

การศึกษาระดับปริญญาโทของการแจกแจงอุณหภูมิในแง่หลักบริเวณทางออกของเตาเผาเหล็ก
โดยคำนึงถึงผลจากการสูญเสียความร้อนที่ช่องเปิด

นายเอกรัษฎ์ สมเรียวงค์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A NUMERICAL STUDY OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A BILLET AT THE
REHEATING FURNACE DISCHARGE DOORS TAKING THE DOORS HEAT LOSS INTO
ACCOUNT

Mr. Eakarach Somriewwongkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2011
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาเชิงตัวเลขของการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก
บริเวณทางออกของเตาเผาเหล็กโดยคำนึงถึงผลจากการ
สูญเสียความร้อนที่ช่องเปิด

โดย

นายเอกวิทย์ สมเวียวงศ์กุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์บุญภรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาทิต ภัคดี)

เอกรัษฎ์ สมเรียวงศ์กุล : การศึกษาเชิงตัวเลขของการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก บริเวณทางออกของเตาเผาเหล็กโดยคำนึงถึงผลจากการสูญเสียความร้อนที่ช่องเปิด. (A NUMERICAL STUDY OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A BILLET AT THE REHEATING FURNACE DISCHARGE DOORS TAKING THE DOORS HEAT LOSS INTO ACCOUNT) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. จิตติน แดงเที่ยง, 112 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กบริเวณช่องเปิดโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแก้สมการกำกับด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก และศึกษาปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิอันจะเป็นแนวทางในการป้องกันปัญหาการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กที่ไม่สม่ำเสมอได้

เตาเผาเหล็กที่ศึกษาเป็นเตาแบบผลักดัน (pusher type reheating furnace) ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะพิจารณาปัญหาเป็นแบบสองมิติในสภาวะคงตัว และกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้มีการแผ่รังสีความร้อนจากแก๊สและผนังเตา การพาความร้อน และถ่ายเทความร้อนจากการเปิดและปิดประตูเตา ใช้การคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไฮเดล (Gauss-Seidel iteration) ทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก เปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่าที่วัดได้จากโรงงานด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กโดยปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ของแบบจำลองแล้ววิเคราะห์ผลว่าตัวแปรใดมีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก

จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขกับค่าที่ตรวจวัดได้จากพบว่ามีความสอดคล้องกันด้านคุณภาพ การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตามีค่ามากที่สุด ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิมากที่สุดคืออุณหภูมิภายในของพื้นเตา จึงควรหุ้มฉนวนที่พื้นเตาเพื่อลดการสูญเสียความร้อนส่วนใหญ่และส่งผลให้อุณหภูมิภายในของพื้นเตามีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การหุ้มฉนวนที่ประตูเตาเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดการสูญเสียความร้อนที่ไม่จำเป็นและช่วยให้อุณหภูมิในแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

5270589421: MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : REHEATING FURNACE / TEMPERATURE DISTRIBUTION / OPENING

EAKARACH SOMRIEWWONGKUL : A NUMERICAL STUDY OF THE
TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A BILLET AT THE REHEATING FURNACE
DISCHARGE DOORS TAKING THE DOORS HEAT LOSS INTO ACCOUNT.

ADVISOR : ASST. PROF. CHITTIN TANGTIENG, Ph.D., 112 pp.

This research is conducted to study the heat transfer of the billet at the openings by formulating a mathematical model and solving the governing equation by a numerical method to predict the temperature distribution in the billet. The effects of crucial factors on the temperature distribution in the billet are investigated to prevent the non-uniformity of the temperature distribution problem.

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

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

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2011

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้มอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้รวมทั้งให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าตลอดจนให้การสนับสนุนด้านการงานและการศึกษาอันเป็นกำลังใจและแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จนสำเร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญาภรณ์ ประธานกรรมการผู้ช่วยศาสตราจารย์มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล กรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาทิต ภัคดี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางในการแก้ไขและเติมเต็มงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วงและมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

กราบขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาค่าเล่าเรียนเป็นจำนวน 4 ภาคการศึกษาอันเป็นการแบ่งเบาภาระทางการเงินของผู้วิจัย และเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

กราบขอบพระคุณมารดาและครอบครัวที่ให้การดูแลและสนับสนุนข้าพเจ้าทั้งในด้านการเรียนและชีวิตความเป็นอยู่มาโดยตลอดงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณคุณประยงค์ โสมิทธิวิเศษ ผู้จัดการโรงงานพระประแดงเซฟตีล จำกัด ที่ให้โอกาสเข้าตรวจวัดข้อมูลในโรงงาน และให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการเผาเหล็กและเตาเผาเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย

กราบขอบพระคุณสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยที่ให้การสนับสนุนและให้โอกาสเข้าตรวจวัดข้อมูลในโรงงานที่เข้าร่วมโครงการในการทำงานวิจัยนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 เตาเผาเหล็ก	15
3.2 ข้อมูลน้ำมันเตา.....	16
3.3 ทฤษฎีการเผาไหม้.....	17
3.3.1 การเผาไหม้ทางทฤษฎี	17
3.3.2 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี	17
3.3.3 การเผาไหม้ทางปฏิบัติ	18

3.3.4 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ทางปฏิบัติ	21
3.4 การแผ่รังสีความร้อนจากแก๊ส	21
3.5 สมดุลความร้อนของแท่งเหล็ก	25
บทที่ 4 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข	32
4.1 สมการการนำความร้อนสองมิติ	32
4.2 วิธีสมดุลพลังงาน	34
4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	36
4.4 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีสมดุลพลังงาน	37
4.5 ขั้นตอนการคำนวณซ้ำด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล	45
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง	47
5.1 ผลการตรวจสอบโปรแกรมเบื้องต้น	47
5.1.1 การตรวจสอบการนำความร้อนหนึ่งมิติ	47
5.1.2 การตรวจสอบความอิสระในการกำหนดระยะระหว่างจุด (Δx และ Δy)	48
5.2 ผลการคำนวณ	48
5.2.1 ผลการคำนวณซ้ำ	48
5.2.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน	49
5.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน	52
5.4 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน ของแท่งเหล็ก	53
บทที่ 6 บทสรุป	71
6.1 สรุปผลการสร้างแบบจำลอง	71
6.2 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองจากสภาวะการทำงานจริง	71

6.3 สรุปผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก.....	72
รายการอ้างอิง.....	74
ภาคผนวก.....	76
ภาคผนวก ก ข้อมูลของเตาเผาเหล็ก.....	77
ภาคผนวก ข ขั้นตอนและวิธีการคำนวณต่าง ๆ	80
ภาคผนวก ค ข้อมูลการตรวจวัดจากโรงงาน	105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	112

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ผลการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แผ่นเหล็ก โดยมีความร้อนสูญเสียออกสู่ฐานรองแผ่นเหล็กไป 21.3 kW	6
ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาก่อนปรับปรุงความดันภายในเตา	10
ตารางที่ 2.3 แสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาหลังปรับปรุงความดันภายในเตา	11
ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย	16
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของน้ำมันเตา	17
ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงต่าง ๆ	20
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนสูงสุดของอุณหภูมิที่จุดเดียวกัน และเวลาในการคำนวณเมื่อกำหนดค่า Δx ต่างกัน เทียบกับกรณี $\Delta x = 0.0025$ m	48
ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณซ้ำ	48
ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิของแท่งเหล็ก	50
ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อน	50
ตารางที่ 5.5 ร้อยละความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าจากการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแท่งเหล็ก	52
ตารางที่ 5.6 ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก	54
ตารางที่ 5.7 ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก	56
ตารางที่ 5.8 ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก	58
ตารางที่ 5.9 ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก	59
ตารางที่ 5.10 ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก	61
ตารางที่ 5.11 ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก ..	63
ตารางที่ 5.12 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก	65
ตารางที่ 5.13 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก	67
ตารางที่ 5.14 ผลจากการป้องกันอากาศรั่วเข้าสู่เตาต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก	69
ตารางที่ 5.15 ผลจากการป้องกันอากาศรั่วเข้าสู่เตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก	69

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	เตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน.....	4
รูปที่ 2.2 (a)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน.....	5
รูปที่ 2.2 (b)	ความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กที่พิจารณา.....	5
รูปที่ 2.3	อุณหภูมิบริเวณแนวกลางที่ผิวบนและล่างของแผ่นเหล็ก.....	6
รูปที่ 2.4	ลักษณะเตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อนที่ศึกษา.....	7
รูปที่ 2.5	การถ่ายเทความร้อนในเตาเผาเหล็ก.....	7
รูปที่ 2.6	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของแผ่นเหล็กจากผลการคำนวณกับค่าที่ตรวจวัดได้.....	8
รูปที่ 2.7	ความร้อนที่สูญเสียต่อพื้นที่ช่องเปิดเมื่อมีอากาศรั่วเข้าไปในปริมาณต่าง ๆ.....	9
รูปที่ 2.8	เวลาที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นในกระบวนการเผาเหล็กเมื่อมีการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิด ขนาดต่าง ๆ.....	9
รูปที่ 2.9	องค์ประกอบระบบต่างๆของเตาเผา.....	10
รูปที่ 2.10 (a)	การถ่ายเทความร้อนในส่วน preheat และส่วน heating.....	13
รูปที่ 2.10 (b)	การถ่ายเทความร้อนในส่วน soaking.....	13
รูปที่ 2.11	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริง.....	14
รูปที่ 3.1	กราฟสำหรับใช้หาค่า a และ b ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ.....	23
รูปที่ 3.2	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำในของผสมที่ความดันรวม 1 atm.....	23
รูปที่ 3.3	ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของคาร์บอนไดออกไซด์.....	24
รูปที่ 3.4	ตัวคูณปรับแก้เมื่อพิจารณาของผสมระหว่างไอน้ำกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	24
รูปที่ 3.5	การถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากแท่งเหล็กภายในเตาเผา.....	26
รูปที่ 3.6	แสดงผิวปิดสองผิว.....	28
รูปที่ 3.7	แสดงการแผ่รังสีจากผนังเตาด้านข้างเข้าสู่แท่งเหล็ก.....	28
รูปที่ 3.8	แสดงการไหลของอากาศรั่วผ่านหัวแท่งเหล็ก.....	30
รูปที่ 3.9	แสดงการแผ่รังสีจากแท่งเหล็กไปสู่ประตูเหล็ก.....	31
รูปที่ 4.1	การแบ่งจุดวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบ.....	32
รูปที่ 4.2	สมมูลความร้อนในปริมาตรควบคุมของจุด (m,n).....	34
รูปที่ 4.3	ปริมาตรควบคุมที่ศึกษา.....	36
รูปที่ 4.4	เงื่อนไขขอบเขตของปริมาตรควบคุมที่ศึกษา.....	36

รูปที่ 4.5 การแบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็นชั้นเล็ก ๆ 37

รูปที่ 4.6 สมดุลพลังงานของจุด (0,H) 38

รูปที่ 4.7 สมดุลพลังงานของจุด (x,H) 39

รูปที่ 4.8 สมดุลพลังงานของจุด (L,H) 39

รูปที่ 4.9 สมดุลพลังงานของจุด (L,y) 40

รูปที่ 4.10 สมดุลพลังงานของจุด (L,0) 41

รูปที่ 4.11 สมดุลพลังงานของจุด (x,0) 42

รูปที่ 4.12 สมดุลพลังงานของจุด (0,0) 43

รูปที่ 4.13 สมดุลพลังงานของจุด (0,y) 44

รูปที่ 4.14 สมดุลพลังงานของจุด (x,y) 44

รูปที่ 4.15 แผนภูมิสายงานของการคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล 46

รูปที่ 5.1 ผลการตรวจสอบการนำความร้อนหนึ่งมิติ 47

รูปที่ 5.2 การแจกแจงอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ 49

รูปที่ 5.3 การแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก 50

รูปที่ 5.4 แผนผังการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากแท่งเหล็ก 51

รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวยาวของแท่งเหล็กที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ.... 53

รูปที่ 5.6 ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก 55

รูปที่ 5.7 ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่อความสูญเสียผ่านประตูยั้งเหล็ก 56

รูปที่ 5.8 ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก 57

รูปที่ 5.9 ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก 59

รูปที่ 5.10 ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก 62

รูปที่ 5.11 ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก 64

รูปที่ 5.12 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก 66

รูปที่ 5.13 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก 67

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$(A/F)_{actual}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจริง	kg_{air}/kg_{fuel}
$(A/F)_{stoic}$	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี	kg_{air}/kg_{fuel}
A_c	พื้นที่หน้าตัด	m^2
$A_{c,furnace}$	พื้นที่หน้าตัดของเตาเผาเหล็ก	m^2
A_g	พื้นที่ผิวของแก๊ส	m^2
$A_{opening}$	พื้นที่ของช่องเปิดเมื่อเปิดประตูยิงเหล็ก	m^2
A_s	พื้นที่ผิวของแท่งเหล็ก	m^2
A_w	พื้นที่ของผนังเตา	m^2
a_c	ค่า a ของคาร์บอนไดออกไซด์	-
a_{tip}	ค่า a เฉลี่ยบริเวณด้านข้างของแท่งเหล็ก	-
a_{top}	ค่า a เฉลี่ยบริเวณด้านบนของแท่งเหล็ก	-
a_w	ค่า a ของไอน้ำ	-
b_c	ค่า b ของคาร์บอนไดออกไซด์	-
b_{tip}	ค่า b เฉลี่ยบริเวณด้านข้างของแท่งเหล็ก	-
b_{top}	ค่า b เฉลี่ยบริเวณด้านบนของแท่งเหล็ก	-
b_w	ค่า b ของไอน้ำ	-
c_p	ความจุความร้อนจำเพาะ	$kJ/kg.K$
D_h	hydraulic diameter	m
E_{cv}	พลังงานสุทธิในปริมาตรควบคุม	kJ
F_{12}	ตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวที่หนึ่งไปยังพื้นผิวที่สอง	-
F_{sa}	ตัวประกอบการมองเห็นจากแท่งเหล็กไปยังช่องเปิด	-
F_{sd}	ตัวประกอบการมองเห็นจากแท่งเหล็กไปยังประตูยิงเหล็ก	-
F_{ss}	ตัวประกอบการมองเห็นจากแท่งเหล็กไปยังแท่งเหล็ก	-

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
F_{sw}	ตัวประกอบการมองเห็นจากแท่งเหล็กไปยังผนังเตา	-
f_{close}	สัดส่วนเวลาการปิดประตู	-
f_{open}	สัดส่วนเวลาการเปิดประตู	-
g	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง	m/s ²
H_b	ความสูงของแท่งเหล็ก	m
H_f	ความสูงของเตาเผาเหล็ก	m
h_a	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ	W/m ² .K
h_g	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแก๊ส	W/m ² .K
$\overline{h_L}$	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับเฉลี่ย	W/m ² .K
h_{nat}	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระ	W/m ² .K
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/m.K
k_{ins}	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน	W/m.K
k_{iron}	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กหล่อ	W/m.K
k_m	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของปูนทนไฟ	W/m.K
L_b	ความยาวของแท่งเหล็ก	m
L_f	ความยาวของเตาเผาเหล็ก	m
L_e	Mean beam length	m
$L_{e,tip}$	Mean beam length บริเวณด้านข้างของแท่งเหล็ก	m
$L_{e,top}$	Mean beam length บริเวณด้านบนของแท่งเหล็ก	m
MW	มวลโมเลกุล	kg/kmol
m_{air}	มวลของอากาศ	kg
m_{fuel}	มวลของเชื้อเพลิง	kg
\dot{m}_{air}	อัตราการไหลของอากาศ	kg/s
$\dot{m}_{air,close}$	อัตราการไหลของอากาศขณะปิดประตูถังเหล็ก	kg/s
$\dot{m}_{air,leak}$	อัตราการไหลของอากาศรั่วเฉลี่ยตลอดเวลาการผลิต	kg/s

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\dot{m}_{air,open}$	อัตราการไหลของอากาศขณะเปิดประตูยึงเหล็ก	kg/s
\dot{m}_{flue}	อัตราการไหลของไอเสีย	kg/s
\dot{m}_{fuel}	อัตราการไหลของเชื้อเพลิง	kg/s
$\dot{m}_{product}$	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์	kg/s
$\dot{m}_{reactant}$	อัตราการไหลของสารตั้งต้น	kg/s
n	จำนวนโมล	kmol
Nu_L	Nusselt number เฉลี่ย	-
Pr	Prandtl number	-
p_c	ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์	atm
p_w	ความดันย่อยของไอน้ำ	atm
Q_{cv}	ความร้อนรวมที่เข้าหรือออกปริมาตรควบคุมผ่านผิวควบคุม	kJ
q	อัตราการถ่ายเทความร้อน	kW
q_{amb}	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยแผ่รังสีกับสิ่งแวดล้อมภายนอก	kW
q_{cond}	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน	kW
$q_{conv,a}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากอากาศรั่วเข้าเตา	kW
$q_{conv,g}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากแก๊ส	kW
q_{cv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมที่เข้าหรือออกปริมาตรควบคุมผ่านผิวควบคุม	kW
q_{door}	อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านประตูยึงเหล็ก	kW
q_{in}	อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ห้องเหล็ก	kW
$q_{nat,conv}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบอิสระ	kW
q_{out}	อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากห้องเหล็ก	kW
q_{rad}	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน	kW
$q_{rad,d}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยแผ่รังสีกับประตูยึงเหล็ก	kW

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$q_{rad,g}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยแผ่รังสีจากแก๊ส	kW
$q_{rad,w}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยแผ่รังสีจากผนังเตา	kW
q_{ws}	อัตราการแผ่รังสีจากผนังเตาสู่แท่งเหล็ก	kW
q''_{door}	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย	kW/m ²
Ra	Rayleigh number	-
Re	Reynolds number	-
T_{∞}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอก	K
T_a	อุณหภูมิของอากาศ	K
T_{amb}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกเตา	K
T_{av}	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแก๊สกับแท่งเหล็ก	K
T_d	อุณหภูมิภายในของประตูยั้งเหล็ก	K
T_f	อุณหภูมิฟิล์ม	K
T_g	อุณหภูมิของแก๊ส	K
T_{in}	อุณหภูมิภายใน	K
T_{out}	อุณหภูมิภายนอก	K
T_s	อุณหภูมิของพื้นผิวที่พิจารณา	K
T_w	อุณหภูมิของผนังเตา	K
V_{air}	ความเร็วของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา	m/s
V_{flue}	อัตราเร็วของไอเสีย	m/s
V_g	ปริมาตรของแก๊ส	m ³
W_f	ความกว้างของเตาเผาเหล็ก	m
X_{ins}	ความหนาของฉนวน	m
X_{iron}	ความหนาของเหล็กหล่อ	m
X_m	ความหนาของปูนทนไฟ	m
Y	สัดส่วนโดยมวล	kg/kg _{total}

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$\%O_2$	ร้อยละโดยโมลของออกซิเจนที่ตรวจวัดได้	%
α	Thermal diffusivity	m^2/s
α_g	สัมประสิทธิ์การดูดซับรังสีของแก๊ส	-
β	สัมประสิทธิ์ของการขยายตัวเชิงปริมาตร	K^{-1}
ϵ_c	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	-
ϵ_{eff}	effective emissivity	-
ϵ_g	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊ส	-
$\epsilon_{g,av}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สที่อุณหภูมิเฉลี่ย	-
$\epsilon_{g,av,tip}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สบริเวณด้านข้างของแท่งเหล็กที่อุณหภูมิเฉลี่ย	-
$\epsilon_{g,av,top}$	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สบริเวณด้านบนของแท่งเหล็กที่อุณหภูมิเฉลี่ย	-
ϵ_{iron}	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของเหล็กหล่อ	-
ϵ_s	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแท่งเหล็ก	-
ϵ_w	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำ	-
ϵ_{wall}	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผนังเตา	-
$\Delta\epsilon$	ตัวคูณปรับแก้เมื่อพิจารณาของผสมระหว่างไอน้ำกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	-
$\Delta\epsilon_{tip}$	ตัวคูณปรับแก้เมื่อพิจารณาของผสมระหว่างไอน้ำกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บริเวณด้านข้างของแท่งเหล็ก	-
$\Delta\epsilon_{top}$	ตัวคูณปรับแก้เมื่อพิจารณาของผสมระหว่างไอน้ำกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บริเวณด้านบนของแท่งเหล็ก	-
λ	สัดส่วนระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี	-
μ	viscosity	$kg/m.s$
ν	kinematic viscosity	m^2/s

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
χ	สัดส่วนโดยโมล	kmol/kmol _{total}
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ	kg/m ³
ρ_{flue}	ความหนาแน่นของไอเสีย	kg/m ³
σ	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์	W/m ² .K ⁴

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าของประเทศไทยถือว่าเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศ เนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำของอุตสาหกรรมหลักอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า เครื่องจักรกล ฯลฯ กระบวนการผลิตเหล็กเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานมากเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนการใช้พลังงานต่อมูลค่าการผลิตหรือความเข้มข้นของการใช้พลังงาน (energy intensity) ซึ่งอุตสาหกรรมผลิตเหล็กจัดเป็นอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของอุตสาหกรรมอื่นโดยรวม ประกอบกับปัจจุบันธุรกิจการก่อสร้าง และอุตสาหกรรมอื่น ๆ ได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้มีความต้องการใช้เหล็กมากขึ้น อุตสาหกรรมเหล็กจึงต้องขยายตัวตามเพื่อผลิตเหล็กให้เพียงพอต่อความต้องการ ส่งผลให้อุตสาหกรรมเหล็กต้องใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

ในกระบวนการเผาเหล็ก เตาเผาเหล็ก (reheating furnace) เป็นอุปกรณ์หลักทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่เหล็กเพื่อให้เหล็กอ่อนตัวและง่ายต่อการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กอื่น ๆ ต่อไป พลังงานที่ใช้ในเตาเผาเหล็กเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น แก๊สธรรมชาติ และน้ำมันเตา เป็นต้น โดยทั่วไปอุณหภูมิภายในเตาจะมีค่าอยู่ในช่วง $1,100^{\circ}\text{C}$ - $1,250^{\circ}\text{C}$ จึงจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงจำนวนมากเพื่อทำความร้อนให้ได้ถึงอุณหภูมิดังกล่าว การป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากเตาจึงเป็นเรื่องสำคัญที่ผู้ผลิตต้องพิจารณาเป็นอันดับต้น ๆ เพื่อลดการสูญเสียพลังงาน และลดต้นทุนในส่วนของการเผาไหม้ อย่างไรก็ตาม การสูญเสียความร้อนออกจากเตาในบางกรณีไม่สามารถป้องกันได้หรือป้องกันได้ยาก เช่น การสูญเสียผ่านช่องเปิดต่าง ๆ ตามรอยรั่วหรือรอยแตกของเตา รวมถึงการสูญเสียผ่านประตูทางออกของเตาขณะเปิดหรือแม้กระทั่งขณะปิดประตูก็ตาม นอกจากการสูญเสียความร้อนออกจากเตาจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานแล้วยังมีผลทำให้ชิ้นเหล็กภายในเตามีอุณหภูมิลดลงด้วย ส่งผลให้เหล็กมีอุณหภูมิไม่เหมาะสมต่อการนำไปแปรรูปหรือการແຈກແຈງอุณหภูมิของชิ้นเหล็กไม่สม่ำเสมอ เมื่อนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูปอาจทำให้ชิ้นเหล็กเกิดความเสียหายได้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมากทั้งในเรื่องสูญเสียวัตถุดิบ อัตราการผลิตลดลง สูญเสียเวลาในการหยุดทำงานในสายการผลิต และต้องใช้พลังงานในการเผาเหล็กเพิ่มขึ้น จะเห็นว่าหากการແຈກແຈງอุณหภูมิของชิ้นเหล็กไม่สม่ำเสมอจะทำให้เกิดความสูญเสียตามมาหลายประการ

วิทยานิพนธ์นี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลจากการสูญเสียความร้อนออกจากเตาว่ามีผลกระทบอย่างไรต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก โดยจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กว่าเหมาะสมต่อการนำไปแปรรูปหรือไม่ เป็นแนวทางในการวิเคราะห์เพื่อปรับปรุง และพัฒนาเตาเผาเหล็กให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อแท่งเหล็กอันจะนำมาซึ่งความสูญเสียดังที่กล่าวมา

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กบริเวณทางออกของเตาเผาเหล็ก
2. เพื่อศึกษาเชิงตัวเลขจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลที่ได้จากการตรวจวัดจากโรงงาน
3. เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กโดยให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างแก๊สร้อน ผนังเตา และแท่งเหล็ก
2. ศึกษาเชิงตัวเลขจากแบบจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องสองมิติ (2-D finite different method) และการคำนวณแบบเกาส์-ไซเดล เพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก และเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลที่ตรวจวัดจากโรงงาน
3. วิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปสู่การแก้ไข ปรับปรุง และพัฒนาให้การแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กสม่ำเสมอได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองที่เหมาะสมกับกระบวนการเผาเหล็กที่ศึกษา
2. มีวิธีการสำหรับทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กบริเวณทางออกของเตา
3. มีความรู้ความเข้าใจถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กมากขึ้นเพียงใด นำไปสู่การป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากอุณหภูมิของแท่งเหล็กไม่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป และลดปัญหาการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กไม่สม่ำเสมอได้

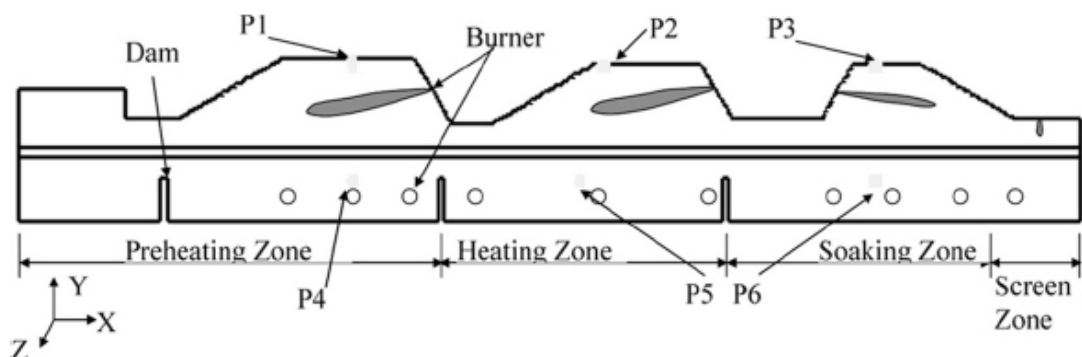
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาชนิดและการทำงานของเตาเผาเหล็กที่ใช้ในประเทศไทย
2. ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก
3. สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก
4. ตรวจสอบวัดค่าที่จำเป็นต่าง ๆ จากเตาเผาเหล็กในโรงงาน
5. นำค่าที่ตรวจวัดได้มาวิเคราะห์และเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลข
6. เปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน
7. แปรเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อผลการคำนวณที่สนใจและวิเคราะห์ผลที่ได้เพื่อนำไปสู่การปรับปรุง พัฒนา และแก้ไขปัญหาในปัจจุบันสรุปผล
8. ทำรายงานฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่การศึกษาวิจัย

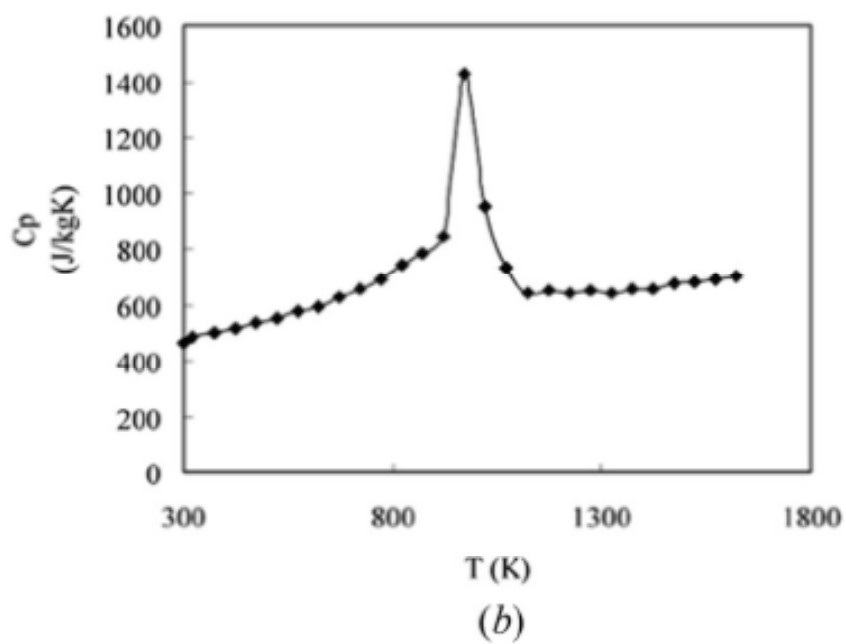
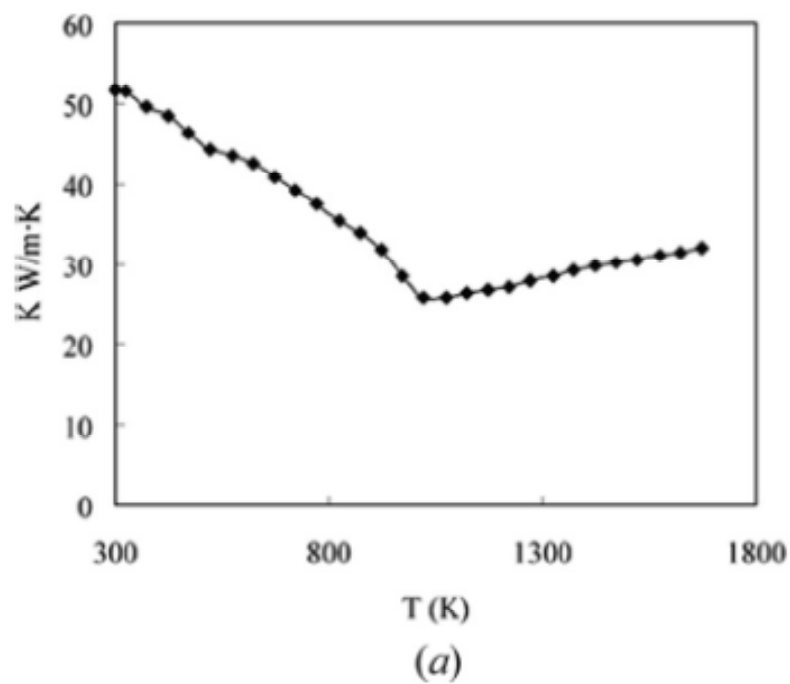
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Huang et al., 2008 กล่าวถึงการให้ความร้อนแก่เหล็กแผ่นว่าต้องให้ความร้อนจนกระทั่งเหล็กอ่อนตัวก่อนนำไปรีดขึ้นรูป และการแจกแจงอุณหภูมิในแผ่นเหล็กอย่างสม่ำเสมอเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ เพื่อศึกษาการแจกแจงอุณหภูมิในแผ่นเหล็กผู้วิจัยจึงสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในเตาขึ้น เตาที่ศึกษาเป็นเตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน (walking beam reheating furnace) แสดงในรูปที่ 2.1 ใช้ coke oven gas เป็นเชื้อเพลิงเผาเหล็กแผ่นคาร์บอนต่ำ (low carbon steel slab) มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) และค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) ขึ้นกับอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 2.2 และกำหนดให้การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สร้อน ผงังเตา และแผ่นเหล็ก มีการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเป็นหลัก ผลการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนแสดงในตารางที่ 2.1 เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการคำนวณพบว่าความร้อนที่เข้าสู่แผ่นเหล็กจากการแผ่รังสีมีค่า 97.1% ของความร้อนทั้งหมด ส่วนความร้อนจากการพาความร้อนมีค่าเพียง 2.9% เท่านั้น และเมื่อนำผลการคำนวณไปเปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดจริงพบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แผ่นเหล็กมีความคลาดเคลื่อน 3.3% ของพลังงานทั้งหมด และจากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่คำนวณได้กับค่าจากการตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 2.3 พบว่าบริเวณผิวล่างของแผ่นเหล็กมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่บริเวณผิวบนของแผ่นเหล็กจะเห็นว่าค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแก๊ส เนื่องจากการวัดอุณหภูมิผิวบนของแผ่นเหล็กจะติดอุปกรณ์ตรวจวัดไว้ที่ผิวแผ่นเหล็ก อุปกรณ์ตรวจวัดวัดจึงสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรงและได้รับการแผ่รังสีจากแก๊สและผงังเตาจึงทำให้ค่าที่ตรวจวัดได้มีอุณหภูมิสูงกว่าที่ควรจะเป็น



รูปที่ 2.1 เตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน (Huang et al., 2008)



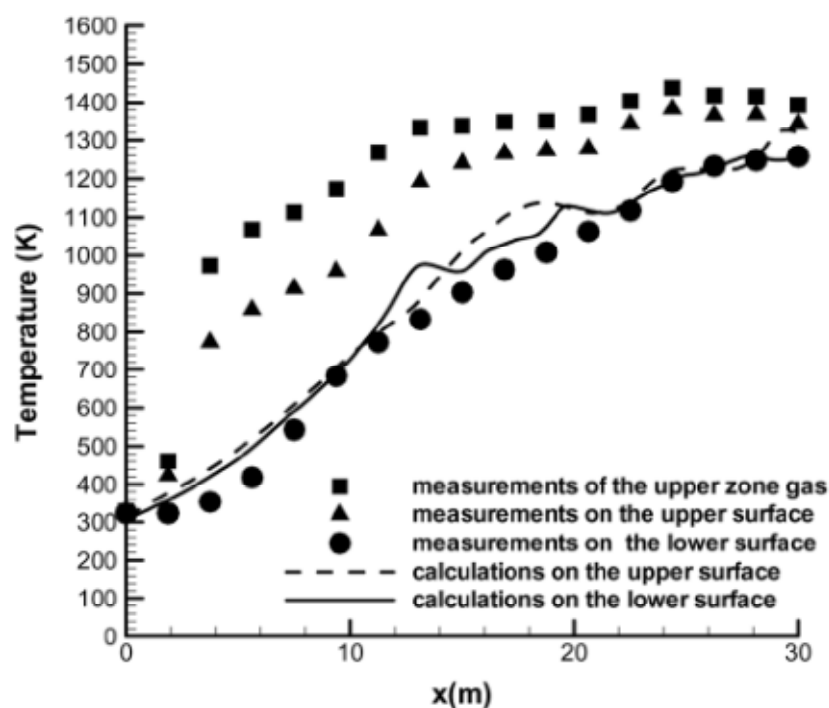
รูปที่ 2.2 (a) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน

(b) ความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กที่พิจารณา

(Huang et al., 2008)

ตารางที่ 2.1 ผลการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แผ่นเหล็ก โดยมีความร้อนสูญเสียออกสู่ฐานรองแผ่นเหล็กไป 21.3 kW (Huang et al., 2008)

	Radiation rate (kW)	Convection rate (kW)	Radiation rate (kW)	Convection rate (kW)	Total rate (kW)
	Upper surface		Lower surface		
Preheating zone	2,318.1	132.6	2,213.9	106.8	4,771.4
Heating zone	2,221.4	41.4	1,979.6	40.2	4,282.7
Soaking zone	1,043.0	10.6	1,104.8	12.6	2,171.1
Screen zone	416.2	12.4	267.9	2.8	699.3
Total rate	5,998.7 (48.0%)	197 (1.6%)	5,566.2 (44.6%)	162.4 (1.3%)	1,1924.5
	Near-wall side surface		The other side surface		
Total rate	270.6 (2.2%)	11.6 (0.1%)	292.9 (2.3%)	12.6 (0.1%)	587.7 (4.7%)

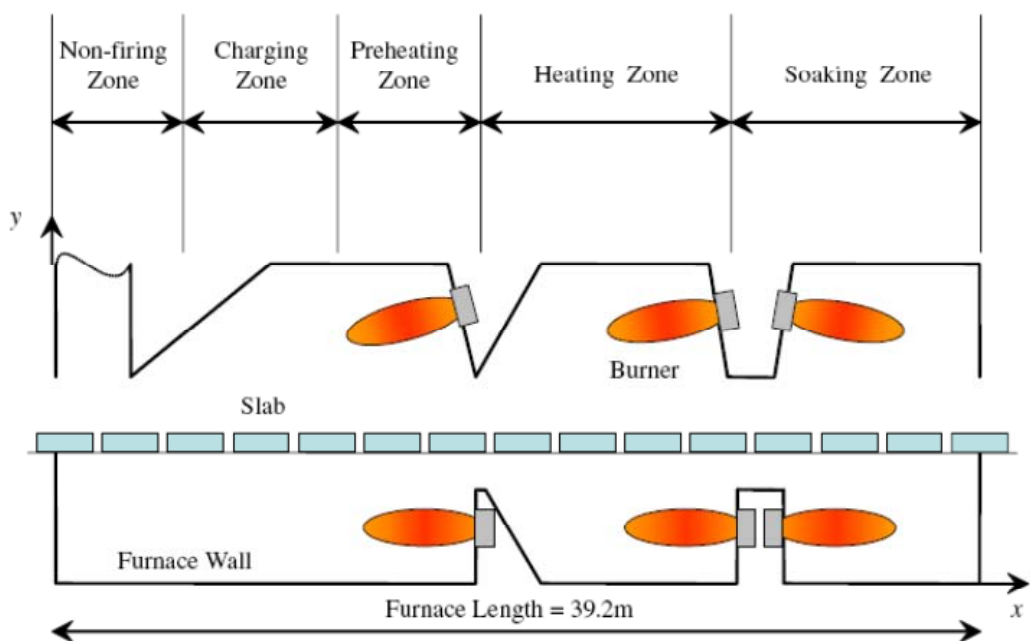


รูปที่ 2.3 อุณหภูมิบริเวณแนวกลางที่ผิวบนและล่างของแผ่นเหล็ก

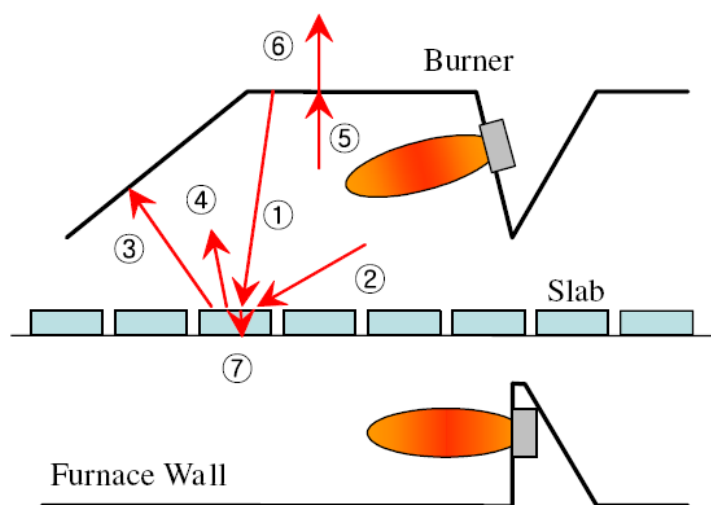
(Huang et al., 2008)

