

การศึกษาเชิงตัวเลขของการกระจายอุณหภูมิของแท่งเหล็กจากการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิว
ภายในเตาเผาเหล็ก



นายธวัช คุ้มเกียรติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A NUMERICAL STUDY OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A BILLET SUBJECTED
TO THE THERMAL RADIATION AMONG SURFACES IN A REHEATING FURNACE

Mr. Tanawat Khoukit



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาเชิงตัวเลขของการกระจายอุณหภูมิของแท่ง เหล็กจากการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวภายใน เตาเผาเหล็ก
โดย	นายธนวัฒน์ เก้ากิตต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญาณกรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาทีต ภัคดี)

ธนวัฒน์ แก้วกิตต์ : การศึกษาเชิงตัวเลขของการกระจายอุณหภูมิของแท่งเหล็กจากการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวภายในเตาเผาเหล็ก (A NUMERICAL STUDY OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A BILLET SUBJECTED TO THE THERMAL RADIATION AMONG SURFACES IN A REHEATING FURNACE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.จิตติน แดงเที่ยง, 127 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กของพื้นผิวปิดล้อมภายในเตาเผาเหล็กด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหасมารจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น เตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type) ถูกนำมาใช้ในศึกษาและวิเคราะห์หาค่าการถ่ายเทความร้อนแต่ละพื้นผิวภายในเตาเผาเหล็กในส่วนของ soaking zone เนื่องจากกระบวนการเผาเหล็กเป็นกระบวนการที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงมีเพียงแค่การแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น โดยแท่งเหล็กจะได้รับความร้อนหลักที่ผิวด้านบนของแท่งเหล็ก การกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กถูกวิเคราะห์เป็นสองมิติภายใต้สภาวะคงตัว และคำนวณหาอุณหภูมิของแต่ละจุดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) โดยใช้การคำนวณซ้ำด้วยวิธีเกาส์-ไซด์ล (gauss-seidel) ซึ่งเปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน โดยงานวิจัยนี้วิเคราะห์ค่าตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวแท่งเหล็กที่ถูกแบ่งเป็นชิ้นเล็ก ๆ และศึกษาผลของความหนาแน่นผนังเตา , ผลของเปลวไฟ และผลของอุณหภูมิพื้นเตาต่อการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก

จากการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากแบบจำลองกับผลจากการตรวจวัดพบว่าค่ามีความสอดคล้องเป็นที่ยอมรับได้ การกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กมีลักษณะเป็นการนำความร้อนแบบเชิงเส้นหนึ่งมิติจากผิวบนสู่ผิวล่าง โดยที่อุณหภูมิตรงกลางแท่งเหล็กมีค่าสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับเปลวไฟ จากสมดุลความร้อนของแท่งเหล็กพบว่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตามีค่าสูงสุด ดังนั้นเมื่อทำการหุ้มฉนวนผนังเตาจึงส่งผลให้อุณหภูมิแท่งเหล็กสูงขึ้นแต่ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิแท่งเหล็กลดลง เพราะว่าแบบจำลองกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวด้านล่างแท่งเหล็กคงที่ ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมแท่งเหล็กมีค่าลดลงโดยการลดอุณหภูมิเปลวไฟ และเพิ่มอุณหภูมิพื้นเตา ส่งผลให้กระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้ส่งผลให้การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟและการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตามีค่าลดลงด้วย ซึ่งสามารถลดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาได้ด้วยการหุ้มฉนวนที่พื้นเตา

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570219521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: THERMAL RADIATION / ENCLOSURE SURFACE / PUSHER TYPE REHEATING FURNACE / TEMPERATURE DISTRIBUTION

TANAWAT KHOUKIT: A NUMERICAL STUDY OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A BILLET SUBJECTED TO THE THERMAL RADIATION AMONG SURFACES IN A REHEATING FURNACE. ADVISOR: ASSOC. PROF. CHITTIN TANGTHIENG, Ph.D., 127 pp.

The study of the temperature distribution of a billet in the reheating furnace under the enclosure surfaces is presented. This research is conducted to investigate the numerical method by formulating the mathematical model and solving the governing equation. A billet is heated at the soaking zone in pusher type reheating furnace. Due to the high temperature for the reheating process, the only thermal radiation is applied at the upper surface of a billet. The two dimensions steady state heat conduction is employed by calculating the temperature with the finite difference method and solving with the Gauss-seidel iterative technique. The numerical result is verified with the field data. The different value of view factor of a billet and the effect of the insulation thickness , combustion flame and floor temperature on the temperature distribution are also investigated in this study.

The agreement between the numerical result and the field data is fairly acceptable. The temperature distribution is likely one dimension from upper to lower surface. The hot spot of the billet occurs near the combustion flame. From the heat balance of a billet, the heat loss through furnace wall is the highest value. The billet temperature is increased but the degree of temperature uniformity is decreased when covering the wall thickness because the floor temperature is set. Decreasing the flame temperature and increasing the floor temperature, the degree of temperature uniformity is increased. Moreover, the thermal radiation of combustion flame and the heat loss through furnace floor are also decreased.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มีโอกาสให้ข้าพเจ้าในการทำงานวิจัยฉบับนี้ รวมถึงให้คำแนะนำถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ที่มีคุณค่ายิ่ง คอยให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนทางด้านการวิจัยและทางด้านทุนการศึกษาอันเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญาภรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ , รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เลิศนุกวัฒน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาทีต ภัคที กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาของงานวิจัยฉบับนี้ และถ่ายทอดวิชาความรู้อันเป็นส่วนเติมเต็มที่มีประโยชน์ยิ่ง ทำให้ใฝ่ใจวิจัยฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่เลี้ยงดูอบรมสั่งสอนมอบความรักให้อย่างหาที่สุดไม่ได้ เป็นที่พึ่งคอยให้คำปรึกษาก้าวผ่านอุปสรรคและปัญหา และเป็นผู้ที่คอยให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาและคอยเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมาจนสำเร็จ
ลุล่วง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก	4
2.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในแท่งเหล็ก	7
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	18
3.1 เตาเผาเหล็ก (reheating furnace).....	18
3.1.1 เตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type furnace).....	19
3.1.2 เตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน (walking beam furnace).....	19
3.2 การถ่ายเทความร้อน (heat transfer)	20
3.2.1 การนำความร้อน (conduction heat transfer).....	20

3.2.2 การพาความร้อน (convection heat transfer).....	21
3.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiation heat transfer).....	22
3.3 ตัวประกอบการมองเห็น (view factor).....	23
3.3.1 Reciprocity relation.....	24
3.3.2 Summation rule.....	24
3.3.3 Cross-strings method.....	24
3.4 การแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม (radiative heat transfer enclosure).....	25
3.5 การหาความต้านทานทางความร้อน (thermal resistance).....	30
3.7 สมการการนำความร้อนสองมิติ	36
บทที่ 4 การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงเลข.....	39
4.1 สมมติฐานและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา.....	39
4.2 การพิจารณาปัญหาของตัวประกอบการมองเห็น.....	42
4.3 การพิจารณาปัญหาของการกระจายตัวของอุณหภูมิของแท่งเหล็ก	43
4.4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน.....	52
4.4.1 การคำนวณการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม	52
4.4.2 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตา	53
4.4.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็ก	55
4.4.4 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนรวมของทั้งระบบ.....	56
บทที่ 5 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	59
5.1 ตัวประกอบการมองเห็นภายในเตาเผาเหล็ก	59
5.1.1 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและเปลวไฟ	59
5.1.2 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและผนังเตาด้านข้าง.....	60
5.1.3 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและผนังเตาด้านบน.....	61

5.1.4	ตัวประกอบการณ์มองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและพื้นผิวสมมาตร.....	62
5.2	ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	63
5.2.1	ตรวจสอบผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลระเบียบวิธีเชิงเลข.....	63
5.2.2	ตรวจสอบความอิสระของระยะระหว่างจุด (grid independent).....	66
5.3	ผลการคำนวณการกระจายตัวอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนในแท่งเหล็ก.....	67
5.3.1	ผลการคำนวณการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก.....	67
5.3.2	ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก.....	69
5.4	การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการตรวจวัดจากโรงงาน.....	70
5.5	การศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นผนังเตา.....	72
5.5.1	ผลการคำนวณความหนาแน่นผนังเตาต่อการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก.....	73
5.5.2	ผลการคำนวณความหนาแน่นผนังเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก.....	75
5.6	การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเปลวไฟ.....	77
5.6.1	ผลการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟต่อการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก.....	77
5.6.2	ผลการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก.....	80
5.7	การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิพื้นเตา.....	81
5.7.1	ผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นเตาต่อการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก.....	82
5.7.2	ผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก.....	84
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัย.....	87
6.1	สรุปการศึกษางานวิจัย.....	87
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	89
	รายการอ้างอิง.....	90
	ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณหาตัวประกอบการณ์มองเห็น.....	92
	ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	112

ญ

หน้า

ภาคผนวก ค รายละเอียดวัสดุทนไฟ 122

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 127



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของหัวเผาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาเผาเหล็ก	5
ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิของผนังเตาและอุณหภูมิก๊าซภายในเตาเผาเหล็ก	6
ตารางที่ 4.1 พื้นผิวภายในเตาเผาเหล็ก	39
ตารางที่ 5.1 ผลการตรวจสอบความอิสระของระยะระหว่างจุด.....	67
ตารางที่ 5.2 การถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก	70
ตารางที่ 5.3 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิ (°C) จากโรงงาน	71
ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อน (%) ระหว่างผลการตรวจวัดและผลการคำนวณ	72
ตารางที่ 5.5 ผลของอุณหภูมิที่ความหนาแน่นของผนังเตาต่าง ๆ	74
ตารางที่ 5.6 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กที่ความหนาแน่นผนังเตาต่าง ๆ.....	77
ตารางที่ 5.7 ผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิเปลวไฟต่าง ๆ.....	79
ตารางที่ 5.8 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กที่อุณหภูมิเปลวไฟต่าง ๆ	80
ตารางที่ 5.9 ผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิพื้นเตาต่าง ๆ	83
ตารางที่ 5.10 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กที่อุณหภูมิพื้นเตาต่าง ๆ.....	85

สารบัญญภาพ

รูปที่ 2.1	ลักษณะเตาเผาเหล็กแบบผลักดัน	4
รูปที่ 2.2	ความเร็วการไหลของก๊าซ (บน) และการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาเผาเหล็ก (ล่าง).....	5
รูปที่ 2.3	ลักษณะเตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน	6
รูปที่ 2.4	การกระจายตัวของอุณหภูมิ (บน) และการแผ่รังสีความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก (ล่าง)	7
รูปที่ 2.5	ขนาดที่ใช้ในการคำนวณระเหยวิธีเชิงเลข (บน) และคานเลื่อนแท่งเหล็ก (ล่าง)	8
รูปที่ 2.6	การกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กขนาด xz ที่ $y = 0.848$ เมตร	9
รูปที่ 2.7	การกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กขนาด yz ที่ $x = 0.218$ เมตร	9
รูปที่ 2.8	การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังเตา ก๊าซร้อน และแท่งเหล็ก	10
รูปที่ 2.9	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กแบบกับค่าจากการวัด	10
รูปที่ 2.10	การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศภายในเตากับแท่งเหล็ก	11
รูปที่ 2.11	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการแผ่รังสี	11
รูปที่ 2.12	อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางภายในแท่งเหล็ก	12
รูปที่ 2.13	สมดุลความร้อนในส่วนของ preheating และ heating	13
รูปที่ 2.14	สมดุลความร้อนในส่วนของ soaking	13
รูปที่ 2.15	ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างผนังเตาด้านบนและด้านข้างกับแท่งเหล็ก	13
รูปที่ 2.16	เปรียบเทียบอุณหภูมิจากการวัดกับการคำนวณ	14
รูปที่ 2.17	การแลกเปลี่ยนความร้อนในระหว่างเผาเหล็ก	15
รูปที่ 2.18	เปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดกับผลการคำนวณ	15
รูปที่ 2.19	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน	16
รูปที่ 2.20	เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน	16
รูปที่ 3.1	เตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type furnace)	18
รูปที่ 3.2	เตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน (walking beam furnace)	19
รูปที่ 3.3	การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก	20

รูปที่ 3.4	ตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2	23
รูปที่ 3.5	การหาตัวประกอบการมองเห็นด้วยวิธี Cross-strings method.....	25
รูปที่ 3.6	พื้นผิวการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม	25
รูปที่ 3.7	ลักษณะรังสีที่กระทำต่อวัตถุเทา.....	26
รูปที่ 3.8	ความต้านทานของการแผ่รังสีความร้อนสุทธิระหว่างวัตถุเทา 2 พื้นผิวใด ๆ	28
รูปที่ 3.9	ความต้านทานของการแผ่รังสีความร้อนสุทธิของพื้นผิวปิดล้อม N พื้นผิว.....	29
รูปที่ 3.10	การนำความร้อนผ่านพื้นผิวความยาว L	30
รูปที่ 3.11	ความต้านทานการพาความร้อน.....	31
รูปที่ 3.12	ความต้านทานการแผ่รังสีความร้อน.....	31
รูปที่ 3.13	ความต้านทานความร้อนที่เกิดจากความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา.....	32
รูปที่ 3.14	ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน	33
รูปที่ 3.15	การนำความร้อน 1 มิติ ความยาว L	35
รูปที่ 3.16	ปริมาตรควบคุมบริเวณรอบจุด m, n	36
รูปที่ 4.1	พื้นผิวการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม	39
รูปที่ 4.2	เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา.....	40
รูปที่ 4.3	ความร้อนสุทธิของพื้นผิวแท่งเหล็ก	41
รูปที่ 4.4	ความร้อนสุทธิของจุดที่พิจารณา.....	41
รูปที่ 4.5	การประมาณค่าเชิงเส้นหาค่าอุณหภูมิของพื้นผิวแท่งเหล็ก.....	42
รูปที่ 4.6	ปัญหาการกระจายตัวของอุณหภูมิ.....	43
รูปที่ 4.7	สมดุลพลังงานจุดที่ 1	44
รูปที่ 4.8	สมดุลพลังงานจุดที่ 2	45
รูปที่ 4.9	สมดุลพลังงานจุดที่ 3.....	46
รูปที่ 4.10	สมดุลพลังงานจุดที่ 4.....	47
รูปที่ 4.11	สมดุลพลังงานจุดที่ 5.....	48

รูปที่ 4.12 สมดุลพลังงานจุดที่ 6.....	49
รูปที่ 4.13 สมดุลพลังงานจุดที่ 7.....	50
รูปที่ 4.14 สมดุลพลังงานจุดที่ 8.....	50
รูปที่ 4.15 สมดุลพลังงานจุดที่ 9.....	51
รูปที่ 4.16 ผังการคำนวณแบบจำลอง (block diagram) การแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิด ล้อม.....	52
รูปที่ 4.17 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตา.....	53
รูปที่ 4.18 ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของผนังเตา.....	53
รูปที่ 4.19 ผังการคำนวณแบบจำลอง (block diagram) การถ่ายเทความร้อนผนังเตา.....	54
รูปที่ 4.20 ผังการคำนวณแบบจำลอง (block diagram) การถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็ก.....	55
รูปที่ 4.21 ผังการคำนวณแบบจำลอง (block diagram) การถ่ายเทความร้อนของทั้งระบบ.....	58
รูปที่ 5.1 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและเปลวไฟ.....	59
รูปที่ 5.2 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและผนังเตาด้านข้าง.....	60
รูปที่ 5.3 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและผนังเตาด้านบน.....	61
รูปที่ 5.4 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและพื้นผิวสมมาตร.....	62
รูปที่ 5.5 ปัญหาการนำความร้อนแบบ 2 มิติ.....	63
รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิของผลเฉลยแม่นยำตรง.....	64
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการคำนวณของผลเฉลยแม่นยำตรงและระเบียบวิธีเชิงเลขที่ $y = 0.75$	64
รูปที่ 5.8 ปัญหาการนำความร้อนแบบสมมาตรตามแกน x	65
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการคำนวณแบบสมมาตรของผลเฉลยแม่นยำตรงและระเบียบวิธีเชิงเลขที่ $y = 0.8$	66
รูปที่ 5.10 อุณหภูมิในแท่งเหล็กของแต่ละความสูงตามแนวยาวของแท่งเหล็ก.....	68
รูปที่ 5.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก.....	68
รูปที่ 5.12 สมดุลความร้อนของแท่งเหล็ก.....	70

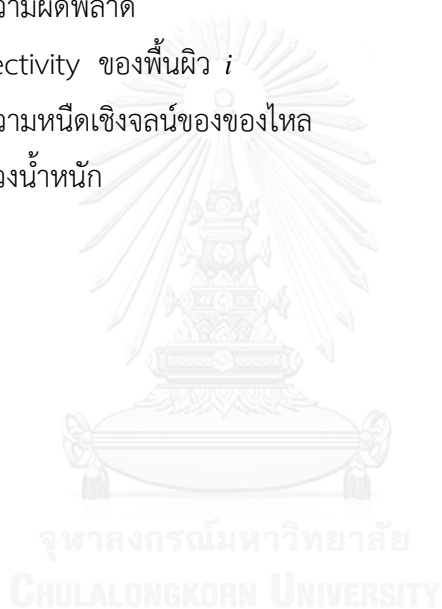
รูปที่ 5.13	เปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับผลการคำนวณ.....	71
รูปที่ 5.14	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนที่ความหนาฉนวนผนังเตาต่าง ๆ	73
รูปที่ 5.15	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กที่ความหนาฉนวนผนังเตาต่าง ๆ.....	73
รูปที่ 5.16	ผลของอุณหภูมิที่พิจารณาต่อความหนาฉนวนผนังเตา	75
รูปที่ 5.17	ผลของการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาต่อความหนาฉนวนผนังเตา.....	76
รูปที่ 5.18	ผลของการถ่ายเทความร้อนต่อความหนาฉนวนผนังเตา.....	76
รูปที่ 5.19	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนที่อุณหภูมิเปลวไฟต่าง ๆ	78
รูปที่ 5.20	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กที่อุณหภูมิเปลวไฟต่าง ๆ.....	79
รูปที่ 5.21	ผลของอุณหภูมิที่พิจารณาต่ออุณหภูมิเปลวไฟ.....	80
รูปที่ 5.22	ผลของการถ่ายเทความร้อนต่ออุณหภูมิเปลวไฟ.....	81
รูปที่ 5.23	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนที่อุณหภูมิพื้นเตาต่าง ๆ.....	83
รูปที่ 5.24	การกระจายตัวของอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กที่อุณหภูมิพื้นเตาต่าง ๆ	83
รูปที่ 5.25	ผลของอุณหภูมิที่พิจารณาต่ออุณหภูมิพื้นเตา	84
รูปที่ 5.26	ผลของการถ่ายเทความร้อนต่ออุณหภูมิพื้นเตา	86

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
A	พื้นที่ตัวกลางของการถ่ายความร้อน	m^2
A_i	พื้นที่ของพื้นผิว i	m^2
A_s	พื้นที่การถ่ายเทความร้อน	m^2
$E_{b,i}$	การปลดปล่อยพลังงานของวัตถุดำของพื้นผิว i	W/m^2
$F_{1 \rightarrow 2}$	ตัวประกอบมุมมองเห็นจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2	-
$F_{2 \rightarrow 1}$	ตัวประกอบมุมมองเห็นจากพื้นผิว A_2 ไปยังพื้นผิว A_1	-
$F_{5 \rightarrow 1}$	ตัวประกอบมุมมองเห็นจากพื้นผิวแท่งเหล็กไปยังพื้นผิวเปลวไฟ	-
$F_{5 \rightarrow 2}$	ตัวประกอบมุมมองเห็นจากพื้นผิวแท่งเหล็กไปยังพื้นผิวผนังเตาด้านข้าง	-
$F_{5 \rightarrow 3}$	ตัวประกอบมุมมองเห็นจากพื้นผิวแท่งเหล็กไปยังพื้นผิวผนังเตาด้านบน	-
$F_{5 \rightarrow 4}$	ตัวประกอบมุมมองเห็นจากพื้นผิวแท่งเหล็กไปยังพื้นผิวสมมาตร	-
$F_{i \rightarrow j}$	ตัวประกอบมุมมองเห็นจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j	-
g	ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง	m/s^2
G_i	การแผ่รังสีลงบนพื้นผิว i	W/m^2
Gr_L	Grashof number	-
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน	$W/m^2 \cdot K$
h_b	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่พื้นเตา	$W/m^2 \cdot K$
h_{conv}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน	$W/m^2 \cdot K$
h_{rad}	สัมประสิทธิ์การถ่ายความร้อนแบบแผ่รังสี	$W/m^2 \cdot K$
I_{elec}	กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทาน	A
J_i	Radiosity ของพื้นผิว i	W/m^2
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	$W/m \cdot K$
L	ความยาวของบริเวณการถ่ายเทความร้อน	m
L_c	ขนาดความยาวของบริเวณลักษณะพิเศษ	m
Nu	Nusselt number	-
Pr	Prandtl number	-
$q_{billet \rightarrow flame}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแท่งเหล็กไปยังเปลวไฟ	W
$q_{billet \rightarrow wall}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแท่งเหล็กไปผนังเตาด้านข้าง	W

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$Q_{billet \rightarrow ceiling}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแท่งเหล็กไปเพดานเตา	W
$Q_{billet \rightarrow reradiating}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากแท่งเหล็กไปพื้นผิวสมมาตร	W
$Q_{net, billet}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของแท่งเหล็ก	W
$q_{rad, enclosure}$	อัตราการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม	W
\dot{Q}_{cond}	อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน	W
$\dot{Q}_{cond, right}$	การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านขวา	W
$\dot{Q}_{cond, left}$	การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านซ้าย	W
$\dot{Q}_{cond, top}$	การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านบน	W
$\dot{Q}_{cond, bottom}$	การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านล่าง	W
\dot{Q}_{conv}	อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนด้านนอกเตา	W
$\dot{Q}_{emit, max}$	อัตราการปลดปล่อยรังสีความร้อนสูงสุด	W
\dot{Q}_i	คือ ความร้อนสุทธิของพื้นผิว i	W
$\dot{Q}_{i \rightarrow j}$	ความร้อนสุทธิจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j	W
\dot{Q}_{total}	การถ่ายเทความร้อนรวม	W
Ra_L	Rayleigh number	-
R_{cond}	ความต้านทานการนำความร้อน	K/W
R_{conv}	ความต้านทานแบบการพาความร้อน	K/W
R_{elec}	ความต้านทานไฟฟ้า	Ω
R_{equi}	ความต้านทานการพาขนานกับการแผ่รังสีความร้อน	K/W
R_i	ความต้านทานของพื้นผิว i	-
$R_{i \rightarrow j}$	ความต้านทานของพื้นว่างระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิว j	-
R_{rad}	ความต้านทานการแผ่รังสีความร้อน	K/W
R_{total}	ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนรวม	K/W
T_{bottom}	อุณหภูมิพื้นเตา	K
T_{flame}	อุณหภูมิเปลวไฟ	K
T_{out}	อุณหภูมิผนังด้านนอกเตา	K
T_s	อุณหภูมิที่พื้นผิว	K
T_{wall}	อุณหภูมิผนังเตาด้านใน	K
T_{∞}	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมด้านนอกเตา	K

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
ΔV_{elec}	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	V
Δx	ความยาวของบริเวณการถ่ายเทความร้อนแกน x	m
Δy	ความยาวของบริเวณการถ่ายเทความร้อนแกน y	m
σ	ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann	$W/m^2 \cdot K^4$
β	สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตร	K^{-1}
ε	ค่า emissivity ของพื้นผิว	-
ε_i	emissivity ของพื้นผิว i	-
ε_{tol}	ค่าความผิดพลาด	-
ρ_i	reflectivity ของพื้นผิว i	-
ν	ค่าความหนืดเชิงจลน์ของของไหล	$kg/m \cdot s$
ω	ค่าถ่วงน้ำหนัก	-



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้ามีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน (infrastructure) ในประเทศ ซึ่งเหล็กเป็นวัตถุดิบที่จำเป็นในอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมการผลิตยานยนต์ อุตสาหกรรมการก่อสร้าง และ อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล่าวนั้นมีการใช้พลังงานที่สูง ในปี 2008 อุตสาหกรรมเหล็กในประเทศจีนเป็นแกนหลักของเศรษฐกิจซึ่งได้ใช้พลังงานเพียง อุตสาหกรรมเดียวสูงถึง 17% ของการใช้พลังงานอุตสาหกรรมอื่นทั้งหมดในประเทศ [1] จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ เพิ่มขึ้น จึงทำให้ความต้องการการผลิตเหล็กเพื่อมาเป็น วัตถุดิบนั้นเพิ่มขึ้นด้วย แต่ในปัจจุบันราคาต้นทุนของน้ำมันเชื้อเพลิงสูงขึ้น และราคามีความผันผวน ในตลาดโลก อีกทั้งการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงส่งผลกระทบต่อระบบสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทำให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้น (global warming) ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้การศึกษาทางด้านการอนุรักษ์พลังงานไม่เพียงช่วยลดต้นทุนการผลิต แต่ยังส่งผลทางด้านประสิทธิภาพของ อุตสาหกรรมเหล็กอีกด้วย

ในปี 1994 ได้มีการศึกษาการใช้พลังงานสำหรับแต่ละกระบวนการของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศญี่ปุ่น พบว่าจำนวนการใช้พลังงานในกระบวนการหลอมเหล็ก (blast furnace) มากที่สุดอยู่ที่ 44.1% ของการใช้พลังงานทั้งหมด และจำนวนการใช้พลังงานในกระบวนการรีด (rolling and piping) รองลงมาอยู่ที่ 17.3% ของการใช้พลังงานทั้งหมด [2] จะเห็นได้ว่าในกระบวนการเผาเหล็ก (reheating furnace) เป็นกระบวนการให้ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรงได้แก่น้ำมันเตา และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น แก่เหล็กก่อนที่จะนำไปแปรรูปโดยการรีด ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการรีดนั้นอยู่ในช่วง 1,100 - 1,250 °C โดยเตาเผาเหล็ก (reheating furnace) ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ คือ preheating zone , heating zone และ soaking zone ส่วนแรกที่เหล็กเคลื่อนที่เข้ามา คือ preheating zone ส่วนนี้จะเป็นการอุ่นขึ้นเหล็กให้ร้อนโดยไอเสียจากการเผาไหม้ ส่วนที่สองขึ้นเหล็กจะเคลื่อนที่ต่อมาจาก preheating zone คือ heating zone ส่วนนี้จะเป็นการเผาเหล็กให้มีความร้อนจนอุณหภูมิสูง และส่วนที่สามเหล็กจะเคลื่อนที่ต่อมาจากส่วน heating zone คือ soaking zone ส่วนนี้จะเป็นการให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิคงที่ตลอดทั้งชิ้นเหล็ก ซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ขึ้นเหล็กจะถูกดันนำไปรีด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ เนื่องจากอุณหภูมิขึ้นเหล็กต้องคงที่ (uniform

temperature) หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิ (temperature distribution) อย่างสม่ำเสมอ เพราะจะส่งผลต่อคุณภาพและเกิดความเสียหายต่อการแปรรูป

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในชิ้นเหล็ก อันเป็นผลมาจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวภายในเตาเผาเหล็กโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด
2. เพื่อศึกษาปัจจัยการถ่ายเทความร้อนที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในชิ้นเหล็ก โดยการเปลี่ยนพารามิเตอร์จากแบบจำลองเชิงตัวเลข

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. สร้างแบบจำลองจากการแลกเปลี่ยนการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างแท่งเหล็ก (billet) เปลวไฟ (combustion flame) และผนังเตา (wall) ภายในเตาเผาเหล็กแบบ pusher ขนาด 12 ตัน ภายใต้สภาวะคงตัว
2. ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขด้วยผลต่างสืบเนื่องแบบ 2 มิติ (2-D finite difference method) ภายใต้สภาวะคงตัว เพื่อทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก และเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัดโรงงาน
3. ศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กที่ศึกษา
2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ศึกษาสามารถทำนายผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กภายในเตาเผาเหล็ก
3. ทราบถึงปัจจัยการถ่ายเทความร้อนที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก ก่อนที่จะถูกนำไปแปรรูป

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลชนิดและการทำงานของเตาเผาเหล็กในประเทศไทย
2. ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก
3. ศึกษาการคำนวณระเบียบวิธีเชิงเลขโดยวิธีผลต่างสี่บเนื่องในการจำลองการถ่ายเทความร้อนในเตาเผาเหล็ก
4. ประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กภายในเตาเผาเหล็ก
5. เปรียบเทียบผลจากการสร้างแบบจำลองกับผลจากการตรวจวัดโรงงาน
6. วิเคราะห์ ปรับปรุง และแก้ไขตัวแปร (parameter) สำคัญที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก และสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์และเสนอผลงานวิจัย

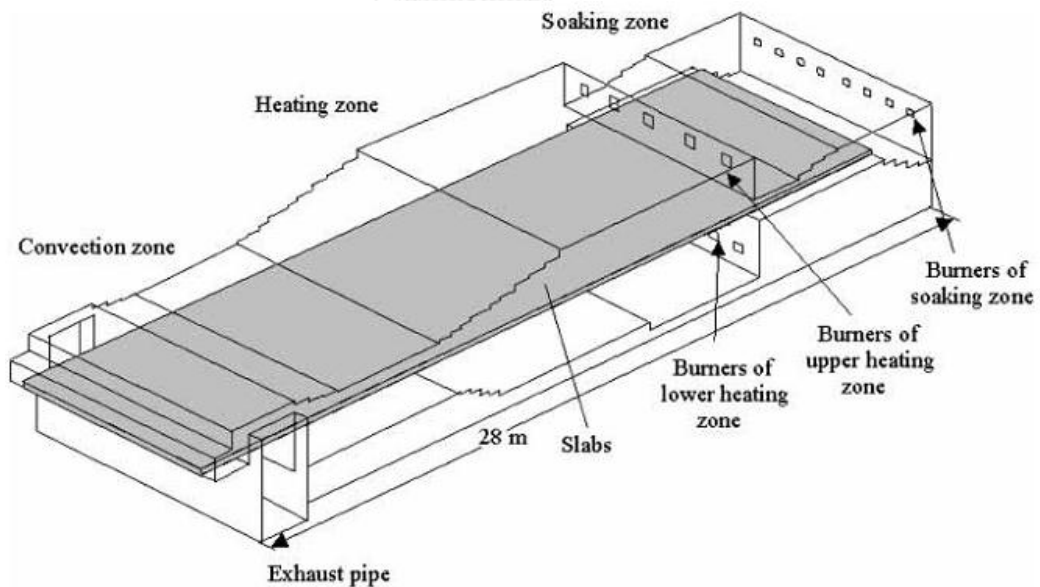


บทที่ 2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระเบียบวิธีเชิงเลข (numerical method) ของการกระจายตัวอุณหภูมิ (temperature distribution) ภายในเตาเผาเหล็ก (reheating furnace) ซึ่งจะต้องทราบเกี่ยวกับแบบจำลองซึ่งอธิบายถึงกลไกที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเหล็กเสียก่อน เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลองของงานวิจัยนี้ ดังนั้นจึงแบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็ก

2.1 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก

Maki , Osterman และ Luomala (2002) [3] ได้ศึกษาระเบียบวิธีเชิงเลขด้วยใช้ไฟไนต์วอลุ่มสามมิติ (3D finite volume method) ของเตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type) แสดงดังรูปที่ 2.1 ใช้ coke even gas เป็นเชื้อเพลิง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PHEONICS



รูปที่ 2.1 ลักษณะเตาเผาเหล็กแบบผลักดัน [3]

แบบจำลองได้คำนวณการไหลของก๊าซ และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็ก สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ใช้ eddy-break-up (EBU) และ renormalization group (RNG)

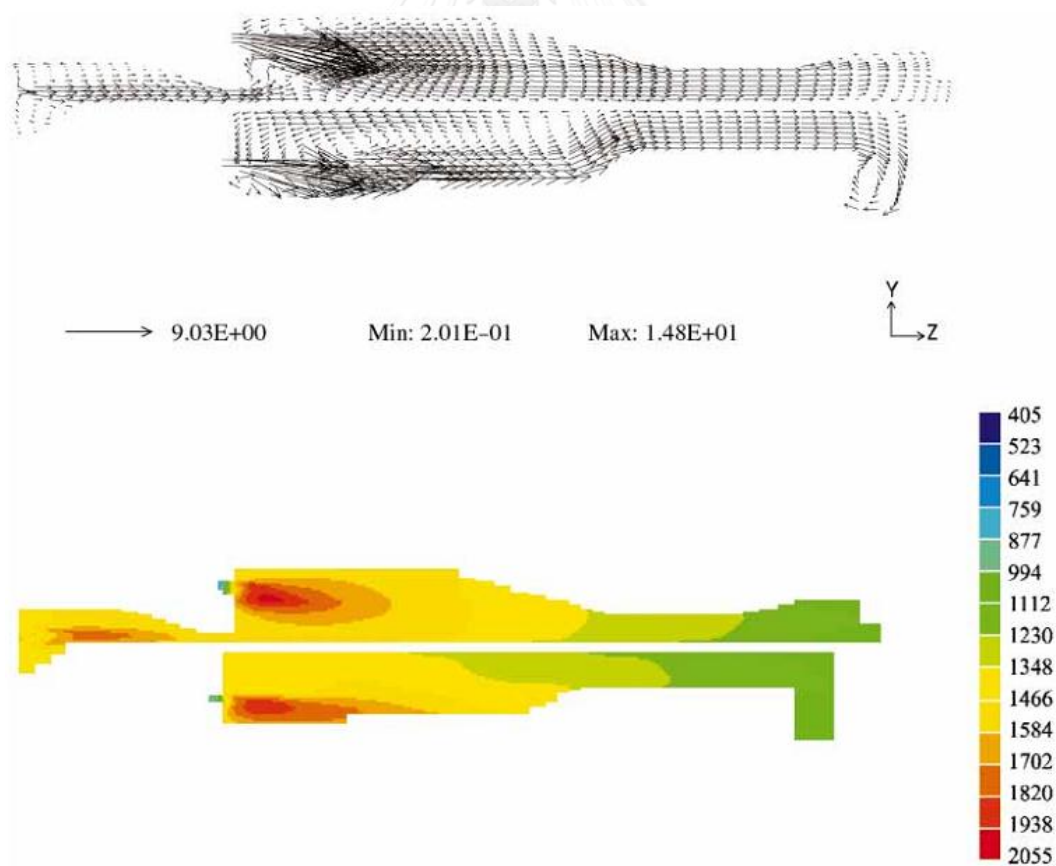
สำหรับการไหลปั่นป่วน (turbulence) และแสดงค่าของหัวเผาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาเผาเหล็กดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าของหัวเผาที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของเตาเผาเหล็ก [3]

Burner position	Number	Diameter (mm)	Coke gas (Nm ³ /h)	Air (Nm ³ /h)	Velocity (m/s) v	w
Soaking zone	8	380	900	3800	4.3	0
Upper heating zone	6	380	2200	11,200	10.3	2.0
Lower heating zone	7	300	2100	10,800	8.6	0

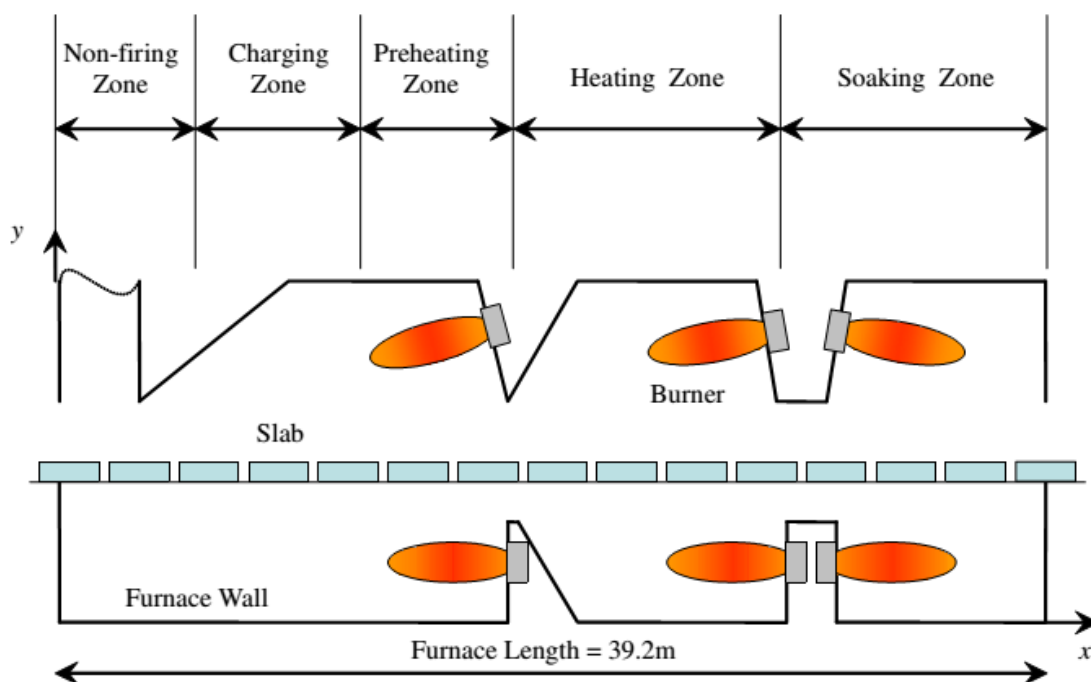
w, z-directional velocity; v, y-directional velocity.

จากการคำนวณแบบจำลองพบว่าความเร็วในการไหลของก๊าซภายในเตาด้วยความเร็วต่ำเนื่องจากปฏิกิริยา exothermic ของปฏิกิริยาการเผาไหม้ปลดปล่อยพลังงานให้ก๊าซภายในเตา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบทบาทของการแผ่รังสีความร้อน (radiation heat transfer) ภายในเตามีผลสำคัญมากกว่าการพาความร้อน (convection heat transfer) และจากลักษณะที่ซับซ้อนของเตาทำให้เกิดการหมุนวนของก๊าซขนาดใหญ่บริเวณด้านล่างในส่วนของการ heating zone ดังแสดงรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความเร็วการไหลของก๊าซ (บน) และการกระจายตัวของอุณหภูมิในเตาเผาเหล็ก (ล่าง) [3]

Kim (2007) [4] ศึกษาแบบจำลองทำนายผลของการแผ่รังสีความร้อนและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน (walking beam furnace) แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยเหล็กแท่งแบน (slab) มีขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงคือ 1.16 , 0.23 และ 0.2 เมตรตามลำดับ จำนวนแท่งเหล็กทั้งหมด 28 แท่ง ตารางที่ 2.2 แสดงอุณหภูมิของผนังเตาและอุณหภูมิก๊าซภายในเตาเผาเหล็ก โดยอุณหภูมิของแท่งเหล็กก่อนเข้าเตาเผาเหล็กอยู่ที่ $21.2\text{ }^{\circ}\text{C}$

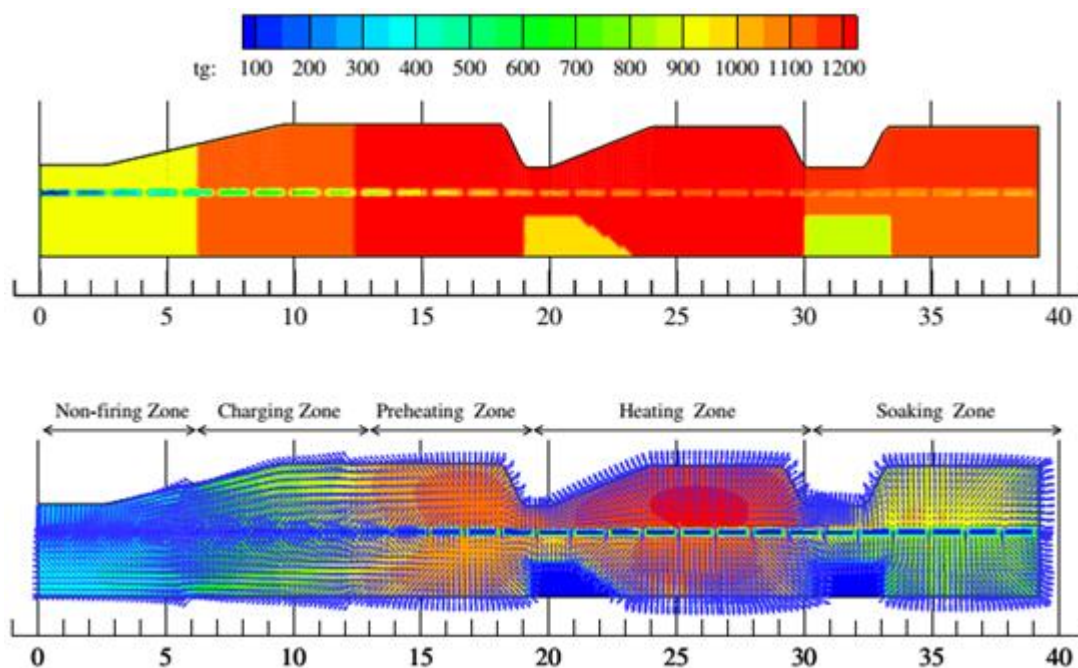


รูปที่ 2.3 ลักษณะเตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน [4]

ตารางที่ 2.2 อุณหภูมิของผนังเตาและอุณหภูมิก๊าซภายในเตาเผาเหล็ก [4]

Zone	T_{w_upper}	T_{g_upper}	T_{g_lower}	T_{w_lower}
Non-firing	750	950	950	700
Charging	950	1150	1150	900
Preheating	1040	1240	1240	990
Heating	1050	1250	1230	980
Soaking	960	1160	1120	970

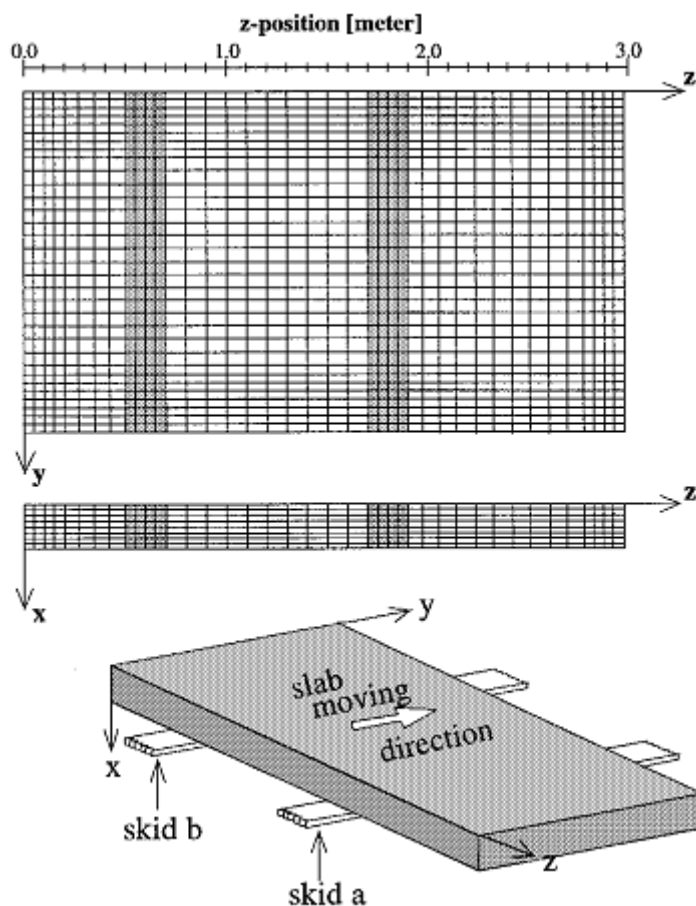
จากการคำนวณแบบจำลองพบว่าแท่งเหล็กที่เข้าเตาในส่วน non-firing ได้รับการแผ่รังสีความร้อนสูงเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างก๊าซร้อนและผนังเตากับแท่งเหล็ก โดยแท่งเหล็กจะได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นสูงสุดในส่วน heating และแท่งเหล็กสามารถแผ่รังสีความร้อนออกตัวเองได้เช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยการไหลของการแผ่รังสีความร้อน (radiative heat flux) แทนด้วยเวกเตอร์ (vector) แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การกระจายตัวของอุณหภูมิ (บน) และการแผ่รังสีความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก (ล่าง) [4]

