

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กกล้าโดยการประยุกต์ใช้การ
คำนวณทางพลศาสตร์ของไหล

นายจิรวัตร ตรีพิเชษฐกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

HEAT TRANSFER AND COMBUSTION ANALYSIS OF STEEL REHEATING FURNACE
BY APPLYING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Mr Jeerawat Treepichetkul

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

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้ของ เตาเผาเหล็กกล้าโดยการประยุกต์ใช้การคำนวณทาง พลศาสตร์ของไหล
โดย	นายจีรวัตร ตรีพิเชษฐกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อยุธยา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ชاکกร จารุพิสิษฐ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. กฤษดา ประภากร)

จิรวัตร์ ตรีพิเชษฐกุล : การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กกล้าโดยการประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล. (HEAT TRANSFER AND COMBUSTION ANALYSIS OF STEEL REHEATING FURNACE BY APPLYING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร. มาวิน สุประดิษฐ ญ อยุธยา, 90 หน้า.

การพัฒนาแบบจำลองใน 3 มิติที่สภาวะคงที่โดยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม FLUENT ถูกนำมาใช้ในการคำนวณการเผาไหม้เชื้อเพลิงและการถ่ายเทความร้อนภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กชนิดผลึก ในขั้นแรกแบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทำนายสภาวะการเผาไหม้ภายใต้สภาวะการทำงาน ณ ปัจจุบันของโรงงานซึ่งเป็นการเผาไหม้ระหว่างน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศปกติ ผลที่ได้จากการคำนวณแสดงให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิและลักษณะการไหลของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็ก โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นถูกประเมินความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่วัดได้จริงจากเตาด้วยระบบวิเคราะห์ก๊าซ จากนั้นจึงทำการประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ผ่านการประเมินเพื่อศึกษาผลของการเผาไหม้ด้วยเทคนิค oxygen enrichment combustion ที่ 23%OEC และ 25%OEC ผลจากการคำนวณแสดงให้เห็นความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิและลักษณะการไหลของก๊าซภายในเตาของการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและ oxygen enrichment combustion นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าการใช้การเผาไหม้ด้วยเทคนิค oxygen enrichment combustion นี้ทำให้ประสิทธิภาพของการเผาไหม้และประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กดีขึ้น

ภาควิชา....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา....2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5170259221 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : 3-D CFD simulation / Pusher-type reheating furnace / Temperature distribution / Gas flow pattern / Oxygen enrichment combustion

JEERAWAT TREEPICHETKUL : HEAT TRANSFER AND COMBUSTION
ANALYSIS OF STEEL REHEATING FURNACE BY APPLYING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. ADVISOR : MAWIN SUPRADIST NA
AYUDHAYA, Ph.D., 90 pp.

A steady state three-dimensional CFD simulation has been developed to compute combustion reaction and heat transfer in the pusher-type reheating furnace by FLUENT software. At first, the model was developed to predict combustion conditions of the present practice which was oil-air based combustion. The simulation results described the temperature distributions and gas flow patterns in the furnace chamber. In order to validate the model, the calculated temperature and chemical compositions of the off-gases from the model were used to compare with the measured temperature and chemical compositions of the off-gases from the furnace by using the process mass spectrometer. Once the model was validated, it was then used to study the oxygen enrichment combustion conditions at 23% OEC and 25% OEC. The calculation results show several differences between the normal air combustion and oxygen enrichment combustion in term of temperature distribution and flow patterns. Therefore it can be concluded that the use of oxygen enrichment combustion can improve both combustion efficiency and heat transfer efficiency of the furnace.

Department : Mettalurgical Engineering Student's Signature

Field of Study : Mettalurgical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยคำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.มาวิน สุประดิษฐ์ ณ อุทยาน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการศึกษาวิจัย ตลอดจนตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัย ประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ชاکร จารุพิสิฐธร และ ดร.กฤษดา ประภากร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมโลหการที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ต่องานวิจัยฉบับนี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายจิตติชัย จันทรินทร์ และ นายภาสกรินทร์ พรหมประไพ ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยเป็นอย่างมาก ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เชื้ออำนาจโปรแกรม FLUENT สำหรับใช้ในงานวิจัย และศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่เชื้ออำนาจให้ใช้โปรแกรมเขียนแบบ SolidWork และ FLUENT และขอขอบคุณสถาบันเหล็กที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับงานวิจัยนี้ และบริษัท กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด สำหรับการสนับสนุนข้อมูลต่างๆ ในงานวิจัยเป็นอย่างดี จนกระทั่งงานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

ทั้งนี้ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณครอบครัวและบุคคลรอบข้าง ซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจ ทำให้สามารถฝ่าฟันปัญหาต่างๆ มาได้โดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	4
2.1 เตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace).....	4
2.2 การเผาไหม้ (Combustion).....	5
2.2.1 เชื้อเพลิง (Fuel).....	6
2.2.2 เคมีการเผาไหม้ (Combustion chemistry).....	7
2.2.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง.....	8
2.2.4 การเผาไหม้โดยไม่มีอากาศส่วนเกิน.....	10
2.2.5 การเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนเกิน.....	10
2.3 Oxygen-Enhanced Combustion (OEC).....	11
2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ภายในเตาเผาเหล็ก.....	13
2.5 การสูญเสียความร้อน (Heat loss).....	14
2.6 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD).....	16
2.6.1 หลักการเบื้องต้นของการคำนวณ CFD.....	16
2.6.2 ขั้นตอนการคำนวณ CFD.....	17
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20

บทที่	หน้า
3. การพัฒนาแบบจำลอง.....	28
3.1 การศึกษาและเก็บข้อมูลของเตาเผาเหล็ก.....	28
3.1.1 ลักษณะของเตาเผาเหล็ก.....	28
3.1.2 การทำงานของเตาเผาเหล็ก.....	32
3.2 การพัฒนาแบบจำลอง.....	32
3.2.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง.....	32
3.2.1.1 กำหนดโดเมนของปัญหา (Computational Domain).....	33
3.2.1.2 สร้างเอลิเมนต์ (Meshing).....	35
3.2.1.3 กำหนดแบบจำลอง.....	36
3.2.1.4 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition).....	37
3.2.1.4.1 ทางเข้าโดเมน (Inlet).....	38
3.2.1.4.2 ทางออกโดเมน (Outlet).....	40
3.2.1.4.2 ผนังโดเมน (Wall boundaries).....	40
3.2.1.5 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation).....	44
3.3 การศึกษาผลของการตัดปล่องก๊าซเสีย (Fume duct).....	46
3.4 การศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์.....	47
4. แบบจำลองและวิเคราะห์ผล.....	48
4.1 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation).....	48
4.2 ผลการตัดปล่องก๊าซเสีย (Fume duct).....	51
4.3 ผลของความละเอียดของขนาดเมช.....	53
4.4 วิเคราะห์กระบวนการผลิต ณ ปัจจุบัน (การเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ (21%O ₂))...	56
4.4.1 การเผาไหม้ของเตา.....	56
4.4.2 การไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตา.....	58
4.4.3 การสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสีย (Sensible heat loss).....	63
4.4.4 การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็ก.....	64
5. การประยุกต์ใช้แบบจำลอง.....	68
5.1 การประยุกต์ใช้การเผาไหม้แบบ Oxygen-Enriched Combustion (OEC).....	68
5.2 ผลการประยุกต์ใช้การเผาไหม้แบบ OEC.....	69
5.2.1 เปรียบเทียบการเผาไหม้.....	70

บทที่	หน้า
5.2.2 เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน.....	71
5.2.3 เปรียบเทียบการสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสีย.....	76
5.2.4 เปรียบเทียบการใช้พลังงานความร้อนของเตาเผาเหล็ก.....	77
6. สรุปผลการพัฒนาและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง.....	81
6.1 สรุปผล.....	81
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	90

สารบัญญัตราจ

ตารางที่		หน้า
2.1	ส่วนผสมของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	6
2.2	ตัวอย่างค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงแต่ละประเภทที่นิยมใช้ใน อุตสาหกรรม.....	9
2.3	แบบจำลองย่อยที่ใช้สำหรับการคำนวณ CFD.....	21
2.4	แบบจำลองย่อยในการคำนวณ CFD.....	26
3.1	ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผาเหล็ก.....	29
3.2	ส่วนผสมทางเคมีของน้ำมันเตา C (Fuel Oil C)	31
3.3	ข้อมูลการเผาไหม้ของ Heating zone และ Soaking zone.....	31
3.4	โมเดลย่อยที่เลือกใช้ในการคำนวณ CFD.....	36
3.5	อุณหภูมิ (°C) และฟลักซ์ความร้อน (w/m ²) ของผนังด้านข้างและด้านบน.....	42
3.6	จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณ CFD.....	47
4.1	อุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่ได้จากการคำนวณ CFD กับจากการวัดค่า จริงด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	50
4.2	เปรียบเทียบอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้กรณีมี ปล่องก๊าซเสียและไม่มีปล่องก๊าซเสีย.....	53
4.3	เปรียบเทียบอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้กรณี จำนวนเมชเท่ากับ 1,000,092 1,448,692 และ 1,723,323.....	55
4.4	ปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซต่างๆ ของก๊าซเสีย.....	64
5.1	ส่วนผสมทางเคมีและปริมาตรของอากาศเผาไหม้กรณีเผาไหม้ด้วย 23% OEC และ 25% OEC.....	68
5.2	ปริมาณและส่วนผสมของก๊าซเสียจากการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผา ไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23% OEC และ 25% OEC.....	69
5.3	อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซภายในเตาสำหรับการเผาไหม้ด้วย อากาศปกติและการเผาไหม้ด้วย 23% OEC และ 25% OEC.....	71
5.4	อุณหภูมิของก๊าซเสียออกจากเตาสำหรับการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการ เผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23% OEC และ 25% OEC.....	76

ตารางที่		หน้า
5.5	ความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซต่างๆ ของก๊าซเสียสำหรับการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23% OEC และ 25% OEC.....	77
5.6	เปรียบเทียบการใช้พลังงานความร้อนของการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติกับการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC.....	78

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของเตาเผาเหล็กแบบผลึก.....	5
2.2	ก๊าซออกซิเจน (O ₂) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂) ในก๊าซเสียที่สัดส่วนปริมาณอากาศส่วนเกินต่างๆ กันสำหรับเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (BFG: Blast Furnace Gas; COG: Coke Oven Gas; NG-H: Natural Gas H).....	11
2.3	การเผาไหม้ของหัวเผาด้วยเทคนิค Oxygen-enriched combustion (OEC).....	12
2.4	เปรียบเทียบปริมาตรของออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้.....	12
2.5	การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก.....	14
2.6	การสูญเสียความร้อนรูปแบบต่างๆ ของเตาเผาเหล็ก.....	15
2.7	แผนภาพสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก.....	16
2.8	แผนภาพแสดงหลักการและสมการสำหรับคำนวณการไหล.....	17
2.9	สรุปขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง.....	19
2.10	Walking-Beam Slab reheating furnace.....	21
2.11	ลักษณะของเตาเผาเหล็กตาม ก) แนวยาวและ ข) แนวขวางของเตา.....	22
2.12	เปรียบเทียบอุณหภูมิสแลปที่ได้จากการคำนวณและการวัดค่าจริงตลอดแนวความยาวของเตาเผาเหล็ก.....	23
2.13	อุณหภูมิใจกลางสแลปเมื่อกำหนดค่า Emissivity ของผนังเตาคงที่เท่ากับ 0.75 และกำหนดค่า emissivity ของสแลปเท่ากับ 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 และ 1.0.....	24
2.14	อุณหภูมิใจกลางสแลปเมื่อกำหนดค่า Emissivity ของสแลปคงที่เท่ากับ 0.5 และกำหนดค่า Emissivity ของผนังเตาเท่ากับ 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 และ 1.0.....	25
2.15	Feralpi LAM2 walking hearth reheating furnace.....	25
2.16	เปรียบเทียบอุณหภูมิเหล็กแท่งบิลเลทซึ่งได้จากการคำนวณ CFD และการวัดค่าจริง.....	27
3.1	เตาเผาเหล็กชนิดผลึกของโรงงานกรุงเทพผลิตเหล็ก.....	29
3.2	ลักษณะหัวเผาของ Heating และ Soaking zone ของเตาเผาเหล็ก.....	30
3.3	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยการคำนวณ CFD.....	33
3.4	ก) CAD เตา ข) ปริมาตรด้านในเตา และ ค) ปริมาตรอากาศภายในเตาสำหรับคำนวณ CFD.....	34

ภาพที่	หน้า
3.5 การแบ่งเอลิเมนต์ของพื้นผิวของรูพ่นอากาศและบริเวณโดยรอบ.....	35
3.6 การแบ่งเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุม.....	36
3.7 เงื่อนไขขอบเขต.....	38
3.8 รูพ่นอากาศและรูพ่นน้ำมันของ ก) หัวเผาจริง ข) Simplified burner.....	39
3.9 ก) พื้นผิวของผนังเตาและ ข) ตัวอย่างภาพถ่ายด้วย Thermal camera ในบริเวณเดียวกัน.....	41
3.10 การแบ่งโซนเตาเผาเหล็กเพื่อกำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผนังด้านข้างและหลังคาเตา.....	42
3.11 คุณสมบัติของผิวบิลเลท ณ ตำแหน่งต่างๆ ตลอดแนวความยาวของเตาโดยเริ่มวัดจากตำแหน่งทางเข้าของบิลเลท (ตำแหน่ง 0 m) จนถึงทางออกของบิลเลท (ตำแหน่ง 21 m).....	43
3.12 ตำแหน่งการติดตั้ง Off-gas Analysis System.....	44
3.13 การติดตั้งหัว Off-gas analyzer probe เพื่อวัดส่วนผสมและคุณสมบัติของก๊าซเสีย.....	45
3.14 เครื่อง Mass Spectrometer รุ่น Prima δ B.....	45
3.15 ปริมาตรควบคุมมีปล่องก๊าซเสีย.....	46
3.16 ปริมาตรควบคุมที่ไม่มีปล่องก๊าซเสีย.....	46
4.1 ตัวอย่างผลการวัดคุณสมบัติของก๊าซเสีย.....	48
4.2 ตัวอย่างผลการวัดส่วนผสมของก๊าซเสีย.....	49
4.3 คุณสมบัติของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านหัวเผากรณี ก) มีปล่องก๊าซเสียและ ข) ไม่มีปล่องก๊าซเสีย.....	52
4.4 คุณสมบัติของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผากรณีจำนวนเมฆเท่ากับ ก) 1,000,092 ข) 1,448,692 และ ค) 1,723,323.....	54
4.5 ลักษณะเปลวไฟที่เกิดจากเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ.....	57
4.6 คุณสมบัติของก๊าซร้อนบนระนาบ ก) ตัดผ่านหัวเผาและ ข) ตั้งฉากแนวความยาวเตาที่ระยะ $y = 1.00, 3.83$ และ 6.66 เมตร.....	59
4.7 การไหลของก๊าซร้อนบนระนาบ ก) ตัดผ่านหัวเผาและ ข) ตั้งฉากแนวความยาวเตาที่ระยะ $y = 1.00, 3.83$ และ 6.66 เมตร ใน Soaking zone และ Heating zone.....	60

ภาพที่	หน้า
4.8 การไหลของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผาใน Preheating zone.....	61
4.9 คุณภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผาใน Preheating zone.....	61
4.10 คุณภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบเหนือจากพื้นเตา 0.1 เมตร ตลอดแนวยาวเตา ที่ระยะ $y = 1$ เมตร, 3.83 เมตร และ 6.66 เมตร.....	62
4.11 แผนภาพ Sankey ของเตาเผาเหล็ก.....	67
5.1 ลักษณะเปลวไฟจากการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23% OEC และ ค) 25% OEC.....	70
5.2 คุณภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผาสำหรับการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23% OEC และ ค) 25% OEC.....	72
5.3 คุณภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบเหนือจากพื้นเตา 0.1 เมตร ตลอดแนวยาวเตา สำหรับการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23% OEC และ ค) 25% OEC.....	73
5.4 การไหลของก๊าซร้อนบนระนาบเหนือจากพื้นเตา 0.1 เมตร สำหรับการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23% OEC และ ค) 25% OEC.....	74
5.5 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กด้วย Sankey Diagram สำหรับการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23% OEC และ ค) 25% OEC.....	79

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

กระบวนการรีดร้อน (Hot rolling) เหล็กแผ่นและเหล็กเส้นเป็นกระบวนการรีดเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือลดขนาดเหล็กแท่งที่มีขนาดใหญ่ซึ่งได้แก่ Slab และ Billet ให้มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ ซึ่งในกระบวนการรีดร้อนอาจมีการลดขนาดของเหล็กแท่งลงถึง 90 % ดังนั้นก่อนการรีดจำเป็นต้องเผาเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 1,000 – 1,300 °C [1] ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าวเหล็กจะมีความอ่อนตัวสูงสามารถรีดลดขนาดได้ง่าย

เตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace) คืออุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการรีดร้อนซึ่งมีหน้าที่ให้ความร้อนแก่เหล็กซึ่งพลังงานความร้อนหลักที่ใช้ในเตาเผาเหล็กได้มาจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะใช้ก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงนี้ส่วนหนึ่งสามารถถ่ายเทไปสู่เหล็กภายในเตาและทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น และพลังงานความร้อนอีกส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปโดยไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใดๆ จากการศึกษางานวิจัยในอดีตจำนวนไม่น้อยที่ศึกษาและประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก อาทิเช่น ปี 2000 Jong Gyu Kim และ Kang Y. Huh [2] ซึ่งได้ศึกษาประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กพบว่าปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ให้เข้าสู่เตาเผา มีปริมาณเพียง 40.6 % ที่สามารถถ่ายเทไปยังเหล็กและทำให้เหล็กร้อนขึ้น ในขณะที่ความร้อนที่เหลือจะสูญเสียไปในรูปแบบต่างๆ และ ปี 2005 W.H. Chen [3] ได้ศึกษาและวิเคราะห์การใช้พลังงานภายในเตาเผาเหล็ก โดยการทำสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็กทำให้ทราบว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเหล็กมีค่าเพียง 42.34 % ในขณะที่ปริมาณการสูญเสียความร้อนทั้งหมดมีค่าสูงถึง 57.66 % ของพลังงานความร้อนที่ให้แก่เตาเผาเหล็ก

จากการประเมินการใช้พลังงานความร้อนภายในเตาเผาเหล็กที่กล่าวมาจะเห็นว่าปริมาณความร้อนที่ก่อให้เกิดประโยชน์ในการทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นยังมีค่าอยู่ในระดับต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ให้แก่เตาเผาเหล็ก ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนของเตาเผาเหล็กจึงมีความจำเป็นอย่างมากในการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การควบคุมการเผาไหม้เชื้อเพลิงให้เกิดสมบูรณ์ที่สุดเพื่อให้ได้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้สูงสุดเพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิงลง หรือการควบคุมการถ่ายเทความร้อนให้สามารถถ่ายเทไปสู่เหล็กให้ได้มากที่สุดเพื่อเป็นการใช้ประโยชน์จากความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ให้มากที่สุด และสุดท้ายคือการลดปริมาณการสูญเสียพลังงานความร้อนในรูปแบบต่างๆ ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดหรือการนำความร้อนที่สูญเสีย

ไปกลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด โดยการเลือกวิธีที่จะปรับปรุงเปลี่ยนแปลงหรือการแก้ไขกระบวนการผลิตเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเหล็กเป็นสิ่งที่มีความยุ่งยาก ซับซ้อนมาก อีกทั้งการทดลองเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ยังมีความเสี่ยงต่อความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นและจะส่งผลเสียอย่างยิ่งต่อการผลิต ดังนั้นการประเมินสภาพการทำงานจริงของกระบวนการผลิตจึงมีความเป็นอยู่อย่างยิ่ง เพื่อให้เข้าใจและทราบข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจริงและสามารถปรับปรุงหรือแก้ปัญหาได้ถูกต้อง เสียเวลาและค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยในงานนี้ในขั้นตอนแรกจะศึกษากระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงและการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาเหล็กที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งจะทำให้สามารถประเมินสภาวะการเผาไหม้ภายในเตาที่เกิดขึ้นว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นสมบูรณ์หรือไม่ ปริมาณพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้และพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทไปยังเหล็กมากน้อยเพียงใด รวมถึงการกระจายความร้อน ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาเป็นอย่างไร โดยวิธีการที่นำมาใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้คือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากในปัจจุบัน สามารถทำนายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเตาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และนอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นดังกล่าวในการทำนายผลของการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในเตา ทำให้สามารถประเมินความเป็นไปได้และใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการผลิตจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อเพิ่มความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาเหล็ก

1.2.2 ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เพื่อทำนายปรากฏการณ์การเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก

1.2.3 ประเมินความเหมาะสมของการใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเพื่อคำนวณอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของเตาเผาเหล็ก