Kim, 2007 ได้สังเกตเห็นความสำคัญของการแจกแจงอุณหภูมิในแผ่นเหล็ก เนื่องจากการแจกแจงอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลผลิต จึงสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเผาเหล็กเพื่อทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแผ่นเหล็ก โดยให้ความสำคัญกับการแผ่รังสีความร้อนเป็นหลักเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของแผ่นเหล็กมีการแผ่รังสีมากกว่า 90% ของการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด เตาเผาเหล็กที่ศึกษาเป็น

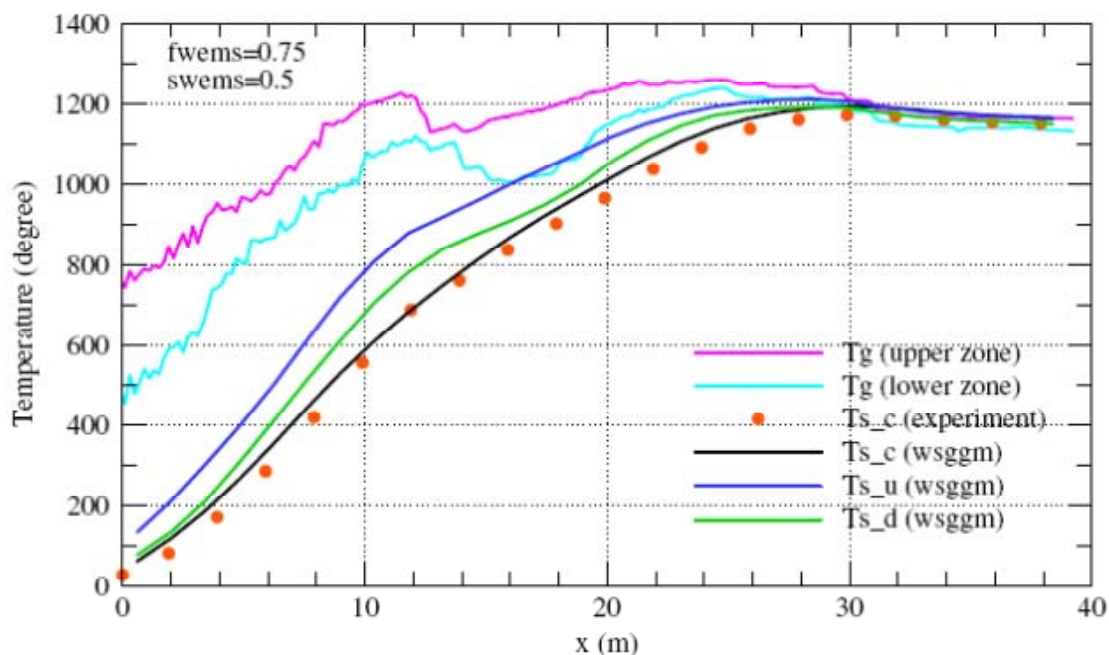
เตาแบบคานเลื่อนแสดงในรูปที่ 2.4 มีการถ่ายเทความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่หมายเลข 1 คือการแผ่รังสีจากผนังเตาสู่แผ่นเหล็ก หมายเลข 2 คือการแผ่รังสีจากแก๊สสู่แผ่นเหล็ก หมายเลข 3 คือการแผ่รังสีจากแผ่นเหล็กสู่ผนังเตา หมายเลข 4 คือการแผ่รังสีจากแผ่นเหล็กสู่แก๊ส หมายเลข 5 คือการแผ่รังสีจากแก๊สสู่ผนังเตา หมายเลข 6 คือการนำความร้อนผ่านผนังเตาสู่ภายนอก และ หมายเลข 7 คือการนำความร้อนภายในแท่งเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่าที่ตรวจวัดได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากดังแสดงในรูปที่ 2.6 เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผนังเตาและแผ่นเหล็กมีค่า 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 ลักษณะเตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อนที่ศึกษา (Kim, 2007)



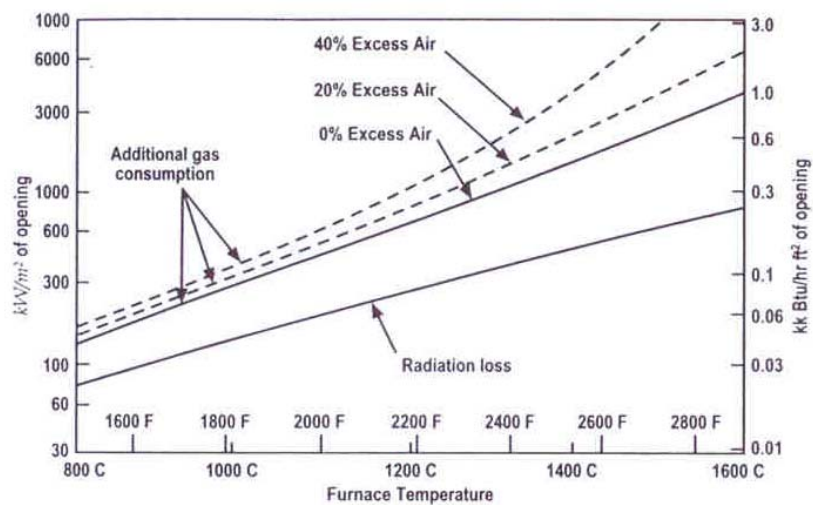
รูปที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนในเตาเผาเหล็ก (Kim, 2007)



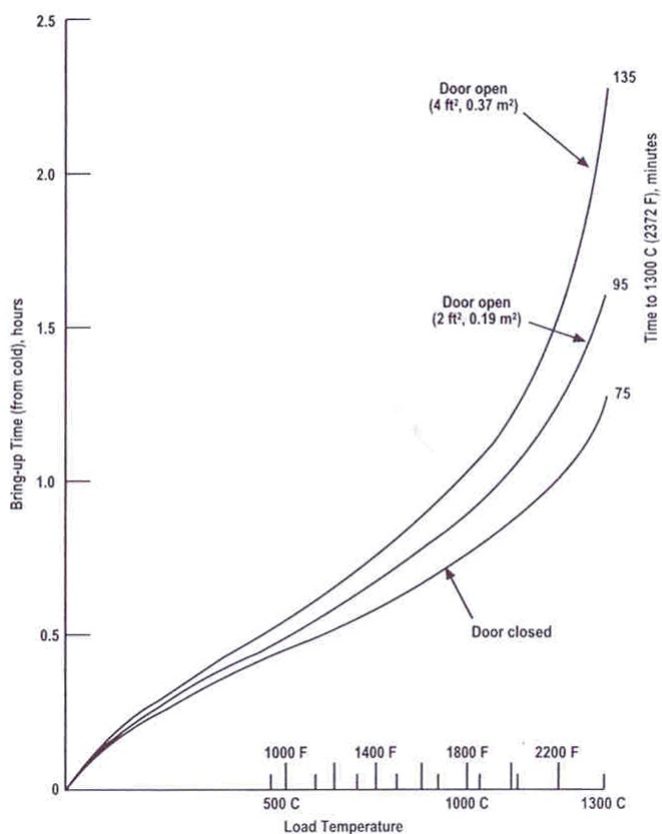
รูปที่ 2.6 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิของแผ่นเหล็กจากผลการคำนวณกับค่าที่ตรวจวัดได้

(Kim, 2007)

Trinks et al., 2004:189 กล่าวถึงการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดต่าง ๆ โดยการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนอันเกิดจากแก๊สที่ไหลออกจากเตาผ่านช่องเปิดดังกล่าว เช่น ช่องประตูเข้า-ออก, ช่องรอยแตกต่าง ๆ ฯลฯ ซึ่งแก๊สดังกล่าวจะพาความร้อนออกไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะที่ประตูเปิดจะสูญเสียความร้อนมากที่สุด การสูญเสียจากการพาความร้อนอาจเกิดจากอากาศเย็นที่รั่วเข้าสู่เตาก็เป็นได้หากความดันภายในเตามีค่าต่ำกว่าความดันนอกเตา (ความดันบรรยากาศ) ซึ่งในกรณีนี้จะสูญเสียความร้อนมากกว่ากรณีที่เกิดรั่วออกจากเตา ยิ่งช่องเปิดมีขนาดใหญ่มากเท่าไร อากาศเย็นจะสามารถไหลเข้าสู่เตาได้มากเท่านั้น เป็นผลทำให้สูญเสียความร้อนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ยิ่งไปกว่านั้นอากาศเย็นที่รั่วเข้าสู่เตาจะทำให้ชั้นเหล็กมีอุณหภูมิลดลง ทำให้ไม่ได้ผลผลิตตามที่ต้องการ หรือทำให้ต้องใช้เวลาในกระบวนการเผามากขึ้นเพื่อให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ส่งผลให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น



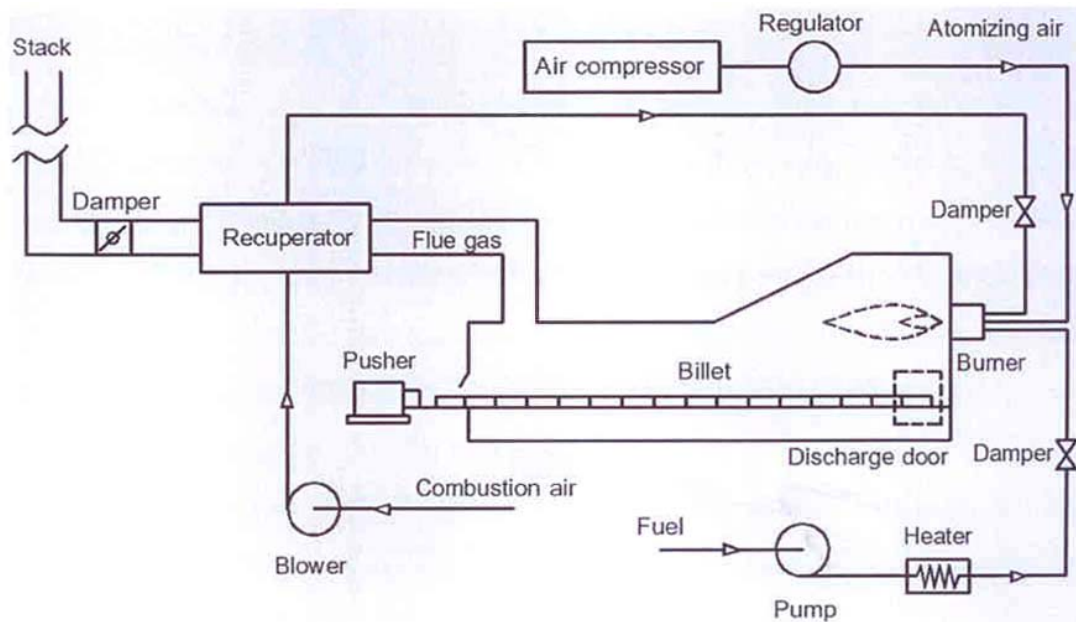
รูปที่ 2.7 ความร้อนที่สูญเสียต่อพื้นที่ช่องเปิดเมื่อมีอากาศรั่วเข้าในปริมาณต่าง ๆ
(ข้อมูลจาก British Gas R&D Report MRS E 478 โดย N.Ficker อ้างถึงใน Trinks et al., 2004)



รูปที่ 2.8 เวลาที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นในกระบวนการเผาเหล็กเมื่อมีการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิด
ขนาดต่าง ๆ

(ข้อมูลจาก British Gas R&D Report MRS E 478 โดย N.Ficker อ้างถึงใน Trinks et al., 2004)

ศุภณัฐ เจริญ, 2551 ศึกษาผลจากการเพิ่มความดันภายในเตาเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศเย็นรั่วเข้าสู่เตาโดยใช้กฎอนุรักษ์พลังงานในการคำนวณโดยกำหนดให้ปริมาตรควบคุมเป็นปริมาตรภายในเตาเผาเหล็กไม่รวมชิ้นเหล็กที่อยู่ภายใน เตาเผาเหล็กที่พิจารณาเป็นเตาเผาเหล็กแบบผลัดตัน มีองค์ประกอบระบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 สมดุลความร้อนที่พิจารณาก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงแสดงในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ตามลำดับ จากผลการคำนวณก่อนการปรับปรุงจะเห็นว่าความร้อนสูญเสียจากอากาศรั่วเข้าสู่เตามีเพียง 0.03% ในขณะที่ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดจากการแผ่รังสีมีค่าถึง 1.61% จากความร้อนทั้งหมด และจากการคำนวณค่าความร้อนหลังการปรับปรุงความดันภายในเตา ความร้อนสูญเสียจากอากาศรั่วเข้าสู่เตาถูกกำจัดไปแล้ว แต่ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดยังคงมีอยู่เท่าเดิม ซึ่งอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กลดลงได้



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบระบบต่างๆของเตาเผา

(ศุภณัฐ เจริญ, 2551)

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาก่อนปรับปรุงความดันภายในเตา

ความร้อนเข้า	kW	%	ความร้อนออก	kW	%
1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	4,562.25	79.07	1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	2,354.61	40.81

ความร้อนเข้า	kW	%	ความร้อนออก	kW	%
2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	11.46	0.20	2) ความร้อนสัมผัสที่ออกไปกับไอเสีย	2,133.81	36.98
3) ความร้อนที่เกิดจากการก่อตัวของสเกล	282.74	4.90	3) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล	56.82	0.98
4) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่ recuperator	911.57	15.80	4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	93.11	1.61
5) ความร้อนจากอากาศรั่วเข้าสู่เตา	1.52	0.03	5) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	32.84	0.57
			6) ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (เช่นหลังคาและพื้นเตา)	1,098.36	19.04
ความร้อนเข้ารวม	5,769.53	100.00	ความร้อนออกรวม	5,769.53	100.00

ตารางที่ 2.3 แสดงรายละเอียดสมดุลความร้อนของเตาเผาหลังปรับปรุงความดันภายในเตา

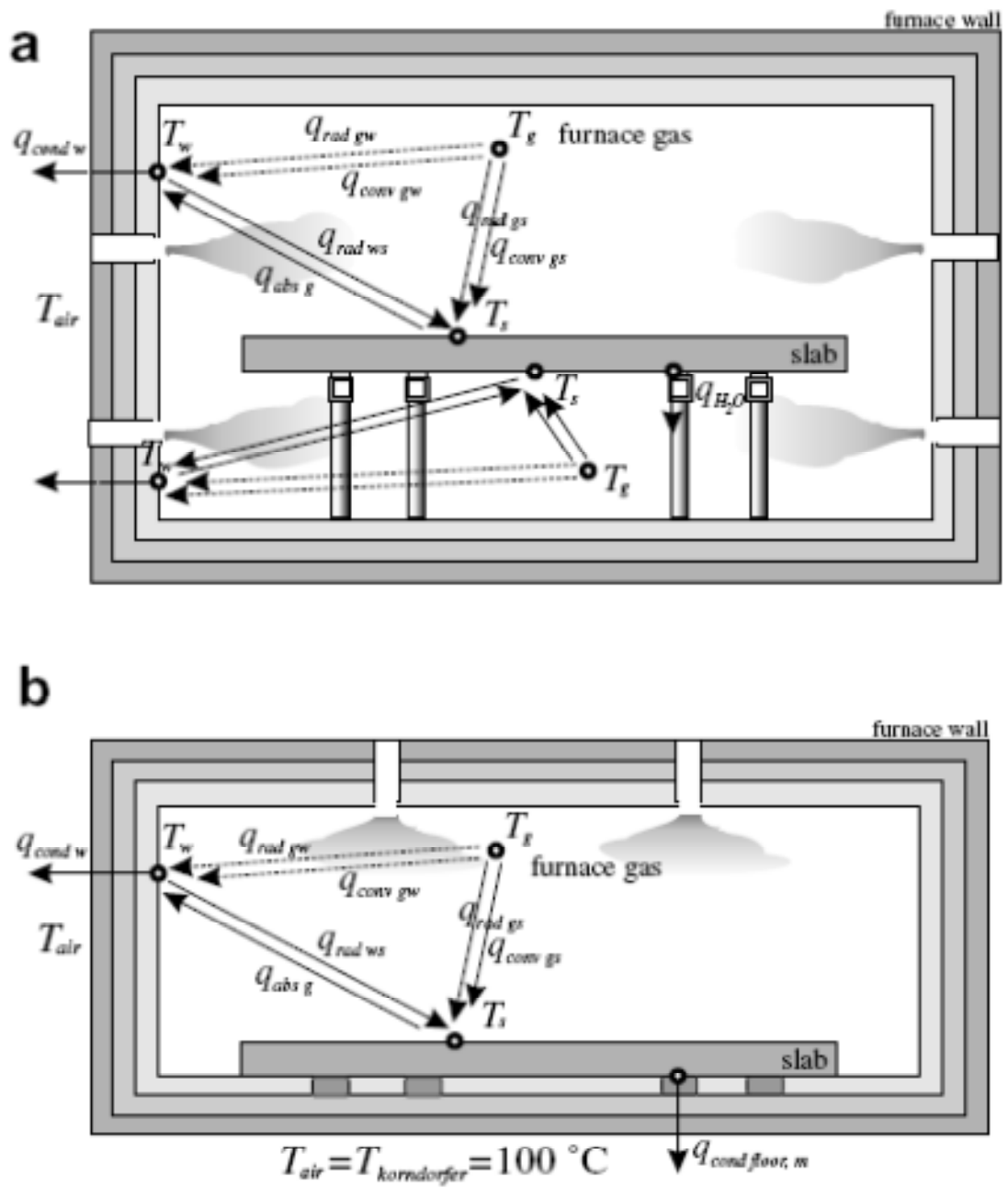
ความร้อนเข้า	kW	%	ความร้อนออก	kW	%
1) ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง	4,394.31	78.94	1) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก	2,354.61	42.30
2) ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า	11.04	0.20	2) ความร้อนสัมผัสที่ออกไปกับไอเสีย	1930.98	34.69
3) ความร้อนที่เกิดจากการก่อตัวของสเกล	282.74	5.08	3) ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่สเกล	56.82	1.02
4) ความร้อนจากการอุ่นอากาศที่ recuperator	878.63	15.78	4) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิด	93.11	1.67
			5) ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา	32.84	0.59
			6) ความร้อนสูญเสียอื่น ๆ (เช่นหลังคาและพื้นเตา)	1,098.36	19.73
ความร้อนเข้ารวม	5,566.72	100.00	ความร้อนออกรวม	5,566.72	100.00

Jang และ Kim, 2007 ใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สองมิติ (2-D finite element method) เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิของแท่งเหล็กภายในเตาเผาแบบคานเลื่อน โดยพิจารณาให้มีการถ่ายเทความร้อนดังนี้

- 1) การแผ่รังสีความร้อนจากผนังเตาสู่แท่งเหล็ก
- 2) การแผ่รังสีจากแก๊สสู่แท่งเหล็ก
- 3) การพาความร้อนจากแก๊สสู่แท่งเหล็ก
- 4) การนำความร้อนจากแท่งเหล็กไปสู่ฐานรองแท่งเหล็ก
- 5) การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็ก

เมื่อนำผลจากแบบจำลองไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จริง ที่ตำแหน่งกึ่งกลางแท่งเหล็กบริเวณทางออกของเตา พบว่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดจริงมีความแตกต่างกันเพียง 7°C หรือ 0.56% เท่านั้น

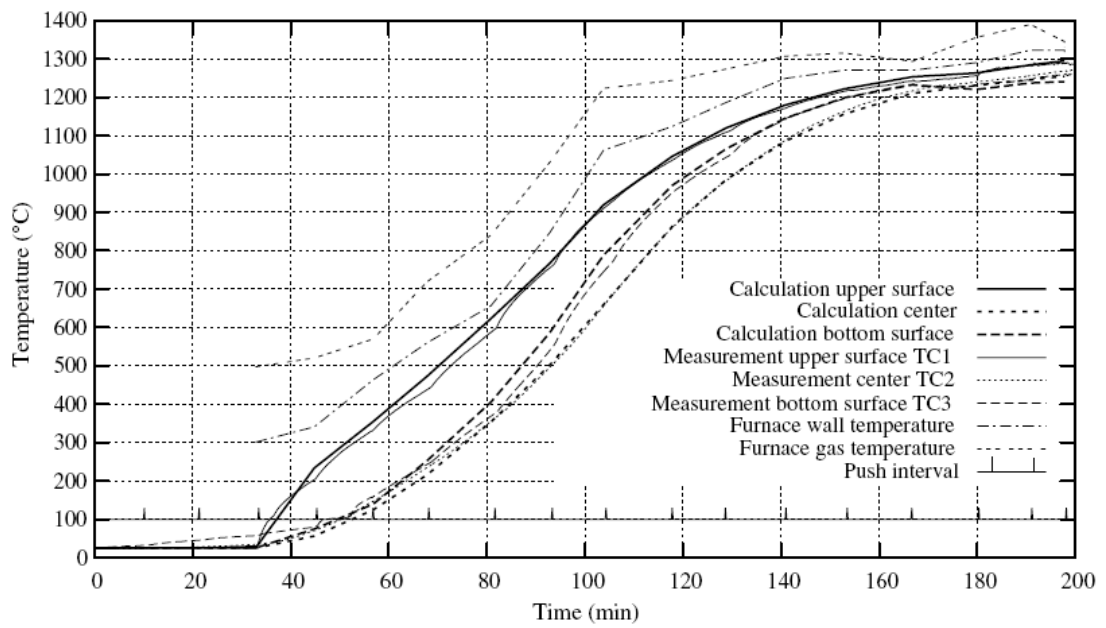
Jaklic, Vode และ Kolenko, 2006 ได้สร้างแบบจำลองกระบวนการเผาแผ่นเหล็กเพื่อทำนายอุณหภูมิของแผ่นเหล็กภายในเตาเผาแบบผลัดดัน โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่าง แก๊ส, ผนังเตา และแผ่นเหล็ก ด้วยแบบจำลองอุณหภูมิ 3 ค่า คืออุณหภูมิแก๊ส, อุณหภูมิผนังเตา และอุณหภูมิผิวของแผ่นเหล็ก และพิจารณาการนำความร้อนภายในแผ่นเหล็กด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องสามมิติ (3-D finite different method) ในการคำนวณแบบจำลองอุณหภูมิ 3 ค่านั้น อุณหภูมิแก๊สมีค่าสูงที่สุด และจะถ่ายเทความร้อนไปสู่แผ่นเหล็กด้วยการแผ่รังสีความร้อน ($q_{rad\ gs}$) และการพาความร้อน ($q_{conv\ gs}$) รวมถึงถ่ายเทความร้อนสู่ผนังเตาด้วยการแผ่รังสี ($q_{rad\ gw}$) และการพาความร้อน ($q_{conv\ gw}$) เช่นกัน ความร้อนส่วนหนึ่งที่ผนังเตาได้รับจะสูญเสียออกไปนอกเตาด้วยการนำความร้อนผ่านผนังเตา ($q_{cond\ w}$) อีกส่วนหนึ่งจะแผ่รังสีไปสู่แผ่นเหล็ก ($q_{rad\ ws}$) ในขณะที่มีความร้อนบางส่วนถูกดูดซับโดยแก๊ส ($q_{abs\ g}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผนังเตาและแผ่นเหล็กมีค่า 0.95 และ 0.8 ตามลำดับ เมื่อนำผลจากการคำนวณไปตรวจสอบกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และจากรูปเมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นว่าอุณหภูมิผนังเตาจะลู่เข้าหาอุณหภูมิแก๊ส นอกจากนี้จะเห็นว่าอุณหภูมิของแผ่นเหล็กจะลดลงจากผิวบนสู่พื้นล่าง



รูปที่ 2.10 (a) การถ่ายเทความร้อนในส่วน preheat และส่วน heating

(b) การถ่ายเทความร้อนในส่วน soaking

(Jaklic et al., 2006)



รูปที่ 2.11 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริง

(Jaklic et al., 2006)

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 เตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace)

เตาเผาเหล็ก คือ เตาที่มีหน้าที่ให้ความร้อนแก่เหล็กจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ในช่วง $1,100^{\circ}\text{C}$ ถึง $1,250^{\circ}\text{C}$ (ศุภณัฐ เจริญ, 2551) ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเหล็กอื่น ๆ ต่อไป ในกระบวนการเผาเหล็กนั้นจะแบ่งส่วนของเตาได้เป็น 3 ส่วน คือส่วน preheat ส่วน heating และส่วน soaking ในส่วน preheat จะอุ่นเหล็กให้ร้อนโดยใช้ความร้อนเหลือใช้จากไอเสีย ส่วน heating จะให้ความร้อนหลักแก่เหล็กจนกระทั่งมีอุณหภูมิตามที่ต้องการ หลังจากนั้นเหล็กจะถูกส่งไปยังส่วน soaking ซึ่งมีหน้าที่ในการให้ความร้อนแก่เหล็กต่อไปเพื่อรักษาอุณหภูมิของเหล็กมีค่าคงที่ตลอดทั่วทั้งชิ้นงาน

การแบ่งประเภทเตาเผาเหล็กอาจแบ่งตามแหล่งพลังงานที่ใช้ เช่น ใช้น้ำมันเตา, ใช้แก๊สธรรมชาติ หรือใช้ไฟฟ้า เป็นต้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงการแบ่งประเภทเตาจากวิธีการลำเลียงชิ้นเหล็ก ซึ่งแบ่งได้ 3 แบบ คือ

1) เตาแบบผลักดัน (pusher type furnace) เป็นเตาที่เคลื่อนชิ้นเหล็กโดยการผลักชิ้นเหล็กเข้าและออกจากเตาเผา โดยเหล็กที่ถูกผลักเข้าสู่เตาจะไปดันเหล็กที่อยู่ก่อนหน้าให้เคลื่อนที่ไป ดังนั้นเหล็กแต่ละชิ้นจะสัมผัสกันตลอดกระบวนการการเผาเหล็ก เมื่อชิ้นเหล็กที่ทางออกถูกผลักออกจากเตา เหล็กชิ้นใหม่ก็จะถูกผลักเข้าสู่เตาต่อไป

ข้อดีของเตาชนิดนี้คือ ต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับเตาชนิดอื่น การทำงานไม่ซับซ้อน และการควบคุมการถ่ายเทความร้อนทำได้ง่ายเนื่องจากไม่มีการใช้น้ำระบายความร้อนภายในเตา

ข้อเสียคือมีข้อจำกัดในเรื่องรูปร่างหน้าตัดของชิ้นเหล็ก คือเหล็กจะต้องมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมเท่านั้นเพื่อไม่ให้เหล็กเกยทับกันขณะถูกผลักดัน และการเผาเหล็กหลายขนาดพร้อมกันในเตาชนิดนี้ทำได้ยาก

2) เตาแบบคานเลื่อน (walking beam furnace) เป็นเตาที่เคลื่อนชิ้นเหล็กด้วยกลไกการทำงานของคานเลื่อนลำเลียงเหล็กเข้าและออกจากเตาเผา การลำเลียงเหล็กแบบนี้เหล็กแต่ละชิ้นจะไม่สัมผัสกัน แต่ต้องมีน้ำระบายความร้อนสำหรับคานเลื่อน

ข้อดีของเตาชนิดนี้คือ เหล็กแต่ละชิ้นจะไม่สัมผัสกัน สามารถเผาเหล็กได้ทุกรูปร่าง และหลายขนาด การสึกกร่อนของพื้นเตาจะเกิดขึ้นช้าเนื่องจากไม่มีการเสียดสีระหว่างชิ้น

เหล็กกับพื้นเตา และการสูญเสียผ่านช่องเปิดมีน้อยเนื่องจากช่องเปิดมีขนาดเล็กและไม่ได้เปิดตลอดเวลา

แต่เตาชนิดนี้มีข้อเสียคือ การลำเลียงชิ้นเหล็กค่อนข้างซับซ้อนเมื่อเทียบกับเตาแบบผลัดตัน ใช้ต้นทุนและค่าบำรุงรักษาสูง และมีความร้อนสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากการระบายความร้อนด้วยน้ำภายในเตา

3) เตาแบบพื้นเลื่อน (walking hearth furnace) กลไกการลำเลียงชิ้นเหล็กจะคล้ายคลึงกับเตาแบบคานเลื่อน แตกต่างกันเพียงอุปกรณ์ที่ใช้ลำเลียงชิ้นเหล็กเท่านั้น เตาชนิดนี้ต้องใช้น้ำระบายความร้อนเช่นเดียวกับเตาแบบคานเลื่อน และโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีข้อดีข้อเสียเหมือนกัน

3.2 ข้อมูลน้ำมันเตา

น้ำมันเตา (fuel oil) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นไขขาว ผลิตได้จากก้นหลอมน้ำมันดิบ เป็นส่วนที่หนักและข้นเหนียวมากจึงตกค้างอยู่หลังจากที่ส่วนอื่นระเหยและกลั่นตัวออกไปหมดแล้ว เนื่องจากน้ำมันเตามีองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงไปตามแหล่งที่มาของน้ำมันดิบ ดังนั้นค่าองค์ประกอบของน้ำมันเตาจึงแสดงเป็นค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย (ศุภณัฐ เจริญ, 2551)

ธาตุองค์ประกอบ	% โดยมวล
คาร์บอน (C)	86.4
ไฮโดรเจน (H)	11.6
ซัลเฟอร์ (S)	2.0

เนื่องจากการวิเคราะห์การเผาไหม้น้ำมันเตาหรือเชื้อเพลิงอื่น ๆ จำเป็นต้องทราบสูตรโมเลกุลของเชื้อเพลิงนั้น ๆ เพื่อนำมาเขียนในสมการการเผาไหม้ โดยที่สูตรโมเลกุลของน้ำมันเตาสามารถหาได้โดยนำข้อมูลองค์ประกอบในรูปร้อยละโดยมวลมาคำนวณหาจำนวนโมลของธาตุองค์ประกอบในน้ำมันเตา จากการคำนวณพบว่าน้ำมันเตา 1 kmol ประกอบด้วยคาร์บอน 0.3834 kmol ไฮโดรเจน 0.6133 kmol และซัลเฟอร์ 0.0033 kmol เขียนเป็นสูตรโมเลกุลได้คือ $C_{0.3834}H_{0.6133}S_{0.0033}$ คุณสมบัติสำคัญอื่น ๆ ของน้ำมันเตา แสดงในตารางที่ 3.2

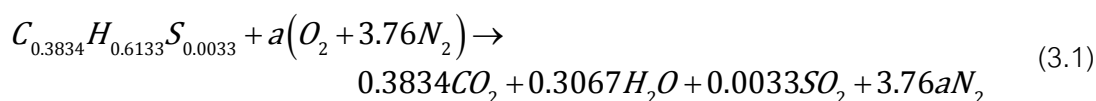
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติของน้ำมันเตา (ศุภณัฐ เจริญ, 2551)

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
มวลโมเลกุล (MW)	5.329	kg/kmol
ความถ่วงจำเพาะ (S.G.)	0.96	-
ความจุความร้อนจำเพาะ (c_p)	1.884	kJ/kg.K
ความร้อนเชื้อเพลิงสูง (HHV)	42.1	MJ/liter
ความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ (LHV)	39.6	MJ/liter

3.3 ทฤษฎีการเผาไหม้

3.3.1 การเผาไหม้ทางทฤษฎี

การเผาไหม้ทางทฤษฎี เป็นการเผาไหม้ที่ออกซิเจน (O_2) และเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากันได้หมดพร้อมกันพอดี สมการการเผาไหม้ของน้ำมันเตา 1 kmol เขียนได้ดังนี้



จากสมการที่ 3.1 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อน้ำมันเตาทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศแล้ว คาร์บอนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพียงอย่างเดียว ไม่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เกิดขึ้น ไฮโดรเจนทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นน้ำ (H_2O), ซัลเฟอร์ทั้งหมดจะเปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ เทอม ($O_2 + 3.76N_2$) คือองค์ประกอบของอากาศ ประกอบด้วยร้อยละโดยปริมาตรของออกซิเจน 21% และไนโตรเจน (N_2) 79% โดยประมาณ ในอากาศ 4.76 kmol จะมีออกซิเจน 1 kmol และไนโตรเจน 3.76 kmol ดังนั้น a จึงเป็นจำนวนโมลของออกซิเจนที่ต้องใช้ในการเผาไหม้น้ำมันเตา 1 kmol ได้หมดพร้อมกันพอดี เรียกปริมาณออกซิเจนนี้ว่า ปริมาณ stoichiometric จากการดุลสมการการเผาไหม้ทางทฤษฎี จะได้ค่า a เท่ากับ 0.54 หมายความว่าต้องใช้ ออกซิเจน 0.54 kmol เพื่อที่จะเผาไหม้น้ำมันเตา 1 kmol ได้หมดพร้อมกันพอดี

3.3.2 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (stoichiometric air-fuel ratio, A/F_{stoic})

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณอากาศกับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้ หรืออีกนัยหนึ่งคือ ปริมาณอากาศที่ใช้เผาไหม้เชื้อเพลิงหนึ่งหน่วย

โดยส่วนใหญ่แล้วจะเขียนในรูปอัตราส่วนโดยมวล มีหน่วยเป็น $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีจึงเป็นปริมาณอากาศที่ต้องใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงหนึ่งหน่วยให้หมดพร้อมกันพอดี หาได้จาก

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{stoic}} = \left(\frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}}\right)_{\text{stoic}} = \frac{4.76a}{1} \frac{MW_{\text{air}}}{MW_{\text{fuel}}} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ 3.2 คำนวณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีของน้ำมันเตาได้เท่ากับ 13.915 $\text{kg}_{\text{air}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$ หมายความว่าต้องใช้อากาศ 13.915 kg เพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิง 1 kg ได้หมดพร้อมกันพอดี

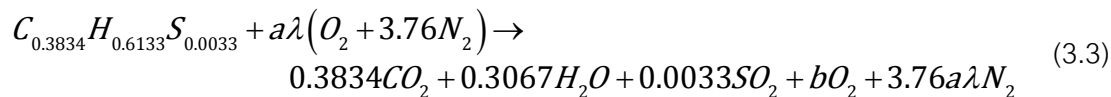
3.3.3 การเผาไหม้ทางปฏิบัติ

ในความเป็นจริงแล้วการควบคุมปริมาณออกซิเจนหรือปริมาณอากาศให้พอดีกับเชื้อเพลิงนั้นทำได้ยาก เนื่องจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่สัดส่วนของการผสมเพียงจุดเดียว ดังนั้นกระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงจะสามารถเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ

- 1) กรณีที่อากาศไม่เพียงพอ (fuel rich mixtures) จะมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์
- 2) กรณีที่อากาศมากเกินไป (fuel lean mixtures) จะมีออกซิเจนเหลือในผลิตภัณฑ์

เตาเผาเหล็กโดยส่วนใหญ่รวมถึงในงานวิจัยนี้ ผู้ผลิตจะเลือกให้การเผาไหม้เป็นแบบมีอากาศมากเกินไป เนื่องด้วยเหตุผล 3 ประการ ประการแรกคือในการผสมอากาศเผาไหม้ (combustion air) กับเชื้อเพลิงในกรณีที่เชื้อเพลิงเป็นของเหลว นั้นจำเป็นต้องทำให้เชื้อเพลิงแตกเป็นละอองเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศเผาไหม้ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถผสมเชื้อเพลิงกับอากาศได้อย่างสมบูรณ์ทำให้มีเชื้อเพลิงเหลือ จึงจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณอากาศเพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เหลือให้หมด ประการที่สองเป็นผลสืบเนื่องมาจากประการแรกคือ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ จึงต้องใช้เวลาในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น แต่ในความเป็นจริงการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นในเวลาสั้น ๆ ไม่สามารถเพิ่มเวลาตามที่ต้องการได้ แต่สามารถเพิ่มอากาศเผาไหม้เข้าไปเพื่อช่วยเผาไหม้เชื้อเพลิงส่วนที่เหลือให้หมดได้ และประการสุดท้ายเป็นเหตุผลทางด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการเผาไหม้ที่มีอากาศน้อยเกินไปจะเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่ง