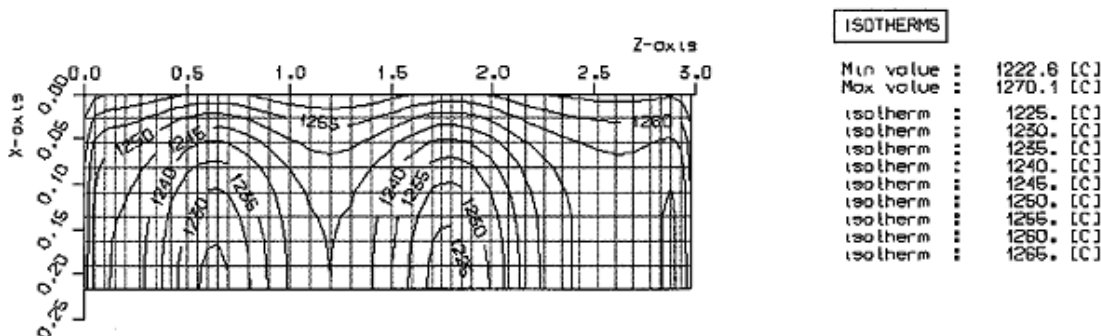
2.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็ก

Lindholm และ Leden (1999) [5] ให้ความสนใจเกี่ยวกับแท่งเหล็กที่ถูกดันออกไปสู่กระบวนการรีด เนื่องจากว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอในแท่งเหล็กเป็นสาเหตุความหนาของผลิตภัณฑ์ที่รีดไม่เป็นไปตามความต้องการในระหว่างกระบวนการรีด ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้าย จึงสร้างแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงเลขไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ (3D finite element method) ขึ้นกับเวลา (transient) โดยพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซ การแผ่รังสีความร้อนของผนังเตาเผา และการแผ่รังสีความร้อนคานเลื่อนแท่งเหล็ก (skid pipe) ซึ่งอยู่กับที่ เปรียบเทียบผลการทดลองกับเตาเผาแบบปลักตัน แท่งเหล็กแบนขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง คือ 1.695 , 0.218 และ 2.98 เมตรตามลำดับ อุณหภูมิเริ่มต้น $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ใช้ coke even gas เป็นเชื้อเพลิง ความกว้างของคานเลื่อนแท่งเหล็กขนาด 0.2 เมตร ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ได้แก่ $20\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ และ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (emissivity) ของผนังเตาและแท่งเหล็กแบน คือ 0.9 และ 0.8 ตามลำดับ คานเลื่อนแท่งเหล็กและขนาด (mesh) ที่ใช้ในการคำนวณระเบียบวิธีเชิงเลขแสดงดังรูปที่ 2.5

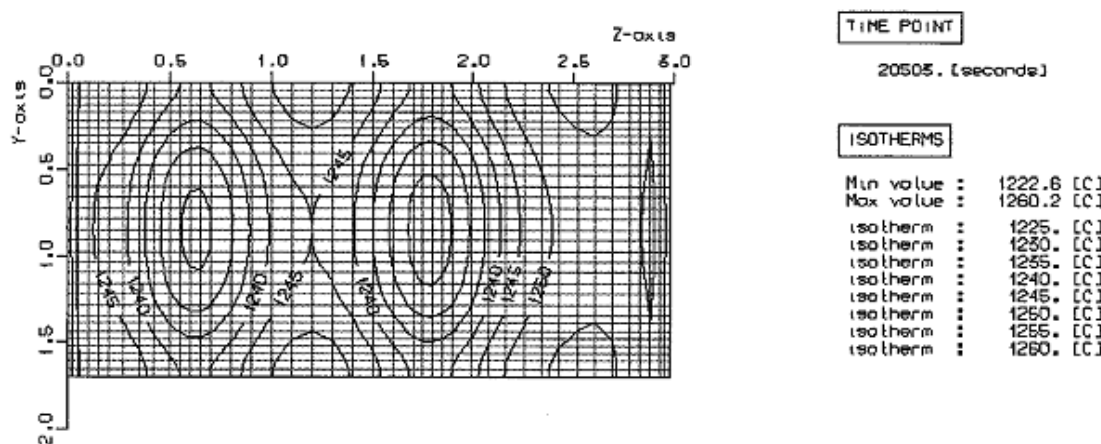


รูปที่ 2.5 ขนาดที่ใช้ในการคำนวณระเบียบวิธีเชิงเลข (บน) และคานเลื่อนแท่งเหล็ก (ล่าง) [5]

จากแบบจำลองพบว่าเป็นที่ชัดเจนว่าคานเลื่อนส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในแท่งเหล็ก การกระจายของอุณหภูมิในแท่งเหล็กไม่เพียงส่งผลกระทบต่อทางด้านล่างของแท่งเหล็ก แต่ส่งผลกระทบต่อตลอดทั้งความหนาของแท่งเหล็กด้วย อุณหภูมิด้านล่างของแท่งเหล็กอยู่ในช่วง 1,223 ถึง 1,260 °C อุณหภูมิต่ำสุดอยู่บริเวณเหนือคานเลื่อนแท่งเหล็ก โดยความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวบนกับผิวล่างเหนือคานเลื่อนแท่งเหล็กประมาณ 36 °C แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กระนาบ xz ที่ $y=0.848$ เมตร และระนาบ yz ที่ $x=0.218$ เมตร ดังรูปที่ 2.6 และรูปที่ 2.7 ตามลำดับ ซึ่งการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กสมเหตุสมผลและยอมรับได้กับการทดลอง



รูปที่ 2.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กกระนาบ xz ที่ $y=0.848$ เมตร [5]

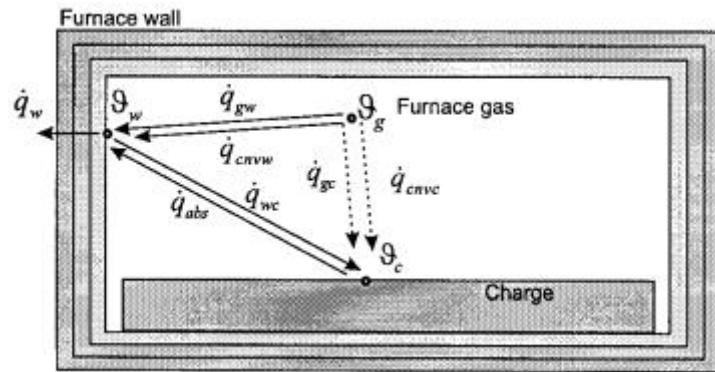


รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กกระนาบ yz ที่ $x=0.218$ เมตร [5]

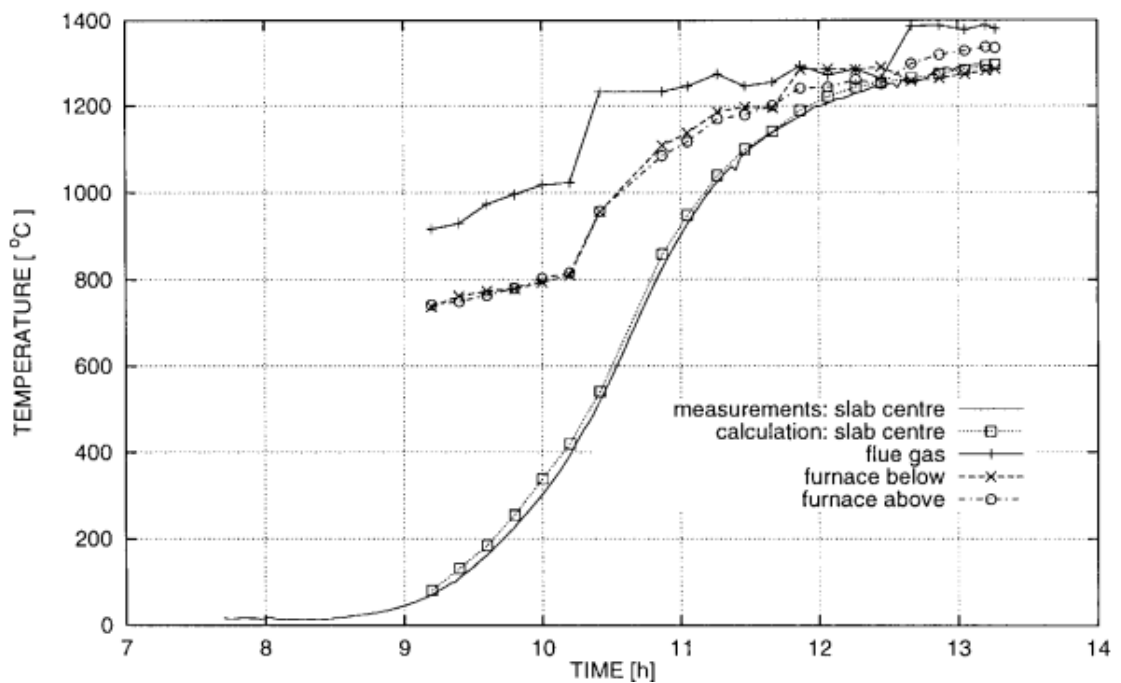
Kolenko , Glogovac และ Jaklic (1999) [6] ศึกษาการแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchange) ระหว่างผนังเตา ก๊าซร้อน และแท่งเหล็ก ด้วยแบบจำลองอุณหภูมิ 3 ค่า คือ อุณหภูมิผนังเตา อุณหภูมิก๊าซร้อน และอุณหภูมิผิวแท่งเหล็กด้วยระเบียบวิธีเชิงเลขผลต่างสี่เหลี่ยม แสดงดังรูปที่ 2.8 จากสมดุลทางความร้อนที่ผนังเตาจะเห็นว่าผนังเตาจะได้รับความร้อนจากก๊าซร้อน จะแผ่รังสีความร้อน (\dot{q}_{gw}) และพาความร้อนไปยังผนังเตา (\dot{q}_{cnw}) รวมทั้งการดูดซับความร้อนภายในเตา (\dot{q}_{abs}) ซึ่งผนังเตาจะสูญเสียความร้อนจากการนำความร้อนในผนังเตา (\dot{q}_w) และการแผ่รังสีความร้อนมายังแท่งเหล็ก (\dot{q}_{wc}) หรือสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\dot{q}_w + \dot{q}_{wc} - \dot{q}_{abs} - \dot{q}_{gw} - \dot{q}_{cnw} = 0 \quad (2.1)$$

โดยอุณหภูมิผนังเตาสามารถวัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) อุณหภูมิผิวแท่งเหล็กสามารถคำนวณเป็นขั้นเป็นตอนได้จากระเบียบวิธีเชิงเลขผลต่างสี่เหลี่ยม แต่อุณหภูมิก๊าซร้อนเป็นตัวไม่ทราบค่า (unknown) จากการคำนวณแบบจำลองพบว่าอุณหภูมิตรงกึ่งกลางแท่งเหล็กแบนมีค่าใกล้เคียงกับการวัดค่าจริงมาก แสดงดังรูปที่ 2.9

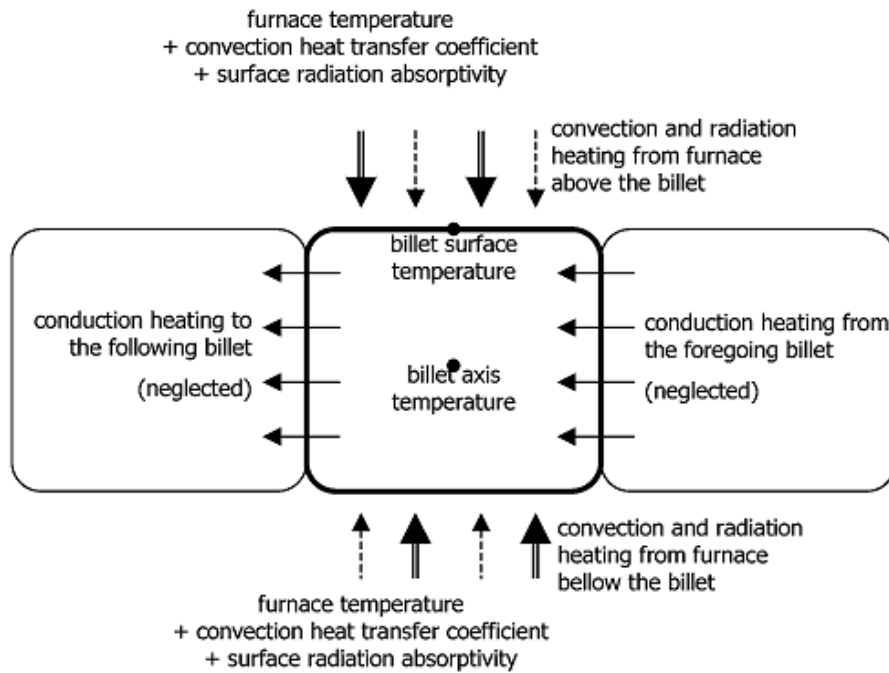


รูปที่ 2.8 การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังเตา ก๊าซร้อน และแท่งเหล็ก [6]

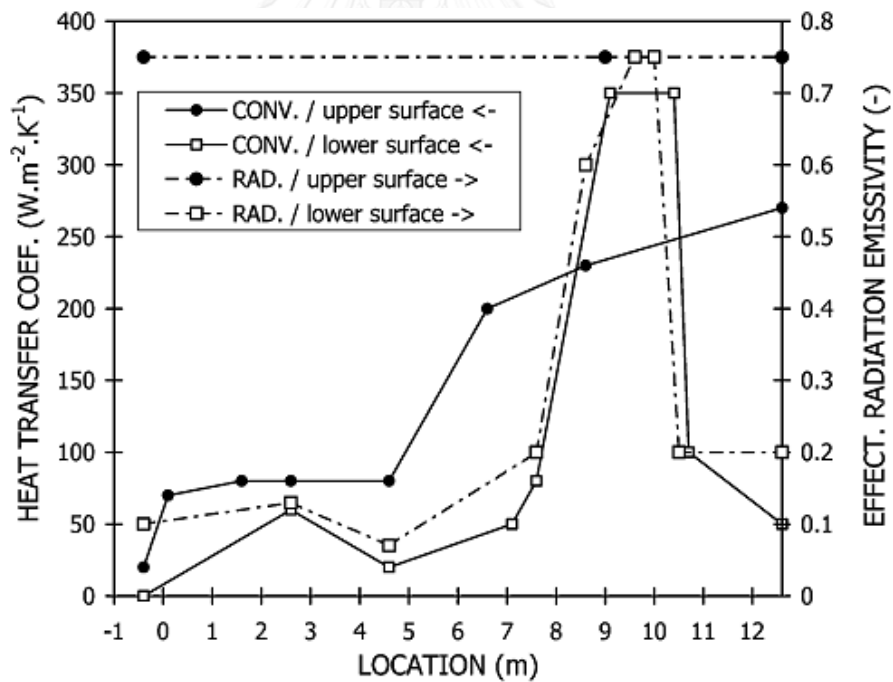


รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กแบบกับค่าจากการวัด [6]

Honner , Vesely และ Svantner (2003) [7] ศึกษาการวัดค่าอุณหภูมิภายในแท่งเหล็ก อุณหภูมิภายในเตาโดยอุปกรณ์วัดจะเคลื่อนที่ไปกับแท่งเหล็กภายในเตาเผาเหล็กด้วย โดยทำการทดลองกับเตาเหล็กแบบผลักตัน ข้อดีเนื่องจากสายเทอร์โมคัปเปิลสั้นจึงทำให้ค่าที่ได้มีความเสถียรและลดการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่าวิธีอื่น โดยแท่งเหล็กยาว (billet) ที่ทดลองมีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูง คือ 0.1 , 2.5 และ 0.1 เมตรตามลำดับ และสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศภายในเตากับแท่งเหล็กเพื่อคำนวณอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กโดยนำค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดเป็นเงื่อนไขขอบเขต แสดงดังรูปที่ 2.10

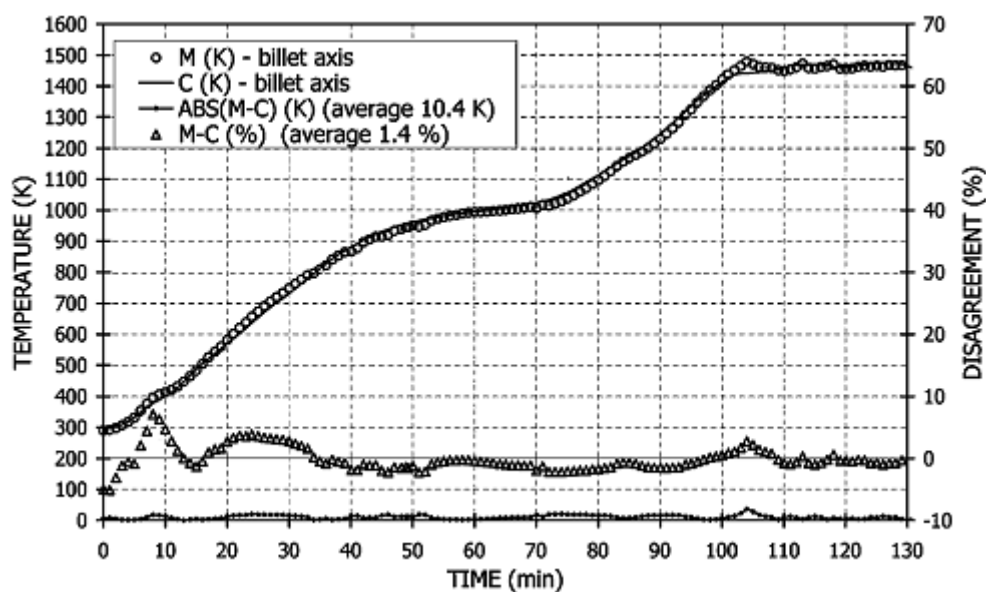


รูปที่ 2.10 การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศภายในเตากับแท่งเหล็ก [7]



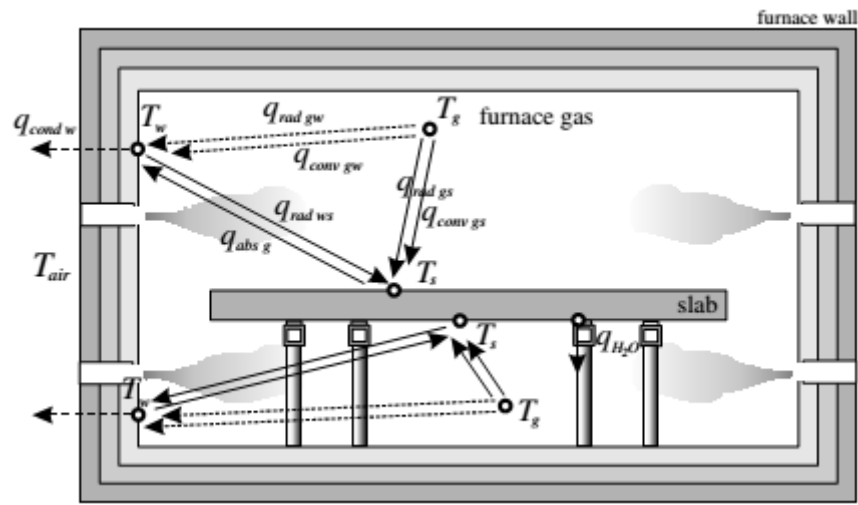
รูปที่ 2.11 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการแผ่รังสี [7]

จากการคำนวณพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผิวบนและผิวล่างของแท่งเหล็กที่ค่าขึ้นกับอุณหภูมิในแต่ละส่วนของเตาเผา แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยค่าดังกล่าวถูกนำไปใช้ในเงื่อนไขขอบเขตเพื่อคำนวณอุณหภูมิภายในแท่งเหล็ก รูปที่ 2.12 แสดงอุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางภายในแท่งเหล็ก โดย M คือ ค่าจากการวัด และ C คือ ค่าจากการคำนวณ

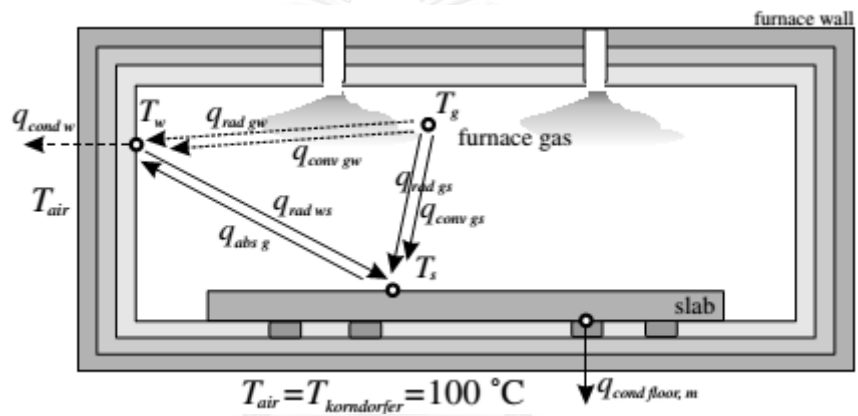


รูปที่ 2.12 อุณหภูมิบริเวณกึ่งกลางภายในแท่งเหล็ก [7]

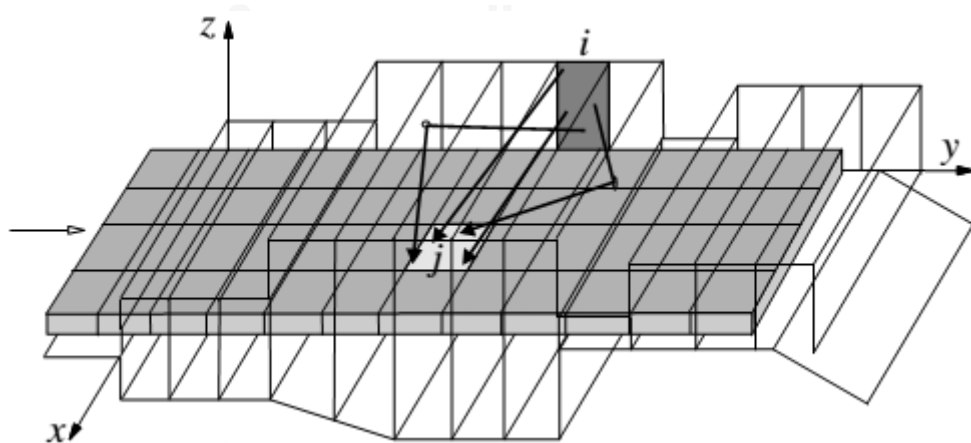
Jaklic , Vode และ Kolenko (2007) [8] ได้ศึกษาต่อจากงานวิจัยของ [6] ด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอุณหภูมิ 3 ฝิว ด้วยแบบจำลองอุณหภูมิ 3 ค่า การคำนวณหาตัวประกอบมุมมองเห็น (view factor) และการถ่ายเทความร้อนในแท่งเหล็กด้วยแบบจำลองระเบียบวิธีเชิงเลขสามมิติ โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังเตา ก๊าซร้อน และฝิวแท่งเหล็ก รวมถึงคำนวณในส่วนของ preheating และ heating นอกจากนี้แบบจำลองได้คำนึงการถ่ายเทความร้อนผ่านฝิวด้านล่างของแท่งเหล็กในส่วน soaking ซึ่งประกอบด้วยถ่ายเทความร้อนจาก 2 กลไกหลัก คือ การแผ่รังสีความร้อน และการนำความร้อนระหว่างผนังเตากับฝิวแท่งเหล็กด้านล่าง โดยพิจารณาจากพื้นฝิวเตามีความขรุขระและเกิดขึ้นของออกไซด์ (oxide scale) พบว่าการแผ่รังสีมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก สามารถแสดงสมดุลความร้อนได้ดังรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 เนื่องจากได้คำนึงถึงลักษณะการทำงานจริงของเตาเผาซึ่งเป็นสามมิติ จึงได้คำนวณการมองเห็นระหว่างผนังเตาด้านบน (ceiling) และผนังเตาด้านข้าง (side wall) กับแท่งเหล็ก โดยแบ่งเป็นพื้นฝิวเล็ก ๆ ตลอดทั้งฝิวเตาเผาแสดงดังรูปที่ 2.15 โดยสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผนังเตาและแท่งเหล็กแบน คือ 0.95 และ 0.8 ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 สมดุลความร้อนในส่วนของ preheating และ heating [8]

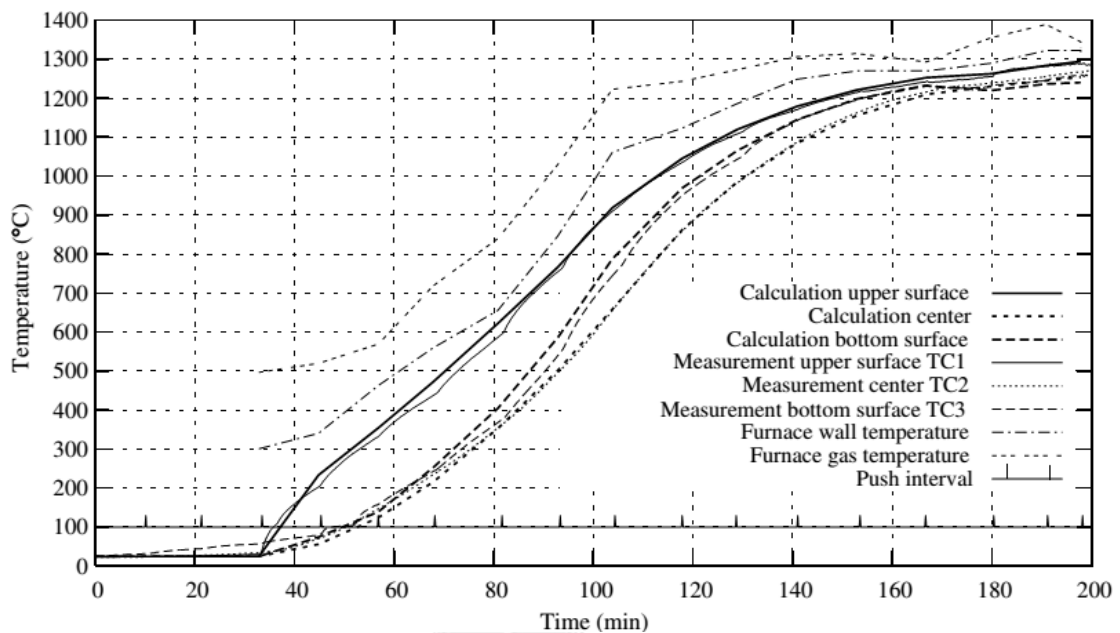


รูปที่ 2.14 สมดุลความร้อนในส่วนของ soaking [8]



รูปที่ 2.15 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างผนังเตาด้านบนและด้านข้างกับแท่งเหล็ก [8]

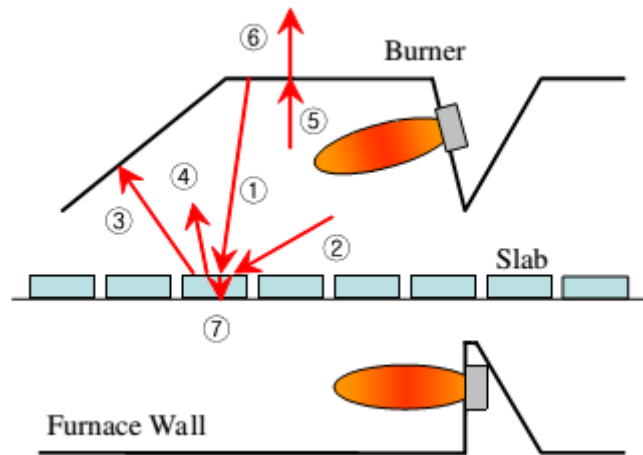
จากการศึกษาคำนวณการถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองพบว่า ผลจากการคำนวณอุณหภูมิของแท่งเหล็กแบนตลอดทั้งกระบวนการเผาเหล็กมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากวัดมาก และอุณหภูมิบริเวณด้านล่างของแท่งเหล็กในส่วน soaking มีค่าใกล้เคียงเป็นที่ยอมรับได้เช่นกัน สำหรับแบบจำลองการคำนวณอุณหภูมิที่พื้นผิวผนังเตาเผาเหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.16



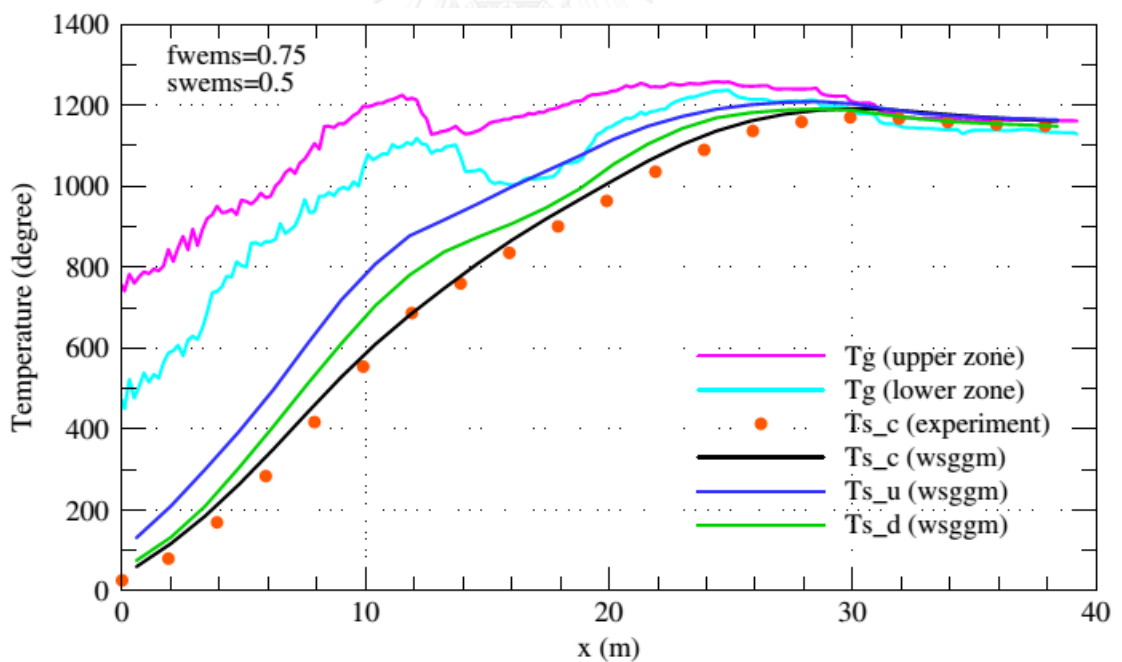
รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบอุณหภูมิจากการวัดกับการคำนวณ [8]

จากงานวิจัยของ [4] นอกจากพิจารณาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในเตาดังที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังได้พิจารณาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในแท่งเหล็กด้วย โดยพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น โดยที่เกิดการนำความร้อนภายในแท่งเหล็กเท่านั้น ซึ่งการนำความร้อนภายในแท่งเหล็กเป็นการคำนวณสองมิติขึ้นกับเวลาด้วยระเบียบวิธีเชิงเลขไฟไนต์เอลูเมนต์ รูปที่ 2.17 แสดงการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในเตากับแท่งเหล็ก หมายเลข 1 คือ การแผ่รังสีจากผนังเพดานเตาสู่แท่งเหล็ก หมายเลข 2 คือ การแผ่รังสีจากก๊าซสู่แท่งเหล็ก หมายเลข 3 คือ การแผ่รังสีจากแท่งเหล็กสู่ผนังเพดานเตา หมายเลข 4 คือ การแผ่รังสีจากแท่งเหล็กสู่ก๊าซ หมายเลข 5 คือ การแผ่รังสีความร้อนจากก๊าซสู่ผนังเพดานเตา หมายเลข 6 คือ การนำความร้อนจากผนังเพดานเตาสู่อากาศภายนอก และหมายเลข 7 คือ การนำความร้อนภายในแท่งเหล็ก ในการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กได้ใช้สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผนังเตา และของแท่งเหล็กคือ 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าแท่งเหล็กถูกให้ความร้อนมากขณะที่เคลื่อนที่ผ่านในส่วนของการ charging , preheating และ heating อุณหภูมิประมาณ 1,150 °C โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในส่วนของ heating สำหรับในส่วนของการ soaking อุณหภูมิมีค่าลดลงประมาณ

90 °C เมื่อเทียบในส่วนการเผาไหม้ก่อนหน้า อุณหภูมิแท่งเหล็กมีค่าลู่เข้ากับอุณหภูมิก๊าซ และแท่งเหล็กร้อนจะมีการแผ่รังสีบางส่วนออกไป จึงเป็นเหตุให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กต่ำกว่าเล็กน้อย รวมถึงความชันของอุณหภูมิ (temperature gradient) ภายในแท่งเหล็กมีค่าน้อย แสดงดังรูปที่ 2.18

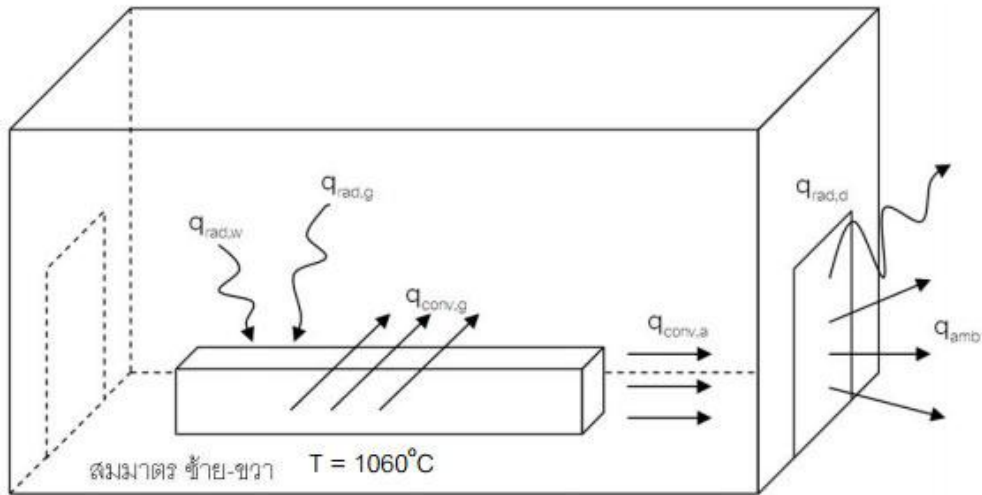


รูปที่ 2.17 การแลกเปลี่ยนความร้อนในระหว่างเผาเหล็ก [4]

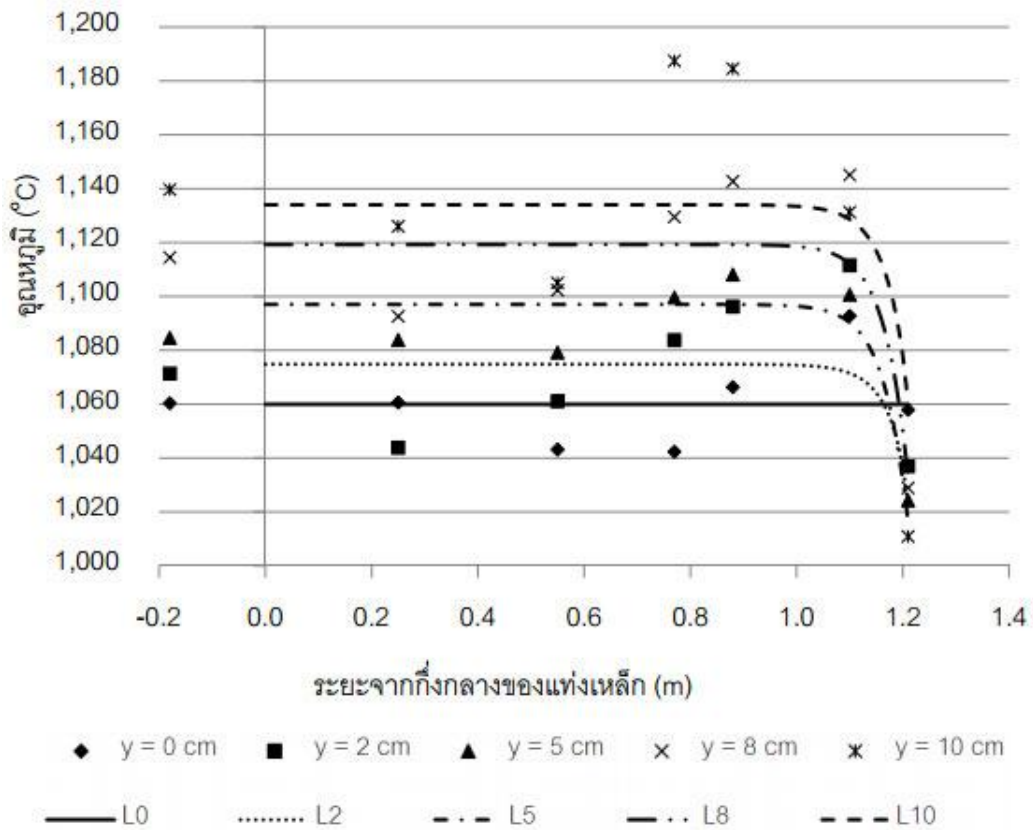


รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดกับผลการคำนวณ [4]

เอกรัชฎ์ สมเรียววงศ์กุล (2554) [9] คำนึงถึงผลจากการสูญเสียความร้อนที่ช่องเปิด บริเวณทางออกของเตาเผาเหล็กก่อนที่แท่งเหล็กจะถูกนำไปรีด ซึ่งได้สร้างแบบจำลองในการแจกแจง



รูปที่ 2.19 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน [9]



รูปที่ 2.20 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน [9]

อุณหภูมิในแท่งเหล็กบริเวณทางออกของเตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type furnace) โดยแท่งเหล็กแบน (billet) มีขนาดกว้าง สูง และยาว คือ 0.1 , 0.1 และ 1.21 เมตรตามลำดับ และใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขสองมิติด้วยผลต่างสี่เหลี่ยม (2-D finite difference method) ภายใต้สภาวะคงตัว โดยศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของก๊าซ และผนังเตา การพาความร้อน และการถ่ายเทความร้อนจากการเปิดและปิดประตูเตา แสดงดังรูปที่ 2.19 โดยสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผนังเตาและของแท่งเหล็ก คือ 0.8 และ 0.9 ตามลำดับ และกำหนดอุณหภูมิพื้นเตา อุณหภูมิผนังเตาและอุณหภูมิก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้คือ $1,060\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1,150\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $1,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงานมีความสอดคล้องกันแสดงดังรูปที่ 2.20 และพบว่าการสูญเสียความร้อนมากที่สุดบริเวณพื้นเตา ซึ่งมีผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิภายในแท่งเหล็ก



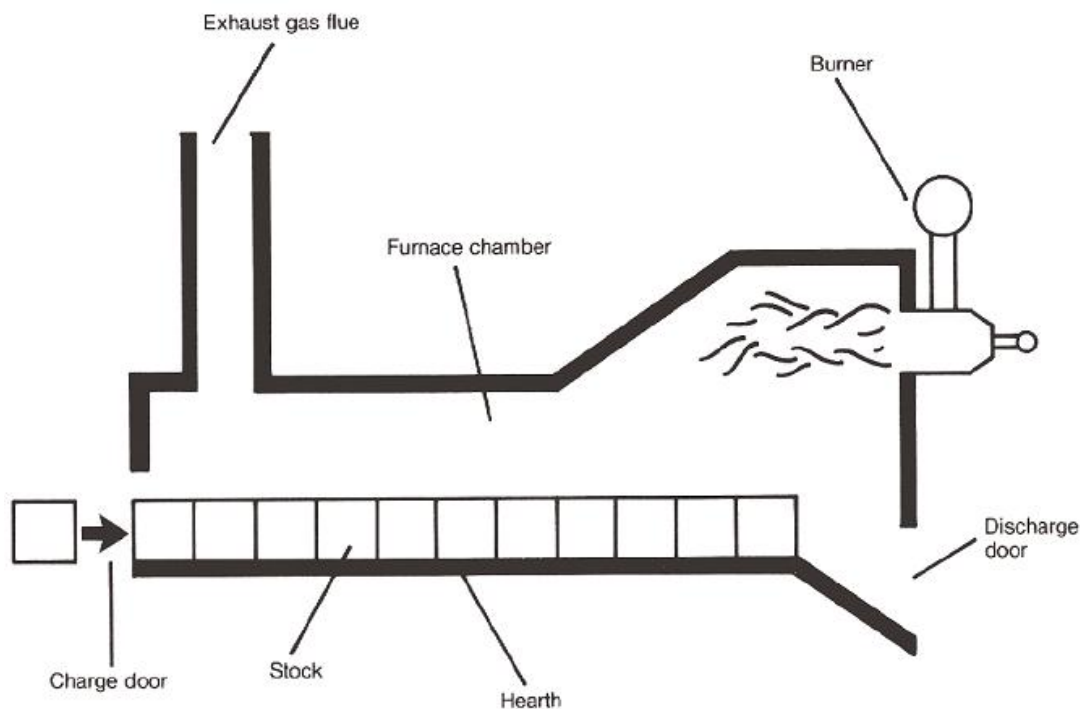
บทที่ 3

ทฤษฎี

3.1 เตาเผาเหล็ก (reheating furnace)

เตาเผาเหล็กถูกแบ่งออกอย่างกว้าง ๆ เป็น 2 ประเภท โดยขึ้นอยู่กับวิธีการให้กำเนิดความร้อน ได้แก่ เตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้และเตาเผาไฟฟ้า เตาเผาที่ใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้สามารถแบ่งแยกได้อีก เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง รูปแบบการในการลำเลียงวัสดุ รูปแบบการถ่ายเทความร้อน และรูปแบบการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น

เตาเผาเหล็กเป็นเตาที่ใช้เผาแท่งเหล็กที่ถูกนำลำเลียงเข้าไปภายในเตา ซึ่งแท่งเหล็กจะถูกลำเลียงผ่านส่วนต่าง ๆ ของเตาเผาประกอบด้วย 3 ส่วน คือ preheating zone , heating zone และ soaking zone โดยมีหัวเผา ณ ตำแหน่งต่างเพื่อทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่แท่งเหล็กก่อนที่แท่งเหล็กจะถูกนำไปแปรรูปต่อไป และอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 1,100–1,250 °C



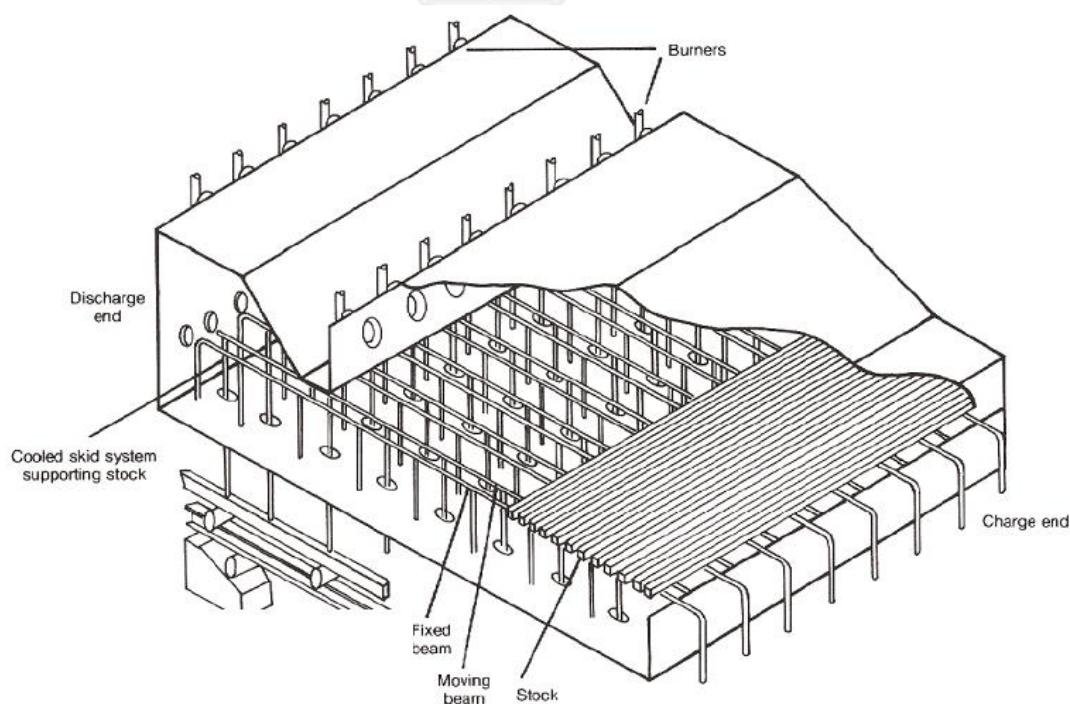
รูปที่ 3.1 เตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type furnace) [10]

3.1.1 เตาเผาเหล็กแบบผลักดัน (pusher type furnace)

การทำงานของเตาเหล็กแบบผลักดัน แท่งเหล็กจะถูกลำเลียงเข้าสู่เตาเผาด้วยการผลักดันซึ่งแท่งเหล็กที่จะเคลื่อนที่ติดกันไป เตาเผาเหล็กแบบผลักดันเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเหล็ก เนื่องจากต้นทุนการติดตั้งและต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ แต่แท่งเหล็กจะถูกผลักดันให้เคลื่อนที่บนพื้นเตาเผาเหล็ก ซึ่งบ่อยครั้งทำให้เกิดความเสียหายกับแท่งเหล็กจากพื้นเตา และการลำเลียงแท่งเหล็กเข้าสู่เตาเผาเหล็กต้องทำงานร่วมกันกับการดันแท่งเหล็กออกจากเตาเพื่อที่จะไปแปรรูป แสดงดังรูปที่ 3.1

