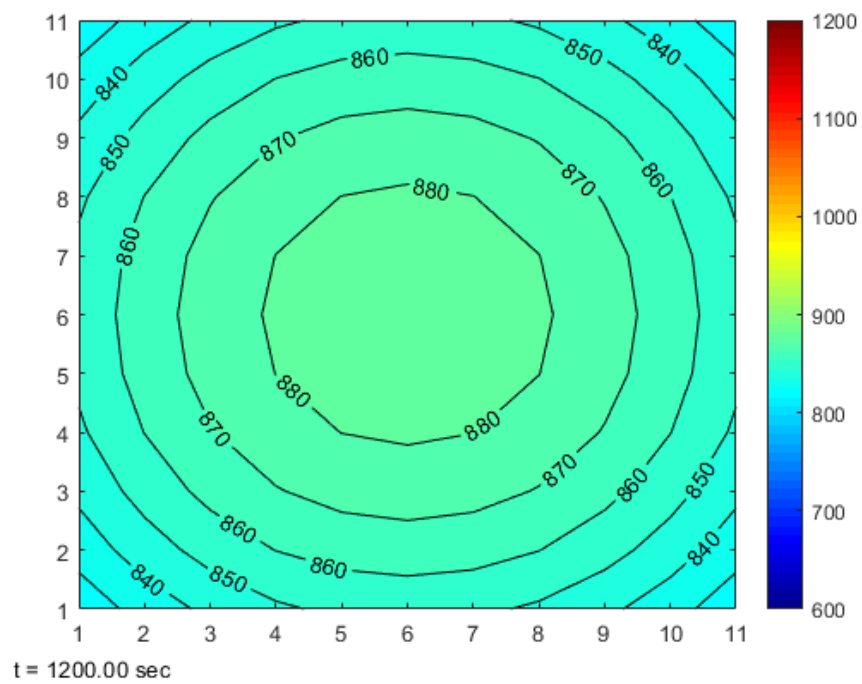
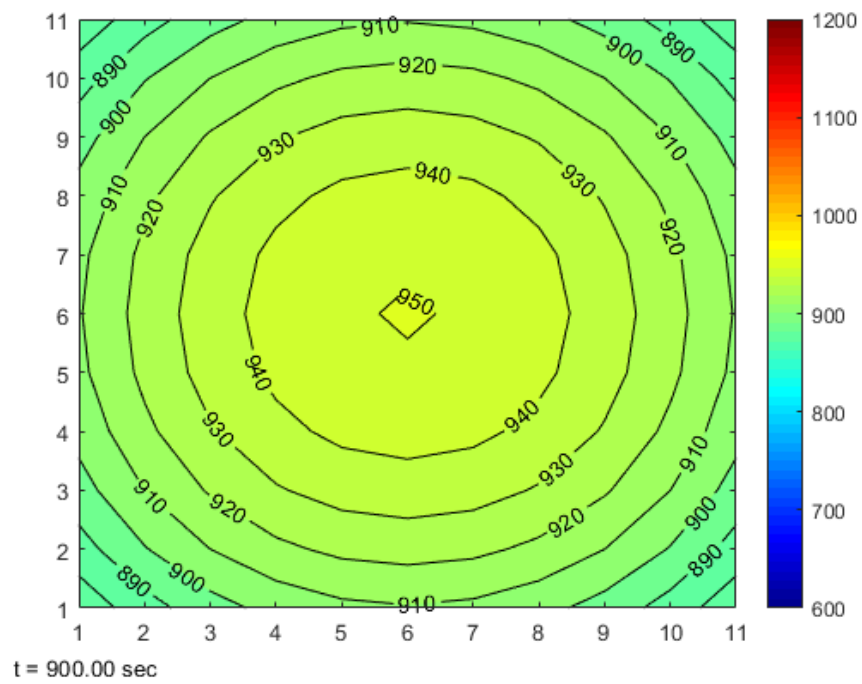
ข้อมูลจากการตรวจวัดอุณหภูมิที่ผิวของ billet ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนดังแสดงในภาคผนวก ก จะถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลอง โดยตัวอย่างของวิธีการคำนวณจะถูกแสดงในภาคผนวก ข ซึ่งมีรายละเอียดของผลการคำนวณดังนี้



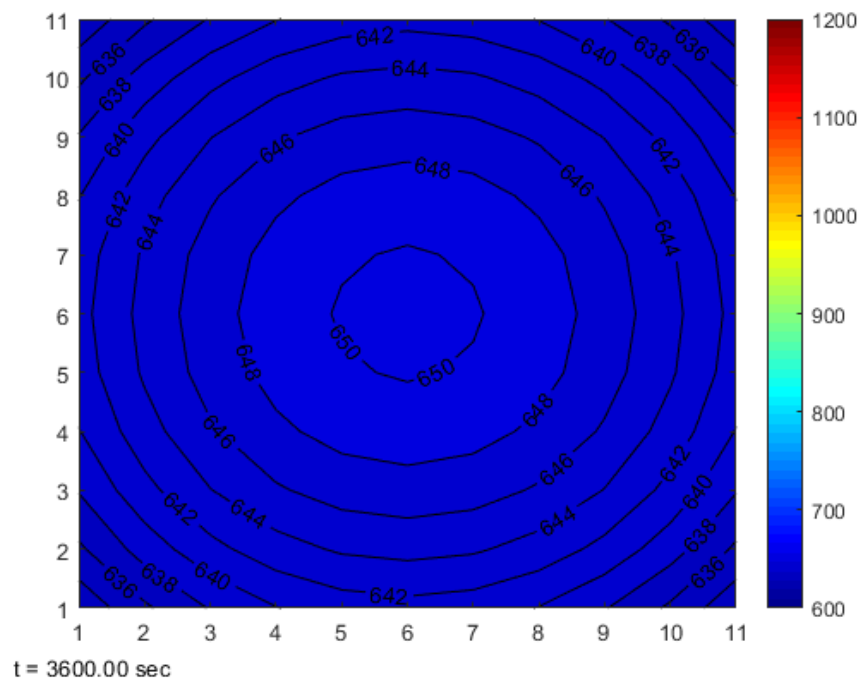
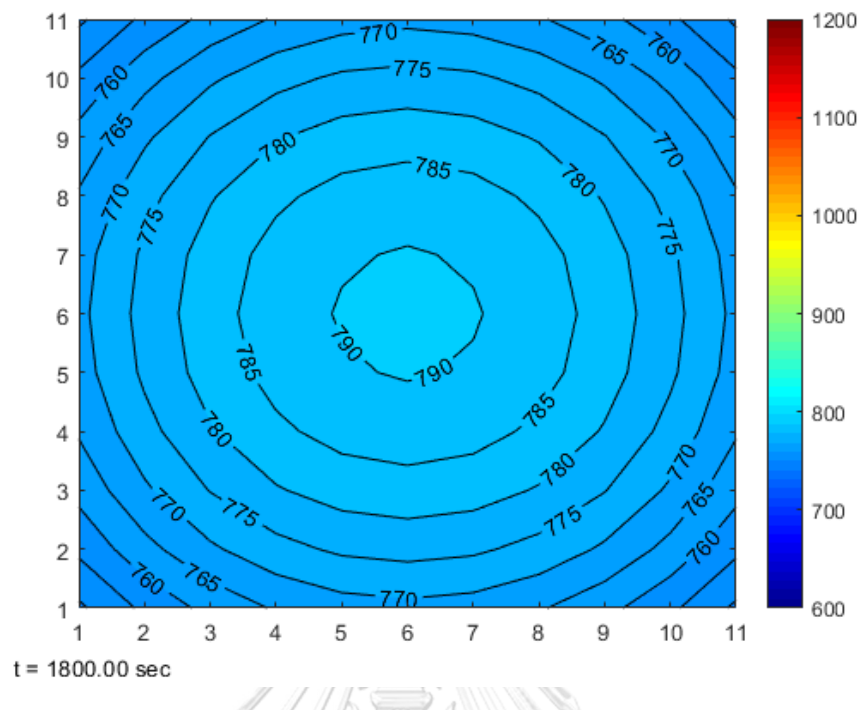
7.1 ตัวอย่างการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 7.1 แผนภาพของอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 300 วินาที และ 600 วินาที



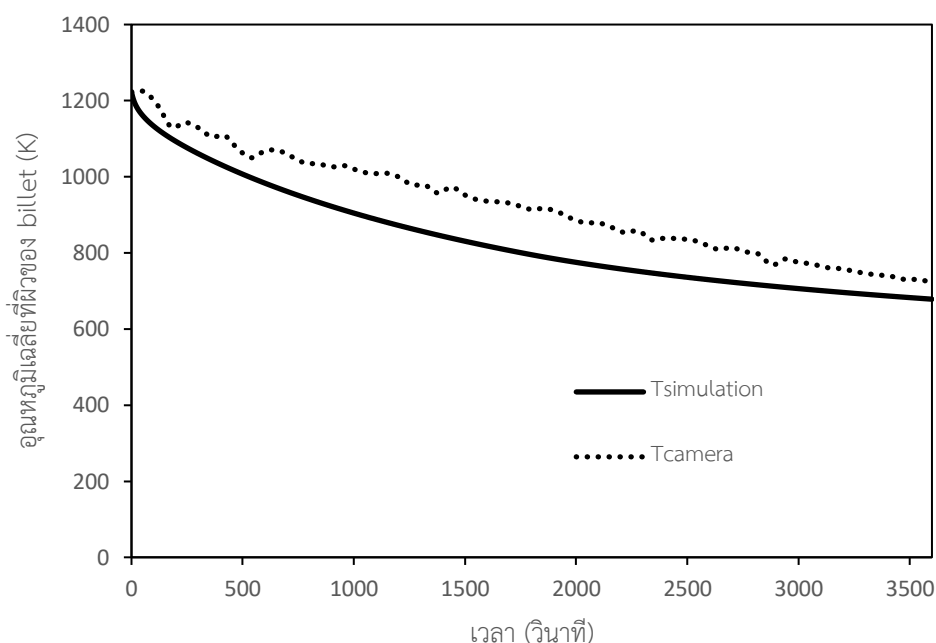
รูปที่ 7.2 แผนภาพของอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 900 วินาที และ 1200 วินาที



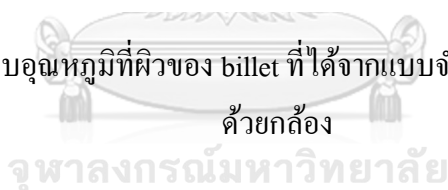
รูปที่ 7.3 แผนภาพของอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายใน Billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 1800 วินาที และ 3600วินาที

## 7.2 การตรวจสอบความถูกต้องของการแจกแจงอนุกรม billet ที่ได้จากแบบจำลอง

ข้อมูลการแจกแจงอนุกรมของ billet ที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลอนุกรมที่ได้จากการตรวจวัดผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนดังแสดงในรูปที่ 7.4



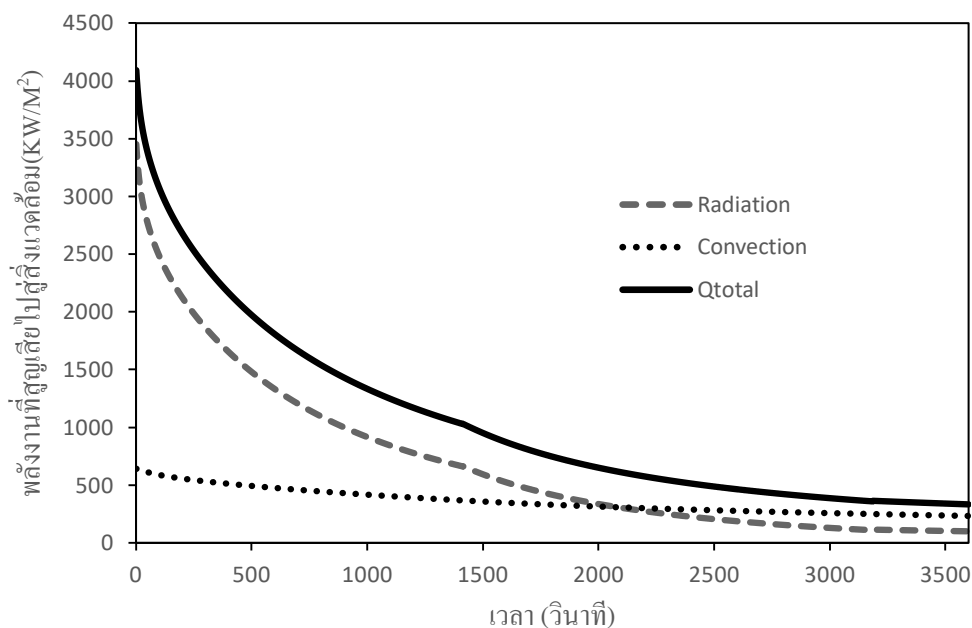
รูปที่ 7.4 การเปรียบเทียบอนุกรมที่ผิวของ billet ที่ได้จากแบบจำลองกับ ค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยกล้อง



จากรูปที่ 7.4 จะเห็นว่าอนุกรมของ billet มีแนวโน้มในการลดลงใกล้เคียงกัน และมีความคลาดเคลื่อนของอนุกรมที่เวลาต่าง ๆ เฉลี่ยที่ ร้อยละ 9.827 เมื่อเทียบกับข้อมูลจากการตรวจวัดซึ่งคาดว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของ billet ที่ใช้ในการคำนวณซึ่งไม่สามารถระบุค่าได้อย่างแม่นยำ และรวมถึงความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมในระหว่างการลำเลียงของ billet ในแบบจำลองซึ่งอาจถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณเมื่อเทียบกับสภาวะจริง

### 7.3 พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของ billet ที่ได้จากแบบจำลอง

พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนจะถูกเปรียบเทียบกับพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 7.5

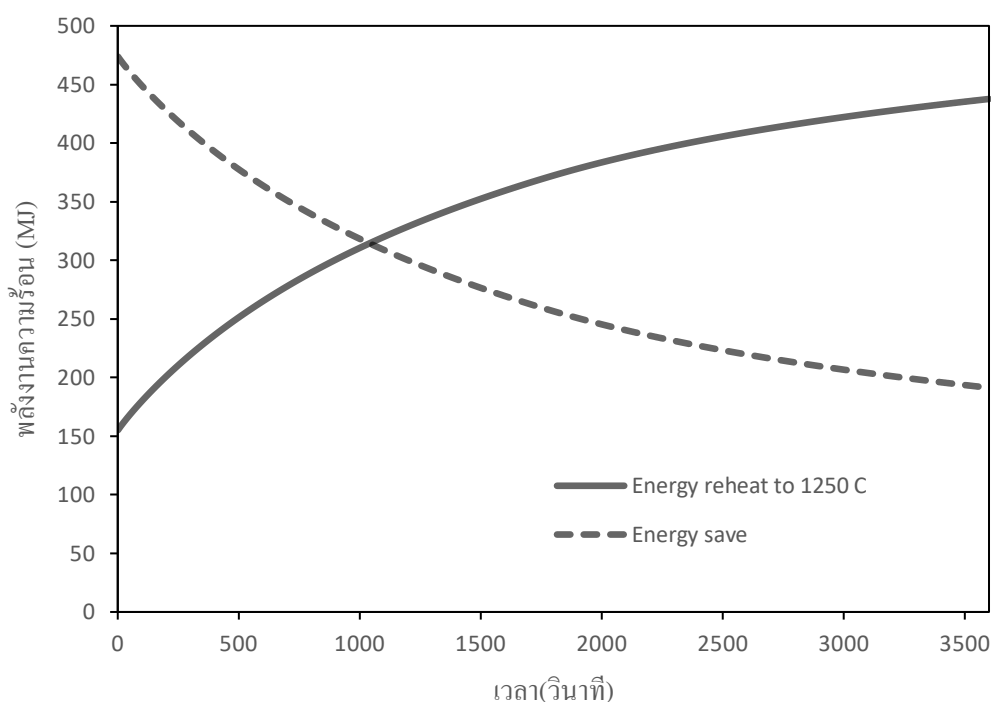


รูปที่ 7.5 การเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมจากการพาความร้อนกับการแผ่รังสีความร้อน และพลังงานความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด

จากรูปที่ 7.5 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกที่ billet มีอุณหภูมิกว่า 1150 เคลวิน หรือที่เวลาก่อนหน้าที่ 3 ของการลำเลียง (วินาทีที่ 150) พลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่า ร้อยละ 80 จะเป็นผลมาจากการแผ่รังสีความร้อน แต่เมื่ออุณหภูมิของ billet ลดลง ผลของการพาความร้อนต่อความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนเมื่ออุณหภูมิของ billet อยู่ที่ประมาณ 746 เคลวิน หรือที่เวลาประมาณนาทีที่ 35 ของการลำเลียง (วินาทีที่ 2084) ผลของการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนต่อความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดจะมีค่าเท่ากัน และตั้งแต่วินาที 55 นาทีของการลำเลียง (วินาทีที่ 3305) หรือช่วงที่ billet มีอุณหภูมิประมาณ 659 เคลวิน เป็นต้นไป ผลของการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนต่อการสูญเสียความร้อนทั้งหมดจะเริ่มคงที่ที่ร้อยละ 30