เป็นแก๊สพิษในไอเสีย ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ จึงต้องเลือกการเผาไหม้แบบมีอากาศมากเกินไป เพื่อกำจัดปัญหาเหล่านี้ให้หมดไป สมการของการเผาไหม้ดังกล่าวเขียนได้ดังนี้



โดยที่ λ คือ สัดส่วนระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎีดังแสดงในสมการที่ 3.4 และ b คือ จำนวนโมลของออกซิเจนที่เหลืออยู่ในไอเสีย

$$\lambda = \frac{(A/F)_{actual}}{(A/F)_{stoic}} \quad (3.4)$$

- ถ้า λ น้อยกว่า 1 หมายความว่า การเผาไหม้มีอากาศไม่เพียงพอ
- ถ้า λ เท่ากับ 1 หมายความว่า การเผาไหม้เป็นไปตามทฤษฎี
- ถ้า λ มากกว่า 1 หมายความว่า การเผาไหม้มีอากาศมากเกินไป

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่างานวิจัยนี้มีออกซิเจนในการเผาไหม้มากเกินไป ดังนั้น λ จึงมีค่ามากกว่า 1 เมื่อดุลสมการที่ 3.3 ให้มีออกซิเจนเท่ากันทั้งสองฝั่งจะได้

$$\lambda = \frac{(2 \times 0.3834) + 0.3067 + (2 \times 0.0033) + 2b}{2a} \quad (3.5)$$

$$\lambda = \frac{1.08 + 2b}{2a} \quad (3.6)$$

ปริมาณออกซิเจนที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์วิเคราะห์ไอเสีย (flue gas analyzer) เป็นปริมาณร้อยละโดยปริมาตรของออกซิเจนในไอเสียที่ถูกดูดไอน้ำและความชื้นออกไปแล้ว (dry basis) ปริมาณร้อยละโดยโมลของออกซิเจนที่วัดได้จึงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\%O_2 = \frac{b}{0.3834 + 0.0033 + b + 3.76a\lambda} \times 100 \quad (3.7)$$

เมื่อ $\%O_2$ เป็นค่าร้อยละโดยโมลของออกซิเจนที่ตรวจวัดได้ จากสมการที่ 3.6 และ 3.7 เขียน b ให้อยู่ในรูป λ แล้วจัดรูป จะได้สมการของ λ ในรูป $\%O_2$ ดังนี้

$$\lambda = \frac{a - 0.1533 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{a - 2.5704 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.8)$$

เนื่องจากการเผาไหม้น้ำมันเตา a มีค่า 0.54 เมื่อแทนลงในสมการที่ 3.8 จะได้

$$\lambda = \frac{0.54 - 0.1533 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{0.54 - 2.5704 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (3.9)$$

สมการที่ 3.9 นี้สามารถใช้งานได้สะดวก เพียงตรวจวัดค่าร้อยละโดยโมลของออกซิเจนในไอเสีย ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ไอเสีย แล้วนำมาแทนลงในสมการดังกล่าว จะสามารถหาค่า λ ได้ทันที นอกจากนี้ยังสามารถนำค่า λ ไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจริงได้ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ค่า λ ในกรณีที่เป็นการเผาไหม้แบบมีออกซิเจนมากเกินไปจะแสดงถึงปริมาณอากาศที่เกินมาจากค่าทางทฤษฎี ซึ่งหากมีอากาศมากเกินไปจะทำให้มีออกซิเจนเหลือออกมาในไอเสียมาก ออกซิเจนที่เกินมานี้จะพาความร้อนออกไปทิ้งโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่า λ ให้เหมาะสมซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิง โดยส่วนใหญ่จะแสดงในรูปร้อยละของอากาศส่วนเกินดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงปริมาณอากาศส่วนเกินที่เหมาะสมกับเชื้อเพลิงต่าง ๆ

(แหล่งที่มา: <http://www.engineeringtoolbox.com>)

เชื้อเพลิง	ร้อยละของอากาศส่วนเกิน
แก๊สธรรมชาติ	5-10
น้ำมันเตาหมายเลข 2 และ 6	10-20
ถ่านหิน	20-30

3.3.4 อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ทางปฏิบัติ

อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ทางปฏิบัติสามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$\lambda = \frac{(A/F)_{actual}}{(A/F)_{stoic}} \quad (3.4)$$

หากทราบข้อมูลการใช้เชื้อเพลิงจะสามารถนำไปคำนวณหาอัตราการใช้ของอากาศได้จากสมการ

$$(A/F)_{actual} = \left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \right)_{actual} \quad (3.10)$$

3.4 การแผ่รังสีความร้อนจากแก๊ส (Gaseous Thermal Radiation)

แก๊สแต่ละชนิดจะแผ่รังสีความร้อนได้เพียงช่วงความยาวคลื่นเฉพาะในบางช่วงเท่านั้น แก๊สที่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้จะต้องเป็นแก๊สที่โมเลกุลมีขั้วเท่านั้น เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำ เป็นต้น ส่วนแก๊สที่โมเลกุลไม่มีขั้วจะไม่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้ เช่น แก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เป็นต้น นอกจากนี้การแผ่รังสีความร้อนของแก๊ส จะเป็นปรากฏการณ์การแผ่รังสีเชิงปริมาตร (volumetric phenomenon) ไม่ใช่การแผ่รังสีความร้อนเชิงพื้นผิว (surface phenomenon) ดังเช่นการแผ่รังสีความร้อนจากของแข็งและของเหลว

อัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิจากแก๊สสามารถหาจากสมมติฐานที่ว่าความร้อนจะถูกแผ่รังสีออกจากปริมาตรครึ่งทรงกลมของแก๊สสู่พื้นผิวเล็กๆที่ศูนย์กลางฐานของครึ่งวงกลมนั้น ๆ อัตราการแผ่รังสีความร้อนดังกล่าวสามารถหาได้จากสมการที่ 3.11 ภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวล้อมรอบเป็นพื้นผิวดำ (blackbody) (Incropera, 2007)

$$q = A_s \sigma (\epsilon_g T_g^4 - \alpha_g T_s^4) \quad (3.11)$$

ในกรณีที่พื้นผิวที่ล้อมรอบแก๊สไม่ใช่พื้นผิวดำและอุณหภูมิแก๊ส (T_g) มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิพื้นผิว (T_s) อัตราการแผ่รังสีความร้อนสุทธิจากแก๊สจะหาได้จากสมการที่ 3.12 ทั้งนี้สมการดังกล่าวจะมีความแม่นยำในกรณีที่สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของพื้นผิวมีค่า

มากกว่า 0.8 และอุณหภูมิแก๊สมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิพื้นผิวอยู่ในช่วง $7/9 < T_g / T_s < 9/7$ (Hottel, 1967)

$$q = A_s \left[\frac{\varepsilon_s + 1}{2} (4 + a + b - c) \varepsilon_{g,av} \sigma T_{av}^3 \right] (T_g - T_s) \quad (3.12)$$

เมื่อ A_s คือ พื้นที่ผิวที่รับการแผ่รังสี (m^2)
 ε_s คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแท่งเหล็ก
 $\varepsilon_{g,av}$ คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สที่อุณหภูมิเฉลี่ย หากจากการหา ε_g ที่อุณหภูมิเฉลี่ย, T_{av}
 T_{av} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแก๊สกับพื้นผิว $T_{av} = \sqrt[4]{(T_g^4 + T_s^4)/2}$ (K)

โดยที่ค่า a และ b หาได้จากรูปที่ 3.1 ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแก๊สกับพื้นผิว (T_{av}) และสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊ส ในกรณีแก๊สผสมจะต้องเฉลี่ยค่า a และ b โดยการถ่วงน้ำหนักด้วยสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สแต่ละชนิด ส่วนค่า c เป็นค่าคงที่มีค่า 0.5

ส่วน ε_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิของแก๊ส (T_g) ความดันรวม (p) ความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิด (p_g) และรัศมีของปริมาตรครึ่งทรงกลมของแก๊ส (L) ซึ่งค่า L ดังกล่าวเป็นรัศมีของรูปร่างที่เกิดจากการแผ่รังสีไปยังพื้นผิวเล็กๆ แต่ในการวิเคราะห์นี้ จะเป็นการแผ่รังสีสู่แท่งเหล็กซึ่งมีรูปร่างต่างออกไป ดังนั้นค่า L จึงต้องใช้เป็นค่า mean beam length (L_e) หากจาก (Incropera, 2007)

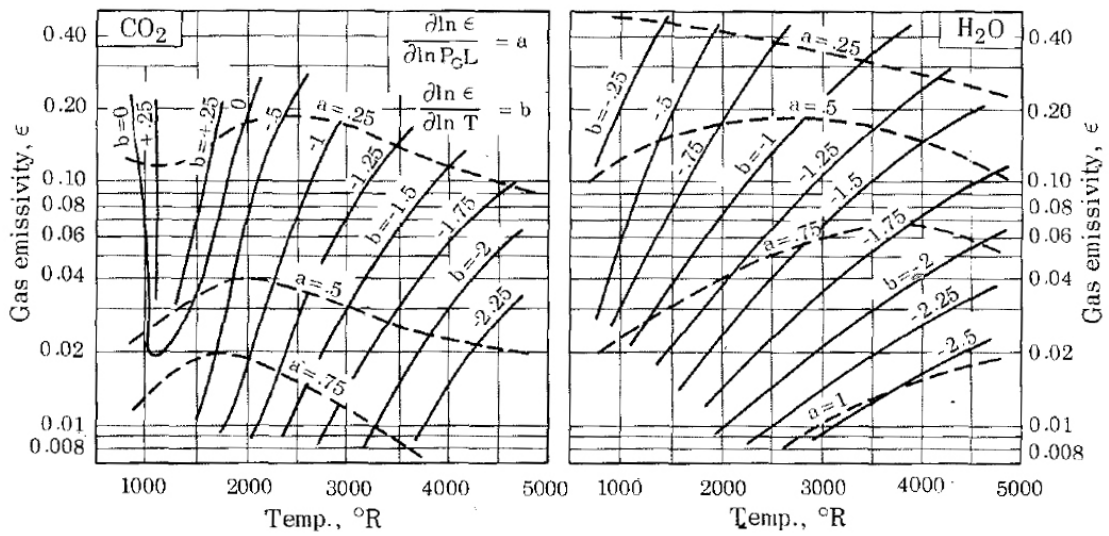
$$L_e = 3.6 \frac{V_g}{A_g} \quad (3.13)$$

เมื่อ V_g คือ ปริมาตรของแก๊ส (m^3)
 A_g คือ พื้นที่ผิวของแก๊ส (m^2)

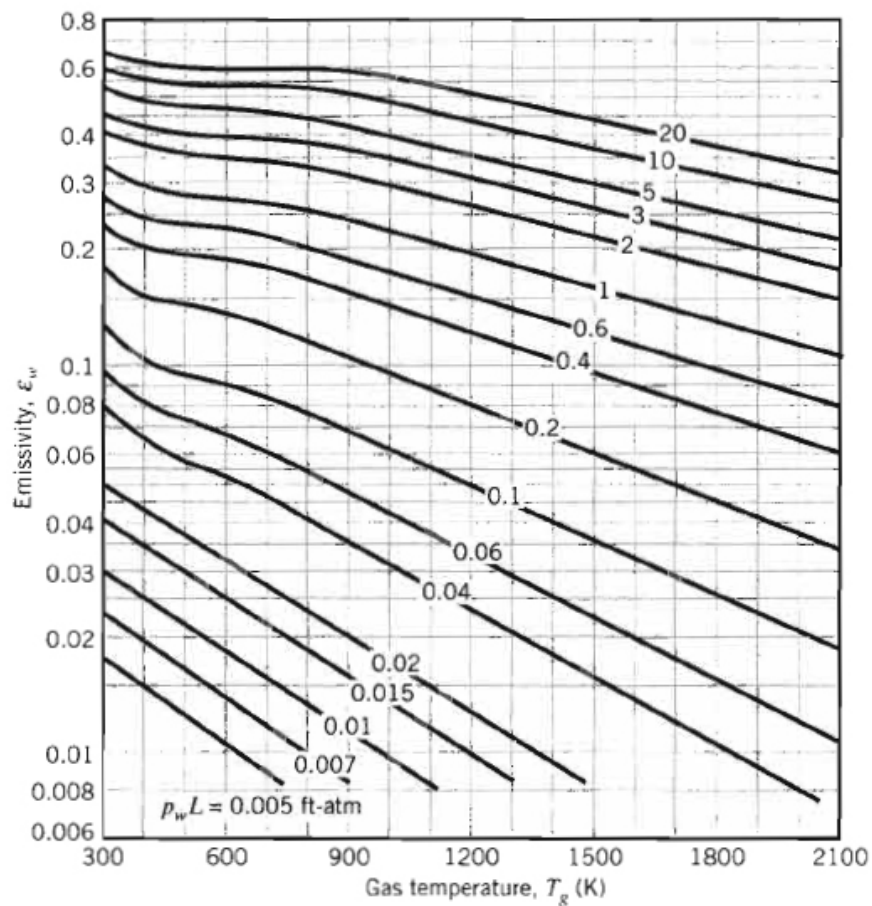
ค่า L_e ที่ได้จะเป็นส่วนหนึ่งในการหาค่า ε_g ดังนี้

$$\varepsilon_g = \varepsilon_w + \varepsilon_c - \Delta\varepsilon \quad (3.14)$$

โดยที่ ε_w , ε_c , $\Delta\varepsilon$ สามารถหาได้จากรูปที่ 3.2 รูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ

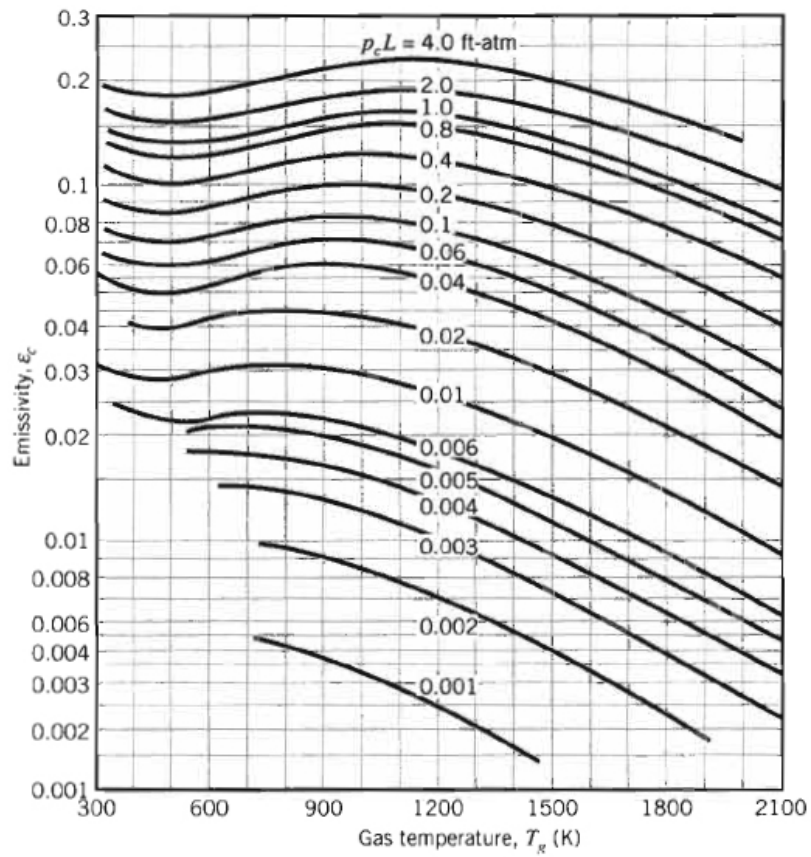


รูปที่ 3.1 กราฟสำหรับใช้หาค่า a และ b ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ (Hottel, 1967)

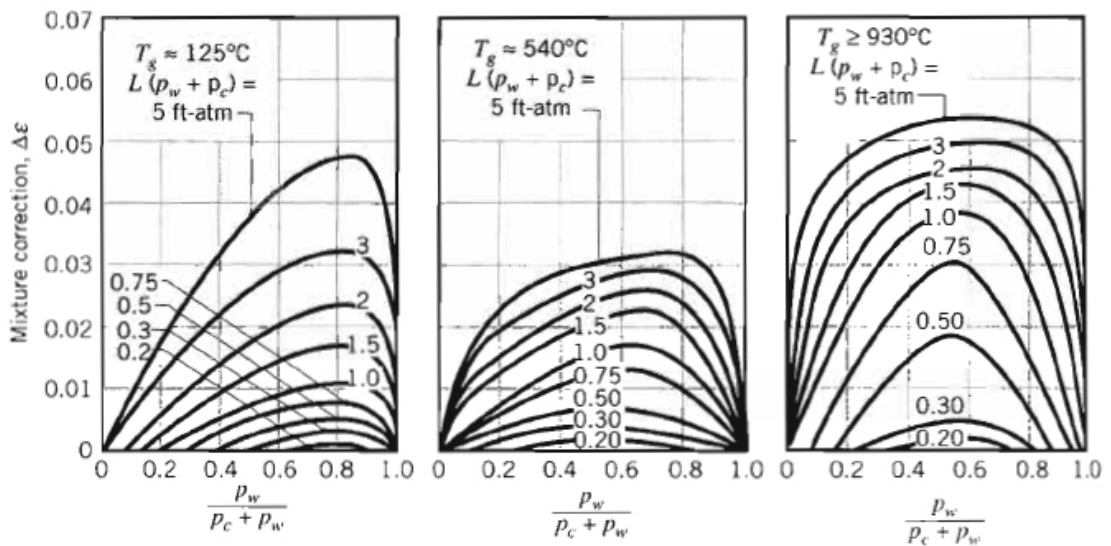


รูปที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำในของผสมที่ความดันรวม 1 atm

(Incropera, 2007)



รูปที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของคาร์บอนไดออกไซด์
ในของผสมที่ความดันรวม 1 atm (Incropera, 2007)



รูปที่ 3.4 ตัวคูณปรับแก้เมื่อพิจารณาของผสมระหว่างไอน้ำกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
(Incropera, 2007)

3.5 สมดุลความร้อนของแท่งเหล็ก

กำหนดให้แท่งเหล็กเป็นปริมาตรควบคุม พิจารณาความร้อนที่ถ่ายเทเข้า และออกจากแท่งเหล็ก จากกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ ว่าด้วยกฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy)

$$Q_{cv} = \Delta E_{cv} \quad (3.15)$$

เมื่อ Q_{cv} คือ ความร้อนรวมที่เข้าหรือออกปริมาตรควบคุมผ่านผิวควบคุม (kJ)
 ΔE_{cv} คือ พลังงานที่เปลี่ยนแปลงสุทธิในปริมาตรควบคุม (kJ)

เขียนในรูปอัตราต่อหนึ่งหน่วยเวลา

$$q_{cv} = \frac{dE_{cv}}{dt} \quad (3.16)$$

พิจารณากระบวนการในสภาวะคงตัว (steady state, $\frac{dE_{cv}}{dt} = 0$) สมการที่ 3.16 จะลดรูปลงเหลือ

$$q_{cv} = 0 \quad (3.17)$$

หรือ

$$q_{in} - q_{out} = 0 \quad (3.18)$$

เมื่อ q_{in} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็ก (kW)
 q_{out} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งเหล็ก (kW)

ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่แท่งเหล็ก ประกอบด้วย

- 1) ความร้อนจากการพาความร้อนของไอเสียจากการเผาไหม้ ($q_{conv,g}$)
- 2) ความร้อนจากการแผ่รังสีของผนังเตา ($q_{rad,w}$)
- 3) ความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊ส ($q_{rad,g}$)

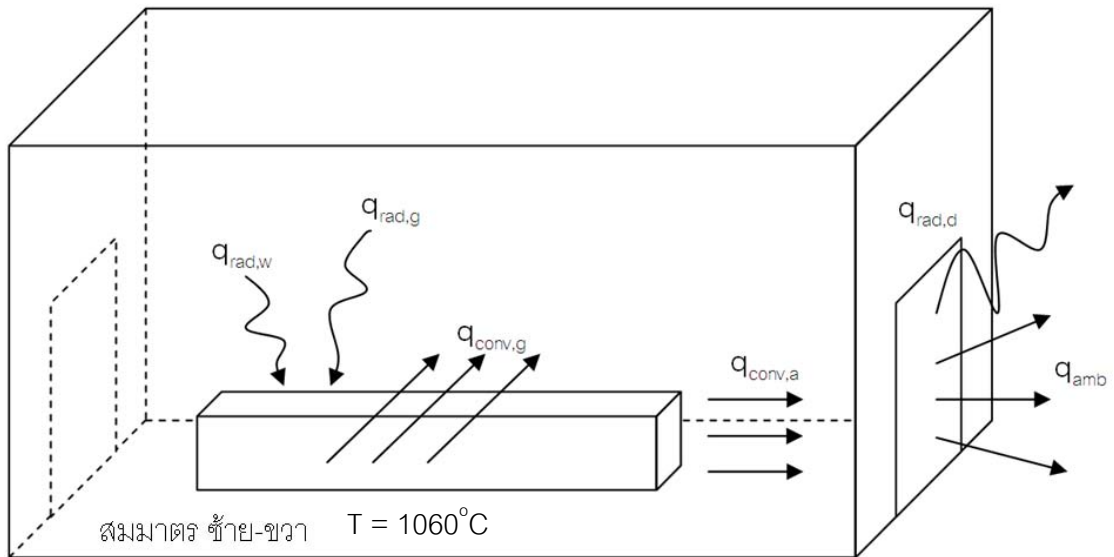
ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากแท่งเหล็ก ประกอบด้วย

- 4) ความร้อนสูญเสียจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา ($q_{conv,a}$)
- 5) ความร้อนสูญเสียผ่านประตูยั้งเหล็ก ($q_{rad,d}$)
- 6) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดของประตูขณะเปิดประตูยั้งเหล็ก (q_{amb})

เมื่อนำมาแทนในสมการที่ 3.18 จะได้

$$q_{conv,g} + q_{rad,w} + q_{rad,g} - q_{conv,a} - q_{rad,d} - q_{amb} = 0 \quad (3.19)$$

การถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากแท่งเหล็กภายในเตาเผาแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากแท่งเหล็กภายในเตาเผา

ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าแท่งเหล็ก

1) ความร้อนจากการพาความร้อนของไอเสียจากการเผาไหม้ ($q_{conv,g}$)

เกิดขึ้นเมื่อแก๊สร้อนไหลผ่านแท่งเหล็ก ในกรณีนี้ที่ศึกษานี้พิจารณาให้เป็นการพาความร้อนแบบบังคับผ่านแผ่นราบ มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ สามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จาก

$$q_{conv,g} = h_g A_s (T_g - T_s) \quad (3.20)$$

เมื่อ	h_g	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับเฉลี่ยของแก๊ส ($W/m^2 \cdot K$)
	A_s	คือ พื้นที่ผิวที่ความร้อนถ่ายเทผ่าน (m^2)
	T_g	คือ อุณหภูมิแก๊สไอเสีย (K)
	T_s	คือ อุณหภูมิผิวของแท่งเหล็ก (K)

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยหาจาก

$$\overline{h}_L = \frac{\overline{Nu}_L k}{L} \quad (3.21)$$

เมื่อ	\overline{h}_L	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับเฉลี่ย (h_g ในสมการที่ 3.20)
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแก๊ส (W/m.K)
	L	คือ ความยาวของพื้นผิวตามทิศทางกรไหลของแก๊ส (m)
	\overline{Nu}_L	คือ Nusselt number เฉลี่ย

และ Nusselt number เฉลี่ย, \overline{Nu}_L หาจาก (Incropera, 2007)

$$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}; \quad Pr \geq 0.6 \quad (3.22)$$

เมื่อ	Re_L	คือ Reynolds number
	Pr	คือ Prandtl number

โดยที่ค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการที่ 3.21 และ 3.22 จะหาจากอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวแห้งเฉลี่ยกับอุณหภูมิแก๊ส, $(T_s + T_g)/2$

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

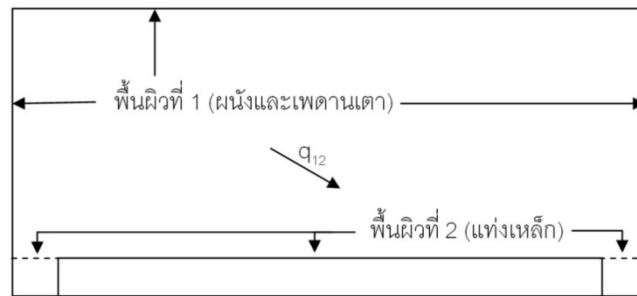
2.1) การแผ่รังสีจากผนังเตาเข้าสู่ผิวบนของแห้งเฉลี่ย

สมมติให้เป็นการแผ่รังสีภายในผิวปิดสองผิว (two surfaces enclosure) ระหว่างแห้งเฉลี่ยกับผนังและเพดานของเตาดังแสดงในรูปที่ 3.6 ในการแผ่รังสีระหว่างกันเพียงสองพื้นผิว การแผ่รังสีสุทธิออกจากผิวที่ 1 (q_1) จะต้องเท่ากับการแผ่รังสีสุทธิเข้าสู่ผิวที่ 2 ($-q_2$) และค่าทั้งสองนี้จะต้องเท่ากับอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิวทั้งสอง (Incropera, 2007)

$$q_{12} = q_1 = -q_2 = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (3.23)$$

เมื่อ	σ	คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
	ε	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี
	A	คือ พื้นที่ผิว (m^2)
	F	คือ ตัวประกอบการมองเห็น (view factor)

T คือ อุณหภูมิพื้นผิว (K)



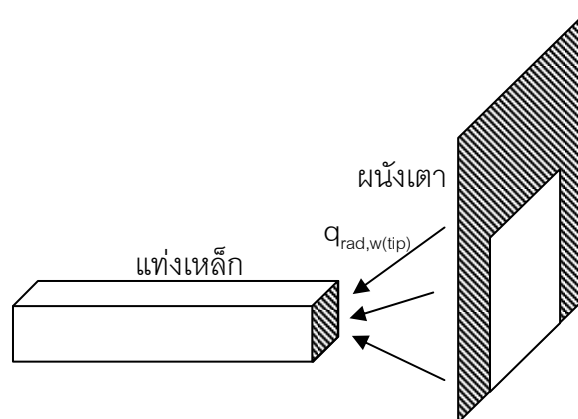
รูปที่ 3.6 แสดงผิวปิดสองผิว

2.2) การแผ่รังสีจากผนังเตาด้านข้างเข้าสู่ผิวข้างของแท่งเหล็ก

เนื่องจากบริเวณทางออกของเตาเผาเหล็กประกอบด้วยส่วนที่เป็นประตูเปิด-ปิด สำหรับนำเหล็กออกจากเตาและส่วนที่เป็นผนังเตา จึงต้องพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในบริเวณนี้ด้วย การถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กกับประตูเหล็กจะกล่าวในหัวข้อความร้อนสูญเสียผ่านประตูเหล็ก ส่วนการแผ่รังสีจากผนังเตาด้านข้างแสดงในรูปที่ 3.7 หาได้จาก

$$q_{rad,w,tip} = A_c F_{sw} \sigma \varepsilon_s (T_w^4 - T_s^4) \quad (3.24)$$

เมื่อ	σ	คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
	ε_s	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแท่งเหล็ก
	A_c	คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งเหล็ก (m^2)
	F_{sw}	คือ ตัวประกอบการมองเห็นจากแท่งเหล็กไปยังผนังเตา
	T_w	คือ อุณหภูมิผนังภายในเตา (K)
	T_s	คือ อุณหภูมิผิวแท่งเหล็ก (K)



รูปที่ 3.7 แสดงการแผ่รังสีจากผนังเตาด้านข้างเข้าสู่แท่งเหล็ก

3) ความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊ส ($q_{rad,g}$)

เนื่องจากแท่งเหล็กมีแก๊สร้อนจัดล้อมรอบอยู่ นอกจากจะได้รับความร้อนจากการพาความร้อนแล้วยังได้รับการความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊สด้วย ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊สหาได้จากสมการที่ 3.12

$$q = A_s \left[\frac{\varepsilon_s + 1}{2} (4 + a + b - c) \varepsilon_{g,av} \sigma T_{av}^3 \right] (T_g - T_s) \quad (3.12)$$

ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากแท่งเหล็ก

4) ความร้อนสูญเสียจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา ($q_{conv,a}$)

อากาศจะรั่วไหลเข้ามาในขณะเปิดประตูเตาและจะกระทบหัวของแท่งเหล็กแล้วไหลขึ้นด้านบนซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการไหลแบบขวาง (cross flow) เมื่อพิจารณาเฉพาะหน้าตัดของหัวแท่งเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.8 จึงสมมติให้เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบบบังคับที่มีการไหลแบบขวางและราบเรียบ แต่เนื่องจากประตูเตาไม่ได้เปิดไว้ตลอดเวลา จึงต้องมีตัวคูณสัดส่วนเวลาการเปิดประตูในสมการการถ่ายเทความร้อนเพื่อถ่วงน้ำหนักให้เป็นการถ่ายเทความร้อนขณะเปิดประตู ดังนี้

$$q_{conv,a} = h_a f_{open} A_c (T_a - T_s) \quad (3.25)$$

เมื่อ	h_a	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับเฉลี่ยของอากาศ (W/m ² .K)
	f_{open}	คือ สัดส่วนเวลาการเปิดประตู
	A_c	คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งเหล็ก (m ²)
	T_a	คือ อุณหภูมิอากาศที่รั่วเข้า (K)
	T_s	คือ อุณหภูมิผิวของแท่งเหล็ก (K)

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยสามารถหาได้จาก

$$\bar{h} = \frac{Nu_D k}{D_h} \quad (3.26)$$

เมื่อ	\bar{h}	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับเฉลี่ย (h_a ในสมการที่ 3.25)
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ (W/m.K)
	D_h	คือ hydraulic diameter ในที่นี้คือความหนาของแท่งเหล็ก (m)

\overline{Nu}_D คือ Nusselt number เฉลี่ย

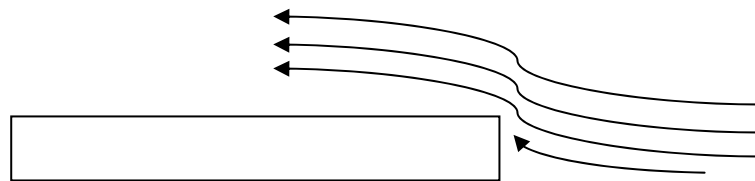
และ Nusselt number เฉลี่ย, \overline{Nu}_D หาจาก (Incropera, 2007)

$$\overline{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (3.27)$$

เมื่อ Re_D คือ Reynolds number

Pr คือ Prandtl number

โดยที่ค่าคุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในสมการที่ 3.26 และ 3.27 จะหาจากอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิผิวแห่งเหล็กกับอุณหภูมิอากาศ, $(T_s + T_a)/2$



รูปที่ 3.8 แสดงการไหลของอากาศรั่วผ่านหัวแห่งเหล็ก

5) ความร้อนสูญเสียผ่านประตูยั้งเหล็กขณะปิดประตู ($q_{rad,d}$)

เป็นการสูญเสียความร้อนขณะปิดประตูยั้งเหล็กเนื่องจากประตูยั้งเหล็กไม่ได้รับการหุ้มฉนวน อุณหภูมิของประตูจึงต่ำกว่าอุณหภูมิของแห่งเหล็ก ความร้อนจะถ่ายเทออกจากแห่งเหล็กไปสู่ประตูโดยการแผ่รังสี (ไม่คิดการแผ่รังสีจากส่วนบนของแห่งเหล็กเนื่องจากตัวประกอบการมองเห็นมีค่าน้อยจนสามารถละทิ้งได้) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 แต่เนื่องจากประตูยั้งเหล็กไม่ได้ปิดตลอดเวลา จึงต้องมีตัวคูณสัดส่วนเวลาการปิดประตูในสมการการแผ่รังสี ดังนี้

$$q_{rad,d} = A_c f_{close} F_{sd} \sigma \varepsilon_s (T_d^4 - T_s^4) \quad (3.28)$$

เมื่อ σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

ε_s คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแห่งเหล็ก

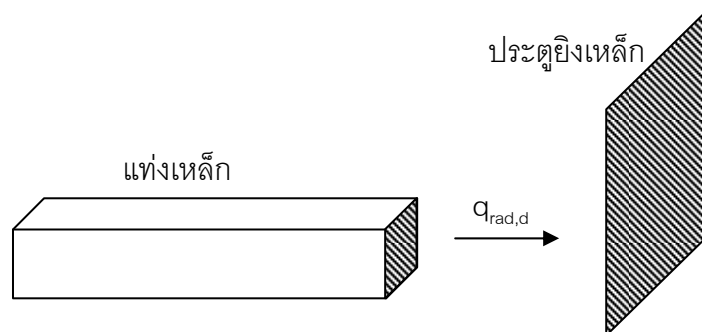
A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแห่งเหล็ก (m^2)

f_{close} คือ สัดส่วนเวลาการปิดประตู

F_{sd} คือ ตัวประกอบการมองเห็นจากแห่งเหล็กไปยังประตูยั้งเหล็ก

T_d คือ อุณหภูมิประตูภายในเตา (K)

T_s คือ อุณหภูมิผิวแผงเหล็ก (K)



รูปที่ 3.9 แสดงการแผ่รังสีจากแท่งเหล็กไปสู่ประตูยึงเหล็ก

6) ความร้อนสูญเสียผ่านช่องเปิดขณะเปิดประตูยึงเหล็ก (q_{amb})

เป็นการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดของประตูยึงเหล็กขณะเปิดประตูเพื่อนำเหล็กออกจากเตา แท่งเหล็กจะถูกเปิดสู่บรรยากาศโดยตรงทำให้มีการแผ่รังสีความร้อนออกจากเตา แต่เนื่องจากไม่ได้เปิดประตูไว้ตลอดเวลา จึงต้องมีตัวคูณสัดส่วนเวลาการเปิดประตูในสมการการแผ่รังสี ดังนี้

$$q_{amb} = A_c f_{open} F_{sa} \sigma \varepsilon_s (T_{amb}^4 - T_s^4) \quad (3.29)$$

เมื่อ	σ	คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
	ε_s	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแท่งเหล็ก
	A_c	คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งเหล็ก (m^2)
	f_{open}	คือ สัดส่วนเวลาการเปิดประตู
	F_{sa}	คือ ตัวประกอบการมองเห็นจากแท่งเหล็กไปยังช่องเปิด
	T_{amb}	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกเตาเผา (K)
	T_s	คือ อุณหภูมิผิวแท่งเหล็ก (K)

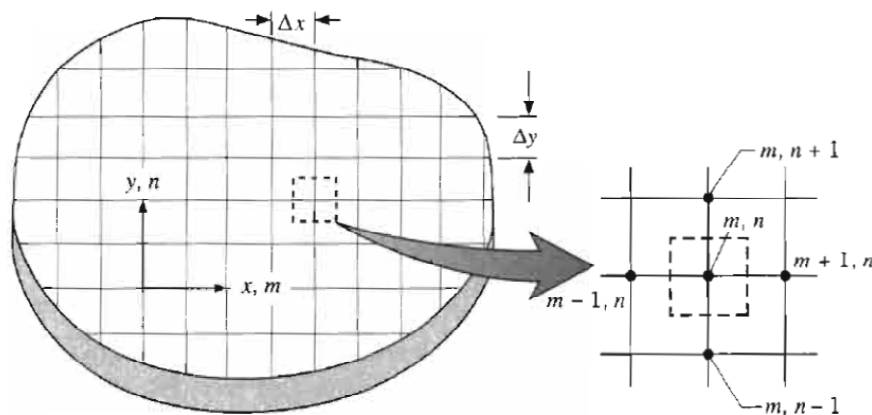
บทที่ 4 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

4.1 สมการการนำความร้อนสองมิติ (Incropera, 2007)

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการนำความร้อนภายในแท่งเหล็กเป็นการนำความร้อนสองมิติที่สภาวะคงตัว ไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในแท่งเหล็ก และคุณสมบัติทางความร้อนของแท่งเหล็กคงที่ สมการการนำความร้อนดังกล่าวเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (4.1)$$

ในการหาคำตอบแม่นยำตรง (exact solutions) ของสมการข้างบนสามารถทำได้เฉพาะปัญหาที่มีรูปร่างและเงื่อนไขขอบเขตอย่างง่ายเท่านั้น แต่ปัญหาโดยทั่วไปรวมถึงในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาที่ซับซ้อนไม่สามารถหาคำตอบแม่นยำตรงได้ จึงต้องหาคำตอบด้วยวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ซึ่งเป็นการหาคำตอบโดยประมาณและมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ในงานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและเหมาะสำหรับกรวิเคราะห์วิธีเชิงตัวเลขเบื้องต้น ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมสามารถหาคำตอบได้เฉพาะจุดที่กำหนดเท่านั้น ในการวิเคราะห์จึงต้องเริ่มจากการกำหนดจุดเหล่านี้โดยแบ่งปริมาตรควบคุมที่สนใจเป็นชิ้นเล็ก ๆ มีขนาดตามแนวแกน x และ y เท่ากับ Δx และ Δy ตามลำดับ และกำหนดให้จุดดังกล่าวอยู่ที่กึ่งกลางของชิ้นส่วนแต่ละชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จุดแต่ละจุดจะเป็นตัวแทนของปริมาตรควบคุมนั้น ๆ เช่น อุณหภูมิที่จุด (m,n) จะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของปริมาตรที่ล้อมรอบด้วยเส้นประดังรูป