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูลกระบวนการผลิต การทำงานและลักษณะของเตา ขนาด รูปร่าง และวัสดุที่ใช้ทำเตาเผาเหล็กของโรงงาน

1.3.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กในช่วงสภาวะคงตัว โดยการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) ด้วยโปรแกรม FLUENT 6.3

1.3.3 ประเมินความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้โดยการเปรียบเทียบผลกับค่าที่วัดได้ในกระบวนการผลิตของโรงงาน

1.3.4 ประยุกต์ใช้แบบจำลองในการศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น สัดส่วนของออกซิเจนในอากาศ ต่อการกระจายตัวของความร้อน และก๊าซที่เกิดขึ้นในเตา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้รับความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก

1.4.2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาเหล็กที่มีความถูกต้อง แม่นยำ สามารถทำนายสภาพการเผาไหม้ ทิศทางการกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆ และอุณหภูมิภายในเตาเผาเหล็กในช่วงสภาวะคงตัวได้

1.4.3 สามารถนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์การเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาเพื่อใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็ก

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

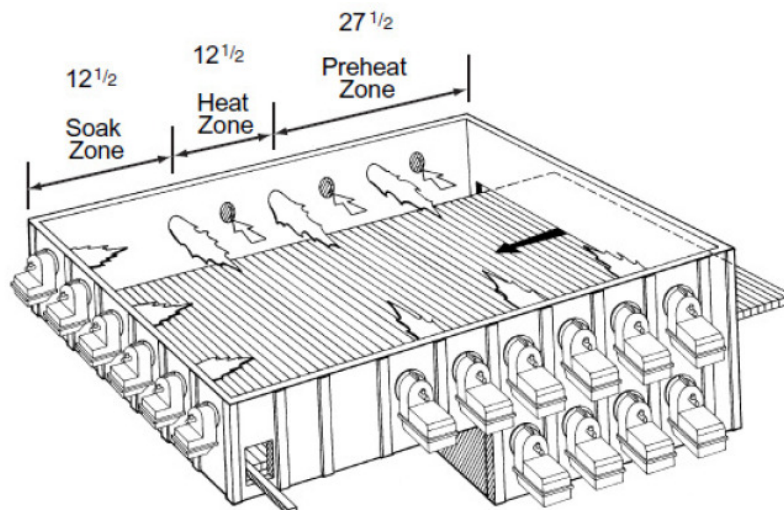
งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลหรือ Computational Fluid Dynamics (CFD) เพื่อทำนายการไหลของก๊าซ การเผาไหม้เชื้อเพลิงและการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก ในการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวจึงจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เข้าใจลักษณะทางกายภาพของปัญหาที่เกิดขึ้น รวมทั้งศึกษาถึงรายละเอียดการสร้างแบบจำลองที่ถูกต้อง ดังนั้นในบทนี้จึงได้ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องทั้งหมด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ลักษณะกายภาพของปัญหา ได้แก่ การทำงานของเตาเผาเหล็ก กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง กลไกการถ่ายเทความร้อน และการสูญเสียความร้อนของเตาเผาเหล็ก
2. พื้นฐานการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ได้แก่ หลักการพื้นฐานของการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลและขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง
3. ปริทัศน์วรรณกรรม เป็นการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อใช้เป็นแนวทางและเป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลองของงานวิจัยนี้ต่อไป

2.1 เตาเผาเหล็ก (Reheating Furnace)

เตาเผาเหล็กที่นิยมใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ เตาเผาเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Reheating Furnace) เหล็กแท่งที่เป็นวัตถุดิบและมีอุณหภูมิต่ำจะถูกป้อนเข้าสู่ภายในเตาด้านทางเข้าเตาและเคลื่อนที่ไปตามแนวยาวของเตาจนกระทั่งถึงทางออกเตา ในระหว่างที่เหล็กเคลื่อนที่ที่อยู่ในเตานั้นเหล็กจะถูกให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการ

สำหรับเตาเผาเหล็กแบบต่อเนื่องมีหลายชนิด ได้แก่ Pusher furnace, Walking beam furnace และ Roller-hearth furnace ซึ่งทั้งสามชนิดมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับกลไกการลำเลียงชิ้นงาน ตั้งแต่การนำชิ้นงานเข้าสู่ภายในเตาและเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องภายในเตาจนกระทั่งชิ้นงานออกจากเตา [4] โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาเตาเผาเหล็กชนิดผลัก (Pusher type reheating furnace) ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างและการทำงานของเตาดังแสดงในภาพที่ 2.1

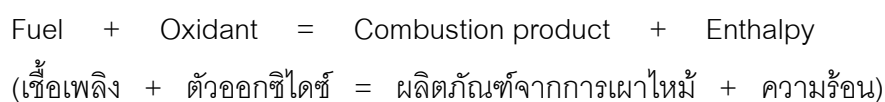


ภาพที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างและการทำงานของเตาเผาเหล็กแบบผลัด [5]

จากรูปจะเห็นว่าในเตาเผาเหล็กชนิดผลัดจะมีแท่งเหล็กวางชิดติดกันอย่างเป็นระเบียบบนพื้นเตา และมีจำนวนแท่งเหล็กคงที่ โดยเหล็กแท่งบิลเลท (Billet steel) ถูกป้อนเข้าสู่เตาที่ประตูทางเข้า (Charging door) และเคลื่อนที่ตามแนวขวางโดยการดันของแท่งเหล็กชิ้นที่ไล่ตามมา ในขณะเดียวกันแท่งเหล็กที่เคลื่อนที่จนมาถึงประตูทางออก (Discharging door) เหล็กแท่งบิลเลทที่ป้อนเข้าสู่เตามีอุณหภูมิต่ำกว่ากับอุณหภูมิห้อง ในระหว่างที่บิลเลทอยู่ภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กและเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องผ่านโซนต่างๆ ของเตาเผาเหล็ก ได้แก่ preheating zone, heating zone และ soaking zone จนกระทั่งเคลื่อนที่มาถึงประตูทางออก มีอุณหภูมิสูงตามต้องการจะถูกผลัดออกไปจากเตาเพื่อไปเข้าแท่นรีดในขั้นตอนถัดไป

2.2 การเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้เชื้อเพลิงคือการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วระหว่างเชื้อเพลิง (fuel) และตัวออกซิไดซ์ (oxidant) เกิดผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ (Combustion products) และมีการปล่อยพลังงานความร้อนออกมาด้วย โดยปฏิกิริยาการเกิดการเผาไหม้สามารถเขียนได้ดังนี้



ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้หรือก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ประกอบด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำ (H₂O) ก๊าซออกซิเจน (O₂) ก๊าซไนโตรเจน (N₂) และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ในการเผาไหม้ เช่น กรณีการเผาไหม้

เชื้อเพลิงซึ่งใช้อากาศปกติเป็นตัวออกซิไดซ์และมีปริมาณที่พอดีกับปริมาณเชื้อเพลิงจะไม่เกิดก๊าซออกซิเจนส่วนเกินหลงเหลือในผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ เรียก “การเผาไหม้สมบูรณ์” (Complete combustion) และในกรณีที่ปริมาณอากาศที่ใช้้น้อยเกินไปไม่เพียงพอสำหรับการเผาไหม้ทำให้เชื้อเพลิงบางส่วนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้จะเกิดควันดำและมีก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ในผลิตภัณฑ์ เรียกว่า “การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์” (Incomplete combustion) เป็นต้น

2.2.1 เชื้อเพลิง (Fuel)

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้สามารถแบ่งตามสถานะของเชื้อเพลิงออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ เชื้อเพลิงของแข็ง (Solid fuel) เชื้อเพลิงของเหลว (Liquid fuel) และก๊าซเชื้อเพลิง (Gaseous fuel) เชื้อเพลิงแต่ละประเภทมีข้อดีข้อด้อยและความเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยพื้นฐานของเชื้อเพลิงทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว หรือก๊าซเชื้อเพลิงจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ได้และต้องการให้มีในเชื้อเพลิงในปริมาณสูงๆ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยองค์ประกอบดังกล่าวได้แก่ ธาตุคาร์บอน (Solid carbon, C) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_mH_n) ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ [6]

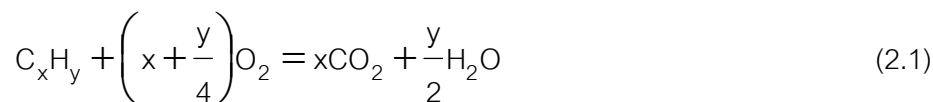
	เชื้อเพลิง		
	ก๊าซ	ของเหลว	ของแข็ง
ส่วนประกอบของเชื้อเพลิง	H_2, CO, C_mH_n	C_mH_n	C, C_mH_n
สิ่งเจือปนในเชื้อเพลิง (residuals)	$CO_2, N_2, H_2O,$ H_2S และ SO_2	S, V, H_2O และ โลหะอื่นๆ	S, ซี้เถ้า และ H_2O
Oxidation specie	O_2 , (residual elements, H_2O, N_2 (A))		
ก๊าซเสียจากการเผาไหม้ (Combustion gas)	CO_2, H_2O, N_2 และ O_2		
ก๊าซซึ่งเป็นมลพิษ	SO_2, NO_x และ ($NO+NO_2$)	SO_2, NO_x และฝุ่น	SO_2, NO_x , ฝุ่น และซี้เถ้า

นอกจากนี้ในเชื้อเพลิงยังมีส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ ซี้เถ้า กำมะถัน (S) ไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) น้ำ (H_2O) และโลหะอื่นๆ เป็นต้น

องค์ประกอบเหล่านี้เป็นส่วนที่ไม่ต้องการให้มีในเชื้อเพลิงเนื่องจากไม่มีส่วนก่อให้เกิดประโยชน์ในการเผาไหม้นอกจากนั้นก๊าซเสียที่เกิดขึ้นยังก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

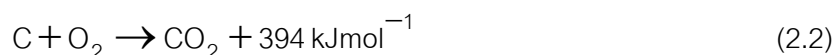
2.2.2 เคมีการเผาไหม้ (Combustion chemistry)

สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C_xH_y) สามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้

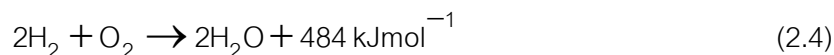
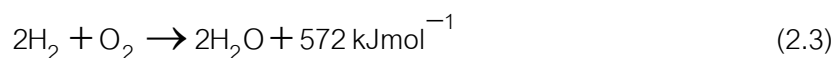


ในกรณีเชื้อเพลิงเป็นเชื้อเพลิงของเหลว การเกิดการเผาไหม้จะเป็นการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ที่มีความซับซ้อน (Complex chain reaction) แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีธาตุหลักคือ ธาตุคาร์บอน (C) และธาตุไฮโดรเจน (H) ทำให้สามารถเขียนอยู่ในรูปปฏิกิริยาพื้นฐานอย่างง่าย เรียกว่า “ระบบปฏิกิริยาเคมีพื้นฐาน” (Simple Chemically Reacting System (SCRS)) [7] ดังต่อไปนี้

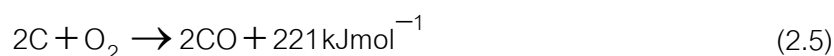
- ปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์ของคาร์บอน



- ปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์ของไฮโดรเจนสำหรับกรณีไอน้ำเกิดการควบแน่นและไม่เกิดการควบแน่น ตามลำดับ



- ปฏิกิริยาออกซิเดชันไม่สมบูรณ์ของคาร์บอน



- ปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนนอกไซด์



ในการเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับส่วนผสมของเชื้อเพลิงชนิดนั้นๆ ซึ่งสามารถวัดค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเรียกว่า “ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง”

2.2.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงคือปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงที่ปลดปล่อยออกมาต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง เมื่อเชื้อเพลิงนั้นอยู่ในสภาวะเริ่มต้นที่ 25 °C ทำปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์กับออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์ที่เย็นตัวลงมาที่ 25 °C โดยค่าความร้อนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. Gross calorific value หรือ Higher heating value (HHV) คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงโดยไอน้ำในผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้เกิดการกลั่นตัวเป็นน้ำ
2. Net calorific value หรือ Lower heating value (LHV) คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงโดยไอน้ำในผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ไม่เกิดการกลั่นตัวเป็นน้ำ

ค่าความร้อน HHV และ LHV ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดสามารถคำนวณโดยวิธีทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{HHV} = \sum_{i=1}^m x_i H_i \quad (2.7)$$

$$\text{LHV} = \sum_{i=1}^m x_i L_i \quad (2.8)$$

เมื่อ H_i คือ ค่า HHV ขององค์ประกอบ i ในเชื้อเพลิง

L_i คือ ค่า LHV ขององค์ประกอบ i ในเชื้อเพลิง

x_i คือ สัดส่วนของปริมาตรขององค์ประกอบ i ในเชื้อเพลิงต่อปริมาตรของเชื้อเพลิง

จากคำนิยามของ HHV และ LHV ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง HHV และ LHV ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{LHV} = \text{HHV} + y_{\text{H}_2\text{O}} \Delta h_{\text{v,H}_2\text{O}} \quad (2.9)$$

$$y_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{RG,H}_2\text{O}}}{V_f} \quad (2.10)$$

เมื่อ $y_{\text{H}_2\text{O}}$ คือ สัดส่วนของน้ำในเชื้อเพลิง
 $V_{\text{RG,H}_2\text{O}}$ คือ ปริมาตรของน้ำในเชื้อเพลิง
 $\Delta h_{\text{v,H}_2\text{O}}$ คือ ค่าเอนทาลปีของการระเหยเป็นไอของน้ำที่ 25 °C มีค่าเท่ากับ 1963 kJ/Nm³

ตัวอย่างค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลวชนิดต่างๆ ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิงแต่ละประเภทที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม [8]

เชื้อเพลิง	หน่วย	Net Calorific Value (LHV)	Gross Calorific Value (HHV)
Coal	MJ/kg	29.4	30450
Coke	MJ/kg	27.45	27900
Fuel Oil	MJ/kg	40.5	42.9
Gas Oil	MJ/kg	42.8	45.6
Natural Gas	MJ/m ³	34.82	38.62
LPG	MJ/m ³	86.1	93.1
Coke Oven Gas	MJ/m ³	18.6	20.8
Basic Oxygen Steelmaking Gas	MJ/m ³	8.7	8.9
Blast Furnace Gas	MJ/m ³	3.13	3.18

2.2.4 การเผาไหม้โดยไม่มีอากาศส่วนเกิน

กระบวนการเผาไหม้จำเป็นต้องใช้อากาศจำนวนหนึ่งเพื่อทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ โดยการเผาไหม้ที่ใช้อากาศพอดีกับปริมาณเชื้อเพลิงหรือเรียกว่า “การเผาไหม้โดยไม่มีอากาศส่วนเกิน” ปริมาณของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้โดยไม่มีอากาศส่วนเกินนี้เรียกว่า ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎี (Theoretical air, A_0)

สำหรับกรณีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดของเหลวซึ่งมีองค์ประกอบพื้นฐานได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ สามารถคำนวณปริมาณอากาศที่จำเป็นต้องใช้ในการเผาไหม้ต่อเชื้อเพลิงเหลว 1 kg [9] ได้ดังนี้

$$A_0 = \frac{O_0}{0.21} = \frac{1}{0.21} \left\{ \frac{22.4}{12} C + \frac{22.4}{4} \left(H - \frac{O}{8} \right) + \frac{22.4}{32} S \right\} \quad (2.11)$$

$$= 8.89C + 26.7 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3.3S \quad (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

เมื่อ A_0 คือ ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีที่ใช้ในการเผาไหม้สมบูรณ์

O_0 คือ ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้สมบูรณ์

C, H, O และ S คือ สัดส่วนโดยมวลของธาตุ C, H, O และ S ในเชื้อเพลิงตามลำดับ

เนื่องจากการเผาไหม้เป็นการทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์และพอดีกันระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิเจนในอากาศ ดังนั้นก๊าซเสีย (Waste gas) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้จะเป็นก๊าซเสียที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซ CO_2 , H_2O , N_2 และ SO_2 (เชื้อเพลิงมีกำมะถัน) เท่านั้น

2.2.5 การเผาไหม้โดยใช้อากาศส่วนเกิน

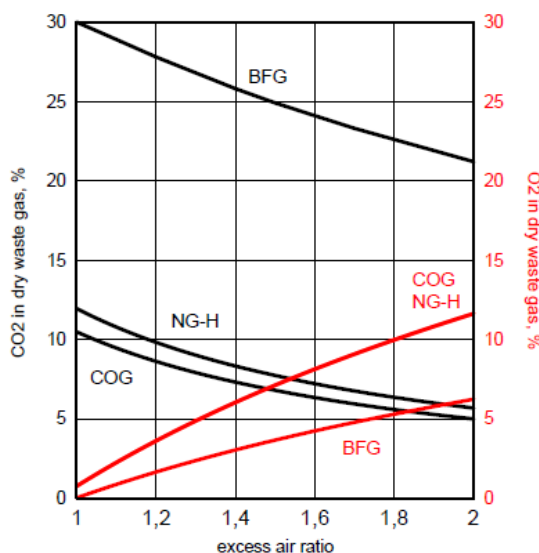
สำหรับกระบวนการเผาไหม้จริงการใช้อากาศเชิงทฤษฎีจะทำให้เกิดการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ได้ยาก ปริมาณอากาศที่จำเป็นต้องใช้ในการเผาไหม้จึงควรมีมากกว่าค่าที่คำนวณได้ในเชิงทฤษฎีหรือเรียกอากาศที่จำเป็นต้องใช้ว่า “อากาศที่ใช้จริง” หรือ “อากาศส่วนเกิน” (Excess air)

สำหรับปริมาณอากาศส่วนเกินหรืออากาศที่ใช้จริง (A_{excess}) สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$A_{\text{excess}} = \lambda A_{\text{air}} \quad (2.12)$$

เมื่อ A_{excess} คือ ปริมาณอากาศที่ใช้จริงในการเผาไหม้สมบูรณ์ (kg/kg fuel)
 A_{air} คือ ปริมาณอากาศเชิงทฤษฎีที่ใช้ในการเผาไหม้สมบูรณ์ (kg/kg fuel)
 λ คือ สัดส่วนอากาศส่วนเกิน (Excess air ratio)

เมื่อเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ เกิดก๊าซเสียที่มีส่วนผสม ได้แก่ CO_2 , H_2O , N_2 , SO_2 และ O_2



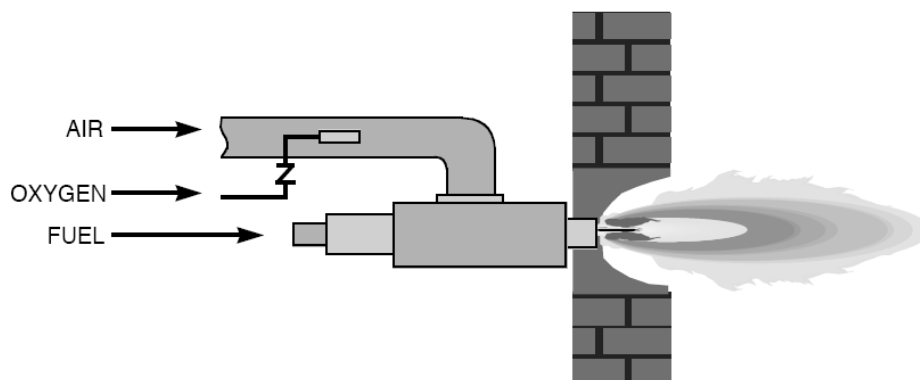
ภาพที่ 2.2 ก๊าซออกซิเจน (O_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในก๊าซเสียที่สัดส่วนปริมาณอากาศส่วนเกินต่างๆ กันสำหรับเชื้อเพลิงแต่ละชนิด (BFG: Blast Furnace Gas; COG: Coke Oven Gas; NG-H: Natural Gas H) [6]

ภาพที่ 2.2 แสดงตัวอย่างปริมาณของ O_2 และ CO_2 ในก๊าซเสีย เมื่อใช้สัดส่วนอากาศส่วนเกินต่างๆ กันในก๊าซเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ซึ่งเมื่อปริมาณอากาศส่วนเกินมากขึ้นปริมาณ CO_2 ในก๊าซเสียลดลง ในขณะที่ก๊าซ O_2 กลับสูงขึ้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากก๊าซ O_2 บางส่วนที่เกินความจำเป็นจะไม่เกิดปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงนั่นเอง

2.3 Oxygen-Enhanced Combustion (OEC)

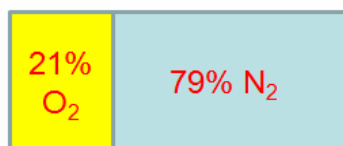
จากปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งใช้อากาศปกติ (Normal air) เป็นตัวออกซิไดซ์ จะเห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเชื้อเพลิงเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบในเชื้อเพลิงกับ

ออกซิเจนในอากาศเป็นหลัก โดยก๊าซไนโตรเจนจะไม่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้แต่อย่างใด สำหรับการเผาไหม้ด้วยเทคนิค Oxygen-Enriched Combustion (OEC) เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศเผาไหม้โดยการผสมออกซิเจนบริสุทธิ์กับอากาศปกติ ดังแสดงในภาพที่ 2.3