7.4 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองไปที่ อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียง เป็นระยะเวลาต่าง ๆ

พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่ผ่านการลำเลียงมาเป็นเวลาต่าง ๆ ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส รวมถึงพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงไปสู่ reheating furnace เป็นระยะเวลาต่าง ๆ จะถูกแสดงในรูปที่ 7.6



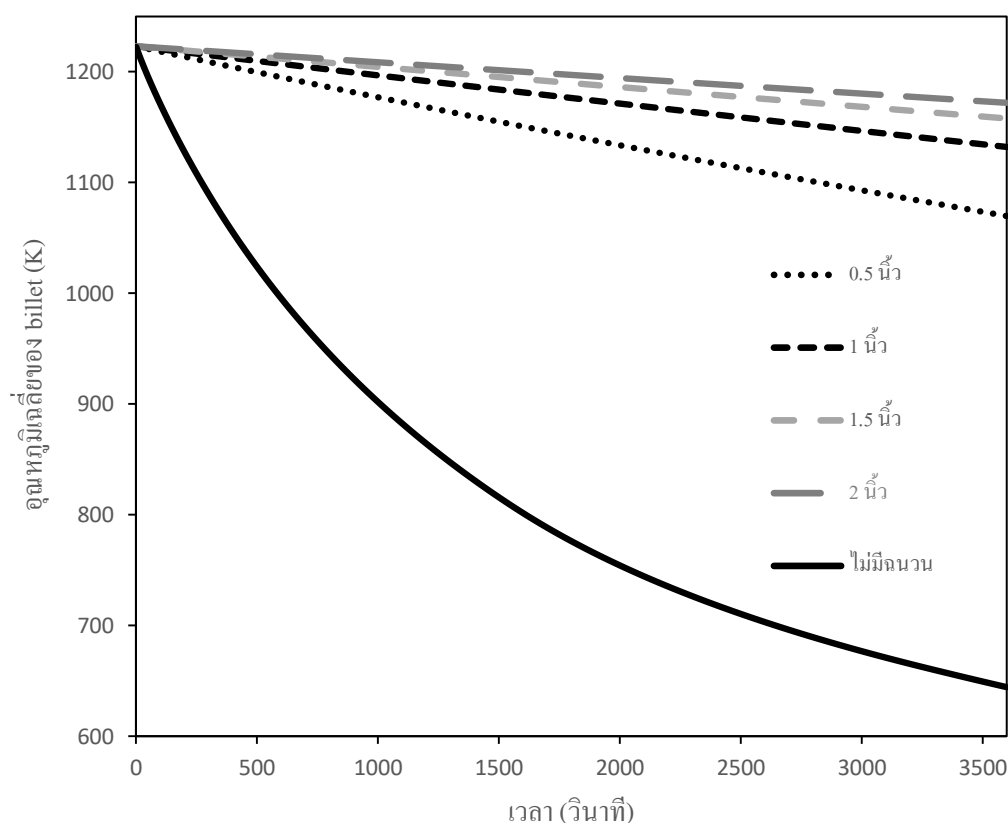
รูปที่ 7.6 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส และพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียง เป็นระยะเวลาต่าง ๆ

จากรูปที่ 7.6 จะเห็นได้ว่ายิ่งใช้ระยะเวลาในการลำเลียงมากขึ้น พลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสจะยิ่งสูงขึ้น และพลังงานที่สามารถประหยัดได้จะลดลงตามเวลาที่ใช้ในการลำเลียง และเมื่อเวลาที่ใช้ในการลำเลียงเท่ากับ 32 นาที (1909 วินาที) พลังงานที่สามารถประหยัดได้จะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 50 ของพลังงานที่สามารถประหยัดได้ตั้งต้น และเมื่อเวลาที่ใช้ในการลำเลียงเท่ากับ 60 นาที (3600 วินาที) พลังงานที่สามารถประหยัดได้จะลดลงเหลือเพียงร้อยละ 36.971 ของพลังงานที่สามารถประหยัดตั้งต้นเท่านั้น



## 7.5 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่ไม่มี ฉนวนกันความร้อนเทียบกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ

หลังจากการพิจารณาการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียงจำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับการแจกแจงอุณหภูมิ billet จากกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนครอบคลุมในระหว่างการลำเลียงในส่วนก่อนหน้า เพื่อวิเคราะห์ผลต่างของอุณหภูมิและประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 7.7



รูปที่ 7.7 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่ได้จากแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีฉนวนกัน  
ความร้อนเทียบกับกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ

จากรูปที่ 7.7 จะเห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนจะมีแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิช้ากว่าในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนค่อนข้างมาก โดยที่เวลา 30 นาทีของการลำเลียง อุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนที่ร้อยละ 47.153, 51.567,

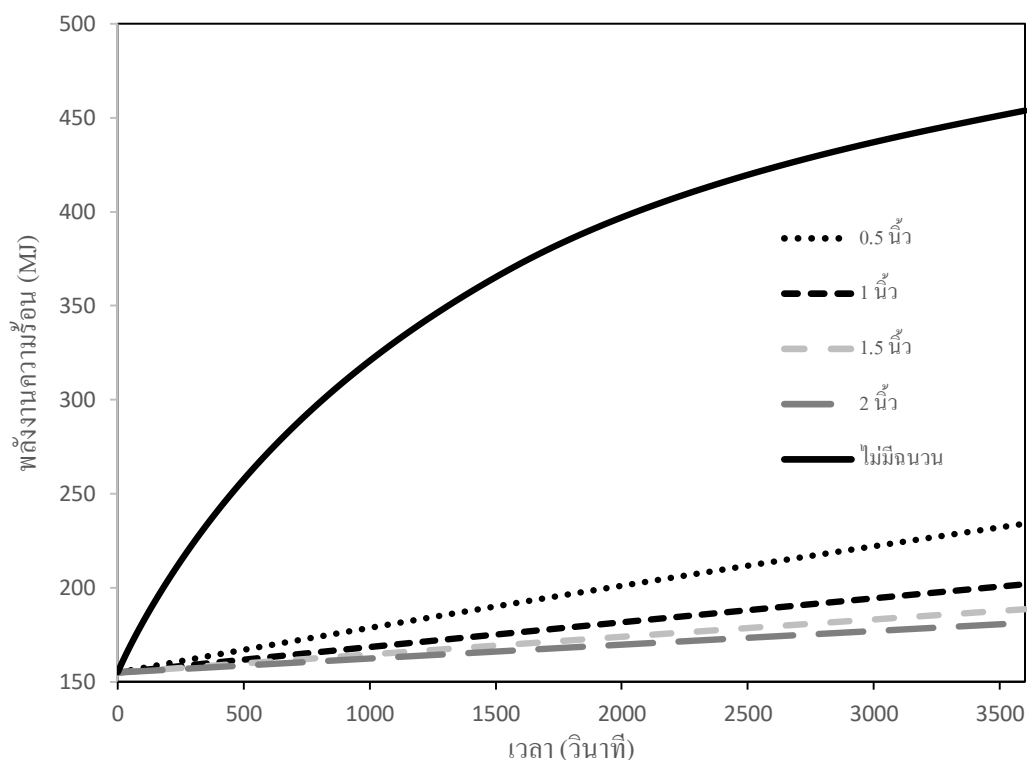
53.307 และ 54.252 ตามลำดับ และเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ในกรณีที่ไม่มีจนวนกันความร้อนที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียง อุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ในกรณีที่มีจนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว , 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีจนวนกันความร้อนที่ร้อยละ 66.038, 75.724, 79.716 และ 81.909 ตามลำดับเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ในกรณีที่ไม่มีจนวนกันความร้อน

นอกจากนี้ยังพบว่ายิ่งความหนาของจนวนกันความร้อนมีค่าสูงขึ้นอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลาต่าง ๆ จะยังมีแนวโน้มในการลดลงของอุณหภูมิช้าลง



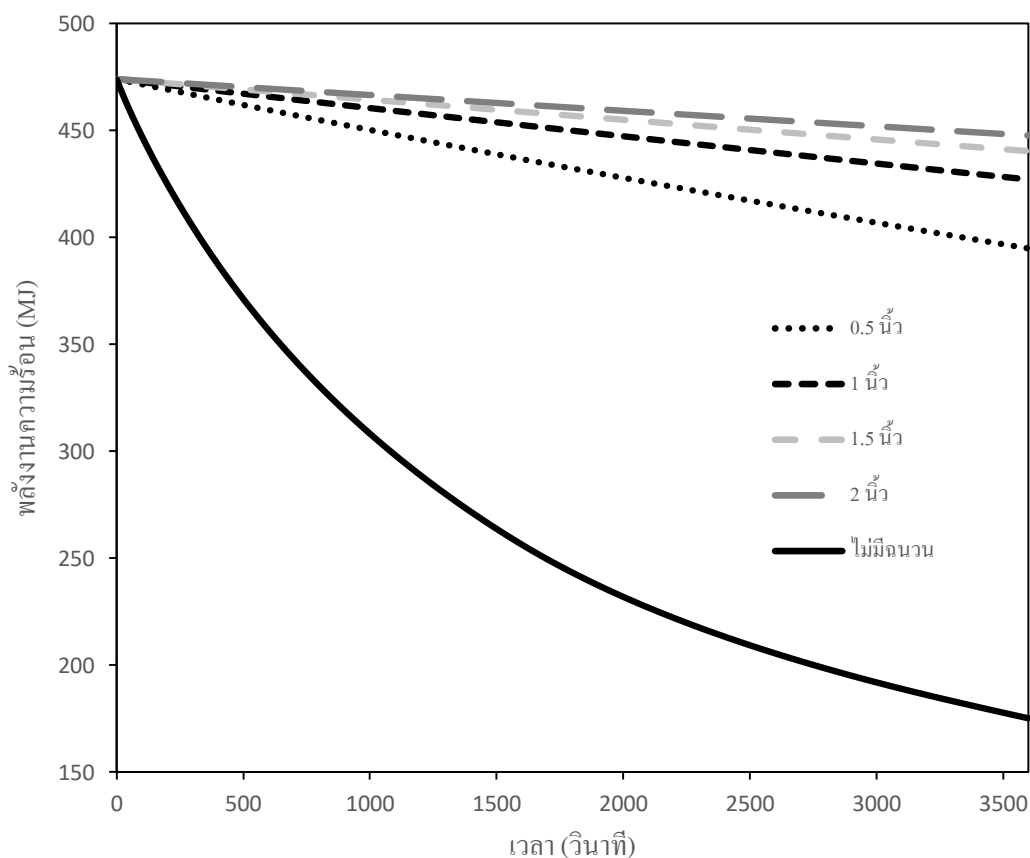
7.6 ผลการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ในกรณีที่มี  
 ผนวกันความร้อนที่แต่ละความหนาถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ เทียบกับกรณีที่ไม่  
 มีผนวกันความร้อนในระหว่างการลำเลียง

ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีผนวกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ ครอบ  
 ในระหว่างการลำเลียงจะถูกนำมาใช้พิจารณาพลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ  
 ของการลำเลียงที่ได้จากแบบจำลองไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสดังแสดงในรูปที่ 7.8 รวมถึง  
 พลังงานงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 7.4 แต่ในกรณีนี้จะทำการ  
 พิจารณาพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียง เป็นระยะเวลาต่าง ๆ เทียบ  
 กันระหว่างกรณีที่มีผนวกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ กับกรณีที่ไม่มีผนวกันความร้อนดัง  
 แสดงในรูปที่ 7.9



รูปที่ 7.8 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ในกรณีที่มีผนวกันความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ของ  
 การลำเลียงที่ได้จากแบบจำลองไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 7.8 จะเห็นว่าพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสนั้นมีค่าต่ำกว่ากรณีที่มีไม่มีฉนวนกันความร้อนค่อนข้างมาก และยังความหนาของฉนวนเพิ่มขึ้นพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสจะยังมีค่าลดลงและเริ่มมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสจะมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนที่ร้อยละ 48.415, 55.516, 58.443 และ 60.051 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิในหัวข้อที่ 7.5 โดยข้อมูลในส่วนนี้จะถูกจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้เทียบกับกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนต่อไป



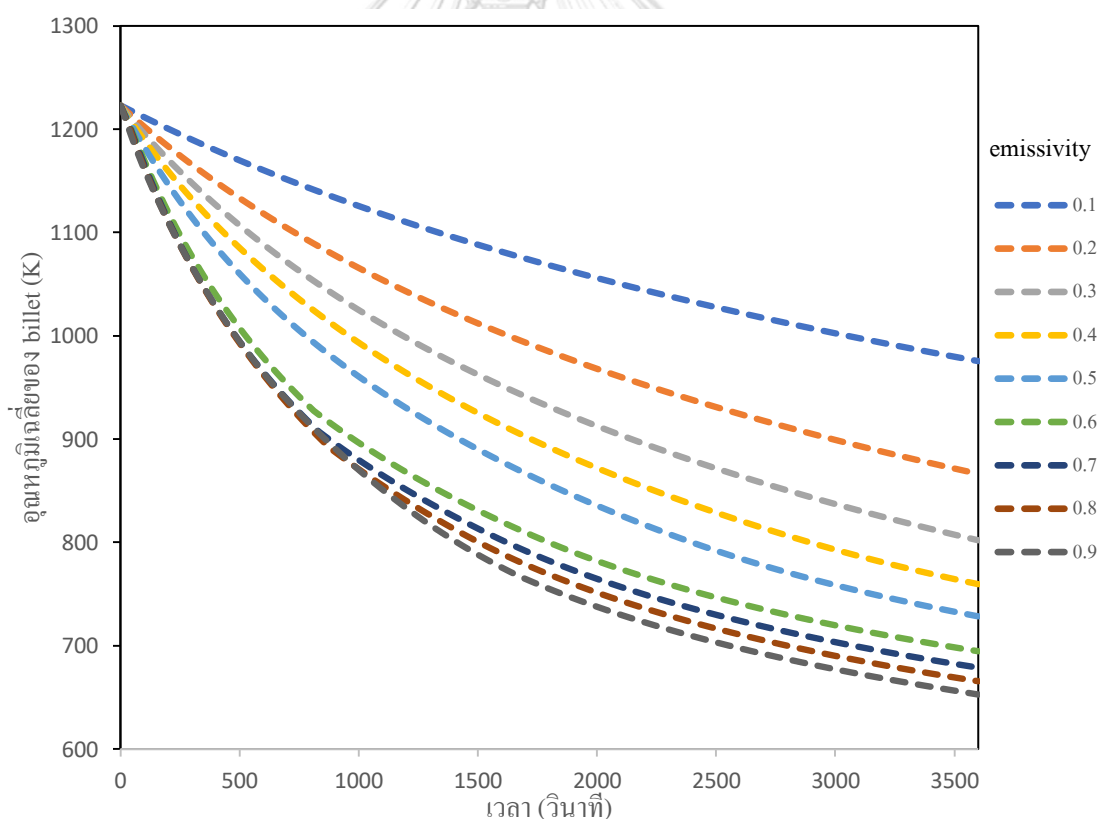
รูปที่ 7.9 ผลการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ระหว่างกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ กับกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

จากรูปที่ 7.9 จะเห็นว่าพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ที่แต่ละความหนาจะมีความหนาแน่นจะมีแนวโน้มเดียวกันคือมีค่าพลังงานที่สามารถประหยัดได้ลดลงตามเวลาที่มากขึ้น โดยที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว , 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 83.300, 90.096, 92.898 และ 94.436 ของพลังงานที่สามารถประหยัดได้ตั้งต้น นอกจากนี้ยิ่งความหนาของฉนวนมีค่าเพิ่มขึ้น พลังงานที่สามารถประหยัดได้ก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น และความต่างของค่าพลังงานที่สามารถประหยัดได้จะมีแนวโน้มที่ลดลง โดยที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว , 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีจำนวนกันความร้อนถึงร้อยละ 125.454, 143.854, 151.439 และ 155.605 ตามลำดับเมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่มีจำนวนกันความร้อน