รูปที่ 4.1 การแบ่งจุดวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบ (Incropera, 2007)

เมื่อพิจารณาอนุพันธ์อันดับสอง $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ ในสมการที่ 4.1 ค่าประมาณของอนุพันธ์ดังกล่าวที่จุด (m,n) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1/2,n} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-1/2,n}}{\Delta x} \quad (4.2)$$

โดยที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแนวแกน x สามารถเขียนในรูปอุณหภูมิของจุดรอบข้างได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1/2,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-1/2,n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x} \quad (4.4)$$

แทนสมการที่ 4.3 และ 4.4 ลงในสมการที่ 4.2 จะได้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} \quad (4.5)$$

ในทำนองเดียวกันกับอนุพันธ์อันดับสอง $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \Big|_{m,n} &\approx \frac{\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m,n+1/2} - \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{m,n-1/2}}{\Delta y} \\ &\approx \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

เมื่อกำหนดให้ $\Delta x = \Delta y$ และแทนสมการที่ 4.5 และ 4.6 ลงในสมการที่ 4.1 จะได้

$$T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 4T_{m,n} = 0 \quad (4.7)$$

สมการที่ 4.7 เป็นสมการที่ใช้คำนวณหาอุณหภูมิที่จุด (m,n) ได้โดยง่าย เพียงใช้ค่าอุณหภูมิของจุดรอบข้างเท่านั้น อย่างไรก็ตามสมการนี้ใช้ได้กับกรณีจุดที่วิเคราะห์เป็นจุดภายใน (interior node) ซึ่งมีเฉพาะการนำความร้อนเท่านั้น หากเป็นจุดที่ขอบของปริมาตรควบคุมหรือมีการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบอื่นจำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีอื่นในการวิเคราะห์ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2 วิธีสมดุลพลังงาน

ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีสมดุลพลังงานจะใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานกับปริมาตรควบคุมชิ้นเล็ก ๆ แต่ละชิ้นโดยกำหนดให้ความร้อนทั้งหมดถ่ายเทเข้าสู่ปริมาตรควบคุม แต่ในความเป็นจริงจะต้องมีความร้อนที่ถ่ายเทออกด้วย ซึ่งเมื่อหาคำตอบแล้วจะพบว่าความร้อนที่ถ่ายเทออกจะมีเครื่องหมายเป็นลบ การสร้างสมการด้วยวิธีนี้จะทำให้สามารถประมาณคำตอบในปัญหาต่าง ๆ ได้มากขึ้นแม้ว่าจะมีการพาความร้อน หรือการแผ่รังสีก็ตาม ยกตัวอย่างการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีสมดุลพลังงาน พิจารณาปริมาตรควบคุมที่จุด (m,n) ที่ล้อมรอบด้วยเส้นประในรูปที่ 4.2 จะเขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้คือ (Incropera, 2007)

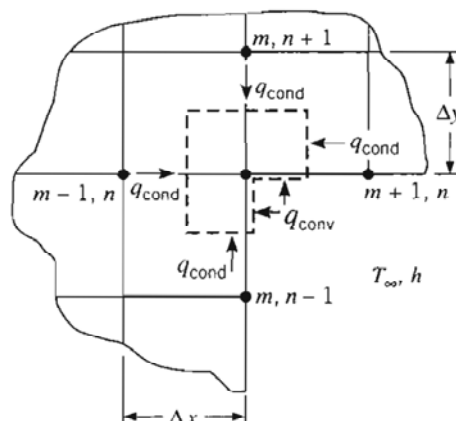
$$\sum_{i=1}^4 q_{cond,(i) \rightarrow (m,n)} + q_{conv} = 0 \quad (4.8)$$

เมื่อ $q_{cond,(i) \rightarrow (m,n)}$ คือ ความร้อนที่ถ่ายเทจากจุดรอบข้างสู่จุด (m,n) โดยการนำความร้อน
 q_{conv} คือ ความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่จุด (m,n) โดยการพาความร้อน

โดยที่สมการการนำความร้อนจากจุด $(m,n+1)$ สู่จุด (m,n) เขียนได้ดังนี้

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = k(\Delta x \cdot W) \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (4.9)$$

โดยที่ k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของปริมาตรควบคุม (W/m.K)
 W คือ ความหนาของปริมาตรควบคุมที่พิจารณา (m)



รูปที่ 4.2 สมดุลความร้อนในปริมาตรควบคุมของจุด (m,n) (Incropera, 2007)

เทอม $(\Delta x \cdot W)$ คือพื้นที่ที่ความร้อนถ่ายเทผ่าน และเทอม $\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y}$ คือค่าประมาณผลต่างสี่เหลี่ยมของอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุด ในทำนองเดียวกันการนำความร้อนของจุดที่เหลือเข้าสู่จุด (m,n) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot W \right) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} \quad (4.10)$$

$$q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = k \left(\frac{\Delta y}{2} \cdot W \right) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (4.11)$$

$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = k (\Delta y \cdot W) \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (4.12)$$

โดยที่การนำความร้อนจากจุด $(m,n-1)$ และจุด $(m+1,n)$ เป็นการนำความร้อนผ่านพื้นที่ที่มีความกว้าง $\Delta x/2$ และ $\Delta y/2$ ตามลำดับ พื้นที่จึงน้อยกว่าการนำความร้อนจากจุดอื่น ๆ อยู่ครึ่งหนึ่ง

นอกจากการนำความร้อน ปริมาตรควบคุมยังได้รับผลจากการพาความร้อนด้วย ซึ่งเป็นการพาความร้อนผ่านด้านที่มีความกว้าง $\Delta x/2$ และ $\Delta y/2$ ตามลำดับ เขียนสมการได้ดังนี้

$$q_{(\infty) \rightarrow (m,n)} = h \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot W \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) + h \left(\frac{\Delta y}{2} \cdot W \right) (T_{\infty} - T_{m,n}) \quad (4.13)$$

สมการที่ 4.8 เป็นผลรวมของสมการที่ 4.9 ถึง 4.13 เมื่อรวมสมการเหล่านี้ และกำหนดให้ $\Delta x = \Delta y$ แล้วจัดรูป จะได้สมการเพื่อใช้หาค่าอุณหภูมิที่จุด m, n คือ

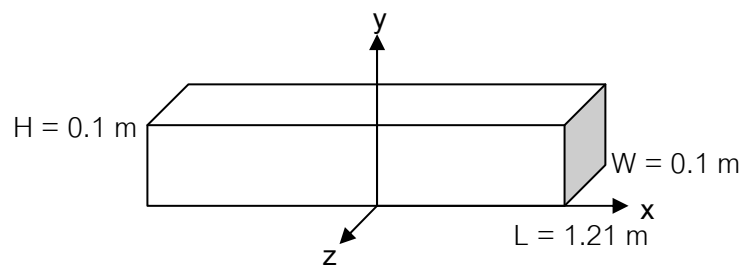
$$T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + \frac{1}{2}(T_{m+1,n} + T_{m,n-1}) + \frac{h\Delta x}{k} T_{\infty} - \left(3 + \frac{h\Delta x}{k} \right) T_{m,n} = 0 \quad (4.14)$$

ในการวิเคราะห์ปัญหาหนึ่ง ๆ จะมีสมการเช่นเดียวกับสมการที่ 4.7 และ 4.14 เกิดขึ้นมากมาย และค่าอุณหภูมิแต่ละจุดจะเป็นค่าที่ไม่ทราบ ต้องสมมติค่าตั้งต้นและนำมาคำนวณซ้ำเพื่อหาคำตอบ

4.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

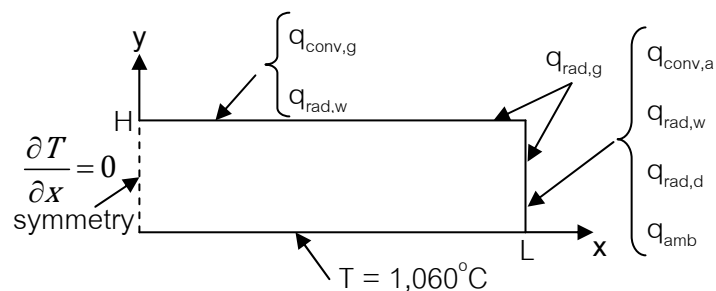
งานวิจัยนี้เป็นการหาการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กยาว 2.42 m กว้าง (W) 0.1 m และหนา (H) 0.1 m กำหนดปริมาตรควบคุมของปัญหานี้เป็นแท่งเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีสมมติฐานดังนี้

- 1) พิจารณาปัญหาในสภาวะคงตัว
- 2) พิจารณาปัญหาในสองมิติโดยกำหนดให้อุณหภูมิในแนวแกน z คงที่
- 3) การถ่ายเทความร้อนมีความสมมาตรในแนวแกน x จึงวิเคราะห์เพียงครึ่งหนึ่งของความยาวทั้งหมด (พิจารณา $L = 1.21$ m)
- 4) ผนังเตาและแท่งเหล็กเป็นพื้นผิวเทา (gray surface, $\epsilon_s = \alpha_s$)
- 5) พิจารณาแก๊สเป็นแก๊สเทา (gray gas, $\epsilon_g = \alpha_g$)
- 6) คุณสมบัติทางความร้อนของแท่งเหล็กคงที่
- 7) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแก๊สคงที่
- 8) รูปร่างความเร็วของแก๊สไอเสียคงตัวในแนวแกน x
- 9) อุณหภูมิแก๊ส (ไอเสีย) คงที่มีค่า $1,250^\circ\text{C}$
- 10) อุณหภูมิผนังเตาคงที่มีค่า $1,150^\circ\text{C}$
- 11) ผนังล่างของแท่งเหล็กอุณหภูมิคงที่ $1,060^\circ\text{C}$ เท่ากับอุณหภูมิพื้นเตา



รูปที่ 4.3 ปริมาตรควบคุมที่ศึกษา

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เงื่อนไขขอบเขตของปริมาตรควบคุมที่ศึกษา

จากรูปที่ 4.4 เงื่อนไขขอบเขตเขียนได้ดังนี้

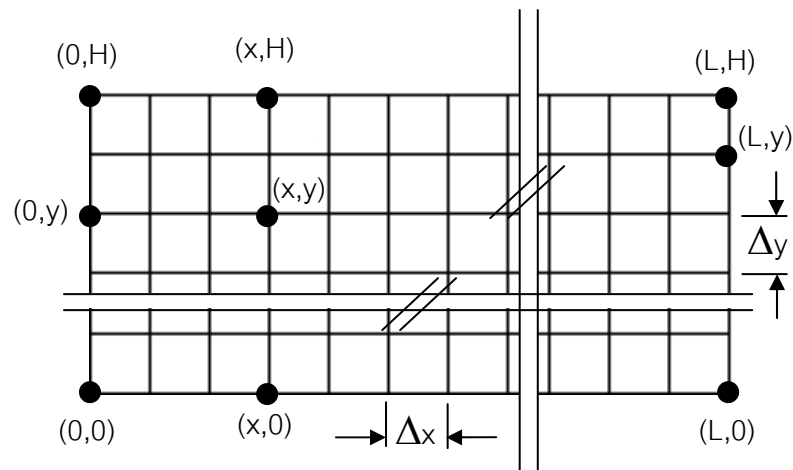
$$1) \quad x=0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0$$

$$2) \quad x=L; \quad k\Delta y W \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = q_{conv,a} + q_{rad,g} + q_{rad,w} + q_{rad,d} + q_{amb}$$

$$3) \quad y=0; \quad T|_{y=0} = 1060^{\circ}C$$

$$4) \quad y=H; \quad k\Delta x W \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=H} = q_{rad,w} + q_{rad,g} + q_{conv,g}$$

แบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ โดยเลือกให้ชิ้นส่วนดังกล่าวมีขนาด $\Delta x = \Delta y = 0.01 \text{ m}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

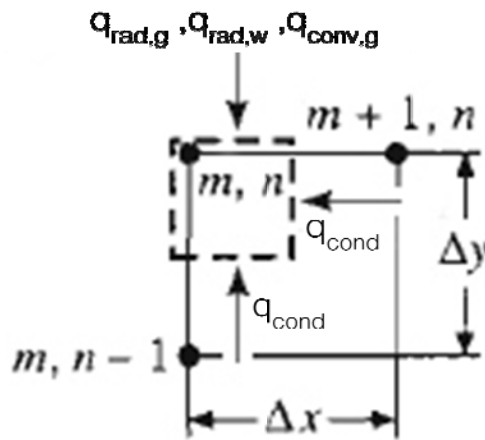


รูปที่ 4.5 การแบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

4.4 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีสมดุลพลังงาน

จุดเก้าจุดที่แสดงในรูปที่ 4.5 จะมีการถ่ายเทความร้อนแตกต่างกันตามเงื่อนไขขอบเขตของแต่ละจุด ส่วนจุดอื่น ๆ ที่ไม่ได้แสดงจะมีเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับจุดใดจุดหนึ่งในเก้าจุดที่แสดง ขึ้นกับว่าอยู่ในตำแหน่งที่เหมือนกับจุดใด เมื่อกำหนดจุดที่สนใจให้เป็นจุด (m,n) ใด ๆ จะเขียนสมดุลพลังงานของแต่ละจุดได้ดังนี้

1) จุด (0,H) เขียนสมดุลพลังงานได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 สมดุลพลังงานของจุด (0,H)

เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{rad,g} + q_{rad,w} + q_{conv,g} = 0$$

$$k \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot W \right) \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} + k \left(\frac{\Delta y}{2} \cdot W \right) \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + h_{r,g} \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot W \right) (T_g - T_{m,n})$$

$$+ h_{r,w} \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot W \right) (T_w - T_{m,n}) + h_g \left(\frac{\Delta x}{2} \cdot W \right) (T_g - T_{m,n}) = 0$$

เมื่อ $h_{r,g}$ และ $h_{r,w}$ เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนและอุณหภูมิดังนี้

$$h_{r,g} = \frac{\epsilon_s + 1}{2} (4 + a + b - c) \epsilon_{g,av} \sigma T_{av}^3 \quad (4.15)$$

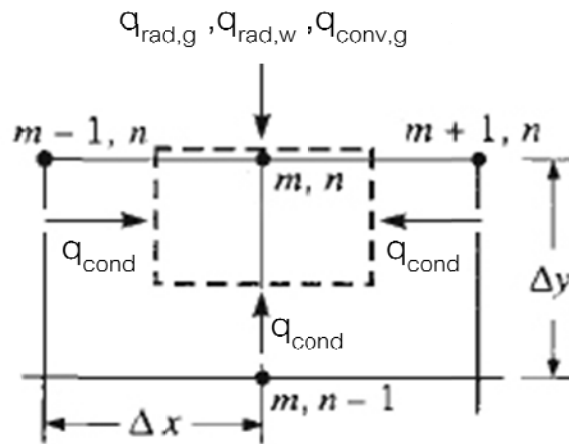
$$h_{r,w} = \sigma \epsilon_{eff} (T_w + T_{m,n}) (T_w^2 + T_{m,n}^2) \quad (4.16)$$

เมื่อ T_{av} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างแก๊สกับพื้นผิว $T_{av} = \sqrt[4]{(T_g^4 + T_{m,n}^4)/2}$ มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)

จัดรูปเขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอุณหภูมิจุดอื่นจะได้

$$T_{m,n} = \frac{k(T_{m,n-1} + T_{m+1,n}) + \Delta x (h_{r,g} \cdot T_g + h_{r,w} \cdot T_w + h_g \cdot T_g)}{2k + \Delta x (h_{r,g} + h_{r,w} + h_g)} \quad (4.17)$$

2) จุด (x,H) เขียนสมดุลพลังงานได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สมดุลพลังงานของจุด (x,H)

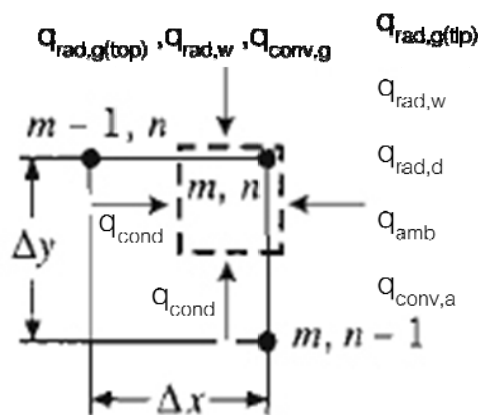
เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{rad,g} + q_{rad,w} + q_{conv,g} = 0$$

ในทำนองเดียวกันกับจุดที่ผ่านมา แทนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ แล้วจัดรูป เขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอนุกรมทวิจุดอื่นจะได้

$$T_{m,n} = \frac{k(2T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n}) + 2\Delta x(h_{r,g} \cdot T_g + h_{r,w} \cdot T_w + h_g \cdot T_g)}{4k + 2\Delta x(h_{r,g} + h_{r,w} + h_g)} \quad (4.18)$$

3) จุด (L,H) เขียนสมดุลพลังงานได้ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สมดุลพลังงานของจุด (L,H)

เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{rad,g(top)} + q_{rad,g(tip)} + q_{rad,w(top)} + q_{rad,w(tip)} + q_{rad,d} + q_{amb} + q_{conv,g} + q_{conv,a} = 0$$

ในทำนองเดียวกันกับจุดที่ผ่านมา แทนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ แล้วจัดรูป เขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอนุกรมจุดอื่นจะได้

$$T_{m,n} = \frac{k(T_{m-1,n} + T_{m,n-1}) + \Delta x \left((h_{r,g(top)} + h_{r,g(tip)}) \cdot T_g + (h_{r,w(top)} + h_{r,w(tip)}) \cdot T_w + h_{r,d} \cdot T_d + h_{r,amb} \cdot T_{amb} + h_g \cdot T_g + h_a \cdot T_a \right)}{2k + \Delta x (h_{r,g(top)} + h_{r,g(tip)} + h_{r,w(top)} + h_{r,w(tip)} + h_{r,d} + h_{r,amb} + h_g + h_a)} \quad (4.19)$$

เมื่อ $h_{r,w(tip)}$, $h_{r,d}$ และ $h_{r,amb}$ เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน อนุกรมจุด และค่าตัวประกอบต่าง ๆ ดังนี้

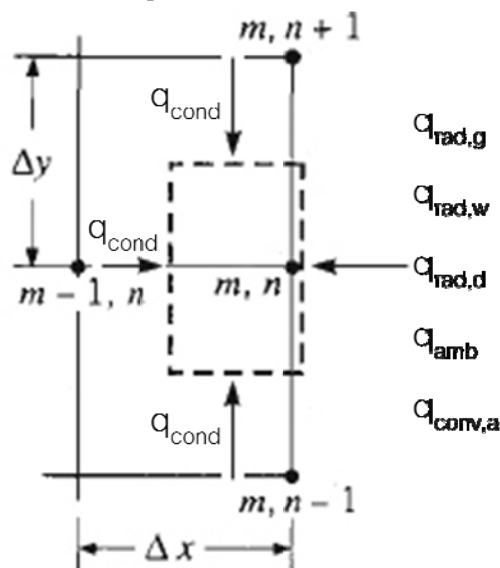
$$h_{r,w(tip)} = F_{sw} \cdot \sigma \varepsilon_s (T_w + T_{m,n}) (T_w^2 + T_{m,n}^2) \quad (4.20)$$

$$h_{r,d} = F_{sd} \cdot C_{ct} \cdot \sigma \varepsilon_s (T_d + T_{m,n}) (T_d^2 + T_{m,n}^2) \quad (4.21)$$

$$h_{r,amb} = C_{open} \cdot C_{ot} \cdot \sigma \varepsilon_s (T_{amb} + T_{m,n}) (T_{amb}^2 + T_{m,n}^2) \quad (4.22)$$

ส่วน $h_{r,g(tip)}$ หากจากวิธีเดียวกับ $h_{r,g(top)}$ ในสมการที่ 4.15 แต่ต่างกันที่ค่า a, b และ $\varepsilon_{g,av}$

4) จุด (L,y) เขียนสมการพลังงานได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 สมดุลพลังงานของจุด (L,y)

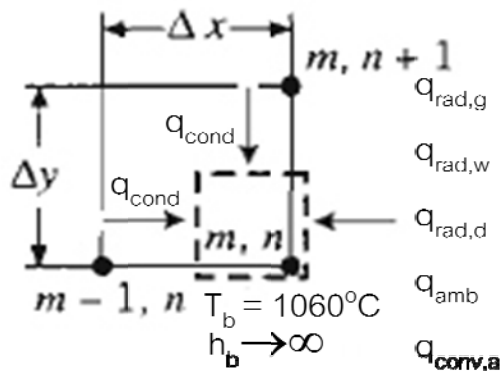
เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{rad,g} + q_{rad,w} + q_{rad,d} + q_{amb} + q_{conv,a} = 0$$

ในทำนองเดียวกันกับจุดที่ผ่านมา แทนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ แล้วจัดรูป เขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอุณหภูมิจุดอื่นจะได้

$$T_{m,n} = \frac{k(T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + 2T_{m-1,n}) + 2\Delta x(h_{r,g} \cdot T_g + h_{r,w} \cdot T_w + h_{r,d} \cdot T_d + h_{r,amb} \cdot T_{amb} + h_a \cdot T_a)}{4k + 2\Delta x(h_{r,g} + h_{r,w} + h_{r,d} + h_{r,amb} + h_g + h_a)} \quad (4.23)$$

5) จุด (L,0) เขียนสมการพลังงานได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 สมดุลพลังงานของจุด (L,0)

เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{rad,g} + q_{rad,w} + q_{rad,d} + q_{amb} + q_{conv,a} + q_{conv,b} = 0$$

ในทำนองเดียวกันกับจุดที่ผ่านมา แทนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ แล้วจัดรูป เขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอุณหภูมิจุดอื่นจะได้

$$T_{m,n} = \frac{k(T_{m,n+1} + T_{m-1,n}) + \Delta x(h_{r,g} \cdot T_g + h_{r,w} \cdot T_w + h_{r,d} \cdot T_d + h_{r,amb} \cdot T_{amb} + h_a \cdot T_a + h_b \cdot T_b)}{2k + \Delta x(h_{r,g} + h_{r,w} + h_{r,d} + h_{r,amb} + h_g + h_a + h_b)} \quad (4.24)$$

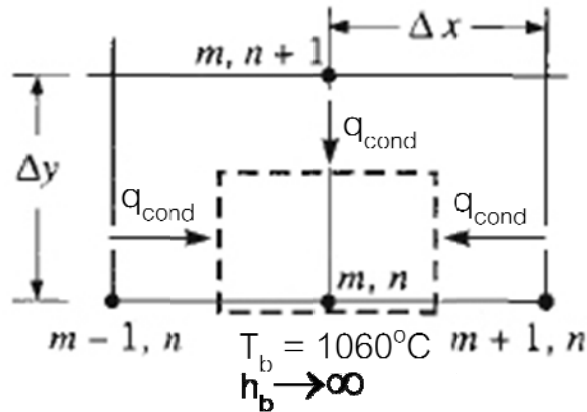
แต่เนื่องจากสภาวะขอบเขตที่ $y = 0$ ของปัญหาคือ $T_b = 1060^\circ\text{C}$ จึงกำหนดให้ค่า h_b มีค่าเข้าสู่อนันต์ จากสมการที่ 4.24 จะได้

$$T_{m,n} = T_b \quad (4.25)$$

6) จุด $(x,0)$ เขียนสมดุลพลังงานได้ดังรูปที่ 4.11

เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{conv,b} = 0$$



รูปที่ 4.11 สมดุลพลังงานของจุด $(x,0)$

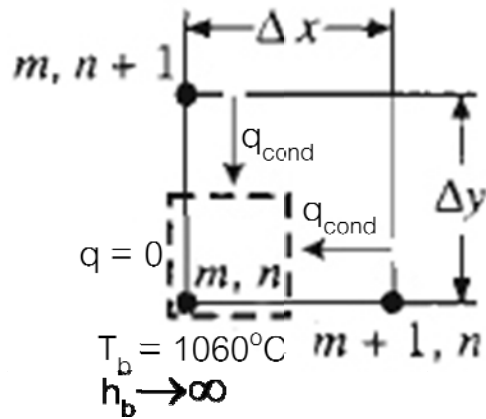
ในทำนองเดียวกันกับจุดที่ผ่านมา แทนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ แล้วจัดรูป เขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอุณหภูมิจุดอื่นจะได้

$$T_{m,n} = \frac{k(2T_{m,n+1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n}) + 2\Delta x(h_b \cdot T_b)}{4k + 2\Delta x h_b} \quad (4.26)$$

แต่เนื่องจากสภาวะขอบเขตที่ $y = 0$ ของปัญหาคือ $T_b = 1060^\circ\text{C}$ จึงกำหนดให้ค่า h_b มีค่าเข้าสู่อนันต์ จากสมการที่ 4.26 จะได้

$$T_{m,n} = T_b \quad (4.27)$$

7) จุด (0,0) เขียนสมดุลพลังงานได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 สมดุลพลังงานของจุด (0,0)

เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = 0$$

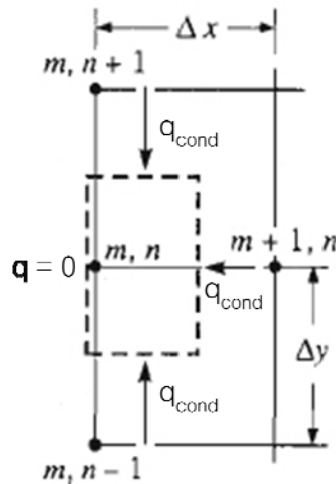
ในทำนองเดียวกันกับจุดที่ผ่านมา แทนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ แล้วจัดรูป เขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอุณหภูมิจุดอื่นจะได้

$$T_{m,n} = \frac{k(T_{m,n+1} + T_{m+1,n}) + \Delta x h_b \cdot T_b}{2k + \Delta x h_b} \quad (4.28)$$

แต่เนื่องจากสภาวะขอบเขตที่ $y = 0$ ของปัญหาคือ $T_b = 1060^\circ\text{C}$ จึงกำหนดให้ค่า h_b มีค่าเข้าสู่อนันต์ จากสมการที่ 4.28 จะได้

$$T_{m,n} = T_b \quad (4.29)$$

8) จุด $(0,y)$ เขียนสมดุลพลังงานได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 สมดุลพลังงานของจุด $(0,y)$

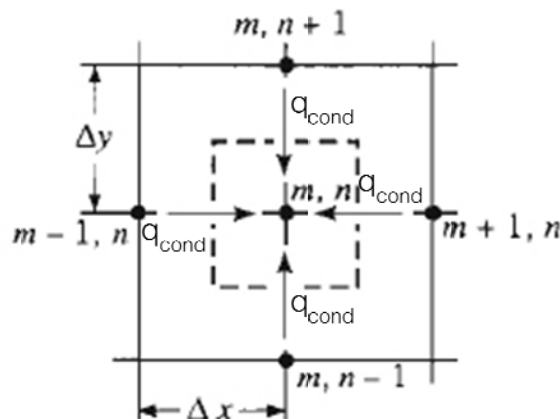
เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} = 0$$

ในทำนองเดียวกันกับจุดที่ผ่านมา แทนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ แล้วจัดรูป เขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอุณหภูมิจุดอื่นจะได้

$$T_{m,n} = \frac{(T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + 2T_{m+1,n})}{4} \quad (4.30)$$

9) จุด (x,y) เขียนสมดุลพลังงานได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 สมดุลพลังงานของจุด (x,y)

เขียนสมการอนุรักษ์พลังงานได้ดังนี้

$$q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} = 0$$

ในทำนองเดียวกันกับจุดที่ผ่านมา แทนค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่าง ๆ แล้วจัดรูป เขียน $T_{m,n}$ ให้อยู่ในรูปอุณหภูมิจุดอื่นจะได้

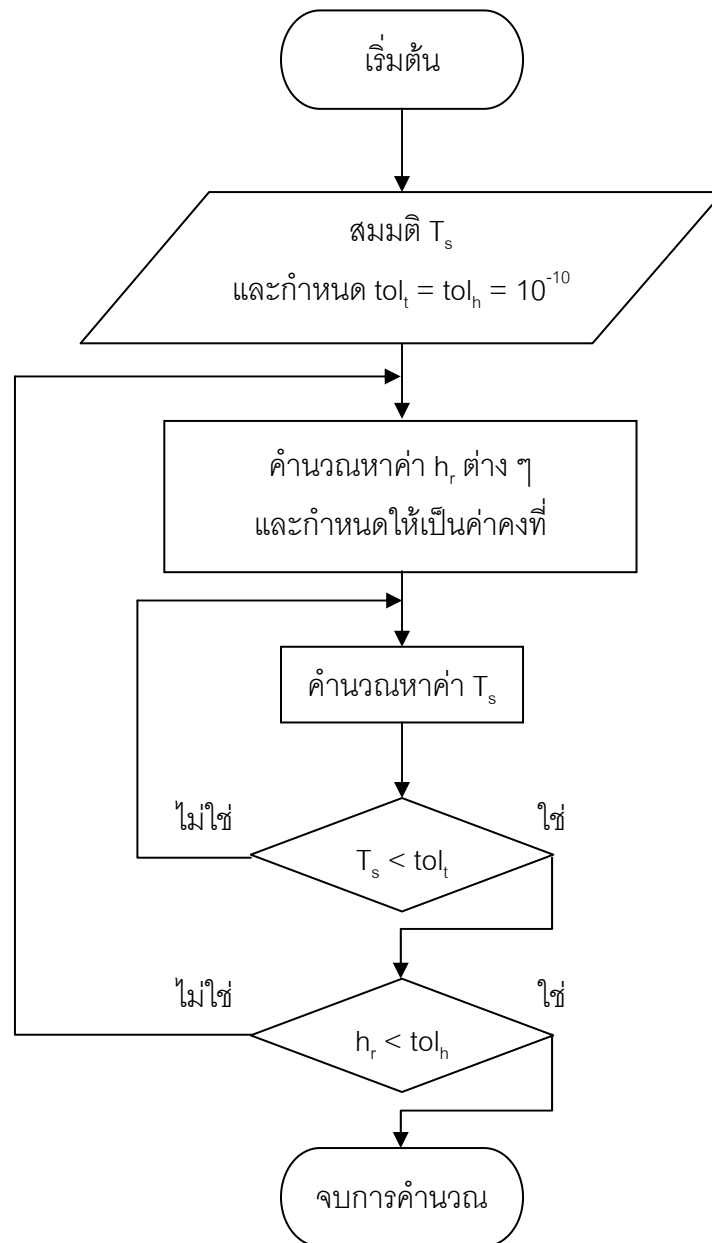
$$T_{m,n} = \frac{(T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + T_{m+1,n} + T_{m-1,n})}{4} \quad (4.31)$$

จากสมการที่ 4.31 จะเห็นว่าเมื่อวิเคราะห์จุดภายในโดยมีเฉพาะการนำความร้อนเท่านั้นจะได้สมการสำหรับหาอุณหภูมิที่จุด (m,n) เหมือนกับสมการที่ 4.7 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

เมื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานกับทุกจุดจะได้จำนวนสมการเท่ากับจำนวนจุด และเท่ากับจำนวนตัวแปรอุณหภูมิไม่ทราบค่า สามารถแก้สมการหาคำตอบได้โดยใช้วิธีคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.5 ขั้นตอนการคำนวณซ้ำด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล

วิธีคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดลสามารถใช้ได้กับสมการเชิงเส้นเท่านั้น แต่สมการที่ใช้หาอุณหภูมิที่สร้างขึ้นในหัวข้อที่แล้วไม่ใช่สมการเชิงเส้นเนื่องจากมีสมการที่เกิดจากการแผ่รังสีรวมอยู่ด้วย คือสมการที่ 4.15, 4.16, 4.20, 4.21 และ 4.22 ซึ่งเขียนอยู่ในรูปตัวแปร $h_{r,g}$, $h_{r,w}$, $h_{r,w(tip)}$, $h_{r,d}$ และ $h_{r,amb}$ ตามลำดับ (ต่อไปนี้จะแทนด้วยสัญลักษณ์ h_r เพียงตัวเดียว) จึงจำเป็นต้องทำสมการที่ใช้หาอุณหภูมิให้เป็นสมการเชิงเส้น (linearize) โดยเริ่มจากสมมติอุณหภูมิเริ่มต้นเพื่อคำนวณหาค่า h_r ต่าง ๆ แล้วกำหนดให้เป็นค่าคงที่ที่ทำให้สมการที่ใช้หาอุณหภูมิเป็นสมการเชิงเส้นส่งผลให้สามารถใช้วิธีคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดลคำนวณหาอุณหภูมิได้ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้ใหม่กลับไปแทนหาค่า h_r ต่าง ๆ อีกครั้ง ทำเช่นนี้ซ้ำไปจนกว่าคำตอบจะลู่เข้าดังแสดงในรูปที่ 4.15 กำหนดค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (tolerance) เท่ากับ 10^{-10} ค่าตัวประกอบน้ำหนัก (weighting factor) เท่ากับ 1 และอุณหภูมิเริ่มต้น $1,250^\circ\text{C}$



รูปที่ 4.15 แผนภูมิสายงาน (flow chart) ของการคำนวณซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล

บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

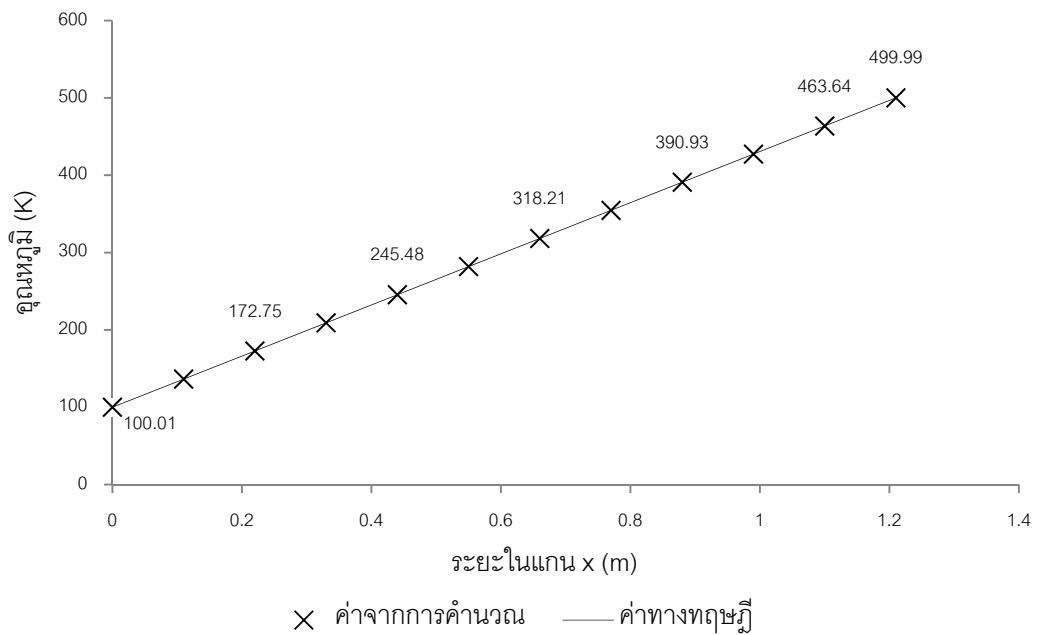
5.1 ผลการตรวจสอบโปรแกรมเบื้องต้น

5.1.1 การตรวจสอบการนำความร้อนหนึ่งมิติ

เป็นการตรวจสอบว่าโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณซ้ำนั้นถูกต้องในเบื้องต้นหรือไม่ โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปริมาตรควบคุมดังนี้

- 1) $x=0$; $T_s = 100 \text{ K}$ และ $h = 10^6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (อนันต์)
- 2) $x=L$; $T_s = 500 \text{ K}$ และ $h = 10^6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (อนันต์)
- 3) $y=0$; $h = 0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- 4) $y=H$; $h = 0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

จากเงื่อนไขที่กำหนดจะทำให้ปัญหากลายเป็นปัญหาการนำความร้อนหนึ่งมิติในแนวแกน x ผลการตรวจสอบดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าค่าจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมาก



รูปที่ 5.1 ผลการตรวจสอบการนำความร้อนหนึ่งมิติ

5.1.2 การตรวจสอบความอิสระในการกำหนดระยะระหว่างจุด (Δx และ Δy)

เป็นการตรวจสอบว่าเมื่อกำหนดค่า Δx และ Δy ต่างกันแล้วค่าอุณหภูมิที่จุดเดียวกันมีความคลาดเคลื่อนมากน้อยเพียงใด หากกำหนด Δx และ Δy ให้มีค่าน้อย ค่าตอบที่ได้จะมีความแม่นยำสูงแต่จะเสียเวลาในการคำนวณมาก จึงจำเป็นต้องกำหนดค่า Δx และ Δy ให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้เสียเวลาในการคำนวณมากเกินไปและได้คำตอบที่มีความคลาดเคลื่อนในระดับที่ยอมรับได้ ผลการตรวจสอบแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนสูงสุดของอุณหภูมิที่จุดเดียวกัน และเวลาในการคำนวณเมื่อกำหนดค่า Δx ต่างกัน เทียบกับกรณี $\Delta x = 0.0025$ m

$\Delta x = \Delta y$ (m)	ร้อยละความคลาดเคลื่อน	เวลาในการคำนวณ
0.0025	-	3 ชั่วโมง 28 นาที
0.0050	0.08	16 นาที
0.0100	0.18	2 นาที
0.0200	1.38	7 วินาที

จากผลการเปรียบเทียบในตารางเลือกใช้ $\Delta x = 0.01$ m เนื่องจากใช้เวลาไม่มากและได้ผลลัพธ์ที่มีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 0.2% ซึ่งยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