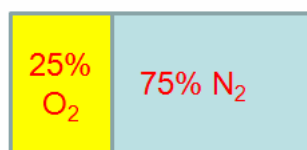


ภาพที่ 2.3 การเผาไหม้ของหัวเผาด้วยเทคนิค Oxygen-enriched combustion (OEC) [10]

การผสมออกซิเจนบริสุทธิ์เข้ากับอากาศเผาไหม้ทำให้ความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศเผาไหม้มีค่าสูงขึ้น ในกรณีการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่ควบคุมให้ปริมาณออกซิเจนสำหรับทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงมีค่าคงที่ก็เปรียบเสมือนเป็นการลดปริมาณไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้ให้ลดลง



ก) อากาศปกติ



ข) 25% OEC

ภาพที่ 2.4 เปรียบเทียบปริมาณของออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้

ภาพที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณของออกซิเจนและไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้ในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและ 25% OEC จะเห็นว่าทั้งสองกรณีมีปริมาณออกซิเจนในปริมาณที่

เท่ากัน ในขณะที่ปริมาณไนโตรเจนในกรณี 25% OEC มีค่าลดลงจากการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ ผลดีจากการลดลงของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้ได้แก่

1. อุณหภูมิเปลวไฟสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนซึ่งคอยดูดซับพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ลดลง

2. Available heat เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้และสูญเสียไปโดยการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนลดลงทำให้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มีจำนวนเพิ่มขึ้น

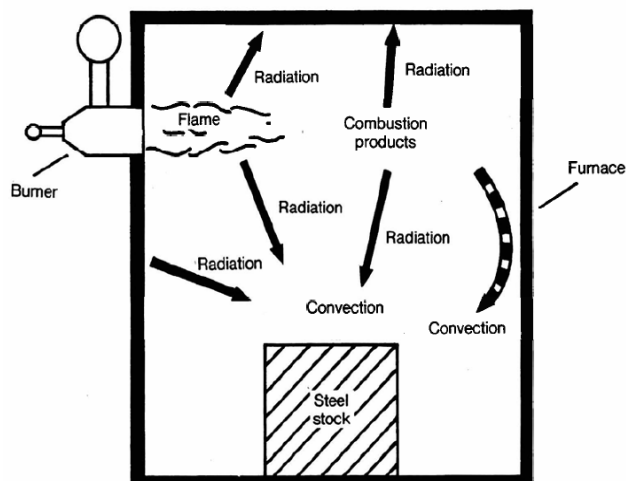
3. ปริมาตรของก๊าซเสียลดลง เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้ลดลงทำให้ก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ลดลงด้วย

จากข้อดีดังกล่าวข้างต้นส่งผลดีอย่างมากต่อกระบวนการผลิต เช่น ทำให้กำลังการผลิตเพิ่มขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของกระบวนการผลิตและลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต เป็นต้น

สำหรับการประยุกต์ใช้การเผาไหม้ด้วยเทคนิค Oxygen-enriched Combustion ในเตาเผาเหล็กนิยมใช้ความเข้มข้นของออกซิเจนไม่เกิน 28% [11] เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศเผาไหม้สูงมากๆ จะทำให้อุณหภูมิเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่าสูงมากทำให้เกิดความเสียหายแก่หัวเผาซึ่งไม่ได้รับออกแบบมาสำหรับการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงๆ นอกจากนี้อุณหภูมิภายในเตาที่ใช้การเผาไหม้แบบ OEC ที่สูงขึ้นอาจทำให้โครงสร้างผนังเตาเสียหายได้ด้วย

2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ภายในเตาเผาเหล็ก

หลังจากเกิดการเผาไหม้และได้พลังงานความร้อนเกิดขึ้นแล้ว ความร้อนดังกล่าวจะเกิดการถ่ายเทไปสู่บริเวณต่างๆ ภายในเตาเผาเหล็ก ส่งผลให้อุณหภูมิภายในเตาสูงขึ้นตามลำดับ สำหรับการถ่ายเทความร้อนในเตาเผาเหล็กประกอบด้วย การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Radiation heat transfer) และการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection heat transfer) ดังแสดงในภาพที่ 2.5



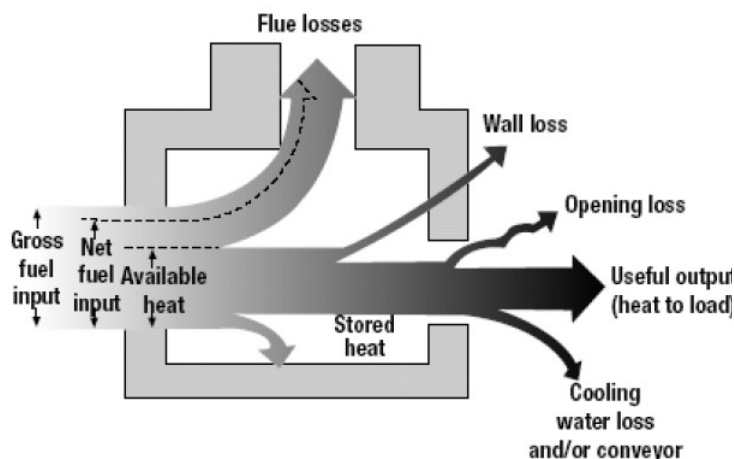
ภาพที่ 2.5 การถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก [1]

จากภาพที่ 2.5 แสดงภาพจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเหล็ก ซึ่งจะเห็นว่า ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเปลวไฟเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีไปสู่ก๊าซโดยรอบ และผนังเตา ความร้อนเหล่านี้จะถูกดูดซับและเก็บสะสมอยู่ภายในก๊าซและโครงสร้างของผนังเตา จากนั้นความร้อนจากเปลวไฟและความร้อนซึ่งสะสมอยู่ในก๊าซร้อนและโครงสร้างผนังเตาจึง ถ่ายเทไปสู่ชิ้นงานซึ่งวางอยู่บนพื้นเตา นอกจากนี้การไหลวนของก๊าซร้อนภายในเตาจะทำให้เกิด การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อนไปสู่บิลเลทอีกด้วย

การถ่ายเทความร้อนภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กซึ่งมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยสูงกว่า $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่ามากกว่า 90 % เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี และประมาณ 10% เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน [12]

2.5 การสูญเสียความร้อน (Heat loss)

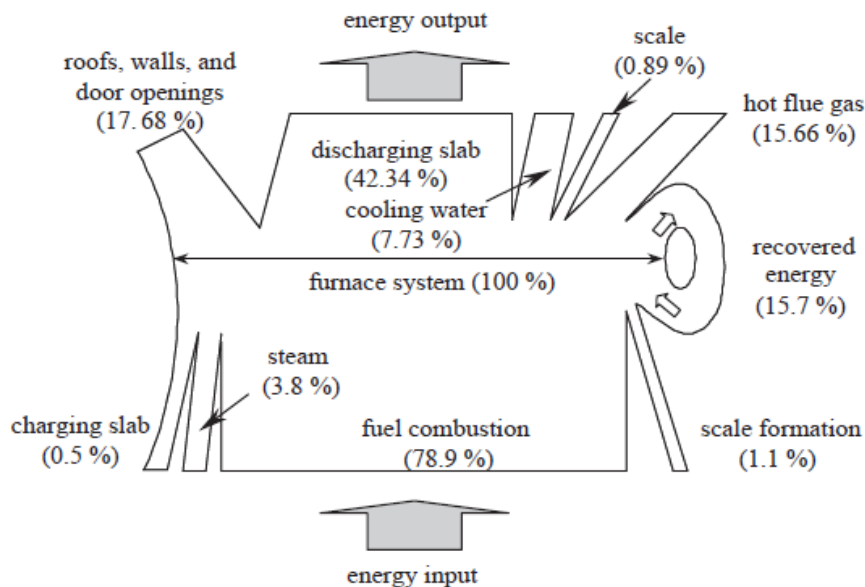
ในทางอุดมคติพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้หรือความร้อนที่ให้แก่เตาเผาเหล็ก จะต้องถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่เหล็กแท่งทั้งหมด แต่ในทางปฏิบัติจะมีการสูญเสียพลังงาน ความร้อนบางส่วนไปโดยไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ในหลายรูปแบบ ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อน ของเตาเผาเหล็กลดลง



ภาพที่ 2.6 การสูญเสียความร้อนรูปแบบต่างๆ ของเตาเผาเหล็ก [13]

ภาพที่ 2.6 แสดงให้เห็นรูปแบบการสูญเสียความร้อนออกจากเตาเผาเหล็กในรูปแบบต่างๆ ได้แก่

- การสูญเสียความร้อนจากก๊าซเสีย คือความร้อนที่ออกไปกับก๊าซเสียของเตาเผาเหล็ก ซึ่งก๊าซเสียดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อม
- การสูญเสียความร้อนไปกับสเกล คือการสูญเสียความร้อนไปพร้อมกับสเกล เนื่องจากมีความร้อนสะสมอยู่ในสเกล ทำให้สเกลนั้นมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม
- การสูญเสียความร้อนเนื่องจากน้ำหล่อเย็น คือความร้อนที่สูญเสียไปกับน้ำที่ใช้ระบายความร้อน ซึ่งจะมีเฉพาะเตาที่มีระบบน้ำหล่อเย็นเท่านั้น
- การสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิดต่างๆ ของเตาเผา คือความร้อนที่ออกจากเตาเผาเหล็กทางช่องเปิดต่างๆ เช่น ประตูเข้า/ออก รูหรือช่องบริเวณผนังเตาและหลังคาเตา เนื่องจากความดันของก๊าซร้อนภายในเตาเผาเหล็กมีค่าสูงกว่าความดันภายนอกหรือความดันบรรยากาศ
- การสูญเสียความร้อนผ่านผนังของเตาเผาเหล็ก คือการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา ได้แก่ หลังคา ผนังด้านข้าง และพื้นเตา โดยการสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตาเกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของผนังเตามีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายนอก ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากภายในเตาผ่านพื้นผิวส่วนต่างๆ ของเตาสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกได้
- การสูญเสียความร้อนเนื่องจากความร้อนสะสมในโครงสร้างของเตาเผาเหล็ก คือความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโครงสร้างของเตา



ภาพที่ 2.7 แผนภาพสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก [3]

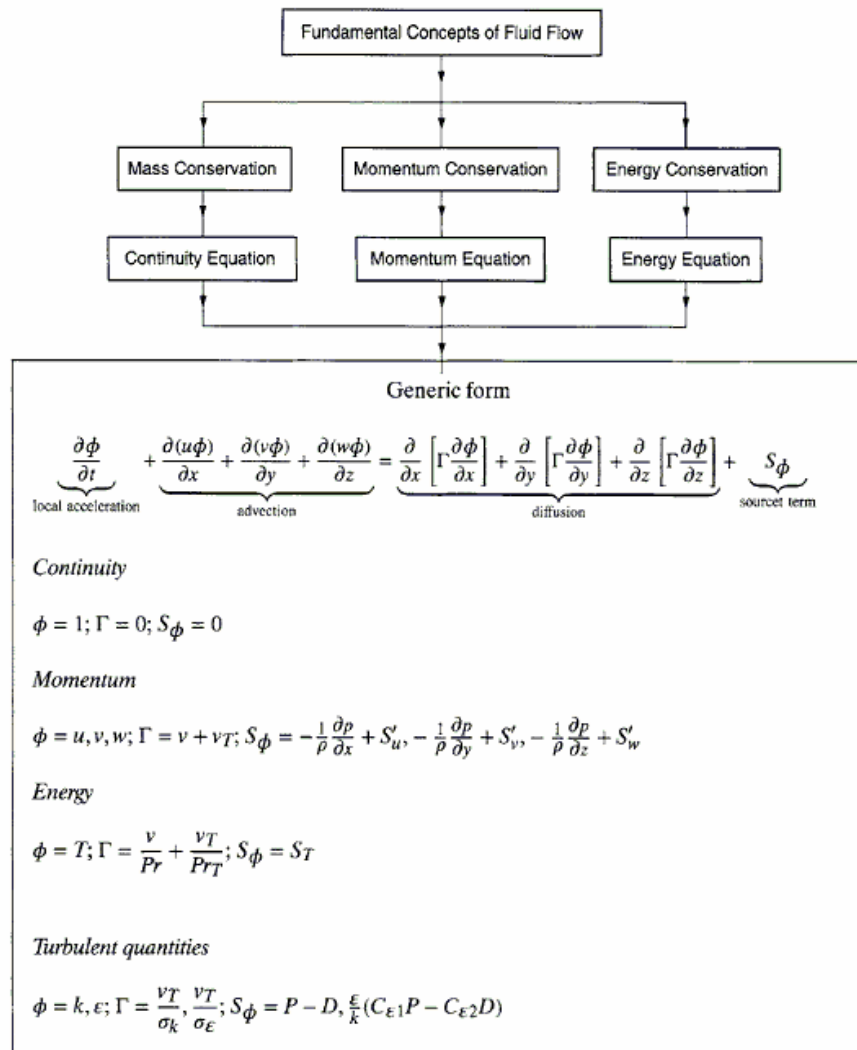
ภาพที่ 2.7 แสดงสมดุลพลังงานของเตาเผาเหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นปริมาณความร้อนที่ให้แก่เตา การ ใช้พลังงาน และการสูญเสียในรูปแบบต่างๆ โดยพลังงานความร้อนคิดเป็นประมาณ 42.34% ของ ความร้อนทั้งหมดที่เข้าสู่เตาเผาเหล็กสามารถถ่ายเทไปสู่เหล็กแท่งและส่งผลให้เหล็กร้อนขึ้น ในขณะที่ความร้อนที่เหลืออีก 57.66% เป็นความร้อนที่สูญเสียออกจากเตาในรูปแบบต่างๆ โดย ในความร้อนจำนวนนี้ประมาณ 15.7% สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้

2.6 การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD)

การคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นวิธีที่ช่วย แก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล (fluid flow) รวมถึงปัญหาเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยา เคมี (chemical reaction) และการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) เช่น Finite difference, Finite volume และ Finite element เป็นต้น ในการ คำนวณเพื่อประมาณผลเฉลยของปัญหา

2.6.1 หลักการเบื้องต้นของการคำนวณ CFD

การคำนวณพลศาสตร์ของไหลคือการใช้สมการทางคณิตศาสตร์อธิบายถึงลักษณะทาง กายภาพของของไหลและสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่เกิดการไหล ซึ่งหลักการเบื้องต้นและสมการของ การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลแสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 แผนภาพแสดงหลักการและสมการสำหรับคำนวณการไหล [14]

จากภาพที่ 2.8 จะเห็นว่าสมการอธิบายการไหลของของไหลสร้างมาจากกฎพื้นฐาน ได้แก่ กฎอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass) กฎอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum) และกฎอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy) โดยสมการที่ได้เรียกว่า สมการอนุรักษ์มวล หรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน ตามลำดับ

สมการอนุรักษ์มวล

สมการอนุรักษ์มวลหรือเรียกอีกอย่างว่า “สมการความต่อเนื่อง” (Continuity Equation) บ่งบอกว่ามวลไม่มีการสร้างหรือสูญหายไป ดังนั้นผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในปริมาตรควบคุมใดๆ กับปริมาณมวลที่ไหลออกและเข้าจากผิวของปริมาตรควบคุมนั้นๆ มีค่าเท่ากับศูนย์

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมมาจากการประยุกต์ใช้กฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (New's second law) คือ แรงเท่ากับมวลคูณด้วยความเร่ง ซึ่งสมการอนุรักษ์โมเมนตัมอธิบายว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมในปริมาตรควบคุมใดๆ มีค่าเท่ากับแรงลัพธ์ที่กระทำต่อปริมาตรและผิวของปริมาตรควบคุมนั้นๆ

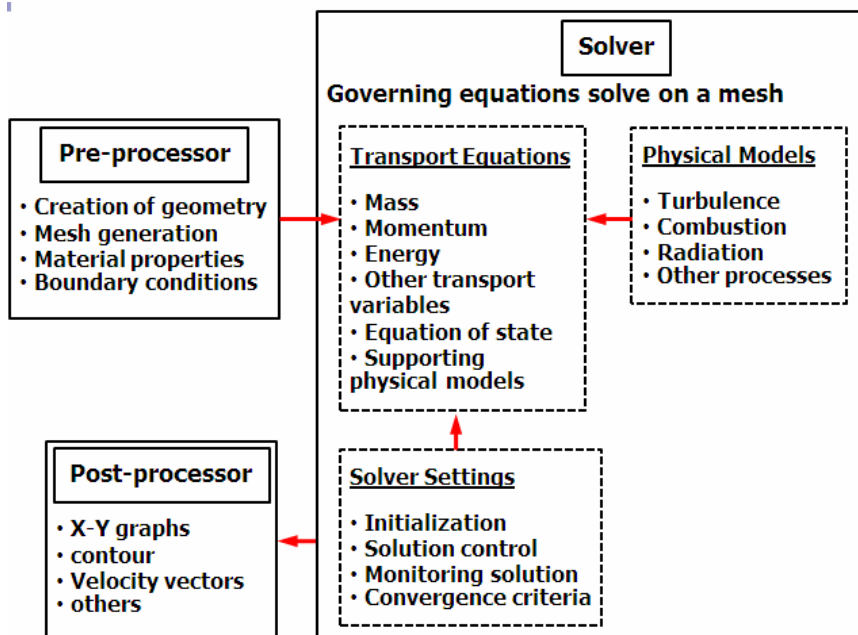
สมการอนุรักษ์พลังงาน

กฎอนุรักษ์พลังงานบ่งบอกว่าพลังงานไม่มีการสูญหายไป โดยสมการอนุรักษ์พลังงานเป็นการใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งกล่าวว่า “อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลเท่ากับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่มวลรวมกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำบนก้อนมวลนั้น”

การใช้สมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการไหลของของไหลนั้นก็คือการหาผลเฉลยของสมการการไหลของไหลทั้งหมด แต่เนื่องจากสมการดังกล่าวเป็นสมการที่มีความยุ่งยากไม่สามารถแก้สมการเพื่อหาคำตอบได้โดยง่าย ดังนั้นจึงนำการคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยหรือเรียกว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั่นเอง

2.6.2 ขั้นตอนการคำนวณ CFD

ในปัจจุบันการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลโดยการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งมีขายทั่วไป เช่น CFX, FLUENT และ STAR-CD เป็นต้น โปรแกรมแต่ละตัวพัฒนาขึ้นมาให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีลำดับขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองสามารถสรุปเป็นแผนภาพดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [14]

จากภาพที่ 2.9 จะเห็นว่าขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. Pre-process

สำหรับขั้นตอน Pre-process เปรียบเสมือนขั้นตอนของการเตรียมความพร้อมและกำหนดเงื่อนไขของปัญหาประกอบด้วยขั้นตอนย่อยต่างๆ ดังนี้

1.1 สร้างรูปร่างของปัญหา (Creation of Geometry) เป็นขั้นตอนแรกซึ่งเป็นการสร้างปริมาตรของของไหลที่จะคำนวณ CFD (Computational Domain)

1.2 แบ่งเอลิเมนต์ (Mesh Generation) ขั้นตอนนี้เป็นการแบ่งปริมาตรควบคุมซึ่งถูกกำหนดขึ้นในขั้นตอนแรกเป็นปริมาตรเล็กๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (elements)

1.3 กำหนดลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของของไหล (Physics and Fluid properties) เป็นการกำหนดว่าของไหลซึ่งไหลอยู่ภายในปริมาตรควบคุมเป็นของไหลแบบใดและมีคุณสมบัติเป็นอย่างไร

1.4 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) เป็นการกำหนดว่าขอบเขตของปริมาตรควบคุมแต่ละด้านมีคุณสมบัติเป็นอย่างไร เช่น เป็นผนังที่มีอุณหภูมิคงที่หรือมีการคายความร้อนค่าหนึ่ง เป็นทางเข้าของปริมาตรควบคุมซึ่งมีการไหลเข้าของของไหลด้วยความเร็วค่าหนึ่ง เป็นต้น

2. Solver

ขั้นตอน Solver เป็นขั้นตอนการกำหนดค่าการเริ่มต้นการคำนวณ การคำนวณและการสิ้นสุดการคำนวณ โดยแบ่งเป็นสองขั้นตอนย่อยคือ

2.1 การกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialization) และการควบคุมการแก้ปัญหา (Solution control) เป็นการกำหนดค่าตัวแปรสำหรับเริ่มต้นการคำนวณ ซึ่งการกำหนดค่าเริ่มต้นที่ใกล้เคียงกับค่าผลเฉลยของปัญหาจะทำให้การคำนวณได้ผลเฉลยเร็วขึ้น

2.2 การสังเกตการลู่เข้า (Monitoring Convergence) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการคำนวณและการลู่เข้าของคำตอบเพื่อให้ได้ผลเฉลยสุดท้ายของปัญหา