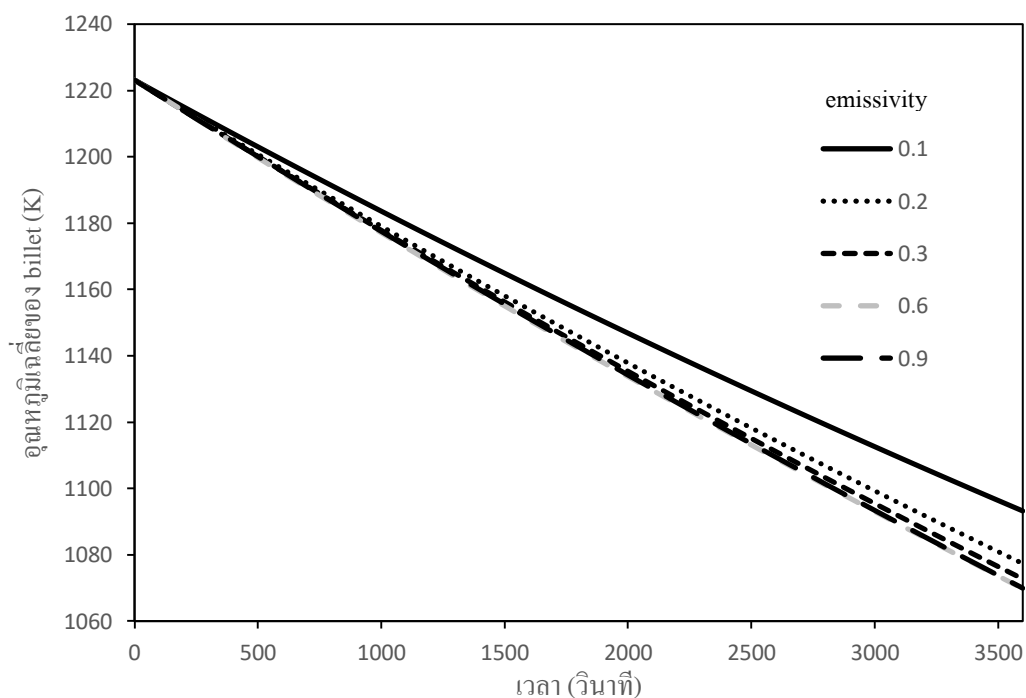
## 7.7 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

เมื่อแผ่นสแตนเลสผ่านการใช้งานในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เป็นเวลานาน ที่บริเวณพื้นผิวจะค่อย ๆ เกิดรอยด่างขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสที่ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ซึ่งถือเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของ billet ในงานวิจัยนี้ จึงมีการเปรียบเทียบผลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียงดังแสดงในรูปที่ 7.10 โดยในกรณีนี้จะทำการปรับค่า emissivity ตั้งแต่ 0.1 จนถึง 0.9 โดยที่ค่า emissivity เท่ากับ 0.1 จะเป็นค่าของแผ่นสแตนเลสเงา ที่ค่า emissivity 0.6 จะเป็นค่าของแผ่นสแตนเลสด้านที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ และที่ค่า emissivity 0.9 จะเป็นค่าของแผ่นสแตนเลสที่เกิดการ oxidized ซึ่งเป็นค่าที่อ้างอิงจาก ("Engineering ToolBox,") [8]

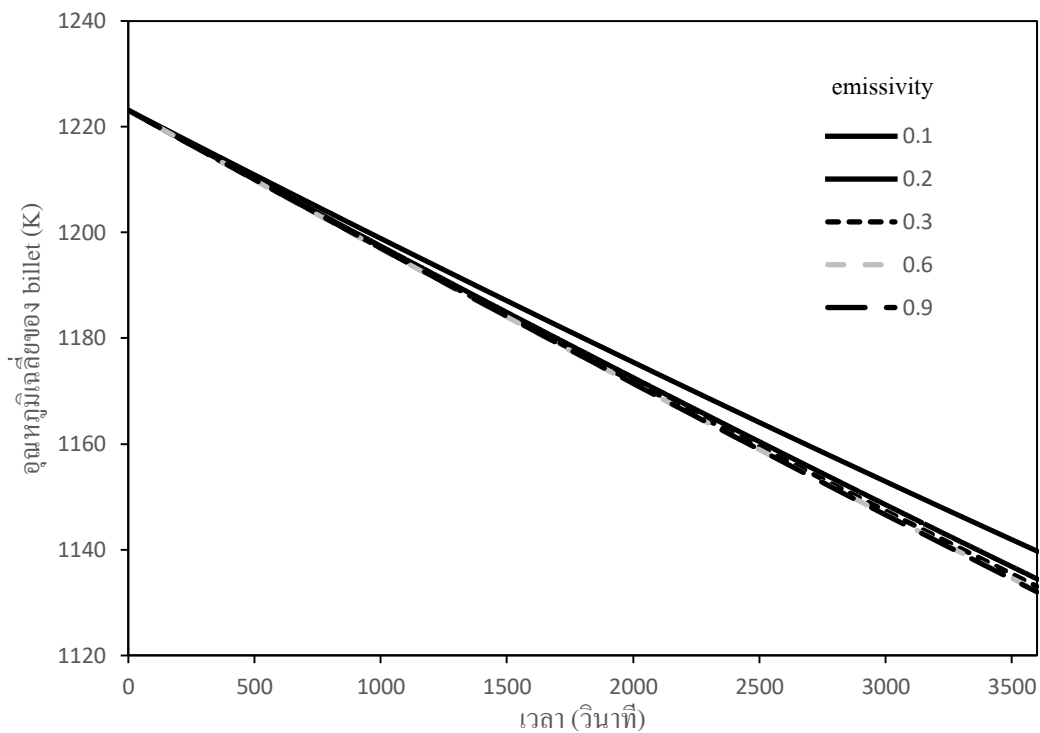


รูปที่ 7.10 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

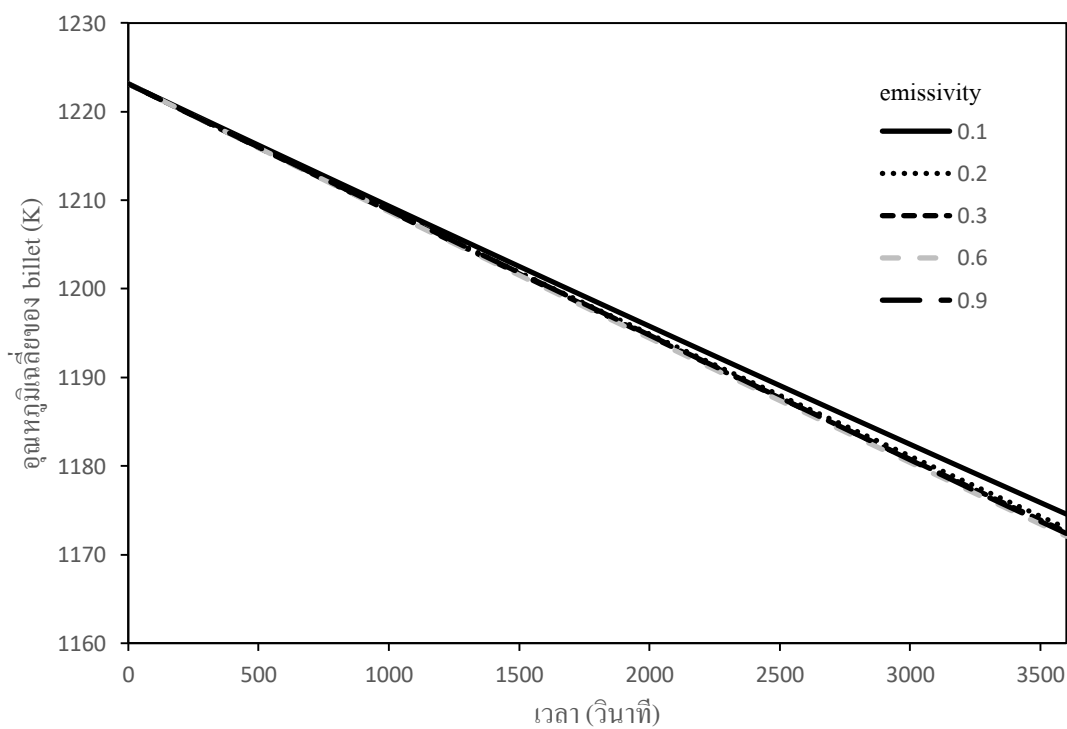
จากรูปที่ 7.10 จะเห็นว่าในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ อุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงจะมีแนวโน้มเดียวกันคือ มีอุณหภูมิเฉลี่ยลดลงตามเวลาของการลำเลียงที่มากขึ้น และยังค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงจะมีแนวโน้มลดลงค่อนข้างชัดเจน โดยเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2 – 0.9 เทียบกับกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1 พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 88.816, 82.222, 77.866, 74.671, 71.211, 69.584, 68.236 และ 66.915 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1



รูปที่ 7.11 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนมีความหนา 0.5 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง



รูปที่ 7.12 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนมีความหนา 1 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง



รูปที่ 7.13 ผลการเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนมีความหนา 2 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง



แต่เมื่อพิจารณาการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีจนวนกันความร้อนมีความหนาของ เซรามิกไฟเบอร์ที่ 0.5, 1 และ 2 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่าง การลำเลียงดังแสดงในรูปที่ 7.11, 7.12 และ 7.13 พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียง จะมีแนวโน้มเดียวกับในกรณีที่จนวนมีเพียงแผ่นสแตนเลส คือ มีอุณหภูมิเฉลี่ยลดลงตามเวลาของ การลำเลียงที่มากขึ้น และเมื่อความหนาของจนวนกันความร้อนมากขึ้นแนวโน้มการลดลงของ อุณหภูมิเฉลี่ยเมื่อค่า emissivity เพิ่มขึ้นจะยิ่งลดน้อยลง

โดยในกรณีที่จนวนมีความหนา 0.5 นิ้ว พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลา 60 นาทีของการ ลำเลียงในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2, 0.3, 0.6 และ 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 98.550, 98.126, 97.858 และ 97.870 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1

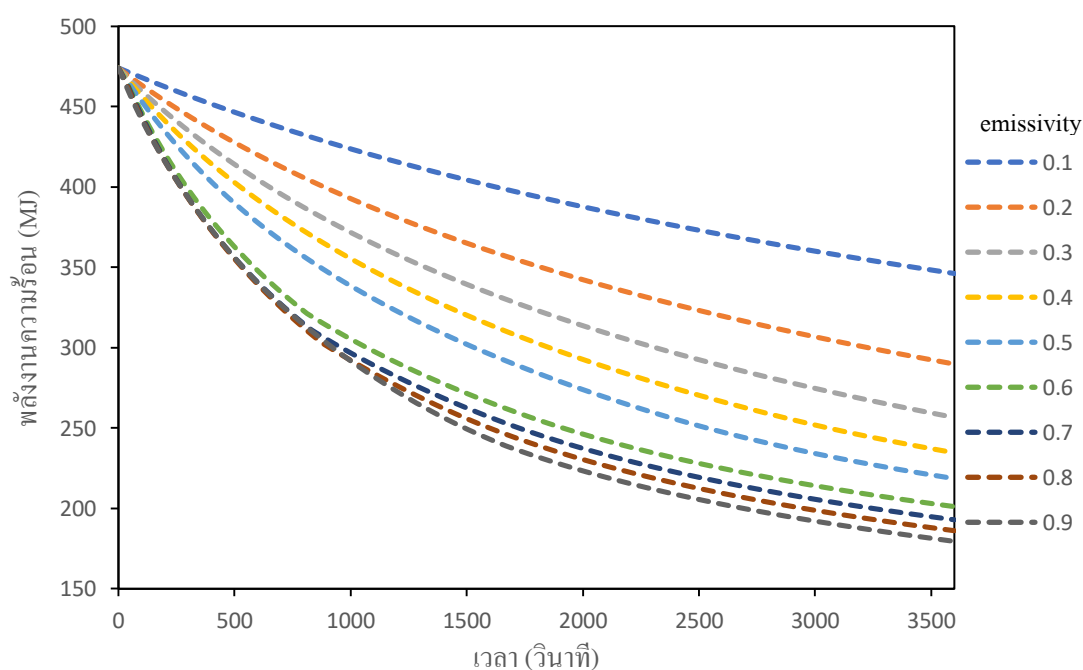
ในกรณีที่จนวนมีความหนา 1 นิ้ว พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลา 60 นาทีของการ ลำเลียงในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2, 0.3, 0.6 และ 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 99.538, 99.414, 99.340 และ 99.322 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1

และในกรณีที่จนวนมีความหนา 2 นิ้ว พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลา 60 นาทีของการ ลำเลียงในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2, 0.3, 0.6 และ 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 99.865, 99.827, 99.787 และ 99.814 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1

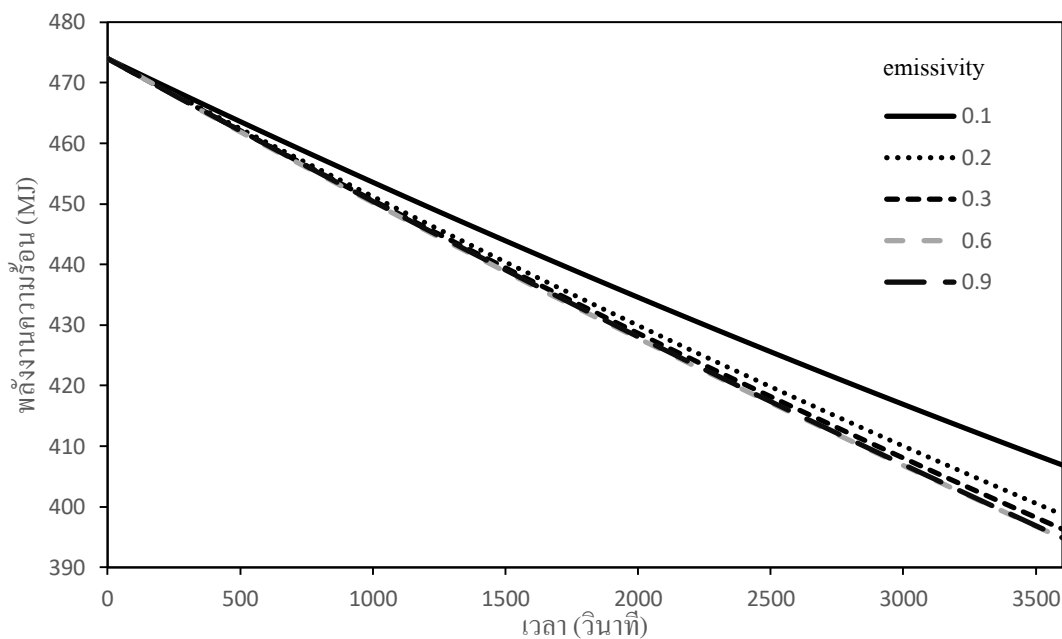
ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความหนาของจนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้น ผลของค่า emissivity ของ แผ่นสแตนเลสบนจนวนกันความร้อนต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของ billet จะยิ่งลดน้อยลง

7.8 ผลการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ในกรณีที่จนวนกันความร้อนมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง

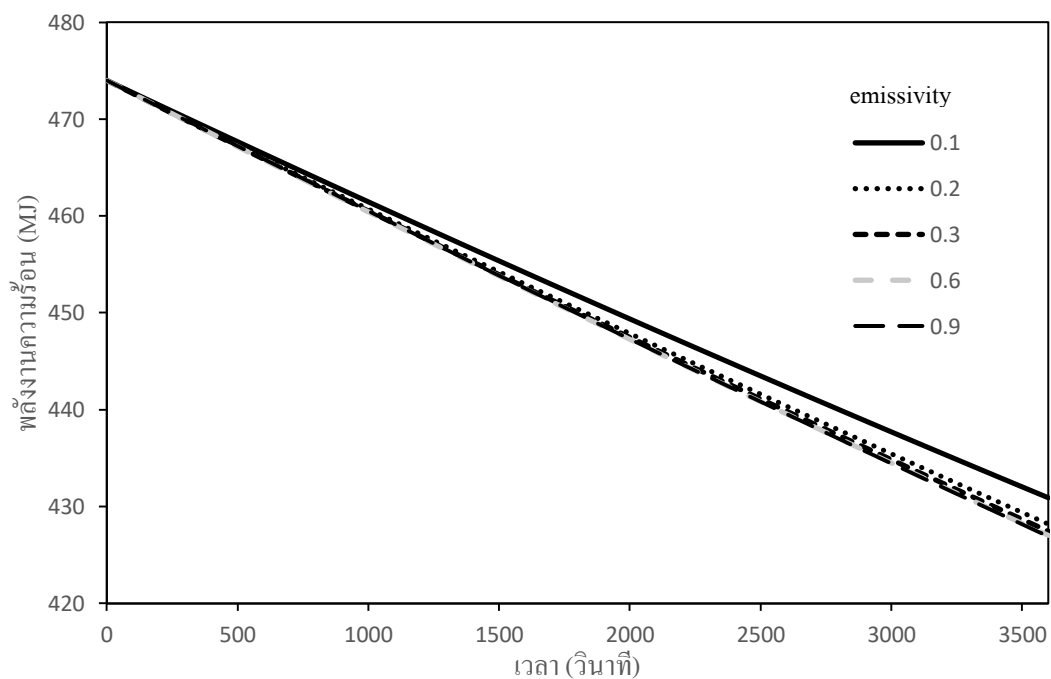
ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่จนวนกันความร้อนมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียงจะถูกนำมาใช้ในการพิจารณาพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 7.6 ซึ่งพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่จนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียงจะถูกแสดงในรูปที่ 7.14 และพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่จนวนกันความร้อนมีความหนา 0.5, 1 และ 2 นิ้ว และมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียงจะถูกแสดงในรูปที่ 7.15, 7.16 และ 7.17 ตามลำดับ