5.2 ผลการคำนวณ

เมื่อเลือก $\Delta x = 0.01$ m จะได้จำนวนจุดในแนวแกน x 122 จุด จำนวนจุดในแนวแกน y 11 จุด และจำนวนจุดทั้งหมด 1,342 จุด กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-10} ตัวประกอบน้ำหนักเท่ากับ 1 และสมมติอุณหภูมิเริ่มต้น $1,250^{\circ}\text{C}$ คำนวณซ้ำจนผลลัพธ์ลู่เข้า ได้ผลการคำนวณดังนี้

5.2.1 ผลการคำนวณซ้ำ

เป็นผลการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณซ้ำแสดงในตารางที่ 5.2

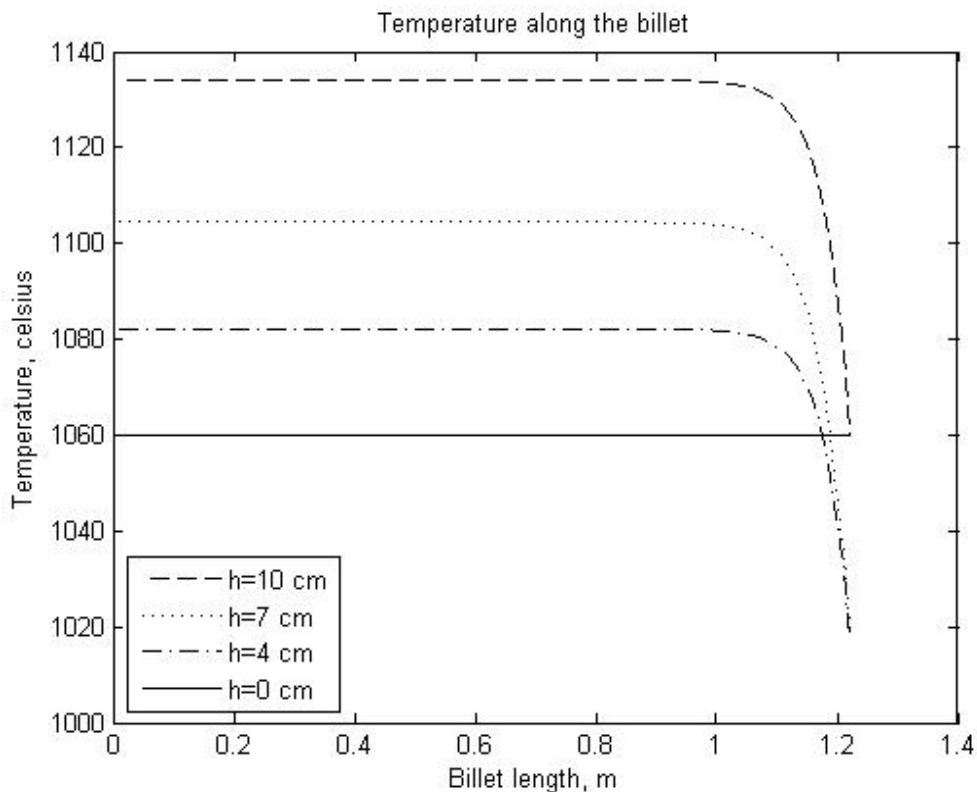
ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณซ้ำ

ข้อมูล	ผลการคำนวณ
จำนวนครั้งในการคำนวณซ้ำ h_r	13 ครั้ง

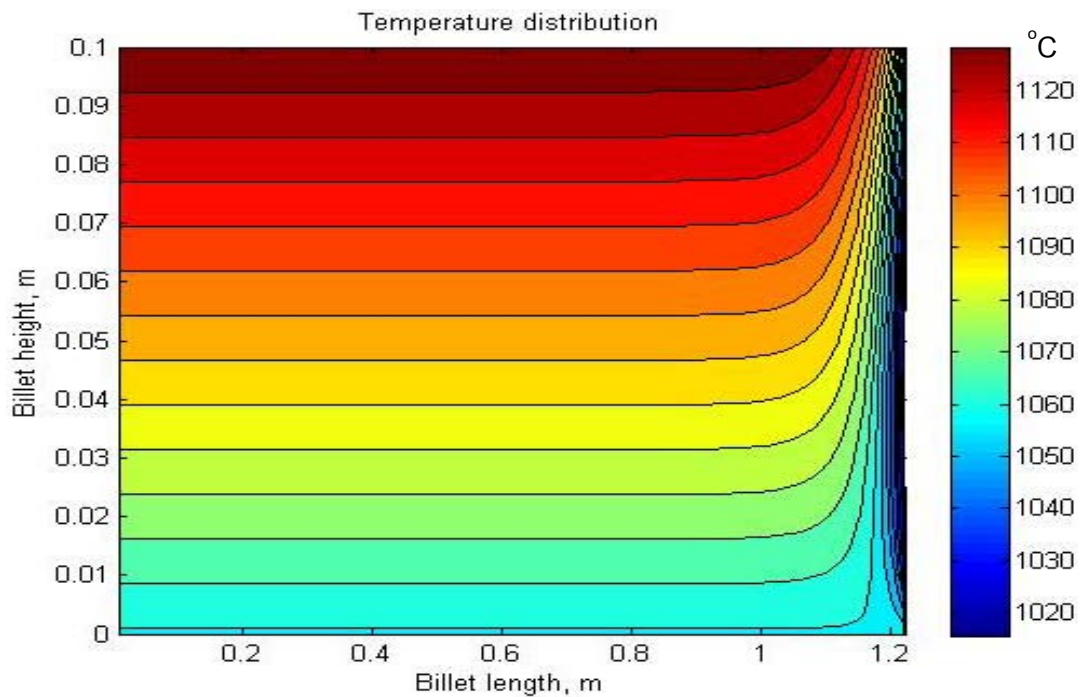
ข้อมูล	ผลการคำนวณ
จำนวนครั้งในการคำนวณซ้ำ T_s	4,474 ครั้ง
เวลาที่ใช้คำนวณ	2 นาที

5.2.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อน

ผลการคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 5.2 รูปที่ 5.3 และตารางที่ 5.3 จากรูปพบว่า การแจกแจงอุณหภูมิส่วนใหญ่ (ที่ระยะความยาวของแท่งเหล็กตั้งแต่ 0 m ถึง 1 m วัดจากกึ่งกลางแท่งเหล็ก) จะลดลงเป็นเชิงเส้นจากผิวบนสู่ผิวล่าง โดยอุณหภูมิที่ผิวบนมีค่า $1,134^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิที่ผิวล่างมีค่าคงที่ $1,060^{\circ}\text{C}$ แต่ที่บริเวณปลายแท่งเหล็กอุณหภูมิจะลดต่ำลง เนื่องจากมีการสูญเสียความร้อนต่อพื้นที่มากในบริเวณดังกล่าว อุณหภูมิในแนวระดับที่ความสูง 7 cm ลดลงมากที่สุดประมาณ 87°C และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของอุณหภูมิในแนวระดับมีค่ามากที่สุด 12.8°C ที่ความสูงเดียวกัน จุดที่มีอุณหภูมิต่ำสุดอยู่บริเวณปลายแท่งเหล็กที่ความสูง 4 cm มีค่าประมาณ $1,016^{\circ}\text{C}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กมีค่า 24.71°C



รูปที่ 5.2 การแจกแจงอุณหภูมิที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ



รูปที่ 5.3 การแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็ก

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิของแท่งเหล็ก

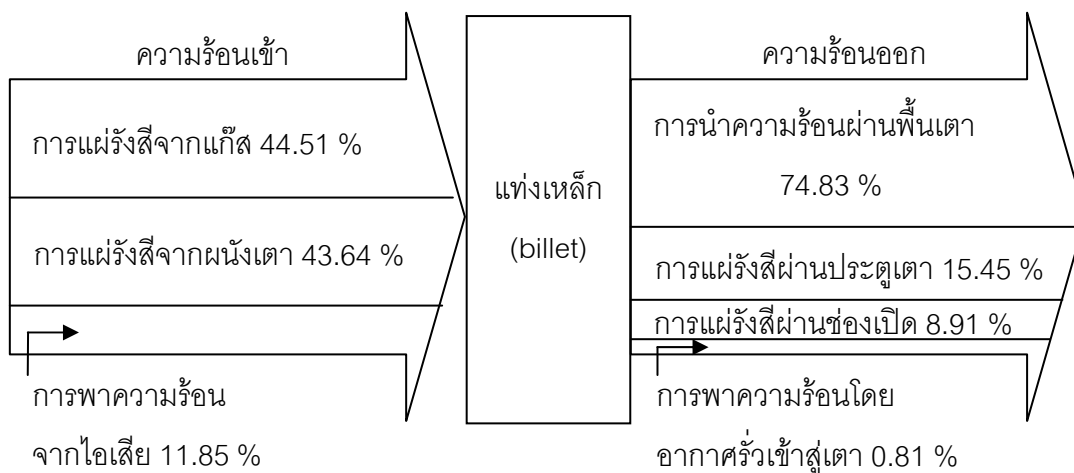
ผลการคำนวณ (°C)	ค่า
อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็ก	1,094.46
อุณหภูมิสูงสุดในแท่งเหล็ก	1,134.05
อุณหภูมิต่ำสุดในแท่งเหล็ก	1,015.62
ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดในแท่งเหล็ก	118.43
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับของอุณหภูมิแท่งเหล็ก	12.80
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็ก	24.71

ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนแสดงในตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อน

ความร้อนเข้า	kW	%	ความร้อนออก	kW	%
การแผ่รังสีจากแก๊ส	1.3857	44.51	การสูญเสียผ่านพื้นเตา	2.3293	74.83
การแผ่รังสีจากผนังเตา	1.3583	43.64	การสูญเสียผ่านประตูยিংเหล็ก	0.4811	15.45

ความร้อนเข้า	kW	%	ความร้อนออก	kW	%
การพาความร้อน จากไอเสีย	0.3689	11.85	การสูญเสียจาก อากาศรั่วเข้าสู่เตา	0.0251	0.81
			การสูญเสียผ่านช่องเปิด	0.2775	8.91
ความร้อนเข้ารวม	3.1129	100.00	ความร้อนออกรวม	3.1129	100.00



รูปที่ 5.4 แผนผังการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากแทงเหล็ก

จากผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนพบว่าการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แทงเหล็กโดยการแผ่รังสีมีค่าถึง 88.15% ของความร้อนที่ถ่ายเทเข้าทั้งหมด แบ่งเป็นการแผ่รังสีจากแก๊ส 44.51% และการแผ่รังสีจากผนังเตา 43.64% ส่วนการพาความร้อนเข้าสู่แทงเหล็กมีเพียง 11.85% เท่านั้น ความร้อนที่สูญเสียออกจากแทงเหล็กจะแบ่งได้ 3 กรณีคือการสูญเสียความร้อนขณะเปิดประตูยิงเหล็ก การสูญเสียความร้อนขณะปิดประตูยิงเหล็ก และการสูญเสียทั้งขณะเปิดประตูและปิดประตู การสูญเสียความร้อนขณะเปิดประตูประกอบด้วย การแผ่รังสีผ่านช่องเปิดของประตูคิดเป็น 8.91% ของการสูญเสียทั้งหมด และการพาความร้อนจากอากาศเย็นที่รั่วเข้าสู่เตาทางช่องเปิดของประตูเตาคิดเป็น 0.81% ของการสูญเสียทั้งหมด และการแผ่รังสีผ่านช่องเปิดเป็นการสูญเสียที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ แต่การสูญเสียจากอากาศรั่วเข้าสู่เตาถึงแม้จะเป็นการสูญเสียเพียงเล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุณหภูมิในแทงเหล็กมากนักแต่สามารถป้องกันได้โดยเพิ่มความดันภายในเตาให้สูงขึ้นเพื่อไม่ให้มีอากาศเย็นรั่วเข้าสู่เตา การสูญเสียความร้อนขณะปิดประตูคือการสูญเสียความร้อนผ่านประตูยิงเหล็กซึ่งไม่ได้หุ้มฉนวนทำให้เกิดการสูญเสียถึง 15.45% จึงควรหุ้มฉนวนประตูยิงเหล็กเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและช่วยให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิในแนวระดับของแทงเหล็กสม่ำเสมอมากขึ้น ส่วนการสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้ง

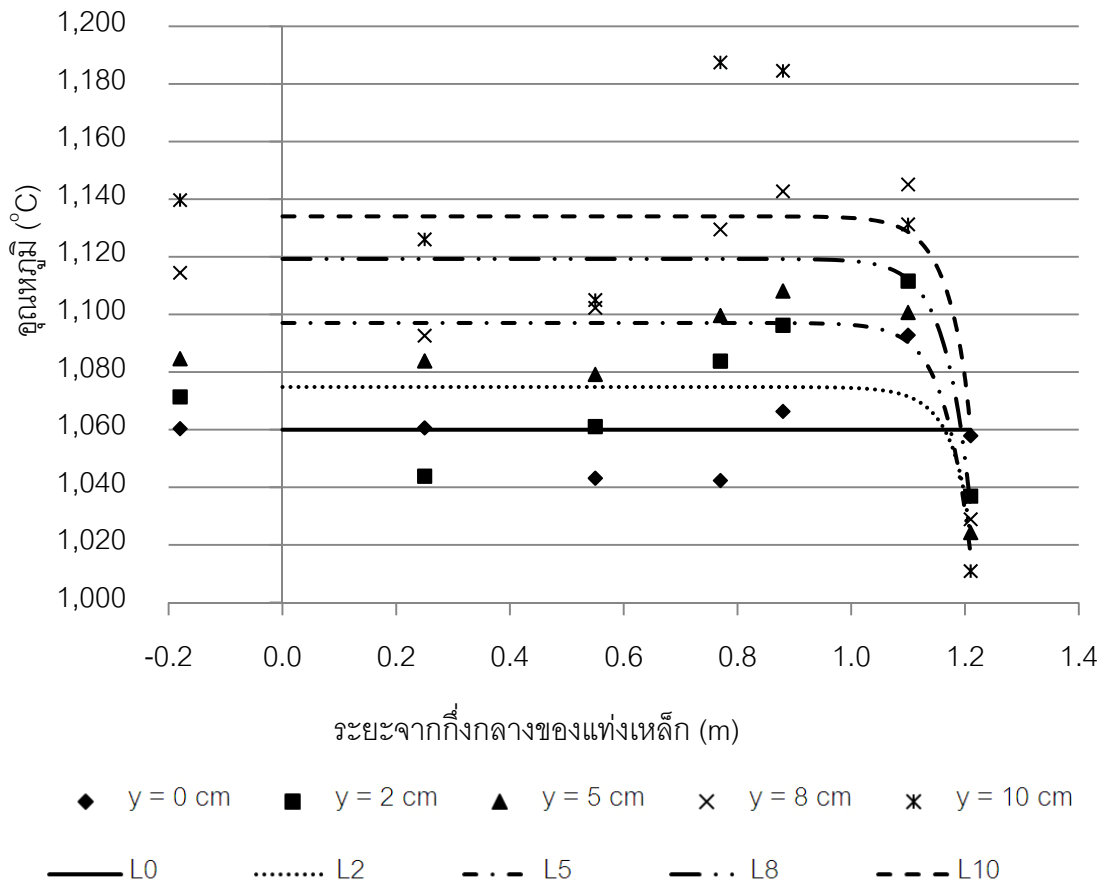
ขณะเปิดประตูและปิดประตูคือการสูญเสียผ่านพื้นเตาเป็นการสูญเสียความร้อนที่มากที่สุดมีค่าถึง 74.83% จึงควรหุ้มฉนวนที่พื้นเตาเพื่อลดการสูญเสียความร้อนและส่งผลให้การแจกแจงอุณหภูมิในแนวตั้งของแท่งเหล็กสม่ำเสมอมากขึ้น จากแนวทางการลดการสูญเสียความร้อนที่ได้เสนอไปทั้งการหุ้มฉนวนและการเพิ่มความดันภายในเตา จะสามารถทำนายผลการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กในกรณีดังกล่าวได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ ให้สอดคล้องกันดังจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 5.4

5.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน

นำผลการคำนวณอุณหภูมิในแท่งเหล็กมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากโรงงาน โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะตามแนวระดับของแท่งเหล็กที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ของแท่งเหล็กดังแสดงในรูปที่ 5.5 โดยที่กราฟจุดแสดงข้อมูลผลจากการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแท่งเหล็ก และกราฟเส้นแสดงผลจากการคำนวณที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ ตามตัวเลขกำกับไว้หลังชื่อ จากกราฟเปรียบเทียบพบว่าผลจากการคำนวณและค่าที่วัดได้มีความสอดคล้องกันเชิงคุณภาพ มีแนวโน้มการแจกแจงอุณหภูมิเป็นไปในทางเดียวกัน และเมื่อคำนวณหาร้อยละความคลาดเคลื่อนที่ตำแหน่งการวัดต่าง ๆ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดมีค่า 4.89% และค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดมีค่า 0.06% ดังแสดงในตารางที่ 5.5 เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดมีค่าไม่เกิน 5% จึงเชื่อมั่นได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการแจกแจงอุณหภูมิได้จริงและมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้

ตารางที่ 5.5 ร้อยละความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าจากการวัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแท่งเหล็ก

ตำแหน่งความสูงจากผิวล่าง (cm)	ระยะตามแนวยาวของแท่งเหล็ก (m)					
	0.25	0.55	0.77	0.88	1.10	1.21
0	0.06	1.62	1.69	0.59	3.00	0.20
2	2.97	1.29	0.83	1.96	3.60	1.40
5	1.21	1.65	0.24	1.01	0.94	0.75
8	2.43	1.54	0.91	2.06	2.88	0.39
10	0.71	2.63	4.50	4.27	0.23	4.89



รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิตามแนวยาวของแท่งเหล็กที่ตำแหน่งความสูงต่าง ๆ

5.4 ผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก (parametric study)

การศึกษาผลกระทบจากการหุ้มฉนวนประตูดึงเหล็ก

เนื่องจากสภาพการทำงานของเตาเผาเหล็กที่ศึกษาในปัจจุบันไม่ได้หุ้มฉนวนที่ประตูดึงเหล็กและจากผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าการสูญเสียความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยออกจากแท่งเหล็กผ่านประตูดังกล่าวสูงทำให้อุณหภูมิมิบริเวณปลายแท่งเหล็กลดต่ำลงมาก จึงควรปรับปรุงด้วยการหุ้มฉนวนที่ประตูเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในของประตูและลดความร้อนสูญเสียบริเวณดังกล่าว ฉนวนที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์เป็นฉนวนใยเซรามิก (ceramic fiber) ทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 1260°C มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ 0.16 W/m.K (ฉนวนใยเซรามิก, 2553: ออนไลน์) ศึกษาผลจากการหุ้มฉนวนหนา 0.6 cm, 1.25 cm, 2.5 cm และ 5 cm ได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้ (บริษัทโกลบอล อินชูลेशन จำกัด, 2553: ออนไลน์)

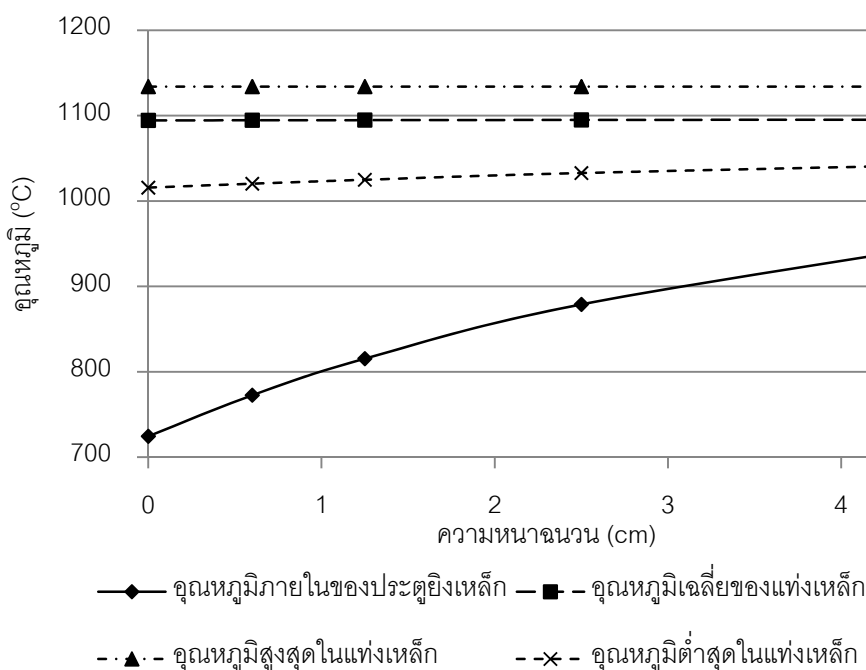
1) ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

เมื่อหุ้มฉนวนประตูจะทำให้อุณหภูมิภายในของประตูมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของฉนวนดังแสดงในรูปที่ 5.6 และเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างแท่งเหล็กกับประตูเหล็กมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของแท่งเหล็ก ดังนั้นการเพิ่มความหนาของฉนวนจึงส่งผลให้อุณหภูมิที่ปลายแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นแต่ไม่ทำให้อุณหภูมิสูงสุดเปลี่ยนแปลง ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดจึงมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในตารางที่ 5.6 เมื่อหุ้มฉนวนหนา 5 cm จะทำให้ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดมีค่าลดลงถึง 28.37°C เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้หุ้มฉนวน และจากเหตุผลเดียวกันเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาของฉนวนจะไม่ทำให้อุณหภูมิโดยรวมของแท่งเหล็กเปลี่ยนแปลงไปมากนัก สังเกตได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กซึ่งเป็นค่าที่ต้องใช้ข้อมูลอุณหภูมิทุกจุดของแท่งเหล็กในการคำนวณจะมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเปลี่ยนความหนาของฉนวนดังแสดงในตารางที่ 5.6 เมื่อหุ้มฉนวนหนา 5 cm อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็กจะเพิ่มขึ้นเพียง 0.97°C และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กลดลงเพียง 1°C เมื่อเทียบกับกรณีไม่หุ้มฉนวน แต่เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างแท่งเหล็กกับประตูเหล็กเป็นการถ่ายเทความร้อนในแนวระดับ การหุ้มฉนวนจึงส่งผลกระทบต่อหลัก ๆ ต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนในแนวระดับเป็นส่วนใหญ่ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของอุณหภูมิแท่งเหล็กในแนวระดับจึงลดลงมากเมื่อความหนาของฉนวนเพิ่มขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5.6 เมื่อหุ้มฉนวนหนา 5 cm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับจะมีค่าลดลง 4.73°C เมื่อเทียบกับกรณีไม่หุ้มฉนวน

ตารางที่ 5.6 ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

ปัจจัยที่พิจารณา ($^{\circ}\text{C}$)	ความหนาฉนวน (cm)				
	0.00	0.60	1.25	2.50	5.00
อุณหภูมิภายในของประตูเหล็ก	724.47	772.52	815.34	878.92	962.30
อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็ก	1,094.46	1,094.61	1,094.76	1,095.02	1,095.43
อุณหภูมิสูงสุดในแท่งเหล็ก	1,134.05	1,134.05	1,134.05	1,134.05	1,134.05
อุณหภูมิต่ำสุดในแท่งเหล็ก	1,015.62	1,020.20	1,024.83	1,032.72	1,043.99
ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็ก	118.43	113.85	109.22	101.33	90.06
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับของอุณหภูมิแท่งเหล็ก	12.80	12.06	11.32	10.05	8.06

ปัจจัยที่พิจารณา (°C)	ความหนาแน่น (cm)				
	0.00	0.60	1.25	2.50	5.00
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม ของอุณหภูมิแท่งเหล็ก	24.71	24.52	24.33	24.06	23.70



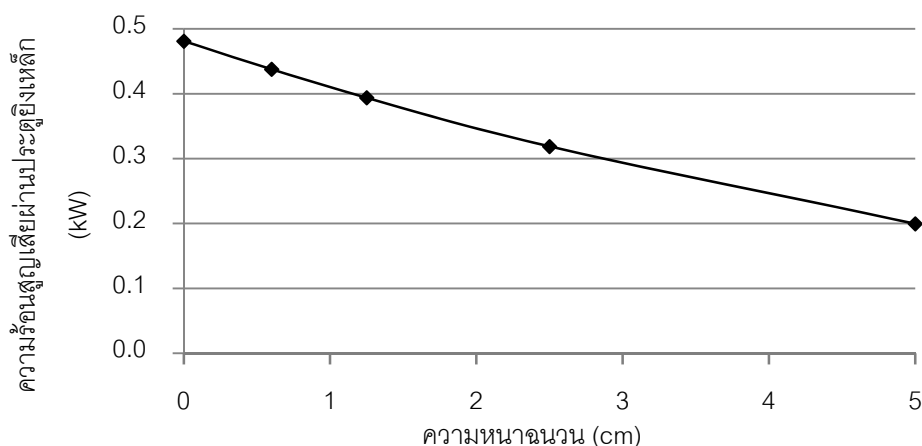
รูปที่ 5.6 ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

2) ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การหุ้มฉนวนประตูเป็นการลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมของประตู ส่งผลให้อัตรการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนผ่านประตูมีค่าลดลงและอุณหภูมิภายในของประตูยิ่งเหล็กเพิ่มขึ้น การสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างแท่งเหล็กกับประตูยิ่งเหล็กจึงลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.7 เมื่อหุ้มฉนวนหนา 5 cm การสูญเสียความร้อนผ่านประตูมีค่าลดลง 0.2815 kW ซึ่งมีค่าถึง 59% เมื่อเทียบกับกรณีไม่ได้หุ้มฉนวน ส่วนการสูญเสียความร้อนในรูปแบบอื่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่การสูญเสียความร้อนผ่านประตูมีค่าลดลงมากกว่าการเพิ่มขึ้นดังกล่าวความร้อนสูญเสียรวมจึงมีค่าลดลงดังแสดงในตารางที่ 5.7 เมื่อหุ้มฉนวนหนา 5 cm อัตราการสูญเสียความร้อนออกจากแท่งเหล็กรวมมีค่าลดลง 0.1087 kW คิดเป็น 3.49% เมื่อเทียบกับกรณีไม่หุ้มฉนวน

ตารางที่ 5.7 ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การถ่ายเทความร้อน (kW)	ความหนาฉนวน (cm)				
	0.00	0.60	1.25	2.50	5.00
การแผ่รังสีจากแก๊ส	1.3857	1.3834	1.3810	1.3771	1.3708
การแผ่รังสีจากผนังเตา	1.3583	1.3444	1.3303	1.3060	1.2673
การพาความร้อนจากไอเสีย	0.3689	0.3685	0.3680	0.3673	0.3661
การแผ่รังสีออกสู่บรรยากาศ	-0.2775	-0.2810	-0.2845	-0.2906	-0.3004
การแผ่รังสีกับประตูยিংเหล็ก	-0.4811	-0.4378	-0.3940	-0.3187	-0.1996
การพาความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา	-0.0251	-0.0252	-0.0253	-0.0255	-0.0258
การถ่ายเทความร้อนสู่พื้นเตา	-2.3293	-2.3523	-2.3756	-2.4155	-2.4784
รวมความร้อนเข้า	3.1129	3.0963	3.0794	2.7316	3.0042
รวมความร้อนออก	-3.1129	-3.0963	-3.0794	-2.7316	-3.0042



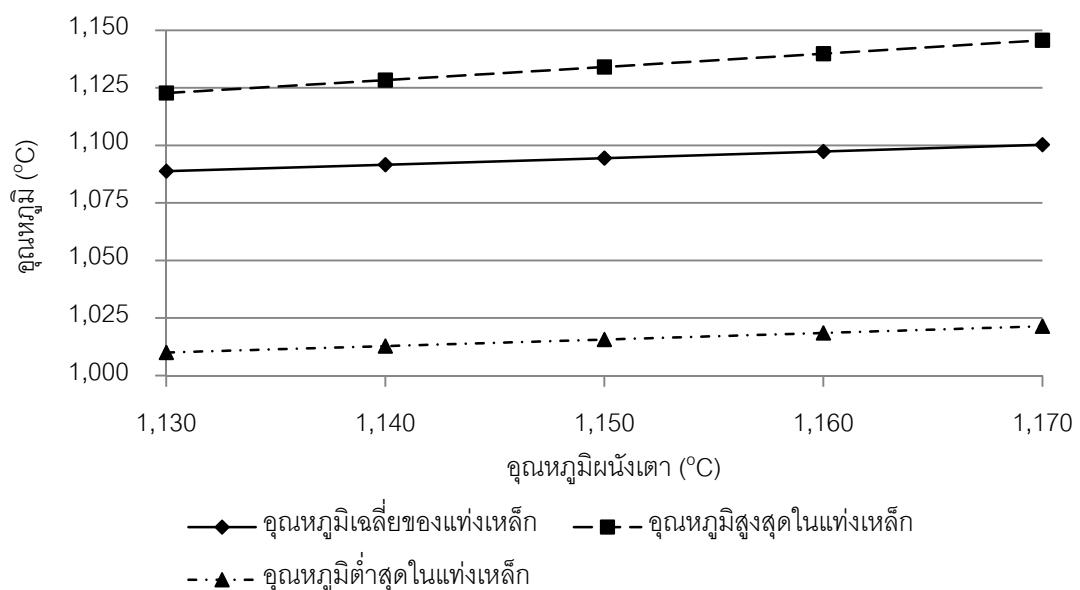
รูปที่ 5.7 ผลการหุ้มฉนวนที่มีต่อความร้อนสูญเสียผ่านประตูยিংเหล็ก

การศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิผนังเตา

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองของการทำงานปกติที่อุณหภูมิผนังเตามีค่า $1,150^{\circ}\text{C}$ พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังเตามีค่าถึง 43.64% จึงกล่าวได้ว่าการแผ่รังสีจากผนังเตามีความสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กมาก และปัจจัยหนึ่งที่มีผลสำคัญต่อการแผ่รังสีจากผนังเตาคืออุณหภูมิของผนังเตาซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพการหุ้มฉนวนผนังเตา เพื่อศึกษาผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผนังเตาจึงทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิผนังเตาในแบบจำลองได้ผลดังนี้

1) ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

การแผ่รังสีจากผนังเตาเข้าสู่แท่งเหล็กเป็นการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่ โดยเฉพาะการแผ่รังสีเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็ก เนื่องจากพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนที่ผิวบนของแท่งเหล็กมีมากกว่าพื้นที่หน้าตัดด้านข้าง การแผ่รังสีจากผนังเตาเข้าสู่แท่งเหล็กจึงมีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนในแนวตั้งมากกว่าแนวระดับ เมื่ออุณหภูมิผนังเตาสูงขึ้น อัตราการแผ่รังสีจากผนังเตาเข้าสู่แท่งเหล็กจะเพิ่มขึ้น อุณหภูมิบริเวณผิวบนของแท่งเหล็กจึงสูงขึ้น และจะนำความร้อนไปสู่จุดอื่น ๆ ทำให้อุณหภูมิจุดอื่น ๆ สูงขึ้นด้วย แต่เนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นมากกว่าอุณหภูมิต่ำสุดผลต่างอุณหภูมิสูงสุดจึงมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.8 เมื่ออุณหภูมิผนังเตามีค่า $1,170^{\circ}\text{C}$ ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 5.82°C เมื่อเทียบกับสภาพการทำงานปกติที่อุณหภูมิผนังเตามีค่า $1,150^{\circ}\text{C}$ แต่เนื่องจากอุณหภูมิมวลกลางของแท่งเหล็กมีค่าคงที่จึงทำให้อุณหภูมิตั้งแต่ผิวบนและผิวล่างมีความแตกต่างกันมากจึงส่งผลให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวตั้งมีค่าเพิ่มขึ้นมาก นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างจะส่งผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิส่วนใหญ่ของแท่งเหล็กเนื่องจากความแตกต่างดังกล่าวนี้กินพื้นที่ตลอดความยาวของแท่งเหล็กดังแสดงในรูปที่ 5.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กจึงเพิ่มสูงขึ้นมากดังแสดงในตารางที่ 5.8 เมื่ออุณหภูมิผนังเตามีค่า $1,170^{\circ}\text{C}$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กเพิ่มขึ้นถึง 3.36°C เมื่อเทียบกับสภาพการทำงานปกติ ในทางตรงกันข้ามค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเนื่องจากอุณหภูมิตั้งแต่ผิวบนและผิวล่างมีค่าสูงขึ้นจากสาเหตุที่กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 5.8 ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

ตารางที่ 5.8 ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

ปัจจัยที่พิจารณา (°C)	อุณหภูมิผนังเตา (°C)				
	1,130	1,140	1,150	1,160	1,170
อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็ก	1,088.78	1,091.60	1,094.46	1,097.36	1,100.29
อุณหภูมิสูงสุดในแท่งเหล็ก	1,122.75	1,128.36	1,134.05	1,139.81	1,145.66
อุณหภูมิต่ำสุดในแท่งเหล็ก	1,009.99	1,012.78	1,015.62	1,018.49	1,021.41
ผลต่างอุณหภูมิสูงสุด ของแท่งเหล็ก	112.77	115.58	118.43	121.32	124.25
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุด ในแนวระดับของอุณหภูมิ แท่งเหล็ก	12.86	12.83	12.80	12.76	12.73
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม ของอุณหภูมิของแท่งเหล็ก	21.53	23.09	24.71	26.37	28.07

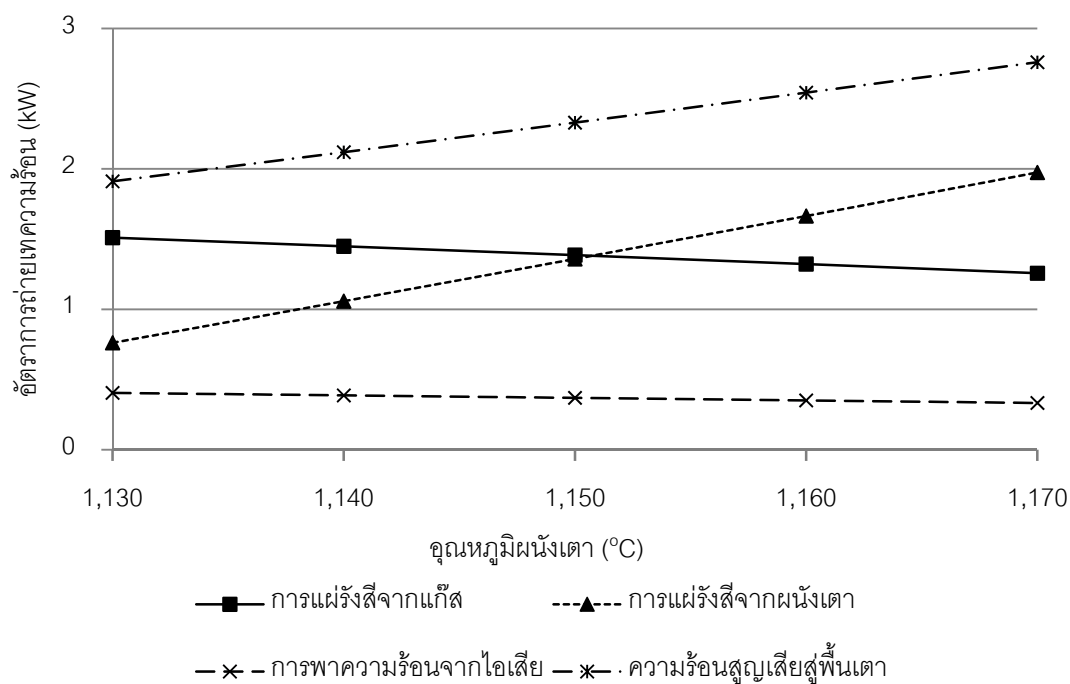
2) ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

เมื่ออุณหภูมิผนังเตาเพิ่มขึ้นผลต่างระหว่างอุณหภูมิผนังเตากับอุณหภูมิผิวของแท่งเหล็กจึงมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการแผ่รังสีจากผนังเตาเข้าสู่แท่งเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันจะส่งผลให้อัตราการแผ่รังสีจากแก๊สและอัตราการพาความร้อนจากไอเสียเข้าสู่แท่งเหล็กมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.9 เมื่ออุณหภูมิผนังเตาเพิ่มขึ้นจาก 1,150°C เป็น 1,170°C อัตราการแผ่รังสีจากผนังเตาเพิ่มขึ้น 0.6157 kW อัตราการแผ่รังสีจากแก๊สลดลง 0.1290 kW และอัตราการพาความร้อนจากไอเสียลดลงเพียง 0.0363 kW จึงทำให้ความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กรวมมีค่าสูงขึ้น 0.4505 kW นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิผนังเตาเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของแท่งเหล็กจะเพิ่มขึ้นจึงทำให้แท่งเหล็กสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้นในทุกรูปแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งการสูญเสียความร้อนสู่พื้นเตามีค่ามากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 5.9 เมื่ออุณหภูมิผนังเตามีค่า 1,170°C ความร้อนสูญเสียผ่านพื้นเตามีค่าเพิ่มขึ้น 0.4301 kW เมื่อเทียบกับสภาพการทำงานปกติ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิผิวบนและอุณหภูมิผิวล่างของแท่งเหล็กมีค่าแตกต่างกันมากและกินพื้นที่ตลอดความยาวของแท่งเหล็กดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว จึงทำให้ความร้อนจากการแผ่รังสีจากผนังเตาที่เข้าสู่แท่งเหล็กบริเวณผิวบนถูกนำความร้อนออกสู่พื้นเตาเป็นส่วนใหญ่ ส่วนการสูญเสียความร้อนในรูปแบบอื่นบริเวณปลายแท่งเหล็กนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยดังแสดงในตารางที่ 5.9 ถึงแม้้อัตราการ