3.1.2 เตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน (walking beam furnace)

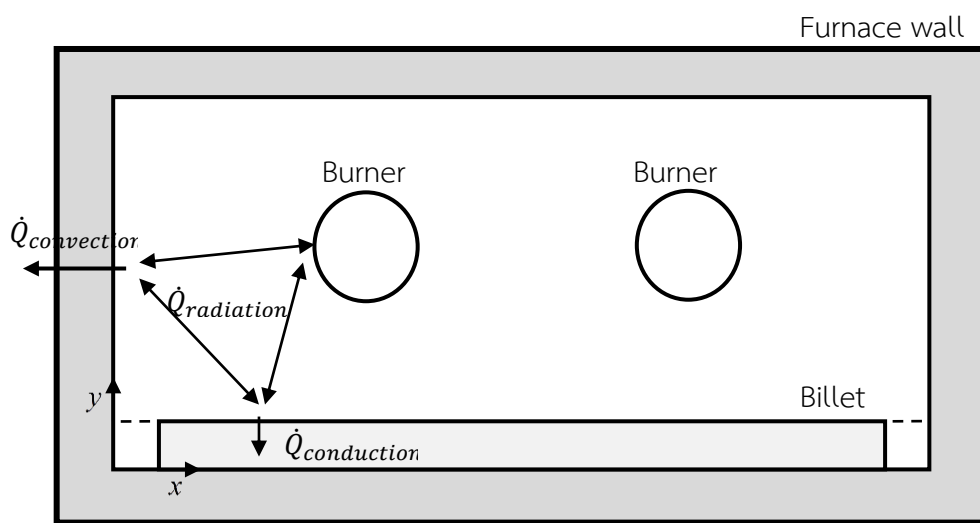
ส่วนประกอบของเตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อนที่ทำหน้าที่เคลื่อนเหล็กเข้าสู่เตาเผาเหล็ก ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ คานเลื่อนแบบเคลื่อนที่ (moving beam) และคานเลื่อนอยู่กับที่ (fixed beam) แท่งเหล็กที่ถูกลำเลียงจะไม่เคลื่อนที่ติดกันไป จึงทำให้เกิดช่องว่างในการแผ่รังสีและการพาความร้อนได้ดี แต่เนื่องจากคานเลื่อนที่ทำหน้าที่เคลื่อนแท่งเหล็กต้องมีการระบายความร้อนด้วยน้ำ ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนบริเวณพื้นผิวด้านล่างของแท่งเหล็ก แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เตาเผาเหล็กแบบคานเลื่อน (walking beam furnace) [10]

3.2 การถ่ายเทความร้อน (heat transfer)

กระบวนการเผาเหล็กภายในเตาเผาเหล็ก (reheating furnace) จะเกิดกลไกการถ่ายเทความร้อน (heat transfer mechanisms) เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature difference) โดยเกิดขึ้นจากการถ่ายเทของพลังงานจากตัวกลางอุณหภูมิสูงกว่าไปยังตัวกลางอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลไก คือ การนำความร้อน (conduction heat transfer) , การพาความร้อน (convection heat transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (radiation heat transfer) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก

3.2.1 การนำความร้อน (conduction heat transfer)

งานวิจัยนี้การนำความร้อนในกระบวนการเผาเหล็กจะเกิดขึ้นบริเวณผนังเตา ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาเผาไปสู่บรรยากาศภายนอกโดยผ่านผนังเตา และการนำความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็ก การนำความร้อนสามารถพิจารณาได้จาก Fourier 's law

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad 3.1$$

- เมื่อ \dot{Q}_{cond} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน (W)
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (thermal conductivity) ($W/m \cdot K$)
 A คือ พื้นที่ที่ตัวกลางของการถ่ายความร้อน (m^2)
 dx คือ ความหนาของตัวกลาง (m)
 dT คือ ผลต่างอุณหภูมิของตัวกลาง (K)

3.2.2 การพาความร้อน (convection heat transfer)

เนื่องจากกระบวนการพาเหล็กเป็นกระบวนการพาไหม้ก๊าซร้อนที่อุณหภูมิสูง ทำให้การแผ่รังสีความร้อนเป็นกลไกสำคัญ (dominate) ของการถ่ายเทความร้อนมากกว่าการพาความร้อน ดังนั้นการพาความร้อนในกระบวนการพาเหล็กด้านในเตาจึงไม่มีผลต่อการพิจารณาอย่างมีนัยสำคัญโดยงานวิจัยนี้จะละทิ้งการคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อนในเตาพาเหล็ก แต่การพาความร้อนในกระบวนการพาเหล็กจะเกิดขึ้นบริเวณผนังด้านนอกเตาซึ่งเป็นการพาความร้อนจากผนังเตาด้านนอกสู่บรรยากาศภายนอกเตา อย่างไรก็ตามการพาความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้จาก Newton's law of cooling

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad 3.2$$

เมื่อ	\dot{Q}_{conv}	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนด้านนอกเตา (W)
	h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) ของอากาศด้านนอกเตา ($W/m^2 \cdot K$)
	A_s	คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกเตา (K)
	T_∞	คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมด้านนอกเตา (K)

หากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนด้านนอกเตาเป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) เนื่องจากไม่มีปัจจัยภายนอกที่บังคับการไหลของอากาศภายนอกเตา เช่น พัดหรือพัดลมระบายความร้อนมาเกี่ยวข้อง สัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จาก Nusselt number ดังนี้

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad 3.3$$

เมื่อ	Nu	คือ Nusselt number (<i>Dimensionless</i>)
	h	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) ($W/m^2 \cdot K$)
	L	คือ ความยาวของบริเวณการถ่ายเทความร้อน (m)
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K$)

โดย Nusselt Number สำหรับพื้นผิวที่เป็นระนาบตามแนวตั้ง ซึ่งสามารถใช้กับ Ra_L ได้ทุกช่วง สามารถหาจากสมการได้ดังนี้ [11]

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad 3.4$$

โดย Nusselt Number สำหรับพื้นผิวที่เป็นระนาบตามแนวนอน ซึ่งสามารถใช้กับ Ra_L ในช่วงระหว่าง $10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$ สามารถหาจากสมการได้ดังนี้ [11]

$$Nu = 0.15 Ra_L^{1/3} \quad 3.5$$

เมื่อ Ra_L คือ Rayleigh number (*Dimensionless*)
โดย Rayleigh number หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Ra_L = Gr_L Pr \quad 3.6$$

เมื่อ Pr คือ Prandtl number (*Dimensionless*)
 Gr_L คือ Grashof number (*Dimensionless*)
โดย Grashof number หาได้จากสมการดังนี้

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^2} \quad 3.7$$

เมื่อ g คือ ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
 β คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของปริมาตร (K^{-1})
 L_c คือ ขนาดความยาวของบริเวณลักษณะพิเศษ (characteristic length) (m)
 ν คือ ค่าความหนืดเชิงจลน์ของของไหล (kinetic viscosity) ($kg/m \cdot s$)

3.2.3 การแผ่รังสีความร้อน (radiation heat transfer)

การแผ่รังสีเป็นการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (electromagnetic waves or photon) ซึ่งไม่เหมือนกับถ่ายความร้อนด้วยการนำความร้อนและการพาความร้อน การแผ่รังสีเกิดได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งวัตถุทั้งหมดที่มีอุณหภูมิสัมบูรณ์มากกว่าศูนย์จะสามารถแผ่รังสีความร้อนได้

กระบวนการพาเหล็กเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูงเนื่องจากเกิดการเผาไหม้ของก๊าซร้อน ดังนั้นการแผ่รังสีความร้อนจึงเป็นกลไกหลักของการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการเผาเหล็ก [3] , [4] และ [8]

อัตราการสูงสุดของการแผ่รังสีความร้อนซึ่งสามารถถูกปลดปล่อยจากอุณหภูมิที่ผิวสามารถพิจารณาได้จาก Stefan-Boltzmann law ดังนี้

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad 3.8$$

เมื่อ $\dot{Q}_{emit,max}$ คือ อัตราการปลดปล่อยรังสีความร้อนสูงสุด (W)
 σ คือ ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann มีค่า 5.67×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K^4$)
 A_s คือ พื้นที่การถ่ายความร้อน (m^2)
 T_s คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

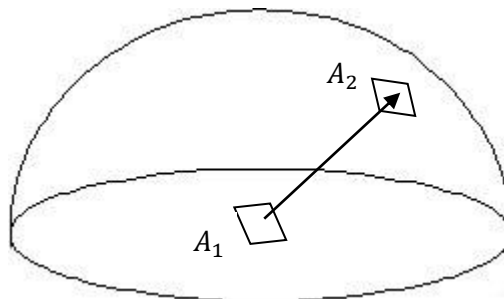
พื้นผิวอุดมคติซึ่งปลดปล่อยการแผ่รังสีความร้อนที่อัตราสูงสุดเรียกว่า วัตถุดำ (blackbody) การปลดปล่อยการแผ่รังสีความร้อนของทุกพื้นผิวจริงมีค่าน้อยกว่าวัตถุดำโดยมีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq \varepsilon \leq 1$ การปลดปล่อยการแผ่รังสีโดยวัตถุดำ ซึ่งมีค่า $\varepsilon = 1$ ที่อุณหภูมิเดียวกัน

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad 3.9$$

เมื่อ ε คือ ค่า emissivity ของพื้นผิว (Dimensionless)

3.3 ตัวประกอบการมองเห็น (view factor)

การแผ่รังสีภายในเตาเผาเหล็กจะเป็นการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว เช่น การแผ่รังสีความร้อนจากผนังเตาไปยังแท่งเหล็ก เป็นการปลดพลังออกจากพื้นผิวเป็นลักษณะครึ่งทรงกลมทุกทิศทาง แสดงดังรูปที่ 3.4 ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนจากผนังเตาไปยังแท่งเหล็กและรวมถึงพื้นผิวต่าง ๆ ภายในเตาเผาเหล็กนั้นจะมีสัดส่วนความสัมพันธ์ โดยมีตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อนเรียกว่า ตัวประกอบการมองเห็น (view factor) โดยตัวประกอบการมองเห็นภายในเตาเผาเหล็กสามารถหาได้จากวิธีต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.4 ตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2

3.3.1 Reciprocity relation

ตัวประกอบการมองเห็นของการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 จะมีสัดส่วนระหว่างพื้นผิว A_2 และพื้นผิว A_1 ซึ่งความสัมพันธ์นี้เรียกว่า Reciprocity relation

$$A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1} \quad 3.10$$

เมื่อ $F_{1 \rightarrow 2}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 (*Dimensionless*)
 $F_{2 \rightarrow 1}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว A_2 ไปยังพื้นผิว A_1 (*Dimensionless*)

3.3.2 Summation rule

เมื่อพิจารณาตามหลักการของพื้นที่ปิดล้อม (enclosure) พลังงานที่ปลดปล่อยการแผ่รังสีจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิวโดยรอบ ๆ จำนวน N พื้นผิว ต้องมีค่าเท่ากับพลังงานทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากพื้นผิว i ผลรวมของตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิวทั้งหมดของพื้นที่ผิวโดยรอบและรวมถึงการมองเห็นของพื้นผิวตัวเองต้องมีค่าเท่า 1 ตามความสัมพันธ์ของ Summation rule ดังนี้

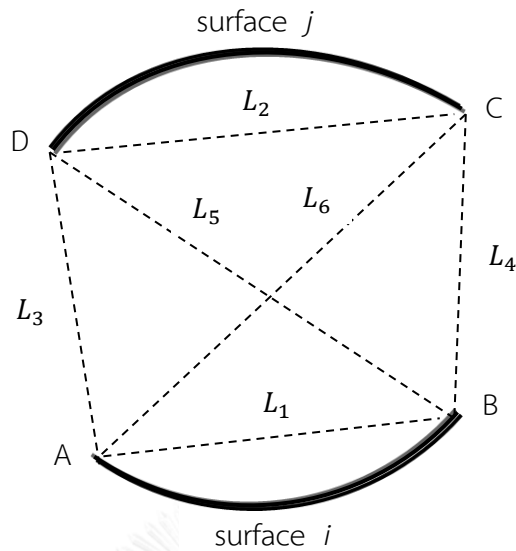
$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = F_{i \rightarrow 1} + F_{i \rightarrow 2} + F_{i \rightarrow 3} + \dots + F_{i \rightarrow N-2} + F_{i \rightarrow N-1} + F_{i \rightarrow N} = 1 \quad 3.11$$

3.3.3 Cross-strings method [11]

การคำนวณตัวประกอบการมองเห็นภายในเตาเผาเหล็ก ซึ่งจะมีการมองเห็นเป็นลักษณะเฉพาะ เช่น ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างผนังเตาเผาที่แท่งเหล็ก สามารถพิจารณาได้จาก Cross-strings method ซึ่งใช้ได้กับการปัญหาที่มีลักษณะสองมิติ โดยในการหาตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j สามารถแสดงได้ในเทอมของความยาวของเส้นดังรูปที่ 3.5

ตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j สามารถหาได้จากผลต่างของผลรวมของเส้นที่ไขว้กัน (crossed strings) กับผลรวมของเส้นที่ไม่ไขว้กัน (uncrossed strings) ต่อด้วย 2 เท่าของความยาวของพื้นผิว i โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

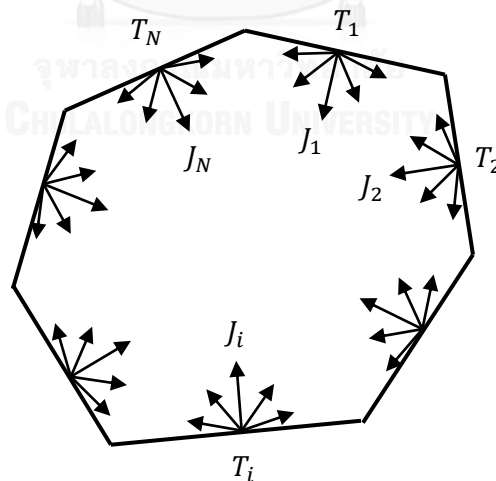
$$F_{i \rightarrow j} = \frac{(L_5 + L_6) - (L_3 + L_4)}{2 \times L_1} \quad 3.12$$



รูปที่ 3.5 การหาตัวประกอบมุมมองเห็นด้วยวิธี Cross-strings method

3.4 การแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม (radiative heat transfer enclosure)

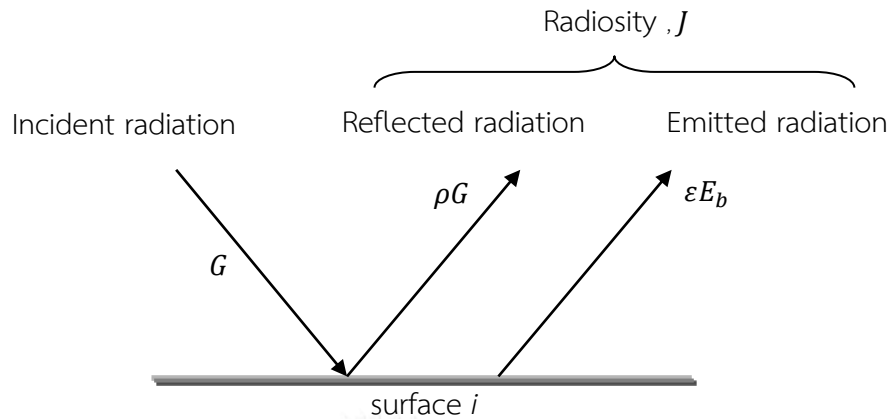
เมื่อพิจารณาภายในเตาเผาเหล็กของกระบวนการเผาเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่ากลไกการถ่ายเทความร้อนจะเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีภายในเนื้อที่ปิดล้อม โดยภายในเตาเผาเหล็กมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน x ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาการถ่ายเทความร้อนเพียงครึ่งเดียวได้ การแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม N พื้นผิวแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 พื้นผิวการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม

โดยในทางปฏิบัติการวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อนของพื้นที่ปิดล้อมจะมีความซับซ้อนในการวิเคราะห์หากถ้าบางสมมติฐานไม่ถูกสมมติขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อนจะสมมติให้พื้นผิวปิดล้อมเป็นวัตถุเทา (gray surface) ซึ่งการแผ่รังสีออกจากพื้นผิวจะ

ประกอบด้วย การปลดปล่อยการแผ่รังสี (emitted radiation) และการสะท้อนรังสี (reflected radiation) แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ลักษณะรังสีที่กระทำต่อวัสดุเทา

ซึ่งผลรวมของการปลดปล่อยการแผ่รังสีและการสะท้อนรังสีเรียกว่า Radiosity สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$J_i = \varepsilon_i E_{b,i} + \rho_i G_i \quad 3.13$$

สำหรับพื้นผิว i ซึ่งเป็นวัตถุเทาจะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\varepsilon_i = \alpha_i \quad 3.14$$

$$\alpha_i + \rho_i = 1 \quad 3.15$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$J_i = \varepsilon_i E_{b,i} + (1 - \varepsilon_i) G_i \quad 3.16$$

- เมื่อ
- J_i คือ Radiosity ของพื้นผิว i (W/m^2)
 - G_i คือ การแผ่รังสีลงบนพื้นผิว i (W/m^2)
 - $E_{b,i}$ คือ การปลดปล่อยพลังงานของวัตถุดำของพื้นผิว i เท่ากับ σT_i^4 (W/m^2)
 - ε_i คือ emissivity ของพื้นผิว i (Dimensionless)
 - ρ_i คือ reflectivity ของพื้นผิว i (Dimensionless)

เมื่อพิจารณาหลักการอนุรักษ์พลังงานของพลังงานที่เข้าและออกบนพื้นผิว i จะได้ว่าอัตราความร้อนสุทธิของการถ่ายความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Net radiation heat transfer) จากพื้นผิว i ของพื้นที่ A_i สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\dot{Q}_i = A_i (J_i - G_i) \quad 3.17$$

นำสมการ 3.16 แทนลงสมการเพื่อลดตัวแปร G_i จะได้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= A_i \left(J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{b,i}}{1 - \varepsilon_i} \right) \\ \dot{Q}_i &= \frac{A_i \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (E_{b,i} - J_i) \\ \dot{Q}_i &= \frac{A_i \varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} (\sigma T_i^4 - J_i) \end{aligned} \quad 3.18$$

หากพิจารณาในทางไฟฟ้าของความต้านทานไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ตาม Ohm's law ดังนี้

$$I_{elec} = \frac{\Delta V_{elec}}{R_{elec}} \quad 3.19$$

เมื่อ I_{elec} คือ กระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทาน (A)

ΔV_{elec} คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

R_{elec} คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

จากหลักการของ Ohm's law สามารถนำมาเขียนในรูปแบบของความต้านทานทางความร้อนได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{Q}_i &= \frac{E_{b,i} - J_i}{R_i} \\ \dot{Q}_i &= \frac{\sigma T_i^4 - J_i}{R_i} \end{aligned} \quad 3.20$$

$$R_i = \frac{1 - \varepsilon_i}{A_i \varepsilon_i} \quad 3.21$$

เมื่อ \dot{Q}_i คือ ความร้อนสุทธิของพื้นผิว i (W)

R_i คือ ความต้านทานของพื้นผิว i (surface resistance) (*Dimensionless*)

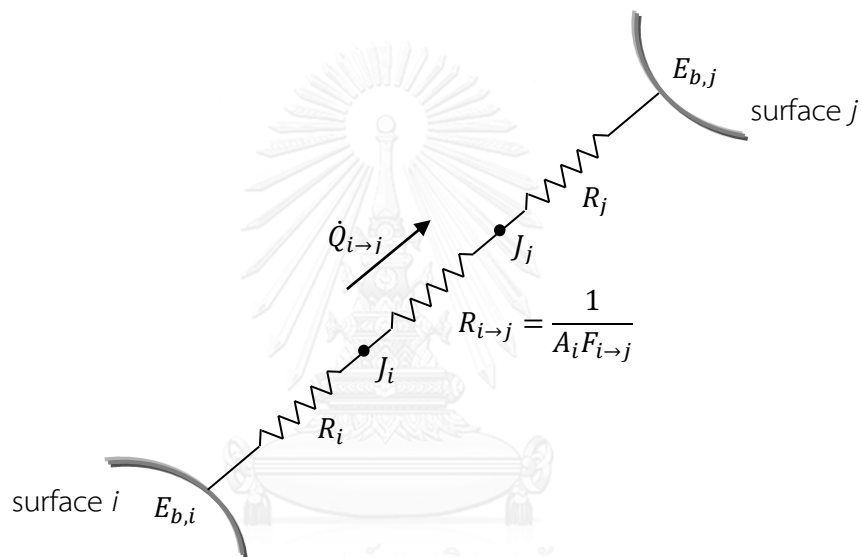
A_i คือ พื้นที่ของพื้นผิว i (m^2)

เมื่อพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนสุทธิตระหว่างวัตถุเทา 2 พื้นผิวใด ๆ แสดงดังรูปที่ 3.8 ตามกฎอนุรักษ์พลังงานการแผ่รังสีความร้อนออกจากพื้นผิวทั้งหมดของ i กระทบต่อพื้นผิว j ลบด้วยการแผ่รังสีความร้อนออกจากพื้นผิวทั้งหมดของ j กระทบต่อพื้นผิว i ดังนี้

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = A_i J_i F_{i \rightarrow j} - A_j J_j F_{j \rightarrow i} \quad 3.22$$

จากความสัมพันธ์ของ reciprocity relation จะได้

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = A_i F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad 3.23$$



รูปที่ 3.8 ความต้านทานของการแผ่รังสีความร้อนสุทธิตระหว่างวัตถุเทา 2 พื้นผิวใด ๆ

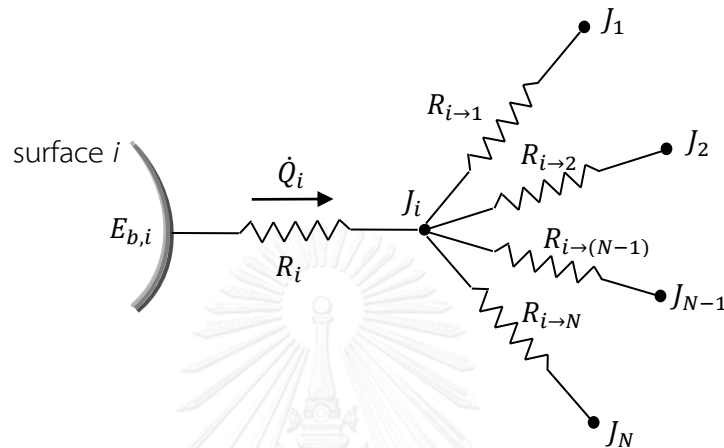
หากพิจารณาในทางไฟฟ้าของความต้านทานไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้ตาม Ohm's law ดังนี้

$$\dot{Q}_{i \rightarrow j} = \frac{J_i - J_j}{R_{i \rightarrow j}} \quad 3.24$$

$$R_{i \rightarrow j} = \frac{1}{A_i F_{i \rightarrow j}} \quad 3.25$$

- เมื่อ $\dot{Q}_{i \rightarrow j}$ คือ ความร้อนสุทธิจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j (W)
 $R_{i \rightarrow j}$ คือ ความต้านทานของพื้นว่างระหว่างพื้นผิว i และพื้นผิว j (space resistance) (Dimensionless)
 $F_{i \rightarrow j}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j (Dimensionless)

เนื่องจากภายในเตาเผาเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.6 ซึ่งประกอบด้วยพื้นผิวหลายพื้นผิวภายในพื้นที่ปิดล้อม ดังนั้นเมื่อพิจารณาพื้นผิวปิดล้อม N พื้นผิว จากกฎอนุรักษ์พลังงานจะพบว่า การถ่ายเทความร้อนสุทธิจากผิว i มีค่าเท่ากับผลรวมของการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิวอื่น ๆ N พื้นผิวของพื้นที่ปิดล้อม สามารถแสดงในเทอมของความต้านทานทางไฟฟ้าดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ความต้านทานของการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวปิดล้อม N พื้นผิว

จากสมการ 3.20 จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N \dot{Q}_{i \rightarrow j} \quad 3.26$$

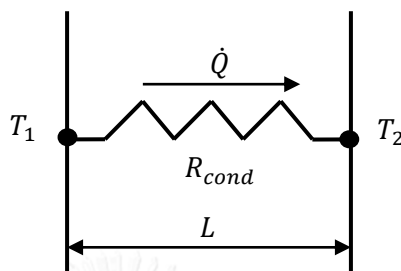
$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N A_i F_{i \rightarrow j} (J_i - J_j) \quad 3.27$$

ดังนั้นผลรวมของการถ่ายความร้อนสุทธิ คือ

$$\dot{Q}_i = \sum_{j=1}^N \frac{A_i (J_i - J_j)}{R_{i \rightarrow j}} \quad 3.28$$

3.5 การหาความต้านทานทางความร้อน (thermal resistance)

กลไกการถ่ายเทความร้อนทางด้านการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสี ความร้อนที่ไม่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ปิดล้อมสามารถพิจารณาในลักษณะความต้านทานทางความร้อนได้ เพื่อทำให้ง่ายต่อการคำนวณ รูปที่ 3.10 แสดงการนำความร้อนผ่านพื้นผิวความยาว L



รูปที่ 3.10 การนำความร้อนผ่านพื้นผิวความยาว L

สามารถแสดงสมการความต้านทานการนำความร้อนได้ดังนี้

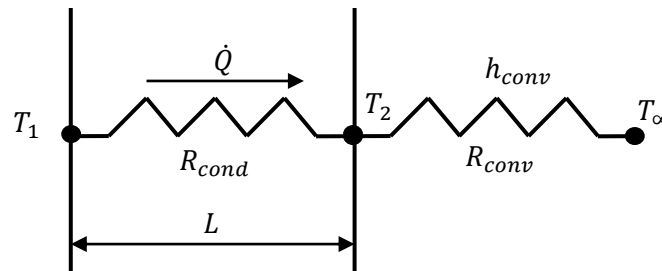
$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad 3.29$$

ดังนั้นสมการการนำความร้อนสามารถแสดงดังนี้

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond}} \quad 3.30$$

- เมื่อ \dot{Q}_{cond} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน (W)
 R_{cond} คือ ความต้านทานการนำความร้อน (K/W)
 L คือ ความยาวของบริเวณการถ่ายเทความร้อน (m)
 k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m·K)
 A คือ พื้นที่ที่ตัวกลางของการถ่ายความร้อน (m^2)

สำหรับการพาความร้อนซึ่งสามารถหาความต้านทานการพาความร้อนได้ แสดงดังรูปที่ 3.11 เป็นการนำความร้อนจาก T_1 ไปยังอุณหภูมิ T_2 และมีการพาความร้อนที่พื้นผิวไปยังอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_∞) ซึ่งประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน (h_{conv}) โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับ Nusselt number (Nu) ตามสมการ 3.3



รูปที่ 3.11 ความต้านทานการพาความร้อน

สามารถแสดงสมการความต้านทานการพาความร้อนได้ดังนี้

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv} A} \quad 3.31$$

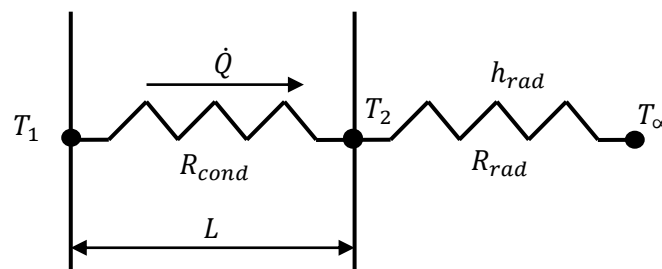
เมื่อ R_{conv} คือ ความต้านทานการพาความร้อน (K/W)

h_{conv} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)

เนื่องจากความต้านทานทางความร้อนมีลักษณะการคำนวณเหมือนความต้านทางไฟฟ้าดังนั้นจากรูปที่ 3.11 จะได้ว่าความต้านทานการนำความร้อนต่ออนุกรมกับความต้านทานพาความร้อน ซึ่งสามารถเขียนสมการรวมความต้านทาน (R_{total}) ได้ดังนี้

$$R_{total} = R_{cond} + R_{conv} \quad 3.32$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับความต้านทานการแผ่รังสีความร้อนแสดงดังรูปที่ 3.12 เป็นการนำความร้อนจาก T_1 ไปยังอุณหภูมิ T_2 และมีการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวไปยังอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_∞) ซึ่งประกอบด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี (h_{rad})



รูปที่ 3.12 ความต้านทานการแผ่รังสีความร้อน

สามารถแสดงสมการความต้านทานการแผ่รังสีความร้อนได้ดังนี้

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A} \quad 3.33$$

เมื่อ R_{rad} คือ ความต้านทานการแผ่รังสีความร้อน (K/W)

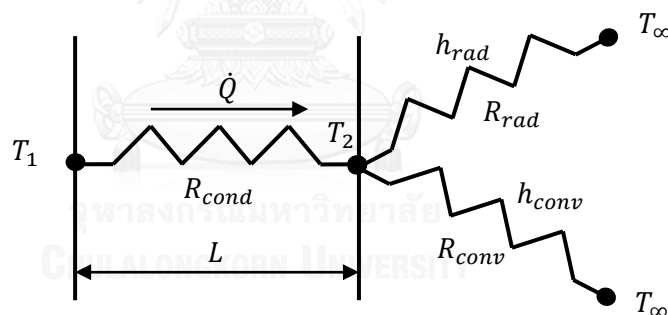
h_{rad} คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี ($W/m^2 \cdot K$)

เนื่องจากสมการการแผ่รังสีความร้อนเป็นสมการไม่เชิงเส้น (nonlinear) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h_{rad} จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{out} + T_{\infty})(T_{out}^2 + T_{\infty}^2) \quad 3.34$$

หากพิจารณาจากรูปที่ 3.12 ความต้านทานการนำความร้อนและความต้านทานการแผ่รังสีต่อแบบอนุกรมกัน ดังนั้นสามารถเขียนสมการรวมได้ในลักษณะเดียวกันกับสมการ 3.32 ได้เช่นกัน

เนื่องจากความร้อนสูญเสีย (heat loss) ที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กซึ่งเกิดการนำความร้อนจะถูกส่งผ่านผนังเตาไปสู่สิ่งแวดล้อมซึ่งเกิดการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนภายนอกเตาเผาเหล็กแสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ความต้านทานความร้อนที่เกิดจากความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.13 ความต้านทานการพาความร้อนต่อขนานกับความต้านทานการแผ่รังสี ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{R_{equi}} = \frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{rad}} \quad 3.35$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการความต้านทานรวมได้ดังนี้

$$R_{total} = R_{cond} + R_{equi} \quad 3.36$$

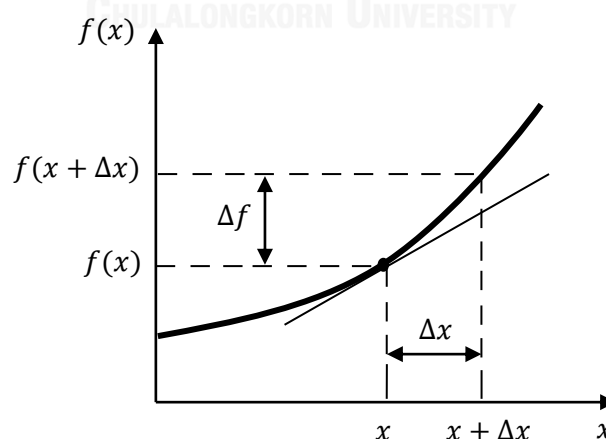
โดยสมการการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่ผ่านผนังเตาเผาเหล็กไปสู่สิ่งแวดล้อมนอกเตาเผาเหล็ก สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{total} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{total}} \quad 3.37$$

ปัญหาในงานวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งการได้ค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของสมการนั้นมีความเป็นไปได้ยาก โดยประกอบไปด้วยสมการควบคุม (governing equation), เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition), เงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) และรูปร่าง (geometry) ของปัญหาที่พิจารณา เป็นต้น ซึ่งจะเกิดความซับซ้อนในการวิเคราะห์อย่างมาก ดังนั้นปัญหาดังกล่าวสามารถคำนวณได้ด้วยระเบียบวิธีเชิงเลข (numerical method) ซึ่งจะได้คำตอบโดยประมาณ (approximate solution) ซึ่งได้เลือกใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขด้วยผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและเหมาะสมสำหรับการหาคำตอบซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.6 การหาค่าสมการอนุพันธ์ [11]

เมื่อพิจารณาปัญหาในแขนงทางวิศวกรรมศาสตร์ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งสมการนำความร้อนที่ใช้ในการศึกษาการแจกแจงของอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กอยู่ในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยเช่นกัน หากพิจารณาฟังก์ชัน f ซึ่งขึ้นกับตัวแปร x แสดงดังรูป 3.14



รูปที่ 3.14 ค่าอนุพันธ์ของฟังก์ชัน

ดังนั้นค่าอนุพันธ์ เมื่อการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้น x เข้าสู่ศูนย์ จะได้

$$\frac{df(x)}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad 3.38$$

ซึ่งจะได้ค่าอนุพันธ์โดยประมาณคือ

$$\frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad 3.39$$

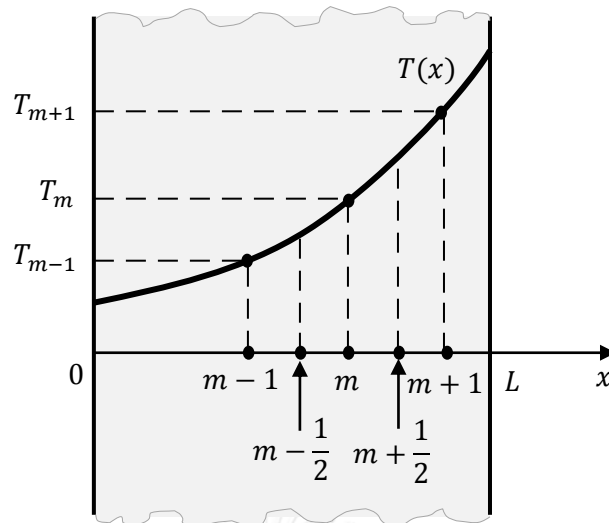
ค่าอนุพันธ์โดยประมาณในเทอมของผลต่าง คือ รูปแบบของผลต่างสี่บเนื่อง (finite difference form) ซึ่งสามารถหาค่าอนุพันธ์โดยประมาณจากอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series expansion)

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{df(x)}{dx} + \frac{1}{2} \Delta x^2 \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \dots \quad 3.40$$

หากพิจารณาโดยการละทิ้งพจน์ทางขวาของสมการทั้งหมดยกเว้น 2 พจน์แรก โดย Δx^2 ของพจน์แรกของสมการที่ถูกละทิ้ง คือค่าความผิดพลาดที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้นตอนของการประมาณ อย่างไรก็ตามเราสามารถลดค่าความผิดพลาดลงได้โดยให้ค่า Δx มีค่าน้อย ๆ ดังนั้นจะทำให้คำตอบโดยประมาณมีความแม่นยำมากขึ้น

เมื่อพิจารณาสมการการนำความร้อนหนึ่งมิติ ความยาว L ภายใต้สภาวะคงตัว ไม่มีการผลิตความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.15 โดยสามารถแสดงสมการควบคุมได้ดังนี้

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad 3.41$$



รูปที่ 3.15 การนำความร้อน 1 มิติ ความยาว L

หากพิจารณาอุณหภูมิที่จุด m (node) จากสมการ 3.39 พบว่า อนุพันธ์อันดับหนึ่งของอุณหภูมิ $\frac{dT}{dx}$ ที่จุดกึ่งกลาง $m - \frac{1}{2}$ และ $m + \frac{1}{2}$ บริเวณรอบจุด m จะได้

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{m-\frac{1}{2}} \cong \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} \quad 3.42$$

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{m+\frac{1}{2}} \cong \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \quad 3.43$$

และสมการอนุพันธ์อันดับ 2 ของอุณหภูมิที่จุด m ดังนี้

$$\left. \frac{d^2T}{dx^2} \right|_m \cong \frac{\left. \frac{dT}{dx} \right|_{m+\frac{1}{2}} - \left. \frac{dT}{dx} \right|_{m-\frac{1}{2}}}{\Delta x} \quad 3.44$$

$$\left. \frac{d^2T}{dx^2} \right|_m = \frac{\frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} - \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x}}{\Delta x} \quad 3.45$$

$$\left. \frac{d^2T}{dx^2} \right|_m = \frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} \quad 3.46$$

ดังนั้นจากสมการ 3.41 การนำความร้อนหนึ่งมิติ ความยาว L ภายใต้สภาวะคงตัว ไม่มีการผลิตความร้อน จะได้

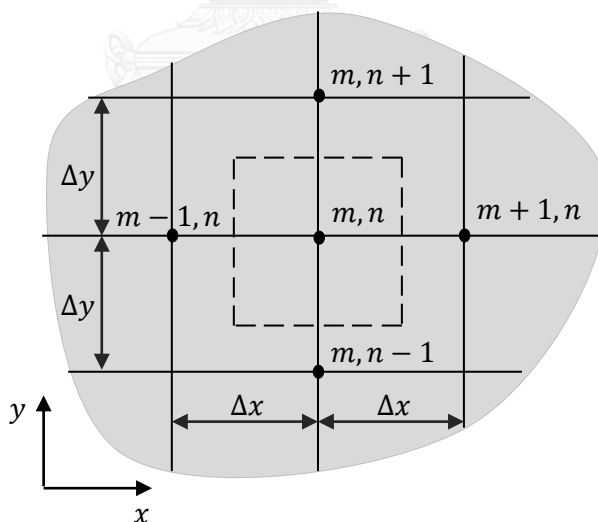
$$\frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} = 0 \quad 3.47$$

3.7 สมการการนำความร้อนสองมิติ

งานวิจัยนี้เป็นการพิจารณาการแจกแจงความร้อนภายในแท่งเหล็กโดยเป็นการนำความร้อนสองมิติภายใต้สภาวะคงตัว ไม่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายในแท่งเหล็ก และคุณสมบัติของแท่งเหล็กคงที่ สามารถพิจารณาสมการควบคุมได้ดังนี้

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} = 0 \quad 3.48$$

ระเบียบวิธีเชิงเลขด้วยวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเป็นการพิจารณาอุณหภูมิที่จุดที่สนใจ หากพิจารณาอุณหภูมิที่จุด m, n โดยมีปริมาตรควบคุมบริเวณรอบจุด m, n เป็นค่าผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งมีระยะห่าง Δx และ Δy ในทิศทางแกน x และทิศทางแกน y ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ปริมาตรควบคุมบริเวณรอบจุด m, n

เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ในการพิจารณาอุณหภูมิจุดที่สนใจ ซึ่งจะใช้การสมดุลพลังงานในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานที่ถ่ายเทความร้อนเข้าและออกของปริมาตรควบคุมที่จุดนั้น ๆ สามารถแสดงดังนี้

$$\dot{Q}_{cond, right} + \dot{Q}_{cond, left} + \dot{Q}_{cond, top} + \dot{Q}_{cond, bottom} = 0 \quad 3.49$$

เมื่อ	$\dot{Q}_{cond, right}$	คือ การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านขวา (W)
	$\dot{Q}_{cond, left}$	คือ การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านซ้าย (W)
	$\dot{Q}_{cond, top}$	คือ การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านบน (W)
	$\dot{Q}_{cond, bottom}$	คือ การนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านล่าง (W)

หากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านขวา หรือในทิศทางแกน x ของจุด m, n จากความเข้าใจการหาค่าอนุพันธ์จะได้

$$\dot{Q}_{cond, right} = k \Delta y \frac{T_{m+1, n} - T_{m, n}}{\Delta x} \quad 3.50$$

เมื่อ	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K$)
	Δy	คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยมีความหนา 1 หน่วยในทิศทางแกน z (m)
	Δx	คือ ความยาวของบริเวณการถ่ายเทความร้อน (m)

ในทำนองเดียวกันกับการนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมแต่ละทิศทางรอบจุด m, n ดังนี้

$$\dot{Q}_{cond, left} = k \Delta y \frac{T_{m-1, n} - T_{m, n}}{\Delta x} \quad 3.51$$

หากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมทางด้านบนหรือในทิศทางแกน y ของจุด m, n จากความเข้าใจการหาค่าอนุพันธ์จะได้

$$\dot{Q}_{cond, top} = k \Delta x \frac{T_{m, n+1} - T_{m, n}}{\Delta y} \quad 3.52$$

เมื่อ	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K$)
	Δx	คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนโดยมีความหนา 1 หน่วยในทิศทางแกน z (m)
	Δy	คือ ความยาวของบริเวณการถ่ายเทความร้อน (m)

$$\dot{Q}_{cond, bottom} = k \Delta x \frac{T_{m, n-1} - T_{m, n}}{\Delta y} \quad 3.53$$

ดังนั้นสมการสมดุลพลังงานจะได้

$$k\Delta y \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k\Delta y \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k\Delta x \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} + k\Delta x \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} = 0 \quad 3.54$$

หากกำหนดให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าคงตัว และ $\Delta x = \Delta y$ จะได้

$$T_{m+1,n} + T_{m-1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} + 4T_{m,n} = 0 \quad 3.55$$

ซึ่งสมการ 3.55 จะถูกนำไปประยุกต์ใช้สำหรับผลเฉลยโดยประมาณบริเวณจุดภายใน (interior node) ของการนำความร้อนภายในแท่งเหล็กเท่านั้น ในอีกความหมายคือเงื่อนไขขอบเขตจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมการผลต่างสี่บั้งภายในของแท่งเหล็ก

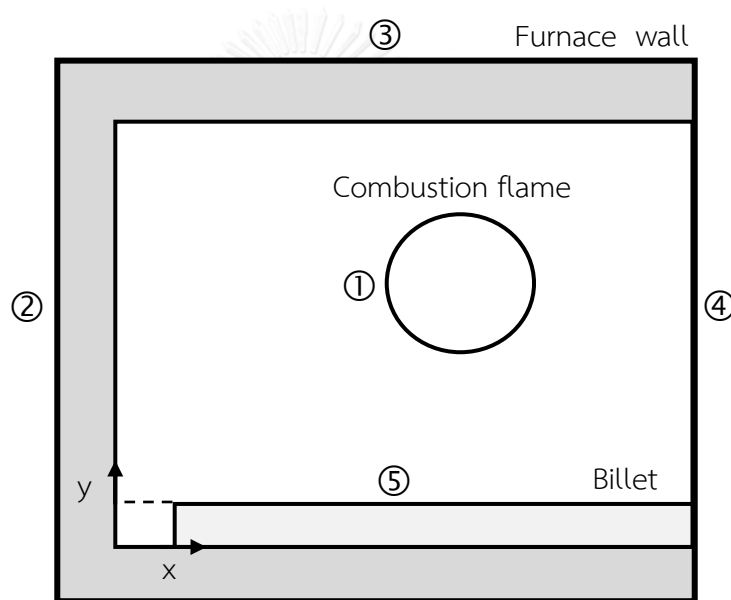


บทที่ 4

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงเลข

4.1 สมมติฐานและเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวภายในพื้นที่ปิดล้อมภายในเตาเผาเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้ว่าภายในเตาเผาเหล็กมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน x แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยประกอบด้วย 5 พื้นผิวแสดงดังตารางที่ 4.1



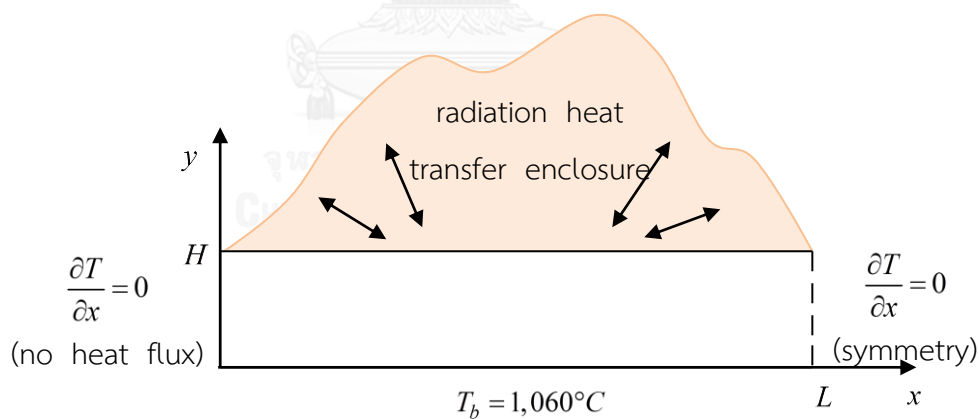
รูปที่ 4.1 พื้นผิวการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม

ตารางที่ 4.1 พื้นผิวภายในเตาเผาเหล็ก

หมายเลข	พื้นผิว	หมายเลข	พื้นผิว
1	เปลวไฟ (combustion flame)	4	พื้นผิวสมมาตร (reradiating surface)
2	ผนังเตาด้านข้าง (side wall)	5	แท่งเหล็ก (billet)
3	ผนังเตาด้านบน (ceiling)		

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการแจกแจงอุณหภูมิแท่งเหล็กจากการแผ่รังสีความร้อนภายในเนื้อที่ปิดล้อม จึงกำหนดสมมติฐานในการคำนวณดังนี้

1. พิจารณาปัญหาอยู่ในสภาวะคงตัว
2. การนำความร้อนแท่งเหล็กในสองมิติ
3. เกิดการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อมมายังแท่งเหล็ก
4. เตาเผาเหล็กและแท่งเหล็กมีความสมมาตรตามแนวแกน x
5. ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังเตาด้านข้างของแท่งเหล็ก $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0\right)$
6. ผนังเตาและแท่งเหล็กเป็นพื้นผิวเทา (gray surface)
7. คุณสมบัติทางความร้อนของผนังเตาและแท่งเหล็กคงที่
8. อุณหภูมิเปลวไฟมีค่าคงที่ $T_{flame} = 1,350^{\circ}C$ และเป็นพื้นผิวดำ (black body surface)
9. อุณหภูมิผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่าคงที่ $T_{wall} = 1,150^{\circ}C$
 - 9.1. พิจารณาอุณหภูมิผนังเตาด้านข้างและด้านบนเป็นตัวไม่ทราบค่า ที่เกิดจากการปรับปรุงผนังเตาด้วยการเพิ่มความหนาของฉนวน โดยที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่า $T_{\infty} = 30^{\circ}C$
10. อุณหภูมิพื้นเตาเผาหรืออุณหภูมิผิวด้านล่างแท่งเหล็กมีค่าคงที่ $T_{bottom} = 1,060^{\circ}C$

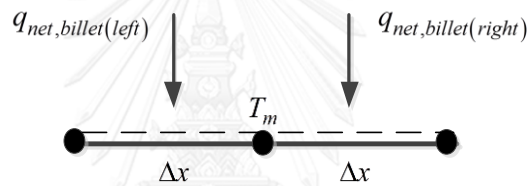


รูปที่ 4.2 เงื่อนไขขอบเขตของปัญหา

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก ซึ่งเป็นลักษณะการนำความร้อนแบบ 2 มิติ จากรูปที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขขอบเขตของ ตามสมมติฐานข้างต้นดังนี้

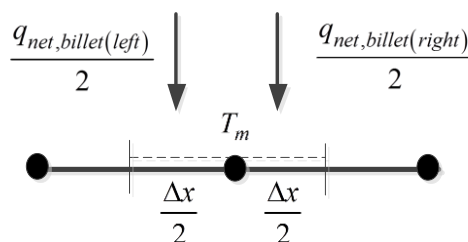
$$\begin{aligned}
 1) \quad x=0 & \quad , \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \\
 2) \quad x=L & \quad , \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \\
 3) \quad y=0 & \quad , \quad T_b = 1,060^\circ\text{C} \\
 4) \quad y=H & \quad , \quad k\Delta x \frac{\partial T}{\partial y} = q_{billet}
 \end{aligned}$$

หากพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตที่ $y=H$ หรือที่ผิวด้านบนของแท่งเหล็ก โดยเงื่อนไขขอบเขตคือการแผ่รังสีความร้อนสุทธิของพื้นผิวแท่งเหล็ก ซึ่งประกอบไปด้วยการแผ่รังสีความร้อนสุทธิของพื้นผิวภายในเตาเผาเหล็กดังสมการ 3.28 โดยหาได้จากค่า radiosity ของแต่ละพื้นผิวภายในเตาเผาเหล็กซึ่งสามารถแปรเปลี่ยนได้ตามอุณหภูมิของพื้นผิวนั้น ๆ



รูปที่ 4.3 ความร้อนสุทธิของพื้นผิวแท่งเหล็ก

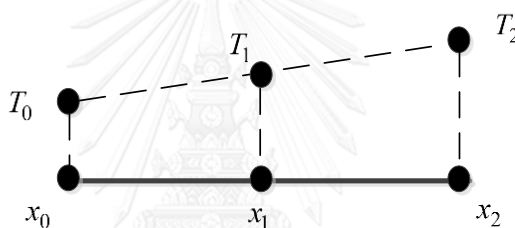
จากการหาความร้อนสุทธิภายในพื้นที่ปิดล้อมภายในเตาเผาเหล็กของแต่ละพื้นผิวของแท่งเหล็กจะประกอบด้วยค่าของตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวของแท่งเหล็กนั้นแสดงดังรูปที่ 4.3 เมื่อนำความร้อนสุทธิของพื้นผิวของแท่งเหล็กมาประยุกต์เป็นเงื่อนไขขอบเขตที่พื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กเพื่อที่จะหาการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก จะเห็นได้ว่าความร้อนสุทธิของแต่ละพื้นผิวเป็นครึ่งหนึ่งของพื้นผิวควบคุม (control surface) ของจุด (node) ที่ต้องการพิจารณา ดังนั้นการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตระหว่างการถ่ายเทความร้อนสุทธิของแต่ละพื้นผิวกับจุดอุณหภูมิพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความร้อนสุทธิของจุดที่พิจารณา

รูปที่ 4.4 แสดงพื้นผิวควบคุม (control surface) ของจุดอุณหภูมิที่พิจารณา (T_m) ประกอบด้วย ความร้อนสุทธิของพื้นผิวแห่งเหล็กด้านซ้ายครึ่งหนึ่ง ($(q_{net,billet(left)}/2)$) และด้านขวาครึ่งหนึ่ง ($(q_{net,billet(right)}/2)$) ต่อด้วยพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน $\Delta x/2$ ซึ่งคือความร้อนฟลักซ์ (heat flux) ของพื้นผิวนั้น ๆ

เมื่อหาอุณหภูมิของแต่ละจุด (node) ได้แล้ว จะต้องนำค่าอุณหภูมิระหว่างสองจุดเพื่อมาหาอุณหภูมิของพื้นผิวแห่งเหล็ก โดยอุณหภูมิพื้นผิวของแท่งเหล็กจะถูกนำไปคำนวณหาค่า Radiosity และความร้อนสุทธิของพื้นผิว งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการประมาณค่าในช่วงโดยการใช้ผลต่างจากการแบ่งย่อยของนิวตัน (newton's divided-difference interpolating polynomials) [12] ด้วยการใช้ประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (linear interpolation) ในการหาอุณหภูมิระหว่างสองจุด สำหรับการหาอุณหภูมิของพื้นผิวแห่งเหล็กแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การประมาณค่าเชิงเส้นหาอุณหภูมิของพื้นผิวแห่งเหล็ก

จากรูปที่ 4.5 แสดงการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น สำหรับการหาอุณหภูมิที่พื้นผิวจากการประมาณค่าอุณหภูมิระหว่างสองจุด สามารถคำนวณได้ดังนี้

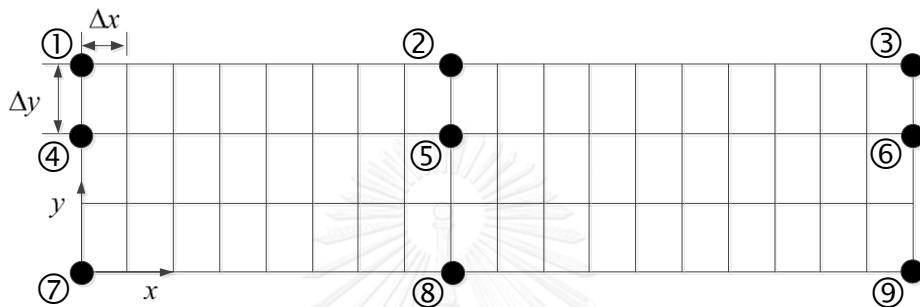
$$T_1 = T_0 + (x_1 - x_0) \left(\frac{T_2 - T_0}{x_2 - x_0} \right) \quad 4.1$$

4.2 การพิจารณาปัญหาของตัวประกอบการมองเห็น

การวิจัยนี้ได้ศึกษาและคำนวณหาค่าตัวประกอบการมองเห็น (view factor) ของปัญหาที่พิจารณา ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการคำนวณการแผ่รังสีความร้อนภายในเตาเผาเหล็กประกอบไปด้วยจำนวน 5 ผิว ดังตารางที่ 4.1 โดยข้อมูลขนาดพื้นผิวต่าง ๆ และตัวอย่างการคำนวณตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวต่าง ๆ ภายใต้งานวิจัยแบบ 1 พื้นผิวได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก เนื่องจากความเป็นจริงอุณหภูมิของแท่งเหล็กไม่ได้มีค่าคงที่ตลอดทั้งความยาว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวภายในพื้นที่ปิดล้อมด้วยการแบ่งพื้นผิวของแท่งเหล็กเป็นพื้นผิวเล็ก ๆ ได้แก่ 1 , 2 , 10 , 20 และ 50 พื้นผิว และมีขนาดของพื้นผิว 1.3 , 0.65 ,

0.13 , 0.065 และ 0.026 m ตามลำดับ เพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาที่พิจารณาจริง โดยค่าตัวประกอบการมองเห็นที่หาได้ของแต่ละขนาดพื้นผิวจะมีค่าตัวประกอบการมองเห็นตลอดความยาวพื้นผิวนั้น ผลการคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวต่าง ๆ มายังพื้นผิวแห่งหลัก จะทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนด้วยค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square , RMS) ซึ่งใช้ค่าของ 50 พื้นผิวเป็นตัวอ้างอิง (Base line)

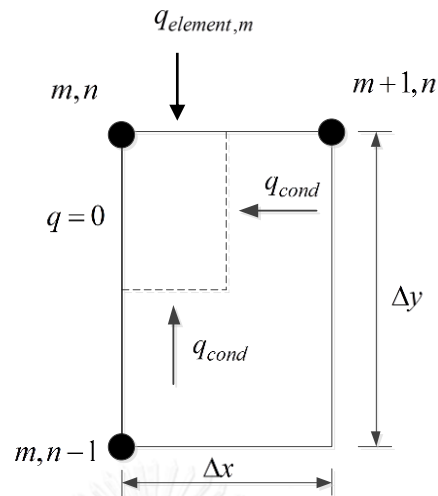
4.3 การพิจารณาปัญหาของการกระจายตัวของอุณหภูมิของแท่งเหล็ก



รูปที่ 4.6 ปัญหาการกระจายตัวของอุณหภูมิ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระเบียบวิธีเชิงเลขแบบผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) ซึ่งประกอบไปด้วยเอลิเมนต์ (element) และจุดต่อ (node) ของปัญหาการนำความร้อนในแท่งเหล็กแบบ 2 มิติแสดงดังรูปที่ 4.6 ดังนั้นจากปัญหาการกระจายตัวของอุณหภูมิเป็นปัญหาที่มีการถ่ายเทความร้อนแตกต่างกันตามลักษณะเงื่อนไขขอบเขตของแต่ละจุด โดยเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวด้านบนคือความร้อนฟลักซ์ของพื้นผิวนั้น ๆ ($q_{element}$) โดยกำหนดให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าคงตัว และ $\Delta x \neq \Delta y$ และกำหนดให้อุณหภูมิที่จุด m, n เป็นจุดสนใจในการพิจารณาที่จุด ๆ นั้น ซึ่งสามารถเขียนสมการพลังงานได้ดังนี้

4.3.1 พิจารณาจุดที่ 1



รูปที่ 4.7 สมดุลพลังงานจุดที่ 1

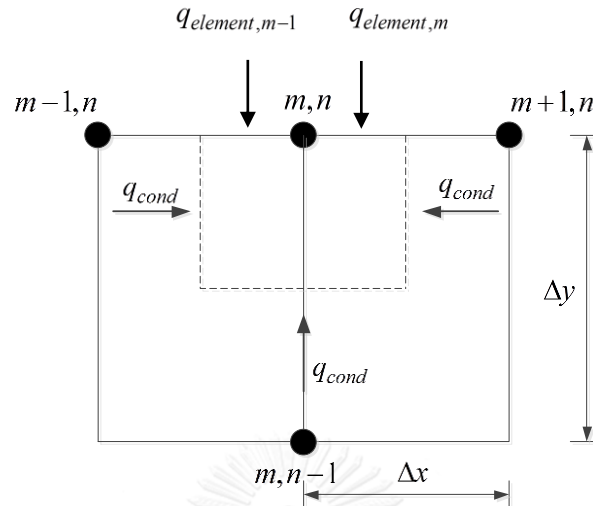
$$q + q_{element,m} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = 0$$

เงื่อนไขขอบเขตของจุดที่ 1 ประกอบด้วยการถ่ายเทความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อมภายในเตาเผาเหล็ก ($q_{rad, enclosure}$) มายังพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็ก ซึ่งเป็นฟังก์ชันของค่า radiosity ตามสมการ 3.28 และเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิตามสมการ 3.18 ดังนั้นสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$0 + q_{element,m} \left(\frac{\Delta x}{2} \right) + \left(k \frac{\Delta y}{2} \right) \frac{(T_{m+1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \left(k \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{(T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = \frac{1}{(k \Delta x / \Delta y + k \Delta y / \Delta x)} \left[q_{element,m} \Delta x + k \frac{\Delta y}{\Delta x} T_{m+1,n} + k \frac{\Delta x}{\Delta y} T_{m,n-1} \right] \quad 4.2$$

4.3.2 พิจารณาจุดที่ 2



รูปที่ 4.8 สมดุลพลังงานจุดที่ 2

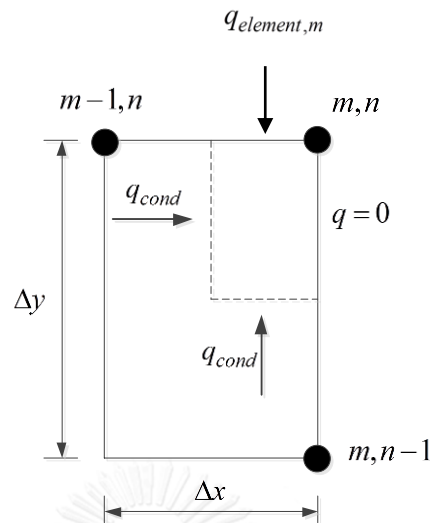
$$q_{element,m} + q_{element,m-1} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = 0$$

หากพิจารณาเอลิเมนต์ที่จุด 2 สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของการถ่ายเทความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อมภายในเตาเผาเหล็ก ($q_{rad,enclosure}$) มายังพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็ก ซึ่งมีลักษณะเดียวกับจุดที่ 1 ดังนั้นสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$\left(q_{element,m-1} \frac{\Delta x}{2} + q_{element,m} \frac{\Delta x}{2} \right) + \left(k \frac{\Delta y}{2} \right) \frac{(T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \left(k \frac{\Delta y}{2} \right) \frac{(T_{m+1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + (k\Delta x) \frac{(T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = \frac{1}{(k\Delta x/\Delta y + k\Delta y/\Delta x)} \left[\left(q_{element,m-1} \frac{\Delta x}{2} + q_{element,m} \frac{\Delta x}{2} \right) + k \frac{\Delta y}{2\Delta x} T_{m-1,n} + k \frac{\Delta y}{2\Delta x} T_{m+1,n} + k \frac{\Delta x}{\Delta y} T_{m,n-1} \right] \quad 4.3$$

4.3.3 พิจารณาจุดที่ 3



รูปที่ 4.9 สมดุลพลังงานจุดที่ 3

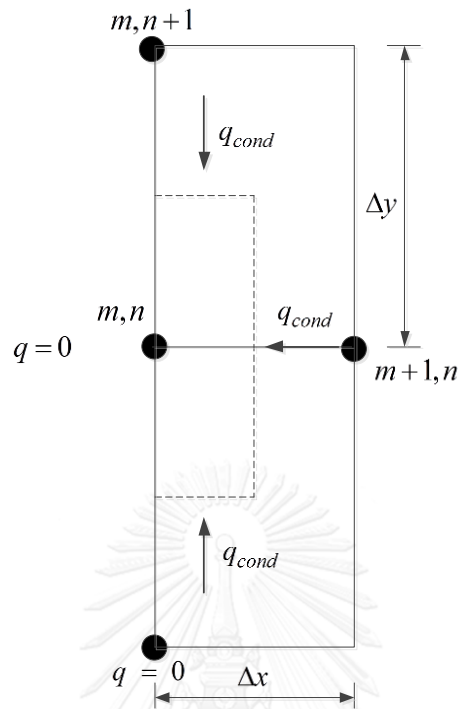
$$q + q_{element,m} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = 0$$

หากพิจารณาเอลิเมนต์ที่จุด 3 สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของการถ่ายเทความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อมภายในเตาเผาเหล็ก ($q_{rad, enclosure}$) มายังพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็ก ซึ่งมีลักษณะเดียวกับจุดที่ 1 ดังนั้นสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$0 + q_{element,m} \left(\frac{\Delta x}{2} \right) + \left(k \frac{\Delta y}{2} \right) \frac{(T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \left(k \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{(T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = \frac{1}{(k \Delta x / \Delta y + k \Delta y / \Delta x)} \left[q_{element,m} \Delta x + k \frac{\Delta y}{\Delta x} T_{m-1,n} + k \frac{\Delta x}{\Delta y} T_{m,n-1} \right] \quad 4.4$$

4.3.4 พิจารณาจุดที่ 4



รูปที่ 4.10 สมดุลพลังงานจุดที่ 4

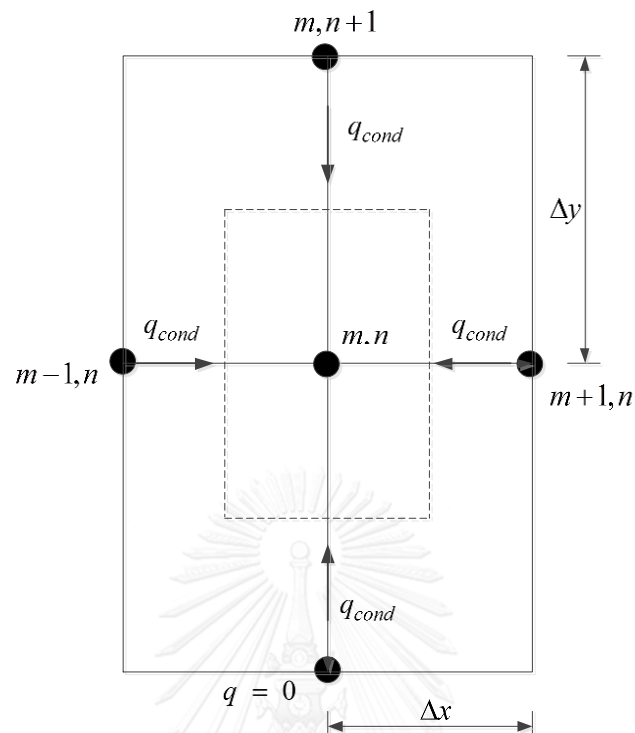
$$q + q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = 0$$

หากพิจารณาเอลิเมนต์ที่จุด 4 จะประกอบด้วย การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน ภายในแท่งเหล็กซึ่งสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$0 + \left(k \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{(T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} + (k \Delta y) \frac{(T_{m+1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \left(k \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{(T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = \frac{1}{(\Delta y / \Delta x) + (\Delta x / \Delta y)} \left[\frac{\Delta y}{\Delta x} T_{m+1,n} + \frac{\Delta x}{2 \Delta y} T_{m,n+1} + \frac{\Delta x}{2 \Delta y} T_{m,n-1} \right] \quad 4.5$$

4.3.5 พิจารณาจุดที่ 5



รูปที่ 4.11 สมดุลพลังงานจุดที่ 5

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

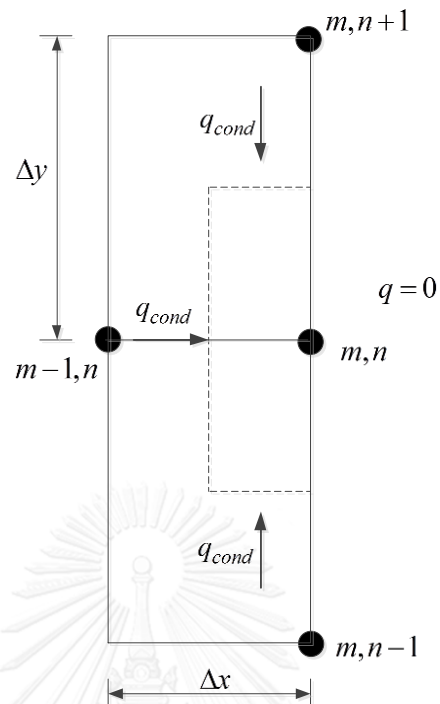
หากพิจารณาเอลิเมนต์ที่จุด 5 จะประกอบด้วย การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนภายในแท่งเหล็กซึ่งสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$(k\Delta y) \frac{(T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + (k\Delta x) \frac{(T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} + (k\Delta y) \frac{(T_{m+1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + (k\Delta x) \frac{(T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = \frac{1}{(2\Delta y/\Delta x) + (2\Delta x/\Delta y)} \left[\frac{\Delta y}{\Delta x} T_{m-1,n} + \frac{\Delta y}{\Delta x} T_{m+1,n} + \frac{\Delta x}{\Delta y} T_{m,n-1} + \frac{\Delta x}{\Delta y} T_{m,n+1} \right] \quad 4.6$$

จากสมการ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อเมื่อแทนค่า $\Delta x = \Delta y$ สมการ 4.6 จะเหมือนสมการ 3.55 ซึ่งคือผลเฉลยโดยประมาณบริเวณจุดภายใน (interior node) ของการนำความร้อนภายในแท่งเหล็ก โดยเงื่อนไขขอบเขตจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมการผลต่างสี่บี่นึ่งภายในของแท่งเหล็ก

4.3.6 พิจารณาจุดที่ 6



รูปที่ 4.12 สมดุลพลังงานจุดที่ 6

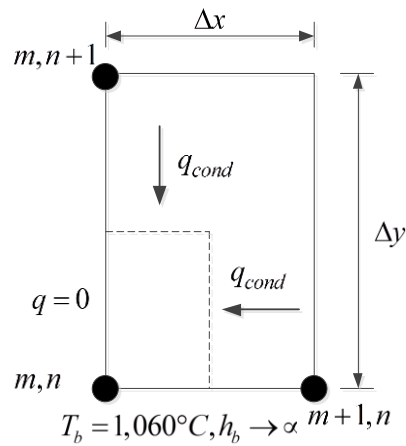
$$q + q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} + q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n-1) \rightarrow (m,n)} = 0$$

หากพิจารณาเอลิเมนต์ที่จุด 6 จะประกอบด้วยการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนภายในแท่งเหล็กซึ่งสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$0 + \left(k \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{(T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} + (k \Delta y) \frac{(T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \left(k \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{(T_{m,n-1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = \frac{1}{(\Delta y / \Delta x) + (\Delta x / \Delta y)} \left[\frac{\Delta y}{\Delta x} T_{m-1,n} + \frac{\Delta x}{2 \Delta y} T_{m,n+1} + \frac{\Delta x}{2 \Delta y} T_{m,n-1} \right] \quad 4.7$$

4.3.7 พิจารณาจุดที่ 7



รูปที่ 4.13 สมดุลพลังงานจุดที่ 7

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

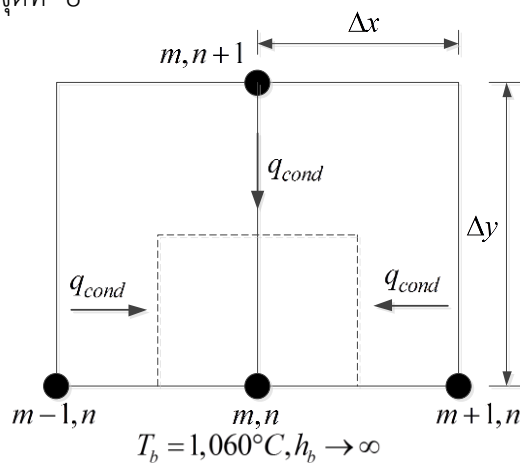
หากพิจารณาเอลิเมนต์ที่จุด 7 จากเงื่อนไขขอบเขตคืออุณหภูมิพื้นด้านล่างแห่งนี้เท่ากับค่าคงที่ ซึ่งมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนโดย $h_b \rightarrow \infty$ (perfect thermal contact) สามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$0 + \left(h_b \frac{\Delta x}{2} \right) (T_b - T_{m,n}) + \left(k \frac{\Delta y}{2} \right) \frac{(T_{m+1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \left(k \frac{\Delta x}{2} \right) \frac{(T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = T_b$$

4.8

4.3.8 พิจารณาจุดที่ 8



รูปที่ 4.14 สมดุลพลังงานจุดที่ 8

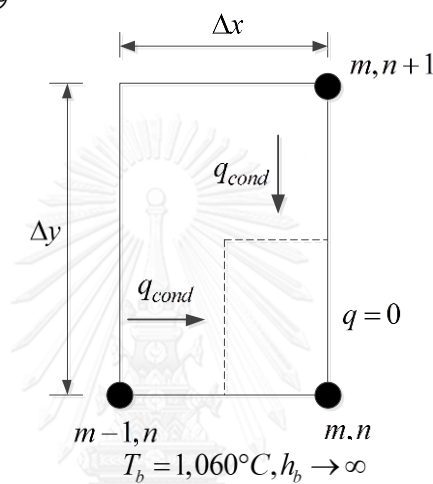
$$q_{(m-1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{\text{bottom}} + q_{(m+1,n) \rightarrow (m,n)} + q_{(m,n+1) \rightarrow (m,n)} = 0$$

หากพิจารณาเอลิเมนต์ที่จุด 8 สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของการถ่ายเทความร้อนลักษณะเดียวกับจุดที่ 7 โดย $h_b \rightarrow \infty$ (perfect thermal contact) ดังนั้นสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$\left(k \frac{\Delta y}{2}\right) \frac{(T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + (h_b \Delta x)(T_b - T_{m,n}) + \left(k \frac{\Delta y}{2}\right) \frac{(T_{m+1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + (k \Delta x) \frac{(T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = T_b \quad 4.9$$

4.3.9 พิจารณาจุดที่ 9



รูปที่ 4.15 สมดุลพลังงานจุดที่ 9

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

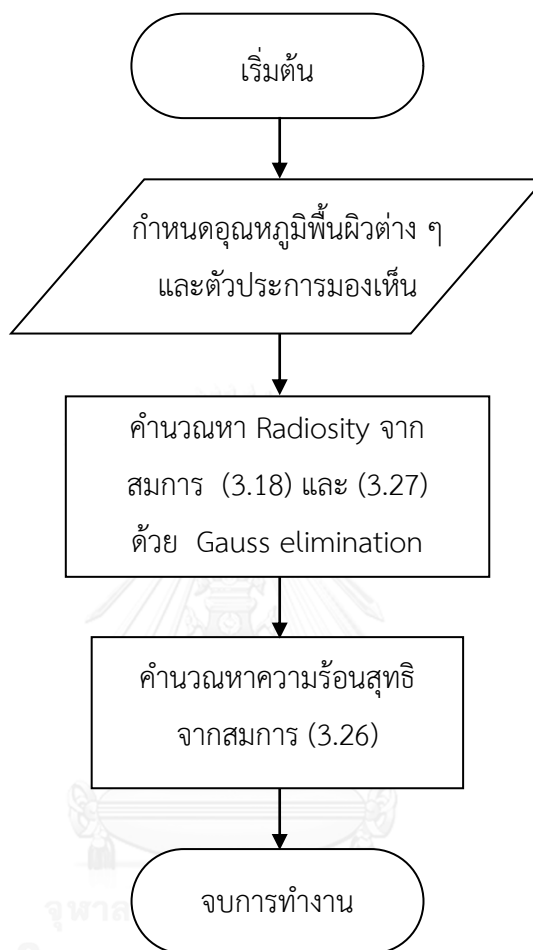
หากพิจารณาเอลิเมนต์ที่จุด 9 สามารถหาได้จากเงื่อนไขขอบเขตของการถ่ายเทความร้อนลักษณะเดียวกับจุดที่ 7 โดย $h_b \rightarrow \infty$ (perfect thermal contact) ดังนั้นสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$0 + \left(h_b \frac{\Delta x}{2}\right) (T_b - T_{m,n}) + \left(k \frac{\Delta y}{2}\right) \frac{(T_{m-1,n} - T_{m,n})}{\Delta x} + \left(k \frac{\Delta x}{2}\right) \frac{(T_{m,n+1} - T_{m,n})}{\Delta y} = 0$$

$$T_{m,n} = T_b \quad 4.10$$

4.4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน

4.41 การคำนวณการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม

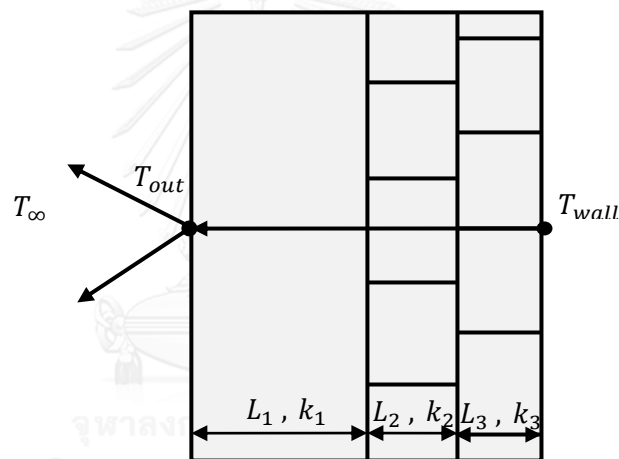


รูปที่ 4.16 ผังการคำนวณแบบจำลอง (block diagram) การแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม

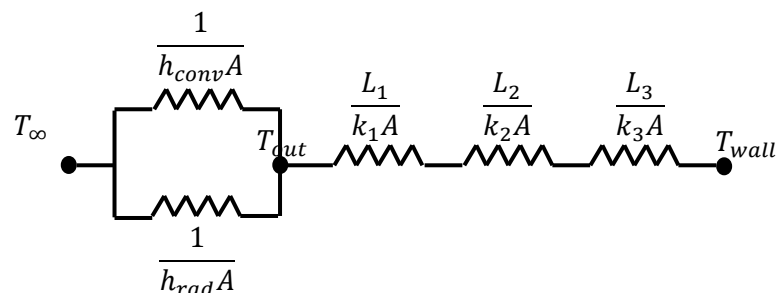
การคำนวณการแผ่รังสีความร้อนของแต่ละพื้นผิวภายในพื้นที่ปิดล้อมของเตาเผาเหล็ก ซึ่งจะคำนวณค่า Radiosity ของแต่ละพื้นผิวจากสมการ 3.18 และ 3.27 โดยคำนวณหาเมทริกซ์ (matrix) ของระบบสมการด้วยการกำจัดแบบเกาส์ (Gauss elimination method) และจากสมการ 3.26 สามารถคำนวณหาการแผ่รังสีความร้อนสุทธิของแต่ละพื้นผิว โดยมีหลักการการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.16

4.4.2 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตา

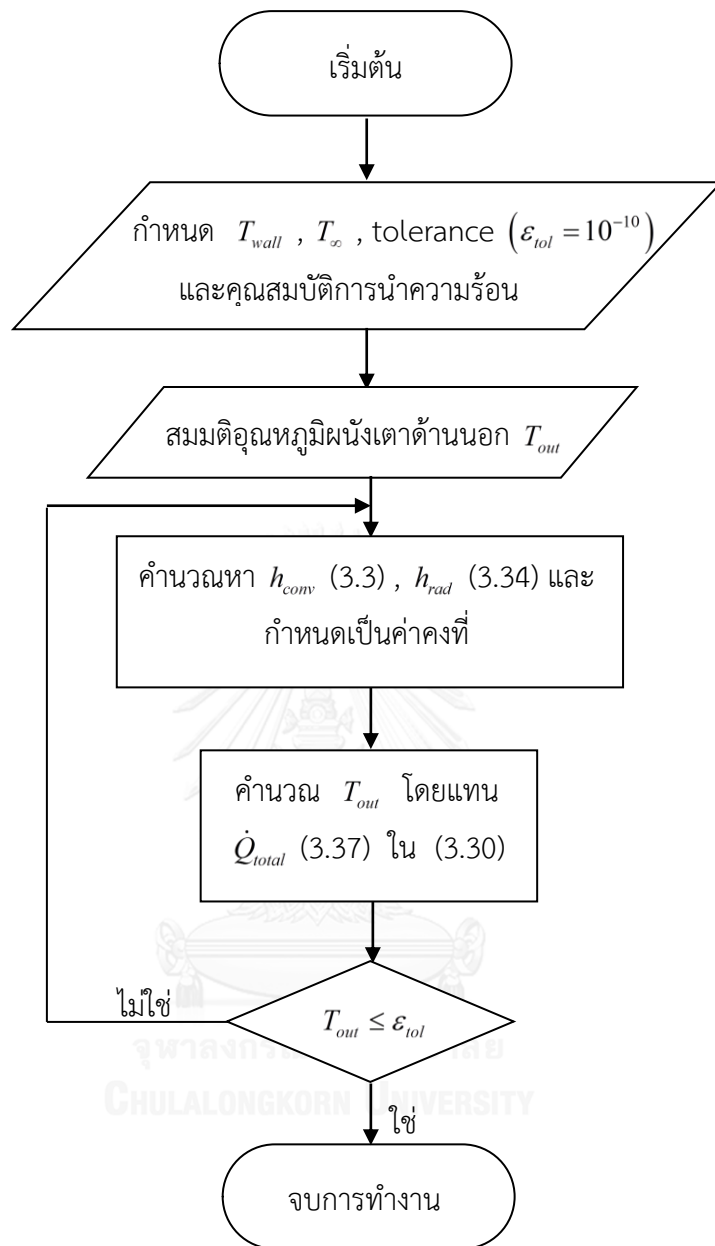
จากรูปที่ 4.17 จะเป็นการกำหนดอุณหภูมิของผนังเตาเป็นค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนผนังเตาแล้ว นอกจากมีการนำความร้อนผ่านผนังเตาและยังมีการพาความร้อนแบบธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อนเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวด้านนอกผนังเตาและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมด้วย โดย Nusselt Number ของผนังเตาด้านข้างซึ่งพิจารณาเป็นพื้นผิวระนาบตามแนวตั้งสามารถหาได้ตามสมการ 3.4 และ Nusselt Number ของผนังเตาด้านบนซึ่งพิจารณาเป็นพื้นผิวระนาบตามแนวนอนสามารถหาได้ตามสมการ 3.5 หากพิจารณาเฉพาะการถ่ายเทความร้อนเฉพาะผนังเตาซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อมแสดงดังรูปที่ 4.18 โดยกระบวนการคำนวณจะเริ่มจากกำหนดอุณหภูมิผนังเตาด้านในและอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และสมมติอุณหภูมิผนังเตาด้านนอก



รูปที่ 4.17 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตา



รูปที่ 4.18 ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของผนังเตา



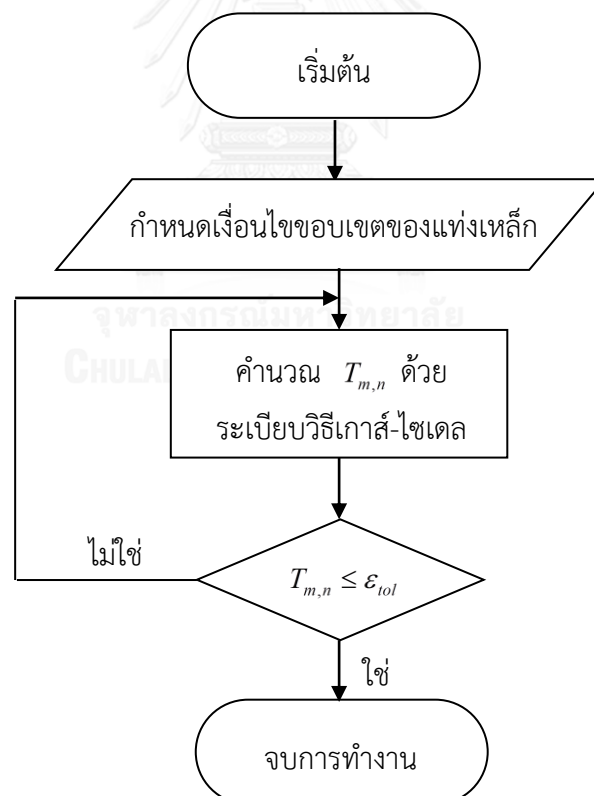
รูปที่ 4.19 ผังการคำนวณแบบจำลอง (block diagram) การถ่ายเทความร้อนผนังเตา

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.17 การถ่ายความร้อนผ่านผนังเตาเผาเหล็กไปสู่สิ่งแวดล้อมด้านนอกเตาเผาเหล็ก สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของความต้านทานทางความร้อนได้แสดงดังรูปที่ 4.18 ซึ่งทำให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยมีหลักการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.19 ซึ่งจะเป็นการคำนวณหาอุณหภูมิผนังด้านนอกเตาเผาเหล็ก (T_{out}) เริ่มจากการกำหนดอุณหภูมิผนังเตาด้านใน (T_{wall}) และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (T_{∞}) และค่ายอมรับความผิดพลาด (tolerance, ϵ_{tol}) เป็นค่าคงที่ จากนั้นสมมติอุณหภูมิผนังด้านนอกเตาเผาเหล็ก (T_{out}) เพื่อที่จะทำการคำนวณค่าที่ถูกต้อง ต่อจากนั้นคำนวณหา

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h_{conv}) จากสมการ 3.3 และ (h_{rad}) จากสมการ 3.34 ให้เป็นค่าคงที่เพื่อที่จะทำการปรับแก้ค่าให้ถูกต้อง และทำการคำนวณ (T_{out}) โดยแทน (\dot{Q}_{total}) จากสมการ 3.37 ลงในสมการ 3.30 หลังจากนั้นทำการตรวจสอบว่า (T_{out}) ที่สมมติขึ้นตอนแรกกับ (T_{out}) ที่ได้จากการคำนวณขึ้นมาใหม่มีค่าน้อยกว่าค่ายอมรับความผิดพลาดหรือไม่ ดังนั้นในการคำนวณขึ้นตอนนี้จะทำการคำนวณซ้ำ (iteration) เพื่อให้ได้ค่า (T_{out}) อยู่เข้าสู่ค่าที่ถูกต้อง

4.4.3 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็ก

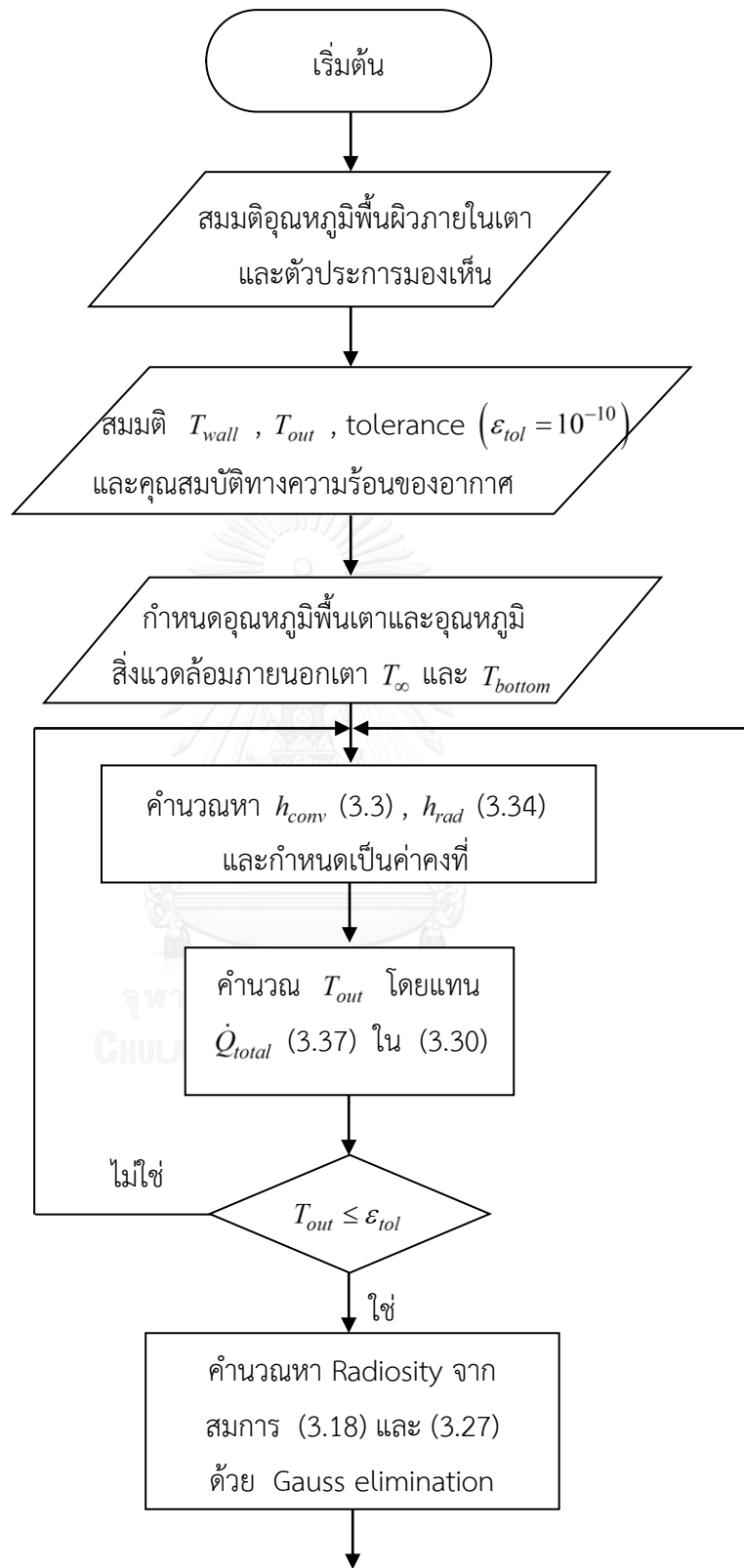
ระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเดล [12] คือสมการที่นำค่าที่ถูกคำนวณจากสมการย่อยแรกนำมาใช้ในการคำนวณสมการย่อยถัด ๆ มา ทำให้คำตอบที่ได้เข้าสู่ผลลัพธ์ได้เร็วขึ้น ดังนั้นระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเดลจึงถูกนำมาใช้ในการคำนวณการนำความร้อนในแท่งเหล็ก ซึ่งระบบจะก่อตัวของปัญหาทางความร้อนในรูปของเมทริกซ์ โดยพิจารณาจากสมดุลความร้อนและเงื่อนไขขอบเขตของปริมาตรควบคุม (control volume) ของจุดนั้น ๆ ดังหัวข้อที่ 4.3