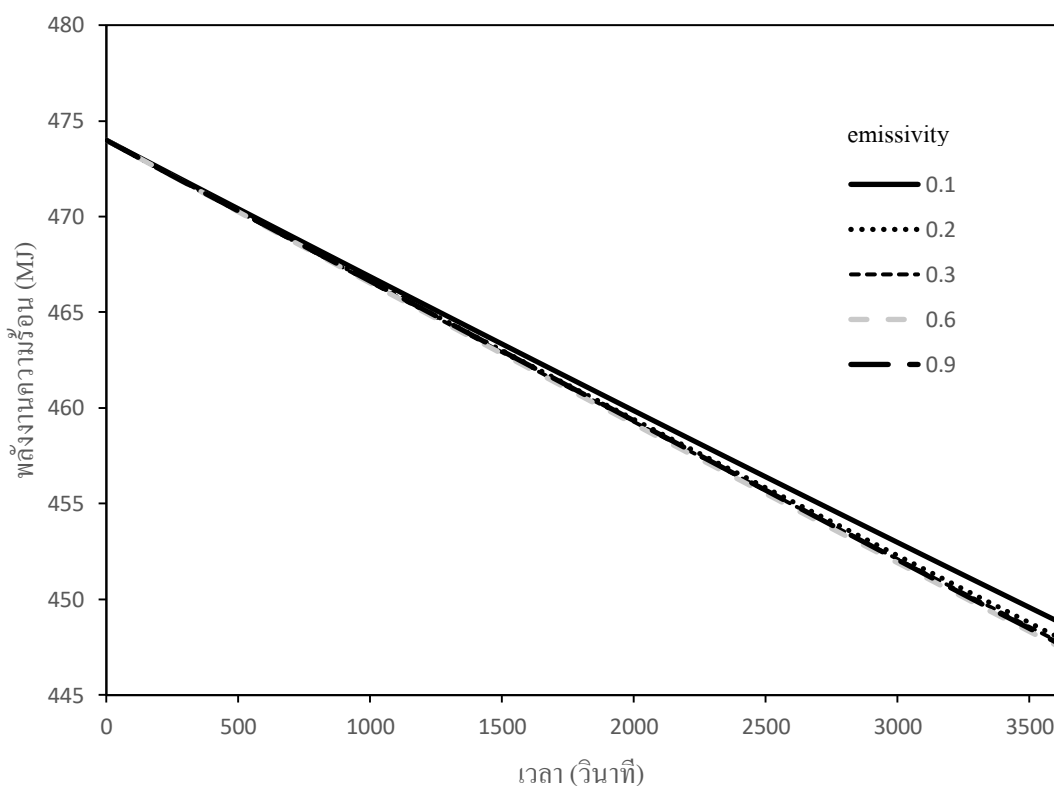
รูปที่ 7.14 พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่จนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง



รูปที่ 7.15 พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง



รูปที่ 7.16 พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 1 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียง



รูปที่ 7.17 พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบใน

ระหว่างการลำเลียง

จากรูปที่ 7.14 จะเห็นได้ว่าพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่แต่ละค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสนั้นจะมีค่าลดลงตามเวลาของการลำเลียงที่มากขึ้น ละยิ่งค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสมีค่าสูงขึ้นพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นเวลาต่าง ๆ จะมีค่าลดลง โดยเมื่อเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2 – 0.9 เทียบกับกรณีที่มีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1 พบว่าพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้ใช้เวลา 60 นาทีของการลำเลียงในกรณีที่มีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 และ 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 83.726, 74.129, 67.791, 63.141, 58.106, 55.739, 53.777 และ 51.855 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีที่มีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1

จากรูปที่ 7.15 7.16 และ 7.17 จะเห็นได้ว่าพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นเวลาต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นและที่ค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสต่าง ๆ จะมีแนวโน้มเดียวกับในกรณีที่จนวนมีเพียงแผ่นสแตนเลส ก็จะมีค่าพลังงานที่สามารถประหยัดได้ลดลงมีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity สูงขึ้นและเมื่อความหนาของจนวนกันความร้อนมากขึ้น แนวโน้มการลดลงของพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้เมื่อค่า emissivity เพิ่มขึ้นจะยิ่งลดน้อยลง

โดยในกรณีที่จนวนมีความหนา 0.5 นิ้ว พบว่าพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงในกรณีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2, 0.3, 0.6 และ 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 97.988, 97.400, 97.029 และ 97.046 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1

ในกรณีที่จนวนมีความหนา 1 นิ้ว พบว่าพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงในกรณีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2, 0.3, 0.6 และ 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 99.369, 99.200, 99.099 และ 99.074 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1

และในกรณีที่จนวนมีความหนา 2 นิ้ว พบว่าพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงในกรณีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.2, 0.3, 0.6 และ 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 99.817, 99.767, 99.712 และ 99.748 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีแผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความหนาของจนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้น ผลของค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสบนจนวนกันความร้อนต่อพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้จะยิ่งลดน้อยลง

## บทที่ 8

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษการถ่ายเทความร้อนของ billet ภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียงรวมถึงการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียง โดยการศึกษาเริ่มจากการตรวจวัดและเก็บข้อมูลอุณหภูมิของ billet ที่เวลาต่าง ๆ ของโรงงานตัวอย่างแห่งหนึ่ง เพื่อนำมาเป็นต้นแบบสำหรับทำการศึกษาสมดุลความร้อนของ billet ซึ่งใช้ในการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่สามารถวิเคราะห์การแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง และใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดในการสอบเทียบความถูกต้องของข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวจะถูกนำมาพัฒนาให้สามารถวิเคราะห์ผลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ รอบในระหว่างการลำเลียงได้ ซึ่งข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียงจะถูกนำมาวิเคราะห์ในด้านของพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อม รวมถึงพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงมาเป็นเวลาต่าง ๆ

ผลการเปรียบเทียบข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนพบว่าแนวโน้มของการลดลงของอุณหภูมิลดลงคล้ายคลึงกันและมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่เวลาเดียวกันเฉลี่ยที่ร้อยละ 9.827 เมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ในด้านการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมของ billet พบว่าในช่วงที่ billet มีอุณหภูมิสูงกว่า 1150 เคลวิน ร้อยละ 80 ของความร้อนที่สูญเสียจะเป็นผลจากการแผ่รังสีความร้อนและเมื่อ billet มีอุณหภูมิ 746 เคลวิน ความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมดจะเกิดจากผลของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อมเท่า ๆ กัน และอัตราส่วนของความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนต่อความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมดจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของ billet ลดลง

ในด้านการเปรียบเทียบข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนกับกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ จะพบว่ายิ่งความหนาของฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของ billet ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงก็จะมีค่าสูงขึ้นตาม โดยที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียง อุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว , 1 นิ้ว , 1.5 นิ้ว

และ 2 นิ้ว จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนที่ร้อยละ 66.038, 75.724, 79.716 และ 81.909 ตามลำดับเมื่อเทียบกับอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อน ซึ่งจะเห็นได้ว่ายิ่งความหนาของฉนวนกันความร้อนมีค่าสูงขึ้นอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลาต่าง ๆ จะยังมีแนวโน้มในการลดลงของอุณหภูมิช้าลง

ในด้านของพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนและมีฉนวนกันความร้อนที่ความหนา 0.5 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันคือยิ่งเวลาที่ใช้ในการลำเลียงมากขึ้นพลังงานที่สามารถประหยัดได้จะยิ่งลดลง โดยที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีไม่มีฉนวนกันความร้อน มีฉนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 36.971 83.300, 90.096, 92.898 และ 94.436 ของพลังงานที่สามารถประหยัดได้ตั้งต้น นอกจากนี้จะเห็นว่ายิ่งความหนาของฉนวนมีค่าเพิ่มขึ้นพลังงานที่สามารถประหยัดได้ก็จะยิ่งเพิ่มขึ้นและความต่างของค่าพลังงานที่สามารถประหยัดได้จะมีแนวโน้มที่ลดลง โดยที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว, 1 นิ้ว, 1.5 นิ้ว และ 2 นิ้ว จะมีค่าสูงกว่าในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนถึงร้อยละ 125.454, 143.854, 151.439 และ 155.605 ตามลำดับเมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อน

นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบผลของการแจกแจงอุณหภูมิ billet และพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่ฉนวนกันความร้อนมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง ในด้านการเปรียบเทียบผลของการแจกแจงอุณหภูมิ billet พบว่าในกรณีที่ฉนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ อุณหภูมิเฉลี่ยที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงจะมีแนวโน้มเดียวกันคือ มีอุณหภูมิเฉลี่ยลดลงตามเวลาของการลำเลียงที่มากขึ้น และยิ่งค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลาต่าง ๆ ของการลำเลียงจะมีแนวโน้มลดลงค่อนข้างชัดเจน โดยที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียง อุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 66.915 เมื่อเทียบกับกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1 ส่วนในกรณีที่ฉนวนมีความหนาของแผ่นเซรามิกไฟเบอร์ 0.5 นิ้ว 1 นิ้ว และ 2 นิ้ว พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 97.870, 99.322 และ 99.814 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีที่

แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความหนาของฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้น ผลของค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสบนฉนวนกันความร้อนต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของ billet จะยิ่งลดน้อยลง ในด้านพลังงานที่สามารถประหยัดได้ จะพบว่าพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นเวลาต่าง ๆ ในกรณีที่ฉนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่แต่ละค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสนั้นจะมีค่าลดลงตามเวลาของการลำเลียงที่มากขึ้น ละยิ่งค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสมีค่าสูงขึ้นพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงเป็นเวลาต่าง ๆ จะมีค่าลดลง โดยที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียง พลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 51.855 เมื่อเทียบกับกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1 ส่วนในกรณีที่ฉนวนมีความหนาของแผ่นเซรามิกไฟเบอร์ 0.5 นิ้ว 1 นิ้ว และ 2 นิ้ว พบว่าพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงในกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.9 จะมีค่าลดลงเหลือร้อยละ 97.046, 99.074 และ 99.748 ตามลำดับเมื่อเทียบกับกรณีที่แผ่นสแตนเลสมีค่า emissivity 0.1 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อความหนาของฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้น ผลของค่า emissivity ของแผ่นสแตนเลสบนฉนวนกันความร้อนต่อพลังงานความร้อนที่สามารถประหยัดได้จะยิ่งลดน้อยลงซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยของ billet

## 8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต

1. จากการตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิของ billet พบว่าการตรวจวัดอุณหภูมิของ billet ที่เวลาต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียงนั้นสามารถทำได้ยาก จึงจำเป็นต้องทำการตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิของ billet ที่ถูกตั้งอยู่หนึ่งแทน และด้วยข้อจำกัดในด้านเวลาการตรวจวัดทำให้สามารถเก็บข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิของ billet ได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ดังนั้นก่อนการตรวจวัดข้อมูล จึงควรทำการศึกษาและออกแบบวิธีการตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิของ billet ที่เวลาต่าง ๆ ในระหว่างการลำเลียงให้ดีขึ้น รวมถึงการเผื่อเวลาในการตรวจวัดเพื่อการเก็บข้อมูลหลาย ๆ ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำสำหรับใช้ในการสอบเทียบข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลอง

2. เนื่องจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของ billet ในระหว่างการลำเลียงทั้งในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนและมีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ ครอบในระหว่างการลำเลียงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองอย่างง่าย จึงยังมีความแตกต่างกับสภาพแวดล้อมจริงของ billet ใน



ระหว่างการลำเลียง ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงสามารถปรับปรุงและพัฒนาให้มีความซับซ้อนและมีความใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมจริงของ billet ในระหว่างลำเลียงยิ่งขึ้นได้ในอนาคต

3. ปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิ billet และพลังงานที่สามารถประหยัดได้ ซึ่งได้แก่ ความหนาของฉนวนกันความร้อน และ ค่า emissivity ที่แผ่นสเตนเลสของฉนวนกันความร้อน ที่ถูกนำมาวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้อาจเป็นปัจจัยสำคัญที่จำเป็นต้องทำการพิจารณา เพื่อทำการต่อ ยอดในการคำนวณหาจุดที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างหรือปรับปรุงระบบลำเลียง billet ภายในโรงงานผลิตเหล็กและเหล็กกล้าให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อเทียบค่าใช้จ่ายในการสร้างหรือปรับปรุงระบบลำเลียงกับค่าใช้จ่ายในด้านเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานแก่ billet หลังจากผ่านการลำเลียงที่สามารถประหยัด รวมถึงจุดคุ้มทุนที่เหมาะสมและสามารถรับได้

4. งานวิจัยนี้อาจเป็นพื้นฐานให้กับงานวิจัยในอนาคตเพื่อปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการแจกแจงอุณหภูมิใน billet ภายใต้สถานะต่าง ๆ ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิรวมถึงการสูญเสียพลังงานความร้อนของ billet ในกระบวนการผลิตเหล็กได้ในอนาคต



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก  
ข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิ billet



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ข้อมูลอุณหภูมิลบิลเล็ต ที่ได้จากการตรวจวัดผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน

ตารางที่ ก. 1 ข้อมูลอุณหภูมิลบิลเล็ต ที่ได้จากการตรวจวัดผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนที่เวลาต่าง ๆ

เวลาที่ทำการตรวจวัด (นาทีที่)	อุณหภูมิลบิลเล็ตที่ผิว billet (องศาเซลเซียส)
0 (เริ่มต้น)	950
1	948
2	913
3	857
4	870
5	856
6	832
7	835
8	799
9	777
10	795
11	796
12	780
13	763
14	761
15	753
16	756
17	743
18	735
19	737
20	727
21	706
22	705
23	684

เวลาที่ทำการตรวจวัด (นาทีที่)	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิว billet (องศาเซลเซียส)
24	700
25	679
26	666
27	662
28	660
29	651
30	641
31	644
32	634
33	617
34	606
35	606
36	594
37	580
38	585
39	561
40	566
41	564
42	561
43	549
44	536
45	541
46	530
47	524
48	495
49	511
50	502

เวลาที่ทำการตรวจวัด (นาทีที่)	อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิว billet (องศาเซลเซียส)
51	498
52	489
53	486
54	480
55	473
56	469
57	465
58	457
59	457
60	449

อุณหภูมิเฉลี่ยของสิ่งแวดล้อมขณะทำการตรวจวัด 32.0 °c

ภาคผนวก ข  
ตัวอย่างการคำนวณ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

### ข.1 ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม

ขั้นตอนการคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม  $h_{conv}$  ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียงมีดังนี้

1. การพาความร้อนแบบอิสระ จะประกอบไปด้วย

#### 1.1 Rayleigh number ( $Ra_D$ )

จากสมการที่

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D_h^3}{\nu\alpha}$$

โดยที่ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่า  $9.81 \text{ m/s}^2$ ,

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{764.15} = 1.3086 \times 10^{-3} \text{ 1/K},$$

$$D_h = \frac{4A}{p} = \frac{4(0.13 \times 0.13)}{4 \times 0.13} = 0.13 \text{ m},$$

$$\nu = 78.792 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

$$\alpha = 112.113 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s},$$

อุณหภูมิที่ผิว billet หรือ  $T_s = 1223.15 \text{ K}$  และ

อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม หรือ  $T_\infty = 305.15 \text{ K}$

จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ Rayleigh number ( $Ra_D$ ) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} Ra_D &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D_h^3}{\nu\alpha} = \frac{9.81 * 1.3086 \times 10^{-3} (1223.15 - 305.15) 0.13^3}{78.792 \times 10^{-6} * 112.113 \times 10^{-6}} \\ &= 2930964.533 \end{aligned}$$

#### 1.2 Average Nusselt number ของการพาความร้อนแบบอิสระ

จากสมการที่

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = C Ra_D^n$$

จากค่า Rayleigh number ที่ได้จากการคำนวณข้างต้น  $Ra_D = 2930964.533$



จะได้ว่า  $C = 0.480$  และ  $n = 0.250$  จากตารางที่ 3.1

จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ Average Nusselt number ของการพาความร้อนได้ดังนี้

$$\overline{Nu}_D = C Ra_D^n = 0.480 * 2930964.533^{0.250} = 19.8607$$

1.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระ  $h_{free}$

$$h_{free} = \frac{\overline{Nu}_D k}{D}$$

โดยที่  $\overline{Nu}_D = 19.8607$

$$k = 55.58 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$$

$$D = 0.13 \text{ m}$$

จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระ ( $h_{free}$ ) ได้ดังนี้

$$h_{free} = \frac{\overline{Nu}_D k}{L} = \frac{19.8607 * 55.58 \times 10^{-3}}{0.13} = 8.4912 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