สูญเสียความร้อนรวมและอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่สิ่งที่ได้กลับมาก็คืออุณหภูมิของแท่งเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 5.9 ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การถ่ายเทความร้อน (kW)	อุณหภูมิผนังเตา (°C)				
	1,130	1,140	1,150	1,160	1,170
การแผ่รังสีจากแก๊ส	1.5103	1.4485	1.3857	1.3218	1.2567
การแผ่รังสีจากผนังเตา	0.7609	1.0573	1.3583	1.6639	1.9740
การพาความร้อนจากไอเสีย	0.4042	0.3867	0.3689	0.3509	0.3327
การแผ่รังสีออกสู่บรรยากาศ	-0.2722	-0.2748	-0.2775	-0.2803	-0.2831
การแผ่รังสีกับประตูเชิงเหล็ก	-0.4671	-0.4740	-0.4811	-0.4883	-0.4957
การพาความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา	-0.0249	-0.0250	-0.0251	-0.0252	-0.0253
การถ่ายเทความร้อนสู่พื้นเตา	-1.9111	-2.1187	-2.3293	-2.5428	-2.7594
รวมความร้อนเข้า	2.6753	2.8925	3.1129	3.3366	3.5634
รวมความร้อนออก	-2.6753	-2.8925	-3.1129	-3.3366	-3.5634



รูปที่ 5.9 ผลของอุณหภูมิผนังเตาที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การศึกษาผลกระทบจากสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูยিংเหล็ก

เมื่อแท่งเหล็กในเตาเผาเคลื่อนมาถึงประตูทางออกและพร้อมที่จะนำเข้าสู่กระบวนการรีดเหล็กประตูยিংเหล็กจะเปิดขึ้นเพื่อนำเหล็กออกจากเตา ไม่เพียงแต่การเปิดประตูเพื่อนำแท่งเหล็กออกจากเตาเท่านั้นแต่รวมถึงเปิดประตูยিংเหล็กค้างไว้หรือเปิดนอกเหนือจากการนำแท่งเหล็กออกจากเตาในกรณีที่เกิดปัญหาบางประการ เช่น แท่งเหล็กติดขัดไม่สามารถเคลื่อนออกจากเตาได้หรือการซ่อมบำรุงแก้ไขปัญหาอื่น ๆ ในขณะที่ประตูเปิดนี้เองจะเกิดการสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดโดยการแผ่รังสีจากแท่งเหล็กออกสู่บรรยากาศภายนอกซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกันมากการสูญเสียความร้อนดังกล่าวจึงมีค่ามากและไม่สามารถป้องกันได้ อย่างไรก็ตามการสูญเสียดังกล่าวจะเกิดในขณะที่เปิดประตูยিংเหล็กเท่านั้นดังนั้นอัตราการผลิตและปัญหาต่างๆ ที่ต้องการเปิดประตูเพื่อแก้ไขจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสูญเสียความร้อนรูปแบบนี้ เพื่อศึกษาผลจากสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูตลอดการผลิตที่มีต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กจึงทดลองเปลี่ยนค่าสัดส่วนดังกล่าวในแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยที่สัดส่วนการเปิดประตูในการทำงานปกติมีค่า 27.5% ทั้งนี้การแปรเปลี่ยนสัดส่วนการเปิดประตูในแบบจำลองได้เปลี่ยนค่าสัดส่วนการเปิดประตูยিংเหล็กตั้งแต่ 0% ถึง 100% ตลอดระยะเวลาการผลิตเพื่อศึกษาแนวโน้มของผลการคำนวณต่าง ๆ แต่ในความเป็นจริงสัดส่วนการเปิดประตูจะอยู่ในช่วง 25% ถึง 50% โดยประมาณ ในการวิเคราะห์ผลจึงจะให้ความสนใจผลในช่วงที่เป็นไปได้เป็นหลักดังนี้

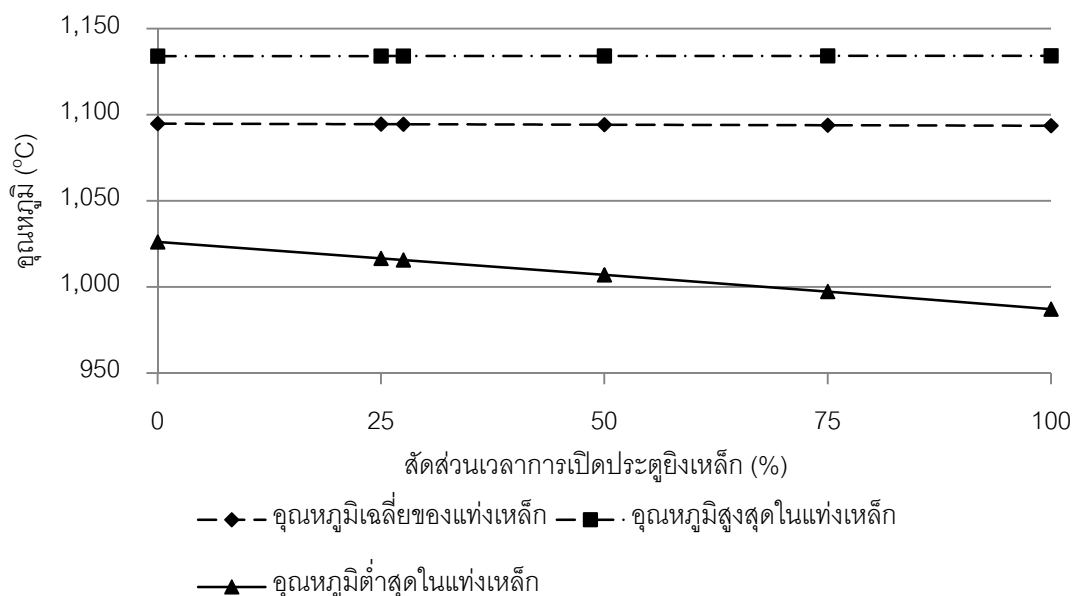
1) ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

การสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดของประตูเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างหน้าตัดของแท่งเหล็กกับสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งเกิดขึ้นบริเวณปลายแท่งเหล็กจึงมีผลอย่างมากต่ออุณหภูมิบริเวณปลายแท่งเหล็ก ดังที่กล่าวไปแล้วว่าอุณหภูมิต่ำสุดจะอยู่บริเวณปลายแท่งเหล็กดังนั้นเมื่อสัดส่วนเวลาการเปิดประตูยিংเหล็กเพิ่มขึ้นระยะเวลาที่แท่งเหล็กถูกเปิดสู่สิ่งแวดล้อมจะมากขึ้นทำให้แท่งเหล็กสูญเสียความร้อนมากขึ้นอุณหภูมิต่ำสุดซึ่งอยู่บริเวณปลายแท่งเหล็กจึงลดลง และเนื่องจากบริเวณปลายแท่งเหล็กมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวทั้งหมดของแท่งเหล็กสัดส่วนเวลาการเปิดประตูจึงแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิเฉลี่ยและอุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็กทำให้ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.10 เมื่อสัดส่วนการเปิดประตูเพิ่มขึ้นจาก 27.5% เป็น 50% อุณหภูมิต่ำสุดจะลดลง 8.61°C ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้น 8.65°C และจากตารางที่ 5.10 อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็กลดลงเพียง

0.26°C และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กเพิ่มขึ้นเพียง 0.41°C เท่านั้น แต่เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างปลายแท่งเหล็กกับสิ่งแวดล้อมภายนอกเป็นการถ่ายเทความร้อนในแนวระดับ สัดส่วนเวลาการเปิดประตูจึงส่งผลกระทบต่อหลัก ๆ ต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนในแนวระดับเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 5.10 เมื่อสัดส่วนเวลาการเปิดประตูถึงเหล็กมีค่า 50% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของอุณหภูมิแท่งเหล็กในแนวระดับเพิ่มขึ้น 1.39°C เมื่อเทียบกับสภาพการทำงานปกติ

ตารางที่ 5.10 ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

ปัจจัยที่พิจารณา (°C)	สัดส่วนเวลาการเปิดประตูถึงเหล็ก (เปอร์เซ็นต์)					
	0	25	27.5	50	75	100
อุณหภูมิเฉลี่ย ของแท่งเหล็ก	1,094.78	1,094.49	1,094.46	1,094.20	1,093.90	1,093.61
อุณหภูมิสูงสุดใน แท่งเหล็ก	1,133.99	1,134.04	1,134.05	1,134.09	1,134.14	1,134.19
อุณหภูมิต่ำสุด ในแท่งเหล็ก	1,026.09	1,016.57	1,015.62	1,007.01	997.33	987.12
ผลต่างอุณหภูมิ สูงสุดของแท่งเหล็ก	107.90	117.47	118.43	127.08	136.81	147.07
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานสูงสุดใน แนวระดับของ อุณหภูมิแท่งเหล็ก	11.11	12.64	12.80	14.18	15.73	17.29
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานรวมของ อุณหภูมิแท่งเหล็ก	24.27	24.66	24.71	25.12	25.62	26.18



รูปที่ 5.10 ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่ออุณหภูมิของห้อง

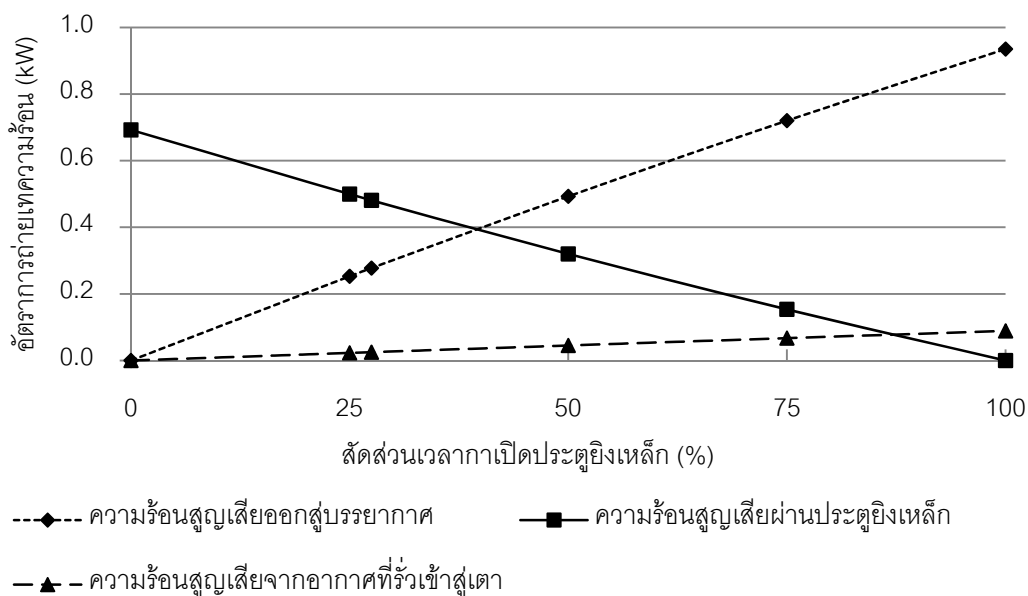
2) ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่อการถ่ายเทความร้อนของห้อง

เมื่อเพิ่มสัดส่วนเวลาการเปิดประตูอัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาจะเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วของไอเสียและความเร็วอากาศที่รั่วเข้าสู่เตามีค่ามากขึ้น อัตราการพาความร้อนจากไอเสียเข้าสู่ห้องและอัตราการสูญเสียความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาจึงมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นดังแสดงในตารางที่ 5.11 เมื่อสัดส่วนเวลาการเปิดประตูห้องเพิ่มขึ้นจาก 27.5% เป็น 50% อัตราการพาความร้อนจากไอเสียเพิ่มขึ้น 0.0059 kW ส่วนการสูญเสียความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตามีค่าเพิ่มขึ้น 0.0202 kW และเนื่องจากการสูญเสียผ่านช่องเปิดของประตูเป็นการถ่ายเทความร้อนบริเวณปลายห้องสัดส่วนเวลาการเปิดประตูห้องจึงส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อการแผ่รังสีเข้าสู่ห้องและการสูญเสียความร้อนสู่พื้นเตา เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณผิวบนและผิวล่างของห้อง แต่จะส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างปลายห้องกับประตูห้องและสิ่งแวดล้อมดังแสดงในรูปที่ 5.11 เมื่อสัดส่วนเวลาการเปิดประตูห้องเพิ่มขึ้นจาก 27.5% เป็น 50% อัตราการสูญเสียผ่านประตูห้องมีค่าลดลง 0.1609 kW และอัตราการสูญเสียผ่านช่องเปิดของประตูมีค่าเพิ่มขึ้น 0.2154 kW ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสัดส่วนเวลาการเปิดประตูเพิ่มขึ้นห้องจะมีสัดส่วนเวลาในการถ่ายเทความร้อนกับประตูห้องน้อยลง และมีสัดส่วนเวลาในการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้นการสูญเสียความร้อนผ่านประตูห้องและผ่านช่องเปิดของประตูห้องจึงลดลงและเพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่เนื่องผลต่างอุณหภูมิระหว่างห้องกับสิ่งแวดล้อมมีค่า

มากกว่าผลต่างอุณหภูมิระหว่างแท่งเหล็กกับประตูยิงเหล็ก การสูญเสียผ่านช่องเปิดของประตูยิงเหล็กจึงเปลี่ยนแปลงมากกว่าการสูญเสียผ่านประตูยิงเหล็ก และจากตารางที่ 5.11 จะเห็นว่าเมื่อสัดส่วนการเปิดประตูยิงเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 27.5% เป็น 50% อัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กทุกรูปแบบจะเพิ่มขึ้นโดยมีอัตราการถ่ายเทความร้อนรวมเพิ่มขึ้น 0.0329 kW จากสมมูลความร้อนจึงกล่าวได้ว่าเมื่อสัดส่วนการเปิดประตูยิงเหล็กเพิ่มขึ้นแท่งเหล็กจะสูญเสียความร้อนรวมเพิ่มขึ้นแต่มีผลน้อยมากเพียง 1.06% เท่านั้น

ตารางที่ 5.11 ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การถ่ายเทความร้อน (kW)	สัดส่วนเวลาการเปิดประตูยิงเหล็ก (%)					
	0	25	27.5	50	75	100
การแผ่รังสีจากแก๊ส	1.3810	1.3853	1.3857	1.3895	1.3938	1.3982
การแผ่รังสีจากผนังเตา	1.3299	1.3558	1.3583	1.3814	1.4070	1.4324
การพาความร้อน จากไอเสีย	0.3616	0.3683	0.3689	0.3749	0.3814	0.3879
การแผ่รังสีออกสู่ บรรยากาศ	0.0000	-0.2529	-0.2775	-0.4929	-0.7203	-0.9353
การแผ่รังสีกับประตู ยิงเหล็ก	-0.6924	-0.4996	-0.4811	-0.3201	-0.1537	0.0000
การพาความร้อนจาก อากาศที่รั่วเข้าสู่เตา	0.0000	-0.0228	-0.0251	-0.0453	-0.0673	-0.0890
การถ่ายเทความร้อน สู่พื้นเตา	-2.3801	-2.3339	-2.3293	-2.2875	-2.2409	-2.1941
รวมความร้อนเข้า	3.0726	3.1093	3.1129	3.1458	3.1822	3.2184
รวมความร้อนออก	-3.0726	-3.1093	-3.1129	-3.1458	-3.1822	-3.2184



รูปที่ 5.11 ผลของสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิพื้นเตา

แบบจำลองที่สร้างขึ้นได้กำหนดสภาวะขอบเขตให้อุณหภูมิผิวล่างของแท่งเหล็กมีค่าเท่ากับอุณหภูมิพื้นเตาได้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองคือแท่งเหล็กสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตามากที่สุดเนื่องจากพื้นเตามีอุณหภูมิต่ำแต่อุณหภูมิผิวบนของแท่งเหล็กมีอุณหภูมิสูงประกอบกับผิวล่างของแท่งเหล็กมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมากจึงเกิดการนำความร้อนจากผิวบนสู่ผิวล่างของแท่งเหล็กและถ่ายเทความร้อนออกสู่พื้นเตาเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้การແจกແจงอุณหภูมิในแนวตั้งของแท่งเหล็กไม่มีความสม่ำเสมอ เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรหุ้มฉนวนพื้นเตาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิพื้นเตา ลดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตา และช่วยให้การແจกແจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ในการศึกษาผลจากการหุ้มฉนวนพื้นเตาจึงทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิภายในของพื้นเตาในแบบจำลองได้ผลดังนี้

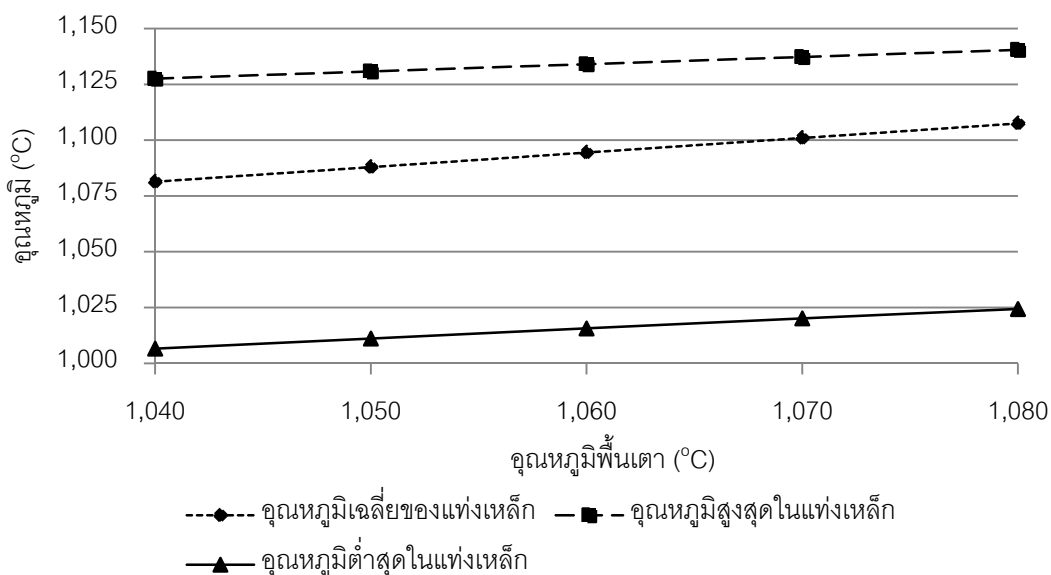
1) ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

เมื่อหุ้มฉนวนพื้นเตาจะช่วยลดความร้อนสูญเสียออกจากพื้นเตาได้ทำให้อุณหภูมิพื้นเตาและอุณหภูมิผิวล่างของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น และเนื่องจากการความร้อนไม่สามารถถ่ายเทออกจากแท่งเหล็กทางผิวล่างซึ่งมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดและเป็นการสูญเสียความร้อนที่มากที่สุดจึงทำให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กเพิ่มขึ้นทุกจุด เมื่ออุณหภูมิพื้นเตาเพิ่มขึ้นจากสภาพการทำงานปกติ $1,060^{\circ}\text{C}$ เป็น $1,080^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็กเพิ่มขึ้น 13.05°C อุณหภูมิ

สูงสุดและต่ำสุดของแท่งเหล็กเพิ่มขึ้น 6.41°C และ 8.71°C ตามลำดับส่งผลให้ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดมีค่าลดลง 2.30°C ดังแสดงในรูปที่ 5.12 และเนื่องจากอุณหภูมิผิวล่างของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิผิวล่างสู่เข้าหาอุณหภูมิผิวบนของแท่งเหล็กนั่นคือการแจกแจงอุณหภูมิในแนวตั้งของแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอมากขึ้นสังเกตได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวตั้งมีค่าลดลงมาก นอกจากนี้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิผิวบนและผิวล่างจะส่งผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิส่วนใหญ่ของแท่งเหล็กเนื่องจากความแตกต่างดังกล่าวจะกินพื้นที่ตลอดความยาวของแท่งเหล็กดังแสดงในรูปที่ 5.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กจึงลดลงมากดังแสดงในตารางที่ 5.12 เมื่ออุณหภูมิพื้นเตามีค่า $1,080^{\circ}\text{C}$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กลดลง 3.57°C เมื่อเทียบกับสภาพการทำงานปกติ ในทางตรงกันข้ามเมื่อความร้อนไม่สามารถถ่ายเทออกจากด้านล่างของแท่งเหล็กได้ความร้อนจึงต้องถ่ายเทออกไปหลายแท่งเหล็กแทนและเนื่องจากบริเวณปลายแท่งเหล็กมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยเมื่ออัตราการสูญเสียความร้อนเพิ่มขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กเปลี่ยนแปลงไปมาก การแจกแจงอุณหภูมिवิเวณปลายแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอลดลง และเนื่องจากการสูญเสียความร้อนบริเวณปลายแท่งเหล็กเป็นการถ่ายเทความร้อนในแนวระดับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับจะมีค่าเพิ่มขึ้น 0.72°C เมื่ออุณหภูมิพื้นเตาเพิ่มขึ้นจาก $1,060^{\circ}\text{C}$ เป็น $1,080^{\circ}\text{C}$ ดังแสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

ปัจจัยที่พิจารณา ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิพื้นเตา ($^{\circ}\text{C}$)				
	1,040	1,050	1,060	1,070	1,080
อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็ก	1,081.38	1,087.92	1,094.46	1,100.99	1,107.51
อุณหภูมิสูงสุดในแท่งเหล็ก	1,127.59	1,130.82	1,134.05	1,137.26	1,140.45
อุณหภูมิต่ำสุดในแท่งเหล็ก	1,006.54	1,011.09	1,015.62	1,020.12	1,024.32
ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็ก	121.05	119.73	118.43	117.13	116.13
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับของอุณหภูมิแท่งเหล็ก	12.08	12.44	12.80	13.15	13.51
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็ก	28.49	26.58	24.71	22.89	21.13



รูปที่ 5.12 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

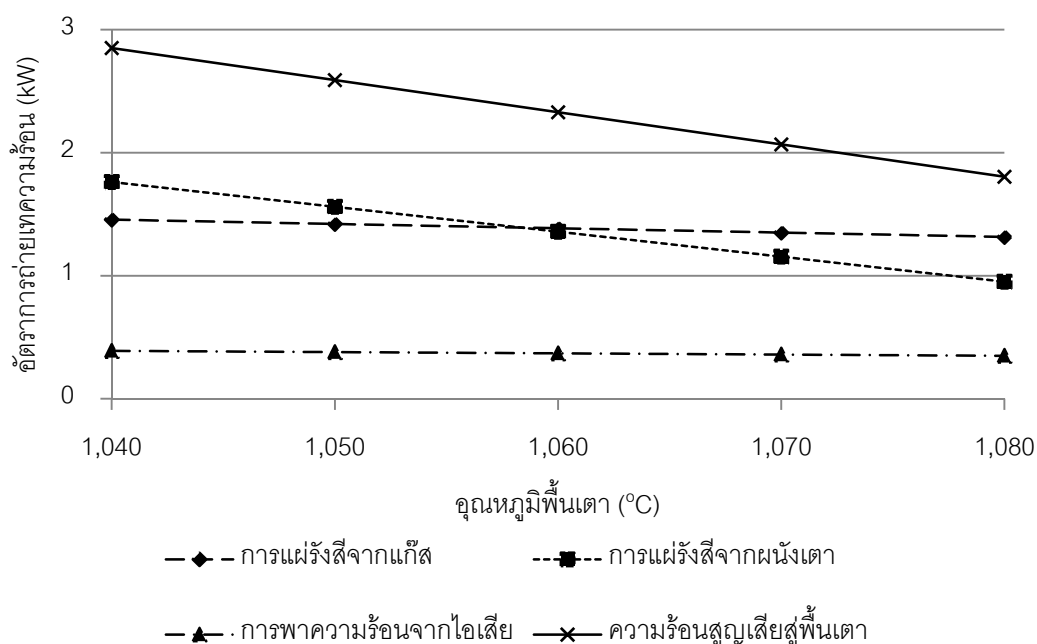
2) ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การหุ้มฉนวนพื้นเตาเป็นการลดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนรวมของพื้นเตา ทำให้อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นเตามีค่าลดลงดังนั้นการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาจึงมีค่าลดลงตามสภาพการหุ้มฉนวนพื้นเตา ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วว่าเมื่อหุ้มฉนวนพื้นเตาจะทำให้อัตราการสูญเสียความร้อนออกสู่พื้นเตามีค่าลดลงส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กสูงขึ้น ผลต่างระหว่างอุณหภูมิผิวของแท่งเหล็กและอุณหภูมิผนังเตารวมถึงอุณหภูมิแก๊สจึงมีค่าลดลงทำให้อัตราการพาความร้อนจากไอเสีย อัตราการแผ่รังสีจากแก๊สและผนังเตาเข้าสู่แท่งเหล็กมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.13 เมื่ออุณหภูมิพื้นเพิ่มขึ้นจาก 1,060°C เป็น 1,080°C ความร้อนสูญเสียสู่พื้นเตามีค่าลดลงถึง 0.5246 kW อัตราการพาความร้อนจากไอเสียลดลง 0.0196 kW อัตราการแผ่รังสีจากแก๊สลดลง 0.0706 kW และอัตราการแผ่รังสีจากผนังเตาลดลง 0.4065 kW ทั้งนี้เนื่องจากการพาความร้อนจากไอเสียเป็นการถ่ายเทความร้อนส่วนน้อยอยู่แล้วจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่ออุณหภูมิพื้นเตาเปลี่ยนแปลง และเนื่องจากการความร้อนไม่สามารถถ่ายเทออกจากแท่งเหล็กทางผิวล่างซึ่งมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนมากที่สุดและเป็นการสูญเสียความร้อนที่มากที่สุด ความร้อนจึงต้องไปถ่ายเทออกบริเวณปลายแท่งเหล็กแทนแต่เนื่องจากบริเวณปลายแท่งเหล็กมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยอัตราการสูญเสียความร้อนบริเวณนี้จึงไม่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิพื้นเตามากนักดังแสดงในตารางที่ 5.13 เมื่ออุณหภูมิพื้นเพิ่มขึ้นจาก 1,060°C เป็น 1,080°C อัตราการสูญเสียความร้อนบริเวณปลายแท่งเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นรวมกันเพียง 0.0279 kW จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นว่าการสูญเสียความร้อนหลัก

คือ การสูญเสียผ่านพื้นเตานั้นมีค่าลดลงมากเมื่ออุณหภูมิพื้นเตาเพิ่มขึ้นส่วนการสูญเสียอื่น ๆ แม้จะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ก็น้อยมากเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อนสู่พื้นเตา ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิพื้นเพิ่มขึ้นจาก 1,060°C เป็น 1,080°C อัตราการสูญเสียความร้อนรวมจึงมีค่าลดลงถึง 0.4967 kW คิดเป็น 15.96% ดังแสดงในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การถ่ายเทความร้อน (kW)	อุณหภูมิพื้นเตา (°C)				
	1,040	1,050	1,060	1,070	1,080
การแผ่รังสีจากแก๊ส	1.4566	1.4211	1.3857	1.3503	1.3150
การแผ่รังสีจากผนังเตา	1.7624	1.5607	1.3583	1.1554	0.9519
การพาความร้อนจากไอเสีย	0.3887	0.3788	0.3689	0.3591	0.3493
การแผ่รังสีออกสู่บรรยากาศ	-0.2700	-0.2738	-0.2775	-0.2813	-0.2851
การแผ่รังสีกับประตูเหล็ก	-0.4613	-0.4711	-0.4811	-0.4910	-0.5011
การพาความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา	-0.0249	-0.0250	-0.0251	-0.0252	-0.0253
การถ่ายเทความร้อนสู่พื้นเตา	-2.8514	-2.5907	-2.3293	-2.0673	-1.8047
รวมความร้อนเข้า	3.6077	3.3606	3.1129	2.8648	2.6162
รวมความร้อนออก	-3.6077	-3.3606	-3.1129	-2.8648	-2.6162



รูปที่ 5.13 ผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การศึกษาผลกระทบจากอากาศรั่วเข้าสู่เตา

แม้ว่าการสูญเสียความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาจะมีค่าน้อย แต่จะมีผลต่อการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กประกอบกับเป็นสิ่งที่สามารถป้องกันไม่ให้เกิดได้จึงควรปรับปรุงไม่ให้เกิดการสูญเสียความร้อนดังกล่าว วิธีการป้องกันไม่ให้อากาศรั่วเข้าสู่เตาคือต้องควบคุมความดันภายในเตาให้สูงกว่าหรือเท่ากับความดันบรรยากาศภายนอกเตา ในการวิเคราะห์แบบจำลองนี้จะสมมติให้ความดันภายในเตามีค่าเท่ากับความดันภายนอกซึ่งจะไม่มีทั้งอากาศรั่วเข้าสู่เตาและไม่มีอากาศรั่วออกจากเตา

1) ผลการป้องกันอากาศรั่วเข้าสู่เตาต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

เมื่อไม่มีอากาศรั่วเข้าสู่เตาจะทำให้ไม่มีการสูญเสียจากการพาความร้อนของอากาศรั่วซึ่งเกิดขึ้นบริเวณปลายแท่งเหล็ก ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณปลายแท่งเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ประกอบบริเวณปลายแท่งเหล็กมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อยอากาศที่รั่วเข้าจึงแทบจะไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิส่วนใหญ่ของแท่งเหล็กรวมถึงอุณหภูมิสูงสุดและการແຈກແຈງอุณหภูมิโดยรวมของแท่งเหล็กด้วยดังแสดงในตารางที่ 5.14 เมื่อไม่มีอากาศรั่วเข้าอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็กเพิ่มขึ้นเพียง 0.04°C อุณหภูมิสูงสุดลดลงเพียง 0.06°C และอุณหภูมิต่ำสุดมีค่าเพิ่มขึ้น 2.17°C จึงทำให้ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็กลดลง 2.23°C ส่วนการແຈກແຈງอุณหภูมิโดยรวมของแท่งเหล็กพิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กมีค่าลดลงเพียง 0.11°C ทั้งนี้สาเหตุที่อุณหภูมิสูงสุดมีค่าลดลงเนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่ที่ผิวบนของแท่งเหล็กเมื่อไม่มีอากาศรั่วเข้าทำให้ความเร็วของไอเสียลดลงส่งผลให้อัตราการพาความร้อนจากไอเสียเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็กมีค่าลดลงอุณหภูมิที่ผิวบนของแท่งเหล็กจึงมีค่าลดลง แต่ลดลงน้อยมากเนื่องจากการพาความร้อนจากไอเสียส่งผลน้อยกว่าการแผ่รังสีจากแก๊สและผนังเตา นอกจากนี้เนื่องจากการพาความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าจะส่งผลกระทบต่อหน้าตัดที่ปลายแท่งเหล็กเท่านั้นจึงกล่าวได้ว่าการพาความร้อนจากอากาศรั่วเป็นการถ่ายเทความร้อนในแนวระดับ อากาศรั่วจึงส่งผลกระทบหลัก ๆ ต่อการແຈກແຈງอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนในแนวระดับเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 5.14 เมื่อไม่มีอากาศรั่วเข้าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดของอุณหภูมิแท่งเหล็กในแนวระดับมีค่าลดลง 0.35°C

ตารางที่ 5.14 ผลจากการป้องกันอากาศรั่วเข้าสู่เตาต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็ก

ปัจจัยที่พิจารณา (°C)	สภาพปัจจุบัน	ไม่มีอากาศรั่วเข้า
อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเหล็ก	1,094.46	1,094.50
อุณหภูมิสูงสุดในแท่งเหล็ก	1,134.05	1,133.99
อุณหภูมิต่ำสุดในแท่งเหล็ก	1,015.62	1,017.79
ผลต่างอุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็ก	118.43	116.20
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับ ของอุณหภูมิแท่งเหล็ก	12.80	12.44
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็ก	24.71	24.60

2) ผลการป้องกันอากาศรั่วเข้าสู่เตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

เมื่อไม่มีอากาศรั่วเข้าสู่เตาจะส่งผลให้ไม่มีการสูญเสียจากการพาความร้อนจากอากาศรั่วและไม่มีอากาศไหลเข้าไปผสมกับไอเสียทำให้ไอเสียมีความเร็วลดลง การพาความร้อนจากไอเสียจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อไม่มีการสูญเสียจากอากาศที่รั่วเข้าความร้อนจึงต้องถ่ายเทออกในรูปแบบอื่นแทน ดังนั้นการสูญเสียความร้อนรูปแบบที่เหลือจึงมีค่าเพิ่มขึ้นแต่เพิ่มขึ้นน้อยมากเนื่องจากการพาความร้อนจากอากาศรั่วเดิมมีค่าน้อยอยู่แล้วจึงส่งผลกระทบต่อถ่ายเทความร้อนอื่น ๆ น้อยเมื่อไม่มีอากาศรั่วเข้าดังแสดงในตารางที่ 5.15 เมื่อไม่มีอากาศรั่วเข้าอัตราการสูญเสียความร้อนออกสู่บรรยากาศมีค่าเพิ่มขึ้นเพียง 0.0016 kW การสูญเสียความร้อนผ่านประตูยิงเหล็กมีเพิ่มขึ้นเพียง 0.0043 kW และการสูญเสียผ่านพื้นเตาเพิ่มขึ้น 0.0090 kW ทั้งนี้เนื่องจากพื้นเตามีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมากการสูญเสียความร้อนที่พื้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่าอากาศรั่วเข้ามีผลต่อการถ่ายเทความร้อนน้อยมาก เมื่อพิจารณาการสูญเสียความร้อนรวมแล้วจะได้ว่าอัตราการสูญเสียความร้อนรวมมีค่าลดลงเพียง 0.0101 kW หรือเพียงแค่ว่า 0.32% ของสภาพการทำงานปัจจุบันเท่านั้น

ตารางที่ 5.15 ผลจากการป้องกันอากาศรั่วเข้าสู่เตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

การถ่ายเทความร้อน (kW)	สภาพปัจจุบัน	ไม่มีอากาศรั่วเข้า
การแผ่รังสีจากแก๊ส	1.3857	1.3852
การแผ่รังสีจากผนังเตา	1.3583	1.3552
การพาความร้อนจากไอเสีย	0.3689	0.3624

การถ่ายเทความร้อน (kW)	สภาพปัจจุบัน	ไม่มีอากาศรั่วเข้า
การแผ่รังสีออกสู่บรรยากาศ	-0.2775	-0.2791
การแผ่รังสีกับประตูยึงเหล็ก	-0.4811	-0.4854
การพาความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา	-0.0251	0.0000
การถ่ายเทความร้อนสู่พื้นเตา	-2.3293	-2.3383
รวมความร้อนเข้า	3.1129	3.1028
รวมความร้อนออก	-3.1129	-3.1028

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 สรุปผลการสร้างแบบจำลอง

แบบจำลองที่สร้างขึ้นตามสมมติฐานและสภาวะขอบเขตที่กำหนดสามารถทำนายการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงานโดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำสุด 0.06% และความคลาดเคลื่อนสูงสุด 4.89% ซึ่งมีค่าไม่เกิน 5% จึงเชื่อมั่นได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถทำนายการแจกแจงอุณหภูมิได้จริงและมีความแม่นยำในระดับที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม

6.2 สรุปผลการวิเคราะห์แบบจำลองจากสภาวะการทำงานจริง

ผลจากแบบจำลองพบว่า การแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กส่วนใหญ่จะเป็นการแจกแจงเชิงเส้นในลักษณะการนำความร้อนหนึ่งมิติจากผิวบนลงสู่ผิวล่างของแท่งเหล็กโดยที่อุณหภูมิสูงสุดมีค่า $1,134^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิต่ำสุดมีค่า $1,094^{\circ}\text{C}$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของอุณหภูมิแท่งเหล็กมีค่า 24.71°C ส่วนบริเวณปลายแท่งเหล็กการแจกแจงอุณหภูมิจะไม่สม่ำเสมอและมีอุณหภูมิต่ำสุด $1,016^{\circ}\text{C}$ การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กมีการแผ่รังสีเป็นหลักมีค่า 88% ของการถ่ายเทความร้อนเข้าทั้งหมดโดยที่การแผ่รังสีจากแก๊สมีค่า 44% การแผ่รังสีจากผนังเตามีค่า 44% ส่วนการพาความร้อนจากไอเสียมียังมีค่าเพียง 12% การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตามีมากที่สุดถึง 75% การสูญเสียผ่านประตูเหล็กมีค่า 15% มีผลต่ออุณหภูมิและการแจกแจงอุณหภูมิในแนวระดับบริเวณปลายแท่งเหล็กมากที่สุด การสูญเสียผ่านช่องเปิดของประตูเหล็กส่งผลกระทบต่อแท่งเหล็กเช่นเดียวกับการสูญเสียผ่านประตูเหล็ก มีอัตราการสูญเสียความร้อน 9% แต่การสูญเสียผ่านช่องเปิดดังกล่าวเป็นการสูญเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้และป้องกันได้ยาก ส่วนการสูญเสียความร้อนจากอากาศที่รั่วเข้าสู่เตามีเพียง 1% และแทบไม่ส่งผลกระทบต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กเลย

6.3 สรุปผลการศึกษาตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

6.3.1 การศึกษาผลกระทบจากการหุ้มฉนวนประตูดึงเหล็ก

จากผลการศึกษามาจากการหุ้มฉนวนพบว่าเมื่อหุ้มฉนวนที่ประตูดึงเหล็กแล้วจะทำให้แท่งเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นและการแจกแจงอุณหภูมิต่ำลงมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถลดความร้อนสูญเสียรวมออกจากแท่งเหล็กได้อีกประการหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบผลการหุ้มฉนวนหนา 5 cm กับกรณีไม่ได้หุ้มฉนวน อุณหภูมิต่ำสุดซึ่งอยู่บริเวณปลายแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น 28.37°C ส่งผลให้การแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กในแนวระดับมีความสม่ำเสมอดีขึ้นมาก นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการสูญเสียความร้อนออกจากแท่งเหล็กผ่านประตูดึงเหล็กได้ถึง 59% และสามารถลดความร้อนสูญเสียรวมได้ 4%

6.3.2 การศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิผนังเตา

เมื่ออุณหภูมิผนังเตาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กสูงขึ้นแต่การแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอลดลง ในกรณีที่อุณหภูมิผนังเตาเพิ่มขึ้นจาก $1,150^{\circ}\text{C}$ เป็น $1,170^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็กจะเพิ่มขึ้น 11.61°C อุณหภูมิต่ำสุดเพิ่มขึ้น 5.80°C อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 5.83°C นอกจากนี้ยังทำให้อัตราการแผ่รังสีจากผนังเตาเข้าสู่แท่งเหล็กเพิ่มขึ้นถึง 45.33% แต่ความร้อนสูญเสียออกจากแท่งเหล็กรวมจะมีค่าเพิ่มขึ้น 14.47%

6.3.3 การศึกษาผลกระทบจากสัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูดึงเหล็ก

สัดส่วนเวลาการเปิดและปิดประตูแบบจะไม่ส่งผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กเลยสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์ เมื่อสัดส่วนเวลาการเปิดประตูเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นในช่วง 25% ถึง 50% อุณหภูมิต่ำสุดของแท่งเหล็กเปลี่ยนแปลงในช่วง 9.56°C การแจกแจงอุณหภูมิในแนวระดับของแท่งเหล็กเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และอัตราการสูญเสียความร้อนออกจากแท่งเหล็กรวมมีค่าเปลี่ยนแปลงเพียง 1.17% เท่านั้น

6.3.4 การศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิพื้นเตา

เมื่ออุณหภูมิพื้นเตาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กสูงขึ้นและการแจกแจงอุณหภูมิของแท่งเหล็กสม่ำเสมอขึ้นมากที่สุด ในกรณีที่อุณหภูมิพื้นเตาเพิ่มขึ้นจาก $1,060^{\circ}\text{C}$ เป็น $1,080^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็กจะเพิ่มขึ้น 6.41°C อุณหภูมิต่ำสุดเพิ่มขึ้น

8.71°C อุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มขึ้น 13.05°C นอกจากนี้ยังลดอัตราการสูญเสียความร้อนออกจากแท่งเหล็ก รวมถึงถึง 16% จึงควรหุ้มฉนวนพื้นเตาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิพื้นเตาเนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

6.3.5 การศึกษาผลกระทบจากอากาศรั่วเข้าสู่เตา

อากาศที่รั่วเข้าสู่เตามีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กเล็กน้อย เมื่อไม่มีอากาศรั่วเข้าสู่เตาจะส่งผลให้อุณหภูมิต่ำสุดของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นเพียง 2.17°C และการแจกแจงอุณหภูมิในแนวระดับบริเวณปลายแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอดีขึ้นเล็กน้อย ส่วนการถ่ายเทความร้อนรูปแบบต่าง ๆ จะได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อพิจารณาอัตราการสูญเสียความร้อนรวมแล้วพบว่ากรณีที่ไม่มีอากาศรั่วเข้าสู่เตามีอัตราการสูญเสียความร้อนรวมลดลงจากสภาพการทำงานปัจจุบันที่มีอากาศรั่วเข้าอยู่เพียง 0.32% เท่านั้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

บริษัทโกลบอล อินซูเลชัน จำกัด. ฉนวนใยเซรามิก [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา:
<http://www.global-insulation.net/> [2554, กันยายน 23]

ศุภณัฐ เจริญ. การศึกษาการประหยัดพลังงานสำหรับเตาเผาเหล็กโดยการลดอากาศรั่วเข้าสู่เตาเผา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

Engineeringtoolbox. fuels-combustion-efficiency [online]. Available from:
http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-combustion-efficiency-d_167.html
[2011, February]

Hottel, H. C. and Sarofim, A. F. Radiative Transfer. USA: McGraw-Hill, 1967.