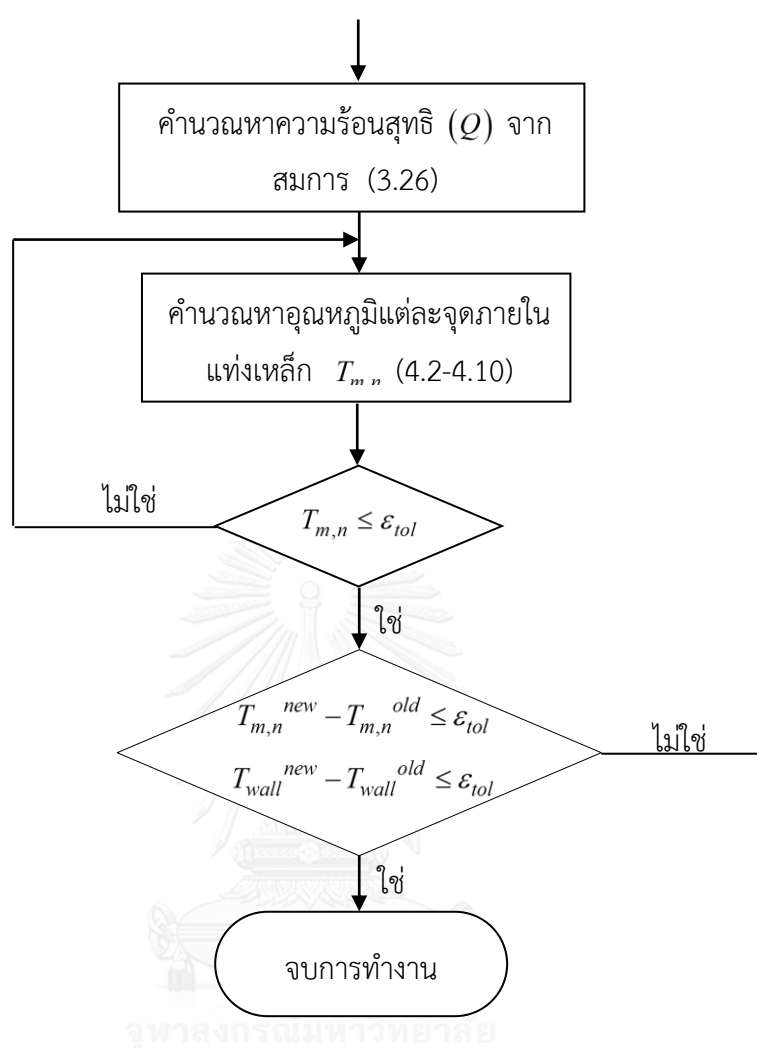


รูปที่ 4.20 ผังการคำนวณแบบจำลอง (block diagram) การถ่ายเทความร้อนภายในแท่งเหล็ก

4.4.4 การคำนวณการถ่ายเทความร้อนรวมของทั้งระบบ

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของทั้งระบบแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ การคำนวณการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม , การคำนวณการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตา และการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในแท่งเหล็ก โดยระบบเริ่มจากการสมมติค่าอุณหภูมิพื้นผิวภายในเตาเผาเหล็ก และกำหนดค่าอุณหภูมิพื้นด้านล่างเตา อุณหภูมิบรรยากาศภายนอกเตา และค่าตัวประกอบการมองเห็น ระบบจะทำการคำนวณหาค่าการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเตา โดยทำการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและกำหนดเป็นค่าคงที่ จากนั้นระบบทำการคำนวณซ้ำจนกว่าค่าการถ่ายเทความร้อนของผนังเตาจะลู่เข้าซึ่งจะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิของผนังเตามา และระบบจะทำการคำนวณหาการแผ่รังสีความร้อนสุทธิของแต่ละพื้นผิวภายในเตาเผาเหล็ก ซึ่งทำการหาค่าโดยคำนวณค่า Radiosity ซึ่งปัญหาจะจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ ดังนั้นการคำนวณการแผ่รังสีความร้อนภายในเตาเผาเหล็กใช้ระเบียบวิธีการกำจัดแบบเกาส์ในแก้ไขปัญหา จากนั้นระบบจะนำค่าความร้อนพลักซ์ที่ได้มาคำนวณหาการกระจายตัวอุณหภูมิของแท่งเหล็ก เนื่องจากเงื่อนไขขอบเขตพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กที่ใช้หาอุณหภูมิเป็นสมการไม่เชิงเส้น (nonlinear) เนื่องจากมีสมการการถ่ายเทความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อม ($q_{rad, enclosure}$) อยู่ด้วย ดังนั้นจึงต้องทำสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น (linear) กำหนดค่า $q_{rad, enclosure}$ ค่าคงที่ ระบบจะทำการคำนวณตามสมการสมดุลความร้อนของแต่ละจุดซึ่งปัญหาของสมการจะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ โดยใช้ระเบียบวิธีการทำซ้ำแบบเกาส์-ไซเดลของอุณหภูมิแต่ละจุด จากการคำนวณดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้ขึ้นมาใหม่ที่ผิวด้านบนของแท่งเหล็ก ระบบจะทำการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิใหม่ที่หาได้กับอุณหภูมิเก่าที่หาได้จากการคำนวณการแผ่รังสีความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก โดยใช้ค่าถ่วงน้ำหนัก (weighting factor, $\omega=0.5$) ระหว่างค่าเก่ากับค่าใหม่ และนำค่าอุณหภูมิของพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กกลับไปคำนวณซ้ำหาอุณหภูมิผนังเตาและอุณหภูมิเพดานเตา และคำนวณหาการแผ่รังสีความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก และคำนวณหาอุณหภูมิภายในแท่งเหล็กจนกว่าค่าตอบจะลู่เข้า โดยกำหนดค่าความคลาดเคลื่อน (tolerance) เท่ากับ 10^{-10} และสมมติอุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละพื้นผิวได้แก่ อุณหภูมิผนังเตา , อุณหภูมิเพดานเตา , อุณหภูมิพื้นผิวด้านบนแท่งเหล็ก คือ $1,000^{\circ}\text{C}$ โดยกำหนดอุณหภูมิพื้นผิวเตาหรืออุณหภูมิผิวด้านล่างแท่งเหล็กเท่ากับ $1,060^{\circ}\text{C}$ แสดงดังรูปที่ 4.20





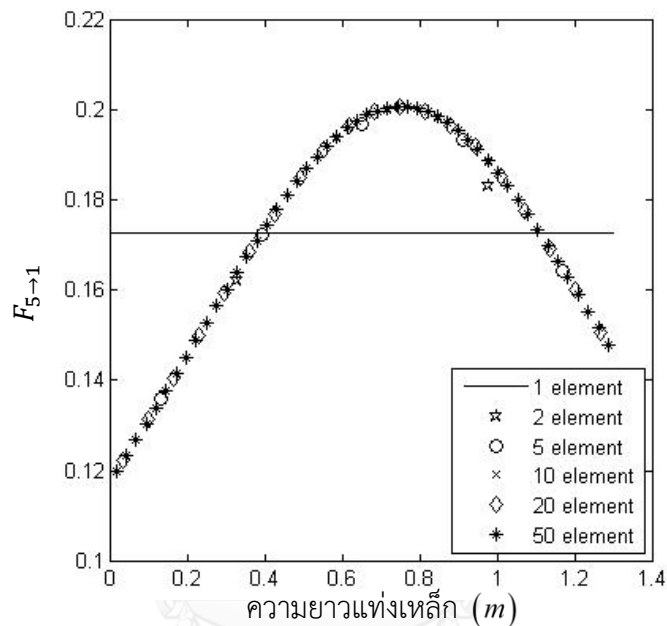
รูปที่ 4.21 ผังการคำนวณแบบจำลอง (block diagram) การถ่ายเทความร้อนของทั้งระบบ

บทที่ 5

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

5.1 ตัวประกอบการมองเห็นภายในเตาเผาเหล็ก

5.1.1 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและเปลวไฟ

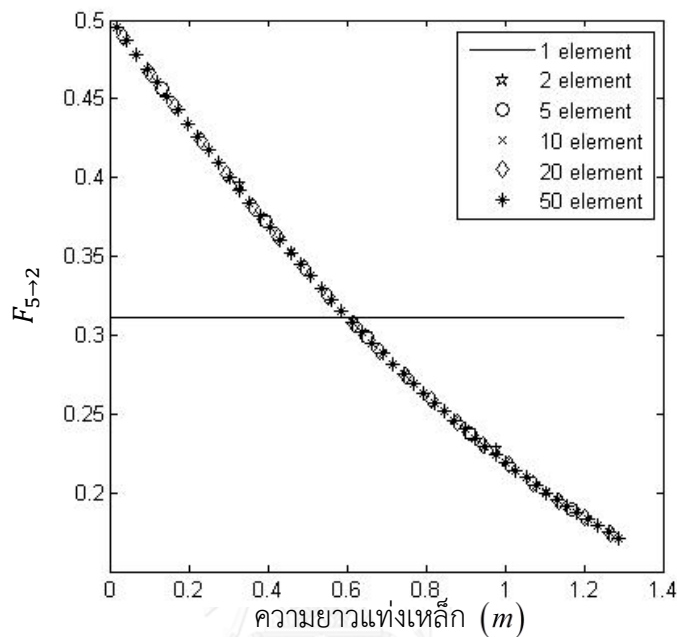


รูปที่ 5.1 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและเปลวไฟ

รูปที่ 5.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กและพื้นผิวเปลวไฟด้วยจำนวนพื้นผิวดัง ๆ กัน ค่าตัวประกอบการมองเห็นจะเป็นตัวแทนของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดความยาวเอลิเมนต์นั้น ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวเปลวไฟของ 1 , 2 , 5 , 10 , 20 และ 50 เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ ก.2 - ก.7 ในภาคผนวก ก โดยค่าของตัวประกอบการมองเห็นในกรณีของ 1 พื้นผิวมีค่า 0.17273 ในกรณีของ 2 พื้นผิวค่าตัวประกอบการมองเห็นคือ 0.162223 และ 0.183242 ซึ่งเป็นค่าที่แทนในช่วงของ $0 \leq x \leq 0.65 \text{ m}$ และ $0.66 \leq x \leq 1.3 \text{ m}$ ตามลำดับ จากรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบการมองเห็นของจำนวน 50 พื้นผิว มีค่าตั้งแต่ 0.119831 ถึง 0.200866 โดยค่าในช่วง $0.4 \leq x \leq 1.15 \text{ m}$ มีค่าสูงมากกว่าในค่าของ 1 พื้นผิว เนื่องจากว่าเปลวไฟอยู่ในตำแหน่งของช่วงนี้ และค่าตัวประกอบการมองเห็นสูงสุดคืออยู่ที่จุดศูนย์กลางของเปลวไฟที่ 0.75 m โดยค่าตัวประกอบการมองเห็นในช่วงเริ่มต้นและสุดท้ายของพื้นผิวของแท่งเหล็กมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากว่าพื้นผิวของแท่งเหล็กนั้นอยู่ไกล

จากเปลวไฟนั่นเอง ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพื้นผิว 1 , 2 , 5 , 10 และ 20 พื้นผิวระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับเปลวไฟคือ 2.37% , 2.12% , 0.85% , 0.42% และ 0.15% ตามลำดับ

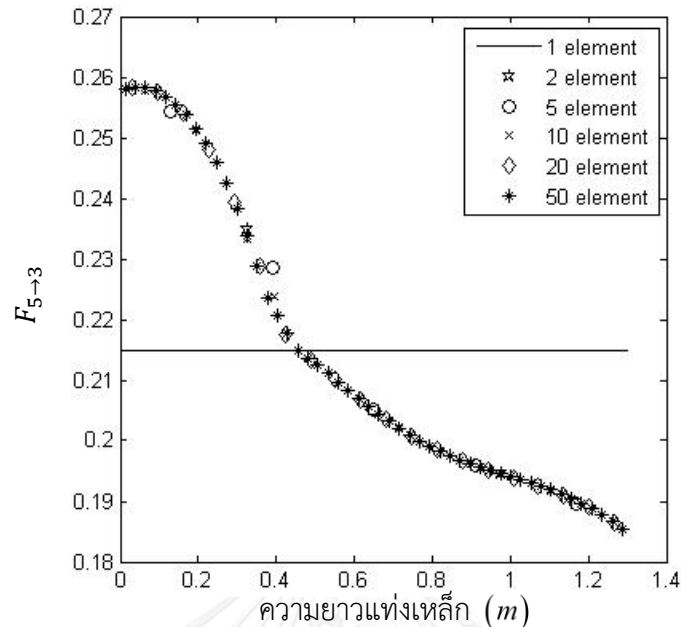
5.1.2 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและผนังเตาด้านข้าง



รูปที่ 5.2 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและผนังเตาด้านข้าง

รูปที่ 5.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กและพื้นผิวผนังเตาดด้วยจำนวนพื้นผิวต่าง ๆ กัน ค่าตัวประกอบการมองเห็นจะเป็นตัวแทนของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดความยาวเอลิเมนต์นั้น ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวผนังเตาด้านข้างของ 1 , 2 , 5 , 10 , 20 และ 50 เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ ก.2 - ก.7 ในภาคผนวก ก โดยค่าของตัวประกอบการมองเห็นในกรณีของ 1 พื้นผิวมีค่า 0.311003 และค่าตัวประกอบการมองเห็นของจำนวน 50 พื้นผิว มีค่าตั้งแต่ 0.49559 ถึง 0.17115 จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบการมองเห็นมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามค่าตัวประกอบการมองเห็นลดลงอย่างช้า ๆ ตลอดความยาวของพื้นผิวแท่งเหล็ก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าพื้นผิวของแท่งเหล็กบริเวณ $x=0$ m อยู่ใกล้ผนังเตามากกว่าพื้นผิวบริเวณ $x=1.3$ m จึงทำให้ค่าตัวประกอบการมองเห็นมีค่ามากกว่านั่นเอง ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพื้นผิว 1 , 2 , 5 , 10 และ 20 พื้นผิวระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับผนังเตาคือ 9.7% , 4.91% , 1.96% , 0.96% และ 0.34% ตามลำดับ

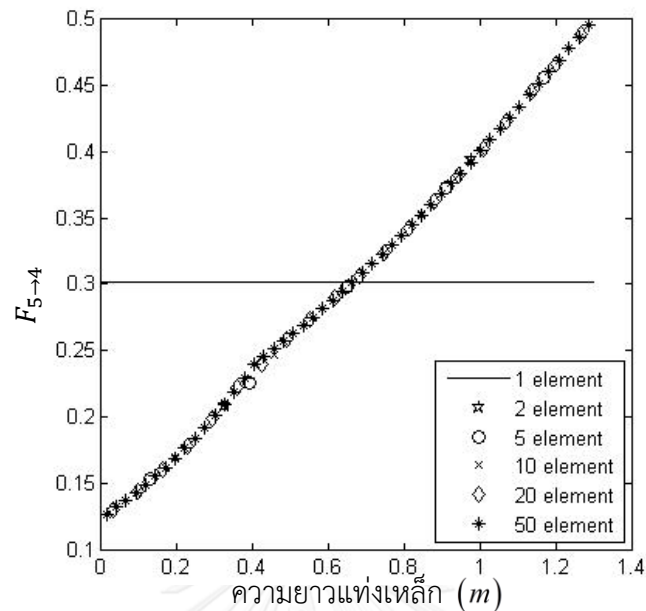
5.1.3 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและผนังเตาด้านบน



รูปที่ 5.3 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและผนังเตาด้านบน

รูปที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กและพื้นผิวผนังเตาด้านบนด้วยจำนวนพื้นผิวต่าง ๆ กัน ค่าตัวประกอบการมองเห็นจะเป็นตัวแทนของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดความยาวเอลิเมนต์นั้น ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวผนังเตาด้านบนของ 1, 2, 5, 10, 20 และ 50 เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ ก.2 - ก.7 ในภาคผนวก ก โดยค่าของตัวประกอบการมองเห็นในกรณีของ 1 พื้นผิวมีค่า 0.21484 และค่าตัวประกอบการมองเห็นของจำนวน 50 พื้นผิว มีค่าตั้งแต่ 0.25813 ถึง 0.18545 จะเห็นได้ว่าเปลวไฟเป็นตัวบังการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวเพดานเตา ดังนั้นที่ความยาวของแท่งเหล็กช่วง $0 \leq x \leq 0.6$ m ค่าตัวประกอบมองเห็นมีค่ามากกว่าช่วง $1 \leq x \leq 1.3$ m ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าพื้นผิวเปลวไฟประมาณครึ่งหนึ่งบังการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวเพดานเตาในช่วง $0 \leq x \leq 0.6$ m ในทางตรงกันข้ามพื้นผิวเปลวไฟเกือบทั้งหมดบังการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวเพดานเตาในช่วง $1 \leq x \leq 1.3$ m ทำให้ในช่วงช่วง $0 \leq x \leq 0.6$ m ค่าตัวประกอบมองเห็นมีค่าตัวประกอบการมองเห็นมากกว่าช่วง $1 \leq x \leq 1.3$ m ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพื้นผิว 1, 2, 5, 10 และ 20 พื้นผิวระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับผนังเตาคือ 2.49% , 1.47% , 0.72% , 0.65% และ 0.47% ตามลำดับ

5.1.4 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและพื้นผิวสมมาตร

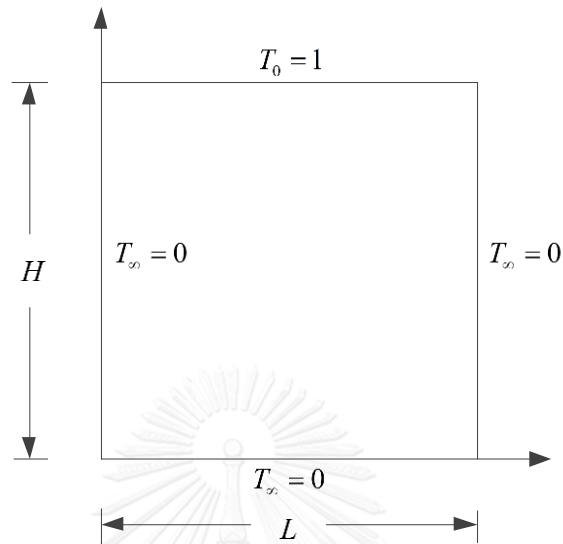


รูปที่ 5.4 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างแท่งเหล็กและพื้นผิวสมมาตร

รูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กและพื้นผิวสมมาตรด้วยจำนวนพื้นผิวต่าง ๆ กัน ค่าตัวประกอบการมองเห็นจะเป็นตัวแทนของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งมีค่าคงที่ตลอดความยาวเอลิเมนต์นั้น ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวสมมาตรของ 1 , 2 , 5 , 10 , 20 และ 50 เอลิเมนต์แสดงดังตารางที่ ก.2 - ก.7 ในภาคผนวก ก โดยค่าของตัวประกอบการมองเห็นในกรณีของ 1 พื้นผิวมีค่า 0.30216 และค่าตัวประกอบการมองเห็นของจำนวน 50 พื้นผิว มีค่าตั้งแต่ 0.12645 ถึง 0.49559 ค่าตัวประกอบการมองเห็นมีค่ามากที่สุดที่จุดปลายของแท่งเหล็ก และค่าตัวประกอบการมองเห็นมีค่าต่ำสุดที่จุดเริ่มต้นของแท่งเหล็ก สามารถอธิบายได้ว่าพื้นผิวของแท่งเหล็กบริเวณที่ $x=0$ m อยู่ไกลจากพื้นผิวสมมาตรมากกว่าพื้นผิวของแท่งเหล็กบริเวณที่ $x=1.3$ m ทำให้ค่าตัวประกอบการมองเห็นมีค่าต่ำกว่า แม้ว่าลักษณะของพื้นผิวสมมาตรมีความคล้ายกับพื้นผิวผนังเตา แต่พื้นผิวแท่งเหล็กในกรณีนี้ถูกบังการมองเห็นโดยบางส่วนของเปลวไฟ ดังนั้นบริเวณที่ $0 \leq x \leq 0.4$ m ค่าตัวประกอบการมองเห็นมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของพื้นผิว 1 , 2 , 5 , 10 และ 20 พื้นผิวระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับผนังเตาคือ 10.87% , 5.59% , 2.21% , 1.25% และ 0.57% ตามลำดับ

5.2 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

5.2.1 ตรวจสอบผลเฉลยแม่นยำตรงกับผลระเบียบวิธีเชิงเลข



รูปที่ 5.5 ปัญหาการนำความร้อนแบบ 2 มิติ

ลักษณะปัญหาการนำความร้อนแบบ 2 มิติ ภายใต้สภาวะคงตัว (steady state) ไม่ขึ้นกับเวลา โดยกำหนดอุณหภูมิทั้ง 4 ด้าน ไม่มีการถ่ายเทความร้อนด้านนอกและไม่มีการผลิตความร้อน (heat generate) เกิดขึ้น

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของปริมาตรควบคุม คือ

$$x=0 : T_{\infty} = 0$$

$$x=L : T_{\infty} = 0$$

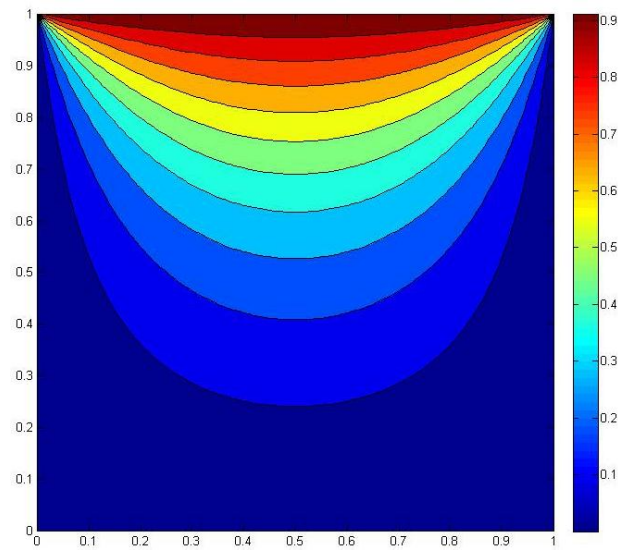
$$y=0 : T_{\infty} = 0$$

$$y=H : T_0 = 1$$

ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของลักษณะปัญหาดังกล่าว [13] ได้แก่

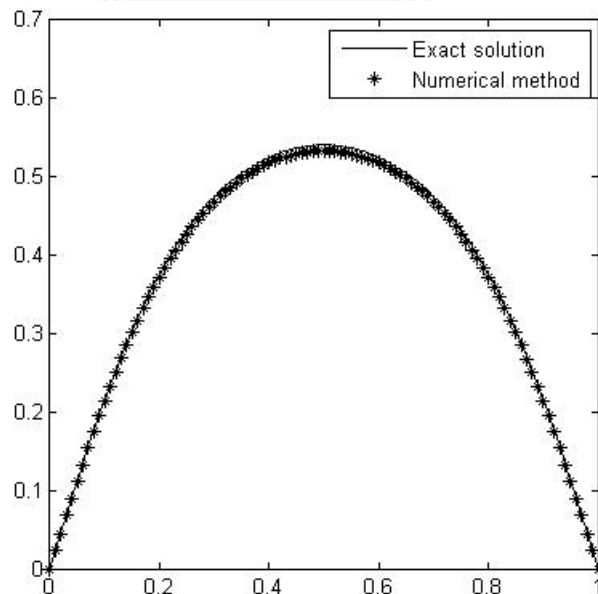
$$T_{(x,y)} = T_{\infty} + \frac{4(T_0 - T_{\infty})}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1) \sinh\left[\frac{(2n+1)\pi H}{b}\right]} \sin\left[\frac{(2n+1)\pi x}{b}\right] \cdot \sinh\left[\frac{(2n+1)\pi y}{b}\right]$$

5.1



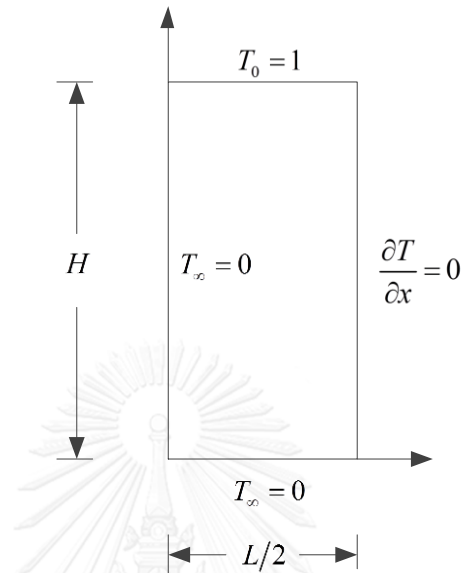
รูปที่ 5.6 การกระจายตัวของอุณหภูมิของผลเฉลยแม่นยำ

จากปัญหาการนำความร้อนแบบ 2 มิติ และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดสามารถคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงเลขตามสมการ 4.6 โดยกำหนดระยะห่างของจุดเท่ากัน ($\Delta x = \Delta y$) คำตอบของผลเฉลยแม่นยำและคำตอบแบบระเบียบวิธีเชิงเลขมีค่าใกล้เคียงมาก แสดงให้เห็นว่าการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบกำหนดเงื่อนไขขอบเขตข้างต้นมีความถูกต้อง ซึ่งผลการตรวจสอบโปรแกรมการคำนวณของผลเฉลยแม่นยำและระเบียบวิธีเชิงเลขดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการคำนวณของผลเฉลยแม่นยำและระเบียบวิธีเชิงเลขที่ $y = 0.75$

ลักษณะปัญหาของงานวิจัยนี้ได้พิจารณาแท่งเหล็กเพียงครั้งเดียวเนื่องจากโครงสร้างของเตาเผาเหล็กและแท่งเหล็กมีลักษณะสมมาตรในแนวแกน x โดยสามารถตรวจสอบการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จากปัญหาดังนี้



รูปที่ 5.8 ปัญหาการนำความร้อนแบบสมมาตรตามแกน x

กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของปริมาตรควบคุม คือ

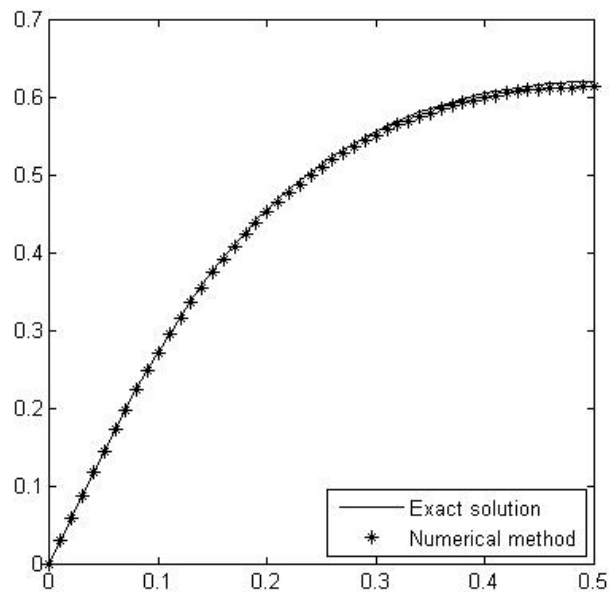
$$x=0 \quad : \quad T_\infty = 0$$

$$x=L/2 \quad : \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

$$y=0 \quad : \quad T_\infty = 0$$

$$y=H \quad : \quad T_0 = 1$$

จากปัญหาการนำความร้อนแบบ 2 มิติ แบบสมมาตรตามแกน x และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดสามารถคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงเลขตามสมการ 4.6 โดยกำหนดระยะห่างของจุดเท่ากัน ($\Delta x = \Delta y$) ค่าตอบของผลเฉลยแม่นยำตรงและคำตอบแบบระเบียบวิธีเชิงเลขมีค่าใกล้เคียงมาก แสดงให้เห็นว่าการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบกำหนดเงื่อนไขขอบเขตข้างต้นมีความถูกต้อง ซึ่งผลการตรวจสอบโปรแกรมการคำนวณของผลเฉลยแม่นยำตรงและระเบียบวิธีเชิงเลขดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบผลการคำนวณแบบสมมาตรของผลเฉลยแม่นยำตรงและระเบียบวิธีเชิงเลขที่ $y = 0.8$

5.2.2 ตรวจสอบความอิสระของระยะระหว่างจุด (grid independent)

เป็นการตรวจสอบระยะห่างของจุดในแนวแกน x และแกน y แต่ละขนาดต่าง ๆ ซึ่งจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณและระยะเวลาในการคำนวณ ซึ่งถ้าระยะระหว่างจุดมีขนาดใหญ่จะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนมาก แต่จะใช้ระยะเวลาในการคำนวณน้อยเนื่องจากจำนวนของเอลิเมนต์มีจำนวนน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าระยะระหว่างจุดมีขนาดเล็กจะส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนน้อย แต่จะใช้ระยะเวลาในการคำนวณมากเนื่องจากจำนวนของเอลิเมนต์มีจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องตรวจสอบระยะระหว่างจุดที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณและระยะเวลาในการคำนวณ ซึ่งสามารถเป็นที่ยอมรับได้ในทางวิศวกรรม ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบผลการคำนวณความอิสระของระยะระหว่างจุดในแนวแกน x และแกน y ที่ขนาด 0.01 m ($\Delta x = \Delta y$) สามารถแสดงผลการคำนวณตามตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ผลการตรวจสอบความอิสระของระยะระหว่างจุด

$\Delta x = \Delta y (m)$	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)	ระยะเวลาในการคำนวณ (sec)
0.01	-	805
0.013	0.0034	263
0.026	0.019	16
0.052	0.043	3
0.065	0.053	2

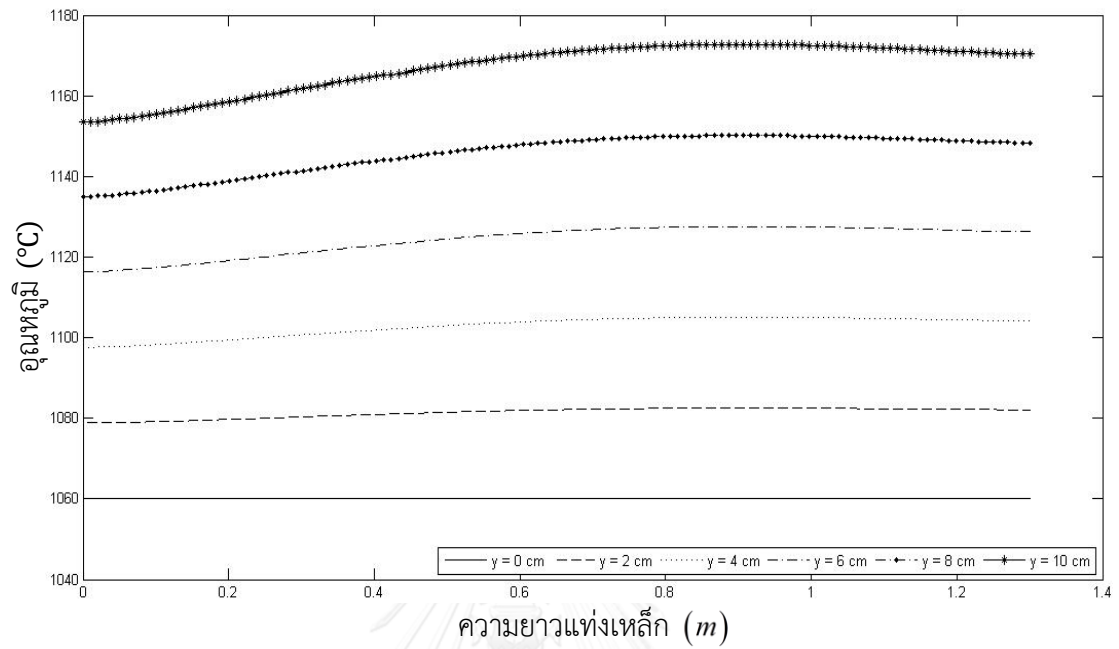
จากผลการเปรียบเทียบระยะระหว่างจุดจึงเลือกใช้ $\Delta x = 0.026 \text{ m}$ เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสามารถยอมรับได้ในทางวิศวกรรม และระยะเวลาในการคำนวณไม่มาก ซึ่งผลการคำนวณที่ได้สอดคล้องกับค่าของการคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นที่ 50 ค่า โดยในแกน y เลือกใช้ระยะระหว่างจุด $\Delta y = 0.01 \text{ m}$ ดังนั้นจำนวนจุดในแนวแกน x 51 จุด ในแนวแกน y 11 จุด และจำนวนจุดทั้งหมด 561 จุด แต่เนื่องจากกำหนดอุณหภูมิที่พื้นด้านล่างแท่งเหล็กที่ ($y=0$) ทำให้เหลือจำนวนจุดในแนวแกน y 10 จุด ดังนั้นจำนวนจุดที่ไม่รู้ค่า (unknown) ทั้งหมด 510 จุด กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ในการคำนวณ 10^{-10} หากพิจารณาระยะระหว่างจุดไม่เท่ากัน $\Delta x \neq \Delta y$ สามารถคำนวณระเบียบวิธีเชิงเลขได้ด้วยสมการ 4.2 - 4.10

5.3 ผลการคำนวณการกระจายตัวอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนในแท่งเหล็ก

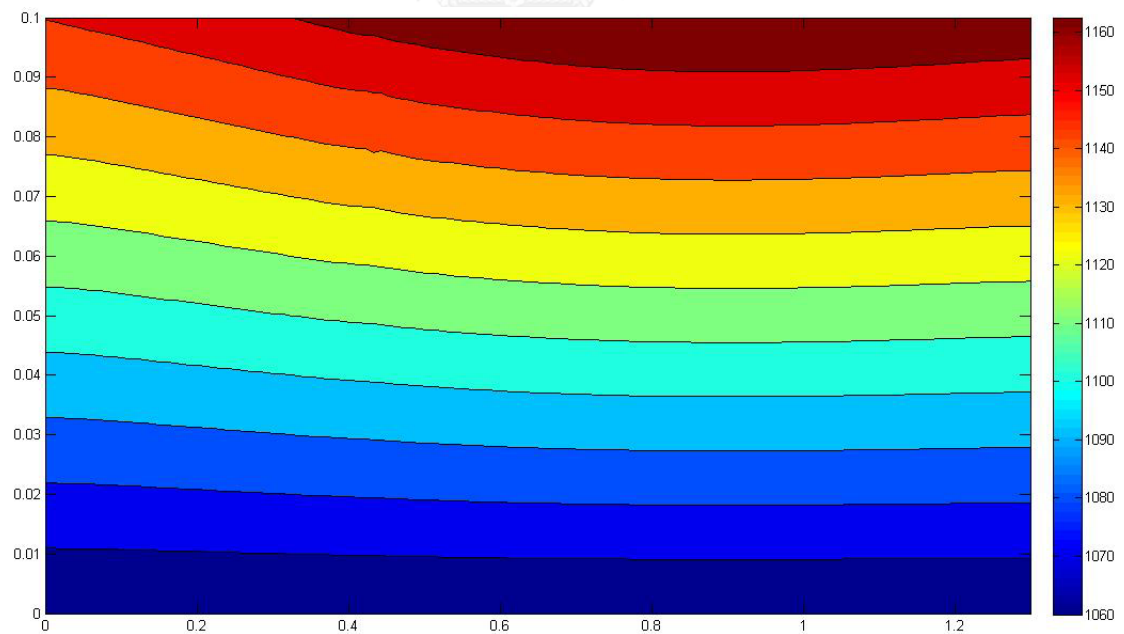
5.3.1 ผลการคำนวณการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก

แท่งเหล็กที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติคือ เหล็กคาร์บอนต่ำ , ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคือ 0.9 และสัมประสิทธิ์การนำความร้อน $30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กตามระยะความสูงกับตามระยะความยาวของแท่งเหล็กแสดงดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 จากรูปพบว่าอุณหภูมิมิลักษณะเพิ่มสูงขึ้นอย่างคงที่ตามระยะความสูงจากด้านล่างสู่ด้านบนของแท่งเหล็ก โดยระยะความสูงของแท่งเหล็กตั้งแต่ 0–4 cm ผลต่างของอุณหภูมิในแนวระดับมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากว่าที่ระยะความสูงนี้อยู่ใกล้กับพื้นผิวด้านล่างแท่งเหล็กหรือพื้นเตาซึ่งกำหนดอุณหภูมิคงที่ $1,060^\circ\text{C}$ ตลอดระยะตามความยาวของแท่งเหล็ก ส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อย และเมื่อพิจารณาระยะความสูงของแท่งเหล็กตั้งแต่ 4–10 cm ผลต่างของอุณหภูมิในแนวระดับมีค่าการเปลี่ยนแปลงมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวด้านบนของแท่งเหล็กซึ่งเป็นผลมาจากตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวด้านบนแท่งเหล็กกับพื้นผิวอื่น ๆ และพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กได้รับการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวอื่น ๆ ภายในเตาเผาเหล็ก หากพิจารณาอุณหภูมิ

พื้นผิวด้านบนแห่งเหล็กพบว่า ที่ความยาวแห่งเหล็กตั้งแต่ 0–0.8 m อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างคงที่และช่วงความยาวแห่งเหล็กตั้งแต่ 0.8–1.3 m อุณหภูมิมีค่าลดลง



รูปที่ 5.10 อุณหภูมิในแห่งเหล็กของแต่ละความสูงตามแนวยาวของแห่งเหล็ก

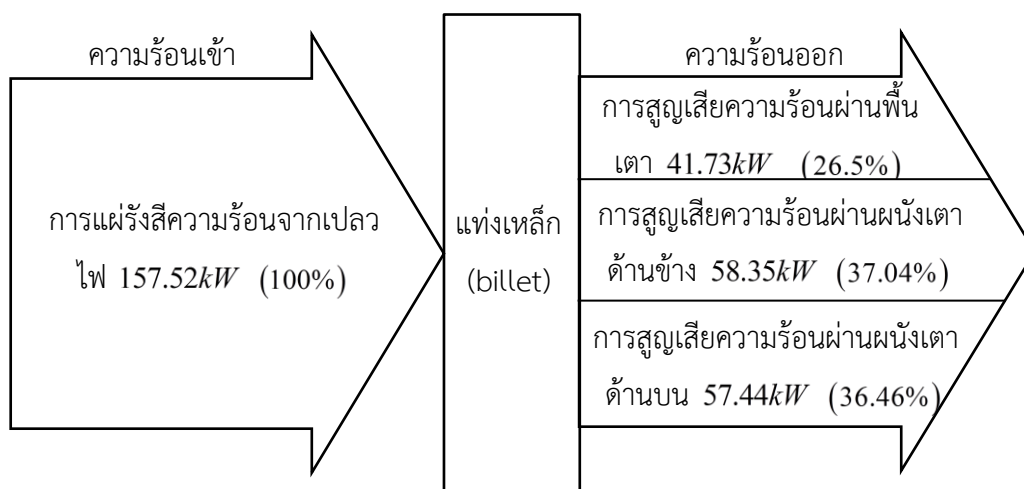


รูปที่ 5.11 การกระจายตัวของอุณหภูมิในแห่งเหล็ก

โดยที่อุณหภูมิสูงสุดของพื้นผิวด้านบนแห่งเหล็กมีค่า $1,172.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอยู่ใกล้กับตำแหน่งของหัวเผา ที่ถูกติดตั้งบริเวณ 0.75 m ของเตาเผาเหล็ก ส่งผลทำให้อุณหภูมิของแห่งเหล็กในช่วงนี้จึงมีค่าสูง และอุณหภูมิต่ำสุดของพื้นผิวด้านบน $1,153.59\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยผลต่างของอุณหภูมิพื้นผิวด้านบนแห่งเหล็กคือ $19.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวด้านบนแห่งเหล็กมีค่า $1,167.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของแห่งเหล็กมีความไม่สม่ำเสมอ โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของแห่งเหล็กอยู่ที่ 34.07°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณของตัวประกอบการมองเห็นดังหัวข้อที่ 5.1 ข้างต้น โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของกึ่งกลางแห่งเหล็กมีค่า $1,113.51\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.3.2 ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของแห่งเหล็ก

จากผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของแห่งเหล็กพบว่า แห่งเหล็กได้รับการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนเพียงอย่างเดียวมีค่า 157.52 kW หรือคิดเป็น 100% ซึ่งการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นประกอบด้วย การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตา , การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้าง และการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านบนแสดงดังตารางที่ 5.2 จากการสูญเสียความร้อนดังกล่าวพบว่า การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่า 58.35 kW (37.04%) และ 57.44 kW (36.46%) ตามลำดับหรือคิดเป็น 73.5% ของการสูญเสียความร้อนทั้งหมดซึ่งเป็นการสูญเสียความร้อนมากที่สุดแสดงดังรูปที่ 5.12 ซึ่งสามารถลดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาได้ด้วยการหุ้มฉนวน ส่งผลให้อุณหภูมิของผนังเตามีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟมีค่าลดลง และช่วยทำให้อุณหภูมิในแห่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาจะเห็นได้ว่าการสูญเสียความร้อนมีค่า 41.73 kW หรือคิดเป็น 26.5% ของการสูญเสียความร้อนทั้งหมด ซึ่งสามารถลดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาได้ด้วยการหุ้มฉนวนที่พื้นด้านล่างเตาเช่นกัน ซึ่งช่วยให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในแห่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น จากการวิเคราะห์สมดุลพลังงานทางความร้อนของแห่งเหล็กสามารถพิจารณาได้โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่าง ๆ ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้น



รูปที่ 5.12 สมดุลความร้อนของแท่งเหล็ก

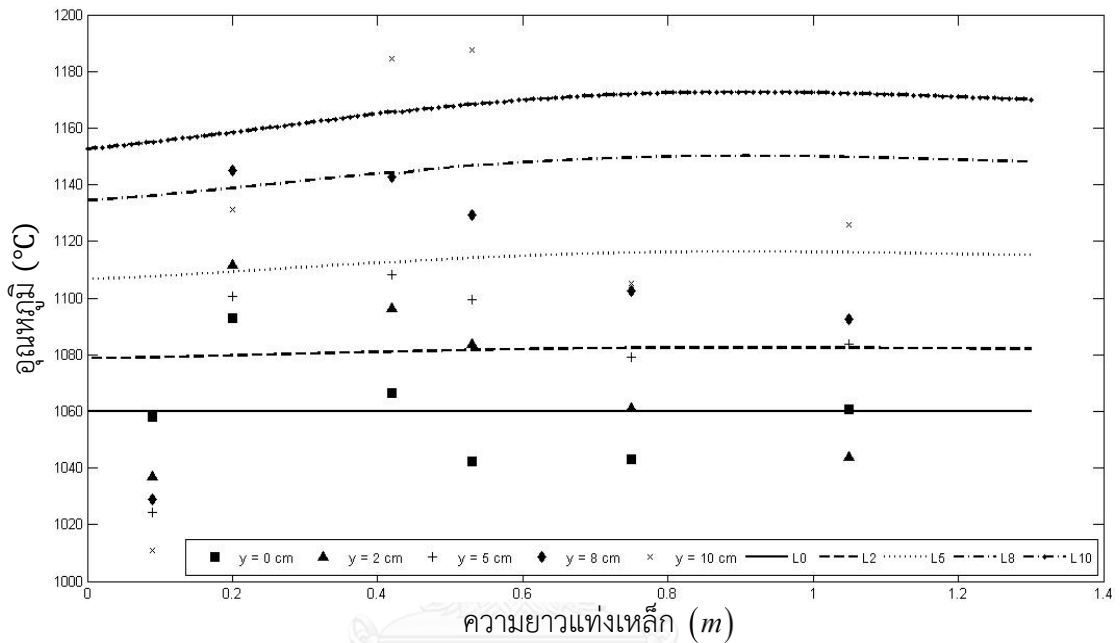
ตารางที่ 5.2 การถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

ความร้อนเข้า	kW	%	ความร้อนออก	kW	%
การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟ	157.52	100	การสูญเสียผ่านพื้นเตา	41.73	26.5
			การสูญเสียผ่านผนังเตาด้านข้าง	58.35	37.04
			การสูญเสียผ่านผนังเตาด้านบน	57.44	36.46
ความร้อนเข้ารวม	157.52	100	ความร้อนออกรวม	157.52	100

5.4 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการตรวจวัดจากโรงงาน

รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณอุณหภูมิของแท่งเหล็กกับผลการตรวจวัดจากโรงงาน [9] โดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ กับระยะตามความสูงของแท่งเหล็ก ซึ่งกราฟจุดแสดงค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน และกราฟเส้นแสดงค่าที่ได้จากการคำนวณที่ระยะความสูงเดียวกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน ค่าอุณหภูมิของแท่งเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดถูกบันทึกค่าด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน (thermal imaging camera) ที่บริเวณทางออกของแท่งเหล็กก่อนที่แท่งเหล็กจะถูกนำไปรีด ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ปลายแท่งเหล็กมีค่าลดลงมาก จากการสูญเสียความร้อนสู่บรรยากาศขณะที่แท่งเหล็กกำลังถูกดันออกมา แต่งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิของแท่งเหล็กเพียงครึ่งหนึ่งของส่วนด้านในเตาเผา ซึ่งมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน x ดังนั้นระยะของค่าที่ได้จากการตรวจวัดแสดงดังตารางที่ 5.3 จากการเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัดกับผลจากการคำนวณพบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณมีความสอดคล้องเชิงคุณภาพ และจากการคำนวณ

ระยะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่วัดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 5.4 พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดคือ 0.06% และมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ระยะ $x=0.09 \text{ m}$ ซึ่งสาเหตุมาจากการตรวจวัดที่บริเวณทางออกของแท่งเหล็กดัดที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่จุดต่าง ๆ สามารถยอมรับได้ในทางวิศวกรรม ดังนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กในระดับที่ยอมรับและเชื่อถือได้



รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบผลการตรวจวัดกับผลการคำนวณ

ตารางที่ 5.3 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) จากโรงงาน [9]

ความสูงจากผิวล่าง (cm)	ระยะความยาวของแท่งเหล็ก (m)					
	0.09	0.2	0.42	0.53	0.75	1.05
0	1,057.89	1,092.81	1,066.33	1,042.34	1,043.15	1,060.60
2	1,036.92	1,111.57	1,096.22	1,083.78	1,061.09	1,043.83
5	1,024.29	1,100.67	1,108.14	1,099.61	1,079.17	1,083.87
8	1,028.87	1,145.11	1,142.75	1,129.50	1,102.31	1,092.64
10	1,010.89	1,131.27	1,184.57	1,187.49	1,105.00	1,126.05