2. การพาความร้อนแบบบังคับ จะประกอบไปด้วย

2.1 Reynold number

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

โดยที่  $V = 1.5 \text{ m/s}$

$$L = 6 \text{ m}$$

$$\nu = 78.792 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ Reynold number ( $Re_L$ ) ได้ดังนี้

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} = \frac{1.5 * 6}{78.792 \times 10^{-6}} = 114224.794$$

ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 500000 จึงถือว่าเป็นการไหลภายนอกแบบ Laminar

2.2 Average Nusselt number ของการไหลภายนอกแบบ Laminar

$$\overline{Nu}_L \equiv \frac{\overline{h}_x x}{k} = 0.664 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad Pr \geq 0.6$$

โดยที่  $Re_L = 114224.794$

$$Pr = 0.704$$

จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ Average Nusselt number ของการไหลภายนอกแบบ Laminar ( $\overline{Nu}_L$ ) ได้ดังนี้

$$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} = 0.664 * 114224.794^{\frac{1}{2}} * 0.704^{\frac{1}{3}} = 199.6361$$

2.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับ  $h_{force}$

$$h_{force} = \frac{\overline{Nu}_L k}{L}$$

โดยที่  $\overline{Nu}_D = 199.6361$

$$k = 55.58 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$$

$$L = 6 \text{ m}$$

จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระ ( $h_{free}$ ) ได้ดังนี้

$$h_{free} = \frac{\overline{Nu}_D k}{L} = \frac{199.6361 * 55.58 \times 10^{-3}}{6} = 1.8493 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

3. การพาความร้อนรวมระหว่างการพาความร้อนแบบอิสระและแบบบังคับ จะประกอบไปด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม  $h_{conv}$  ได้จากสมการ

$$h_{conv} = h_{free} + h_{force} = 8.4912 + 1.8493 = 10.3405 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

ซึ่งค่า  $h_{conv}$  จะถูกคำนวณที่แต่ละอุณหภูมิที่ผิวของ billet ตั้งแต่ 305.15 – 1223.15 K

จากนั้นจึงนำค่า  $h_{conv}$  ที่แต่ละอุณหภูมิมาทำการพล็อตกราฟเทียบกับอุณหภูมิที่ผิวของ billet เพื่อทำการสร้างสมการเส้นแนวโน้มเพื่อใช้ในการประมาณค่า  $h_{conv}$  ที่แต่ละอุณหภูมิผิว ซึ่งจะมีกราฟและสมการเส้นแนวโน้มดังนี้

ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

จากสมการ 6<sup>th</sup> order polynomial trendline ของโปรแกรม Microsoft excel

$$y = B6x^6 + B5x^5 + B4x^4 + B3x^3 + B2x^2 + B1x + a$$

โดยที่

$$B6 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1)$$

$$B5 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,2)$$

$$B4 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,3)$$

$$B3 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,4)$$

$$B2 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,5)$$

$$B1 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,6)$$

$$a = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,7)$$

จากการคำนวณผ่าน โปรแกรม Microsoft excel จะได้ว่า

$$B6 = -9.71830 \times 10^{-16}$$

$$B5 = 4.78142 \times 10^{-12}$$

$$B4 = -9.59515 \times 10^{-9}$$

$$B3 = 1.00518 \times 10^{-5}$$

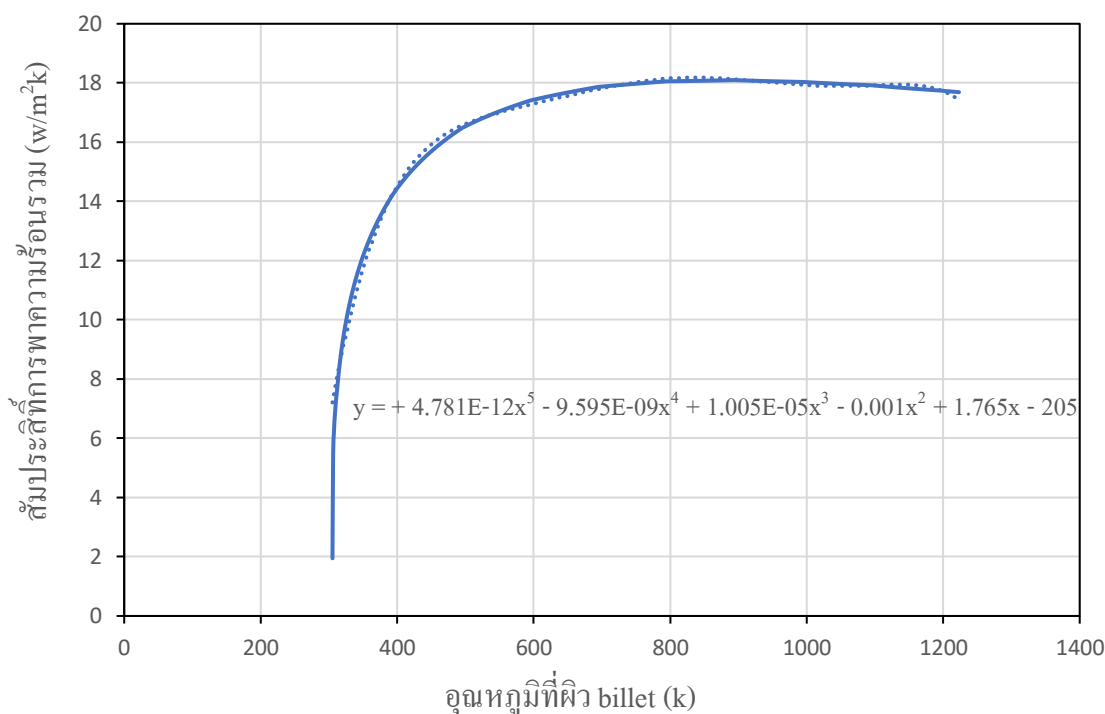
$$B2 = -0.00581$$

$$B1 = 1.76543$$

$$a = -204.902$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่าสมการเส้นแนวโน้มของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ

$$h_{conv} = -9.71830 \times 10^{-16} T^6 + 4.78142 \times 10^{-12} T^5 - 9.59515 \times 10^{-9} x T^4 + 1.00518 \times 10^{-5} T^3 - 0.00581 T^2 + 1.76543 T - 204.902 \frac{W}{m^2 K}$$



รูปที่ ข. 1 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่อุณหภูมิผิว billet ต่าง ๆ และสมการเส้นแนวโน้มที่ใช้ในการประมาณค่าในกรณีที่ไม่มีจำนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

ในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

จากสมการ 6<sup>th</sup> order polynomial trendline ของโปรแกรม Microsoft excel

$$y = B6x^6 + B5x^5 + B4x^4 + B3x^3 + B2x^2 + B1x + a$$

โดยที่

$$B6 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1)$$

$$B5 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,2)$$

$$B4 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,3)$$

$$B3 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,4)$$

$$B2 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,5)$$

$$B1 = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,6)$$

$$a = \text{INDEX}(\text{LINEST}(y, x^{\{1,2,3,4,5,6\}}), 1,7)$$

จากการคำนวณผ่านโปรแกรม Microsoft excel จะได้ว่า

$$B6 = -4.82258 \times 10^{-16}$$

$$B5 = 2.37098 \times 10^{-12}$$

$$B4 = -4.75369 \times 10^{-9}$$

$$B3 = 4.97426 \times 10^{-6}$$

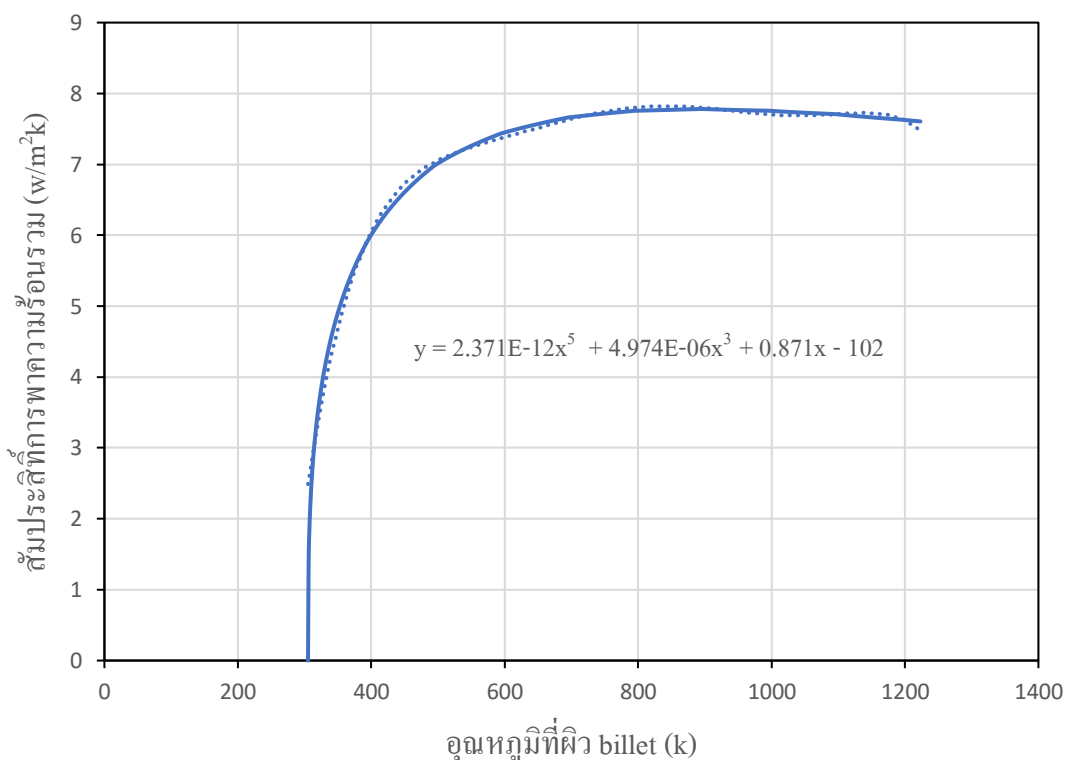
$$B2 = -0.002871$$

$$B1 = 0.87062$$

$$a = 102$$

เพราะฉะนั้นจะได้ว่าสมการเส้นแนวโน้มของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

$$h_{conv} = -4.82258 \times 10^{-16} T^6 + 2.37098 \times 10^{-12} T^5 - 4.75369 \times 10^{-9} T^4 + 4.97426 \times 10^{-6} T^3 - 0.002871 T^2 + 0.87062 T - 101.90 \frac{W}{m^2 K}$$



รูปที่ ข. 2 กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวมที่อุณหภูมิผิว billet ต่าง ๆ และสมการเส้นแนวโน้มที่ใช้ในการประมาณค่าในกรณีที่มีจำนวนกันความร้อนรอบในระหว่างการลำเลียง

ข.2 ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่ต่าง ๆ ของ billet ที่ใช้ในการคำนวณ

1. ค่าการแพร่กระจายทางความร้อนของ billet ( $\alpha$ )

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

โดยที่ thermal conductivity ของ Billet หรือ  $k = 30 \text{ w/mK}$

ความหนาแน่นของ billet หรือ  $\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$

ความจุความร้อนจำเพาะของ billet หรือ  $c_p = 760 \text{ J/kgK}$

จากข้อมูลจะสามารถคำนวณค่าการแพร่กระจายทางความร้อนของ billet ( $\alpha$ ) ได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{30}{7600 * 760} = 5.1939 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

2. Finite difference form of Fourier number ( $Fo$ )

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

โดยที่ ค่าการแพร่กระจายทางความร้อนของ billet หรือ  $\alpha = 5.1939 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

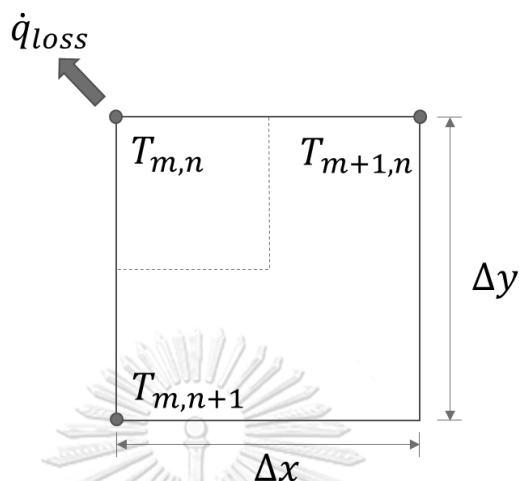
ช่วงระยะเวลาในการคำนวณ  $\Delta t = 1 \text{ s}$

ขนาด element ของ billet ที่ถูกแบ่งในแนวแกน  $\Delta x = 0.013 \text{ m}$

จากข้อมูลจะสามารถคำนวณ Finite difference form of Fourier number ( $Fo$ ) ได้ดังนี้

$$Fo = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} = \frac{5.1939 \times 10^{-6} * 1}{0.013^2} = 0.03073$$

ข.3 ตัวอย่างการสร้างสมการ finite difference จากการพิจารณาสมดุลความร้อนที่ตำแหน่งบน billet มุมซ้ายบน



จากภาพตัวอย่างจะสามารถเขียนสมการสมดุลความร้อนที่ตำแหน่ง  $m, n$

$$\dot{E}_{gen} + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}$$

$$\dot{q}_{loss}A_s + \dot{q}_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)}A + \dot{q}_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)}A = \rho V c_p \frac{dT}{dt}$$

$$\dot{q}_{loss} \left( \frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta y}{2} \right) L + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\Delta x}{2} L \frac{\partial T}{\partial y} = \rho V c_p \frac{dT}{dt}$$

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{loss} \left( \frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta y}{2} \right) L + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\Delta x}{2} L \frac{\partial T}{\partial y}$$

จาก  $\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y}$

เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

$$\rho V c_p \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = \dot{q}_{loss} \left( \frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta y}{2} \right) L + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + k \frac{\Delta x}{2} L \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y}$$

หารด้วย  $kL$  ทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{aligned} \frac{\rho c_p (\Delta x \Delta y)}{k} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \\ = \frac{\dot{q}_{loss}}{k} \left( \frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta y}{2} \right) + \frac{\Delta y}{2} \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2} \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \end{aligned}$$

จาก  $\Delta y = \Delta x$  จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{\rho c_p (\Delta x^2)}{k} \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} = -\frac{\dot{q}_{loss}}{k} (\Delta x) + \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{2} + \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{2}$$

จาก  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  และ  $\dot{q}_{loss} = h_{total}(T_\infty - T_{m,n}^{p+1})$  จะได้

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

ดังแสดงในหัวข้อที่ 7.1

จัดรูปใหม่ได้เป็น

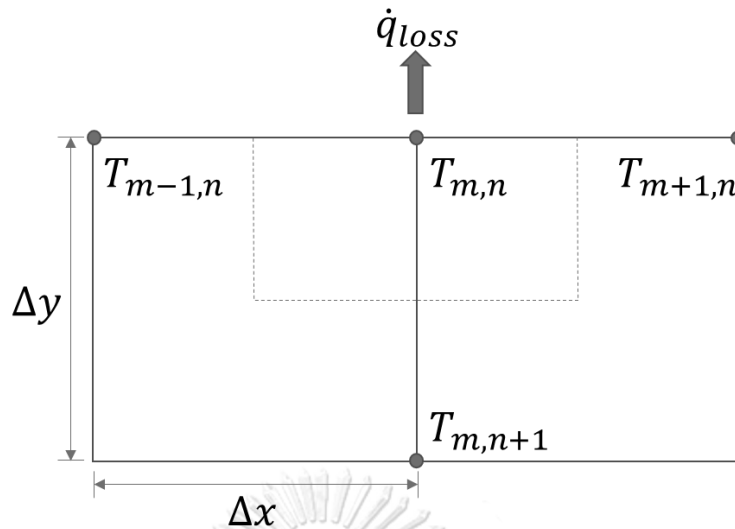
$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p &= 4 \frac{h_{total} \Delta x \alpha \Delta t}{k} (T_\infty - T_{m,n}^{p+1}) + 2 \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \\ &\quad + 2 \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \end{aligned}$$

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

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

ขอบบน





จากภาพตัวอย่างจะสามารถเขียนสมการสมดุลความร้อนที่ตำแหน่ง  $m, n$

$$\dot{E}_{gen} + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}$$

$$\dot{q}_{loss}A_s + \dot{q}_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)}A + \dot{q}_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)}A + \dot{q}_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)}A = \rho V c_p \frac{dT}{dt}$$

$$\dot{q}_{loss}\Delta x L + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{\partial T}{\partial x} + k \Delta x L \frac{\partial T}{\partial y} = \rho V c_p \frac{dT}{dt}$$