Huang, M. J., Hsieh, C. T., Lee, S. T. and Wang, C. H. A coupled numerical study of slab temperature and gas temperature in the walking-beam-type slab reheating furnace. Numerical Heat Transfer Part A: Applications (2008): 625-646.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. and Lavine, A. S. Introduction to Heattransfer. 5th edition. Asia: John Wiley & Sons (Asia) Pte, 2007.

Infrared Services, Inc. emissivity values for common materials [online]. 2000. Available from: <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm> [2011, July]

Jaklic, A., Vode, F. and Kolenko, T. Online simulation model of the slab-reheating process in a pusher-type furnace. Applied Thermal Engineering 27 (2007): 1105-1114.

- Jang, Y. J. and Kim, S. W. An Estimation of a Billet Temperature during Reheating Furnace Operation. International Journal of Control, Automation, and Systems 5 (2007): 43-50.
- John R. Howell. C-13: Rectangle to rectangle in a parallel plane [online]. 2010. Available from: <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/sectionc/C-13.html> [2011, September]
- Kim, M. Y. A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace. Inter National of Heat and Mass Transfer 50 (2007): 3740-3748.
- Trinks, W., Mawhinney, M. H., Shannon, R. A., Reed, R. J. and Garvey, J. R. Industrial Furnaces. 6th edition. New Jersey: Jon Wiley & Sons, 2004.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลของเตาเผาเหล็ก

ก.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผาเหล็กที่ใช้ศึกษา

- ขนาด: มีขนาดกำลังการผลิต 12 ton/hr
- เชื้อเพลิง: น้ำมันเตา C
- อุณหภูมิภายในเตา: ประมาณ $1,250^{\circ}\text{C}$
- ผลิตภัณฑ์: เหล็กรูปพรรณโดยมากเป็นเหล็กฉากที่มีความหนา 3 mm ถึง 6 mm

ก.2 ข้อมูลการผลิตในวันที่ตรวจวัด

- วัตถุดิบเป็นแท่งเหล็กขนาด $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ยาว 2.42 m หนัก 74.6 kg/m
- อัตราการผลิต: 16.4 ton/hr
- อัตราการใช้เชื้อเพลิง: 653 L/hr
- ระยะเวลาที่เปิดประตูเพื่อนำแท่งเหล็กออกจากเตา 1 แท่ง: 11 sec.

ก.3 ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติวัสดุต่าง ๆ

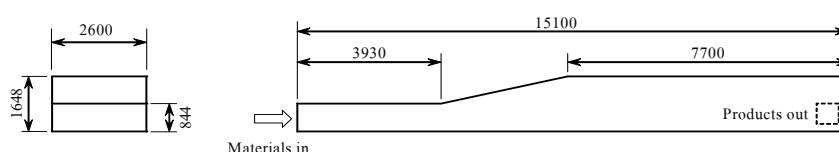
- แท่งเหล็กเป็นเหล็กโครงสร้างคาร์บอนต่ำ มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี 0.9 และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 30 W/m.K
- ผนังเตาด้านในทำด้วยอิฐทนไฟ (fireclay brick) มีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี 0.8

ก.4 ข้อมูลการตรวจวัดที่จำเป็นต้องใช้ในงานวิจัย

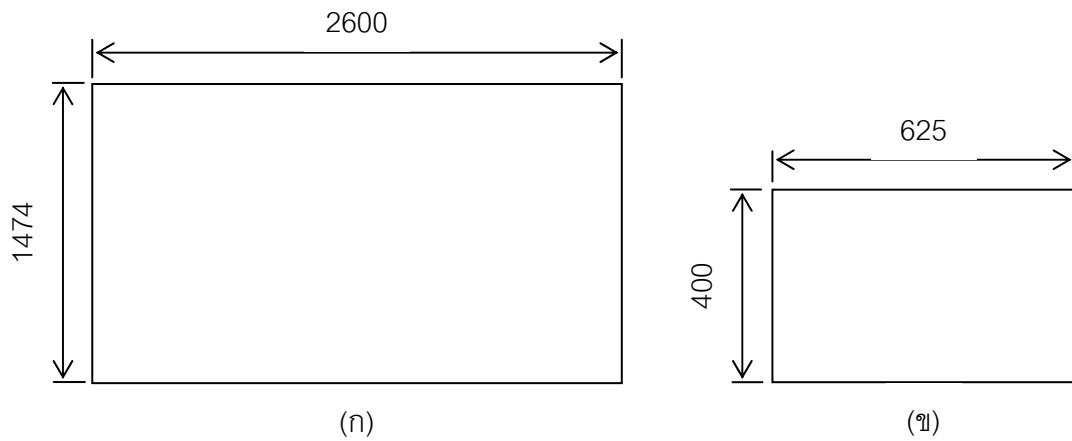
- ปริมาณออกซิเจนในไอเสียขณะปิดประตูมีค่าเฉลี่ย 4.5% ไม่รวมไอน้ำ
- ปริมาณออกซิเจนในไอเสียขณะเปิดประตูมีค่าเฉลี่ย 6.6% ไม่รวมไอน้ำ
- อุณหภูมิอากาศแวดล้อมเฉลี่ยประมาณ 34.4°C
- อุณหภูมิภายนอกของประตูเหล็กเฉลี่ย 223°C

ก.5 ขนาดของเตาเผาเหล็กโดยประมาณ

ขนาดต่าง ๆ ในรูป ก-1 และรูป ก-2 มีหน่วยเป็น mm



รูป ก-1 ขนาดภายนอกของเตาเผาเหล็กที่ศึกษา

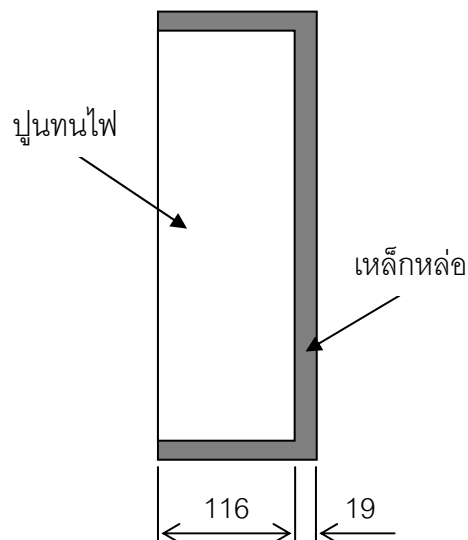


รูป ก-2 (ก) ขนาดหน้าต่างภายในโดยประมาณของเตาเผาเหล็กบริเวณทางออก

(ข) ขนาดช่องเปิดของประตูเมื่อเปิดประตูยิงเหล็ก

ก.6 ข้อมูลของประตูยิงเหล็ก

- ตัวประตูยิงเหล็กทำด้วยปูนทนไฟ หนา 116 mm ดังแสดงในรูป ก-3
- ปิดด้านนอก ด้านบน และด้านล่างของประตูด้วยเหล็กหล่อหนา 19 mm
- สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของปูนทนไฟมีค่า 0.72 W/m.K
- สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเหล็กหล่อมีค่า 42 W/m.K
- สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของเหล็กหล่อมีค่าประมาณ 0.67



รูป ก-3 แสดงวัสดุที่เป็นส่วนประกอบและขนาดด้านข้างของประตูยิงเหล็ก

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนและวิธีการคำนวณต่าง ๆ

ข.1 การวิเคราะห์เกี่ยวกับการเผาไหม้

1. การหาสูตรโมเลกุลของน้ำมันเตา

องค์ประกอบโดยประมาณของน้ำมันเตาแสดงในรูปร้อยละโดยมวลในตาราง ข-1 นำค่าร้อยละโดยมวลมาหารด้วย 100 และหารด้วยมวลโมเลกุลของธาตุองค์ประกอบในตาราง ข-2 ดังสมการ

$$\frac{n_i}{kg_{oil}} = \frac{\%_{m,i}}{100 \times MW_i}$$

จะได้จำนวนโมลของธาตุแต่ละชนิดต่อน้ำมันเตา 1 kg ดังแสดงในตาราง ข-3

ตาราง ข-1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย

ธาตุองค์ประกอบ	% โดยมวล
คาร์บอน (C)	86.4
ไฮโดรเจน (H)	11.6
ซัลเฟอร์ (S)	2.0

ตาราง ข-2 มวลโมเลกุลของธาตุองค์ประกอบของน้ำมันเตา

ธาตุองค์ประกอบ	มวลโมเลกุล (kg/kmol)
คาร์บอน (C)	12.01100
ไฮโดรเจน (H)	1.00794
ซัลเฟอร์ (S)	32.06000

ตาราง ข-3 จำนวนโมลของธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดต่อน้ำมันเตา 1 kg

ธาตุองค์ประกอบ	kmol/kg _{fuel}
คาร์บอน (C)	0.071934
ไฮโดรเจน (H)	0.115086
ซัลเฟอร์ (S)	0.000624
รวม	0.187644

จากตาราง ข-3 จำนวนโมลรวมทั้งหมดของธาตุองค์ประกอบต่อน้ำมันเตา 1 kg คือจำนวน โมลของน้ำมันเตาใน 1 kg ดังนั้นส่วนกลับของมันคือมวลโมเลกุลของน้ำมันเตาดังนี้

$$MW_{oil} = \frac{1}{\sum_i \left(\frac{n_i}{kg_{oil}} \right)} = \frac{1}{0.187644} = 5.32924 \text{ kg/kmol}$$

จะได้ว่ามวลโมเลกุลของน้ำมันเตามีค่า 5.32924 kg/kmol

นำมวลโมเลกุลของน้ำมันเตาที่ได้ไปคูณกับจำนวนโมลต่อน้ำมันเตา 1 kg ของธาตุองค์ประกอบแต่ละธาตุในตาราง ข-3 ดังนี้

$$n_i = MW_{oil} \times \frac{n_i}{kg_{oil}}$$

จะได้จำนวนโมลของธาตุองค์ประกอบนั้น ๆ ต่อน้ำมันเตา 1 kmol ดังแสดงในตาราง ข-4 จะได้ว่าน้ำมันเตา 1 kmol มีคาร์บอน ไฮโดรเจน และซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบ 0.3834, 0.6133 และ 0.0033 kmol ตามลำดับ นั่นคือน้ำมันเตามีสูตรโมเลกุลเป็น $C_{0.3834}H_{0.6133}S_{0.0033}$

ตาราง ข-4 จำนวนโมลของธาตุองค์ประกอบแต่ละธาตุต่อน้ำมันเตา 1 kmol

ธาตุองค์ประกอบ	จำนวนโมล (kmol/kmol _{fuel})
คาร์บอน (C)	0.3834
ไฮโดรเจน (H)	0.6133
ซัลเฟอร์ (S)	0.0033

2. การคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติขณะเปิดและปิดประตูยิงเหล็ก

ค่า λ หรือสัดส่วนระหว่างอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติกับอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี สามารถหาได้จาก

$$\lambda = \frac{0.54 - 0.1533 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{0.54 - 2.5704 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}$$

ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนในไอเสีย เมื่อนำข้อมูลร้อยละของออกซิเจนในไอเสียที่วัดได้ขณะเปิดและปิดประตูยิงเหล็กในหัวข้อ ก.4 มาแทนลงในสมการดังกล่าวจะสามารถคำนวณหาค่า λ ขณะเปิดและปิดประตูได้

ผลจากการตรวจวัดพบว่าปริมาณออกซิเจนในไอเสียขณะปิดประตูและเปิดประตู มีค่าเฉลี่ย 4.5% และ 6.6% ไม่รวมไอน้ำตามลำดับ เมื่อแทนลงในสมการข้างต้น จะได้ค่า λ เท่ากับ 1.25633 และ 1.43075 ตามลำดับ และจากสมการการหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ในทางปฏิบัติ

$$\lambda = \frac{(A/F)_{actual}}{(A/F)_{stoic}}$$

เมื่ออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี $(A/F)_{stoic}$ มีค่า 13.915 kg_{air}/kg_{fuel} และแทนค่า λ ในกรณีต่าง ๆ ลงในสมการข้างต้น จะสามารถคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติได้ดังแสดงในตาราง ข-5

ตาราง ข-5 ผลการคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงขณะปิดและเปิดประตูยিংเหล็ก

การเปิดและปิดประตูยিংเหล็ก	ร้อยละของออกซิเจนในไอเสีย (ไม่รวมไอน้ำ)	λ	อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ (kg _{air} /kg _{fuel})
ปิดประตู	4.5	1.25633	17.48183
เปิดประตู	6.6	1.43075	19.90889

เมื่อทราบข้อมูลอัตราการใช้เชื้อเพลิงประกอบกับค่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติขณะปิดและเปิดประตูยিংเหล็กที่คำนวณได้ จะสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศได้ขณะปิดและเปิดประตูยিংเหล็กได้จาก

$$(A/F)_{actual} = \left(\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{fuel}} \right)_{actual}$$

จากข้อมูลการตรวจวัดในหัวข้อ ก.2 พบว่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงมีค่า 653 L/hr หรือ 0.17413 kg/s เมื่อนำค่าอัตราการใช้เชื้อเพลิงและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติขณะปิดและเปิดประตูไปแทนในสมการข้างต้นจะได้ว่าขณะปิดประตูอัตราการไหลของอากาศมีค่า 3.04411 kg/s และขณะเปิดประตูอัตราการไหลของอากาศมีค่า 3.46674 kg/s ซึ่งข้อมูลการไหลของอากาศที่คำนวณได้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์อากาศที่รั่วเข้าสู่เตาและไอเสียได้ในหัวข้อถัดไป

ข.2 การวิเคราะห์อากาศที่รั่วเข้าสู่เตาผ่านช่องเปิดของประตูยิงเหล็ก

1. คุณสมบัติของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา

จากข้อมูลที่ตรวจวัดได้ในหัวข้อ ก.4 อุณหภูมิของอากาศแวดล้อมเฉลี่ยมีค่าประมาณ 34.4°C จึงเลือกใช้คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิดังกล่าวในการคำนวณเกี่ยวกับอากาศแวดล้อมที่รั่วเข้าสู่เตาโดยใช้ตารางคุณสมบัติของอากาศจาก Incropera, fifth edition, 2007

2. การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา

อัตราการไหลของอากาศขณะปิดประตูยิงเหล็กที่คำนวณได้ในหัวข้อที่แล้วคืออัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้เท่านั้น ดังนั้นอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปิดประตูยิงเหล็กจึงเป็นอัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาผ่านช่องเปิดของประตู สามารถคำนวณได้จาก

$$\dot{m}_{air,leak} = (\dot{m}_{air,open} - \dot{m}_{air,close})$$

$$\dot{m}_{air,leak} = (3.46674 - 3.04411) = 0.42263 \text{ kg/s}$$

จึงได้อัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาผ่านช่องเปิดของประตูมีค่า 0.42263 kg/s

3. การคำนวณหาอัตราเร็วของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา

เมื่อความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 34.4°C มีค่า 1.14728 kg/m^3 ช่องเปิดของประตูที่อากาศไหลผ่านมีขนาดกว้าง 0.625 m และสูง 0.4 m จำนวน 2 ช่อง คำนวณหาอัตราเร็วของอากาศรั่วเฉลี่ยทั้งพื้นที่ช่องเปิดได้ดังนี้

$$v_{air} = \frac{\dot{m}_{air,leak}}{\rho_{air} A_{openings}}$$

$$v_{air} = \frac{0.42263}{1.14728 \times 2 \times (0.625 \times 0.4)} = 0.7367 \text{ m/s}$$

จะได้อัตราเร็วเฉลี่ยของอากาศรั่วเข้าสู่เตาของแต่ละประตูมีค่า 0.7367 m/s

4. การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตา

อากาศที่รั่วเข้าสู่เตาจะกระทบหัวของแท่งเหล็กแล้วไหลขึ้นด้านบนซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการไหลแบบขวางจึงพิจารณาเป็นการไหลแบบขวางกระทบที่หัวแท่งเหล็กสูง 10 cm ซึ่งในที่นี้คือ hydraulic diameter (D_h) มีค่า 0.1 m และจากคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 34.4°C ค่า kinematic viscosity (ν) มีค่า $1.64941 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ และอัตราเร็วของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาของแต่ละประตูมีค่า 0.7367 m/s สามารถคำนวณหา Reynolds number (Re) ได้ดังนี้ (Incropera, 2007)

$$Re_D = \frac{V_{leak,air} \times D_h}{\nu}$$

$$Re_D = \frac{0.7367 \times 0.1}{1.64941 \times 10^{-5}} = 4,466$$

จะได้ Reynolds number มีค่า 4,466 ซึ่งมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ และจากคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 34.4°C ค่า Prandtl number (Pr) มีค่า 0.72713 จะสามารถหาค่า Nusselt number เฉลี่ยได้ดังนี้ (Incropera, 2007)

$$\overline{Nu_D} = 0.3 + \frac{0.62 Re_D^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282,000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$\overline{Nu_D} = 35.02181$$

จะได้ Nusselt number เฉลี่ยมีค่า 35.02181 และจากคุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ 34.4°C ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) มีค่า 0.02621 W/m.K สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาได้ดังนี้

$$\overline{h_a} = \frac{\overline{Nu_D} k}{D_h}$$

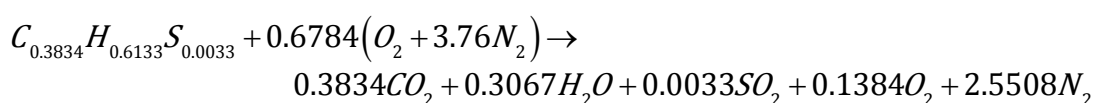
$$\overline{h_a} = \frac{35.02181 \times 0.02621}{0.1} = 9.17922 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

จะได้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาผ่านช่องเปิดของประตูเหล็กมีค่า 9.17922 W/m².K

ข.3 การวิเคราะห์ไอเสีย

1. คุณสมบัติของไอเสีย

ไอเสีย (flue gas) หรือผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ (product of combustion, POC) ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และเนื่องจากการพาความร้อนจากไอเสียส่วนใหญ่เกิดขึ้นขณะปิดประตูยิงเหล็กดังนั้นส่วนประกอบของไอเสียที่จะนำมาหาค่าคุณสมบัติจึงเป็นส่วนประกอบของไอเสียขณะปิดประตูยิงเหล็กซึ่งไม่รวมส่วนของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาดังแสดงสมการการเผาไหม้



แต่การคำนวณค่าคุณสมบัติของไอเสียจำเป็นต้องทราบค่าสัดส่วนโดยโมล (χ) และสัดส่วนโดยมวล (Y) ของสารประกอบแต่ละตัวเพื่อนำไปเป็นค่าถ่วงน้ำหนักคุณสมบัติที่อุณหภูมิ $1,250^\circ\text{C}$ ของสารประกอบแต่ละตัวโดยใช้ตารางคุณสมบัติของอากาศจาก Incropera, 2007 ก่อนนำมารวมกันเป็นค่าคุณสมบัติของไอเสียที่อุณหภูมิดังกล่าวโดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$\chi_i = \frac{n_i}{\sum_i (n_i)}$$

เมื่อ n_i คือจำนวนโมลของสารประกอบแต่ละชนิด

$$MW_{flue} = \sum_i (\chi_i \times MW_i)$$

$$Y_i = \frac{\chi_i \times MW_i}{MW_{flue}}$$

ผลลัพธ์จากสมการข้างต้นแสดงไว้ใน

ตาราง ข-6 จากนั้นใช้สัดส่วนโดยโมลและสัดส่วนโดยมวลของไอเสียเป็นค่าถ่วงน้ำหนักคุณสมบัติของสารประกอบโดยมีข้อกำหนดดังนี้

- คุณสมบัติที่ไม่ขึ้นกับมวลให้ถ่วงน้ำหนักด้วยสัดส่วนโดยโมล ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ความหนืด (μ , ν) thermal diffusivity (α) และ Prandtl number (Pr)

- คุณสมบัติที่ขึ้นกับมวลให้ถ่วงน้ำหนักด้วยสัดส่วนโดยมวล ได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะ (c_p)

ค่าคุณสมบัติของไอเสียจึงคำนวณได้ดังนี้

$$\text{คุณสมบัติของไอเสียที่ไม่ขึ้นกับมวล} = \sum_i (\chi_i \times \text{คุณสมบัติของสารประกอบนั้น ๆ})$$

$$\text{คุณสมบัติของไอเสียที่ขึ้นกับมวล} = \sum_i (Y_i \times \text{คุณสมบัติของสารประกอบนั้น ๆ})$$

จะได้คุณสมบัติของไอเสียที่อุณหภูมิ 1,250°C ดังแสดงในตาราง ข-7

ตาราง ข-6 แสดงค่าส่วนประกอบของไอเสียในรูปแบบต่าง ๆ

สารประกอบ	n_i (kmol)	MW_i (kg/kmol)	χ_i (kmol/kmol _{flue})	$\chi_i \times MW_i$ (kg/kmol _{flue})	Y_i (kg/kg _{flue})
CO ₂	0.3834	44.01	0.11346	4.99335	0.17169
H ₂ O (g)	0.3067	18.015	0.09076	1.63507	0.05622
O ₂	0.1384	31.999	0.04096	1.31067	0.04506
N ₂	2.5508	28.013	0.75483	21.14535	0.72703
รวม	3.3793	-	1.00000	29.08444	1.00000

ตาราง ข-7 คุณสมบัติของไอเสียที่อุณหภูมิ 1,250°C

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่น (ρ)	0.23912	(kg/m ³)
ความจุความร้อนจำเพาะ (c_p)	1326.33	(J/kg.K)
สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)	0.10552	(W/m.K)
ความหนืด (μ)	5.22772×10^{-5}	(kg/m.s)
Kinematic viscosity (ν)	2.18626×10^{-4}	(m ² /s)
Thermal diffusivity (α)	3.32701×10^{-4}	(m ² /s)
Prandtl number (Pr)	0.65712	-

2. การคำนวณหาอัตราการไหลของไอเสีย

เมื่อเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศจะได้ไอเสียออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ จากกฎอนุรักษ์มวลจะได้ว่าอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ (product) จะเท่ากับอัตราการไหลของสารตั้งต้น (reactant) หรืออัตราการไหลของไอเสีย (flue gas) เท่ากับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง (fuel) รวมกับอัตราการไหลของอากาศ แต่เนื่องจากมีอากาศบางส่วนรั่วไหลเข้ามาขณะที่ประตูยังเหล็กเปิด ซึ่งประตูยังเหล็กไม่ได้เปิดตลอดเวลาและอากาศจะรั่วเข้าสู่เตาได้ในขณะที่เปิดประตูเท่านั้น จึงจำเป็นต้องคำนวณสัดส่วนเวลาการเปิดประตู (f_{open}) เพื่อคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักตลอดเวลาการผลิต จากข้อมูลการผลิตในหัวข้อ ก.2 อัตราการผลิตเฉลี่ย 16.4 ton/hr หรืออุณหภูมิเหล็กได้ประมาณ 90 billet/hr และใช้เวลาเปิดประตูเพื่อนำแท่งเหล็กออกจากเตา 11 s/billet จะสามารถคำนวณสัดส่วนเวลาการเปิดประตูได้

$$f_{open} = \frac{90 \times 11}{3600} = 0.275$$

และสามารถหาสัดส่วนเวลาการปิดประตูได้จาก

$$f_{close} = 1 - f_{open} = 1 - 0.275 = 0.725$$

จากข้อมูลการผลิตเชื้อเพลิงมีอัตราการไหล 0.17413 kg/s และจากการคำนวณในหัวข้อที่แล้วขณะเปิดประตูอัตราการไหลของอากาศมีค่า 3.46674 kg/s สัดส่วนเวลาการเปิดประตูมีค่า 0.275 และขณะปิดประตูอัตราการไหลของอากาศมีค่า 3.04411 kg/s สัดส่วนเวลาการปิดประตูมีค่า 0.725 สามารถคำนวณหาอัตราการไหลเฉลี่ยของไอเสียได้ดังนี้

$$\dot{m}_{product} = \dot{m}_{reactant}$$

$$\dot{m}_{flue} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{air}$$

$$\dot{m}_{flue} = \dot{m}_{fuel} + (f_{open} \times \dot{m}_{air,open} + f_{close} \times \dot{m}_{air,close})$$

$$\dot{m}_{flue} = 0.17413 + (0.275 \times 3.46674 + 0.725 \times 3.04411)$$

$$\dot{m}_{flue} = 3.33446 \text{ kg/s}$$

ดังนั้นอัตราการไหลเฉลี่ยของไอเสียมีค่า 3.33446 kg/s

3. การคำนวณหาอัตราเร็วของไอเสีย

ในการคำนวณหาอัตราเร็วของไอเสียจะหาเป็นอัตราเร็วเฉลี่ยทั้งพื้นที่หน้าตัดของเตาที่ไอเสียไหลผ่านโดยสมมติให้รูปร่างความเร็วคงตัวและพัฒนาเต็มที่แล้ว (uniform and fully developed velocity profile) จากผลการคำนวณคุณสมบัติของไอเสียที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ ในตาราง ข-7 ความหนาแน่นของไอเสียมีค่า 0.23912 kg/m^3 พื้นที่หน้าตัดของเตาที่อากาศไหลผ่านมีขนาดกว้าง 2.6 m และสูง 1.474 m แต่ในเตามีแท่งเหล็กสูง 0.1 m อยู่ที่พื้นจึงต้องหักความสูงของแท่งเหล็กออกจากความสูงของเตาด้วย คำนวณหาความเร็วเฉลี่ยของไอเสียได้ดังนี้

$$V_{flue} = \frac{\dot{m}_{flue}}{\rho_{flue} A_{c, furnace}}$$

$$V_{flue} = \frac{\dot{m}_{flue}}{\rho_{flue} \times [W_{furnace} \times (H_{furnace} - H_{billet})]}$$

$$V_{air} = \frac{3.33446}{0.23912 \times [2.6 \times (1.474 - 0.1)]} = 3.90346 \text{ m/s}$$

จะได้ความเร็วเฉลี่ยของไอเสียมีค่า 3.90346 m/s

4. การคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของไอเสีย

ไอเสียที่ออกจากหัวเผาจะไหลผ่านแท่งเหล็กที่เรียงตัวกันอยู่ที่พื้นเตามีลักษณะเป็นการไหลของของไหลผ่านแผ่นราบ จึงพิจารณการไหลของไอเสียผ่านแท่งเหล็กเป็นการไหลผ่านแผ่นราบความยาว 0.1 m ตามความกว้างของแท่งเหล็ก และจากคุณสมบัติของไอเสียที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ ค่า kinematic viscosity (ν) มีค่า $2.18626 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ และอัตราเร็วของไอเสียมีค่า 3.90346 m/s สามารถคำนวณหา Reynolds number ได้ดังนี้ (Incropera, 2007)

$$Re_L = \frac{V_{flue} \times L}{\nu}$$

$$Re_L = \frac{3.90346 \times 0.1}{2.18626 \times 10^{-4}} = 1,785$$

จะได้ Reynolds number มีค่า 1,785 ซึ่งมีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ และจากคุณสมบัติของไอเสียที่อุณหภูมิ 1,250°C ค่า Prandtl number (Pr) มีค่า 0.65712 จะสามารถหาค่า Nusselt number เฉลี่ยได้ดังนี้ (Incropera, 2007)

$$\overline{Nu}_L = 0.664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}; \quad Pr \geq 0.6$$

$$\overline{Nu}_L = 0.664 \times (1,785)^{1/2} \times (0.65712)^{1/3} = 24.38945$$

จะได้ Nusselt number เฉลี่ยมีค่า 24.38945 และจากคุณสมบัติของไอเสียที่อุณหภูมิ 1,250°C ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน มีค่า 0.10552 W/m.K สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของอากาศรั่วเข้าสู่เตาได้ดังนี้

$$\overline{h}_g = \frac{\overline{Nu}_L k_{flue}}{L}$$

$$\overline{h}_L = \frac{24.38945 \times 0.10552}{0.1} = 25.73575 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

จะได้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยของไอเสียมีค่า 25.73575 W/m².K

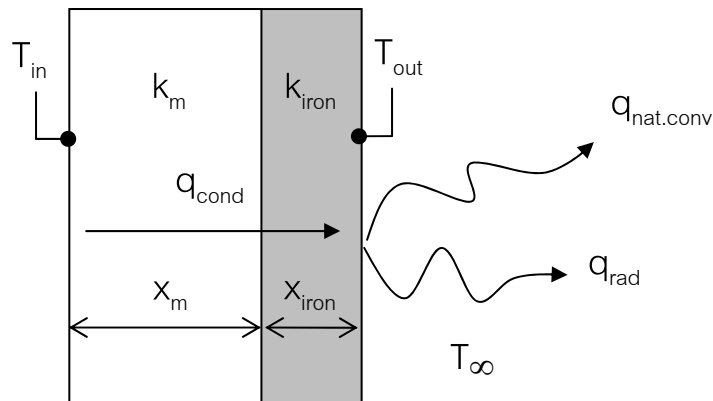
ข.4 การคำนวณหาอุณหภูมิภายในของประตูยิงเหล็ก

1. การหาอุณหภูมิภายในของประตูยิงเหล็กเมื่อไม่หุ้มฉนวน

การถ่ายเทความร้อนผ่านประตูยิงเหล็กแสดงในรูป ข-1 อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านประตูจะมีค่าเท่ากับอัตราการนำความร้อนผ่านประตูและเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากประตูออกสู่สิ่งแวดล้อม ดังสมการ

$$q_{door} = q_{cond} = q_{rad} + q_{nat.conv}$$

$$q_{door} = \frac{A(T_{in} - T_{out})}{\left(\frac{x_m}{k_m} + \frac{x_{iron}}{k_{iron}}\right)} = \sigma \epsilon_{iron} A(T_{out}^4 - T_{\infty}^4) + h_{nat} A(T_{out} - T_{\infty})$$



รูป ข-1 การถ่ายเทความร้อนผ่านประตูยึงเหล็ก

พิจารณาการพาความร้อนแบบอิสระ (free convection หรือ natural convection) จากข้อมูลที่ตรวจวัดได้อุณหภูมิผิวภายนอกของประตูยึงเหล็ก (T_{out}) มีค่าเฉลี่ย 223°C หรือ 496.15 K พื้นที่ประตูยึงเหล็กมีค่า 0.25 m^2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระหาได้ดังนี้ (Incropera, 2007)

$$T_f = \frac{(T_{out} + T_{amb})}{2} = \frac{(496.15 + 307.55)}{2} = 401.85\text{ K}$$

และ

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{401.85} = 2.48849 \times 10^{-3}$$

ใช้คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิ $T_f = 401.85\text{ K}$ คำนวณค่า Rayleigh number ได้ดังนี้

$$Ra_L = \frac{g\beta L^3 (T_{out} - T_{amb})}{\nu\alpha}$$

$$Ra_L = \frac{9.81 \times 2.48849 \times 10^{-3} \times 0.4^3 \times (496.15 - 307.55)}{(2.66313 \times 10^{-5}) \times (3.86293 \times 10^{-5})} = 2.86429 \times 10^8$$

Rayleigh number มีค่า 2.86429×10^8 มีลักษณะการไหลแบบราบเรียบ สามารถหาค่า Nusselt number เฉลี่ยได้จาก

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{9/6}\right]^{4/9}}; \quad (Ra_L \leq 10^9)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 \times (2.86429 \times 10^8)^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{0.689852}\right)^{9/6}\right]^{4/9}} = 71.36571$$

จะได้ Nusselt number 71.36571 จากนั้นนำไปหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระได้จาก

$$h_{nat} = \frac{k \overline{Nu}_L}{L} = \frac{3.39295 \times 10^{-2} \times 71.36571}{0.4} = 6.05351 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

จะได้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระเฉลี่ยมีค่า 6.05351 W/m².K และจากหัวข้อ ก.6 จะได้ข้อมูลดังนี้

- ปูนทนไฟ: $x_m = 0.116 \text{ m}$, $k_m = 0.72 \text{ W/m.K}$
 - เหล็กหล่อ: $x_{iron} = 0.019 \text{ m}$, $k_{iron} = 42 \text{ W/m.K}$
- $\epsilon_{iron} = 0.67$ (Infrared Services, 2000: online)

นำข้อมูลต่าง ๆ แทนค่าลงในสมการการถ่ายเทความร้อนผ่านประตู

$$q''_{door} = \sigma \epsilon_{iron} (T_{out}^4 - T_{\infty}^4) + h_{nat} (T_{out} - T_{\infty})$$

$$q''_{door} = (5.67 \times 10^{-8})(0.67)(496.15^4 - 307.55^4) + (6.05351)(496.15 - 307.55)$$

$$q''_{door} = 3,103.84 \text{ W/m}^2$$

จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านประตูต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยมีค่า 3,103.84 W/m² จากนั้นคำนวณหาอุณหภูมิภายในของประตูถึงเหล็กได้จาก

$$q''_{door} = \frac{(T_{in} - T_{out})}{\left(\frac{x_m}{k_m} + \frac{x_{iron}}{k_{iron}}\right)}$$

$$T_{in} = q''_{door} \times \left(\frac{X_m}{k_m} + \frac{X_{iron}}{k_{iron}} \right) + T_{out}$$

$$T_{in} = 3,103.84 \times \left(\frac{0.116}{0.72} + \frac{0.019}{42} \right) + 496.15 = 997.62 \text{ K}$$