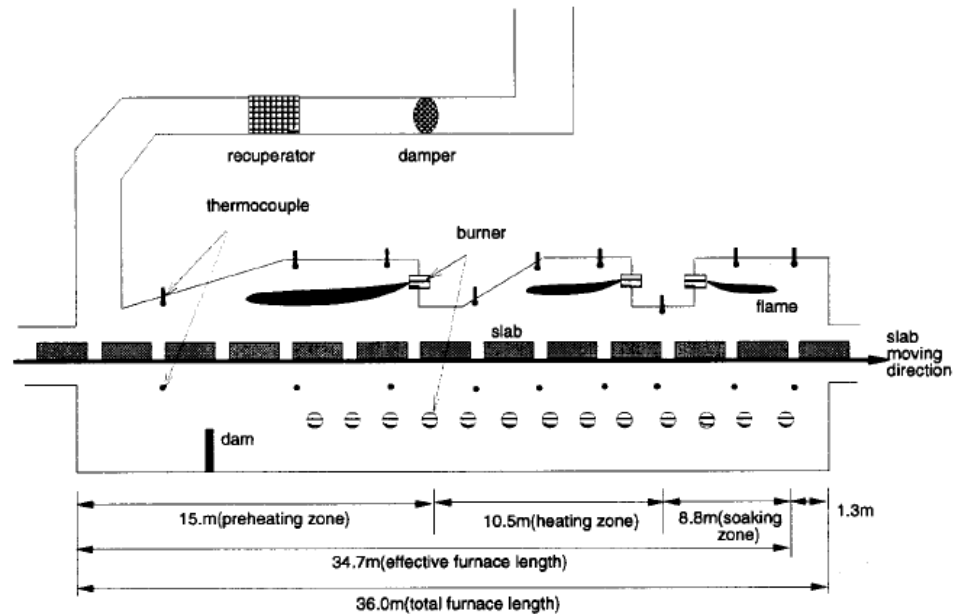
3. Post-process

ขั้นตอน Post-process เป็นขั้นตอนหลังการคำนวณหาผลเฉลยเสร็จสิ้น เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างแบบจำลอง นั่นคือขั้นตอนการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งสามารถนำเสนอได้หลายรูปแบบ เช่น การพลอตกราฟในแนว x-y (x-y plot) การแสดงเวกเตอร์ (vector plot) และ Contour plot เป็นต้น ขึ้นอยู่กับรูปแบบและสิ่งที่ต้องการนำเสนอ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเกี่ยวกับเตาเผาเหล็กไม่ว่าจะเป็นการศึกษาและพัฒนาเตาเผาและองค์ประกอบต่างๆ ของเตาเผาเหล็ก รวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานและการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางในต่างประเทศ ดังนั้นในส่วนนี้จะศึกษาและสรุปงานวิจัยต่างๆ ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับเตาเผาเหล็กเพื่อใช้เป็นแนวทางและข้อมูลในงานวิจัย โดยงานวิจัยที่ให้ความสนใจได้แก่ งานวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อนและการประเมินประสิทธิภาพการทำงานและการใช้พลังงานความร้อนของเตาเผาเหล็ก รวมถึงงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้การคำนวณพลศาสตร์ของไหลเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ของเตาเผาเหล็ก อาทิเช่น

ปี 2000 โดย Jung Gyu Kim และ Kang Y. Huh [15] ศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเหล็กชนิด walking-beam ของโรงงาน POSCO ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งใช้สำหรับเผาเหล็กแท่งหนา (slab) ในกระบวนการรีดร้อน จุดประสงค์ของการศึกษานี้คือทำนายลักษณะการไหล การเผาไหม้เชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตา และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาดังกล่าวโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลอง



ภาพที่ 2.10 Walking-Beam Slab reheating furnace

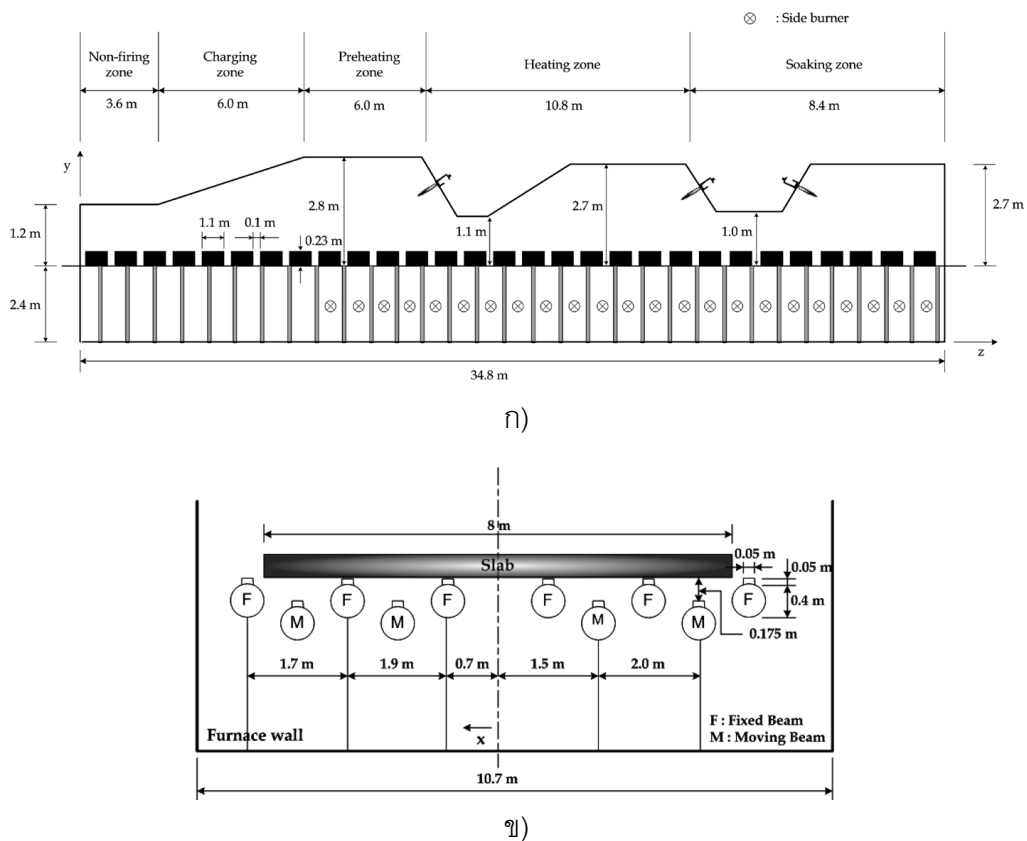
การสร้างแบบจำลองโดยการประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลหรือ CFD ใช้โปรแกรมชื่อ FLUENT เป็นกรณีวิเคราะห์ปัญหาแบบ 3 มิติ ที่สภาวะคงที่ (steady state) โดยการศึกษาจะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่หนึ่งทำการสร้างแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงของหัวเผาซึ่งปรับเปลี่ยนให้มีลักษณะอย่างง่าย (simplified burner) ทั้งนี้ก็เนื่องจากหัวเผาจริงที่ใช้ในเตาเผาเหล็กมีรูปร่างและลักษณะที่ซับซ้อนและมีการติดตั้งจำนวนหลายตัวทำให้การสร้างแบบจำลองของเตาเผาซึ่งมีขนาดใหญ่มีความยุ่งยากและเสียเวลาเป็นอย่างมาก ดังนั้นผลของการคำนวณการเผาไหม้ของหัวเผาอย่างง่ายซึ่งผ่านการประเมินความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่วัดได้จริงจะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของเตาเผาเหล็กในส่วนที่สอง แบบจำลองย่อยที่เลือกใช้แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แบบจำลองย่อยที่ใช้สำหรับการคำนวณ CFD

ความปั่นป่วน	Standard k- ϵ turbulence model
การเผาไหม้	The Mixture Fraction/Assumed PDF model
การถ่ายเทความร้อน	Discrete Ordinates (DO) Radiation Model Weighted-Sum-of-Gray-gases Model (WSGGM)
การคำนวณ NOx	Thermal NOx Model

ผลการคำนวณ CFD โดยใช้โปรแกรม FLUENT ของเตาเผาเหล็กทำให้สามารถทำนายและอธิบายผลจากการเผาไหม้ ลักษณะและทิศทางการไหลของก๊าซ การถ่ายเทความร้อน รวมถึงการสูญเสียความร้อนในรูปแบบต่างๆ ได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่วัดจริงได้ผลที่มีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าสมมุติฐานและข้อกำหนดต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้มีความถูกต้อง และสามารถสร้างแบบจำลองที่มีความถูกต้องสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเตาเผาเหล็กได้จริง

ปี 2008 โดย Jung Hyun JANG และคณะ [16] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การถ่ายเทความร้อนของเตาเผาเหล็กชนิด walking-beam ดังแสดงในภาพที่ 2.11 ซึ่งเป็นเตาที่ใช้สำหรับเผาเหล็กกล้าคาร์บอนสูง (high carbon steel) ซึ่งมีประมาณคาร์บอนระหว่าง 0.35-0.55%

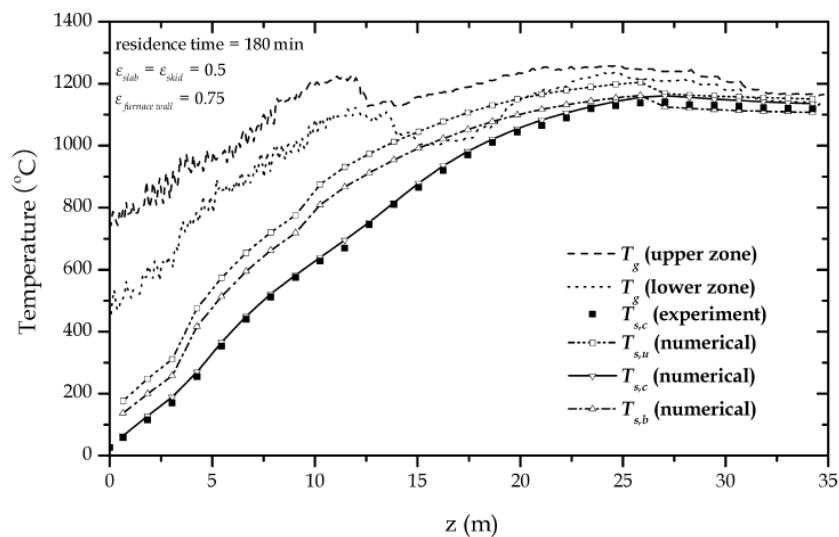


ภาพที่ 2.11 ลักษณะของเตาเผาเหล็กตาม ก) แนวยาวและ ข) แนวขวางของเตา

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะสามารถทำนายการกระจายตัวของฟลักซ์ความร้อน (heat flux distribution) ภายในเตาและการกระจายของอุณหภูมิของเหล็กแท่งสแลบ โดยจะพิจารณาการ

แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเหล็กแท่งกับบริเวณโดยรอบ ได้แก่การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีระหว่างเหล็กแท่งสแลบ สกิด (skids) ก๊าซร้อน ผนังเตา รวมถึงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนภายในเตา และจากนั้นจึงประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวในการศึกษาผลของความเร็วในการป้อนเหล็กแท่ง (charging speed) หรือ residence time และผลของค่า emissivity ของผนังเตาและเหล็กแท่งสแลบต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิของเหล็กแท่งสแลบ พฤติกรรมถ่ายเทความร้อนและการกระจายความร้อนของเหล็กแท่งสแลบ

สำหรับขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองเพื่อจุดประสงค์ในการศึกษาการกระจายทางความร้อนภายในเตาเผาเหล็กนั้น ค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการถ่ายเทความร้อนภายในเตา ได้แก่ ค่า Emissivity ซึ่งบอกถึงความสามารถในการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุ โดยในงานวิจัยนี้ กำหนดค่า emissivity ของฉนวนกันความร้อนของผนังเตา สแลบและสกิดเท่ากับ 0.75 0.5 และ 0.5 ตามลำดับ ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิของสแลบตลอดแนวความยาวเตา เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงแสดงดังภาพที่ 2.12

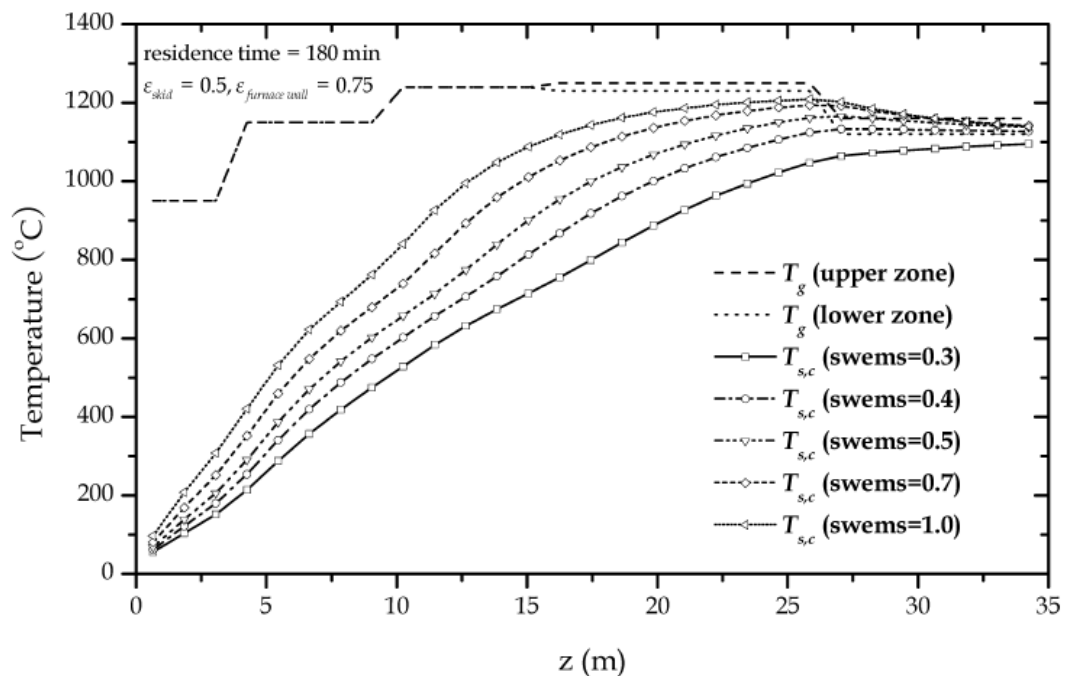


ภาพที่ 2.12 เปรียบเทียบอุณหภูมิของสแลบที่ได้จากการคำนวณและการวัดค่าจริงตลอดแนวความยาวของเตาเผาเหล็ก

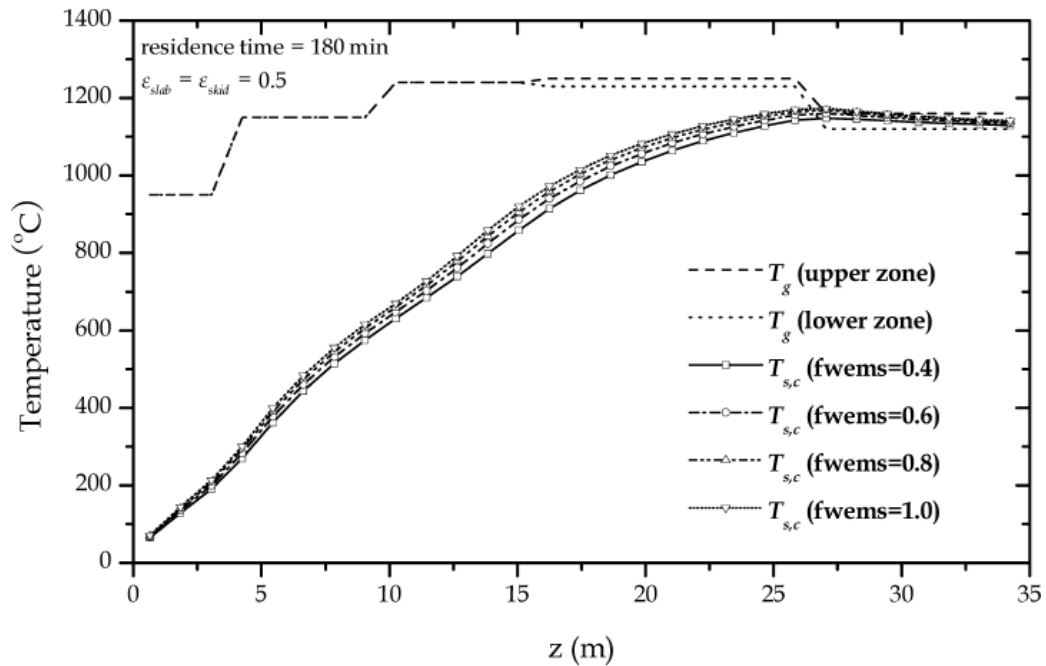
ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณใจกลางของสแลบจะเห็นว่าค่าจากการคำนวณและค่าจากการวัดค่าจริงมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีความถูกต้องและเหมาะสม

สำหรับผลการศึกษาผลของ Residence time พบว่าค่าที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 180 นาที และในขณะที่ผลการศึกษาผลของค่า emissivity ของผนังเตาและสแลบต่อการกระจายความร้อน

ภายในเตาสามารถสรุปได้ว่าเมื่อกำหนดค่าให้ค่า emissivity ของผนังเตาและสกิดมีค่าเท่ากับ 0.75 และ 0.5 ตามลำดับ อุณหภูมิใจกลางของสแลบจะมีค่าสูงขึ้นตามค่า emissivity ของสแลบที่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากค่า emissivity ของสแลบที่สูงขึ้นหมายความว่าสแลบจะสามารถดูดซับ (absorb) ความร้อนไว้ได้มากส่งผลให้อุณหภูมิของสแลบสูง และในกรณีการศึกษาผลของค่า emissivity ของผนังเตาเมื่อกำหนดค่า emissivity ของสกิดและสแลบมีค่าเท่ากับ 0.5 เท่ากัน พบว่าอุณหภูมิใจกลางของสแลบจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า emissivity ของผนังเตาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่การเปลี่ยนแปลงของค่า emissivity ของผนังเตาจะส่งผลค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับผลของค่า emissivity ของสแลบ ผลการคำนวณอุณหภูมิใจกลางของสแลบตลอดแนวยาวเตาของกรณีการศึกษาผลของค่า emissivity ของสแลบและผนังเตาแสดงดังภาพที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ

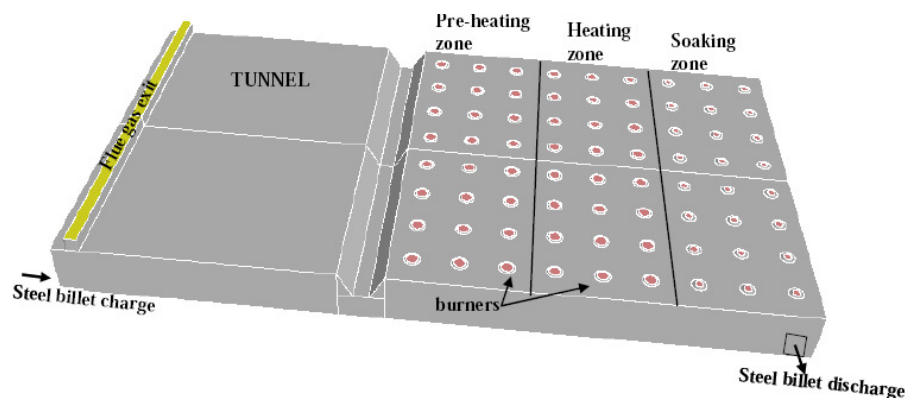


ภาพที่ 2.13 อุณหภูมิใจกลางสแลบเมื่อกำหนดค่า Emissivity ของผนังเตาคงที่เท่ากับ 0.75 และ กำหนดค่า Emissivity ของสแลบเท่ากับ 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 และ 1.0 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.14 อุณหภูมิใจกลางสแลบเมื่อกำหนดค่า Emissivity ของสแลบคงที่เท่ากับ 0.5 และ กำหนดค่า Emissivity ของผนังเตาเท่ากับ 0.3, 0.4, 0.5, 0.7 และ 1.0

ปี 2009 Valerio Battaglia และคณะ [17] ได้สร้างแบบจำลองโดยประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม FLUENT 6.3 เพื่อใช้ในการออกแบบหัวเผา จากนั้นจึงนำผลจากการจำลองการเผาไหม้ของหัวเผาเพื่อสร้างแบบจำลองการเผาไหม้ การไหลของก๊าซ และการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็ก ในการอธิบายการกระจายตัวอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนต่างๆ ของเตา และประเมินประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ความร้อนของเตาเผาเหล็ก



ภาพที่ 2.15 Feralpi LAM2 walking hearth reheating furnace

ภาพที่ 2.15 แสดงเตาเผาเหล็กในงานนี้ซึ่งได้แก่ เตาเผาเหล็กชนิด Walking hearth สำหรับเผาเหล็กแท่งบิลเลท โดยใช้หัวเผาชนิด Low NOx ชื่อ FlexyTech burner จำนวน 72 ตัว เป็นแหล่งพลังงานความร้อนสำหรับเตาเผาเหล็ก