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อน (%) ระหว่างผลการตรวจวัดและผลการคำนวณ

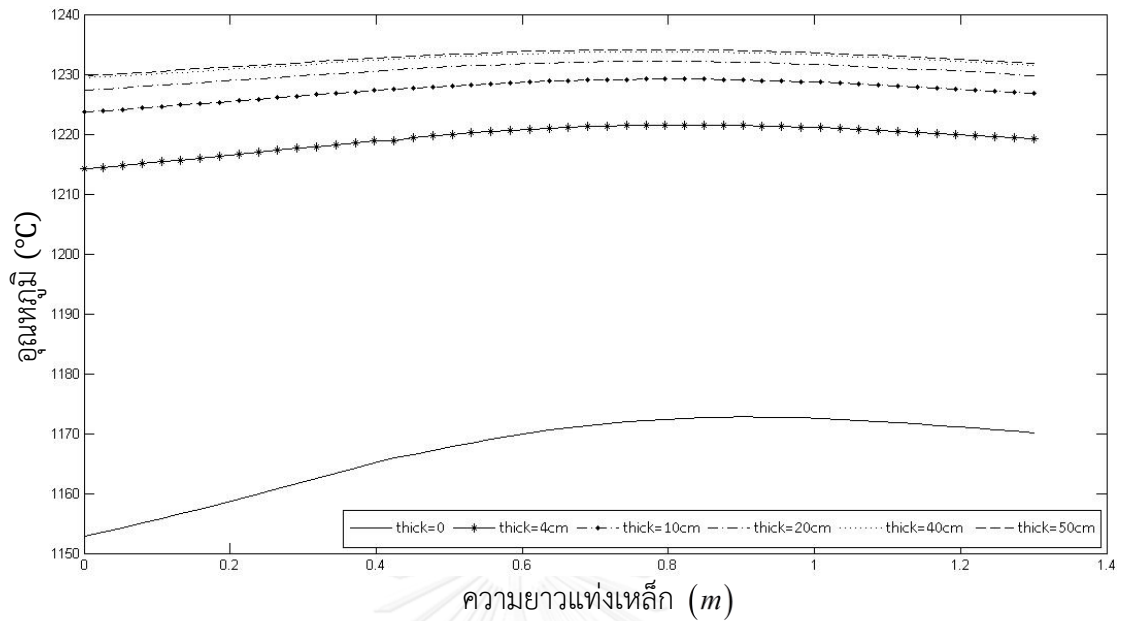
ความสูงจากผิวล่าง (cm)	ระยะความยาวของแท่งเหล็ก (m)					
	0.09	0.2	0.42	0.53	0.75	1.05
0	0.20	3.00	0.59	1.69	1.62	0.06
2	4.06	2.87	1.38	0.19	2.01	3.70
5	8.13	0.78	0.40	1.33	3.41	2.97
8	10.43	0.55	0.12	1.53	4.29	5.23
10	53.84	2.41	1.58	1.60	6.07	4.10

จากผลการทำนายการกระจายตัวอุณหภูมิของแท่งเหล็กพบว่ากระจายตัวอุณหภูมิของแท่งเหล็กมีความไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงพิจารณาตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิของแท่งเหล็กคือ ผลกระทบของความหนาฉนวนผนังเตา , ผลกระทบของอุณหภูมิเปลวไฟ และผลกระทบของอุณหภูมิพื้นเตา อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 5.10 พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวระดับของแท่งเหล็กอยู่ที่พื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็ก และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงสุดในแนวตั้งของแท่งเหล็กอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของแท่งเหล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะพิจารณาการกระจายตัวอุณหภูมิของแท่งเหล็กที่พื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็ก และการกระจายตัวอุณหภูมิในแนวตั้งบริเวณกึ่งกลางของแท่งเหล็ก ซึ่งเป็นพื้นผิวที่ได้รับการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวต่าง ๆ ภายในเตาเผาเหล็ก โดยการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ต่อการกระจายตัวอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กดังนี้

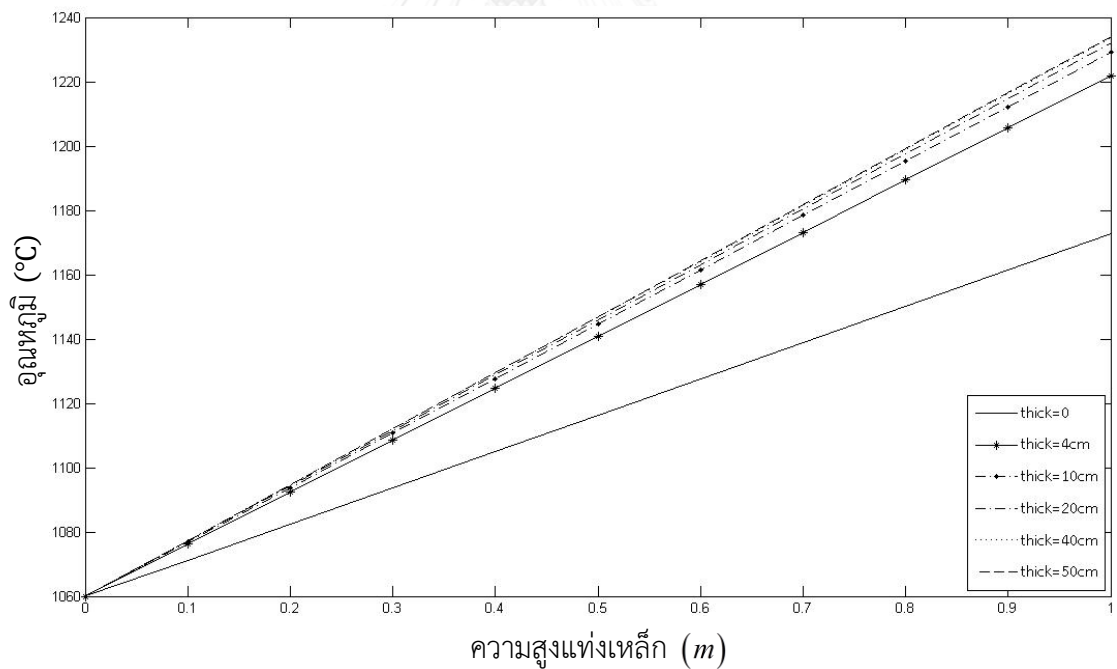
5.5 การศึกษาผลกระทบของความหนาฉนวนผนังเตา

จากผลการคำนวณการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและผนังเตาด้านบนมีค่า 37.04% และ 36.46% ตามลำดับหรือคิดเป็น 73.5% ของการสูญเสียความร้อนทั้งหมด จะเห็นได้ว่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กอย่างมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากการนำความร้อนผ่านผนังเตาไปสู่บรรยากาศด้านนอกเตา ดังนั้นในการลดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาสามารถทำได้โดยการหุ้มฉนวนที่ผนังเตา เพื่อที่จะลดสูญเสียจากการนำความร้อน งานวิจัยนี้จึงได้พิจารณาจำนวนฉนวนทั้งหมด 3 ชั้น [14] โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนดังนี้ 1.6 , 0.19 และ 0.2 $W/m \cdot K$ [15] และพิจารณาความหนาของฉนวนดังนี้ 0 , 4 , 10 , 20 , 40 และ 50 cm โดยอุณหภูมิบรรยากาศภายนอกเตามีค่า 30°C อุณหภูมิเปลวไฟมีค่าคงที่ 1,350°C และอุณหภูมิผิวล่างแท่งเหล็กมีค่าคงที่ 1,060°C

5.5.1 ผลการคำนวณความหนาของผนังเตาต่อการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก



รูปที่ 5.14 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนที่ความหนาของผนังเตาต่าง ๆ



รูปที่ 5.15 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กที่ความหนาของผนังเตาต่าง ๆ

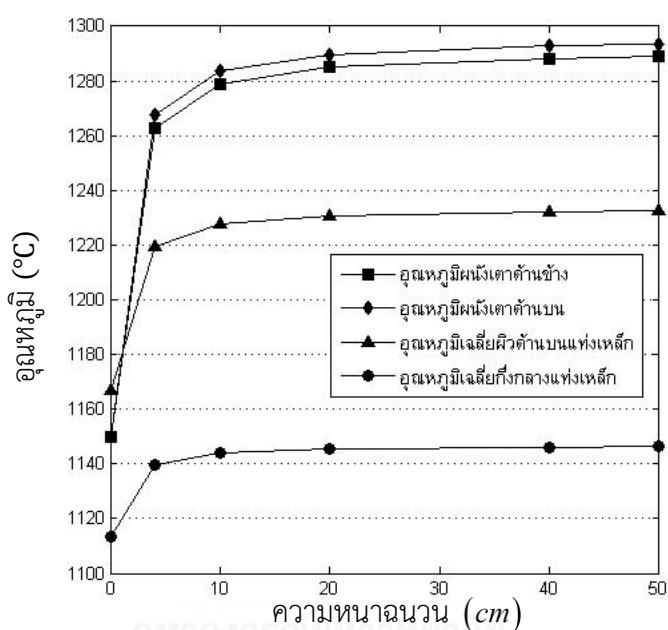
จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กพบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของผนังเตา ส่งผลให้การกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับไม่ได้หุ้มฉนวน แสดงดังรูปที่ 5.14 และการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กตามแนวตั้งที่บริเวณกึ่งกลางแท่งเหล็กมี

ค่าสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.15 จากรูปที่ 5.15 พบว่าการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กมีลักษณะเป็นเชิงเส้นตรง เนื่องจากว่าแบบจำลองมีลักษณะการนำความร้อนในแท่งเหล็กแบบเชิงเส้น 1 มิติ และเมื่อพิจารณาความหนาของผนังเตาที่ 40 cm อุณหภูมิผนังเตาด้านข้างและด้านบนคือ $1,288.3^{\circ}\text{C}$ และ $1,292.79^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ โดยผลต่างของอุณหภูมิผนังเตาด้านข้างและด้านบนคือ 138.3°C และ 142.79°C ตามลำดับ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิผนังเตามีค่าสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิในแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นตลอดความยาวแท่งเหล็ก สามารถพิจารณาได้จากอุณหภูมิพื้นผิวด้านบนแท่งเหล็กสูงสุดมีค่า $1,233.78$ หรือเพิ่มขึ้น 61.08°C และอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวด้านบนแท่งเหล็ก $1,232.36^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางแท่งเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น 32.67°C เมื่อเทียบกับไม่ได้หุ้มฉนวนผนังเตา แต่การกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอลดลงสามารถพิจารณาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของแท่งเหล็กที่มีค่าสูงขึ้นจาก 34.07°C เป็น 54.56°C เมื่อความหนาของผนังเตาเพิ่มขึ้นเป็น 40 cm เทียบกับการไม่หุ้มฉนวนผนังเตา เพราะว่าผลต่างอุณหภูมิระหว่างผิวบนกับผิวล่างของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น โดยสาเหตุมาจากแบบจำลองในงานวิจัยนี้ได้กำหนดอุณหภูมิผิวด้านล่างแท่งเหล็กมีค่าคงที่ตลอดความยาวแท่งเหล็กที่ $1,060^{\circ}\text{C}$ และจะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของผนังเตาเพิ่มขึ้นผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนแท่งเหล็กมีค่าลดลงจาก 19.12°C เป็น 4.22°C โดยที่อุณหภูมิภายนอกเตาผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่า 114.42°C และ 108.45°C ตามลำดับ และหากพิจารณาเพิ่มความหนาของผนังเตาเป็น 50 cm จะพบว่าอุณหภูมิแท่งเหล็กและอุณหภูมิผนังเตาไม่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความหนาของผนังเตาที่ 40 cm ดังนั้นเมื่อเพิ่มความหนาของผนังเตามากกว่า 40 cm จะไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิของแท่งเหล็กและอุณหภูมิผนังเตาแสดงดังตารางที่ 5.5 และรูปที่ 5.16

ตารางที่ 5.5 ผลของอุณหภูมิที่ความหนาของผนังเตาต่าง ๆ

ผลของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความหนาของผนังเตา (cm)					
	0	4	10	20	40	50
อุณหภูมิผนังเตาด้านข้าง	1,150	1,262.89	1,278.87	1,284.98	1,288.3	1,288.99
อุณหภูมิผนังเตาด้านบน	1,150	1,267.66	1,283.46	1,289.51	1,292.79	1,293.47
อุณหภูมิเหล็กสูงสุด	1,172.7	1,221.81	1,229.29	1,232.19	1,233.78	1,234.11
อุณหภูมิเฉลี่ยผิวด้านบน แท่งเหล็ก	1,167.01	1,219.64	1,227.6	1,230.68	1,232.36	1,232.71
อุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางแท่ง เหล็ก	1,113.51	1,139.82	1,143.8	1,145.34	1,146.18	1,146.36
ผลต่างอุณหภูมิผิวด้านบน	19.12	6.98	5.24	4.58	4.22	4.14

แท่งเหล็ก						
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวม แท่งเหล็ก	34.07	50.55	53.06	54.03	54.56	54.67
อุณหภูมิภายนอกผนังเตา ด้านข้าง	-	344.91	232	164.52	114.42	101.85
อุณหภูมิภายนอกผนังเตา ด้านบน	-	336.03	222.73	156.44	108.45	96.61

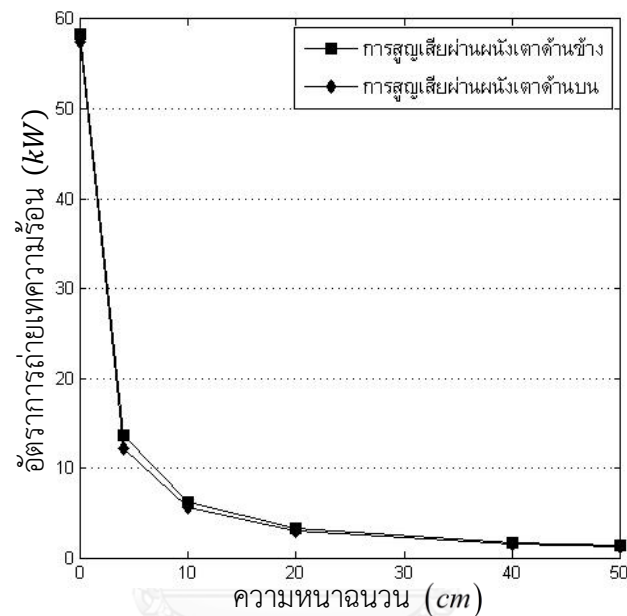


รูปที่ 5.16 ผลของอุณหภูมิที่พิจารณาต่อความหนาผนังเตา

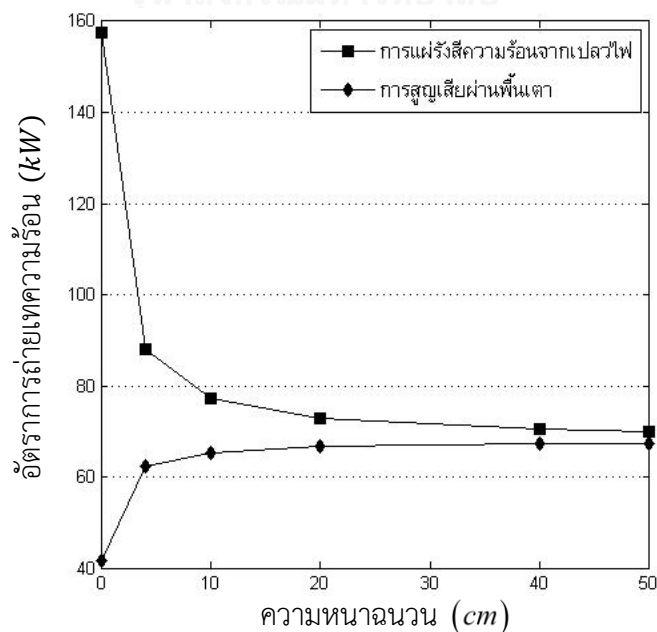
5.5.2 ผลการคำนวณความหนาผนังเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

จากผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนที่ความหนาผนังต่าง ๆ พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาของผนังเตาส่งผลให้การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดแสดงดังตารางที่ 5.6 หากพิจารณาความหนาผนังที่ 40 cm สามารถลดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตารวมจาก 73.5% เป็น 4.67% เปรียบเทียบกับการไม่หุ้มฉนวนแสดงดังรูปที่ 5.17 และจากวิเคราะห์ยังพบว่าการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟมีค่าลดลงจาก 157.52 kW เป็น 70.51 kW หรือคิดเป็น 55.24% เนื่องจากว่าอุณหภูมิผนังเตามีค่าสูงขึ้นและการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาลดลงส่งผลให้การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟมีค่าลดลง จากการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กพบว่าเมื่อการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาลดลง ส่งผลให้การสูญเสียพื้นเตามีค่าสูงขึ้นหรือในอีกความหมายกล่าวคือแท่งเหล็กได้รับความร้อนมากขึ้นก่อนที่แท่งเหล็กจะสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตา

เนื่องจากเป็นสัดส่วนเดียวกัน โดยความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 41.73 kW เป็น 67.36 kW เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่หุ้มฉนวน หรือคิดเป็นสัดส่วนเพิ่มขึ้น 68.84% เมื่อเทียบกับความร้อนรวมเข้าแท่งเหล็ก และส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กสูงขึ้นนั่นเองแสดงดังรูปที่ 5.18 และเมื่อพิจารณาความหนาฉนวนเพิ่มขึ้นเป็น 50 cm พบว่าการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟ และการสูญเสียผ่านพื้นเตาไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตามีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความหนาฉนวน 40 cm



รูปที่ 5.17 ผลของการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาต่อความหนาฉนวนผนังเตา



รูปที่ 5.18 ผลของการถ่ายเทความร้อนต่อความหนาฉนวนผนังเตา

ตารางที่ 5.6 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กที่ความหนาฉนวนผนังเตาต่าง ๆ

การถ่ายเท ความร้อน (kW)	ความหนาฉนวนผนังเตา (cm)					
	0	4	10	20	40	50
การแผ่รังสี ความร้อน จากเปลวไฟ	157.52 (100%)	88.06 (100%)	77.12 (100%)	72.85 (100%)	70.51 (100%)	70.02 (100%)
การสูญเสีย ผ่านพื้นเตา	-41.73 (26.49%)	-62.26 (70.70%)	-65.36 (84.75%)	-66.57 (91.38%)	-67.22 (95.33%)	-67.36 (96.20%)
การสูญเสีย ผ่านผนังเตา ด้านข้าง	-58.35 (37.04%)	-13.61 (15.46%)	-6.21 (8.05%)	-3.32 (4.56%)	-1.74 (2.47%)	-1.41 (2.01%)
การสูญเสีย ผ่านผนังเตา ด้านบน	-57.44 (36.47%)	-12.19 (13.84%)	-5.55 (7.20%)	-2.96 (4.06%)	-1.55 (2.20%)	-1.25 (1.79%)

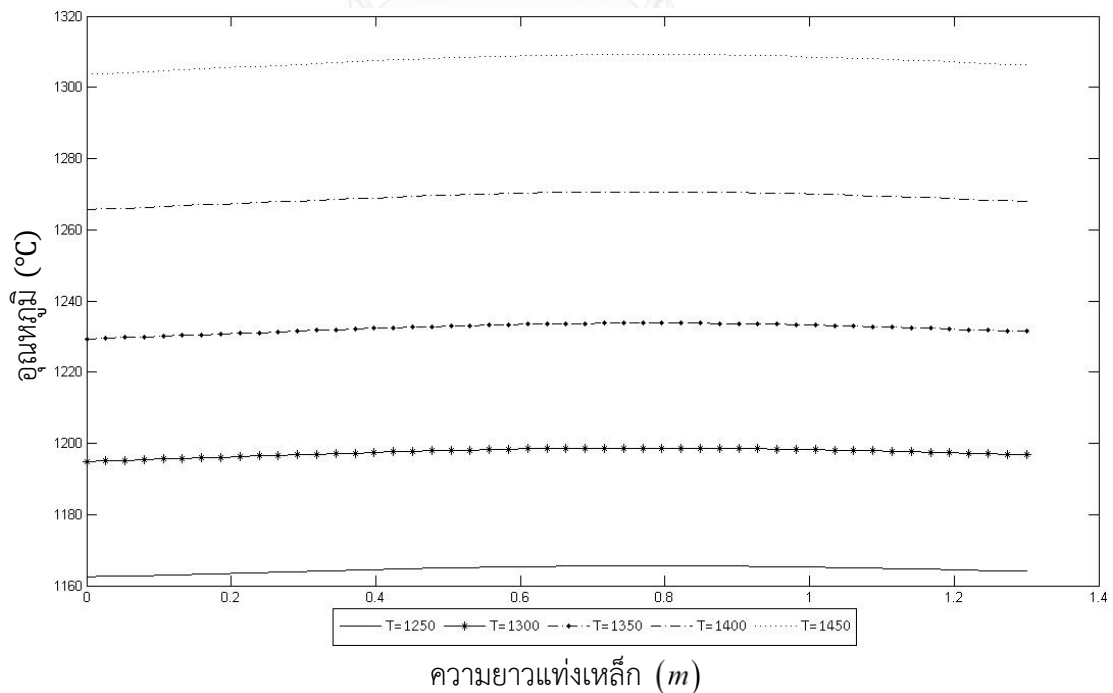
5.6 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิเปลวไฟ

จากงานวิจัยนี้การแผ่รังสีความร้อนเป็นกลไกเดียวที่ถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แท่งเหล็กโดยเกิดจากอุณหภูมิเผาไหม้ของเปลวไฟ ในการวิเคราะห์นี้จะทำการเปลี่ยนตัวแปรในแบบจำลองคืออุณหภูมิเปลวไฟ เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก โดยศึกษาผลของอุณหภูมิเปลวไฟดังนี้ 1,250 , 1,300 , 1,350 , 1,400 และ 1,450 °C โดยที่อุณหภูมิเปลวไฟ 1,350°C เป็นอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจากโรงงาน ซึ่งเป็นการคำนวณขณะที่มีความหนาฉนวนของผนังเตาที่มีความหนา 40 cm และอุณหภูมิผิวล่างแท่งเหล็กมีค่าคงที่ 1,060°C

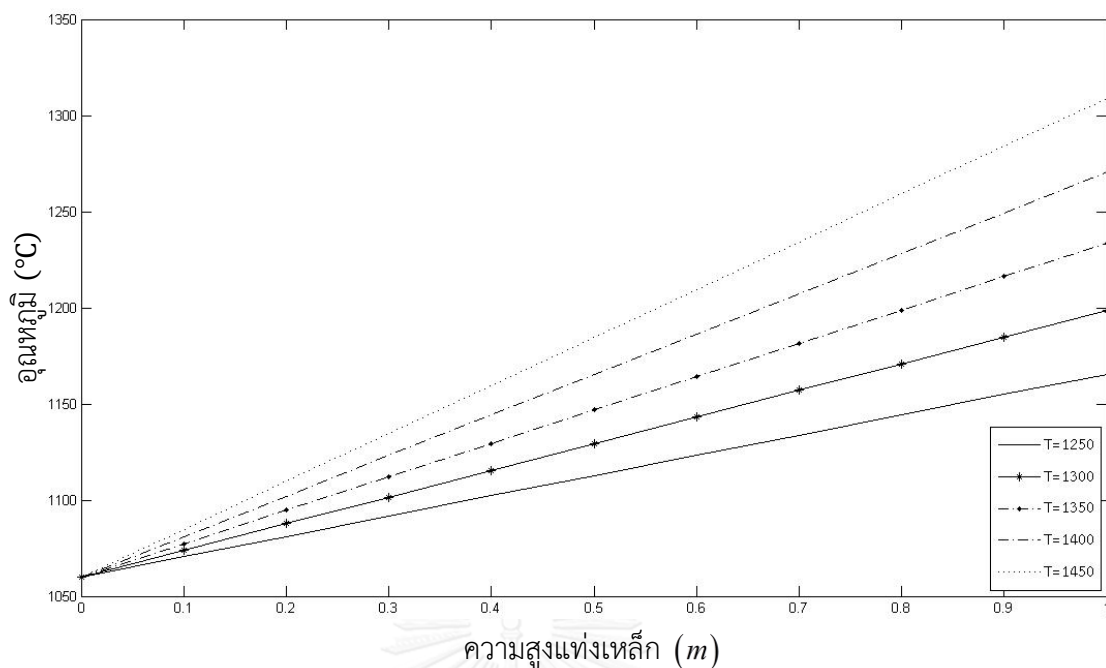
5.6.1 ผลการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟต่อการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก

จากการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลวไฟมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น และผลต่างของอุณหภูมิต่างกันระหว่างผิวด้านบนกับผิวด้านล่างของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นด้วยแสดงดังตารางที่ 5.7 รูปที่ 5.19 แสดงอุณหภูมิผิวด้านบนของแท่งเหล็กพบว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิเปลวไฟสูงขึ้น ดังนั้นอุณหภูมิพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเดียวกัน และการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กตามแนวตั้งที่บริเวณกึ่งกลางแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นแสดงดังรูปที่

5.20 ซึ่งสามารถดูได้จากความชันของเส้นกราฟที่ความชันสูงขึ้น โดยหากลดอุณหภูมิเปลวไฟลงจาก $1,350^{\circ}\text{C}$ เป็น $1,250^{\circ}\text{C}$ ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็กมีค่า $1,165.6^{\circ}\text{C}$ หรือลดลง 68.18°C อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กมีค่าลดลง 67.74°C และอุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางแท่งเหล็กมีค่าลดลง 33.87°C หากพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของแท่งเหล็กพบว่าเมื่ออุณหภูมิเปลวไฟมีค่าลดลงจาก $1,350^{\circ}\text{C}$ เป็น $1,250^{\circ}\text{C}$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของแท่งเหล็กมีค่าลดลงจาก 54.56°C เป็น 33.12°C ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิของแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอขึ้น และเนื่องจากอุณหภูมิของเปลวไฟมีค่าลดลงจึงทำให้อุณหภูมิของผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่า $1,203.63^{\circ}\text{C}$ และ $1,206.87^{\circ}\text{C}$ หรือมีค่าลดลงคิดเป็น 84.67°C และ 85.92°C ตามลำดับ และอุณหภูมิภายนอกผนังเตาด้านข้างและด้านบนลดลงคือ 4.39°C และ 4.17°C ตามลำดับ หากพิจารณาอุณหภูมิเปลวไฟเพิ่มขึ้นจาก $1,350^{\circ}\text{C}$ เป็น $1,450^{\circ}\text{C}$ พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นเป็น 78.34°C หรือคิดเป็น 23.78°C ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุด , อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวด้านบนและอุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางของแท่งเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น 75.52°C , 75.14°C และ 37.57°C ตามลำดับ อุณหภูมิของผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น 88.38°C และ 89.33°C ตามลำดับ และอุณหภูมิภายนอกผนังเตาด้านข้างและด้านบนเพิ่มขึ้นคิดเป็น 4.48°C และ 4.25°C ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิเปลวไฟที่ $1,350^{\circ}\text{C}$ แสดงดังรูปที่ 5.21



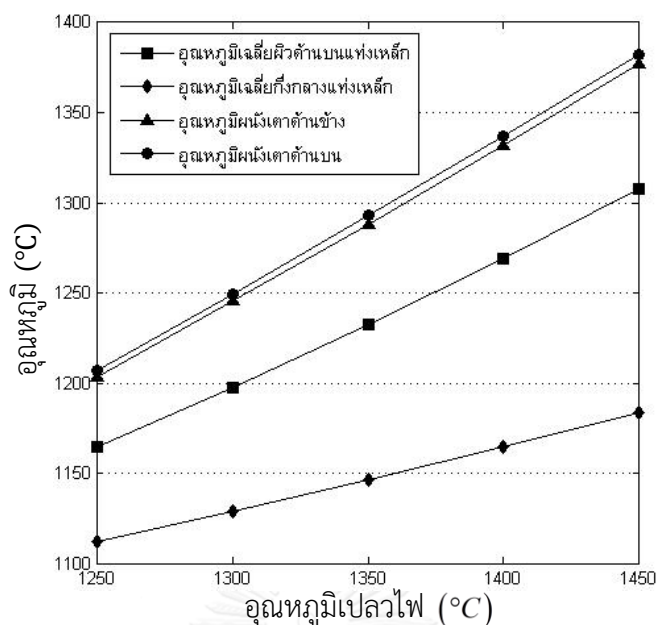
รูปที่ 5.19 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนที่อุณหภูมิเปลวไฟต่าง ๆ



รูปที่ 5.20 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กที่อุณหภูมิเปลวไฟต่าง ๆ

ตารางที่ 5.7 ผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิเปลวไฟต่าง ๆ

ผลของอุณหภูมิ (°C)	อุณหภูมิเปลวไฟ (°C)				
	1,250	1,300	1,350	1,400	1,450
อุณหภูมิเหล็กสูงสุด	1,165.6	1,198.73	1,233.78	1,270.67	1,309.3
อุณหภูมิเฉลี่ยผิวด้านบนแท่งเหล็ก	1,164.62	1,197.52	1,232.36	1,269.05	1,307.5
อุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางแท่งเหล็ก	1,112.31	1,128.76	1,146.18	1,164.53	1,183.75
ผลต่างอุณหภูมิผิวด้านบนแท่งเหล็ก	2.95	3.6	4.22	4.8	5.35
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมแท่งเหล็ก	33.12	43.53	54.56	66.17	78.34
อุณหภูมิผนังเตาด้านข้าง	1,203.63	1,245.46	1,288.3	1,332.06	1,376.68
อุณหภูมิผนังเตาด้านบน	1,206.87	1,249.37	1,292.79	1,337.06	1,382.12
อุณหภูมิภายนอกผนังเตาด้านข้าง	110.03	112.21	114.42	116.65	118.9
อุณหภูมิภายนอกผนังเตาด้านบน	104.28	106.35	108.45	110.57	112.7



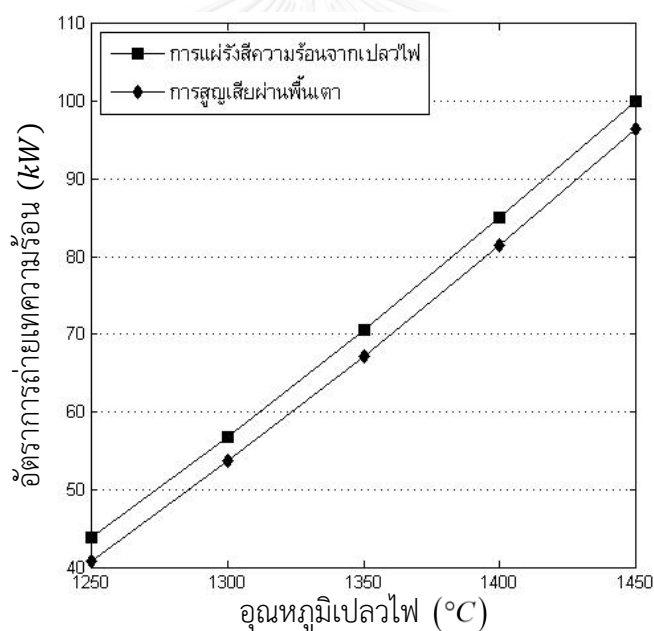
รูปที่ 5.21 ผลของอุณหภูมิที่พิจารณาต่ออุณหภูมิเปลวไฟ

5.6.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

จากการศึกษาพบว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กจากการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟมีลักษณะแนวโน้มเดียวกับอุณหภูมิแสดงดังตารางที่ 5.8 เมื่อพิจารณาลดอุณหภูมิเปลวไฟจาก 1,350°C เป็น 1,250°C พบว่าการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟลดลงจาก 70.51kW เป็น 43.87kW หรือคิดเป็น 37.78% และส่งผลให้การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตามีลดลง 26.41kW หรือคิดเป็นสัดส่วนลดลง 2.31% เมื่อพิจารณาเทียบกับสัดส่วนของความร้อนเข้าแท่งเหล็กแสดงดังรูปที่ 5.22 และจากการลดอุณหภูมิเปลวไฟลงจาก 1,350°C เป็น 1,250°C พบว่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนรวมลดลงจาก 3.29kW เป็น 3.06kW แต่หากเทียบกับสัดส่วนของความร้อนรวมเข้าแท่งเหล็กจะมีค่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนรวมเพิ่มขึ้น 2.3% หากพิจารณาเพิ่มอุณหภูมิเปลวไฟจาก 1,350°C เป็น 1,450°C พบว่าการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟเพิ่มขึ้นจาก 70.51kW เป็น 100.12kW หรือคิดเป็น 41.99% และส่งผลให้การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาคิดเป็นสัดส่วนเพิ่มขึ้น 1.06% เมื่อพิจารณาเทียบกับสัดส่วนของความร้อนเข้าแท่งเหล็ก และพบว่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนรวมเพิ่มขึ้นคิดเป็น 0.32kW แต่หากเทียบกับสัดส่วนของความร้อนรวมเข้าแท่งเหล็กจะมีค่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนรวมลดลง 1.06%

ตารางที่ 5.8 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กที่อุณหภูมิเปลวไฟต่าง ๆ

การถ่ายเทความร้อน (kW)	อุณหภูมิเปลวไฟ (°C)				
	1,250	1,300	1,350	1,400	1,450
การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟ	43.87 (100%)	56.81 (100%)	70.51 (100%)	85 (100%)	100.12 (100%)
การสูญเสียผ่านพื้นเตา	-40.81 (93.02%)	-53.63 (94.40%)	-67.22 (95.33%)	-81.52 (95.91%)	-96.51 (96.39%)
การสูญเสียผ่านผนังเตาด้านข้าง	-1.62 (3.69%)	-1.68 (2.96%)	-1.74 (2.47%)	-1.84 (2.16%)	-1.91 (1.91%)
การสูญเสียผ่านผนังเตาด้านบน	-1.44 (3.28%)	-1.5 (2.64%)	-1.55 (2.20%)	-1.64 (1.93%)	-1.7 (1.70%)



รูปที่ 5.22 ผลของการถ่ายเทความร้อนต่ออุณหภูมิเปลวไฟ

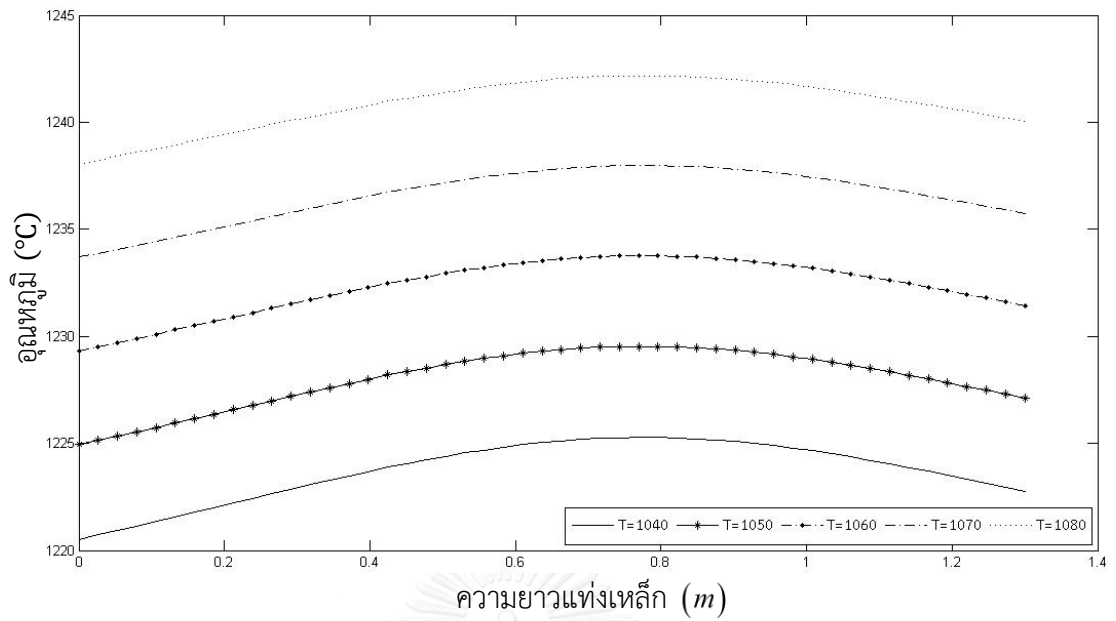
5.7 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิพื้นเตา

จากการศึกษาพบว่า การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็ก โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดอุณหภูมิพื้นเตา $1,060^{\circ}\text{C}$ ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิพื้นผิวด้านล่างของแท่งเหล็กมีค่า $1,060^{\circ}\text{C}$ ด้วย หากพิจารณาการลดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาสามารถทำได้โดยหุ้มฉนวนที่พื้นด้านล่างเตา ซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวด้านล่างของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อจะศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิและการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก จึง

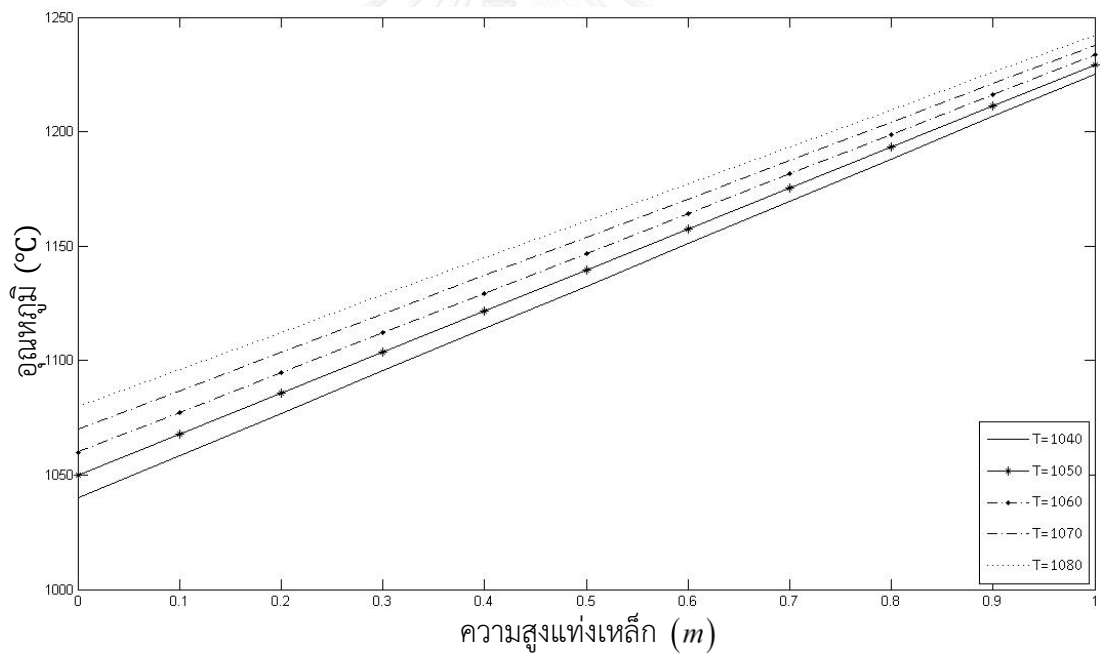
ทำการวิเคราะห์เปลี่ยนตัวแปรอุณหภูมิพื้นเตาในแบบจำลองประกอบด้วย 1,040 , 1,050 , 1,060 , 1,070 และ 1,080°C ซึ่งเป็นการคำนวณขณะที่มีความหนาแน่นของผนังเตาที่ความหนา 40 cm และอุณหภูมิเปลวไฟที่ 1,350°C

5.7.1 ผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นเตาต่อการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็ก

จากการวิเคราะห์อุณหภูมิพื้นเตาพบว่าเมื่ออุณหภูมิพื้นเตามีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นและอุณหภูมิพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงสูงขึ้นในลักษณะเดียวกันแสดงดังรูปที่ 5.23 แต่ผลต่างของอุณหภูมিরะหว่างผิวด้านบนกับผิวด้านล่างของแท่งเหล็กมีค่าลดลงสามารถพิจารณาได้จากความชันของการกระจายอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิพื้นเตามีค่าสูงขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.24 เมื่ออุณหภูมิพื้นเตามีค่า 1,080°C จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิสูงสุดของแท่งเหล็กมีค่า 1,242.19°C หรือมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น 8.41 °C อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวด้านบนของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นคือ 8.51°C และอุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางของแท่งเหล็กสูงขึ้นคือ 14.26°C เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิพื้นเตาที่ 1,060°C แสดงดังตารางที่ 5.9 ซึ่งหากพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของแท่งเหล็กพบว่าเมื่ออุณหภูมิพื้นเตาสูงขึ้นจาก 1,060°C เป็น 1,080°C ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของแท่งเหล็กมีค่าลดลงจาก 54.56°C เป็น 50.92°C ส่งผลให้การกระจายตัวอุณหภูมิของแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.25 หากพิจารณาอุณหภูมิของผนังเตาพบว่าเมื่ออุณหภูมิพื้นเตาเพิ่มขึ้น 1,080°C อุณหภูมิผนังเตาด้านข้างและด้านบนเพิ่มขึ้น 4.05°C และ 3.72°C ตามลำดับ หากพิจารณาอุณหภูมิพื้นเตาลดลงจาก 1,060°C เป็น 1,040°C พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นเป็น 58.17°C หรือคิดเป็น 3.61°C ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุด , อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวด้านบนและอุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางของแท่งเหล็กมีค่าลดลงคิดเป็น 8.49°C , 8.59°C และ 14.29°C ตามลำดับ อุณหภูมิของผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่าลดลงคิดเป็น 4.05°C และ 3.72°C ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิภายนอกผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิพื้นเตาที่ 1,060°C



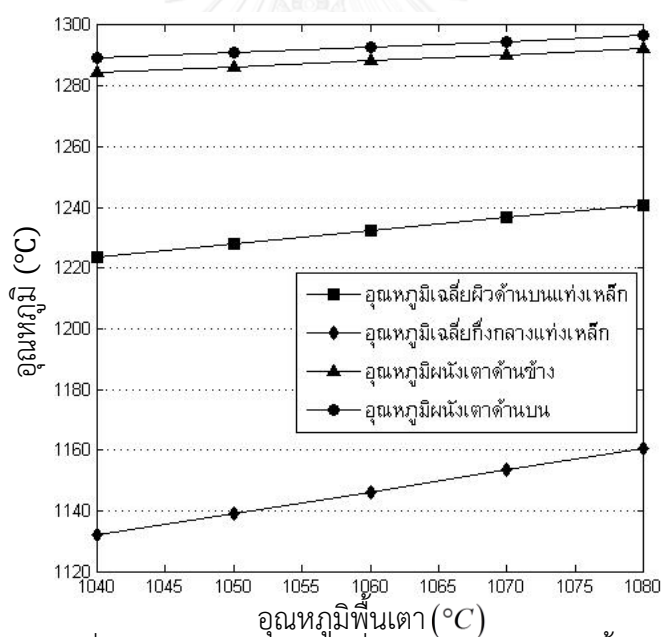
รูปที่ 5.23 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวด้านบนที่อุณหภูมิพื้นเตาต่าง ๆ



รูปที่ 5.24 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่กึ่งกลางแท่งเหล็กที่อุณหภูมิพื้นเตาต่าง ๆ

ตารางที่ 5.9 ผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิพื้นเตาต่าง ๆ

ผลของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิพื้นเตา ($^{\circ}\text{C}$)				
	1,040	1,050	1,060	1,070	1,080
อุณหภูมิเหล็กสูงสุด	1,225.29	1,229.55	1,233.78	1,237.99	1,242.19
อุณหภูมิเฉลี่ยผิวด้านบนแท่งเหล็ก	1,223.77	1,228.07	1,232.36	1,236.63	1,240.87
อุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางแท่งเหล็ก	1,131.89	1,139.04	1,146.18	1,153.32	1,160.44
ผลต่างอุณหภูมิผิวด้านบนแท่งเหล็ก	4.52	4.37	4.22	4.07	3.92
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมแท่งเหล็ก	58.17	56.37	54.56	52.75	50.92
อุณหภูมิผนังเตาด้านข้าง	1,284.25	1,286.28	1,288.3	1,290.32	1,292.35
อุณหภูมิภายในผนังเตาด้านบน	1,289.07	1,290.92	1,292.79	1,294.65	1,296.51
อุณหภูมิภายนอกผนังเตาด้านข้าง	114.22	114.32	114.42	114.53	114.63
อุณหภูมิภายนอกผนังเตาด้านบน	108.27	108.36	108.45	108.54	108.63