จะได้อุณหภูมิภายในของประตูยิงเหล็กมีค่า 997.62 K หรือ 724.47°C

2. การหาอุณหภูมิภายในของประตูยิงเหล็กเมื่อหุ้มฉนวนความหนาต่าง ๆ

การถ่ายเทความร้อนผ่านประตูเมื่อหุ้มฉนวนแสดงใน

รูป ข-2 ฉนวนที่นำมาหุ้มเป็นฉนวนใยเซรามิก (ceramic fiber) ทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ถึง 1260°C มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ 0.16 W/m.K (ฉนวนใยเซรามิก, 2553: ออนไลน์)

จากอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยและอุณหภูมิภายในของประตูที่คำนวณได้ในหัวข้อที่แล้วจะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาสู่อิฐประตูด้านใน (h_{in}) ได้ดังนี้

$$h_{in} = \frac{q''_{door}}{(T_g - T_{in})} = \frac{3,103.84}{(1523.15 - 997.62)} = 5.90611 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

$$h_{in} = 5.90611 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

จะได้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาสู่อิฐประตูด้านในมีค่า 5.90611 W/m².K

เนื่องจากเมื่อหุ้มฉนวนแล้วจะทำให้อุณหภูมิภายในและภายนอกของประตูรวมถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาสู่อิฐประตูด้านในของประตูยิงเหล็ก และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระด้านนอกของประตูเปลี่ยนแปลงไปด้วยทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าเหล่านี้ได้ จึงจำเป็นต้องกำหนดให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาสู่อิฐประตูด้านในของประตูยิงเหล็ก และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระดังกล่าวมีค่าคงที่เมื่อหุ้มฉนวนความหนาต่าง ๆ ทั้งนี้แม้ว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผิวภายนอกของประตูอันจะมีผลต่อทำให้คุณสมบัติ

ของของไหลที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหลนั้น ๆ กับประตูเปลี่ยนแปลงไป แต่จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจึงสามารถสมมติให้มีค่าคงที่ได้

จากการสมมติข้างต้นจะได้ว่า

- สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาสู่อุณหภูมิภายนอกของประตูยิงเหล็กมีค่าคงที่ $5.90611 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
- สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระมีค่าคงที่ $6.05351 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

เมื่อกำหนดให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาสู่อุณหภูมิภายนอกของประตูยิงเหล็ก และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระมีค่าคงที่แล้วจะสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิผิวภายนอกของประตูและอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านประตูต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยได้จาก

$$q''_{door} = \frac{(T_g - T_{out})}{\frac{1}{h_{in}} + \left(\frac{x_m}{k_m} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}} + \frac{x_{iron}}{k_{iron}} \right)} = \sigma \epsilon_{iron} (T_{out}^4 - T_{\infty}^4) + h_{nat} (T_{out} - T_{\infty})$$

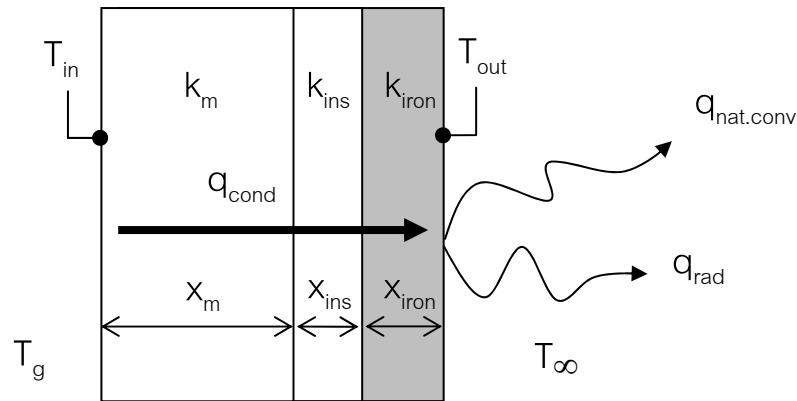
จากนั้นคำนวณหาอุณหภูมิผิวภายในของประตูจาก

$$T_{in} = q''_{door} \times \left(\frac{x_m}{k_m} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}} + \frac{x_{iron}}{k_{iron}} \right) + T_{out}$$

เมื่อหุ้มฉนวนหนา 0.6 cm, 1.25 cm, 2.5 cm และ 5 cm ได้ผลการคำนวณดังแสดงในตาราง ข-8

ตาราง ข-8 ผลการคำนวณอุณหภูมิผิวภายนอกของประตู อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย และอุณหภูมิผิวภายในของประตูเมื่อหุ้มฉนวนความหนาต่าง ๆ

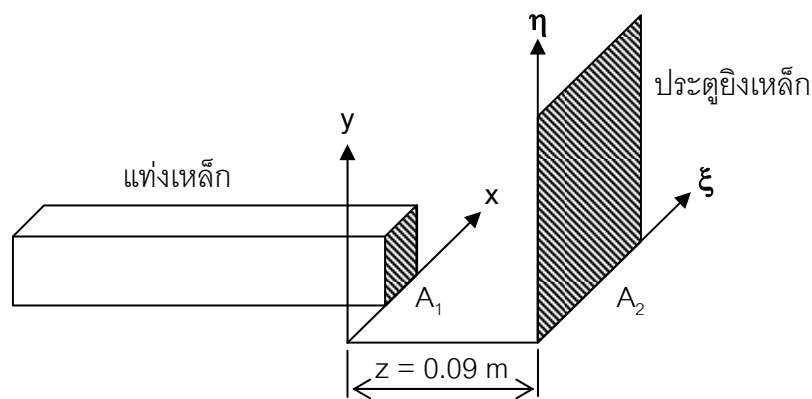
x (m)	T _{out} (K)	q'' (W/m ²)	T _{in} (K)
0.0000	496.15	3,103.84	997.62
0.0006	484.30	2,820.03	1,045.67
0.0125	473.18	2,567.14	1,088.49
0.0250	455.53	2,191.66	1,152.07
0.0500	429.95	1,699.16	1,235.45



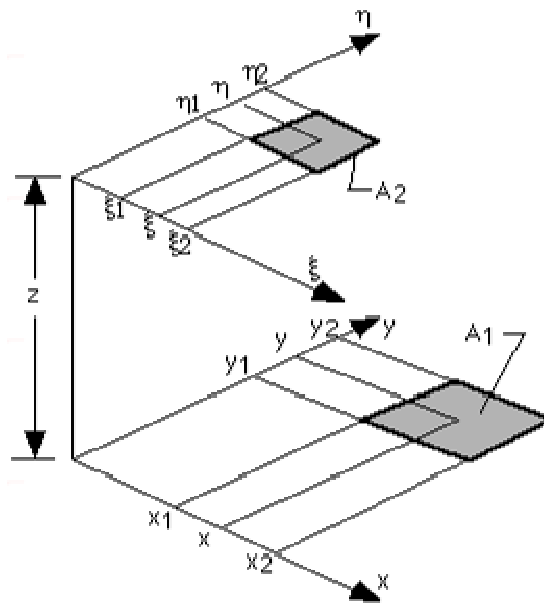
รูป ข-2 การถ่ายเทความร้อนผ่านประตูยึงเหล็กเมื่อหุ้มฉนวน

ข.5 การหาตัวประกอบการมองเห็น (view factor) ของการแผ่รังสีระหว่างแท่งเหล็กกับประตูยึงเหล็กและผนังเตาด้านข้าง

พิจารณากการแผ่รังสีระหว่างหน้าตัดที่ปลายแท่งเหล็กกับประตูยึงเหล็ก ตำแหน่งของแท่งเหล็กและประตูยึงเหล็กแสดงในรูป ข-3 แท่งเหล็กและประตูอยู่ติดกับพื้นเตาในระนาบเดียวกัน และแท่งเหล็กอยู่กึ่งกลางประตูห่างจากประตู 0.09 m ($z = 0.09$) เมื่อพิจารณารูป ข-3 ตามขนาดของแท่งเหล็กและประตูยึงเหล็กประกอบกับ รูป ข-4 ซึ่งเป็นรูปเพื่อใช้ประกอบการคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็น จะได้ค่าตำแหน่งพิกัดต่างๆ ในระนาบทั้งสองระนาบดังแสดงในตาราง ข-9



รูป ข-3 ตำแหน่งของแท่งเหล็กและประตูยึงเหล็ก



รูป ข-4 รูปประกอบเพื่อใช้คำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นของระนาบสองระนาบที่ขนานกัน
(แหล่งที่มา: <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/sectionc/C-13.html>)

ตาราง ข-9 ตำแหน่งพิกัดต่าง ๆ เพื่อใช้ในการคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็น

ตัวแปร	ขนาด (m)	พิกัดที่ 1	พิกัดที่ 2
ความกว้างของแท่งเหล็ก (x_i)	0.100	0.2625	0.3625
ความสูงของแท่งเหล็ก (y_j)	0.100	0.0000	0.1000
ความสูงของประตู (η_k)	0.625	0.0000	0.6250
ความกว้างของประตู (ξ_l)	0.400	0.0000	0.4000

เมื่อกำหนดพิกัดได้แล้วจะสามารถคำนวณค่าตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นที่ A_1 ไปยังพื้นที่ A_2 ให้สัญลักษณ์ F_{12} ได้จาก

$$F_{12} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} \times G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)$$

$$\text{โดยที่ } G = \frac{1}{2\pi} \left(\begin{array}{l} (y-\eta) \left[(x-\xi)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{y-\eta}{\left[(x-\xi)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ + (x-\xi) \left[(y-\eta)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{x-\xi}{\left[(y-\eta)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ - \frac{z^2}{2} \ln \left[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2 \right] \end{array} \right)$$

จากสมการที่ใช้หาตัวประกอบการมองเห็นจะเห็นว่าต้องคำนวณค่า G เป็นจำนวน 16 กรณีจากการแปรเปลี่ยนค่า i, j, k และ l ซึ่งเป็นตัวกำหนดค่า x_i, y_j, η_k และ ξ_l ผลการคำนวณค่า G ทั้ง 16 กรณีแสดงในตาราง ข-10

ตาราง ข-10 ผลการคำนวณค่า G ในกรณีต่าง ๆ เพื่อคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็น

กรณี	i	j	k	l	x_i	y_j	η_k	ξ_l	G	$(-1)^{(i+j+k+l)}G$
1	1	1	1	1	0.2625	0.0000	0.0000	0.0000	0.00632	0.00632
2	1	1	1	2	0.2625	0.0000	0.0000	0.6250	0.00816	-0.00816
3	1	1	2	1	0.2625	0.0000	0.4000	0.0000	0.02772	-0.02772
4	1	1	2	2	0.2625	0.0000	0.4000	0.6250	0.03739	0.03739
5	1	2	1	1	0.2625	0.1000	0.0000	0.0000	0.00927	-0.00927
6	1	2	1	2	0.2625	0.1000	0.0000	0.6250	0.01221	0.01221
7	1	2	2	1	0.2625	0.1000	0.4000	0.0000	0.02120	0.02120
8	1	2	2	2	0.2625	0.1000	0.4000	0.6250	0.02852	-0.02852
9	2	1	1	1	0.3625	0.0000	0.0000	0.0000	0.00816	-0.00816
10	2	1	1	2	0.3625	0.0000	0.0000	0.6250	0.00632	0.00632
11	2	1	2	1	0.3625	0.0000	0.4000	0.0000	0.03739	0.03739
12	2	1	2	2	0.3625	0.0000	0.4000	0.6250	0.02772	-0.02772
13	2	2	1	1	0.3625	0.1000	0.0000	0.0000	0.01221	0.01221

กรณี	i	j	k	l	x_i	y_j	η_k	ξ_l	G	$(-1)^{(i+j+k+l)}G$
14	2	2	1	2	0.3625	0.1000	0.0000	0.6250	0.00927	-0.00927
15	2	2	2	1	0.3625	0.1000	0.4000	0.0000	0.02852	-0.02852
16	2	2	2	2	0.3625	0.1000	0.4000	0.6250	0.02120	0.02120
$\sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} \times G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)$										0.00691

แทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ใช้หาตัวประกอบการมองเห็นจะได้

$$F_{12} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} \times G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)$$

$$F_{12} = F_{sd} = \frac{1}{(0.3625 - 0.2625)(0.1 - 0)} \times (0.00691) = 0.691$$

จะได้ตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นที่ A_1 ไปยังพื้นที่ A_2 หรือจากแท่งเหล็กไปยังประตูยิงเหล็ก (F_{sd}) มีค่า 0.691

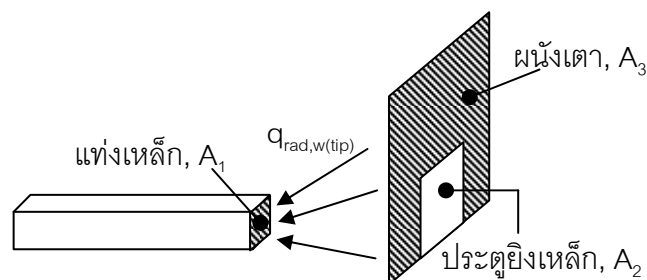
เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดที่หัวแท่งเหล็กหันหน้าเข้าหาประตูยิงเหล็กและผนังเตาซึ่งอยู่ในระนาบเดียวกันดังรูป ข-5 จากกฎการรวมของตัวประกอบการมองเห็น (summation rule)

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} = F_{ss} + F_{sd} + F_{sw} = 1$$

$$0 + 0.691 + F_{sw} = 1$$

$$F_{sw} = 1 - 0.691 = 0.309$$

จะได้ว่าตัวประกอบการมองเห็นจากหน้าตัดปลายแท่งเหล็กไปยังผนังเตา (F_{sw}) มีค่า 0.309



รูป ข-5 แท่งเหล็กหันหน้าตัดเข้าหาประตูยิงเหล็กและผนังเตาด้านข้าง

ข.6 การวิเคราะห์การแผ่รังสีจากผนังเตาแบบผิวปิดสองผิว (Incropera, 2007)

ในการวิเคราะห์การแผ่รังสีจากผนังเตาเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็กจะสมมติให้เป็นการแผ่รังสีภายในผิวปิดสองผิวโดยสมมติให้ผนังและเพดานเตามีอุณหภูมิเท่ากันถือเป็นพื้นผิวเดียวกันกำหนดให้เป็นพื้นผิวที่ 1 และสมมติให้แท่งเหล็กยาวเต็มความกว้างของเตาเป็นพื้นผิวที่ 2 ดังแสดงในรูป ข-6 การแผ่รังสีจากเพดานและผนังเตาสู่แท่งเหล็กใช้สัญลักษณ์ (q_{ws}) หาได้จาก

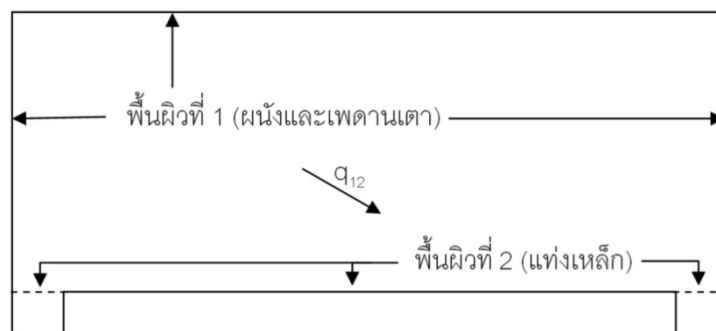
$$q_{ws} = \frac{\sigma(T_w^4 - T_s^4)}{\frac{1 - \epsilon_{wall}}{\epsilon_{wall} A_w} + \frac{1}{A_s F_{sw}} + \frac{1 - \epsilon_s}{\epsilon_s A_s}}$$

จัดให้อยู่ในรูป effective emissivity (ϵ_{eff})

$$q_{ws} = \sigma \epsilon_{eff} A_s (T_w^4 - T_s^4)$$

จะได้

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1 - \epsilon_{wall}}{\epsilon_{wall} (A_w / A_s)} + \frac{1}{F_{sw}} + \frac{1 - \epsilon_s}{\epsilon_s}}$$



รูป ข-6 ผิวปิดสองผิวตามที่สมมติให้แท่งเหล็กยาวเต็มความกว้างของเตา

ตัวประกอบมองเห็นจากแท่งเหล็กไปยังผนังและเพดานเตา (F_{sw}) มีค่าเท่ากับ 1 แทนค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีและขนาดของเตาและแท่งเหล็กที่แสดงไว้ในภาคผนวก ก ดังนี้

$$\epsilon_{eff} = \frac{1}{\frac{1 - 0.8}{0.8 \left(\frac{2 \times 1.374 + 2.6}{2.42} \right)} + \frac{1}{1} + \frac{1 - 0.9}{0.9}} = 0.817$$

จะได้ effective emissivity มีค่า 0.817

ข.7 วิเคราะห์การแผ่รังสีจากแก๊ส (Hottel, 1967)

จากสมการการแผ่รังสีจากแก๊ส

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

จำเป็นต้องทราบค่า a , b , c , สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแท่งเหล็ก (ε_s) และสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊สที่อุณหภูมิเฉลี่ย ($\varepsilon_{g,av}$) ซึ่งหาจาก

$$\varepsilon_{g,av} = (\varepsilon_w + \varepsilon_c - \Delta\varepsilon)_{av}$$

โดยที่สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของไอน้ำ (ε_w) สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของคาร์บอนไดออกไซด์ (ε_c) และตัวคูณปรับแก้เมื่อพิจารณาให้แก๊สเป็นของผสมระหว่างไอน้ำกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($\Delta\varepsilon$) เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าความดันย่อยของแก๊สแต่ละชนิด อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็ก (T_{av}) และค่า mean beam length (L_e)

ค่าความดันย่อยมีดังนี้

- ความดันย่อยของไอน้ำมีค่า 0.09066 atm
- ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 0.11333 atm

ค่า mean beam length หาจาก

$$L_e = 3.6 \frac{V_g}{A_g}$$

แต่การแผ่รังสีจากแก๊สมีทั้งการแผ่รังสีเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็กและเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดบริเวณหัวแท่งเหล็กดังนั้นจึงต้องพิจารณาแยกกันเนื่องจากมีค่า mean beam length ต่างกันดังนี้

ค่า mean beam length ($L_{e,top}$) ของการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็ก

$$L_{e,top} = 3.6 \frac{W_f \times (H_f - H_b) \times L_f}{(2 \times W_f + 2 \times (H_f - H_b)) \times L_f}$$

$$L_{e,top} = 3.6 \frac{2.6 \times (1.474 - 0.1) \times L_f}{(2 \times 2.6 + 2 \times (1.474 - 0.1)) \times L_f} = 1.6181 \text{ m}$$

จะได้ว่า mean beam length ของการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็กมีค่า 1.6181 m

ค่า mean beam length ($L_{e,ip}$) ของการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดที่หัวแท่งเหล็ก

$$L_{e,top} = 3.6 \frac{\left(\frac{W_f - L_b}{2}\right) \times (H_b) \times L_f}{((W_f - L_b) + 2 \times H_b) \times L_f}$$

$$L_{e,top} = 3.6 \frac{\left(\frac{2.6 - 2.42}{2}\right) \times (0.1) \times L_f}{((2.6 - 2.42) + 2 \times 0.1) \times L_f} = 0.08526 \text{ m}$$

จะได้ว่า mean beam length ของการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดที่หัวแท่งเหล็กมีค่า 0.08526 m

เนื่องจากอุณหภูมิของแท่งเหล็กเป็นตัวแปรไม่ทราบค่าและจะมีค่าเปลี่ยนแปลงทุกครั้งที่คำนวณซ้ำ ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กจึงมีค่าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยดังสมการ

$$T_{av} = \sqrt[4]{(T_g^4 + T_s^4) / 2} \quad [K]$$

ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ที่ขึ้นกับอุณหภูมิเฉลี่ยดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป เพื่อความสะดวกในการคำนวณและประหยัดเวลาในการอ่านกราฟต่าง ๆ ผู้วิจัยจึงอ่านค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ จากกราฟในได้แก่ ค่า a_w , a_c , b_w , b_c , ϵ_w , ϵ_c และ $\Delta\epsilon$ ในช่วงอุณหภูมิเฉลี่ย (T_{av}) ตั้งแต่ 1,400 K ถึง 1,523.15 K (1,250°C) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์นั้น ๆ กับอุณหภูมิเฉลี่ยดังกล่าว ได้ผลการอ่านกราฟดังแสดงในตาราง ข-11 และตาราง ข-12 แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 930°C หรือ 1,203.15 K ค่า $\Delta\epsilon$ จะไม่เปลี่ยนแปลงดังนั้นจึงอ่านกราฟเพียงหนึ่งครั้งเท่านั้นได้ว่า $\Delta\epsilon_{top}$ มีค่า 0.0375 และ $\Delta\epsilon_{ip}$ มีค่า 0.00045

ตาราง ข-11 ค่าสัมประสิทธิ์ที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กค่าต่าง ๆ
กรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็ก

สัมประสิทธิ์	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็ก (K)					
	1,400	1,425	1,450	1,475	1,500	1,523.15
$\epsilon_{c,top}$	0.12160	0.11972	0.11714	0.11479	0.11268	0.11019
$\epsilon_{w,top}$	0.11637	0.11406	0.11174	0.10908	0.10623	0.10474
$a_{c,top}$	0.32094	0.32265	0.32414	0.32530	0.32586	0.32807
$a_{w,top}$	0.59515	0.59618	0.60115	0.60962	0.61422	0.61801
$b_{c,top}$	-0.84836	-0.89208	-0.93579	-0.98497	-1.01177	-1.03490
$b_{w,top}$	-1.05957	-1.08069	-1.10440	-1.12780	-1.15074	-1.17100

ตาราง ข-12 ค่าสัมประสิทธิ์ที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กค่าต่าง ๆ
กรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดที่หัวแท่งเหล็ก

สัมประสิทธิ์	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็ก (K)					
	1,400	1,425	1,450	1,475	1,500	1,523.15
$\epsilon_{c,tip}$	0.03976	0.03894	0.03812	0.03729	0.03647	0.03565
$\epsilon_{w,tip}$	0.01142	0.01094	0.01048	0.01000	0.00964	0.00936
$a_{c,tip}$	0.48327	0.48535	0.48650	0.48805	0.48911	0.49063
$a_{w,tip}$	0.94932	0.95776	0.96713	0.97500	0.98431	0.99232
$b_{c,tip}$	-1.16111	-1.19489	-1.22984	-1.26227	-1.29091	-1.31966
$b_{w,tip}$	-2.18608	-2.23657	-2.27313	-2.31402	-2.35079	-2.38663

นำค่า ϵ_w , ϵ_c และ $\Delta\epsilon$ มาคำนวณหาค่า ϵ_g ทั้งกรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็ก และเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดที่หัวแท่งเหล็กได้จากสมการ

$$\epsilon_{g,av} = (\epsilon_w + \epsilon_c - \Delta\epsilon)_{av}$$

และเนื่องจากแก๊สที่แผ่รังสีเป็นแก๊สผสมระหว่างไอน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ ในการหาค่า a และ b ต้องถ่วงน้ำหนักด้วย ϵ_w และ ϵ_c ดังสมการ

$$a = \frac{(\varepsilon_w \times a_w) + (\varepsilon_c \times a_c)}{(\varepsilon_w + \varepsilon_c)}$$

$$b = \frac{(\varepsilon_w \times b_w) + (\varepsilon_c \times b_c)}{(\varepsilon_w + \varepsilon_c)}$$

จะได้ค่า $\varepsilon_{g,av}$ ค่า a และ b ดังตาราง ข-13 และตาราง ข-14

ตาราง ข-13 ค่า $\varepsilon_{g,av}$, a และ b ที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กค่าต่างๆ
กรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็ก

สัมประสิทธิ์	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็ก (K)					
	1,400	1,425	1,450	1,475	1,500	1,523.15
$\varepsilon_{g,av,top}$	0.20047	0.19628	0.19138	0.18636	0.18140	0.17743
a_{top}	0.45504	0.45610	0.45938	0.46383	0.46580	0.46937
b_{top}	-0.95165	-0.98410	-1.01811	-1.05456	-1.07921	-1.10123

ตาราง ข-14 ค่า ε_g , a และ b ที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กค่าต่าง ๆ
กรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดที่หัวแท่งเหล็ก

สัมประสิทธิ์	อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็ก (K)					
	1,400	1,425	1,450	1,475	1,500	1,523.15
$\varepsilon_{g,av,tip}$	0.05073	0.04943	0.04815	0.04685	0.04566	0.04456
a_{tip}	0.58724	0.58896	0.59014	0.59101	0.59265	0.59495
b_{tip}	-1.38977	-1.42335	-1.45480	-1.48466	-1.51253	-1.54152

จากการวิเคราะห์ค่าจากตาราง ข-13 และตาราง ข-14 สามารถสรุปได้ว่าค่าในตารางที่พิจารณามีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอุณหภูมิเฉลี่ยดังนี้

- ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแก๊สกับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กกรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็ก

$$\varepsilon_{g,av,top} = -1.9039 \times 10^{-4} T_{av} + 0.4673; [1,400 K \leq T_{av} \leq 1,523.15 K]$$

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a กับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กกรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็ก

$$a_{top} = 1.2144 \times 10^{-4} T_{av} + 0.2840; [1,400 K \leq T_{av} \leq 1,523.15 K]$$

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า b กับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กกรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่ผิวบนของแท่งเหล็ก

$$b_{top} = -0.0012 T_{av} + 0.7766; [1,400 K \leq T_{av} \leq 1,523.15 K]$$

- ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของแก๊สกับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กกรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดที่หัวแท่งเหล็ก

$$\varepsilon_{g,av,tip} = -5.0250 \times 10^{-5} T_{av} + 0.1210; [1,400 K \leq T_{av} \leq 1,523.15 K]$$

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a กับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กกรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดที่หัวแท่งเหล็ก

$$a_{tip} = 5.8241 \times 10^{-5} T_{av} + 0.5057; [1,400 K \leq T_{av} \leq 1,523.15 K]$$

- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า b กับอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิแท่งเหล็กกรณีการแผ่รังสีจากแก๊สเข้าสู่พื้นผิวหน้าตัดที่หัวแท่งเหล็ก

$$b_{tip} = -0.0012 T_{av} + 0.3161; [1,400 K \leq T_{av} \leq 1,523.15 K]$$

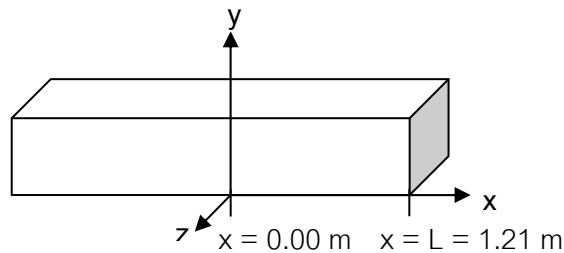
จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะสามารถใช้อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิแก๊สและอุณหภูมิแท่งเหล็กคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของแก๊ส ค่า a และ ค่า b ได้ และเมื่อนำไปแทนในสมการการแผ่รังสีจากแก๊สจะสามารถคำนวณหาอัตราการแผ่รังสีจากแก๊สได้ อย่างไรก็ตามก็ตามความสัมพันธ์ข้างต้นได้ทำขึ้นเพื่อใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับปัญหาในงานวิจัยนี้เท่านั้น จึงไม่สามารถใช้ได้กับปัญหาอื่น ๆ ที่ไปนอกเหนือจากงานวิจัยนี้

ภาคผนวก ค

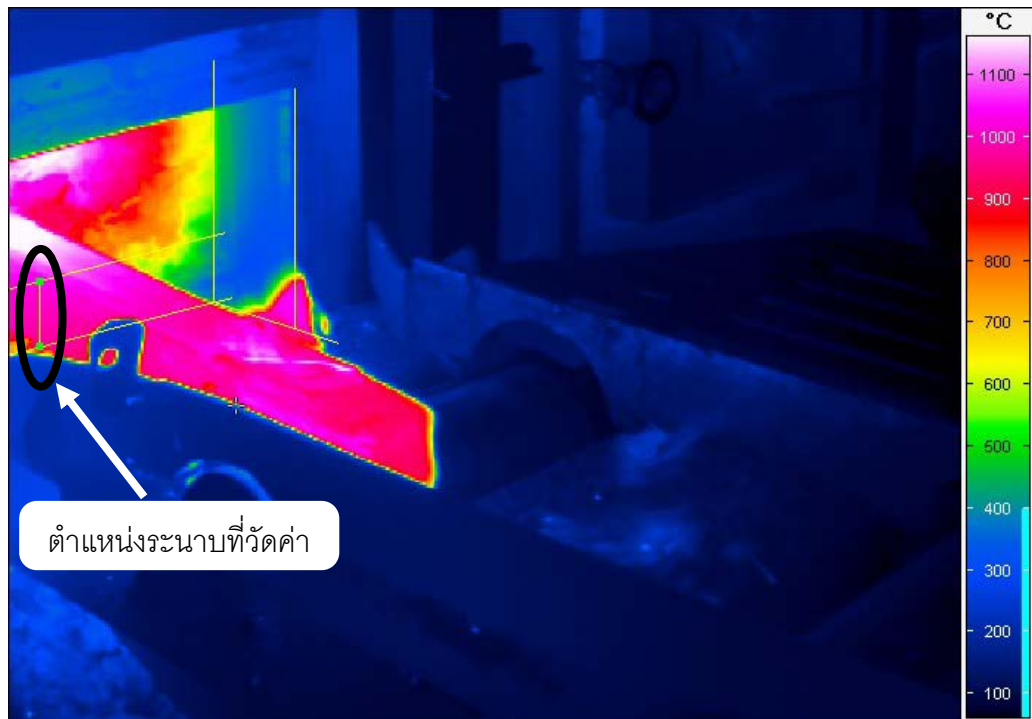
ข้อมูลการตรวจวัดจากโรงงาน

ค.1. ผลการวัดอุณหภูมิแท่งเหล็ก

ตรวจวัดอุณหภูมิแท่งเหล็กด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (thermal imaging camera) โดยถ่ายภาพแท่งเหล็กขณะเคลื่อนออกจากเตาที่ระยะต่าง ๆ โดยกำหนดให้กึ่งกลางแท่งเหล็กเป็นระยะ $x = 0$ m ดังแสดงในรูป ค-1 การอ่านค่าอุณหภูมิที่ระยะความยาวต่าง ๆ ของแท่งเหล็กจะอ่านค่าที่ตำแหน่งเดียวกันในภาพดังแสดงในรูป ค-2 โดยที่ระยะความยาวหนึ่ง ๆ จะอ่านค่าอุณหภูมิที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของแท่งเหล็กได้ผลดังแสดงในตาราง ค-1 แต่ตำแหน่งที่วัดค่าได้ยังไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณเนื่องจากการคำนวณจะคำนวณหาอุณหภูมิที่ระยะทุก ๆ ความสูง 0.01 m และผู้วิจัยเลือกเปรียบเทียบค่าที่ตำแหน่งความสูง 0.00 m, 0.02 m, 0.05 m, 0.08 m และ 0.10 m ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลที่ตรวจวัดมาประมาณค่าในช่วงต่าง ๆ ที่ต้องการเพื่อให้ได้อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่ต้องการ ได้ผลดังแสดงในตาราง ค-2



รูป ค-1 การกำหนดระยะในแนวระดับ



รูป ค-2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิแนวตั้งของแท่งเหล็กที่ระยะในแนวระดับ $x = 0.55$ m

ตาราง ค-1 ค่าอุณหภูมิในแนวตั้งที่ระยะความยาวต่าง ๆ ของแท่งเหล็ก

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก x = 1.21 m		ระยะความยาวของแท่งเหล็ก x = 1.10 m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ (°C)	ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ (°C)
0.00	1,057.89	0.00	1,092.81
4.76	1,050.16	5.56	1,108.33
9.52	1,044.60	11.11	1,115.95
14.29	1,039.35	16.67	1,109.21
19.05	1,037.66	22.22	1,113.15
23.81	1,033.98	27.78	1,116.29
28.57	1,036.93	33.33	1,123.14
33.33	1,037.51	38.89	1,149.60
38.10	1,034.74	44.44	1,125.94
42.86	1,027.29	50.00	1,100.67
47.62	1,025.63	55.56	1,130.93
52.38	1,022.94	61.11	1,153.79
57.14	1,024.67	66.67	1,166.21
61.90	1,023.25	72.22	1,157.25
66.67	1,022.25	77.78	1,142.22
71.43	1,024.14	83.33	1,149.45
76.19	1,029.36	88.89	1,147.76
80.95	1,028.75	94.44	1,141.17
85.71	1,025.48	100.00	1,131.27
90.48	1,008.92		
95.24	1,004.55		
100.00	1,010.89		

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก x = 0.88 m		ระยะความยาวของแท่งเหล็ก x = 0.77 m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ (°C)	ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ (°C)
0.00	1,066.33	0.00	1,042.34
3.85	1,087.37	3.85	1,058.35
7.69	1,085.62	7.69	1,071.67
11.54	1,081.63	11.54	1,078.20
15.38	1,085.54	15.38	1,081.55
19.23	1,094.74	19.23	1,083.64
23.08	1,102.15	23.08	1,084.36
26.92	1,101.09	26.92	1,085.77
30.77	1,105.45	30.77	1,089.54
34.62	1,109.21	34.62	1,091.25
38.46	1,113.00	38.46	1,094.25
42.31	1,112.31	42.31	1,097.02
46.15	1,111.06	46.15	1,097.02
50.00	1,108.14	50.00	1,099.61
53.85	1,112.09	53.85	1,103.74
57.69	1,111.52	57.69	1,106.21
61.54	1,120.80	61.54	1,110.27
65.38	1,127.79	65.38	1,117.43
69.23	1,130.36	69.23	1,120.49
73.08	1,129.27	73.08	1,122.61
76.92	1,134.90	76.92	1,126.66
80.77	1,144.71	80.77	1,130.21
84.62	1,139.39	84.62	1,130.33
88.46	1,138.30	88.46	1,139.58
92.31	1,157.74	92.31	1,165.19
96.15	1,173.38	96.15	1,176.50

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก x = 0.88 m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ (°C)
100.00	1,184.57

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก x = 0.77 m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ (°C)
100.00	1,187.49

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก x = 0.55 m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ (°C)
0.00	1,043.15
3.70	1,052.99
7.41	1,053.79
11.11	1,053.34
14.81	1,054.90
18.52	1,060.03
22.22	1,062.67
25.93	1,061.10
29.63	1,066.14
33.33	1,070.30
37.04	1,072.28
40.74	1,074.76
44.44	1,076.56
48.15	1,078.58
51.85	1,079.76
55.56	1,081.66
59.26	1,084.90
62.96	1,087.18
66.67	1,087.98
70.37	1,088.55
74.07	1,093.76

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก x = 0.25 m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ (°C)
0.00	1,060.60
4.76	1,076.59
9.52	1,062.74
14.29	1,041.08
19.05	1,041.84
23.81	1,051.77
28.57	1,060.11
33.33	1,066.75
38.10	1,068.96
42.86	1,075.41
47.62	1,081.82
52.38	1,085.92
57.14	1,085.77
61.90	1,085.39
66.67	1,087.86
71.43	1,089.54
76.19	1,091.82
80.95	1,092.84
85.71	1,096.30
90.48	1,107.80
95.24	1,117.96

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก $x = 0.55$ m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)
77.78	1,097.59
81.48	1,105.45
85.19	1,110.42
88.89	1,114.21
92.59	1,111.33
96.30	1,097.55

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก $x = 0.25$ m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)
100.00	1,126.05

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก $x = -0.18$ m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ ($^{\circ}$ C)
0.00	1,060.34
4.00	1,047.28
8.00	1,033.36
12.00	1,045.41
16.00	1,062.21
20.00	1,071.37
24.00	1,074.50
28.00	1,077.17
32.00	1,079.53
36.00	1,081.70
40.00	1,082.50
44.00	1,081.85
48.00	1,082.69
52.00	1,086.57
56.00	1,088.05
60.00	1,092.24

ระยะความยาวของแท่งเหล็ก $x = -0.18$ m	
ความสูงจากผิวล่าง (mm)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
64.00	1,094.02
68.00	1,094.17
72.00	1,099.91
76.00	1,107.92
80.00	1,114.47
84.00	1,119.40
88.00	1,120.87
92.00	1,126.51
96.00	1,131.84
100.00	1,139.70

ตาราง ค-2 แสดงอุณหภูมิจากการประมาณค่าในช่วง ณ ตำแหน่งที่ต้องการ เพื่อเปรียบเทียบกับ
ผลจากการคำนวณ

ตำแหน่งความสูงจากผิวล่าง (cm)	ระยะตามแนวยาวของแท่งเหล็ก (m)					
	0.25	0.55	0.77	0.88	1.10	1.21
0	1,060.60	1,043.15	1,042.34	1,066.33	1,092.81	1,057.89
2	1,043.83	1,061.09	1,083.78	1,096.22	1,111.57	1,036.92
5	1,083.87	1,079.17	1,099.61	1,108.14	1,100.67	1,024.29
8	1,092.64	1,102.31	1,129.50	1,142.75	1,145.11	1,028.87
10	1,126.05	1,105.00	1,187.49	1,184.57	1,131.27	1,010.89

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกรัษฎ์ สมเรียวงศ์กุล เกิดเมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ.2529 จังหวัด กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2548 และได้รับพระราชทานปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล เมื่อปี พ.ศ.2552 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2552