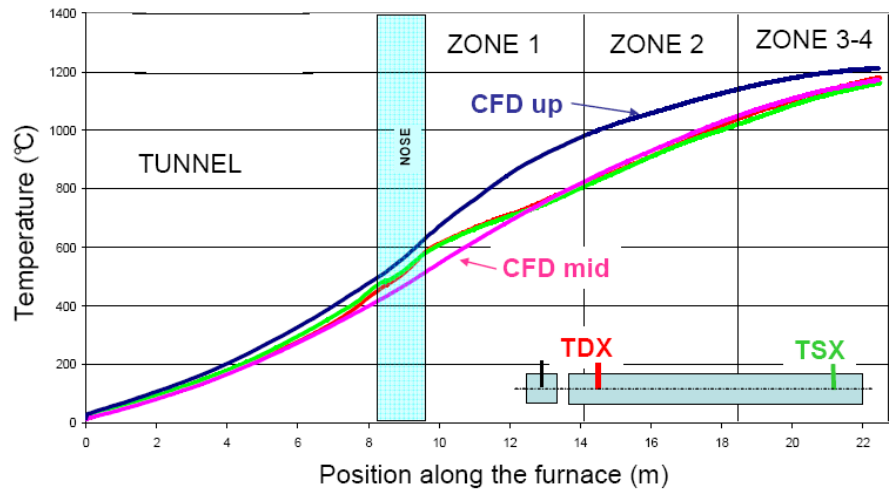
การสร้างแบบจำลองของเตาเผาเหล็กนี้กำหนดเป็นปัญหาแบบสามมิติที่สภาวะคงที่ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดก๊าซได้แก่ก๊าซธรรมชาติกับอากาศและกำหนดให้การไหลของของไหลภายในห้องเผาไหม้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน โดยแบบจำลองย่อยซึ่งประยุกต์ใช้ในการคำนวณ CFD สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แบบจำลองย่อยในการคำนวณ CFD

Flow	Reynolds Average Navier-Stokes compressible ideal gas
Turbulence	Wilcox k- ω
Species	CH ₄ , O ₂ , CO ₂ , CO, H ₂ O, N ₂
Reaction schemes	2 steps: CH ₄ + 3/2O ₂ -> CO + 2H ₂ O CO + 1/2O ₂ -> CO ₂
Chemistry	Finite Rate/Eddy Dissipation (EDM)
Radiation	Discrete Ordinate Model (DOM) Absorption coefficient: WSGGM

นอกจากนี้ในงานวิจัยชิ้นนี้กำหนดให้พื้นผิวของเตาซึ่งได้แก่ผิวด้านบนของเหล็กแท่งบิลเลทซึ่งวางเรียงชิดติดกันและมีการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องในขณะที่เตามีการทำงานให้มีลักษณะเสมือนเป็นพื้นผิวเรียบต่อเนื่อง (Equivalent strip) ตลอดทั้งแนวความยาวเตาเพื่อหลีกเลี่ยงการคำนวณในสภาวะไม่คงที่ (unsteady state)

ผลการคำนวณ CFD สามารถประเมินปริมาณฟลักซ์ความร้อนซึ่งถ่ายเทไปสู่บิลเลทและอุณหภูมิของบิลเลท ณ ตำแหน่งต่างตลอดแนวความยาวของเตา โดยผลการคำนวณอุณหภูมิของเหล็กแท่งบิลเลทด้วย CFD เปรียบเทียบกับค่าที่สามารถวัดได้จากกระบวนการผลิตแสดงดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 เปรียบเทียบอุณหภูมิเหล็กแท่งบิลเลทซึ่งได้จากการคำนวณ CFD และการวัดค่าจริง

จากรูปจะเห็นว่าจากการคำนวณ CFD จะคำนวณค่าของอุณหภูมิที่ผิวด้านบน (CFD_{up}) และใจกลาง (CFD_{mid}) ของเหล็กแท่งบิลเลท ส่วนค่าที่วัดได้จะวัดบริเวณใจกลางของเหล็กแท่งที่ตำแหน่งปลายทั้งสองข้างของบิลเลท (TDX และ TSX) โดยค่าที่วัดได้ทั้งสองด้านมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเทียบกับค่าการคำนวณ CFD ก็มีค่าใกล้เคียงเช่นเดียวกัน

บทที่ 3

การพัฒนาแบบจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาวิจัย โดยในงานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลหรือ Computational Fluid Dynamic (CFD) ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลของก๊าซ การเผาไหม้เชื้อเพลิงและการถ่ายเทความร้อนภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กซึ่งมีการปฏิบัติงานจริงอยู่ ณ ปัจจุบัน เพื่ออธิบายทิศทางและความเร็วการไหลรวมถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ จากนั้นเมื่อสามารถพัฒนาแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำแล้ว จึงประยุกต์ใช้แบบจำลองดังกล่าวในการทำนายปรากฏการณ์ต่างๆ ภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กเมื่อประยุกต์ใช้การเผาไหม้ด้วยเทคนิค Oxygen enriched combustion ที่ 23% และ 25% O_2 เพื่อดูความเหมาะสมก่อนการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในกระบวนการผลิตจริง

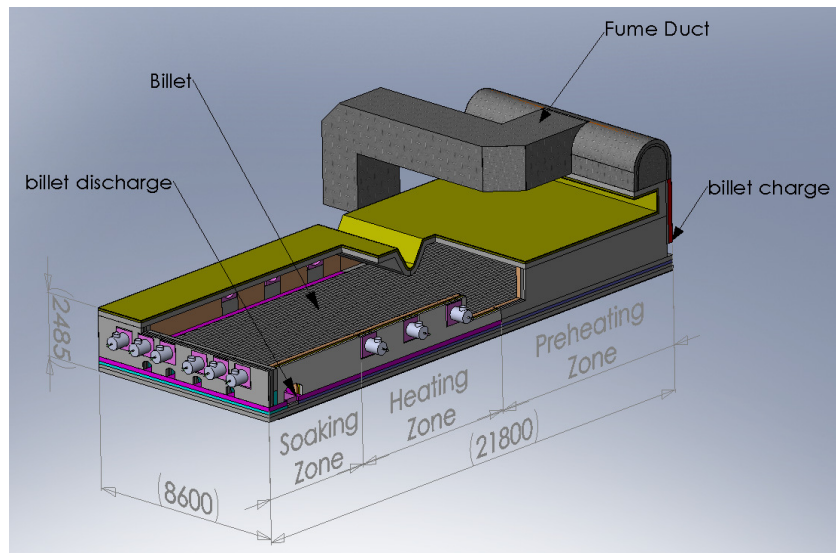
เพื่อการพัฒนาแบบจำลองให้มีความถูกต้องสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ได้ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงลักษณะของเตาเผาเหล็ก การทำงานและรายละเอียดกระบวนการผลิตต่างๆ อย่างละเอียดควบคู่กับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังนั้นรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาวิจัยจะเริ่มตั้งแต่การศึกษาและเก็บข้อมูลการทำงานของเตาเผาเหล็ก โดยนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้เพื่อกำหนดเป็นค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่จะพัฒนาขึ้น จากนั้นจึงประเมินความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง และประยุกต์ใช้แบบจำลองที่ได้เพื่อทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเตาเมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ในขั้นตอนต่อไป

3.1 การศึกษาและเก็บข้อมูลของเตาเผาเหล็ก

3.1.1 ลักษณะของเตาเผาเหล็ก

สำหรับเตาเผาเหล็กซึ่งใช้ในการศึกษาในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นเตาของโรงงานกรุงเทพผลิตเหล็ก (BSI) เป็นเตาเผาเหล็กแบบต่อเนื่องชนิดผลัก หรือ Pusher type furnace มีกำลังการผลิตติดตั้ง 50 tons/hr. ลักษณะและข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผาเหล็กแสดงดังภาพที่ 3.1 และดังตารางที่

3.1 ตามลำดับ



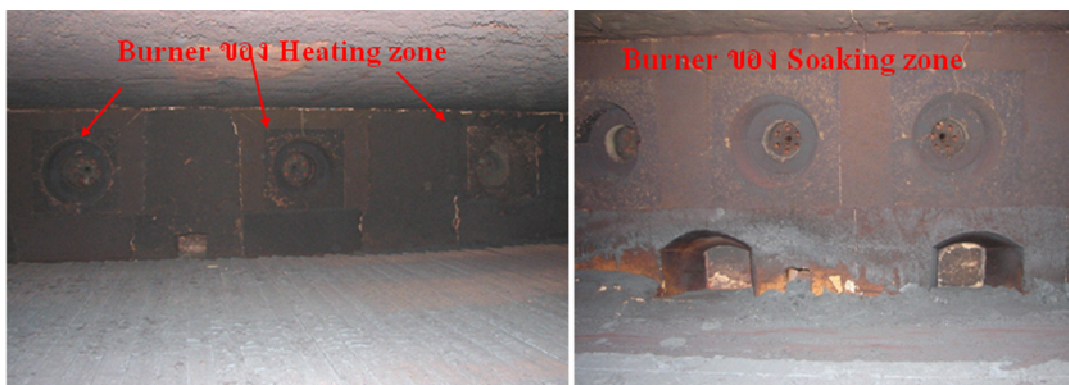
ภาพที่ 3.1 เตาเผาเหล็กชนิดผลึกของโรงงานกรุงเทพผลิตเหล็ก

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของเตาเผาเหล็ก

ข้อมูลเตาเผาเหล็ก		
เตาชนิด Pusher	ยี่ห้อ Danieli ประเทศอิตาลี	
กำลังการผลิตติดตั้ง (tons/hr.)	50	
กำลังการผลิต (tons/hr.)	ต่ำสุด	30
	สูงสุด	60
	เฉลี่ย	40-45
จำนวนชั่วโมงทำงาน	ชั่วโมง/ปี	6300
ขนาดเตา	สูง (m)	1.6
	กว้าง (m)	7.6
	ยาว (m)	20
ขนาดประตูป้อนชิ้นงานเข้า (Charging door)	สูง (m)	0.5
	กว้าง (m)	7.6
ขนาดประตูเอาชิ้นงานออก (Discharging Door)	สูง (m)	0.5
	กว้าง (m)	0.7
ข้อมูลบิลเลท		
ขนาดบิลเลท	กว้าง (mm.)	130
	ยาว (mm.)	6680
น้ำหนักบิลเลท (tons/pieces)		0.868

อัตราการป้อนเข้าเตา (pieces/hr)	57
จำนวนบิลเลทในเตา (pieces)	180
เวลาของบิลเลทอยู่ในเตา (Hrs.)	2
อุณหภูมิบิลเลทขาเข้า (°C)	35
อุณหภูมิบิลเลทขาออก (โดยประมาณ) (°C)	1100-1150
สภาวะการทำงานของเตา	
อุณหภูมิในเตาเผาเหล็ก (°C)	1120-1160
อัตราการใช้น้ำมัน (L/ton)	35
อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เตา (Nm ³ /hr.)	20500
อัตราการไหลของ Atomized air (โดยประมาณ) (Nm ³ /hr.)	942
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมภายในโรงงาน (°C)	40
การสูญเสียสเกล (%)	2

สำหรับเตาเผาเหล็กนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 โซนคือ Preheating zone, Heating zone และ Soaking zone มีการติดตั้งหัวเผาชนิดหัวเผาใช้น้ำมันทั้งหมด 12 ตัว โดยติดตั้งใน Heating zone 6 ตัว และ Soaking zone 6 ตัว การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่หัวเผาจะเป็นแหล่งพลังงานความร้อนแก่บิลเลท โดยจะให้ความร้อนแก่บิลเลทจนมีอุณหภูมิประมาณ 1150 °C ก่อนออกจากเตาเพื่อทำการรีดในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 3.2 ลักษณะหัวเผาของ Heating และ Soaking zone ของเตาเผาเหล็ก

ภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะของหัวเผาใน Heating และ Soaking zone ซึ่งหัวเผาของทั้ง Heating และ Soaking zone นี้จะประกอบไปด้วยรูพ่นอากาศทั้งหมด 6 รู ล้อมรอบรูพ่นน้ำมันเชื้อเพลิง

สำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเผาไหม้นี้ได้แก่เชื้อเพลิงเหลวชนิด น้ำมันเตา C (Fuel oil C) โดยส่วนผสมของน้ำมันเตาซึ่งมีผลการวิเคราะห์ทางเคมีดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของน้ำมันเตา C (Fuel Oil C)

เชื้อเพลิง	ส่วนผสม (wt%)				
	C	H	N	O	S
น้ำมันเตา (Fuel oil C)	86	11.5	0.4	0.1	1.91

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าน้ำมันเตา C นี้มีส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ คาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) เป็นหลักคือ 86% และ 11.5% ตามลำดับ โดย C และ H จะเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับออกซิเจนในอากาศและเกิดพลังงานความร้อนขึ้น โดยจากการวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนของน้ำมันเตานี้พบว่ามีความพลังงานความร้อน (Gross Calorific Value) เท่ากับ 10,118 cal/g นั่นคือการเผาไหม้ของน้ำมันเตา 1 g จะได้พลังงานความร้อนสูงถึง 10,118 cal

ค่าพารามิเตอร์ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงของหัวเผาใน Heating zone และ Soaking zone มีค่าแตกต่างกัน ตารางที่ 3.3 สรุปค่าพารามิเตอร์การเผาไหม้เชื้อเพลิงของ Heating zone และ Soaking zone ซึ่งจากข้อมูลในตารางจะเห็นว่าหัวเผาใน Heating zone จะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศสูงกว่าหัวเผาใน Soaking zone เนื่องจากใน Heating zone มีความต้องการพลังงานความร้อนสูงมากเพื่อให้เหล็กร้อนขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ แต่ใน Soaking zone ต้องการความร้อนเพื่อให้เหล็กที่ร้อนแล้วมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งแท่ง

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการเผาไหม้ของ Heating zone และ Soaking zone

	Heating zone	Soaking zone
จำนวนหัวเผา	6	6
ปริมาณอากาศเผาไหม้ (Nm ³ /hr)	11856	9759
อุณหภูมิอากาศเผาไหม้ (°C)	260	260
ปริมาณเชื้อเพลิง (L/hr)	910	734
อุณหภูมิเชื้อเพลิง (°C)	70	70
ปริมาณ atomization air (Nm ³ /hr)	636	306
อุณหภูมิ atomizing air (°C)	30	30

3.1.2 การทำงานของเตาเผาเหล็ก

การทำงานของเตาเผาเหล็กของ บ. กรุงเทพผลิตเหล็ก จำกัด (มหาชน) จะทำงานตั้งแต่วันที่จันทร์-วันอาทิตย์ โดยในแต่ละวันจะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วงการทำงาน คือ ช่วงรีดเหล็ก, ช่วงอุ่นเตาและช่วงเร่งเตา โดยมีรายละเอียดดังนี้

ช่วงอุ่นเตา

ช่วงเวลา 18:30 – 21:00 น. เป็นช่วงที่มีการควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาเหล็กที่อุณหภูมิต่ำลง เพื่อรีดเหล็กในที่นี่มีการควบคุมอุณหภูมิของ pre-heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 850 °C และควบคุมอุณหภูมิของ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,050 °C

ช่วงเร่งเตา

ช่วงเวลา 21:00 – 21:30 น. เป็นช่วงที่มีการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิที่ควบคุมในช่วงอุ่นเตา มาเป็นอุณหภูมิที่ควบคุมในช่วงรีดเหล็ก

ช่วงรีดเหล็ก

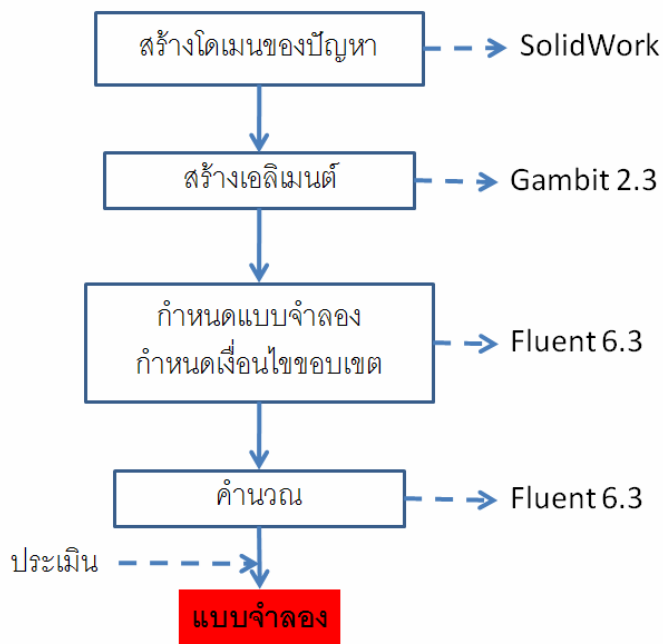
ช่วงเวลา 21:30 – 18:30น. เป็นช่วงที่มีการรีดเหล็ก โดยเหล็กจะได้รับความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเหล็กให้มีอุณหภูมิพอเหมาะในการรีด ในที่นี่จะมีการควบคุมอุณหภูมิของ Pre-heating zone และ heating zone ไว้ที่อุณหภูมิ 1,150 °C และ 1,250 °C ตามลำดับ

จากข้อมูลรายละเอียดการทำงานของเตาเผาเหล็กจะเห็นว่าช่วงรีดเหล็กคือช่วงที่มีการทำงานยาวที่สุดคือประมาณ 21 ชั่วโมง/วัน และในช่วงเวลาดังกล่าวจะควบคุมอุณหภูมิภายในเตาให้คงที่ตลอดเวลา นั่นคือการทำงานของเตาอยู่ในสภาวะคงที่ หรือ Steady state ดังนั้นลดความยุ่งยากและความซับซ้อนของการพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้จึงศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาในช่วงนี้

3.2 การพัฒนาแบบจำลอง

3.2.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาใดๆ มีขั้นตอนต่างๆ สามารถสรุปเป็นแผนภาพอย่างง่ายดังแสดงในภาพที่ 3.3

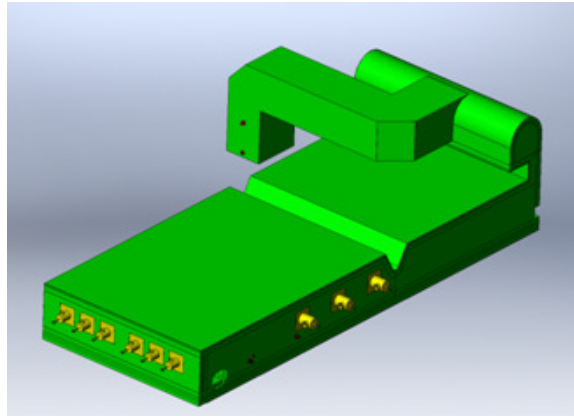


ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองด้วยการคำนวณ CFD

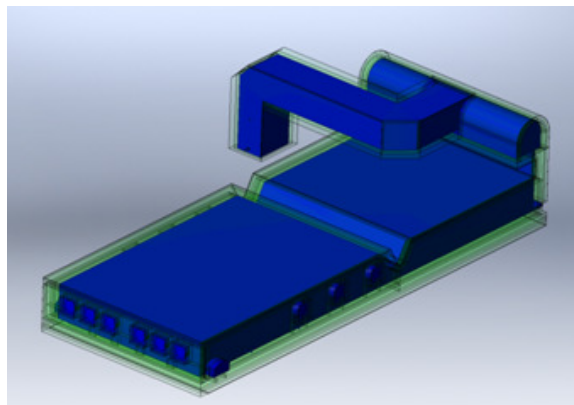
3.2.1.1 กำหนดโดเมนของปัญหา (Computational Domain)

ขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลองคือการกำหนดโดเมนของปัญหาหรือปริมาตรควบคุม ซึ่งเป็นการกำหนดขอบเขตของปัญหาที่จะคำนวณ สำหรับในงานวิจัยนี้ซึ่งสร้างแบบจำลองของการไหลของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ การเผาไหม้เชื้อเพลิง และการถ่ายเทความร้อนภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็ก ดังนั้นโดเมนหรือปริมาตรควบคุมของปัญหานี้จึงถูกกำหนดเฉพาะปริมาตรของอากาศภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กเท่านั้น ซึ่งจะไม่รวมปริมาตรของของแข็งของโครงสร้างเตาเผาเหล็ก

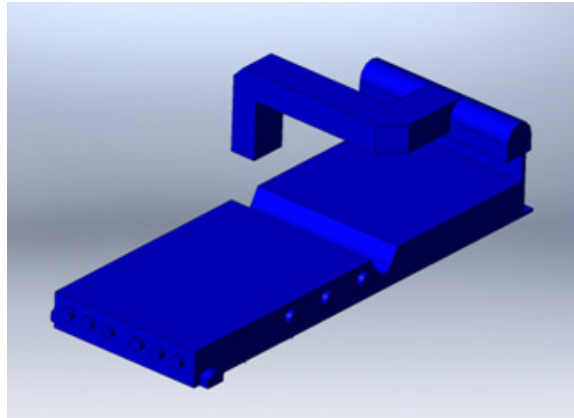
ขั้นตอนการสร้างโดเมนของปัญหานี้ใช้โปรแกรมเขียนแบบคือ SolidWork 2007 โดยเริ่มต้นจากการถอดแบบจาก drawing ของเตาจากโรงงานและสร้างเป็น CAD Files ขึ้น แล้วจึงกำหนดเฉพาะปริมาตรของอากาศภายในห้องเผาไหม้ซึ่งเป็นปริมาตรที่สนใจและต้องการใช้สำหรับการคำนวณ CFD