รูปที่ 5.25 ผลของอุณหภูมิที่พิจารณาต่ออุณหภูมิพื้นเตา

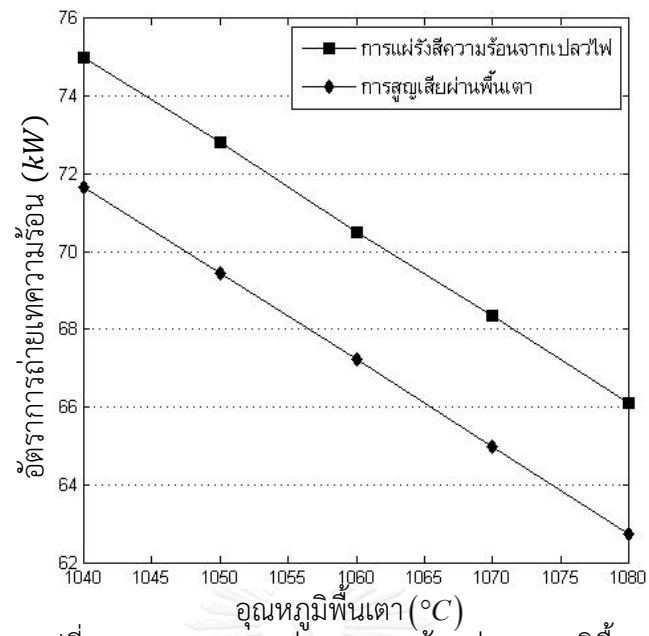
5.7.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิพื้นเตาต่อการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็ก

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของแท่งเหล็กพบว่าเมื่ออุณหภูมิพื้นเตาเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาที่น้อยลง และการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟลดลงด้วย เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิที่ผิวด้านล่างแท่งเหล็กสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวด้านบนแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแท่งเหล็กกับอุณหภูมิเปลวไฟมีค่าน้อยลง ทำให้การแผ่รังสีความ

ร้อนจากเปลวไฟจึงมีค่าน้อยลงแสดงดังตารางที่ 5.10 หากพิจารณาอุณหภูมิพื้นเตาที่ 1,080°C ค่าการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟลดลงจาก 70.57 kW เป็น 66.1 kW หรือคิดเป็น 6.33% นอกจากนี้การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาลดลงจาก 67.22 kW เป็น 62.72 kW หรือคิดเป็นสัดส่วนลดลง 0.44% เมื่อเทียบกับความร้อนรวมเข้าแท่งเหล็ก แสดงดังรูปที่ 5.26 ในขณะที่การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีสัดส่วนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับอุณหภูมิพื้นเตา 1,060°C หากพิจารณาดอุณหภูมิพื้นเตาจาก 1,060°C เป็น 1,040°C พบว่าการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟลดลงจาก 70.51kW เป็น 75kW หรือคิดเป็น 5.97% แต่ส่งผลให้การสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาคิดเป็นสัดส่วนเพิ่มขึ้น 0.2% เมื่อพิจารณาเทียบกับสัดส่วนของความร้อนเข้าแท่งเหล็ก และพบว่าหากเทียบกับสัดส่วนของความร้อนรวมเข้าแท่งเหล็กจะมีค่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนรวมลดลง 0.2%

ตารางที่ 5.10 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กที่อุณหภูมิพื้นเตาต่าง ๆ

การถ่ายเทความร้อน (kW)	อุณหภูมิพื้นเตา (°C)				
	1,040	1,050	1,060	1,070	1,080
การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟ	75 (100%)	72.8 (100%)	70.51 (100%)	68.34 (100%)	66.1 (100%)
การสูญเสียผ่านพื้นเตา	-71.65 (95.53%)	-69.44 (95.38%)	-67.22 (95.33%)	-64.97 (95.07%)	-62.72 (94.89%)
การสูญเสียผ่านผนังเตาด้านข้าง	-1.77 (2.36%)	-1.78 (2.45%)	-1.74 (2.47%)	-1.78 (2.60%)	-1.79 (2.71%)
การสูญเสียผ่านผนังเตาด้านบน	-1.58 (2.11%)	-1.58 (2.17%)	-1.55 (2.20%)	-1.59 (2.33%)	-1.59 (2.41%)



รูปที่ 5.26 ผลของการถ่ายเทความร้อนต่ออุณหภูมิพื้นเตา

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปการศึกษางานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กสภาวะคงตัวแบบ 2 มิติ ซึ่งแท่งเหล็กถูกให้ความร้อนในส่วนของ soaking zone ก่อนที่แท่งเหล็กจะนำไปถูกรีด เพื่อศึกษาว่าแท่งเหล็กนั้นมีค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการรีดและอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อการรีด โดยการถ่ายเทความร้อนภายในพื้นที่ปิดล้อมภายในเตาเผาเหล็กซึ่งประกอบไปด้วย 5 พื้นผิว คือ พื้นผิวเปลวไฟ , พื้นผิวผนังเตาด้านข้าง , พื้นผิวผนังเตาด้านบน , พื้นผิวแท่งเหล็ก และพื้นผิวสมมาตรตามแกน x เนื่องจากงานวิจัยนี้วิเคราะห์แท่งเหล็กเพียงครั้งเดียว ซึ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนหลักของเตาเผาเหล็กคือการแผ่รังสีความร้อนของแต่ละพื้นผิว เนื่องจากกระบวนการอุ่นเหล็กมีอุณหภูมิก่อนข้างสูง ทำให้กลไกการแผ่รังสีความร้อนมีผลสำคัญกว่าการพาความร้อน เนื่องจากการพาความร้อนมีค่าน้อยมากจนละทิ้งได้ โดยเงื่อนไขขอบเขตของพื้นผิวด้านบนแท่งเหล็กเป็นค่าความร้อนฟลักซ์ของพื้นผิว (heat flux) จะอยู่ในรูปของสมการการแผ่รังสีความร้อนซึ่งไม่เป็นสมการเชิงเส้น (nonlinear) และเพื่อศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ งานวิจัยนี้จึงนำระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) มาใช้ในการคำนวณและใช้การคำนวณซ้ำเพื่อหาอุณหภูมิแต่ละจุดในแท่งเหล็กด้วยวิธีเกาส์-ไซเดล (Gauss seidel) อีกทั้งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาตัวประกอบการมองเห็นของแต่ละพื้นผิว โดยแบ่งพื้นผิวแท่งเหล็กเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นอีกด้วย และศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในแท่งเหล็กจากแบบจำลองที่สร้างขึ้น

จากการศึกษาการคำนวณตัวประกอบการมองเห็นพบว่า ค่าของตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวเปลวไฟมีค่าสูงบริเวณตรงกลางของแท่งเหล็ก เป็นเพราะว่าหัวเผาถูกติดตั้งที่บริเวณตรงกลางเตาเผาเหล็ก เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวผนังเตาด้านข้างพบว่า ค่าตัวประกอบการมองเห็นมีค่าสูงบริเวณที่ใกล้ผนังเตาด้านข้างและมีค่าลดลงอย่างคงที่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากว่าพื้นผิวแท่งเหล็กที่อยู่ใกล้กับบริเวณผนังเตาด้านข้างสามารถมองเห็นได้ชัดกว่าบริเวณพื้นผิวแท่งเหล็กที่อยู่ไกลกว่า และสำหรับค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็กกับพื้นผิวสมมาตรซึ่งมีลักษณะเป็นไปในแนวทางเดียวกับค่าตัวประกอบการมองเห็นผนังเตาด้านข้าง คือ พื้นผิวแท่งเหล็กที่อยู่ใกล้กับบริเวณพื้นผิวสมมาตรจะมีค่าสูงกว่าบริเวณพื้นผิวแท่งเหล็กที่อยู่ไกลกว่า หากพิจารณาค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่ง

เหล็กกับพื้นผิวผนังเตาด้านบนพบว่า ค่าตัวประกอบการมองเห็นมีค่าลดลงตั้งแต่บริเวณ $x=0$ m โดยเฉพาะในช่วง $1 \leq x \leq 1.3$ m เป็นเพราะว่าพื้นผิวเปลวไฟเป็นตัวบังในการมองเห็นของพื้นผิวแท่งเหล็ก ดังนั้นพื้นผิวเปลวไฟจึงเป็นตัวบังการมองเห็นระหว่างพื้นผิวอื่น ๆ อีกด้วย ซึ่งผลการคำนวณตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวภายในเตาเผาเหล็กมีความสมเหตุสมผลตามรูปแบบของปัญหาเตาเผาเหล็ก

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กจากแบบจำลองในสภาวะการทำงานจริงของเตาเผาเหล็กเทียบกับค่าอุณหภูมิในแท่งเหล็กจากการตรวจวัดโรงงานพบว่า ค่าคำนวณจากแบบจำลองมีความสอดคล้องเชิงคุณภาพกับค่าที่ตรวจวัดจากโรงงาน แต่เนื่องจากการเก็บค่าอุณหภูมิแท่งเหล็กนั้นเป็นการเก็บค่าขณะที่แท่งเหล็กกำลังถูกดันออกจากเตาเผา ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนในส่วนหัวของแท่งเหล็ก ดังนั้นจากการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนส่วนนี้ของแท่งเหล็กระหว่างแบบจำลองกับค่าได้จากตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนสูง ถึงแม้ว่าค่าความคลาดที่บริเวณส่วนนี้มีค่าสูงแต่ในส่วนจุดอื่น ๆ มีค่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นแบบจำลองที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำนายการกระจายตัวอุณหภูมิในแท่งเหล็กมีความสอดคล้องเป็นที่ยอมรับได้ จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิแท่งเหล็กมีค่าสูงสุด $1,172.7^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิเฉลี่ยผิวด้านบนแท่งเหล็กมีค่า $1,167.01^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิเฉลี่ยกึ่งกลางแท่งเหล็กมีค่า $1,113.51^{\circ}\text{C}$ และผลต่างอุณหภูมิผิวด้านบนแท่งเหล็กมีค่า 19.12°C ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมออุณหภูมิในแท่งเหล็ก โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมแท่งเหล็กคือ 34.07°C จากการคำนวณสมดุลความร้อนแท่งเหล็กพบว่าแท่งเหล็กได้รับการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟเพียงอย่างเดียว 100% โดยเกิดการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาด้านข้างและด้านบนมีค่า 37.04% และ 36.46% ตามลำดับ และเกิดการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตามีค่า 26.5%

การกระจายตัวอุณหภูมิในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นการนำความร้อนแบบเชิงเส้นหนึ่งมิติจากผิวบนสู่ผิวล่าง เมื่อทำการศึกษการถ่ายเทความร้อนจะเห็นได้ว่าการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตารวมมากที่สุดถึง 73.5% ซึ่งสามารถลดการสูญเสียความร้อนนี้ได้ด้วยการหุ้มฉนวนของผนังเตา โดยพบว่าเมื่อความหนาฉนวนที่ 40 cm อุณหภูมิภายในแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้นแต่มีความสม่ำเสมอลดลงซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของแท่งเหล็กมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากว่าแบบจำลองได้กำหนดอุณหภูมิผิวล่างแท่งเหล็กให้คงที่นั่นเอง และพบว่า การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตารวมลดเหลือเพียง 4.67% และการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟมีค่าลดลง 55.24% ซึ่งความร้อนสูญเสียพื้นเตามีค่าสูงขึ้น 25.63kW หรือคิดเป็นสัดส่วนเพิ่มขึ้น 68.84% เมื่อเทียบกับความร้อนรวมเข้าแท่งเหล็ก เมื่อเทียบกับการไม่หุ้มฉนวน ส่วนการศึกษการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของเปลวไฟร่วมกับความหนาฉนวนผนังเตาที่ 40 cm พบว่า เมื่อลดอุณหภูมิเปลวไฟลงทำให้อุณหภูมิแท่งเหล็กก็มีค่าลดลงและการกระจายตัวอุณหภูมิแท่งเหล็กมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเนื่องจากค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐานรวมแห่งเหล็กมีค่าลดลง และเมื่ออุณหภูมิเปลวไฟมีค่าลดลงพบว่าการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟมีค่าลดลงด้วย หากลดอุณหภูมิเปลวไฟลงจาก $1,350^{\circ}\text{C}$ เป็น $1,250^{\circ}\text{C}$ ทำให้การแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟมีค่าลดลง 26.64 kW หรือคิดเป็น 37.78% โดยมีค่าเป็นสัดส่วนเดียวกับการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตา หากเทียบกับความร้อนรวมเข้าแห่งเหล็กการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการศึกษาการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิของพื้นเตาร่วมกับความหนาของผนังเตาที่ 40 cm พบว่า เมื่ออุณหภูมิของพื้นเตามีค่าสูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิในแห่งเหล็กก็มีค่าสูงขึ้นด้วย และหากพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรวมของแห่งเหล็กมีค่าลดลงส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีความสม่ำเสมอมากขึ้น และทำให้ทั้งการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาและการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟมีค่าลดลงด้วยเนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิมระหว่างแห่งเหล็กกับอุณหภูมิเปลวไฟมีค่าน้อยลง ในขณะที่อุณหภูมิพื้นเตา $1,080^{\circ}\text{C}$ ค่าการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟลดลง 6.33% และหากเปรียบเทียบกับความร้อนรวมเข้าแห่งเหล็กการสูญเสียความร้อนผ่านพื้นเตาลดลงคิดเป็น 0.44% เมื่อเทียบกับอุณหภูมิพื้นเตา $1,060^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นการหุ้มฉนวนพื้นเตาจะสามารถช่วยลดการสูญเสียการถ่ายเทความร้อนออกจากพื้นเตา

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 การตรวจวัดอุณหภูมิของแห่งเหล็กทำการวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนบริเวณทางออกของเตาเผาเหล็ก ซึ่งเป็นช่วงของประตูเตาเผาเหล็กเปิดขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนภายนอกเตามาสู่แห่งเหล็ก ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียขึ้นมากที่แห่งเหล็ก ทำให้การเปรียบเทียบค่าผลจากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าคลาดเคลื่อนสูงโดยเฉพาะบริเวณปลายของแห่งเหล็ก ซึ่งถ้าทำการตรวจวัดที่ดีขึ้นอาจทำให้ผลความคลาดเคลื่อนมีค่าที่ดีขึ้น

6.2.2 อุณหภูมิพื้นผิวด้านล่างแห่งเหล็กได้กำหนดให้เป็นค่าอุณหภูมิที่พื้นเตาซึ่งมีค่าคงที่ตลอดความยาวแห่งเหล็ก แต่ในความเป็นจริงแห่งเหล็กจะถูวางอยู่บนคานของเตาเผาเหล็กซึ่งจะมีช่องว่างระหว่างคาน ทำให้พื้นที่ของแห่งเหล็กบางส่วนไม่ได้เกิดขึ้นจากการนำความร้อนผ่านคานเตาเพียงอย่างเดียว แต่จะมีการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนเข้าสู่พื้นผิวด้านล่างแห่งเหล็กด้วย ดังนั้นหากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวแล้ว อาจส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงของจริงมากขึ้น

6.2.3 แบบจำลองได้กำหนดอุณหภูมิเปลวไฟซึ่งได้จากการตรวจวัดมีค่าคงที่ และสมมติให้ลักษณะเปลวไฟมีขนาดและรูปร่างลักษณะทรงกระบอกยาว โดยการเผาไหม้ของเปลวไฟจริงมีลักษณะความซับซ้อนทั้งชนิดของเชื้อเพลิง ลักษณะเปลวไฟ รูปร่างของเปลวไฟ และปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งอาจส่งผลให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งต้องทำการศึกษาในขั้นต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] B. Lin, Y. Wu, and L. Zhang, "Estimates of the potential for energy conservation in the Chinese steel industry," *Energy Policy*, vol. 39, pp. 3680-3689, 2011.
- [2] Y. Sakamoto, Y. Tonooka, and Y. Yanagisawa, "Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry : a process analysis," *Energy Conversion & Management*, vol. 40, pp. 1129-1140, 1999.
- [3] A. M. Maki, P. J. Osterman, and M. J. Luomala, "Numerical study of the pusher-type slab reheating furnace," *Scandinavian Journal of Metallurgy*, vol. 31, pp. 81-87, 2002.
- [4] M. Y. Kim, "A heat transfer for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 2007, pp. 3740-3748, 2007.
- [5] D. Lindholm and B. Leden, "A finite element method for solution of the three-dimensional time-dependent heat-conduction equation with application for heating of steels in reheating furnace," *Numerical Heat Transfer*, vol. 35, pp. 155-172, 1999.
- [6] T. Kolenko, B. Glogovac, and T. Jaklic, "An analysis of a heat transfer model for situations involving gas and surface radiative heat transfer," *Communications in Numerical Methods in Engineering*, vol. 15, pp. 349-365, 1999.
- [7] M. Honner, Z. Vesely, and M. Svantner, "Temperature and heat transfer measurement in continuous reheating furnaces," vol. 32, pp. 225-232, 2003.
- [8] A. Jaklic, F. Vode, and T. Kolenko, "Online simulation model of the slab-reheating process in a pusher-type furnace," *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 1105-1114, 2007.
- [9] เอกรัชฎ์ สมเรียวงค์กุล, "การศึกษาเชิงตัวเลขของการแจกแจงอุณหภูมิในแท่งเหล็กบริเวณทางออกของเตาเผาเหล็กโดยคำนึงถึงผลจากการสูญเสียความร้อนที่ช่องเปิด," วิทยานิพนธ์

- ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [10] Bureau of Energy Efficiency, "Energy efficiency in thermal utilities," Ministry of Power, India, 2005.
- [11] Y. A. Cengel, *Heat and mass transfer : A practical approach*. McGraw-Hill Education, 2006.
- [12] ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ นิพนธ์ วรรณโสภาคย์, ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 8. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.
- [13] D. Poulidakos, *Conduction heat transfer*. Prentice-Hall, Inc, 1994.
- [14] บรรยเวชช์ สงฤทธิ์, "การศึกษาการลดการสูญเสียพลังงานจากการสะสมความร้อนในผนังเตาเผาเหล็กโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์," วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [15] บริษัท ไทย เอส เอส อิฐทนไฟ, "ฉนวนของผนังเตา," <http://www.tssrefractory.com/products/>.
- [16] A. Feingold and K. G. Gupta, "Exterior of infinitely long cylinder to symmetrically placed infinitely long parallel plate," 1970, <http://www.thermalradiation.net/sectionc/C-62.html>.



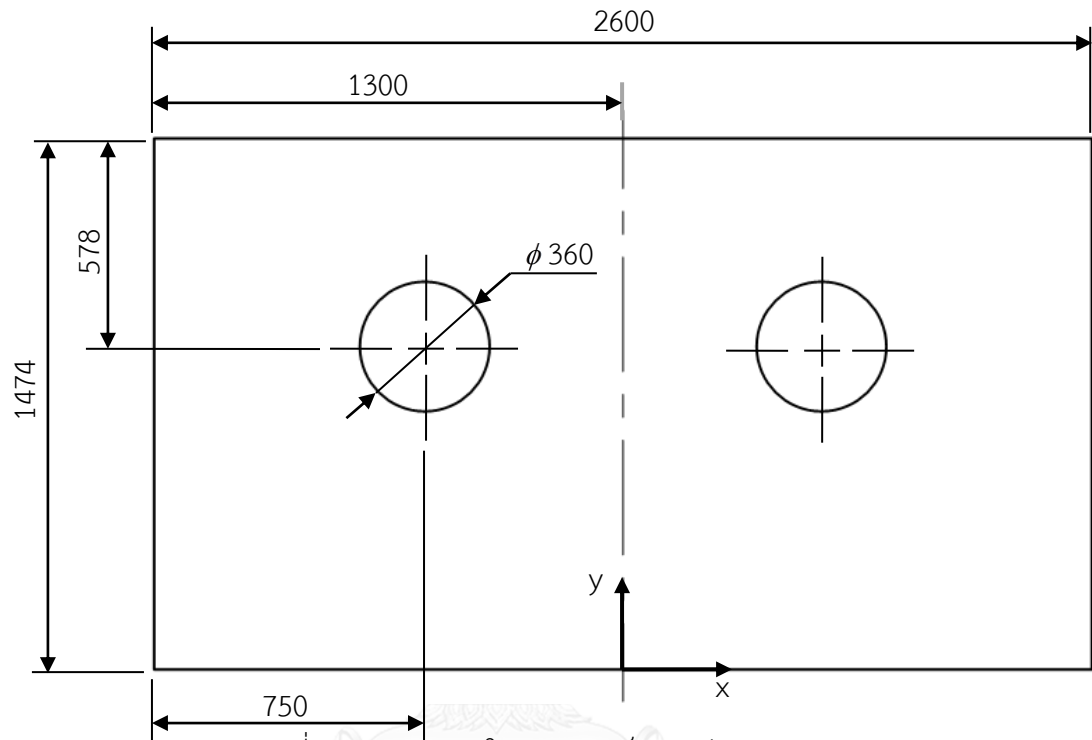
ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็น

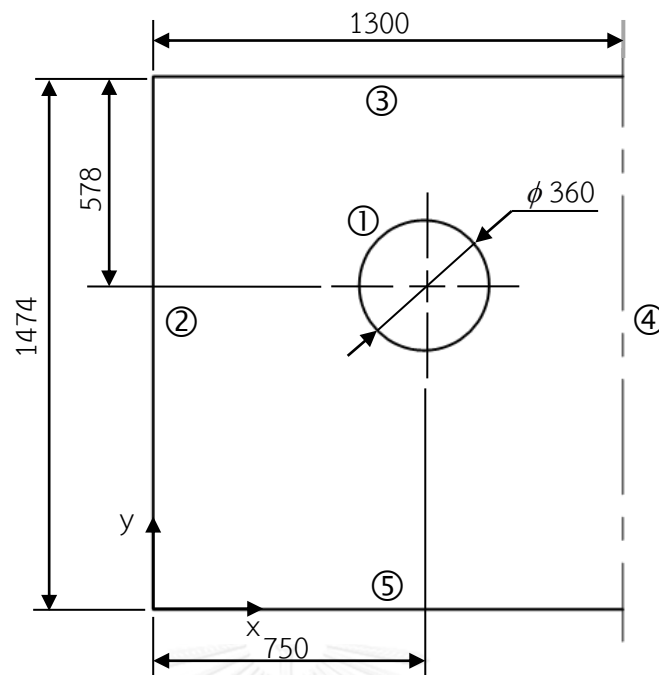
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ก.1 การหาตัวประกอบมุมมองเห็นภายในเตาเผาเหล็ก

ขนาดภายในของเตาเผาเหล็กแสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ขนาดภายในเตาเผาเหล็ก (หน่วย : mm)



รูปที่ ก.2 ขนาดสมมาตรภายในเตาเผาเหล็ก (หน่วย : mm)

จากรูปที่ ก.1 จะเห็นได้ว่าภายในเตาเหล็กมีลักษณะสมมาตร (symmetry) ตามแนวแกน x ดังนั้นการหาตัวประกอบการมองเห็นจึงพิจารณาเพียงครึ่งเดียวของความยาวทั้งหมด แสดงดังรูปที่ ก.2 ซึ่งประกอบด้วย 5 พื้นผิว ดังตารางที่ 4.1 โดยแต่ละพื้นผิวจะเห็นซึ่งกันและกันทั้งสิ้น 5 พื้นผิวซึ่งรวมการมองเห็นพื้นผิวดัวเองด้วย ดังนั้นจึงต้องหาตัวประกอบการมองเห็นทั้งหมด 25 ค่า

ก.2 ตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวหมายเลข 1

พื้นผิวหมายเลข 1 คือ เปลวไฟ (combustion flame) ซึ่งได้กำหนดให้มีลักษณะเป็นวงกลมซึ่งมองไปยังพื้นผิวระนาบอื่น ๆ ซึ่งได้ใช้วิธีการหาตัวประกอบการมองเห็น [16] แสดงดังรูปที่ ก.3 ซึ่งเมื่อเงื่อนไขและสมการในการคำนวณ (governing equation) ดังนี้

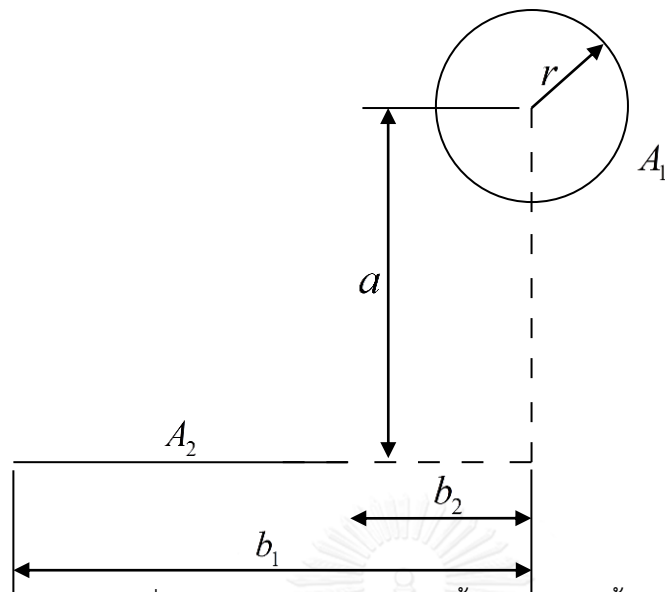
$$r < \sqrt{(a^2 + b_2^2)} \quad \text{ก.1}$$

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2\pi} (\tan^{-1} B_1 - \tan^{-1} B_2) \quad \text{ก.2}$$

เมื่อ

$$B_1 = \frac{b_1}{a} \quad \text{ก.3}$$

$$B_2 = \frac{b_2}{a} \quad \text{ก.4}$$



รูปที่ ก.3 การมองเห็นระหว่างพื้นผิว 1 กับพื้นผิวอื่น ๆ [16]

หากพิจารณาระหว่างรูปที่ ก.2 และรูปที่ ก.3 จะเห็นได้ว่าพื้นผิวระนาบทั้ง 4 ผิวของรูปที่ ก.2 ต้องพิจารณาเป็น 2 พื้นผิวเพื่อที่จะสามารถคำนวณได้ตามรูปที่ ก.3 ในที่นี้จะยกตัวอย่างการคำนวณระหว่างพื้นผิว 1 กับพื้นผิว 5 ตรวจสอบเงื่อนไขจากสมการ ก.1 จะได้ว่า

$$r < \sqrt{(896^2 + 0^2)}$$

$$r < 896$$

จะได้ว่ารัศมีวงกลม ($r=180$) น้อยกว่า 896 ตามเงื่อนไขดังนั้นสามารถใช้สมการ ก.2 ซึ่งพิจารณาเป็น 2 พื้นผิว คือ พื้นผิว 501 และ พื้นผิว 502 ดังนี้

$$F_{1 \rightarrow 501} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{750}{896} - \tan^{-1} \frac{0}{896} \right) = 0.11092$$

$$F_{1 \rightarrow 502} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{550}{896} - \tan^{-1} \frac{0}{896} \right) = 0.08763$$

ดังนั้นตัวประกอบมองเห็นของพื้นผิว 1 มายังพื้นผิว 5 คือ

$$F_{1 \rightarrow 5} = F_{1 \rightarrow 501} + F_{1 \rightarrow 502} = 0.11092 + 0.08763$$

$$F_{1 \rightarrow 5} = 0.19855$$

เมื่อพิจารณาทุก 5 พื้นผิวจะได้ตัวประกอบมองเห็นดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว 1 ไปยังพื้นผิวอื่น ๆ

พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น
$F_{1 \rightarrow 1}$	0 (พื้นผิวเป็นส่วนโค้งจึงมองไม่เห็นตัวเอง)
$F_{1 \rightarrow 2}$	0.24359
$F_{1 \rightarrow 3}$	0.26656
$F_{1 \rightarrow 4}$	0.29134
$F_{1 \rightarrow 5}$	0.19855

ก.3 ตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวหมายเลข 2

ก.3.1 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 1

เนื่องจากตัวประกอบการมองเห็นของการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิว A_2 ไปยังพื้นผิว A_1 จะมีสัดส่วนระหว่างพื้นผิว A_1 และพื้นผิว A_2 ซึ่งคือ Reciprocity relation จากสมการ 3.9 โดย A_1 คือเส้นรอบวงของวงกลม

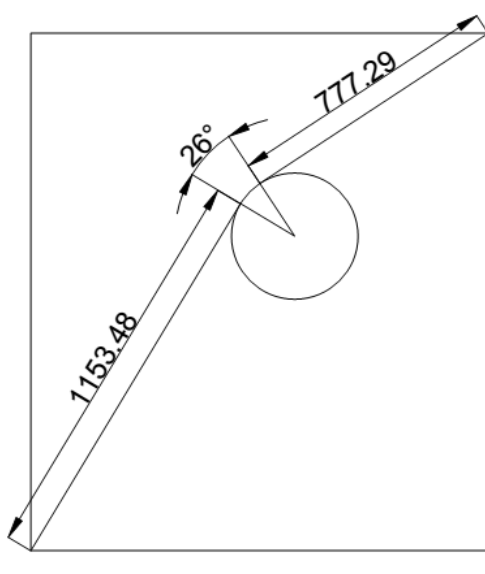
$$A_2 F_{2 \rightarrow 1} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} \quad 3.9$$

$$F_{2 \rightarrow 1} = \frac{360\pi \times 0.24359}{1474}$$

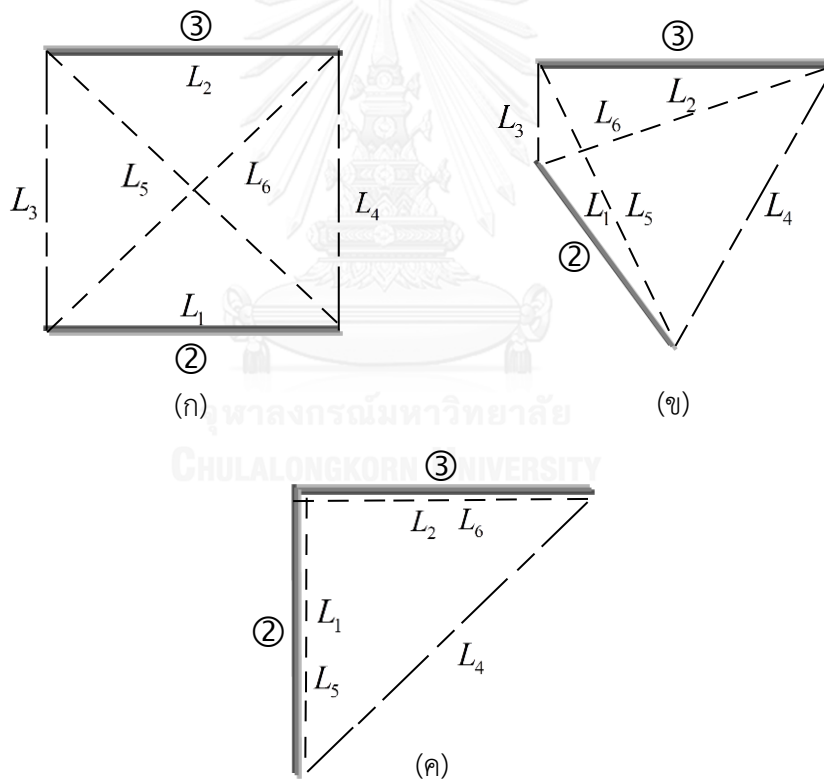
$$F_{2 \rightarrow 1} = 0.1869$$

ก.3.2 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 3

หากพิจารณาตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 3 แสดงรูปที่ ก.4 ซึ่งพื้นผิว 1 เป็นตัวขวางกั้น (block) การแผ่รังสี ดังนั้นสามารถใช้วิธี Crossed-string method ในการคำนวณหาได้ แต่เนื่องจากพื้นผิว 2 และพื้นผิว 3 ตั้งฉากซึ่งกันและกันโดยมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม สามารถแสดงการหาความยาวของเส้นได้ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.4 การมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 3



รูปที่ ก.5 (ก) - (ค) การหาความยาวของรูปสามเหลี่ยมของ Crossed-string method

การหาตัวประกอบมองเห็นใช้วิธี Crossed-string method จากรูปที่ ก.4 ความยาว L_4 จะประกอบด้วยความยาวเส้นตรง 2 เส้น และความยาวของส่วนโค้ง 1 เส้น ที่เกิดจากพื้นที่วงกลมของหัวเผาขวางกันการแผ่รังสี ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการ 3.11 ดังนี้

$$F_{2 \rightarrow 3} = \frac{(L_5 + L_6) - (L_3 + L_4)}{2 \times L_1} \quad 3.11$$

$$F_{2 \rightarrow 3} = \frac{(1474 + 1300) - \left(1153.48 + 180 \times \frac{26\pi}{180} + 777.29\right)}{2 \times 1474}$$

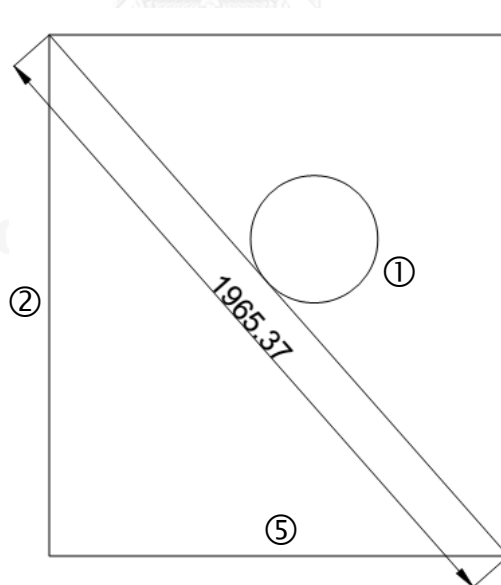
$$F_{2 \rightarrow 3} = 0.25843$$

ก.3.3 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 5

หากพิจารณาตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 5 แสดงดังรูปที่ ก.6 ซึ่งสามารถคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นได้ โดยใช้ Crossed-string method ตามหลักการเช่นเดียวกับหัวข้อ ก.3.2 ข้างต้นได้และจากสมการ 3.11 จะได้

$$F_{2 \rightarrow 5} = \frac{(1474 + 1300) - (1965.37)}{2 \times 1474}$$

$$F_{2 \rightarrow 5} = 0.27429$$



รูปที่ ก.6 การมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 5

ก.3.4 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 4

หากพิจารณาตามหลักการอนุรักษ์พลังงานพลังงานที่ปลดปล่อยการแผ่รังสีจากพื้นผิว 2 ไปยังพื้นผิวโดยรอบ ๆ จำนวน 5 พื้นผิว ต้องมีค่าเท่ากับพลังงานทั้งหมดที่ปลดปล่อย

จากพื้นผิว 2 ตามความสัมพันธ์ของ Summation rule โดย $F_{2 \rightarrow 2} = 0$ เนื่องจากพื้นผิว 2 เป็นระนาบจึงไม่เห็นตัวเอง ดังนั้นสามารถพิจารณาตัวประกอบมุมมองเห็นได้จากสมการ 3.10

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = F_{i \rightarrow 1} + F_{i \rightarrow 2} + F_{i \rightarrow 3} + \cdots + F_{i \rightarrow N-2} + F_{i \rightarrow N-1} + F_{i \rightarrow N} = 1 \quad 3,10$$

$$F_{2 \rightarrow 1} + F_{2 \rightarrow 2} + F_{2 \rightarrow 3} + F_{2 \rightarrow 4} + F_{2 \rightarrow 5} = 1$$

$$0.1869 + 0 + 0.25843 + F_{2 \rightarrow 4} + 0.27429 = 1$$

$$F_{2 \rightarrow 4} = 0.28038$$

ก.4 ตัวประกอบมุมมองเห็นของพื้นผิวหมายเลข 3

ก.4.1 ตัวประกอบมุมมองเห็นระหว่างพื้นผิว 3 และพื้นผิว 1

เนื่องจากตัวประกอบมุมมองเห็นของการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิว A_3 ไปยังพื้นผิว L_2 จะมีสัดส่วนระหว่างพื้นผิว L_2 และพื้นผิว A_3 สามารถพิจารณาโดยใช้ Reciprocity relation ตามหลักการของหัวข้อ ก.3.1 ดังนี้

$$F_{3 \rightarrow 1} = \frac{360\pi \times 0.26656}{1300}$$

$$F_{3 \rightarrow 1} = 0.2319$$

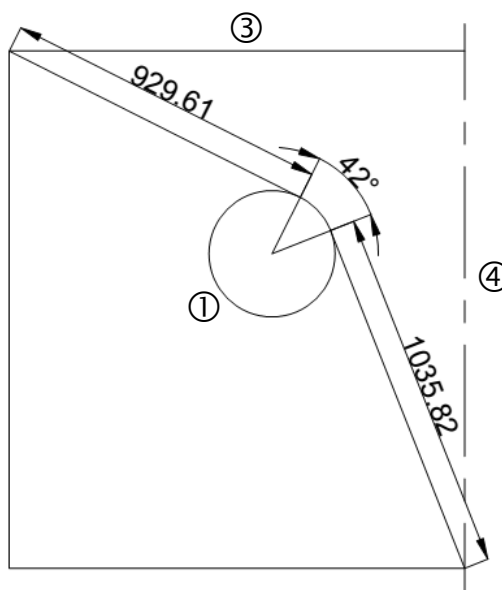
ก.4.2 ตัวประกอบมุมมองเห็นระหว่างพื้นผิว 3 และพื้นผิว 2

เนื่องจากทราบตัวประกอบมุมมองเห็นระหว่างพื้นผิว 2 และพื้นผิว 3 แล้ว ดังนั้นสามารถพิจารณาโดยใช้ Reciprocity relation ตามหลักการของหัวข้อ ก.3.1 และตามสมการ 3.9 ดังนี้

$$F_{3 \rightarrow 2} = \frac{1474 \times 0.25843}{1300}$$

$$F_{3 \rightarrow 2} = 0.29302$$

ก.4.3 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 3 และพื้นผิว 4



รูปที่ ก.7 การมองเห็นระหว่างพื้นผิว 3 และพื้นผิว 4

หากพิจารณาตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 3 และพื้นผิว 4 แสดงดังรูปที่ ก.7 ซึ่งสามารถคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นได้ โดยใช้ Crossed-string method ตามหลักการเช่นเดียวกับหัวข้อ ก.3.2 ข้างต้นได้ และจากสมการ 3.11 จะได้

$$F_{3 \rightarrow 4} = \frac{(1300 + 1474) - \left(929.61 + 180 \times \frac{42\pi}{180} + 1035.82 \right)}{2 \times 1300}$$

$$F_{3 \rightarrow 4} = 0.26024$$

ก.4.4 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 3 และพื้นผิว 5 (summation rule)

ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 3 และพื้นผิว 5 สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ Summation rule โดย $F_{3 \rightarrow 3} = 0$ เนื่องจากพื้นผิว 3 เป็นระนาบจึงไม่เห็นตัวเอง ดังนั้นสามารถพิจารณาตัวประกอบการมองเห็นตามหลักการหัวข้อ ก.3.4 และจากสมการ 3.10 ดังนี้

$$F_{3 \rightarrow 1} + F_{3 \rightarrow 2} + F_{3 \rightarrow 3} + F_{3 \rightarrow 4} + F_{3 \rightarrow 5} = 1$$

$$F_{3 \rightarrow 5} = 1 - 0.2319 - 0.29302 - 0.26024$$

$$F_{3 \rightarrow 5} = 0.21484$$

ก.5 ตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวหมายเลข 4

ก.5.1 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 4 และพื้นผิว 1

สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Reciprocity relation และตามหัวข้อข้างต้นดังนี้

$$F_{4 \rightarrow 1} = \frac{360\pi \times 0.29134}{1474}$$

$$F_{4 \rightarrow 1} = 0.22354$$

ก.5.2 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 4 และพื้นผิว 3

สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Reciprocity relation และตามหลักการหัวข้อข้างต้นดังนี้

$$F_{4 \rightarrow 3} = \frac{1300 \times 0.26024}{1474}$$

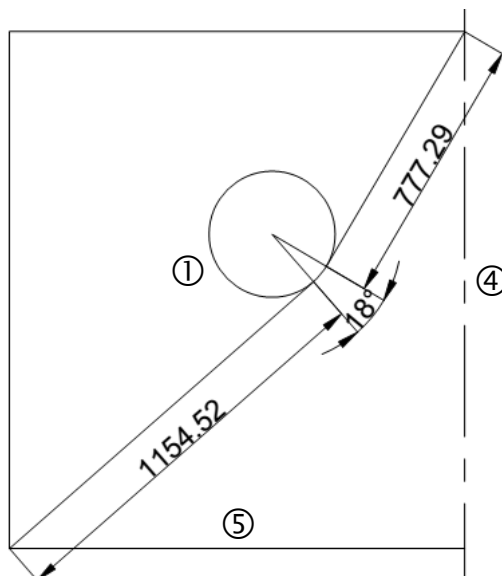
$$F_{4 \rightarrow 3} = 0.22952$$

ก.5.3 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 4 และพื้นผิว 5

ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 4 และพื้นผิว 5 แสดงดังรูปที่ ก.8 ซึ่งสามารถคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นได้ โดยใช้ Crossed-string method ตามหลักการหัวข้อข้างต้นได้ ดังนี้

$$F_{4 \rightarrow 5} = \frac{(1474 + 1300) - \left(777.29 + 180 \times \frac{18\pi}{180} + 1154.52 \right)}{2 \times 1474}$$

$$F_{4 \rightarrow 5} = 0.26649$$



รูปที่ ก.8 การมองเห็นระหว่างพื้นผิว 4 และพื้นผิว 5

ก.5.4 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 4 และพื้นผิว 2

สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Reciprocity relation และตามหลักการหัวข้อข้างต้นดังนี้

$$F_{4 \rightarrow 2} = \frac{1474 \times 0.28038}{1474}$$

$$F_{4 \rightarrow 2} = 0.28038$$

อย่างไรก็ตามตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 4 และพื้นผิว 2 สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Summation rule โดย $F_{4 \rightarrow 4} = 0$ เนื่องจากพื้นผิว 4 เป็นระนาบจึงไม่เห็นตัวเองได้ดังนี้

$$F_{4 \rightarrow 1} + F_{4 \rightarrow 2} + F_{4 \rightarrow 3} + F_{4 \rightarrow 4} + F_{4 \rightarrow 5} = 0$$

$$F_{4 \rightarrow 2} = 1 - 0.22354 - 0.22952 - 0.26649$$

$$F_{4 \rightarrow 2} = 0.28045$$

จะเห็นว่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 4 และพื้นผิว 2 โดยใช้วิธี Reciprocity relation และ Summation rule มีค่าใกล้เคียงมาก ซึ่งถือว่าการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณด้วย

ก.6 ตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวหมายเลข 5

ก.6.1 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 5 และพื้นผิว 1

สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Reciprocity relation และตามหลักการหัวข้อข้างต้นดังนี้

$$F_{5 \rightarrow 1} = \frac{360\pi \times 0.19855}{1300}$$

$$F_{5 \rightarrow 1} = 0.17273$$

ก.6.2 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 5 และพื้นผิว 2

สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Reciprocity relation และตามหลักการหัวข้อข้างต้นดังนี้

$$F_{5 \rightarrow 2} = \frac{1474 \times 0.27429}{1300}$$

$$F_{5 \rightarrow 2} = 0.311003$$

ก.6.3 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 5 และพื้นผิว 4

สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Reciprocity relation และตามหลักการหัวข้อข้างต้นดังนี้

$$F_{5 \rightarrow 4} = \frac{1474 \times 0.26649}{1300}$$

$$F_{5 \rightarrow 4} = 0.30216$$

ก.6.4 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 5 และพื้นผิว 3

สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Reciprocity relation และตามหลักการหัวข้อข้างต้นดังนี้

$$F_{5 \rightarrow 3} = \frac{1300 \times 0.21484}{1300}$$

$$F_{5 \rightarrow 3} = 0.21484$$

เช่นเดียวกับหัวข้อ ก.5.4 ตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 5 และพื้นผิว 3 สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของ Summation rule โดย $F_{5 \rightarrow 5} = 0$ เนื่องจากพื้นผิว 5 เป็นระนาบจึงไม่เห็นตัวเองได้ดังนี้

$$F_{5 \rightarrow 1} + F_{5 \rightarrow 2} + F_{5 \rightarrow 3} + F_{5 \rightarrow 4} + F_{5 \rightarrow 5} = 1$$

$$F_{5 \rightarrow 3} = 1 - 0.17273 - 0.311003 - 0.30216$$

$$F_{5 \rightarrow 3} = 0.214107$$

จะเห็นได้ว่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว 5 และพื้นผิว 3 โดยใช้วิธี Reciprocity relation และ Summation rule มีค่าใกล้เคียงมาก ซึ่งถือว่าเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณด้วย

การคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นของพื้นที่ปิดล้อม 5 ผิว ซึ่งมีค่าตัวประกอบการมองเห็นทั้งหมด 25 ค่า แสดงดังตารางที่ ก.2 โดยตัวประกอบการมองเห็นแต่ละพื้นผิวสามารถคำนวณได้จากการใช้สูตรการคำนวณตามสมการ ก.1-ก.4 , ความสัมพันธ์ของ Reciprocity relation ตามสมการ 3.9 , ความสัมพันธ์ของ Summation rule ตามสมการ 3.10 และวิธี Crossed-string method ตามสมการ 3.11