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = \dot{q}_{loss}\Delta x L + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{\partial T}{\partial x} + k \Delta x L \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$\text{จาก } \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t}, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m,n} = \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x}, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m,n} = \frac{T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x}, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n} = \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y}$$

เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho V c_p \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} &= \dot{q}_{loss}\Delta x L + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + k \frac{\Delta y}{2} L \frac{T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} \\ &\quad + k \Delta x L \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \end{aligned}$$

หารด้วย  $kL$  ทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{aligned} & \frac{\rho c_p}{k} \left( \frac{\Delta x \Delta y}{2} \right) \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \\ &= \dot{q}_{loss} \frac{\Delta x}{k} + \frac{\Delta y}{2} \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + \frac{\Delta y}{2} \frac{T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} \\ & \quad + \Delta x \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \end{aligned}$$

จาก  $\Delta y = \Delta x$  จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} & \frac{\rho c_p}{k} \left( \frac{\Delta x^2}{2} \right) \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} \\ &= \dot{q}_{loss} \frac{\Delta x}{k} + \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{2} + \frac{T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{2} + T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1} \end{aligned}$$

จาก  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  และ  $\dot{q}_{loss} = h_{total}(T_\infty - T_{m,n}^{p+1})$  จะได้

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

เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

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

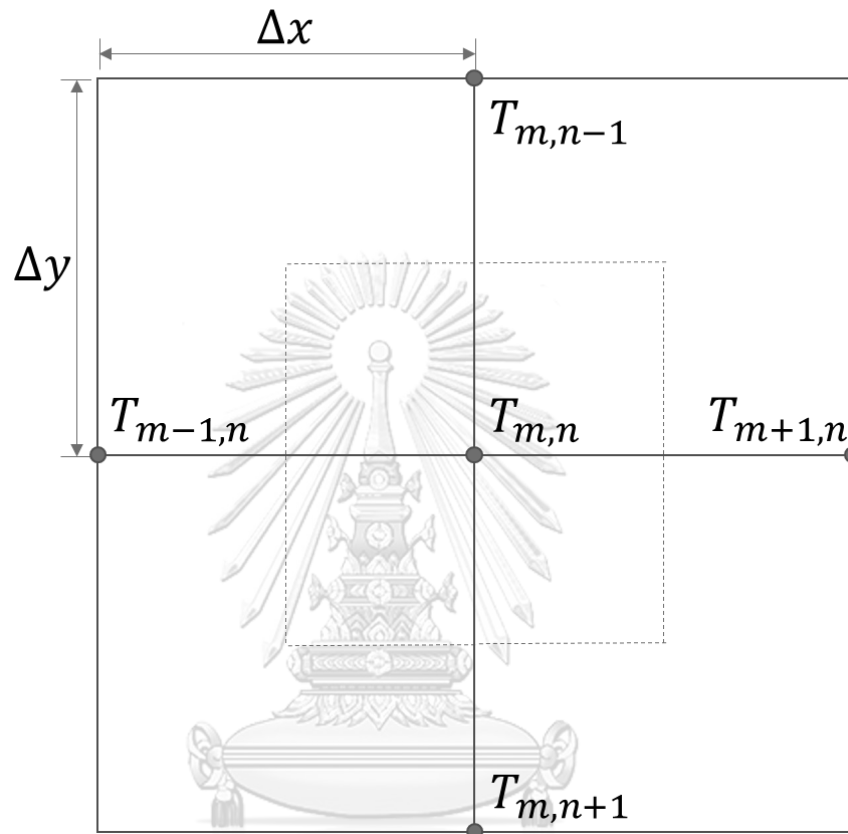
ดังแสดงในหัวข้อที่ 7.2

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p &= 2 \frac{h_{total} \Delta x}{k} \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_\infty - T_{m,n}^{p+1}) + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \\ & \quad + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + 2 \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \\ T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p &= 2BiFo(T_\infty - T_{m,n}^{p+1}) + Fo(T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + Fo(T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \\ & \quad + 2Fo(T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \end{aligned}$$

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

ตำแหน่งภายใน



จากภาพตัวอย่างจะสามารถเขียนสมการสมดุลความร้อนที่ตำแหน่ง  $m, n$

$$\dot{E}_{gen} + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st}$$

จาก  $\dot{E}_{gen} = 0$

$$\dot{q}_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)}A + \dot{q}_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)}A + \dot{q}_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)}A + \dot{q}_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)}A = \rho V c_p \frac{dT}{dt}$$

$$k\Delta y L \frac{\partial T}{\partial x} + k\Delta y L \frac{\partial T}{\partial x} + k\Delta x L \frac{\partial T}{\partial y} + k\Delta x L \frac{\partial T}{\partial y} = \rho V c_p \frac{dT}{dt}$$

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = k\Delta y L \frac{\partial T}{\partial x} + k\Delta y L \frac{\partial T}{\partial x} + k\Delta x L \frac{\partial T}{\partial y} + k\Delta x L \frac{\partial T}{\partial y}$$

จาก  $\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{m,n} \approx \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t}, \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x}, \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y}$

$$\text{และ } \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y}, \frac{T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y}$$

เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \rho V c_p \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} &= k \Delta y L \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + k \Delta y L \frac{T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} \\ &+ k \Delta x L \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} + k \Delta x L \frac{T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \end{aligned}$$

หารด้วย  $kL$  ทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{aligned} \frac{\rho c_p}{k} (\Delta x \Delta y) \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} &= \Delta y \frac{T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + \Delta y \frac{T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta x} + \Delta x \frac{T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \\ &+ \Delta x \frac{T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}}{\Delta y} \end{aligned}$$

จาก  $\Delta y = \Delta x$  จะสามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned} \frac{\rho c_p}{k} (\Delta x^2) \frac{T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p}{\Delta t} &= (T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + (T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + (T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \\ &+ (T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) \end{aligned}$$

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

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

ดังแสดงในหัวข้อที่ 7.3

จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

$$T_{m,n}^{p+1} - T_{m,n}^p = Fo(T_{m+1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + Fo(T_{m-1,n}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + Fo(T_{m,n+1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1}) + Fo(T_{m,n-1}^{p+1} - T_{m,n}^{p+1})$$

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



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก  
โค้ดโปรแกรมคำนวณที่ใช้ในงานวิจัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ค.1 โค้ดโปรแกรมคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิ billet ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนรอบใน ระหว่างการลำเลียง

```

clear all
t = ones(11,11);
B = zeros(121,121);
C = ones(121,1);
Ts = 32+273.15; %K
Tsurf = 950+273.15;
k= 30; %W/m-k
cp= 670; %j/kg-k
den= 7600; %kg/m3
alpha = k/(cp*den); % m2/s
Fo = alpha*1/((0.13/10)^2);
Pair = 0.4561;
Vair = 78.792*10^-6;
Prair = 0.704;
Kair = 55.58*10^-3;
alphaair = 112.113*10^-6;
Betaair = 1.3086*10^-3;
Nuforce = 144.556;
hc = 2.0333; %w/m2-k
Stephen = 5.67*10^-8;%W/m2.K4
hr = Emis*Stephen*(Ts+Tsurf)*((Ts^2)+(Tsurf^2));
ht = hr+hc;
t=t*Tsurf;
x=1;
qgrad =0;
qconv = 0;
tt =0;
tFinal = 3600;

for p=1:tFinal
    for i=1:11
        for j= 1:11
            if t(i,j) < 380+273.15
                Emis = 0.28;
            elseif t(i,j) >= 520+273.15
                Emis = 0.69;
            else
                Emis = 0.00304*(t(i,j)-273.15)-0.888;
            End

            hc = (-9.71829511239881*(10^-16)*
            t(i,j)^6)+(4.78142*(10^-12)* t(i,j)^5)+ (-9.59515*(10^-
            9)* t(i,j)^4)+(1.00518*(10^-5)* t(i,j)^3)+(-0.0058088*
            t(i,j)^2)+(1.7654335* t(i,j))-204.90154;

```

```

    if i==1 & j==1
    Bi =
    ((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2))+hc)*(0.13/10)/k;
    h = ((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2))+hc);
    C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(4*Bi*Fo*Ts);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*Bi*Fo)+(4*Fo);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -2*Fo;
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -2*Fo;

    elseif i==1 & j==11
    Bi =
    ((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2))+hc)*(0.13/10)/k;
    C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(4*Bi*Fo*Ts);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*Bi*Fo)+(4*Fo);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -2*Fo;
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -2*Fo;

    elseif i==11 & j==1
    Bi =
    ((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2))+hc)*(0.13/10)/k;
    C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(4*x*Bi*Fo*Ts);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*x*Bi*Fo)+(4*Fo);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -2*Fo;
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -2*Fo;

    elseif i==11 & j==11
    Bi =
    ((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2))+hc)*(0.13/10)/k;
    C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(4*x*Bi*Fo*Ts);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*x*Bi*Fo)+(4*Fo);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -2*Fo;
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -2*Fo;

    elseif i==1 & j~=1&11
    Bi =
    ((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2))+hc)*(0.13/10)/k;
    C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(2*Bi*Fo*Ts);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(2*Bi*Fo)+(4*Fo);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -Fo;
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -Fo;
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -2*Fo;

    elseif i==11 & j~=1&11
    Bi =
    ((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2))+hc)*(0.13/10)/k;
    C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(2*x*Bi*Fo*Ts);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(2*x*Bi*Fo)+(4*Fo);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -Fo;
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -Fo;
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -2*Fo;

    elseif j==1 & i~=1&11
    Bi =
    ((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2))+hc)*(0.13/10)/k;
    C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(2*Bi*Fo*Ts);
    B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(2*Bi*Fo)+(4*Fo);

```



```

B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -Fo;
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -Fo;
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -2*Fo;

elseif j==11 & i~=1&11
Bi =
((Emis*Stephen*(Ts+t(i,j))*((Ts^2)+(t(i,j)^2)))+hc)*(0.13/10)/k;
C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(2*Bi*Fo*Ts);
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(2*Bi*Fo)+(4*Fo);
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -Fo;
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -Fo;
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -2*Fo;
else
C(11*(i-1)+j,1)= t(i,j);
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*Fo);
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -Fo;
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -Fo;
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -Fo;
B(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -Fo;

end

end

end

T=B\C;
for m=1:11
for n=1:11
t(m,n)= T(11*(m-1)+n,1);
if m ==1 || n==1 ||m==11||n==11
grad = grad + (Emis*Stephen*((305^4)-(t(m,n)^4)));
qconv = qconv + (hc*(305-t(m,n)));
qtotal = grad+qconv;
end
end
end

for a=1:11
for b=1:11
if a==1 & b==1
tt = tt+t(a,b);
elseif a==1 & b==11
tt = tt+t(a,b);
elseif a==11 & b==1
tt = tt+t(a,b);
elseif a==11 & b==11
tt = tt+t(a,b);
elseif a==1 & b~=1&11
tt = tt+(2*t(a,b));
elseif a==11 & b~=1&11
tt = tt+(2*t(a,b));
elseif b==1 & a~=1&11
tt = tt+(2*t(a,b));
elseif b==11 & a~=1&11
tt = tt+(2*t(a,b));
else

```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

```

        tt = tt+(4*t(a,b));
        end

    end

end

tall(:, :, p) = t;
Qrad(p) = qrad;
Qconv(p) = qconv;
Qtotal(p) = qtotal;
Qratio(p) = qrad*100/qtotal;
if p == tFinal
    %contourf(t);colorbar;caxis([700 1250]);colormap(jet)
    contourf(t, 'ShowText', 'on');colormap(jet);
        colorbar;caxis([650 1200])
        str = sprintf('%.2f', p);
        text(0,0,['t = ' str ' sec'])
    end
    tavr = tt/(400);
    Tavr(p) = tavr;
    Tsmean =
(t(1,1)+t(2,1)+t(3,1)+t(4,1)+t(5,1)+t(6,1)+t(1,2)+t(1,3)+t(1,4)+t(1,5)
)/10;
    Tsmax(p) = t(6,6);
    Tsbar(p) = Tsmean;
    qrad = 0;
    qconv = 0;
    qtotal = 0;
    tt = 0;
end

```

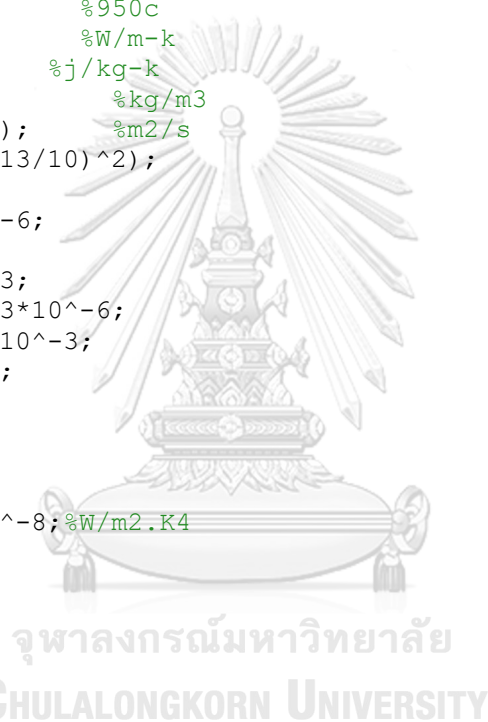
ค.2 โค้ดโปรแกรมคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิ Billet ในกรณีที่มีฉนวนกันความร้อนครอบใน  
ระหว่างการลำเลียง

```

clear all
t = ones(11,11);
B = zeros(41,41);
C = ones(41,1);
D = zeros(121,121);
E = ones(121,1);
J = ones(11,11);
Ts = 305.15;           %K 32c
Tsurf = 1223.15;      %950c
k= 30;                %W/m-k
cp= 670;              %j/kg-k
den= 7600;            %kg/m3
alpha = k/(cp*den);   %m2/s
Fo = alpha*1/((0.13/10)^2);
Pair = 0.4561;
Vair = 78.792*10^-6;
Prair = 0.704;
Kair = 55.58*10^-3;
alphaair = 112.113*10^-6;
Betaair = 1.3086*10^-3;
Nuforce = 144.556;
hc = 7.344;
hct = 0.12104;
hcb = 0.061629;
hcs = 0.20316;
Stephen = 5.67*10^-8; %W/m2.K4
Emis = 0.69;%
Emiss = 0.6;
t=t*Tsurf;
n=1;
a = (0.13/10)*6;
A = (0.18*4*6);
As = (0.18*4*6)/40;
tto=0;
thickness = 0.0254+(0.0127*1);
tFinal =3600;
count=0;
for p=1:tFinal

tto=0;
  TTin = 0;
  TTout= 0;
  TT= 0;
  Tin = t(6,6);
  ttmin=10^21;
  mm=0;

```



```

for m =1:1000
n=1;
  for i=1:11
    for j=1:11

      if t(i,j) < 380+273.15
        Emis = 0.28;
      elseif t(i,j) >= 520+273.15
        Emis = 0.69;
      else
        Emis = 0.00304*(t(i,j)-273.15)-0.888;
      end

      if i==1
        B(n,n)=(1/((1-Emis)/(Emis*a)))+a;
        B(n,41)= -a;
        C(n,1)= (Stephen*(t(i,j)^4))/((1-Emis)/(Emis*a));
        n=n+1;
      elseif j==1 & i~=1&&11
        B(n,n)=(1/((1-Emis)/(Emis*a)))+a;
        B(n,41)= -a;
        C(n,1)= (Stephen*(t(i,j)^4))/((1-Emis)/(Emis*a));
        n=n+1;
      elseif j==11 & i~=1&&11
        B(n,n)=(1/((1-Emis)/(Emis*a)))+a;
        B(n,41)= -a;
        C(n,1)= (Stephen*(t(i,j)^4))/((1-Emis)/(Emis*a));
        n=n+1;
      elseif i==11
        B(n,n)=(1/((1-Emis)/(Emis*a)))+a;
        B(n,41)= -a;
        C(n,1)= (Stephen*(t(i,j)^4))/((1-Emis)/(Emis*a));
        n=n+1;
      elseif i==6 & j==6
        for x = 1:40
          B(41,x)= -a;
        end
        B(41,41)=(1/((1-Emis)/(Emis*a)))+(40*a);
        C(41,1)= (Stephen*(Tin^4))/((1-Emis)/(Emis*a));

      end
    end
  end

T=B\C;

Qs = ((Stephen*(Tin^4))-T(41,1))/((1-Emis)/(Emis*A));
Tout = Tin-(-
(Qs)*((thickness/(0.11*A)))+(0.001/(20*A))+(0.001/(20*A)))));
hc = (-4.82258392948267*(10^-16)* Tout^6)+(2.37098*(10^-12)* Tout^5)+
(-4.75369452547982*(10^-9)* Tout^4)+(4.97426*(10^-6)* Tout^3)+(-
0.00287028723584581* Tout^2)+(0.871* Tout)-102;

Qrad = A*Emis*Stephen*((Ts^4)-(Tout^4));
Qconv = hc*A*(Ts-Tout);
tt = (abs(abs(Qrad+Qconv)-abs(Qs))/abs(Qs))*100;