ก)



ข)



ค)

ภาพที่ 3.4 ก) CAD เต่า ข) ปริมาตรด้านในเต่า และ ค) ปริมาตรอากาศภายในเต่าสำหรับคำนวณ CFD

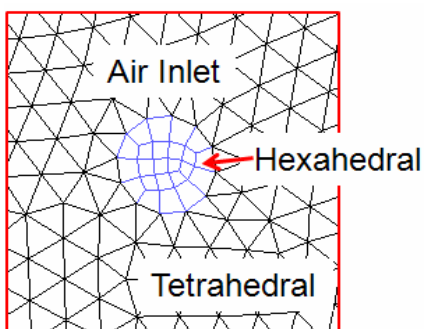
ภาพที่ 3.4 แสดงขั้นตอนการกำหนดโดเมนของปัญหา ในภาพที่ 3.4 ก) แสดงผิวด้านนอกของเต่า ซึ่งเป็นโครงสร้างของแผ่นเหล็กหนา ภาพที่ 3.4 ข) แสดงให้เห็นโครงสร้างเต่าซึ่งประกอบด้วยชั้นของอิฐทนไฟและปริมาตรของอากาศภายในห้องเผาไหม้ของเต่า (ปริมาตรสีน้ำเงิน) และภาพที่ 3.4 ค) แสดงเฉพาะปริมาตรของอากาศภายในเต่าซึ่งเป็นปริมาตรควบคุมสำหรับคำนวณ CFD

ของงานวิจัยนี้

3.2.1.2 สร้างเอลิเมนต์ (Meshing)

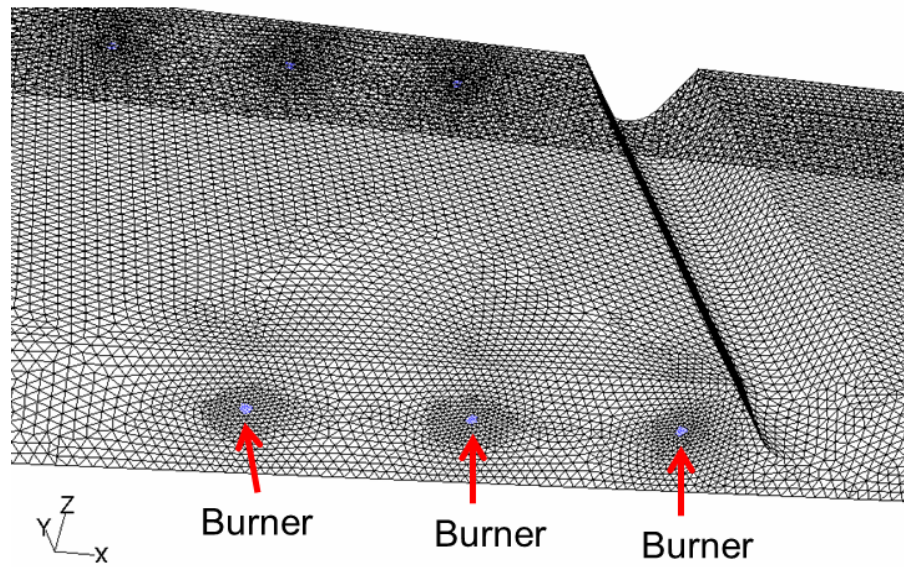
หลังจากกำหนดโดเมนของปัญหาหรือปริมาตรควบคุมสำหรับคำนวณ CFD เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างเอลิเมนต์หรือ meshing ซึ่งใช้โปรแกรม Gambit เวอร์ชัน 2.3

การแบ่งเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุมของปัญหานี้จะแบ่งเป็นแบบ Hybrid mesh ซึ่งประกอบด้วยเมชสองชนิดคือ Hexahedral mesh และ Tetrahedral mesh โดยภาพที่ 3.8 แสดงให้เห็นการแบ่งเอลิเมนต์ของรูปนอภาคและบริเวณโดยรอบ ซึ่งจะเห็นว่าการแบ่งเอลิเมนต์ของพื้นผิวของรูปนอภาคเป็นเมชชนิด Hexahedral mesh ทั้งนี้ก็เนื่องจากรูปนอภาคมีขนาดเล็กคือมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 130 mm และ 76 mm สำหรับหัวเผาของ heating zone และ soaking zone ตามลำดับ และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของรูปนอภาคถูกกำหนดเป็นค่าความเร็วการพ่นอากาศ (velocity inlet) ซึ่งจำเป็นต้องแบ่งเอลิเมนต์ของพื้นผิวของรูปนอภาคให้มีความละเอียดสูงๆ เพื่อให้ค่าความเร็วของอากาศที่พ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้มีค่าที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงเห็นว่าขนาดเอลิเมนต์ของรูปนอภาคมีขนาดเล็ก ในขณะที่การแบ่งเอลิเมนต์ของพื้นผิวโดยรอบมีขนาดใหญ่ขึ้นและใช้เมชชนิด Tetrahedral mesh



ภาพที่ 3.5 การแบ่งเอลิเมนต์ของพื้นผิวของรูปนอภาคและบริเวณโดยรอบ

ลักษณะการกระจายของเอลิเมนต์ของทั้งโดเมนแสดงดังภาพที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นว่าบริเวณใกล้ๆ หัวเผามีลักษณะเมชที่ละเอียดและบริเวณโดยรอบจะมีขนาดเมชที่ใหญ่ขึ้นเพื่อไม่ให้มีจำนวนเอลิเมนต์สูงมากซึ่งจะทำให้เสียเวลาในการคำนวณมากเกินไป



ภาพที่ 3.6 การแบ่งเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุม

3.2.1.3 กำหนดแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลองใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อ FLUENT เวอร์ชัน 6.3 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จภาพที่สามารถแก้ปัญหาการไหล การเกิดปฏิกิริยาเคมีและการถ่ายเทความร้อนได้พร้อมกัน

สมมุติฐานเบื้องต้นของปัญหา ได้แก่

1. กำหนดให้การไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)
2. การเผาไหม้เป็นการเผาไหม้แบบ non-premixed
3. ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นที่สภาวะสมดุล (Equilibrium Chemistry)

และโมเดลย่อยที่เหมาะสมและถูกเลือกใช้สำหรับการพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 โมเดลย่อยที่เลือกใช้สำหรับการคำนวณ CFD

ความปั่นป่วน	Realizable 2-equation k- ϵ model
การเผาไหม้	Discrete phase model The mixture/assumed PDF model
การถ่ายเทความร้อน	Discrete Ordinate Model (DO) Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model (WSGGM)

แบบจำลองการไหล

ใช้ Realizable 2-equation k- ϵ model สำหรับการคำนวณการไหลของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็ก เนื่องจาก Realizable 2-equation k- ϵ model เป็นแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งสามารถคำนวณและให้ผลการคำนวณที่ค่อนข้างแม่นยำโดยใช้เวลาในการคำนวณไม่มากนัก

แบบจำลองการเผาไหม้

ใช้ Discrete phase model สำหรับการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งมีลักษณะเป็นเฟสของเหลว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ Discrete Phase Model สำหรับการพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้

ใช้ The mixture/assumed PDF model สำหรับการคำนวณการเผาไหม้เชื้อเพลิงซึ่งกำหนดให้เป็นการเผาไหม้แบบ non-premixed นั่นคือน้ำมันเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์จะถูกแยกพ่นเข้าสู่บริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โดยการเผาไหม้แบบ non-premixed จะคำนวณสมการ (transport equation) โดยใช้ Stoichiometric mixture fraction approach และใช้ probability density function (PDF) approach ในการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความปั่นป่วนและการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้

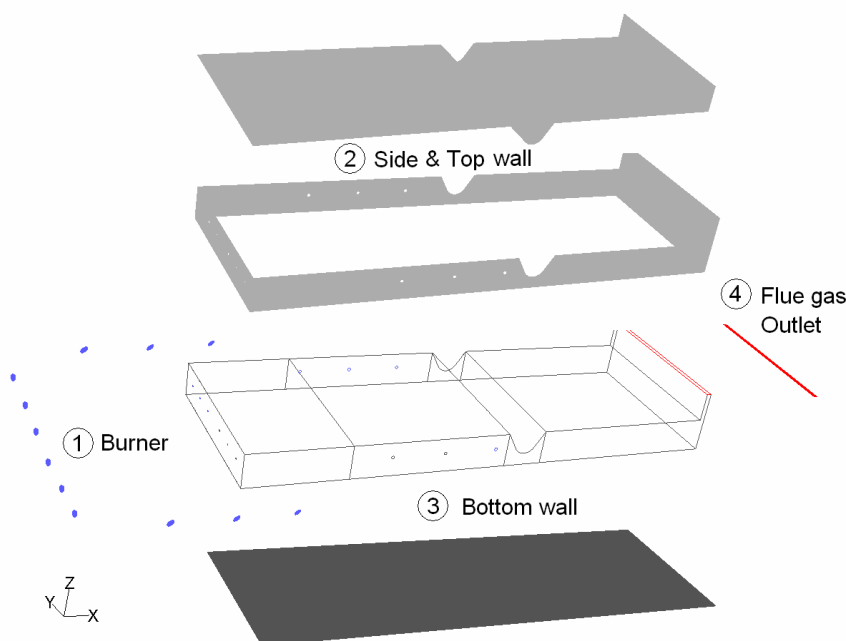
แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน

ใช้ Discrete Ordinate Model (DO) สำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อน สำหรับการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กซึ่งมีอุณหภูมิของก๊าซภายในเตาสูง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจะเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเป็นหลักคือมากกว่า 90% โปรแกรม FLUENT มีแบบจำลองย่อยซึ่งเหมาะสำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีทั้งหมด 2 โมเดลคือ P-1 Model และ DO Model โดย DO Model จะเหมาะกับปัญหาที่ต้องการความแม่นยำของผลเฉลยมาก ๆ แต่จะใช้เวลาในการคำนวณมากกว่า P-1 Model ดังนั้นสำหรับการพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้ซึ่งต้องการศึกษาการกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กเป็นหลักจึงเลือกใช้ DO Model สำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนภายในเตา

ใช้ Weighted-Sum-of-Gray-gases Model (WSGGM) สำหรับการคำนวณค่า Absorption Coefficient ของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ โดย WSGGM จะคำนวณจากสัดส่วนของ CO CO₂ และ H₂O ในก๊าซภายในห้องเผาไหม้ ทำให้การคำนวณค่า Absorption coefficient แม่นยำ ส่งผลให้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีได้ถูกต้องมากขึ้น

3.2.1.4 กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

สำหรับขั้นตอนนี้คือการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของโดเมนที่ทำการศึกษา ในงานวิจัยนี้ศึกษาและสร้างแบบจำลองเฉพาะปริมาตรของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กเท่านั้น โดยไม่รวมปริมาตรของของแข็งของโครงสร้างเตา โดยขอบเขตของโดเมนของปัญหานี้แสดงดังภาพที่ 3.7



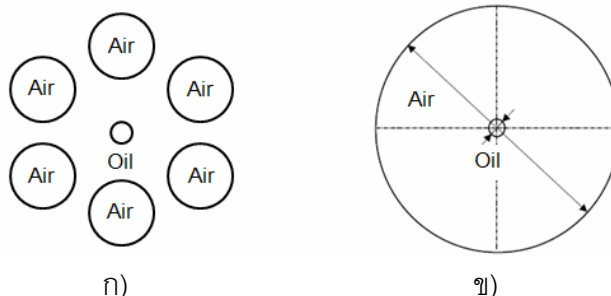
ภาพที่ 3.7 เงื่อนไขขอบเขต

ขอบเขตของโดเมนของปัญหานี้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักๆ คือ ทางเข้าของโดเมน (Inlet) ผนังด้านข้าง/ด้านบนของโดเมน ผนังของโดเมน และทางออกของโดเมน (Outlet) ซึ่งรายละเอียดการกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตของโดเมนในแต่ละด้านมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1.4.1 ทางเข้าโดเมน (Inlet)

ตำแหน่งที่มีการไหลเข้าของของไหลในปัญหานี้ได้แก่หัวเผา (Burner) ซึ่งมีทั้งหมด 12 ตัว แบ่งเป็นหัวเผาใน heating zone 6 ตัว และ soaking zone 6 ตัว ลักษณะของหัวเผาจะประกอบไปด้วยรูพ่นอากาศเผาไหม้ (Air inlet) จำนวน 6 รู ล้อมรอบรูพ่นน้ำมัน (Oil inlet) 1 รู ซึ่งอยู่ในตำแหน่งตรงกลาง ดังแสดงในภาพที่ 3.8 ก) ลักษณะของหัวเผาซึ่งประกอบด้วยรูพ่นอากาศและเชื้อเพลิงขนาดเล็กนี้ทำให้การสร้างโดเมนและการแบ่งเอลิเมนต์มีความยุ่งยากมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงปรับเปลี่ยนลักษณะของหัวเผาให้มีลักษณะอย่างง่ายหรือเรียกว่า Simplified burner ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 3.8 ข) รูพ่นอากาศของหัวเผาอย่างง่ายนี้ทำได้โดยการรวมขนาดของรูพ่นอากาศทั้ง 6 รูให้เหลือเพียงรูเดียวซึ่งมีขนาดพื้นที่เท่ากับรูพ่นอากาศทั้งหมดของหัวเผาจริงๆ

รวมกัน ทำให้ค่าฟลักซ์ของมวล (mass flux) ที่ออกจากรูพ่นอากาศยังคงมีค่าเท่ากับฟลักซ์ของมวลที่ออกจากหัวเผาจริง



ภาพที่ 3.8 รูพ่นอากาศและรูพ่นน้ำมันของ ก) หัวเผาจริง ข) Simplified burner

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของรูพ่นอากาศและรูพ่นน้ำมันเป็นดังนี้

รูพ่นอากาศเผาไหม้ (Air inlet)

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการพ่นอากาศเข้าสู่โดเมนจะกำหนดเป็นค่าความเร็วของอากาศเผาไหม้ที่พ่นจากหัวเผาซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าของอัตราการพ่นอากาศที่ใช้จริงของกระบวนการผลิต (ตารางที่ 3.3) ดังนี้

$$v\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = \frac{\text{mass flow rate}\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)}{\rho\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \times A\left(\text{m}^2\right)} \quad (3.1)$$

ดังนั้นความเร็วของการพ่นอากาศสำหรับหัวเผา Heating zone และ soaking zone มีค่าเท่ากับ 85.45 m/s และ 201.45 m/s ตามลำดับ โดยอากาศเผาไหม้มีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วยก๊าซออกซิเจน 21 % และไนโตรเจน 79 % โดยปริมาตร และมีอุณหภูมิอุ่นร้อนเท่ากับ 260 °C

รูพ่นน้ำมัน (Oil Inlet)

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของรูพ่นน้ำมันเชื้อเพลิงนั้นไม่สามารถทำได้เช่นเดียวกับรูพ่นอากาศ ทั้งนี้ก็เนื่องจากรูพ่นน้ำมันมีเพียง 1 รูและมีขนาดเล็กมากคือเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 mm ดังนั้นจึงไม่สามารถสร้างพื้นผิวและแบ่งเอลิเมนต์ของรูพ่นน้ำมันที่มีขนาดเล็กมากได้ ดังนั้นในงานวิจัยจึงใช้วิธีการจำลองตำแหน่งและความเร็วของการพ่นน้ำมันของแต่ละหัวเผาแทนการสร้างพื้นผิวจริงของรูพ่นน้ำมัน แบบจำลองที่ใช้สำหรับจำลองการพ่นเชื้อเพลิงได้แก่

Discrete Phase Model ซึ่งสามารถจำลองเสมือนว่ามีรูฟ่น้ำมันเชื้อเพลิงออกไป ณ ตำแหน่งตรงกลางของรูฟ่นอากาศ และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำมันดังต่อไปนี้

1. ส่วนผสมทางเคมีของน้ำมันเชื้อเพลิง ดังตารางที่ 3.2
2. ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง หรือ Gross Calorific Value มีค่าเท่ากับ 10,377 cal/g
3. อุณหภูมิของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 70 °C
4. ความเร็วการฟ่นน้ำมัน มีค่าเท่ากับ 10.46 m/s และ 9.02 m/s สำหรับหัวเผาใน heating zone และ soaking zone ตามลำดับ

3.2.1.4.2 ทางออกโดเมน (Outlet)

เงื่อนไขขอบเขตของของไหลที่ไหลออกจากโดเมนกำหนดเป็น Pressure Outlet โดยกำหนดค่าความดันของของไหลที่ทางออกของโดเมนเท่ากับความดันบรรยากาศคือ 101,325 Pa และมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิภายนอกเท่ากับ 35 °C

3.2.1.4.3 ผนังโดเมน (Wall boundaries)

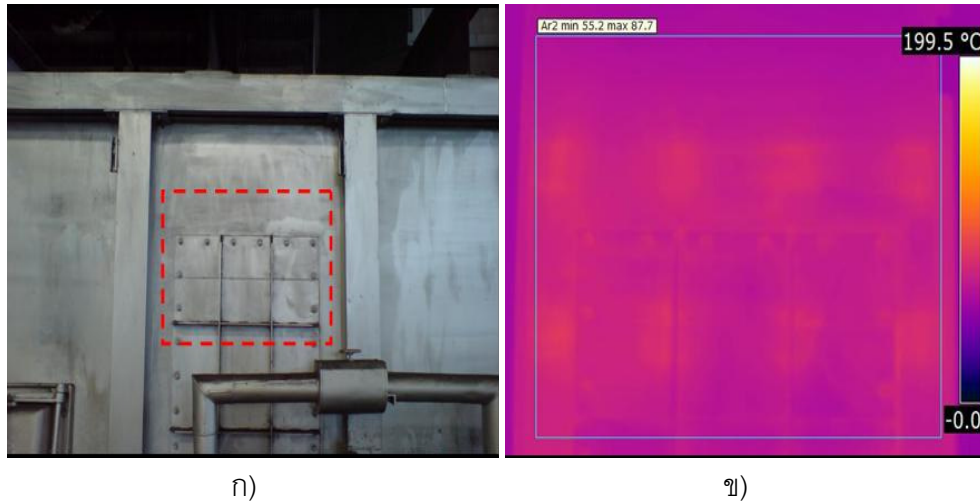
การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของผนังของโดเมนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือผนังด้านข้างและด้านบนของโดเมน และส่วนที่สองคือพื้นของโดเมน การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของผนังในแต่ละด้านมีรายละเอียดดังนี้

ผนังด้านข้างและด้านบนของโดเมน

ผนังเตาด้านข้างและด้านบนของโดเมนได้แก่ผิวด้านในของห้องเผาไหม้ของเตาซึ่งเป็นส่วนประกอบของฉนวนกันความร้อนหรืออิฐทนไฟ โดยขณะที่เตาเผาเหล็กกำลังทำงานในช่วงรีดเหล็กซึ่งกำหนดว่าเตาอยู่ในสภาวะคงที่ (steady state) คืออุณหภูมิภายในเตามีค่าคงที่ โครงสร้างด้านข้างและด้านบนของเตาเผาเหล็กจะดูดซับความร้อนจากก๊าซร้อนและในขณะเดียวกันความร้อนจะเกิดการถ่ายเทออกสู่บรรยากาศภายนอกที่ผิวด้านนอกของเตาเผาเหล็ก ในสภาวะที่เตาเผาเหล็กอยู่ในสภาวะคงที่ปริมาณความร้อนซึ่งดูดซับโดยผิวด้านในจะมีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนที่สูญเสียสู่บรรยากาศภายนอกที่ผิวด้านนอก ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของผนังด้านข้างและด้านบนของโดเมนของงานวิจัยนี้จะกำหนดเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนซึ่งมีค่าเท่ากับฟลักซ์ความร้อนที่สูญเสียออกสู่บรรยากาศที่ผิวด้านนอกของเตาเผาเหล็ก

ขั้นตอนการวัดค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผิวของเตาเผาเหล็กทำได้โดยการวัดค่าอุณหภูมิของพื้นผิวดังกล่าวจากนั้นจึงคำนวณหาค่าฟลักซ์ความร้อนจากสมการคณิตศาสตร์ต่อไป

การวัดอุณหภูมิของผนังด้านนอกของเตาจะใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน หรือ Thermal Camera ในการถ่ายภาพของผนังเตาในแต่ละตำแหน่ง โดยภาพที่ได้จากกล้องถ่ายภาพความร้อนจะแสดงเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดในพื้นที่ที่กล้องถ่ายภาพ ดังตัวอย่างภาพถ่ายในภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ก) พื้นผิวของผนังเตาและ ข) ตัวอย่างภาพถ่ายด้วย Thermal camera ในบริเวณเดียวกัน