ตารางที่ ก.2 ค่าตัวประกอบการมองเห็นพื้นที่ปิดล้อม 5 ผิว

พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น	พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น
$F_{1 \rightarrow 1}$	0	$F_{4 \rightarrow 1}$	0.22354
$F_{1 \rightarrow 2}$	0.24359	$F_{4 \rightarrow 2}$	0.28038
$F_{1 \rightarrow 3}$	0.26656	$F_{4 \rightarrow 3}$	0.22952
$F_{1 \rightarrow 4}$	0.29134	$F_{4 \rightarrow 4}$	0
$F_{1 \rightarrow 5}$	0.19855	$F_{4 \rightarrow 5}$	0.26649
$F_{2 \rightarrow 1}$	0.1869	$F_{5 \rightarrow 1}$	0.17273
$F_{2 \rightarrow 2}$	0	$F_{5 \rightarrow 2}$	0.311003
$F_{2 \rightarrow 3}$	0.25843	$F_{5 \rightarrow 3}$	0.21484
$F_{2 \rightarrow 4}$	0.28038	$F_{5 \rightarrow 4}$	0.30216
$F_{2 \rightarrow 5}$	0.27429	$F_{5 \rightarrow 5}$	0
$F_{3 \rightarrow 1}$	0.2319		
$F_{3 \rightarrow 2}$	0.29302		
$F_{3 \rightarrow 3}$	0		
$F_{3 \rightarrow 4}$	0.26024		
$F_{3 \rightarrow 5}$	0.21484		

ตารางที่ ก.3 ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็ก 2 เอลิเมนต์กับพื้นผิวอื่น ๆ

พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น	พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น
$F_{501 \rightarrow 1}$	0.16222	$F_{502 \rightarrow 1}$	0.18324
$F_{501 \rightarrow 2}$	0.39465	$F_{502 \rightarrow 2}$	0.22737
$F_{501 \rightarrow 3}$	0.23493	$F_{502 \rightarrow 3}$	0.19473
$F_{501 \rightarrow 4}$	0.20819	$F_{502 \rightarrow 4}$	0.39465

ตารางที่ ก.4 ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแท่งเหล็ก 5 เอลิเมนต์กับพื้นผิวอื่น ๆ

พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น	พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น
$F_{501 \rightarrow 1}$	0.13604	$F_{504 \rightarrow 1}$	0.19354
$F_{501 \rightarrow 2}$	0.45624	$F_{504 \rightarrow 2}$	0.23787
$F_{501 \rightarrow 3}$	0.25447	$F_{504 \rightarrow 3}$	0.19604
$F_{501 \rightarrow 4}$	0.15325	$F_{504 \rightarrow 4}$	0.37254

$F_{502 \rightarrow 1}$	0.17251	$F_{505 \rightarrow 1}$	0.16444
$F_{502 \rightarrow 2}$	0.37254	$F_{505 \rightarrow 2}$	0.18960
$F_{502 \rightarrow 3}$	0.22868	$F_{505 \rightarrow 3}$	0.18972
$F_{502 \rightarrow 4}$	0.22627	$F_{505 \rightarrow 4}$	0.45624
$F_{503 \rightarrow 1}$	0.19714		
$F_{503 \rightarrow 2}$	0.29880		
$F_{503 \rightarrow 3}$	0.20525		
$F_{503 \rightarrow 4}$	0.29880		

ตารางที่ ก.5 ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแห่งหลัก 10 เอลิเมนต์กับพื้นผิวอื่น ๆ

พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น	พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น
$F_{501 \rightarrow 1}$	0.12686	$F_{506 \rightarrow 1}$	0.20025
$F_{501 \rightarrow 2}$	0.47799	$F_{506 \rightarrow 2}$	0.28192
$F_{501 \rightarrow 3}$	0.25782	$F_{506 \rightarrow 3}$	0.20214
$F_{501 \rightarrow 4}$	0.13733	$F_{506 \rightarrow 4}$	0.31569
$F_{502 \rightarrow 1}$	0.14521	$F_{507 \rightarrow 1}$	0.19834
$F_{502 \rightarrow 2}$	0.43449	$F_{507 \rightarrow 2}$	0.25147
$F_{502 \rightarrow 3}$	0.25112	$F_{507 \rightarrow 3}$	0.19755
$F_{502 \rightarrow 4}$	0.16918	$F_{507 \rightarrow 4}$	0.35264
$F_{503 \rightarrow 1}$	0.16394	$F_{508 \rightarrow 1}$	0.18875
$F_{503 \rightarrow 2}$	0.39244	$F_{508 \rightarrow 2}$	0.22428
$F_{503 \rightarrow 3}$	0.23342	$F_{508 \rightarrow 3}$	0.19453
$F_{503 \rightarrow 4}$	0.21021	$F_{508 \rightarrow 4}$	0.39244
$F_{504 \rightarrow 1}$	0.18108	$F_{509 \rightarrow 1}$	0.17352
$F_{504 \rightarrow 2}$	0.35264	$F_{509 \rightarrow 2}$	0.20021
$F_{504 \rightarrow 3}$	0.22394	$F_{509 \rightarrow 3}$	0.19178
$F_{504 \rightarrow 4}$	0.24234	$F_{509 \rightarrow 4}$	0.43449
$F_{505 \rightarrow 1}$	0.19403	$F_{510 \rightarrow 1}$	0.15536
$F_{505 \rightarrow 2}$	0.31569	$F_{510 \rightarrow 2}$	0.17899
$F_{505 \rightarrow 3}$	0.20836	$F_{510 \rightarrow 3}$	0.18766

$F_{505 \rightarrow 4}$	0.28192	$F_{510 \rightarrow 4}$	0.47799
-------------------------	---------	-------------------------	---------

ตารางที่ ก.6 ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแห่งชาติ 20 เอลิเมนต์กับพื้นผิวอื่น ๆ

พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น	พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น
$F_{501 \rightarrow 1}$	0.12243	$F_{511 \rightarrow 1}$	0.19968
$F_{501 \rightarrow 2}$	0.48898	$F_{511 \rightarrow 2}$	0.28995
$F_{501 \rightarrow 3}$	0.25824	$F_{511 \rightarrow 3}$	0.20353
$F_{501 \rightarrow 4}$	0.13035	$F_{511 \rightarrow 4}$	0.30684
$F_{502 \rightarrow 1}$	0.13129	$F_{512 \rightarrow 1}$	0.20081
$F_{502 \rightarrow 2}$	0.46701	$F_{512 \rightarrow 2}$	0.27389
$F_{502 \rightarrow 3}$	0.25739	$F_{512 \rightarrow 3}$	0.20076
$F_{502 \rightarrow 4}$	0.14430	$F_{512 \rightarrow 4}$	0.32454
$F_{503 \rightarrow 1}$	0.14051	$F_{513 \rightarrow 1}$	0.19984
$F_{503 \rightarrow 2}$	0.44522	$F_{513 \rightarrow 2}$	0.25866
$F_{503 \rightarrow 3}$	0.25411	$F_{513 \rightarrow 3}$	0.19846
$F_{503 \rightarrow 4}$	0.16016	$F_{513 \rightarrow 4}$	0.34303
$F_{504 \rightarrow 1}$	0.14992	$F_{514 \rightarrow 1}$	0.19684
$F_{504 \rightarrow 2}$	0.42375	$F_{514 \rightarrow 2}$	0.24427
$F_{504 \rightarrow 3}$	0.24814	$F_{514 \rightarrow 3}$	0.19664
$F_{504 \rightarrow 4}$	0.17819	$F_{514 \rightarrow 4}$	0.36226
$F_{505 \rightarrow 1}$	0.15935	$F_{515 \rightarrow 1}$	0.19197
$F_{505 \rightarrow 2}$	0.40270	$F_{515 \rightarrow 2}$	0.23068
$F_{505 \rightarrow 3}$	0.23932	$F_{515 \rightarrow 3}$	0.19517
$F_{505 \rightarrow 4}$	0.19864	$F_{515 \rightarrow 4}$	0.38217
$F_{506 \rightarrow 1}$	0.16853	$F_{516 \rightarrow 1}$	0.18552
$F_{506 \rightarrow 2}$	0.38217	$F_{516 \rightarrow 2}$	0.21789
$F_{506 \rightarrow 3}$	0.22752	$F_{516 \rightarrow 3}$	0.19389
$F_{506 \rightarrow 4}$	0.22177	$F_{516 \rightarrow 4}$	0.40270
$F_{507 \rightarrow 1}$	0.17719	$F_{517 \rightarrow 1}$	0.17782
$F_{507 \rightarrow 2}$	0.36226	$F_{517 \rightarrow 2}$	0.20586

$F_{507 \rightarrow 3}$	0.23454	$F_{517 \rightarrow 3}$	0.19257
$F_{507 \rightarrow 4}$	0.22601	$F_{517 \rightarrow 4}$	0.42375
$F_{508 \rightarrow 1}$	0.18497	$F_{518 \rightarrow 1}$	0.16922
$F_{508 \rightarrow 2}$	0.34303	$F_{518 \rightarrow 2}$	0.19456
$F_{508 \rightarrow 3}$	0.21334	$F_{518 \rightarrow 3}$	0.19100
$F_{508 \rightarrow 4}$	0.25866	$F_{518 \rightarrow 4}$	0.44522
$F_{509 \rightarrow 1}$	0.19153	$F_{519 \rightarrow 1}$	0.16006
$F_{509 \rightarrow 2}$	0.32454	$F_{519 \rightarrow 2}$	0.18396
$F_{509 \rightarrow 3}$	0.21004	$F_{519 \rightarrow 3}$	0.18897
$F_{509 \rightarrow 4}$	0.27389	$F_{519 \rightarrow 4}$	0.46701
$F_{510 \rightarrow 1}$	0.19652	$F_{520 \rightarrow 1}$	0.15065
$F_{510 \rightarrow 2}$	0.30684	$F_{520 \rightarrow 2}$	0.17403
$F_{510 \rightarrow 3}$	0.20669	$F_{520 \rightarrow 3}$	0.18634
$F_{510 \rightarrow 4}$	0.28995	$F_{520 \rightarrow 4}$	0.48898

ตารางที่ ก.7 ค่าตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิวแห่งเหล็ก 50 เอลิเมนต์กับพื้นผิวอื่น ๆ

พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น	พื้นผิวการมองเห็น	ตัวประกอบการมองเห็น
$F_{501 \rightarrow 1}$	0.11983	$F_{526 \rightarrow 1}$	0.19901
$F_{501 \rightarrow 2}$	0.49559	$F_{526 \rightarrow 2}$	0.29490
$F_{501 \rightarrow 3}$	0.25813	$F_{526 \rightarrow 3}$	0.20443
$F_{501 \rightarrow 4}$	0.12645	$F_{526 \rightarrow 4}$	0.30166
$F_{502 \rightarrow 1}$	0.12328	$F_{527 \rightarrow 1}$	0.19996
$F_{502 \rightarrow 2}$	0.48678	$F_{527 \rightarrow 2}$	0.28828
$F_{502 \rightarrow 3}$	0.25833	$F_{527 \rightarrow 3}$	0.20322
$F_{502 \rightarrow 4}$	0.13161	$F_{527 \rightarrow 4}$	0.30854
$F_{503 \rightarrow 1}$	0.12680	$F_{528 \rightarrow 1}$	0.20058
$F_{503 \rightarrow 2}$	0.47797	$F_{528 \rightarrow 2}$	0.28179
$F_{503 \rightarrow 3}$	0.25819	$F_{528 \rightarrow 3}$	0.20207
$F_{503 \rightarrow 4}$	0.13704	$F_{528 \rightarrow 4}$	0.31556
$F_{504 \rightarrow 1}$	0.13038	$F_{529 \rightarrow 1}$	0.20087

$F_{504 \rightarrow 2}$	0.46919	$F_{529 \rightarrow 2}$	0.27543
$F_{504 \rightarrow 3}$	0.25767	$F_{529 \rightarrow 3}$	0.20100
$F_{504 \rightarrow 4}$	0.14276	$F_{529 \rightarrow 4}$	0.32271
$F_{505 \rightarrow 1}$	0.13402	$F_{530 \rightarrow 1}$	0.20081
$F_{505 \rightarrow 2}$	0.46044	$F_{530 \rightarrow 2}$	0.26921
$F_{505 \rightarrow 3}$	0.25676	$F_{530 \rightarrow 3}$	0.20000
$F_{505 \rightarrow 4}$	0.14878	$F_{530 \rightarrow 4}$	0.32998
$F_{506 \rightarrow 1}$	0.13770	$F_{531 \rightarrow 1}$	0.20043
$F_{506 \rightarrow 2}$	0.45172	$F_{531 \rightarrow 2}$	0.26312
$F_{506 \rightarrow 3}$	0.25546	$F_{531 \rightarrow 3}$	0.19908
$F_{506 \rightarrow 4}$	0.15512	$F_{531 \rightarrow 4}$	0.33738
$F_{507 \rightarrow 1}$	0.14143	$F_{532 \rightarrow 1}$	0.19970
$F_{507 \rightarrow 2}$	0.44305	$F_{532 \rightarrow 2}$	0.25716
$F_{507 \rightarrow 3}$	0.25373	$F_{532 \rightarrow 3}$	0.19824
$F_{507 \rightarrow 4}$	0.16179	$F_{532 \rightarrow 4}$	0.34489
$F_{508 \rightarrow 1}$	0.14519	$F_{533 \rightarrow 1}$	0.19865
$F_{508 \rightarrow 2}$	0.43443	$F_{533 \rightarrow 2}$	0.25133
$F_{508 \rightarrow 3}$	0.25157	$F_{533 \rightarrow 3}$	0.19748
$F_{508 \rightarrow 4}$	0.16881	$F_{533 \rightarrow 4}$	0.35253
$F_{509 \rightarrow 1}$	0.14897	$F_{534 \rightarrow 1}$	0.19729
$F_{509 \rightarrow 2}$	0.42587	$F_{534 \rightarrow 2}$	0.24564
$F_{509 \rightarrow 3}$	0.24896	$F_{534 \rightarrow 3}$	0.19679
$F_{509 \rightarrow 4}$	0.17620	$F_{534 \rightarrow 4}$	0.36028
$F_{510 \rightarrow 1}$	0.15276	$F_{535 \rightarrow 1}$	0.19562
$F_{510 \rightarrow 2}$	0.41737	$F_{535 \rightarrow 2}$	0.24008
$F_{510 \rightarrow 3}$	0.24590	$F_{535 \rightarrow 3}$	0.19616
$F_{510 \rightarrow 4}$	0.18397	$F_{535 \rightarrow 4}$	0.36814
$F_{511 \rightarrow 1}$	0.15654	$F_{536 \rightarrow 1}$	0.19367
$F_{511 \rightarrow 2}$	0.40895	$F_{536 \rightarrow 2}$	0.23464
$F_{511 \rightarrow 3}$	0.24238	$F_{536 \rightarrow 3}$	0.19558

$F_{511 \rightarrow 4}$	0.19214	$F_{536 \rightarrow 4}$	0.37611
$F_{512 \rightarrow 1}$	0.16029	$F_{537 \rightarrow 1}$	0.19145
$F_{512 \rightarrow 2}$	0.40060	$F_{537 \rightarrow 2}$	0.22934
$F_{512 \rightarrow 3}$	0.23838	$F_{537 \rightarrow 3}$	0.19504
$F_{512 \rightarrow 4}$	0.20073	$F_{537 \rightarrow 4}$	0.38418
$F_{513 \rightarrow 1}$	0.16400	$F_{538 \rightarrow 1}$	0.18897
$F_{513 \rightarrow 2}$	0.39235	$F_{538 \rightarrow 2}$	0.22416
$F_{513 \rightarrow 3}$	0.23390	$F_{538 \rightarrow 3}$	0.19452
$F_{513 \rightarrow 4}$	0.20976	$F_{538 \rightarrow 4}$	0.39235
$F_{514 \rightarrow 1}$	0.16765	$F_{539 \rightarrow 1}$	0.18627
$F_{514 \rightarrow 2}$	0.38418	$F_{539 \rightarrow 2}$	0.21910
$F_{514 \rightarrow 3}$	0.22894	$F_{539 \rightarrow 3}$	0.19402
$F_{514 \rightarrow 4}$	0.21923	$F_{539 \rightarrow 4}$	0.40060
$F_{515 \rightarrow 1}$	0.17122	$F_{540 \rightarrow 1}$	0.18337
$F_{515 \rightarrow 2}$	0.37611	$F_{540 \rightarrow 2}$	0.21417
$F_{515 \rightarrow 3}$	0.22350	$F_{540 \rightarrow 3}$	0.19351
$F_{515 \rightarrow 4}$	0.22917	$F_{540 \rightarrow 4}$	0.40895
$F_{516 \rightarrow 1}$	0.17469	$F_{541 \rightarrow 1}$	0.18028
$F_{516 \rightarrow 2}$	0.36814	$F_{541 \rightarrow 2}$	0.20936
$F_{516 \rightarrow 3}$	0.22063	$F_{541 \rightarrow 3}$	0.19299
$F_{516 \rightarrow 4}$	0.23958	$F_{541 \rightarrow 4}$	0.41737
$F_{517 \rightarrow 1}$	0.17804	$F_{542 \rightarrow 1}$	0.17703
$F_{517 \rightarrow 2}$	0.36028	$F_{542 \rightarrow 2}$	0.20467
$F_{517 \rightarrow 3}$	0.21776	$F_{542 \rightarrow 3}$	0.19244
$F_{517 \rightarrow 4}$	0.24544	$F_{542 \rightarrow 4}$	0.42587
$F_{518 \rightarrow 1}$	0.18125	$F_{543 \rightarrow 1}$	0.17364
$F_{518 \rightarrow 2}$	0.35253	$F_{543 \rightarrow 2}$	0.20009
$F_{518 \rightarrow 3}$	0.21489	$F_{543 \rightarrow 3}$	0.19184
$F_{518 \rightarrow 4}$	0.25133	$F_{543 \rightarrow 4}$	0.43443
$F_{519 \rightarrow 1}$	0.18428	$F_{544 \rightarrow 1}$	0.17013

$F_{519 \rightarrow 2}$	0.34489	$F_{544 \rightarrow 2}$	0.19563
$F_{519 \rightarrow 3}$	0.21367	$F_{544 \rightarrow 3}$	0.19119
$F_{519 \rightarrow 4}$	0.25716	$F_{544 \rightarrow 4}$	0.44305
$F_{520 \rightarrow 1}$	0.18713	$F_{545 \rightarrow 1}$	0.16654
$F_{520 \rightarrow 2}$	0.33738	$F_{545 \rightarrow 2}$	0.19128
$F_{520 \rightarrow 3}$	0.21238	$F_{545 \rightarrow 3}$	0.19046
$F_{520 \rightarrow 4}$	0.26312	$F_{545 \rightarrow 4}$	0.45172
$F_{521 \rightarrow 1}$	0.18976	$F_{546 \rightarrow 1}$	0.16286
$F_{521 \rightarrow 2}$	0.32998	$F_{546 \rightarrow 2}$	0.18704
$F_{521 \rightarrow 3}$	0.21105	$F_{546 \rightarrow 3}$	0.18965
$F_{521 \rightarrow 4}$	0.26921	$F_{546 \rightarrow 4}$	0.46044
$F_{522 \rightarrow 1}$	0.19216	$F_{547 \rightarrow 1}$	0.15914
$F_{522 \rightarrow 2}$	0.32271	$F_{547 \rightarrow 2}$	0.18291
$F_{522 \rightarrow 3}$	0.20971	$F_{547 \rightarrow 3}$	0.18876
$F_{522 \rightarrow 4}$	0.27543	$F_{547 \rightarrow 4}$	0.46919
$F_{523 \rightarrow 1}$	0.19430	$F_{548 \rightarrow 1}$	0.15538
$F_{523 \rightarrow 2}$	0.31556	$F_{548 \rightarrow 2}$	0.17889
$F_{523 \rightarrow 3}$	0.20835	$F_{548 \rightarrow 3}$	0.18776
$F_{523 \rightarrow 4}$	0.28179	$F_{548 \rightarrow 4}$	0.47797
$F_{524 \rightarrow 1}$	0.19617	$F_{549 \rightarrow 1}$	0.15159
$F_{524 \rightarrow 2}$	0.30854	$F_{549 \rightarrow 2}$	0.17497
$F_{524 \rightarrow 3}$	0.20701	$F_{549 \rightarrow 3}$	0.18666
$F_{524 \rightarrow 4}$	0.28828	$F_{549 \rightarrow 4}$	0.48678
$F_{525 \rightarrow 1}$	0.19774	$F_{550 \rightarrow 1}$	0.14781
$F_{525 \rightarrow 2}$	0.30166	$F_{550 \rightarrow 2}$	0.17115
$F_{525 \rightarrow 3}$	0.20570	$F_{550 \rightarrow 3}$	0.18545
$F_{525 \rightarrow 4}$	0.29490	$F_{550 \rightarrow 4}$	0.49559



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข.1 การคำนวณหาอุณหภูมิผิวผนังเตาเผา

อุณหภูมิผิวผนังเตาเป็นส่วนสำคัญต่อตัวแปรอื่น ๆ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_{conv}) , สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (h_{rad}) และการถ่ายเทความร้อนสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม (\dot{Q}_{total}) แสดงดังรูป 3.13 โดยพิจารณาตัวอย่างการคำนวณที่อุณหภูมิผนังภายในเตาเผา $T_{wall} = 1250^{\circ}C$ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกเตาเผาเหล็ก $T_{\infty} = 30^{\circ}C$ และสมมติอุณหภูมิที่ผิวภายนอกเตาเป็นค่าเริ่มต้น $T_{out} = 90^{\circ}C$

$$T_f = \frac{T_{out} + T_{\infty}}{2} = \frac{363.15 + 303.15}{2} = 333.15K$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{333.15} = 3.00165 \times 10^{-3}$$

การคำนวณหาอุณหภูมิผิวด้านนอกเตาต้องใช้วิธีการคำนวณซ้ำ (iteration) ดังนั้นเพื่อสะดวกในการหาค่าคุณสมบัติของอากาศ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) , ค่าความหนืดเชิงจลน์ของของไหล (ν) และ Prandtl number (Pr) โดยงานวิจัยนี้พิจารณาอุณหภูมิในช่วง $50 \leq T(^{\circ}C) \leq 160$ สามารถหาได้ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$k = 7.05212 \times 10^{-5}T + 0.023867 \quad \text{ข.1}$$

$$\nu = 1.06955 \times 10^{-7}T + 1.24777 \times 10^{-5} \quad \text{ข.2}$$

$$Pr = -1.95242 \times 10^{-4}T + 0.73145 \quad \text{ข.3}$$

เมื่อนำอุณหภูมิแทนสมการจะได้คุณสมบัติของอากาศที่ $T = 60^{\circ}C$ คือ $k = 0.02809$ $W/m \cdot K$, $\nu = 1.8895 \times 10^{-5} \text{ m}^2/s$ และ $Pr = 0.71974$ สามารถคำนวณค่า Rayleigh number ตามสมการ 3.6 และสมการ 3.7 ดังนี้

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{out} - T_{\infty})L_c^3}{\nu^2} Pr$$

$$Ra_L = \frac{9.81 \times 3.00165 \times 10^{-3} \times (363.15 - 303.15) \times 1.474^3 \times 0.71974}{(1.8895 \times 10^{-5})^2}$$

$$Ra_L = 1.1406 \times 10^{10}$$

เมื่อได้ค่า $Ra_L = 1.40655 \times 10^6$ สามารถหาค่า Nusselt Number สำหรับพื้นผิวแนวตั้งได้ตามสมการ 3.4 ดังนี้

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad 3.4$$

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 \times (1.1406 \times 10^{10})^{1/6}}{\left[1 + (0.492/0.71974)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 = 263.504$$

ดังนั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_{conv}) ได้ตามสมการ 3.3

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad 3.3$$

$$h_{conv} = \frac{263.504 \times 0.02809}{1.474} = 5.02308 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

ส่วนในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (h_{rad}) สามารถหาได้จากสมการ 3.34

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{out} + T_{\infty}) (T_{out}^2 + T_{\infty}^2) \quad 3.34$$

$$h_{rad} = 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} (363.15 + 303.15) (363.15^2 + 303.15^2)$$

$$h_{rad} = 7.60874 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

หากพิจารณาการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนภายนอกเตาเผาสามารถคำนวณตามสมการ 3.31 , 3.33 และ 3.35

$$\frac{1}{R_{equi}} = \frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{rad}} \quad 3.35$$

$$\frac{1}{R_{equi}} = h_{conv} A + h_{rad} A$$

$$R_{equi} = \frac{1}{h_{conv} A + h_{rad} A} = \frac{1}{1.474 \times (5.02308 + 7.60874)}$$

$$R_{equi} = 0.053708 \text{ K/W}$$

ในส่วนค่าการนำความร้อนของฉนวนผนังเตาสามารถหาได้จากสมการ 3.29 โดยประกอบไปด้วยความหนาของฉนวนผนังเตาทั้งหมด 3 ชั้น ซึ่งมีขนาดความหนาและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนมีค่าดังตารางนี้

ตารางที่ ข.1 ขนาดความหนาและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนผนังเตา [15]

วัสดุทนไฟ	ความหนา (m)	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K$)
อิฐทนไฟ SK36	0.23	1.6
อิฐฉนวนทนความร้อน B3	0.114	0.19
ฉนวนทนความร้อน SUPER	0.05	0.2

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad 3.29$$

$$R_{cond} = \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A} = \frac{1}{1.474} \left(\frac{0.23}{1.6} + \frac{0.114}{0.19} + \frac{0.05}{0.2} \right)$$

$$R_{cond} = 0.674186 \text{ K/W}$$

สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{total} = \frac{(T_{wall} - T_{\infty})}{R_{equi} + R_{cond}} \quad \text{ข.4}$$

$$\dot{Q}_{total} = \frac{1250 - 30}{0.053708 + 0.674186} = 1676.0691 \text{ W}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกเตาเผา ซึ่งพิจารณาเฉพาะความต้านทานของการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{total} = \frac{(T_{out} - T_{\infty})}{R_{equi}} \quad \text{ข.5}$$

$$T_{out, new} = \dot{Q}_{total} \times R_{equi} + T_{\infty} = (1676.0691 \times 0.053708) + 30$$

$$T_{out, new} = 120.0179^{\circ}C$$

เมื่อได้ค่า $T_{out, new} = 120.0179^{\circ}C$ แล้วก็จะนำค่าอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกเตาเผา (T_{out}) ทำการคำนวณซ้ำเพื่อให้ค่า T_{out} ลู่เข้า โดยทำการคำนวณซ้ำตามวิธีข้างต้น ดังนั้นเมื่อคำนวณจนลู่เข้าแล้วจะได้ค่าดังนี้

$$h_{conv} = 5.4279 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

$$h_{rad} = 8.4559 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

$$\dot{Q}_{total} = 1687.2957 \text{ W}$$

$$T_{out,new} = 112.449^\circ\text{C}$$

ข.2 การคำนวณหาอุณหภูมิผิวหลังคาเตาเผา

การคำนวณหาอุณหภูมิหลังคาเตาเผา มีลักษณะการคำนวณคล้ายกับการคำนวณหาอุณหภูมิผนังเตา เพียงแต่เปลี่ยนสมการ Nusselt Number สำหรับการพาความร้อนในแนวระนาบ พิจารณาตัวอย่างการคำนวณที่อุณหภูมิผนังภายในเตาเผา $T_{wall} = 1250^\circ\text{C}$ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายนอกเตาเผาเหล็ก $T_\infty = 30^\circ\text{C}$ และสมมติอุณหภูมิที่ผิวภายนอกเตาเป็นค่าเริ่มต้น $T_{out} = 90^\circ\text{C}$

$$T_f = \frac{T_{out} + T_\infty}{2} = \frac{363.15 + 303.15}{2} = 333.15 \text{ K}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = \frac{1}{333.15} = 3.00165 \times 10^{-3}$$

คำนวณหาคุณสมบัติของอากาศ ได้แก่ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) , ค่าความหนืดเชิงจลน์ของของไหล (ν) และ Prandtl number (Pr) เมื่อนำอุณหภูมิแทนสมการ ข.1 , ข.2 และ ข.3 จะได้คุณสมบัติของอากาศที่ $T = 60^\circ\text{C}$ คือ $k = 0.02809 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, $\nu = 1.8895 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ และ $Pr = 0.71974$ สามารถคำนวณค่า Rayleigh number ตามสมการ 3.6 และสมการ 3.7 ดังนี้

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_{out} - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr$$

$$Ra_L = \frac{9.81 \times 3.00165 \times 10^{-3} \times (363.15 - 303.15) \times (1.3/2)^3 \times 0.71974}{(1.8895 \times 10^{-5})^2}$$

$$Ra_L = 9.7813 \times 10^8$$

เมื่อได้ค่า $Ra_L = 9.7813 \times 10^8$ สามารถหาค่า Nusselt Number สำหรับพื้นผิวแนวระนาบได้ตามสมการ 3.5 ดังนี้

$$Nu = 0.15 Ra_L^{1/3} \quad 3.5$$

$$Nu = 148.8988$$

ดังนั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h_{conv}) ได้ตามสมการ 3.3

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad 3.3$$

$$h_{conv} = \frac{148.8988 \times 0.02809}{(1.3/2)} = 6.4366 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

ส่วนในการหาสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี (h_{rad}) สามารถหาได้จากสมการ 3.34

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{out} + T_{\infty})(T_{out}^2 + T_{\infty}^2) \quad 3.34$$

$$h_{rad} = 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} (363.15 + 303.15)(363.15^2 + 303.15^2)$$

$$h_{rad} = 7.6087 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

หากพิจารณาการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนภายนอกเตาเผาสามารถคำนวณตามสมการ 3.31 , 3.33 และ 3.35

$$\frac{1}{R_{equi}} = \frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{rad}} \quad 3.35$$

$$\frac{1}{R_{equi}} = h_{conv} A + h_{rad} A$$

$$R_{equi} = \frac{1}{h_{conv} A + h_{rad} A} = \frac{1}{1.3 \times (6.4366 \times 7.6087)}$$

$$R_{equi} = 0.05476 \text{ K/W}$$

ในส่วนค่าการนำความร้อนของผนังเตาสามารถหาได้จากสมการ 3.29 โดยประกอบไปด้วยความหนาของผนังเตาทั้งหมด 3 ชั้น โดยมีลักษณะเดียวกับผนังเตาข้างต้นดังนี้

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad 3.29$$

$$R_{cond} = \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A} = \frac{1}{1.3} \left(\frac{0.23}{1.6} + \frac{0.114}{0.19} + \frac{0.05}{0.2} \right)$$

$$R_{cond} = 0.7644 \text{ K/W}$$

สามารถหาค่าการถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{total} = \frac{(T_{wall} - T_{\infty})}{R_{equi} + R_{cond}}$$

$$\dot{Q}_{total} = \frac{1250 - 30}{0.05476 + 0.7644} = 1489.275 \text{ W}$$

ดังนั้นสามารถหาค่าอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกเตาเผา ซึ่งพิจารณาเฉพาะความต้านทานของการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้นสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{total} = \frac{(T_{out,new} - T_{\infty})A}{R_{equi}} \quad \text{ข.5}$$

$$T_{out,new} = \dot{Q}_{total} \times R_{equi} + T_{\infty} = (1489.275 \times 0.05476) + 30$$

$$T_{out,new} = 111.56^{\circ}\text{C}$$

เมื่อได้ค่า $T_{out,new} = 111.56^{\circ}\text{C}$ แล้วก็ให้นำค่าอุณหภูมิที่พื้นผิวด้านนอกเตาเผา (T_{out}) ทำการคำนวณซ้ำเพื่อให้ค่า T_{out} ลู่เข้า โดยทำการคำนวณซ้ำตามวิธีข้างต้น ดังนั้นเมื่อคำนวณจนลู่เข้าแล้วจะได้ค่าดังนี้

$$h_{conv} = 6.8467 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$h_{rad} = 8.2197 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\dot{Q}_{total} = 1496.053 \text{ W}$$

$$T_{out} = 106.38^{\circ}\text{C}$$

ข.3 การคำนวณหา Radiosity และการถ่ายเทความร้อนสุทธิภายในพื้นที่ปิดล้อม

การหาความร้อนสุทธิภายในพื้นที่ปิดล้อมของแต่ละพื้นผิวนั้นแสดงดังรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วย 5 ผิว ซึ่งจำเป็นต้องคำนวณหาค่า Radiosity ของแต่ละพื้นผิวก่อนแสดงดังสมการ 3.20 และ 3.28 โดยขั้นตอนการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.3 พื้นผิวภายในพื้นที่ปิดล้อมแสดงดังรูป ก.2 โดยรายละเอียดของแต่ละพื้นผิวของตัวอย่างการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตาราง ข.2

ตาราง ข.2 อุณหภูมิและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสี 5 พื้นผิว

พื้นผิว	อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี	ความยาวต่อหนึ่งหน่วย (mm)
เปลวไฟ	1,350	1	360π
ผนังเตา	1,150	0.8	1,474
เพดานเตา	1,150	0.8	1,300
พื้นผิวสมมาตร	ไม่มีการถ่ายเทความร้อน	-	1,474
แท่งเหล็ก	1,000	0.9	1,300

พิจารณาเปลวไฟตามสมการ 3.20 และ 3.28 จะได้ว่า

$$\frac{E_{b,i} - J_i}{R_i} = \sum_{j=1}^N \frac{(J_i - J_j)}{R_{i \rightarrow j}} \quad \text{ก.5}$$

$$E_{b,1} = J_1 + \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \{F_{1 \rightarrow 1}(J_1 - J_1) + F_{1 \rightarrow 2}(J_1 - J_2) + F_{1 \rightarrow 3}(J_1 - J_3) + F_{1 \rightarrow 4}(J_1 - J_4) + F_{1 \rightarrow 5}(J_1 - J_5)\}$$

เมื่อสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของเปลวไฟ $\varepsilon = 1$ ดังนั้น Radiosity ของพื้นผิวเปลวไฟจะได้ว่า

$$J_1 = \sigma T_1^4 = 5.67 \times 10^{-8} (1623.15)^4$$

$$J_1 = 393.566 \text{ kW/m}^2 \quad \text{ก.6}$$

พิจารณาผนังเตาสามารถพิจารณาได้ลักษณะเดียวกับเปลวไฟ ดังนั้นสามารถหาค่า Radiosity ของพื้นผิวผนังเตาได้ดังนี้

$$E_{b,2} = J_2 + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \{F_{2 \rightarrow 1}(J_2 - J_1) + F_{2 \rightarrow 2}(J_2 - J_2) + F_{2 \rightarrow 3}(J_2 - J_3) + F_{2 \rightarrow 4}(J_2 - J_4) + F_{2 \rightarrow 5}(J_2 - J_5)\}$$

$$5.67 \times 10^{-8} (1423.15)^4 = J_2 + \frac{1 - 0.8}{0.8} \left\{ \begin{array}{l} 0.1869(J_2 - J_1) + 0.25843(J_2 - J_3) \\ + 0.28038(J_2 - J_4) + 0.27429(J_2 - J_5) \end{array} \right\}$$

$$1.25J_2 - 0.064572J_3 - 0.070127J_4 - 0.068575J_5 = 250.976 \times 10^3 \quad \text{ก.7}$$

พิจารณาเพดานเตาสามารถพิจารณาได้ลักษณะเดียวกับเปลวไฟ ดังนั้นสามารถหาค่า Radiosity ของพื้นผิวเพดานเตาได้ดังนี้

$$E_{b,3} = J_3 + \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \left\{ F_{3 \rightarrow 1}(J_3 - J_1) + F_{3 \rightarrow 2}(J_3 - J_2) + F_{3 \rightarrow 3}(J_3 - J_3) \right\}$$

$$+ F_{3 \rightarrow 4}(J_3 - J_4) + F_{3 \rightarrow 5}(J_3 - J_5) \left. \right\}$$

$$5.67 \times 10^{-8} (1423.15)^4 = J_3 + \frac{1-0.8}{0.8} \left\{ 0.2319(J_3 - J_1) + 0.29302(J_3 - J_2) \right\}$$

$$+ 0.26024(J_3 - J_4) + 0.21484(J_3 - J_5) \left. \right\}$$

$$-0.073215J_2 + 1.250123J_3 - 0.065224J_4 - 0.053708J_5 = 255.404 \times 10^3 \quad \text{ก.8}$$

พิจารณาพื้นผิวสมมาตร เนื่องจากพื้นผิวมีลักษณะสมมาตรตามแนวแกน x (symmetry) ทำให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อน $q=0$ หรือ $\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0$ ดังนั้นสามารถหาค่า Radiosity ของพื้นผิวสมมาตรได้ดังนี้

$$0 = \{ F_{4 \rightarrow 1}(J_4 - J_1) + F_{4 \rightarrow 2}(J_4 - J_2) + F_{4 \rightarrow 3}(J_4 - J_3) + F_{4 \rightarrow 4}(J_4 - J_4) + F_{4 \rightarrow 5}(J_4 - J_5) \}$$

$$0 = \{ 0.22354(J_4 - J_1) + 0.28038(J_4 - J_2) + 0.22952(J_4 - J_3) + 0.26649(J_4 - J_5) \}$$

$$-0.28051J_2 - 0.230099J_3 + J_4 - 0.26584J_5 = 87.978 \times 10^3 \quad \text{ก.9}$$

พิจารณาพื้นผิวแท่งเหล็กสามารถพิจารณาได้ลักษณะเดียวกับเปลวไฟ ดังนั้นสามารถหาค่า Radiosity ของพื้นผิวแท่งเหล็กได้ดังนี้

$$E_{b,5} = J_5 + \frac{1-\varepsilon_5}{\varepsilon_5} \left\{ F_{5 \rightarrow 1}(J_5 - J_1) + F_{5 \rightarrow 2}(J_5 - J_2) + F_{5 \rightarrow 3}(J_5 - J_3) \right\}$$

$$+ F_{5 \rightarrow 4}(J_5 - J_4) + F_{5 \rightarrow 5}(J_5 - J_5) \left. \right\}$$

$$5.67 \times 10^{-8} (1323.15)^4 = J_5 + \frac{1-0.9}{0.9} \left\{ 0.17273(J_5 - J_1) + 0.311003(J_5 - J_2) \right\}$$

$$+ 0.21484(J_5 - J_3) + 0.30216(J_5 - J_4) \left. \right\}$$

$$-0.034557J_2 - 0.02387J_3 - 0.033491J_4 + 1.11111J_5 = 156.524 \times 10^3 \quad \text{ก.10}$$


หากพิจารณาสมการ ก.6-ก.10 สามารถคำนวณค่า Radiosity ในรูปแบบของเมทริกซ์ (matrix) และสามารถคำนวณด้วยการกำจัดแบบเกาส์ (Gauss elimination method) และเมื่อทราบค่า Radiosity แล้วก็สามารถหาค่าความร้อนสุทธิภายในพื้นที่ปิดล้อมของแต่ละพื้นผิวได้จากสมการ 3.20 จะได้ดังตาราง ก.3 ดังนี้

ตาราง ข.3 ค่า Radiosity และความร้อนสุทธิของ 5 พื้นผิว

พื้นผิว	Radiosity (W/m^2)	ความร้อนสุทธิ (kW)
เปลวไฟ	393.566×10^3	189.21
ผนังเตา	236.038×10^3	-20.346
เพดานเตา	238.176×10^3	-29.065
พื้นผิวสมมาตร	251.772×10^3	0.003
แท่งเหล็ก	160.918×10^3	-139.791

จะเห็นได้ว่าเปลวไฟมีความร้อนสุทธิ 189.21 kW ซึ่งหมายถึงความร้อนได้ถูกปลดปล่อยออกจากพื้นผิวของเปลวไฟหรือเป็นการถ่ายเทความร้อนให้กับพื้นผิวอื่น ๆ ในทางกลับกัน ผนังเตา, เพดานเตา และแท่งเหล็กมีความร้อนสุทธิ -20.346, -29.065 และ -139.791 kW ตามลำดับ ซึ่งหมายถึงพื้นผิวจะได้รับความร้อนสุทธิเข้าสู่พื้นผิวนั้นเอง และจากสมดุลพลังงานจะได้ว่าผลรวมของความร้อนสุทธิมีค่าเป็น 0

$$189.21 + (-20.346) + (-29.065) + 0.003 + (-139.791) \approx 0$$



ภาคผนวก ค
รายละเอียดวัสดุทนไฟ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อิฐทนไฟ SK36 [15]

SK 36			
CLASSIFICATION	High-Alumina Brick ASTM C 27, 80% Alumina		
PHYSICAL PROPERTIES	Refractoriness	Orton Cone	35-36
	Bulk Density	kg/m ³	2480
	Apparent Porosity	%	18.5
	Cold Crushing Strength	kg/cm ²	480
	Modulus of Rupture	kg/cm ²	80
	Permanent Linear Change After Heating at 1600 °C	%	0.80
	CHEMICAL COMPOSITION	Alumina (Al ₂ O ₃)	%
Silica (SiO ₂)		%	34.5
Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)		%	1.3
Titania (TiO ₂)		%	1.9
THERMAL EXPANSION	400 °C	%	0.26
	800 °C	%	0.42
	1000 °C	%	0.55
	1200 °C	%	0.69
	1400 °C	%	0.84
THERMAL CONDUCTIVITY	400 °C	(W/m.K)	1.60
	600 °C	(W/m.K)	1.60
	800 °C	(W/m.K)	1.60
	1000 °C	(W/m.K)	1.65

The above data are typical values of which the properties of the samples tested according to the internal procedure and standard of Siam Refractory generally accepted by our customers for many years. The above data can not be used for specification or guarantee purpose. Siam Refractory reserves the right to update the above data and change our internal procedure and standard without any prior notice.

ตาราง ค.1 ค่าคุณสมบัติของอิฐทนไฟ SK36 [15]

Cassification	High-Alumina Brick ASTM C 27, 60% Alumina		
Physical properties	Refractoriness	Orton Cone	35-36
	Bulk density	kg/m^3	2480
	Apparent porosity	%	18.5
	Cold crushing strength	kg/cm^3	480
	Modulus of rupture	kg/cm^3	80
	Permanent linear change after heating at 1600°C	%	0.80
Chemical composition	Alumina (Al_2O_3)	%	60.5
	Silica (SiO_2)	%	34.5
	Iron Oxide (Fe_2O_3)	%	1.3
	Titania (TiO_2)	%	1.9
Thermal expansion	400°C	%	0.28
	800°C	%	0.42
	1000°C	%	0.55
	1200°C	%	0.69
	1400°C	%	0.84
Thermal conductivity	400°C	($W/m \cdot K$)	1.6
	600°C	($W/m \cdot K$)	1.6
	800°C	($W/m \cdot K$)	1.6
	1000°C	($W/m \cdot K$)	1.65

อิฐฉนวนทนความร้อน B3 [15]

		B 3	
CLASSIFICATION	Insulating Brick ,IS R 2811 Group B3		
PHYSICAL PROPERTIES	Max. Service Temperature	°C	1100
	Bulk Density	kg/m ³	740
	Cold Crushing Strength	kg/cm ²	27
	Modulus of Rupture	kg/cm ²	10
	Permanent Linear Change After Heating at 1100 °C	%	-0.50
CHEMICAL COMPOSITION	Alumina (Al ₂ O ₃)	%	9.0
	Silica (SiO ₂)	%	54.0
	Lime (CaO)	%	33.0
	Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	%	0.5
THERMAL CONDUCTIVITY	350 °C	(W/m.K)	0.19
	400 °C	(W/m.K)	0.22
	600 °C	(W/m.K)	0.25
	800 °C	(W/m.K)	0.30

The above data are typical values of which the properties of the samples tested according to the internal procedure and standard of Siam Refractory generally accepted by our customers for many years. The above data can not be used for specification or guarantee purpose. Siam Refractory reserves the right to update the above data and change our internal procedure and standard without any prior notice.

ตาราง ค.2 ค่าคุณสมบัติของอิฐฉนวนทนความร้อน B3 [15]

Cassification	Insulating brick JIS R 2611 Group B3		
Physical properties	Max. service temperature	$^{\circ}\text{C}$	1100
	Bulk density	kg/m^3	740
	Cold crushing strength	kg/cm^3	27
	Modulus of rupture	kg/cm^3	10
	Permanent linear change after heating at 1100°C	%	-0.50
Chemical composition	Alumina (Al_2O_3)	%	9.0
	Silica (SiO_2)	%	54.0
	Lime (CaO)	%	33.0
	Iron Oxide (Fe_2O_3)	%	0.5
Thermal conductivity	350°C	$(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	0.19
	400°C	$(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	0.22
	600°C	$(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	0.25
	800°C	$(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	0.30

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนวัฒน์ แก้วกิตต์ เกิดเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ.2533 ที่จังหวัดนครนายก ในปีการศึกษา 2551 ได้เข้าศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2554 และในปีการศึกษา 2555 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