```

```

TTin(m) = Tin;
TTout(m)= Tout;
TT(m)= tt;

if tt < ttmin && Tout > Ts
    ttmin=tt;
    mm=m;

end

Tin = Tin-0.1;
n=1;
    end
    Tout=TTout(mm);
    Tin= TTin(mm);

TTmin(p)= ttmin;
TTTin(p) = Tin;
TTTout(p)= Tout;

for i=1:11

    for j= 1:11

        if t(i,j) < 380+273.15
            Emis = 0.28;
        elseif t(i,j) >= 520+273.15
            Emis = 0.69;
        else
            Emis = 0.00304*(t(i,j)-273.15)-0.888;
        end
        hc = (-4.82258392948267*(10^-16)* t(i,j)^6)+(2.37098*(10^-12)*
t(i,j)^5)+ (-4.75369452547982*(10^-9)* t(i,j)^4)+(4.97426*(10^-6)*
t(i,j)^3)+(-0.00287028723584581*t(i,j)^2)+(0.871*t(i,j))-102;

        if i==1 && j==1
            Bi =
            (((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j)))*(((Tin)^2)+(t(i,j)^2)))/(((1-
Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
Emiss)/(Emiss*As))))/(1+(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j)))*(((Tin)^2)+(t(i,
j)^2)))/(((1-Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
Emiss)/(Emiss*As)))))*(((thickness/(0.11*As)))+(0.001/(20*As)))+(0.001/(
20*As)))+(hc*As)+((Emis*Stephen*(Ts+Tout)*((Ts^2)+(Tout^2))*As))^(-
1))))*(0.13/10)/(k*(0.13/10)^6);

            E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(4*Fo*Bi*Ts);
            D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*Bi*Fo)+(4*Fo);
            D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -2*Fo;
            D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -2*Fo;
            count=count+1;

```

```

elseif i==1 && j==11
    Bi =
    (((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,j)^2)))/((1-
    Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
    Emiss)/(Emiss*As))))/(1+(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,
    j)^2)))/((1-Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
    Emiss)/(Emiss*As))))*((thickness/(0.11*As))+(0.001/(20*As))+(0.001/(
    20*As)))+(hc*As)+((Emis*Stephen*(Ts+Tout)*((Ts^2)+(Tout^2))*As))^
    -1))))*(0.13/10)/(k*(0.13/10)^6);
    E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(4*Fo*Bi*Ts);
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*Bi*Fo)+(4*Fo);
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -2*Fo;
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -2*Fo;
    count=count+1;
elseif i==11 && j==1
    Bi =
    (((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,j)^2)))/((1-
    Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
    Emiss)/(Emiss*As))))/(1+(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,
    j)^2)))/((1-Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
    Emiss)/(Emiss*As))))*((thickness/(0.11*As))+(0.001/(20*As))+(0.001/(
    20*As)))+(hc*As)+((Emis*Stephen*(Ts+Tout)*((Ts^2)+(Tout^2))*As))^
    -1))))*(0.13/10)/(k*(0.13/10)^6);
    E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(4*Fo*Bi*Ts);
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*Bi*Fo)+(4*Fo);
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -2*Fo;
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -2*Fo;
    count=count+1;

elseif i==11 && j==11
    Bi =
    (((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,j)^2)))/((1-
    Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
    Emiss)/(Emiss*As))))/(1+(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,
    j)^2)))/((1-Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
    Emiss)/(Emiss*As))))*((thickness/(0.11*As))+(0.001/(20*As))+(0.001/(
    20*As)))+(hc*As)+((Emis*Stephen*(Ts+Tout)*((Ts^2)+(Tout^2))*As))^
    -1))))*(0.13/10)/(k*(0.13/10)^6);
    E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(4*Fo*Bi*Ts);
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*Bi*Fo)+(4*Fo);
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -2*Fo;
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -2*Fo;
    count=count+1;

elseif i==1 && j~=1&&11
    Bi =
    (((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,j)^2)))/((1-
    Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
    Emiss)/(Emiss*As))))/(1+(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,
    j)^2)))/((1-Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
    Emiss)/(Emiss*As))))*((thickness/(0.11*As))+(0.001/(20*As))+(0.001/(
    20*As)))+(hc*As)+((Emis*Stephen*(Ts+Tout)*((Ts^2)+(Tout^2))*As))^
    -1))))*(0.13/10)/(k*(0.13/10)^6);
    E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(2*Bi*Fo*Ts);
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(2*Bi*Fo)+(4*Fo);
    D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -Fo;

```

```

D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -2*Fo;
count=count+1;

elseif i==11 && j~=1&&11
Bi =
(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,j)^2)))/((1-
Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
Emiss)/(Emiss*As))))/(1+(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,
j)^2)))/((1-Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
Emiss)/(Emiss*As))))*((thickness/(0.11*As))+(0.001/(20*As))+(0.001/(
20*As)))+(hc*As)+((Emis*Stephen*(Ts+Tout)*((Ts^2)+(Tout^2))*As))^
-1))))*(0.13/10)/(k*(0.13/10)*6);
E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(2*Bi*Fo*Ts);
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(2*Bi*Fo)+(4*Fo);
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -2*Fo;
count=count+1;

elseif j==1 && i~=1&&11
Bi =
(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,j)^2)))/((1-
Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
Emiss)/(Emiss*As))))/(1+(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,
j)^2)))/((1-Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
Emiss)/(Emiss*As))))*((thickness/(0.11*As))+(0.001/(20*As))+(0.001/(
20*As)))+(hc*As)+((Emis*Stephen*(Ts+Tout)*((Ts^2)+(Tout^2))*As))^
-1))))*(0.13/10)/(k*(0.13/10)*6);
E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(2*Bi*Fo*Ts);
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(2*Bi*Fo)+(4*Fo);
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -2*Fo;
count=count+1;

elseif j==11 && i~=1&&11
Bi =
(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,j)^2)))/((1-
Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
Emiss)/(Emiss*As))))/(1+(((Emis*Stephen*(Tin+t(i,j))*((Tin)^2)+(t(i,
j)^2)))/((1-Emis)/(Emis*a))+(1/a)+((1-
Emiss)/(Emiss*As))))*((thickness/(0.11*As))+(0.001/(20*As))+(0.001/(
20*As)))+(hc*As)+((Emis*Stephen*(Ts+Tout)*((Ts^2)+(Tout^2))*As))^
-1))))*(0.13/10)/(k*(0.13/10)*6);
E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j)+(2*Bi*Fo*Ts);
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(2*Bi*Fo)+(4*Fo);
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -2*Fo;
count=count+1;

else
E(11*(i-1)+j,1)= t(i,j);
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j)=1+(4*Fo);
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+1)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-1)= -Fo;
D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j+11)= -Fo;

```

```

        D(11*(i-1)+j,11*(i-1)+j-11)= -Fo;
        count=count+1;
    end
end
end

Temp = D\E;

for i=1:11
    for j=1:11
        t(i,j)= Temp(11*(i-1)+j,1);
    end
end
tall(:, :, p) = t;

for a=1:11
    for b=1:11
        if a==1 & b==1
            tto = tto+t(a,b);
        elseif a==1 & b==11
            tto = tto+t(a,b);
        elseif a==11 & b==1
            tto = tto+t(a,b);
        elseif a==11 & b==11
            tto = tto+t(a,b);
        elseif a==1 & b~=1&11
            tto = tto+(2*t(a,b));
        elseif a==11 & b~=1&11
            tto = tto+(2*t(a,b));
        elseif b==1 & a~=1&11
            tto = tto+(2*t(a,b));
        elseif b==11 & a~=1&11
            tto = tto+(2*t(a,b));
        else จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
            tto = tto+(4*t(a,b));
        end
    end
end

tavr = tto/(400);
Tavr(p)= tavr;

end

```



ภาคผนวก ง

บทความตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร มก. (Kasetsart Engineering Journal)

ISSN : 0857-4154 ปีที่ 32 ฉบับที่ 107 (2562) : มกราคม - มิถุนายน 2562



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

การจำลองแบบเชิงตัวเลขสำหรับการแจกแจงอุณหภูมิในเหล็กแท่งในระหว่างการลำเลียง  
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

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์แบบสองมิติในการแก้ปัญหาการนำความร้อนภายในเหล็กแท่ง เพื่อคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็กแท่ง ซึ่งเหล็กแท่งในแบบจำลองจะถูกพิจารณาว่ามีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีการนำผลการแจกแจงอุณหภูมิของเหล็กแท่งที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณความร้อนที่สูญเสียสู่สิ่งแวดล้อมต่อเวลา เปรียบเทียบกับปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการอุ่นเหล็กแท่งที่ถูกลำเลียงมาเป็นเวลาต่างๆ ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

ผลงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการแจกแจงอุณหภูมิเหล็กแท่งที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีค่าแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัดจริงด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนในช่วงไม่เกิน  $\pm 9.827$  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  $\pm 9.827$  %. 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 ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )

$\partial$  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)

$\Delta t$  ช่วงระยะเวลาในการคำนวณ (s)

$T$  อุณหภูมิ (K)

$x, y$  แกนสองมิติในระบบ cartesian coordinate

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

$\alpha$  Thermal diffusivity ของ billet:

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

$\varepsilon$  emissivity ของ billet

$\rho$  ความหนาแน่นของ billet ( $kgm^{-3}$ )

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

## Subscripts

*force* การพาความร้อนแบบบังคับ

*free* การพาความร้อนแบบอิสระ

*rad* การแผ่รังสีความร้อน

*total* การพาความร้อนรวม

*s* ตำแหน่งผิวของ billet

$\infty$  อากาศแวดล้อม

*sur* พื้นผิวแวดล้อม

*m* ดัชนีในแนวแกน x

*n* ดัชนีในแนวแกน y

## Superscripts

*p* ที่เวลา p

*p + 1* ที่เวลา p+1

## 1. คำนำ

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

โดยทั่วไปนั้นเหล็กที่ออกจากเตาเผาจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 1100-1250 °C ซึ่งเหล็กเหล่านี้จะถูกลำเลียงไปยังเครื่องรีดเหล็กเพื่อทำการขึ้นรูป โดยในระหว่างการลำเลียง เหล็กจะมีการสูญเสียความร้อนไปสู่สิ่งแวดล้อม ผ่านการแผ่รังสีความร้อนรวมถึงการพาความร้อนโดยอากาศโดยรอบ ทำให้แท่งเหล็กมีอุณหภูมิลดลง ซึ่งในปัจจุบันมีการศึกษาการแก้ไขปัญหาค่าการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกของแท่งโดยการสร้างอุโมงค์ฉนวนกันความร้อนครอบในระหว่างการลำเลียงแท่งเหล็ก โดยถ้าเหล็กมีอุณหภูมิลดลงมาก อาจทำให้เกิดปัญหาในการขึ้นรูปได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กระหว่างการลำเลียงไปจนถึงก่อนเข้าเครื่องรีดเหล็ก เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น

การตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการวัดผ่านกล้องถ่ายภาพ

ความร้อน การวัดด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมมากเนื่องจากสามารถวัดได้สะดวก เพียงการถ่ายรูปผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนจากระยะไกล ถือเป็นการป้องกันอันตรายที่อาจเกิดจากความร้อนของแท่งเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1100-1250 °c ได้ แต่การวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นจะสามารถวัดอุณหภูมิของแท่งเหล็กได้เพียงแค่ที่พื้นผิวรอบนอกที่สามารถมองเห็นได้เท่านั้น ไม่สามารถวัดอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กได้ ดังนั้นการตรวจสอบอุณหภูมิของแท่งเหล็กด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาทำนายการแจกแจงอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กจึงถูกนำมาพิจารณามากขึ้นในปัจจุบัน ดังเช่นในงานวิจัยของ [1-4]

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนนั้น จำเป็นต้องใช้ความรู้ความเข้าใจในด้านการถ่ายเทความร้อนอย่างมากเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองที่มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับสภาวะของการถ่ายเทความร้อนจริงที่สุด นอกจากนี้การแก้ปัญหา ระบบสมการของแบบจำลองเพื่อคำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็กนั้นจำเป็นต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นตัวคำนวณ ซึ่งระเบียบวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหา ระบบสมการก็จะมีหลากหลายวิธีแตกต่างกันออกไป เช่น ในงานวิจัย [1,2,4] จะเลือกใช้ระเบียบวิธีแบบ finite-difference ในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็ก โดยที่ [1] จะพิจารณาแท่งเหล็กในสามมิติ ในขณะที่ [2] เลือกใช้ Crank-Nicholson method พิจารณาแท่งเหล็กในสองมิติ

งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียง รวมถึงถึงการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็ก รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน เพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กในระหว่างการลำเลียงในตำแหน่งที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิโดยตรงได้ นอกจากนี้ยังมีการนำ

ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมต่อเวลา รวมถึงพลังงานที่ต้องจ่ายเพิ่มเพื่ออุ่นแท่งเหล็กไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส หากแท่งเหล็กถูกทำให้เย็นลงผ่านการลำเลียงที่เวลาต่างๆ โดยระเบียบวิธีที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ Finite difference implicit method

## 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 2.1 ขั้นตอนการกำหนดปัญหา

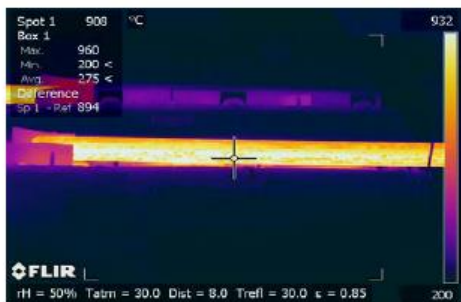
billet ที่ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีขนาดหน้าตัด 130\*130 มิลลิเมตรและมีความยาว 6 เมตร ซึ่งเป็นขนาดของ billet ที่ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเพื่อมาใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

โดยในงานวิจัยนี้พิจารณาว่า billet ไม่มีการถ่ายเทความร้อนในแนวตามยาวหรือแนวการเคลื่อนที่จึงพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของ billet ในสองมิติหรือในแนวหน้าตัดของ billet เท่านั้น ซึ่ง billet ในแบบจำลองจะมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเหมือนกันทั้ง 4 ด้าน

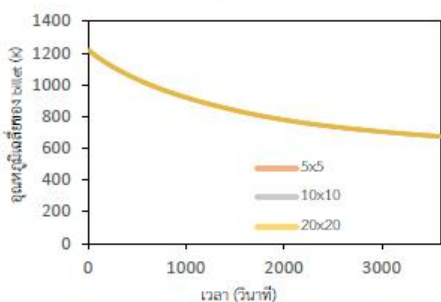
### 2.2 การเก็บข้อมูลอุณหภูมิของ billet ด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

เนื่องจากมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์และขั้นตอนการเก็บข้อมูล ทำให้สามารถทำการทดลองเก็บข้อมูลได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้ผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นมีเพียงแค่ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิววนอกของแท่งเหล็กเท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิที่วัดได้นั้นเป็นข้อมูลอุณหภูมิผิวของแท่งเหล็กหลังจากออกจาก Continuous Casting Machine และถูกนำมาตั้งพักอยู่นิ่งๆ แล้วทำการวัดอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที เป็นเวลา

60 นาที รวมทั้งสิ้น 60 ข้อมูล โดยกล้องถ่ายภาพความร้อนที่ใช้ในการทดลองยี่ห้อ FLIR รุ่น P640 มีช่วงอุณหภูมิที่วัดได้ -40 °C ถึง +2000 °C และมีค่า accuracy อยู่ที่ ±2°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 ของแบบจำลองที่แต่ละขนาดเซลล์ มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยเมื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากแบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 5x5 และ 10x10 เทียบกับ

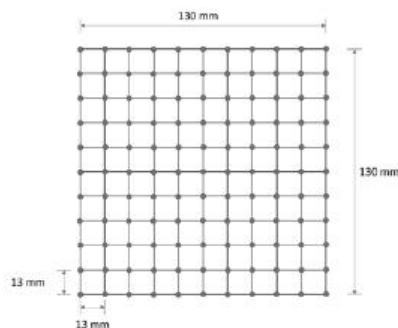
แบบจำลองที่มีขนาดเซลล์ 20x20 พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียงร้อยละ 0.1793 และ ร้อยละ 0.0229 ตามลำดับ

### 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 ในสองมิติ จึงถูกนำมาใช้ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายใน 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  $\dot{q}_{loss}$  โดยค่านี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ถูกพิจารณาและ