ภาพที่ 3.9 ก) แสดงพื้นผิวของผนังเตาด้านนอกที่วัดอุณหภูมิด้วย Thermal camera และภาพที่ 3.9 ข) แสดงภาพถ่ายจาก Thermal camera ซึ่งแสดงอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดในพื้นที่ที่ถูกล้อมรอบด้วยกรอบสี่เหลี่ยมโดยมีค่าเท่ากับ $55.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $87.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ

การคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนเมื่อทราบค่าอุณหภูมิพื้นผิวสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [18]

$$Q = a(T_1 - T_2)^{5/4} + 4.88E \left[\left(\frac{T_1 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (3.2)$$

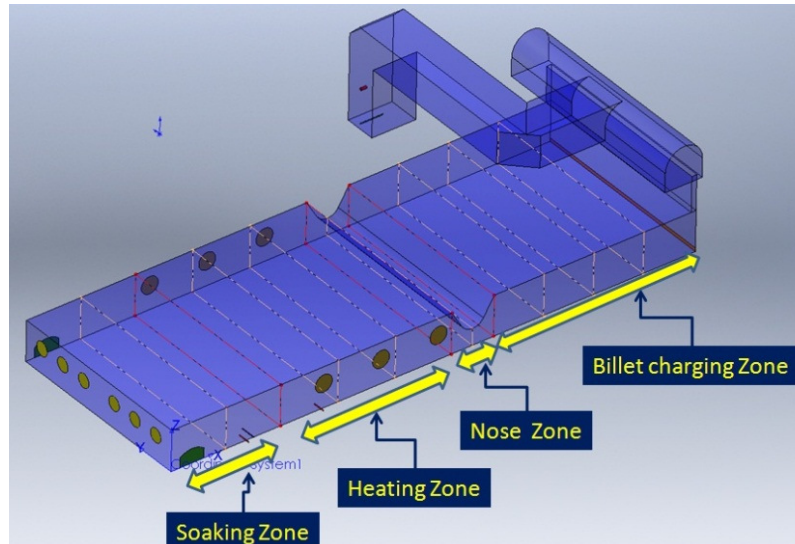
เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนสูญเสียจากผนังเตาหรือ heat flux (w/m^2)

a คือ ค่าคงที่กรณีผนังด้านข้างและด้านบนของเตาเท่ากับ 2.2 และ 2.8 ตามลำดับ

E คือ ค่า emissivity ของวัสดุที่เป็นผนังเตาด้านนอก (Aluminum = 0.83)

T_1 และ T_2 คือ อุณหภูมิของผนังเตาและอุณหภูมิของอากาศรอบๆ เตา ($T_2 = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$)

สำหรับเตาเผาเหล็กซึ่งมีลักษณะยาวและมีอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากัน ดังนั้นการกำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนของผนังเตาจะแบ่งออกเป็น 4 โซนซึ่งมีค่าฟลักซ์ความร้อนแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การแบ่งโซนเตาเผาเหล็กเพื่อกำหนดค่าฟลักซ์ความร้อนที่ผนังด้านข้างและหลังคาเตา

ค่าอุณหภูมิของผนังเตาด้านนอกซึ่งได้จากการวัดด้วย Thermal camera และค่าฟลักซ์ความร้อนของผนังในแต่ละโซนสรุปดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) และฟลักซ์ความร้อน (w/m^2) ของผนังด้านข้างและด้านบน

โซน	ผนังด้านข้าง		ผนังด้านบน	
	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ฟลักซ์ความร้อน (w/m^2)	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ฟลักซ์ความร้อน (w/m^2)
Charging	70	383	70	434
Nose	70	383	70	434
Heating	112	1027	112	1164
Soaking	110	993	110	1125

พื้นของโดเมน

พื้นของโดเมนซึ่งได้แก่พื้นผิวด้านบนของบิลเลทนั้น ในสภาวะที่เตาเผาเหล็กกำลังทำงานอยู่นั้นเหล็กแห่งบิลเลทซึ่งวางเรียงชิดติดกันตลอดแนวความยาวของเตาและมีการเคลื่อนที่เข้าและออกจากเตาอย่างต่อเนื่องจะดูดซับพลังงานความร้อนจากก๊าซร้อนภายในเตาทำให้อุณหภูมิของบิลเลทสูงขึ้น จะเห็นว่าความร้อนที่ไหลออกจากพื้นของโดเมนเป็นความร้อนที่ถูกดูดซับโดยเหล็กแห่งบิลเลทและปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ถูกดูดซับโดยเหล็กแห่งบิลเลทนี้ก็ไม่สามารถจะวัดหรือคำนวณค่าได้ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของพื้นของโดเมนจึงไม่สามารถใช้วิธีการกำหนดเป็นค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูญเสียออกจากผนังเตาด้านนอกเช่นเดียวกับกรณีผนังด้านข้างและด้านบน

ของโดเมนได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของพื้นโดเมนเป็นค่าอุณหภูมิของผิวบิลเลท ซึ่งได้จากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอุณหภูมิของผิวบิลเลทในแต่ละตำแหน่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ [3]

$$\frac{T_s - T_c}{T_d - T_c} = 0.5 + 0.475 \tan^{-1} \left[1.75 \left(2 \frac{z}{L} - 1 \right) \right] \quad (3.3)$$

เมื่อ z คือ ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตา

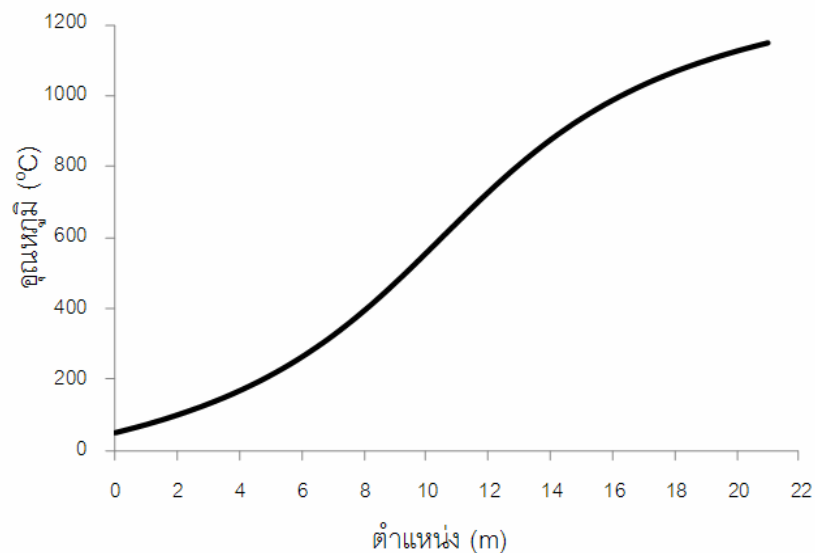
L คือ ความยาวของเตา มีค่าเท่ากับ 21 เมตร

T_s คือ อุณหภูมิผิวบิลเลท ณ ตำแหน่ง z ใดๆ ($^{\circ}\text{C}$)

T_c คือ อุณหภูมิบิลเลทเข้า มีค่าเท่ากับ 50°C

และ T_d คือ อุณหภูมิบิลเลทออก มีค่าเท่ากับ 1150°C

อุณหภูมิของผิวบิลเลท ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณแสดงดังภาพที่ 3.11

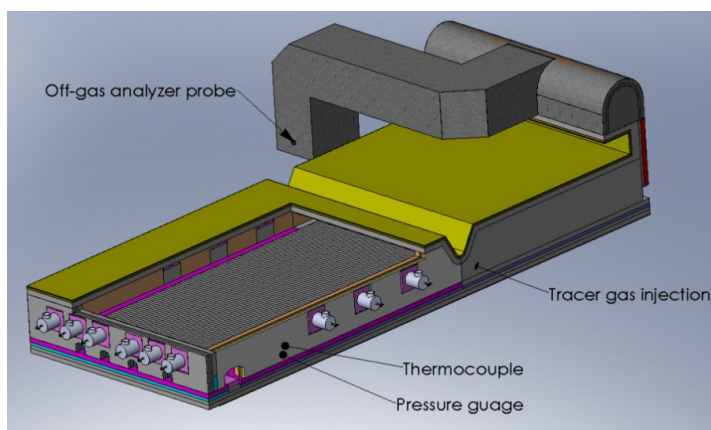


ภาพที่ 3.11 อุณหภูมิของผิวบิลเลท ณ ตำแหน่งต่างๆ ตลอดแนวความยาวของเตาโดยเริ่มวัดจาก ตำแหน่งทางเข้าของบิลเลท (ตำแหน่ง 0 m) จนถึงทางออกของบิลเลท (ตำแหน่ง 21 m)

3.2.1.5 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation)

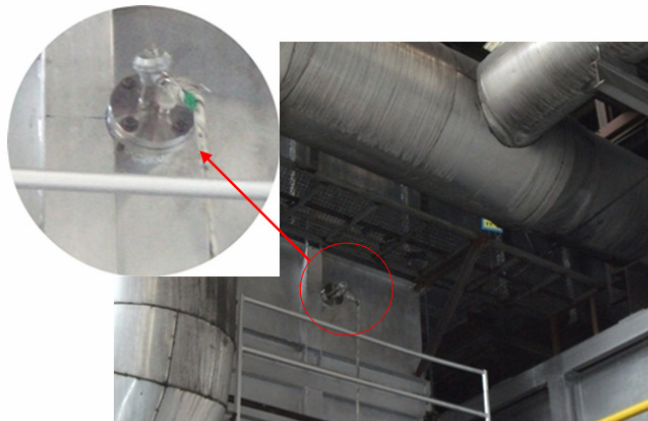
ขั้นตอนการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากการตรวจสอบว่าผลเฉลยที่คำนวณได้จากแบบจำลองนั้นมีความถูกต้องหรือใกล้เคียงกับค่าจริงเพียงใด

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งได้จากการคำนวณ CFD กับค่าที่ได้จากวัดในกระบวนการผลิตจริง เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียได้แก่ระบบวิเคราะห์ก๊าซ (Off-gas analysis system) สำหรับตำแหน่งที่วัดค่าอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่ออกจากเตาคือตำแหน่งที่ก๊าซเสียไหลออกจากเตาทางปล่องก๊าซเสียก่อนที่ก๊าซจะไหลเข้า recuperater หรือ ตำแหน่ง Off-gas analyzer probe ในภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ตำแหน่งการติดตั้ง Off-gas Analysis System

ระบบวิเคราะห์ก๊าซจะประกอบไปด้วยหัววัดก๊าซ ได้แก่ หัววัดอุณหภูมิ (Temperature probe) สำหรับวัดอุณหภูมิของก๊าซเสีย และหัววัดก๊าซ (Gas sampling probe) สำหรับวัดส่วนผสมของก๊าซ ดังภาพที่ 3.13 หัววัดทั้งสองจะสุ่มตัวอย่างก๊าซเสียจากกระบวนการผลิตทุกๆ 20 วินาที จากนั้นตัวอย่างของก๊าซเสียจะไหลผ่านท่อซึ่งทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์ส่วนผสมของก๊าซหรือเครื่อง Mass Spectrometer รุ่น Prima δ B ดังแสดงในภาพที่ 3.14 เครื่อง Mass spectrometer จะวิเคราะห์ส่วนผสมของก๊าซเป็นร้อยละโดยปริมาตร (% vol.) จากนั้นข้อมูลที่ได้ทำการวิเคราะห์จะถูกจัดเก็บและรายงานผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์



ภาพที่ 3.13 การติดตั้งหัว Off-gas analyzer probe เพื่อวัดส่วนผสมและอุณหภูมิของก๊าซเสีย

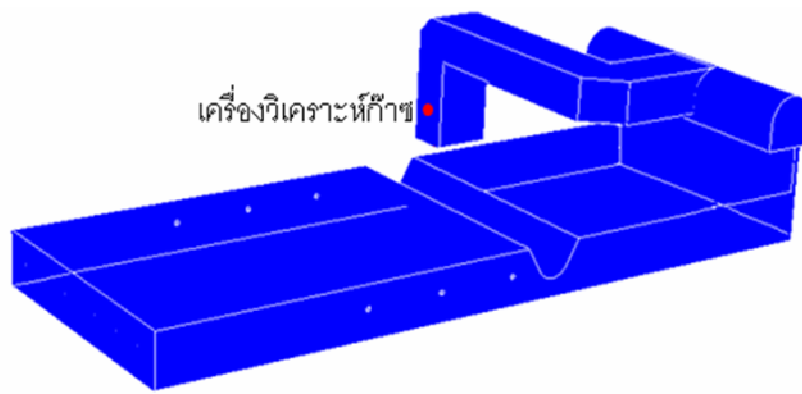


ภาพที่ 3.14 เครื่อง Mass Spectrometer รุ่น Prima 8B

ในงานวิจัยนี้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซจะวัดอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) น้ำ (H_2O) และออกซิเจน (O_2) โดยในกระบวนการผลิตจริงค่าของอุณหภูมิและส่วนผสมต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นเครื่องวิเคราะห์ก๊าซจะวัดอย่างต่อเนื่องเพื่อนำค่าต่ำสุด สูงสุด และค่าเฉลี่ยที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่สามารถคำนวณได้จากแบบจำลอง CFD เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลองต่อไป

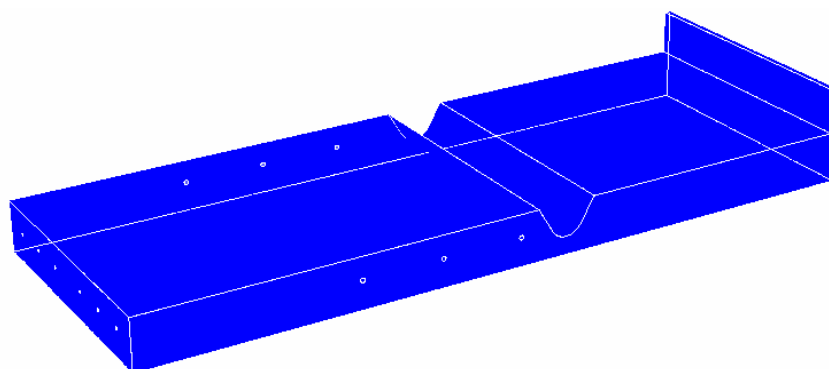
3.3 การศึกษาผลของการตัดปล่องก๊าซเสีย (Fume duct)

ในขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองจำเป็นต้องสร้างแบบจำลองของปริมาณอากาศของห้องเผาไหม้รวมถึงปริมาณอากาศของปล่องก๊าซเสียและ Fume Duct ดังแสดงในภาพที่ 3.15 ทั้งนี้ก็เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ผลจากการคำนวณ CFD ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งระบบวิเคราะห์ก๊าซเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ ณ ตำแหน่งดังกล่าว เพื่อเป็นการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น



ภาพที่ 3.15 ปริมาตรควบคุมมีปล่องก๊าซเสีย

ภายหลังจากการพัฒนาแบบจำลองและประเมินความถูกต้องของแบบจำลองเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงสร้างแบบจำลองเฉพาะปริมาณของอากาศภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กเท่านั้น นั่นคือตัดปริมาณของปล่องก๊าซเสียและ Fume duct ออกไป ดังปริมาตรควบคุมในภาพที่ 3.16 จุดประสงค์เพื่อลดปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ CFD ซึ่งจะช่วยระยะเวลาในการคำนวณของแบบจำลอง



ภาพที่ 3.16 ปริมาตรควบคุมที่ไม่มีปล่องก๊าซเสีย

ในการสร้างแบบจำลองของปริมาตรควบคุมที่ไม่มีปล่องก๊าซเสีย จะเลือกแบบจำลองย่อย และกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ เช่นเดียวกับแบบจำลองของปริมาตรควบคุมแบบที่มีปล่องก๊าซเสียทุกประการ และในการสร้างเอลิเมนต์ก็จะถูกควบคุมให้มีขนาดคงที่เช่นเดียวกัน การตัดปริมาตรของปล่องก๊าซเสียและ Fume duct ทำให้จำนวนเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุมลดลงจาก 1,953,910 เอลิเมนต์ เป็น 1,448,692 เอลิเมนต์

ผลการคำนวณ CFD ของปริมาตรควบคุมที่ไม่มีปล่องก๊าซเสียและ Fume duct จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ CFD ของปริมาตรควบคุมที่มีปล่องก๊าซเสียและ Fume duct เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองอีกครั้งหนึ่ง

3.4 การศึกษาผลของขนาดเอลิเมนต์

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาและยืนยันผลของขนาดเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุม เพื่อหาขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมที่ไม่ทำให้ผลการคำนวณ CFD มีความคลาดเคลื่อน

การศึกษาค่าผลของขนาดเอลิเมนต์จะเริ่มจากการใช้ขนาดเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นก่อนหน้านี้เป็นขนาดมาตรฐาน แล้วจึงแบ่งเอลิเมนต์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น (เมชหยาบ) และเล็กลง (เมชละเอียด) ตามลำดับ สำหรับขนาดของเอลิเมนต์และจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดที่ศึกษาแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการคำนวณ CFD

	ขนาดเอลิเมนต์ (mm)		จำนวนเอลิเมนต์
	Hexahedral	Tetrahedral	
เมชหยาบ	20	80	1,000,092
เมชปกติ	20	120	1,448,692
เมชละเอียด	20	140	1,723,323

โดยผลการคำนวณ CFD ของแบบจำลองทั้งสามกรณี ถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

บทที่ 4

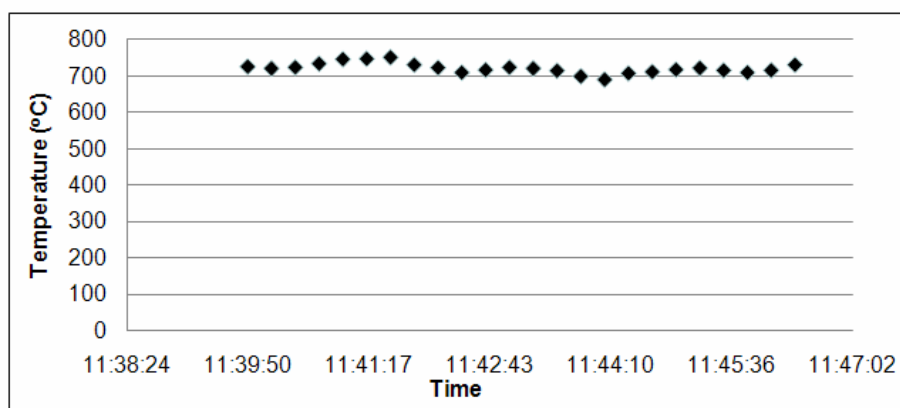
แบบจำลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะอธิบายผลของการพัฒนาแบบจำลองโดยเริ่มจากการประเมินความถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริงในกระบวนการผลิตจากโรงงาน เมื่อได้แบบจำลองที่ยอมรับได้ว่าเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องสามารถคำนวณได้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงจึงใช้ผลที่สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองดังกล่าวมาอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเตา อาทิเช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง การถ่ายเทความร้อน การไหลของก๊าซร้อน เป็นต้น ภายใต้สภาวะการทำงานจริงของเตาในปัจจุบัน เพื่อทำความเข้าใจสิ่งที่เกิดขึ้นและใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นก่อนการทดลองปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตในขั้นต่อไป

4.1 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation)

การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองคือการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการวัดค่าจริง ในงานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่ออกจากเตา

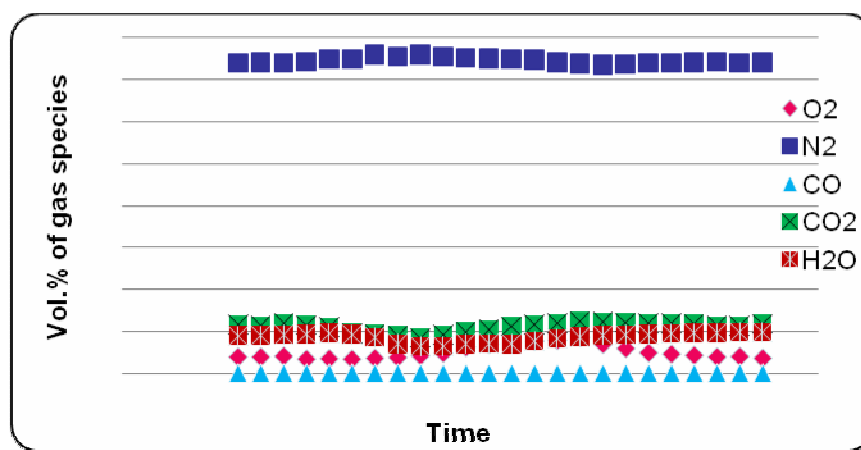
อุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียจากการเผาไหม้สามารถวัดได้ด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ โดยตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิและส่วนผสมดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.1 ตัวอย่างผลการวัดอุณหภูมิของก๊าซเสีย

จากภาพที่ 4.1 ซึ่งแสดงตัวอย่างของผลการวัดอุณหภูมิของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้เป็นช่วงเวลาประมาณ 7 นาที จะเห็นว่าอุณหภูมิของก๊าซเสียที่วัดได้มีค่าการแกว่งตัวขึ้นลงอยู่ในช่วงที่