อุณหภูมิที่ตำแหน่งนั้นๆ thermal fluxes  $\dot{q}_{loss}$  จะขึ้นอยู่กับการปัจจัย 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 อยู่นิ่ง แสดงดังสมการ:

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

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

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

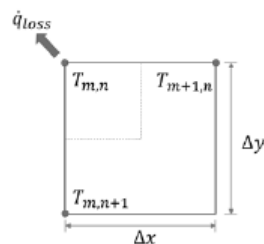
$$h_{total} = h_{force} + h_{free} + h_{rad}$$

## 2.6 การ Discretization ของสมการการถ่ายเทความร้อนของแต่ละตำแหน่งภายใน billet

จากแบบจำลองของ billet ที่กล่าวไปข้างต้น สมการการถ่ายเทความร้อนที่แต่ละตำแหน่งจะถูก

พิจารณาและจัดรูปใหม่เพื่อสร้างระบบสมการที่มีความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่ง ซึ่งใช้คำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิภายใน billet ต่อไป

### 2.6.1 สมการ finite difference ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งมุม



ภาพที่ 4 แสดงตำแหน่งมุมของ billet ในแบบจำลอง

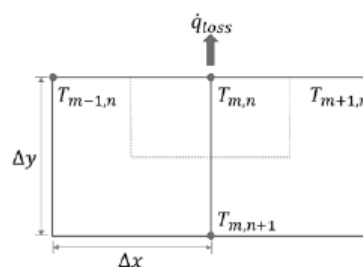
เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

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

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

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

### 2.6.2 สมการ finite difference ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งขอบ



ภาพที่ 5 แสดงตำแหน่งขอบของ billet ในแบบจำลอง

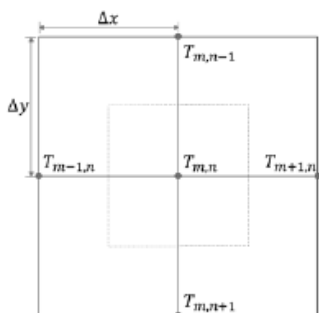
เขียนสมการ finite difference ได้ดังนี้

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

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 ของการถ่ายเทความร้อนที่ตำแหน่งภายในของ 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

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

### 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 องศาเซลเซียสในทุกตำแหน่งภายใน billet อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม  $T_\infty$  และพื้นผิวแวดล้อม  $T_{sur}$  เท่ากันที่ 32 องศาเซลเซียส และมีช่วงระยะเวลาในแต่ละขั้นการคำนวณ 1 วินาที

#### 2.7.1 ค่าคงที่และค่าคุณสมบัติของสารที่ใช้ในแบบจำลอง

ตารางที่ 1 แสดงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของ billet ที่ใช้ในแบบจำลอง

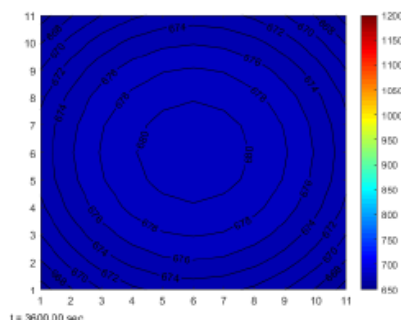
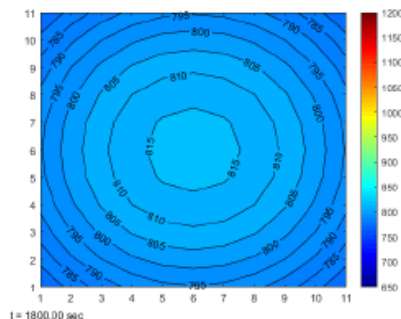
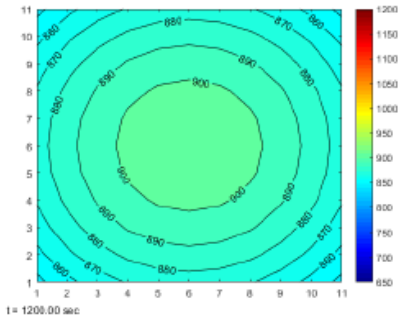
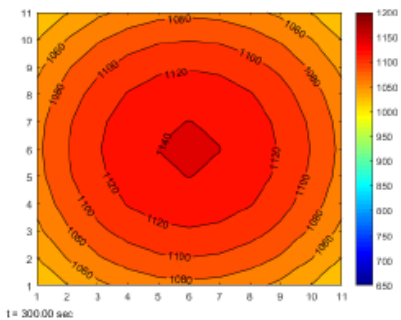
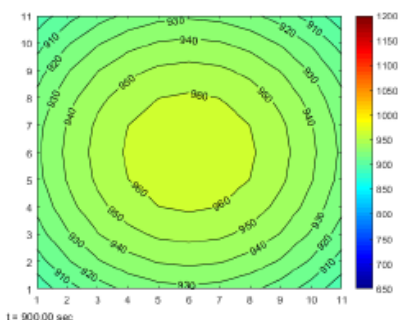
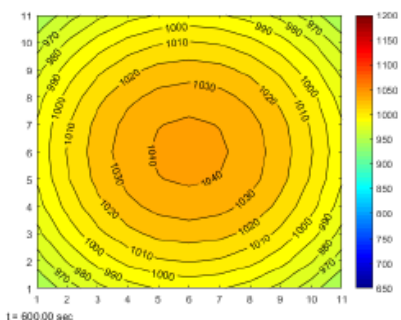
ค่าคุณสมบัติของสาร	ตัวแปร	ค่า
Thermal conductivity ของ billet	$k$	30 W/m K
Density ของ billet	$\rho$	7600 kg/m <sup>3</sup>
Specific heat ของ billet (constant pressure)	$c_p$	670 J/kg - K
ระยะห่างระหว่าง node ภายใน billet	$\Delta x, \Delta y$	0.013 m
Emissivity ของ billet	$\epsilon$	$\epsilon = 0.28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

\* 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



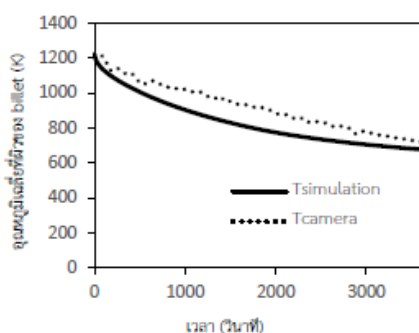
ภาพที่ 7 ตัวอย่างแผนภาพการแจกแจงอุณหภูมิ billet ที่ได้จากแบบจำลองที่เวลา 300, 600, 900, 1200, 1800 และ 3600 วินาที

จากนั้นข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ที่ได้จากแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจริงผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน ดังแสดงในภาพที่ 8 เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นเป็นข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของแท่งเหล็กที่ถูกตั้งพักอยู่นิ่งๆ ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการวัดจริงนั้น จึงต้องถูกพิจารณาที่สภาวะเดียวกันซึ่งคือสภาวะที่มีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนแบบอิสระกับการแผ่รังสีความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเท่านั้น และข้อมูลอุณหภูมิจากแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบจะคำนวณจากค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่ตำแหน่งผิวนอกของ billet เท่านั้น ไม่รวมที่ตำแหน่งภายในของ billet

จากแผนภูมิจะเห็นว่าอุณหภูมิของ billet มีแนวโน้มในการลดลงใกล้เคียงกันและมีความคลาดเคลื่อน



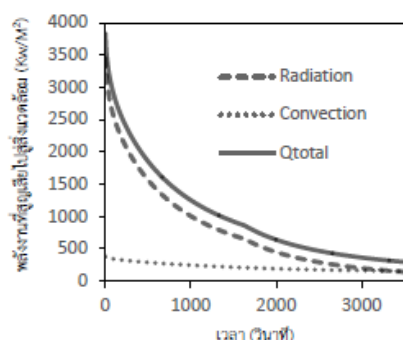
ของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ เฉลี่ยที่ 9.827 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากความคลาดเคลื่อนของค่าคุณสมบัติต่างๆ ของ billet ที่ใช้ในการคำนวณซึ่งไม่สามารถระบุค่าได้อย่างแม่นยำ และรวมถึงความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมในระหว่างการลำเลียงของ billet ในแบบจำลอง ซึ่งอาจถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณเมื่อเทียบกับสถานะจริง



ภาพที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิวของ billet ที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

นอกจากนี้ยังมีการนำข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิของ billet ที่เวลาต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองมาคำนวณกลับเพื่อหาพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน เปรียบเทียบกับพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมทั้งหมด ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งพบว่าในช่วงแรกที่ billet มีอุณหภูมิสูงกว่า 900 องศาเซลเซียส หรือที่เวลาก่อนหน้าที่ที่ 18 ของการลำเลียงพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่าร้อยละ 80 จะเป็นผลมาจากการแผ่รังสีความร้อน แต่เมื่ออุณหภูมิของ billet ลดลง ผลของการพาความร้อนต่อความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนเมื่ออุณหภูมิของ billet อยู่ที่ประมาณ 700 องศาเซลเซียสหรือที่เวลาประมาณหน้าที่ที่ 50 ของการลำเลียงผลของการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนต่อความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดจะมีค่าใกล้เคียงกัน จนผลจากการพาความร้อนจะเริ่มสูงกว่าการแผ่รังสี

ความร้อนที่อุณหภูมิ 686 องศาเซลเซียส หรือที่เวลาประมาณหน้าที่ที่ 56 ของการลำเลียง

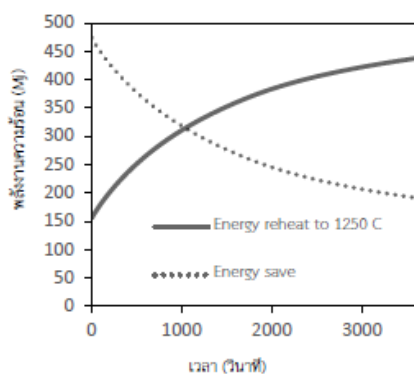


ภาพที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปสู่สิ่งแวดล้อมจากการพาความร้อนกับการแผ่รังสีความร้อนและพลังงานความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด

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 รวมถึงพลังงานที่สามารถประหยัดได้หาก billet ถูกลำเลียงไปสู่ Reheating furnace เป็นระยะเวลาต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 10

โดยพลังงานที่สามารถประหยัดได้จะถูกคำนวณจากพลังงานสูงสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการอุ่น billet ลบด้วยพลังงานที่ใช้จริงในการอุ่น billet ที่ผ่านการลำเลียงมาเป็นเวลาต่างๆ ไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้พลังงานสูงสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการอุ่น billet คำนวณจากพลังงานที่ใช้ในการอุ่น billet เย็นจากอุณหภูมิจากอ่างหรืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 32 องศาเซลเซียสไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้

ว่ายิ่งใช้ระยะเวลาในการลำเลียงมากขึ้น 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 ถูกลำเลียงเป็นระยะเวลาต่าง ๆ

#### 4. สรุปผลการวิจัย

จากแบบจำลองเชิงตัวเลขของการถ่ายเทความร้อนของ billet ในระหว่างการลำเลียงที่ถูกแสดงในงานวิจัยนี้ ทำให้สามารถวิเคราะห์การแจกแจงอุณหภูมิของ billet ในสองมิติได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการวัดผ่านกล้องถ่ายภาพความร้อน พบว่ามีแนวโน้มของการลดลงของอุณหภูมิคล้ายคลึงกันแต่ยังมีความคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งเวลาเดียวกันค่อนข้างสูง ในด้านการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมของ billet พบว่าในช่วงที่ billet มีอุณหภูมิสูง ความร้อนที่สูญเสียส่วนใหญ่จะเป็นผลจากการแผ่รังสีความร้อน แต่ผลของการพาความร้อน

ต่อความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของ billet ลดลง ซึ่งข้อมูลนี้อาจเป็นตัวช่วยในการพิจารณาถึงปัจจัยในการสูญเสียความร้อนของ billet ในงานวิจัยต่อไปในอนาคตได้

งานวิจัยนี้อาจเป็นพื้นฐานให้กับงานวิจัยในอนาคตเพื่อปรับปรุงและพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการแจกแจงอุณหภูมิใน billet ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิ รวมถึงการสูญเสียพลังงานความร้อนของเหล็กแท่งในกระบวนการผลิตเหล็กได้ในอนาคต

#### 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.

ภาคผนวก จ

ข้อมูลพลังงานความร้อนที่ได้จากการคำนวณในกรณีต่าง ๆ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จ.1 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนและมีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ

ตารางที่ จ.1 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่ไม่มีฉนวนกันความร้อนและมีฉนวนกันความร้อนที่ความหนาต่าง ๆ

กรณี	พลังงานใช้ในการอุ่น billet ไปที่ 1250 องศาเซลเซียส (MJ)	พลังงานที่สามารถประหยัด (MJ)
ไม่มีฉนวนกันความร้อน	453.770	175.118
มีฉนวนกันความร้อนหนา 0.5 นิ้ว	234.076	394.812
มีฉนวนกันความร้อนหนา 1 นิ้ว	201.855	427.033
มีฉนวนกันความร้อนหนา 1.5 นิ้ว	188.572	440.316
มีฉนวนกันความร้อนหนา 2 นิ้ว	181.277	447.611

จ.2 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่จนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

ตารางที่ จ.2 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่จนวนกันความร้อนมีเพียงแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

กรณีแผ่นสแตนเลส มีค่า emissivity	พลังงานใช้ในการอุ่น billet ไปที่ 1250 องศาเซลเซียส (MJ)	พลังงานที่สามารถ ประหยัด (MJ)
0.1	282.758	346.129
0.2	339.089	289.798
0.3	372.305	256.583
0.4	394.224	234.644
0.5	410.336	218.552
0.6	427.766	201.122
0.7	435.960	192.928
0.8	442.751	186.137
0.9	449.401	179.486

จ.3 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่อุณหภูมิความร้อนมีแผ่นเซรามิคไฟเบอร์หนา 0.5 นิ้ว 1 นิ้ว และ 2 นิ้ว และมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

ตารางที่ จ.3 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่อุณหภูมิความร้อนมีความหนา 0.5 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

กรณีแผ่นสแตนเลส มีค่า emissivity	พลังงานใช้ในการอุ่น billet ไปที่ 1250 องศาเซลเซียส (MJ)	พลังงานที่สามารถ ประหยัด (MJ)
0.1	221.986	406.902
0.2	230.172	398.716
0.3	232.565	396.322
0.6	234.076	394.812
0.9	234.007	394.881

ตารางที่ จ.4 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่อุณหภูมิความร้อนมีความหนา 1 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

กรณีแผ่นสแตนเลส มีค่า emissivity	พลังงานใช้ในการอุ่น billet ไปที่ 1250 องศาเซลเซียส (MJ)	พลังงานที่สามารถ ประหยัด (MJ)
0.1	197.973	430.915
0.2	200.691	428.197
0.3	201.422	427.446
0.6	201.855	427.033
0.9	201.962	426.926

ตารางที่ จ.5 พลังงานความร้อนที่ใช้ในการอุ่น billet ที่เวลา 60 นาทีของการลำเลียงไปที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียสและพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในกรณีที่อุณหภูมิความร้อนมีความหนา 2 นิ้วและมีแผ่นสแตนเลสที่มีค่า emissivity ต่าง ๆ ครอบคลุมในระหว่างการลำเลียง

กรณีแผ่นสแตนเลส มีค่า emissivity	พลังงานใช้ในการอุ่น billet ไปที่ 1250 องศาเซลเซียส (MJ)	พลังงานที่สามารถ ประหยัด (MJ)
0.1	179.983	448.904
0.2	180.802	448.085
0.3	181.030	447.858
0.4	181.277	447.611
0.5	181.113	447.774



## บรรณานุกรม

- [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.  
doi:10.1007/s12613-010-0333-5
- [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.  
doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.056
- [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.  
doi:10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.022
- [5] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2013). Foundations of Heat Transfer (sixth ed.). Singapore: JohnWiley & Sons, Inc.
- [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.  
doi:10.2320/matertrans.M2014055
- [7] Sadiq, H., Wong, M. B., Tashan, J., Al-Mahaidi, R., & Zhao, X. L. (2013). Determination of Steel Emissivity for the Temperature Prediction of Structural Steel Members in Fire. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(2), 167-173. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000607
- [8] Engineering ToolBox. Retrieved from [https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](https://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายปวร สุขชัยพานิชพงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	1 สิงหาคม 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดราชบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2559 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	38/2 หมู่ 8 ตำบล บ้านสิงห์ อำเภอ โพนทราย จังหวัด ราชบุรี 70120
ผลงานตีพิมพ์	บทความตีพิมพ์ในวิศวกรรมสาร มก. (Kasetsart Engineering Journal) ISSN : 0857-4154 ปีที่ 32 ฉบับที่ 107 (2562) : มกราคม - มิถุนายน 2562