ไม่กว้างมากตลอดระยะเวลาที่ทำการวัดค่าโดยมีค่าอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 750 °C ค่าอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับ 690 °C ในขณะที่ตัวอย่างผลการวัดค่าส่วนผสมของก๊าซเสีย ได้แก่ O₂, N₂, CO₂, CO, และ H₂O ในภาพที่ 4.2 พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับผลการวัดอุณหภูมิของก๊าซเสียคือจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตลอดเวลาเช่นกันคือปริมาณส่วนผสมของก๊าซ O₂, N₂, CO₂, CO และ H₂O จะมีค่าอยู่ในช่วง 3.5-8.6%, 73.5-76.0%, 8.4-12.4%, 0.001-0.004% และ 6.5-9.6% ตามลำดับสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา นั้นอาจเกิดขึ้นได้จากการวัดค่าด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์จะทำการวัดอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสีย ณ จุดเดียวกัน ซึ่งก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงภายในเตาและเกิดการถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนต่างๆ ของเตามีอุณหภูมิและส่วนผสมที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อก๊าซร้อนที่อุณหภูมิและส่วนผสมต่างกัันดังกล่าวไหลผ่านจุดที่มีการติดตั้งหัววัดค่าอุณหภูมิและส่วนผสมที่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์วัดได้จึงมีค่าไม่คงที่และมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ตลอดเวลา



ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างผลการวัดส่วนผสมของก๊าซเสีย

ดังนั้นในการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิและส่วนผสมทางเคมีของก๊าซเสียที่ได้จากการคำนวณ CFD และจากการวัดค่าจริงด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์เพื่อประเมินความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาทั้งค่าต่ำสุด สูงสุด และค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ โดยค่าจากการคำนวณ CFD ซึ่งควรจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ แต่ในกรณีที่คลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ย ค่าที่คำนวณได้ก็ไม่ควรสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง จึงจะสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถคำนวณผลและทำนายปรากฏการณ์ต่างๆ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่ได้จากการคำนวณ CFD กับจากการวัดค่าจริง ด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์

	อุณหภูมิ (°C)	ส่วนผสมของก๊าซเสีย (vol %)				
		O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
ผลการคำนวณ CFD						
	730	4.3	75.5	0.04 ppm	11.3	8.9
ผลการวัดค่าจริง						
สูงสุด	750	8.6	76.0	4000 ppm	12.4	9.6
เฉลี่ย	720	5.1	74.6	2500 ppm	11.1	8.6
ต่ำสุด	690	3.5	73.5	1000 ppm	8.4	6.5

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าของอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่บริเวณปล่องทางออกของก๊าซเสีย ณ ตำแหน่งที่มีการติดตั้งเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ไว้ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ได้จากการคำนวณ CFD ซึ่งมีค่าเท่ากับ 730 °C กับค่าของอุณหภูมิที่วัดค่าจริงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 720 °C และมีค่าสูงสุด ต่ำสุดเท่ากับ 750 °C และ 690 °C ตามลำดับ พบว่าผลของอุณหภูมิจากการคำนวณ CFD มีค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดจริง 10 °C แต่ค่าที่คำนวณได้ดังกล่าวยังมีค่าไม่เกินค่าสูงสุดของค่าที่วัดจริง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าค่าอุณหภูมิของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งได้จากการคำนวณ CFD มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง

นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าส่วนผสมของก๊าซเสียที่ได้จากการคำนวณ CFD และค่าที่วัดได้จริงพบว่าปริมาณส่วนผสมของก๊าซต่างๆ ในก๊าซเสียไม่ว่าจะเป็น O₂ N₂ CO₂ และ H₂O ทุกชนิดมีค่าจากการคำนวณ CFD แตกต่างกับค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้จริงเพียงเล็กน้อย คือ O₂ มีค่าจากการคำนวณเท่ากับ 4.3% ค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจริงเท่ากับ 5.1% N₂ มีค่าจากการคำนวณเท่ากับ 75.5% ค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจริงเท่ากับ 74.6% CO₂ มีค่าจากการคำนวณเท่ากับ 11.3% ค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจริงเท่ากับ 11.1% และ H₂O มีค่าจากการคำนวณเท่ากับ 8.9% ค่าเฉลี่ยของการวัดค่าจริงเท่ากับ 8.6% แต่ค่าจากการคำนวณ CFD ของส่วนผสมของก๊าซดังกล่าวยังคงมีค่าอยู่ในช่วงไม่เกินค่าสูงสุดและไม่ต่ำกว่าค่าต่ำสุดของค่าที่วัดได้จริง ดังนั้นการคำนวณ CFD ของก๊าซ O₂ N₂ CO₂ และ H₂O จึงถือว่ามีค่าความถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับค่าจริง

สำหรับส่วนผสมของก๊าซ CO ซึ่งถือว่ามีค่าจากการคำนวณ CFD แตกต่างกับค่าที่วัดได้จริงเป็นอย่างมากนั่นคือ ค่าปริมาณ CO จากการคำนวณ CFD มีค่าเท่ากับ 0.04 ppm ในขณะที่ค่าปริมาณ CO ที่ได้จากการวัดค่าจริงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,000 ppm และค่าที่คำนวณได้ยังมีค่าต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่วัดได้จริงด้วย สาเหตุที่ทำให้ค่าของ CO จากการคำนวณ CFD มีค่าต่ำกว่าค่าที่วัด

ได้จริงเป็นอย่างมากนั้น เนื่องจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการคำนวณ CFD เพื่อทำนายการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กนี้เป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เพื่อลดความยุ่งยากและความซับซ้อนของปัญหา จึงกำหนดให้แบบจำลองของการเผาไหม้เป็นการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุล (Equilibrium chemistry) คือการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะเป็นการเปลี่ยนแปลงจากสารตั้งต้นซึ่งได้แก่น้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศไปสู่สารผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลลัพธ์ของก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาเผาไหม้เชื้อเพลิงจากการคำนวณ CFD จึงเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาเท่านั้น ได้แก่ O_2 ส่วนเกินหรือออกซิเจนที่เหลือจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง N_2 , H_2O และ CO_2 เท่านั้น จากผลการคำนวณ CFD จึงไม่มีก๊าซ CO เกิดขึ้นหรือมีน้อยมากคือเท่ากับ 0.004 ppm เท่านั้น

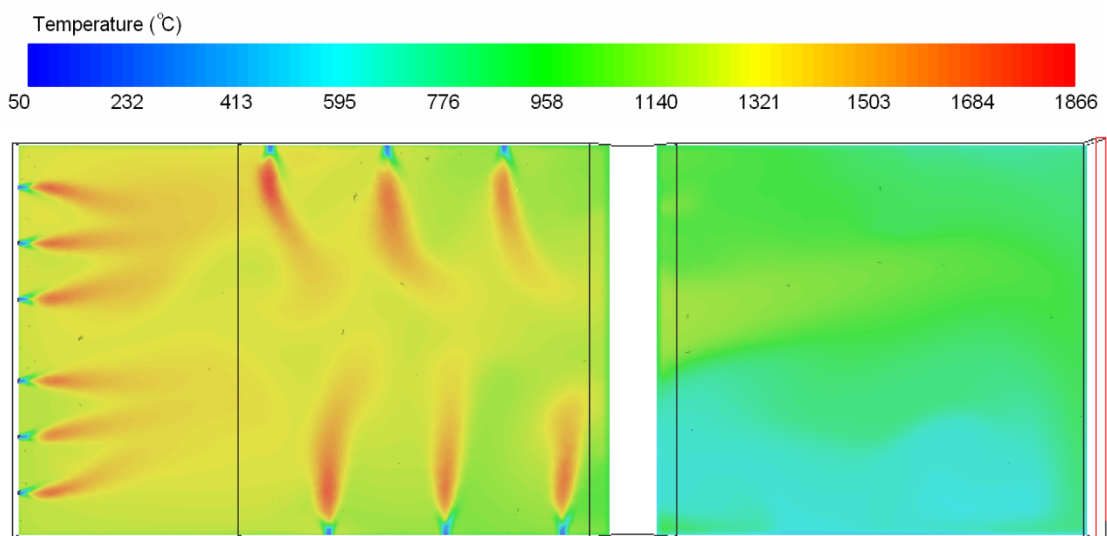
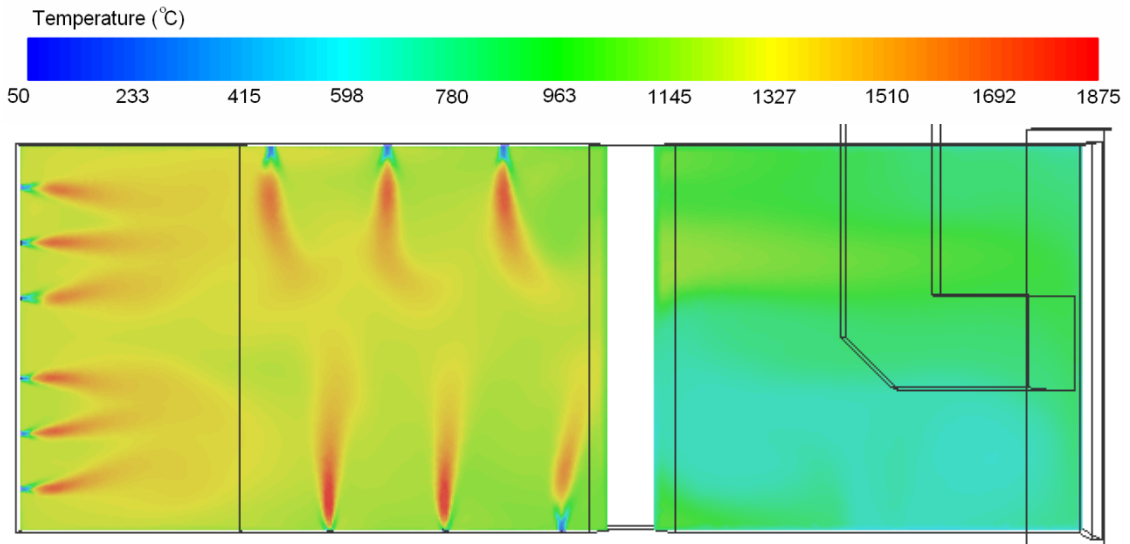
จากผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณ CFD และผลการวัดค่าจริงทั้งในแง่ของอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดขึ้นและแบบจำลองย่อยของการเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อน และการไหลของของที่เลือกใช้ในการคำนวณสามารถอธิบายการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาได้จริง

4.2 ผลการตัดปล่องก๊าซเสีย (Fume Duct)

การสร้างแบบจำลองจึงคำนวณเฉพาะปริมาตรภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็ก ซึ่งตัดปริมาตรของปล่องก๊าซเสียออก โดยการแบ่งเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุมที่ไม่มีปล่องก๊าซเสียจะใช้เอลิเมนต์ชนิดเดียวกับการแบ่งเอลิเมนต์ของปริมาตรที่มีปล่องก๊าซเสีย จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดลดลงจาก 1,953,910 เอลิเมนต์ เป็น 1,448,692 เอลิเมนต์ ระยะเวลาในการคำนวณลดลงจากประมาณ 48 ชั่วโมง เหลือเพียงประมาณ 30 ชั่วโมงเท่านั้น

ผลการคำนวณ CFD ของการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของปริมาตรควบคุมที่ไม่มีปล่องก๊าซเสียเปรียบเทียบกับแบบจำลองของปริมาตรควบคุมที่มีปล่องก๊าซเสียแสดงดังภาพที่ 4.3 โดยรูป 4.3 ก) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้บนระนาบซึ่งตัดผ่านหัวเผาของแบบจำลองที่คำนวณปริมาตรของปล่องก๊าซเสีย และรูป 4.3 ข) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้บนระนาบซึ่งตัดผ่านหัวเผาของแบบจำลองที่ไม่คำนวณปริมาตรของปล่องก๊าซเสีย ตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิของก๊าซบนระนาบดังกล่าวมีลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยทั่วไปที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของทั้งสองกรณีที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน อุณหภูมิของก๊าซภายใน heating zone และ soaking zone จะมีอุณหภูมิสูงและมีอุณหภูมิต่ำใน preheating zone เช่นเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดหรืออุณหภูมิต่ำของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้และอุณหภูมิเฉลี่ยของ

ก๊าซภายในเตาของแบบจำลองทั้งสองกรณีพบว่าอุณหภูมิเปลวไฟของแบบจำลองที่คำนวณปริมาณปล่องก๊าซเสียมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยคือเท่ากับ 1875 °C และ 1866 °C ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซภายในเตามีค่าต่ำกว่าคือแบบจำลองที่คำนวณปริมาณปล่องก๊าซเสียและไม่คำนวณปริมาณปล่องก๊าซเสียมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 1081 °C และ 1088 °C ตามลำดับ



ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านหัวเผากรณี ก) มีปล่องก๊าซเสีย ข) ไม่มีปล่องก๊าซเสีย

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ ณ ตำแหน่งเดียวกันคือบริเวณปล่องก๊าซเสียที่ออกจากห้องเผาไหม้ พบว่าอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากเตา

ที่สามารถคำนวณได้จากแบบจำลองของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกันมากคือมีค่าเท่ากับ 832 °C และ 836 °C ตามลำดับ ในขณะที่ส่วนผสมของก๊าซเสีย ได้แก่ O₂, N₂, CO₂, CO และ H₂O ณ ตำแหน่งดังกล่าวก็มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้กรณีมีปล่องก๊าซเสียและไม่มีปล่องก๊าซเสีย

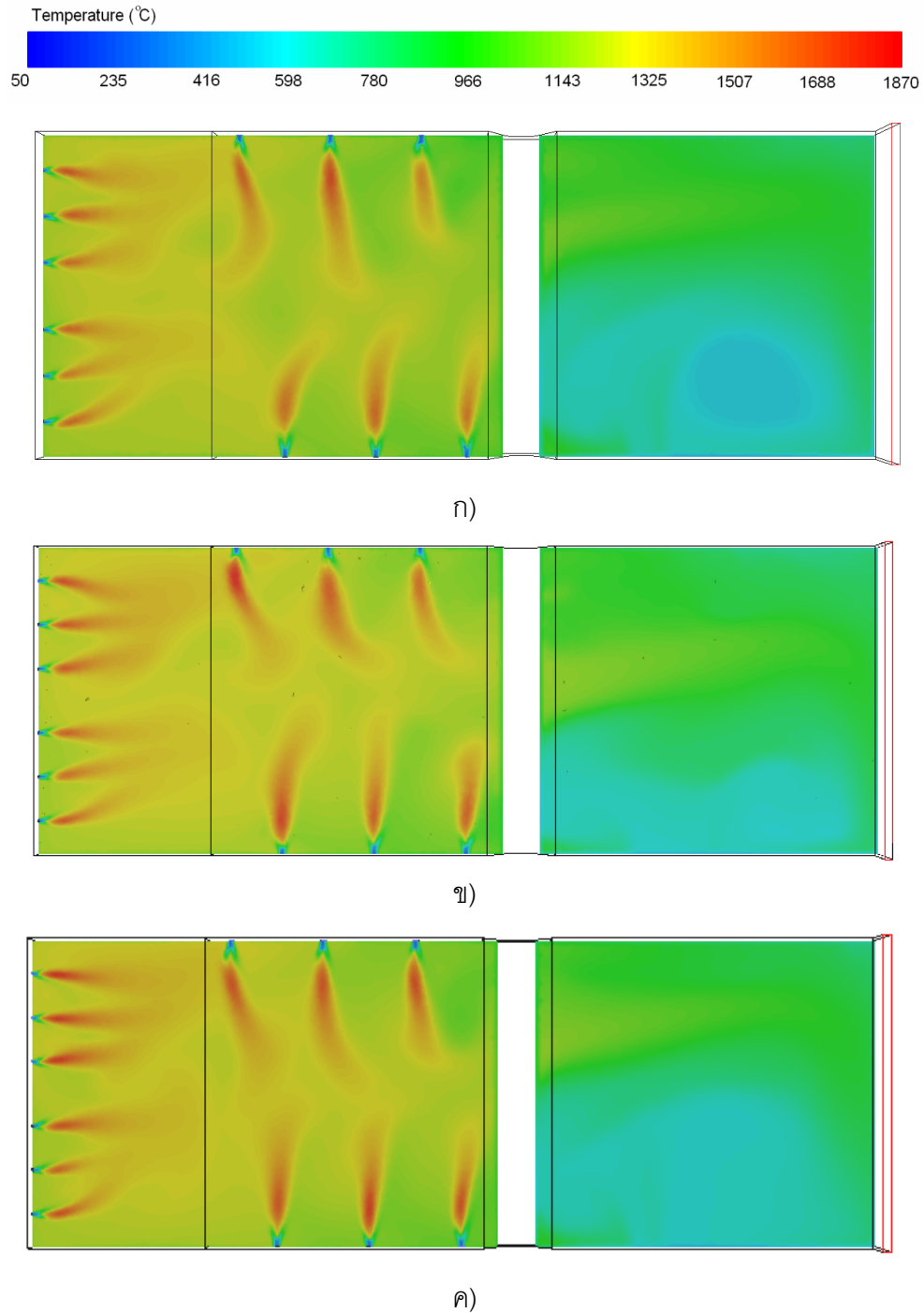
	อุณหภูมิ (°C)	ส่วนผสมของก๊าซเสีย (wt %)				
		O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
มีปล่องก๊าซเสีย	832	4.31	75.53	0.04 ppm	11.16	8.91
ไม่มีปล่องก๊าซเสีย	836	4.22	75.46	0.04 ppm	11.25	8.97

จากการเปรียบเทียบผลการคำนวณ CFD ของแบบจำลองที่คำนวณปริมาตรปล่องก๊าซเสียและไม่มีคำนวณปริมาตรปล่องก๊าซเสียพบว่าทั้งสองกรณีทั้งในแง่ของลักษณะเปลวไฟ การกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ อุณหภูมิของก๊าซเสียและส่วนผสมของก๊าซเสียสามารถสรุปได้ว่าการคำนวณ CFD ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดยในการสร้างแบบจำลองในกรณีที่ไม่มีคำนวณปริมาตรปล่องก๊าซเสียนั้นสามารถลดจำนวนเอลิเมนต์ลงได้ถึง 505,218 เมช ทำให้ใช้เวลาในการคำนวณของแบบจำลองลดลงได้อย่างมาก ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองของเตาเผาเหล็กทั้งกรณีของการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค Oxygen enriched Combustion (OEC) จะทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้ปริมาตรควบคุมที่ไม่มีปล่องก๊าซเสียเพื่อลดระยะเวลาในการคำนวณแต่ให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องแม่นยำเช่นเดิม

4.3 ผลของความละเอียดของขนาดเมช

การศึกษาผลของขนาดเมชซึ่งเป็นเมชแบบ Tetrahedral ซึ่งมีระดับความละเอียดของเมช 3 ระดับ คือ จำนวนเมชเท่ากับ 1,000,092 1,448,692 และ 1,723,323 หรือแบ่งตามระดับความละเอียดของเมชคือ เมชหยาบ เมชปกติ และเมชละเอียด ตามลำดับ การประเมินผลของความละเอียดของเมชต่อผลจากการคำนวณ CFD ของเมชทั้งสามแบบ คือทำการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ซึ่งทำให้เห็นถึงความแตกต่างของลักษณะเปลวไฟ อุณหภูมิของเปลวไฟและอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ได้ ดังภาพที่ 4.4 ซึ่งแสดงลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผา การเปรียบเทียบผลของการคำนวณ CFD ของทั้งสามกรณีจะทำการ

เปรียบเทียบบนช่วงอุณหภูมิเดียวกันคือช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 – 1870 °C ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นถึงความแตกต่างของการกระจายตัวของอุณหภูมิของทั้งสามกรณีได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.4 อุณหภูมิของก๊าซร้อนภายในเตาบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผากรณีจำนวนเมช เท่ากับ ก) 1,000,092 ข) 1,448,692 และ ค) 1,723,323

ภาพที่ 4.4 ก) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซบนระนาบแนวนอนซึ่งตัดผ่านหัวเผาสำหรับกรณีเมชหยาบ โดยผลการคำนวณ CFD สามารถคำนวณได้อุณหภูมิสูงสุดภายในห้องเผาไหม้เท่ากับ 1782 °C ซึ่งก็คืออุณหภูมิของเปลวไฟนั่นเอง ในขณะที่ภาพที่ 4.4 ข) และภาพที่ 4.4 ค) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิมบนระนาบแนวนอนซึ่งตัดหัวเผากรณีเมชปกติและเมชละเอียด ผลการคำนวณ CFD สามารถคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากับ 1866 °C และ 1870 °C ตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิเปลวไฟซึ่งได้จากการคำนวณ CFD ของกรณีเมชหยาบมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเปลวไฟของกรณีเมชปกติและเมชละเอียดค่อนข้างมาก คือต่ำกว่ากรณีเมชปกติและเมชละเอียดเท่ากับ 84 °C และ 88 °C ตามลำดับ ในขณะที่กรณีเมชปกติและเมชละเอียดมีอุณหภูมิเปลวไฟที่ใกล้เคียงกันคือมีค่าต่างกันเพียง 4 °C เท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลการคำนวณ CFD ของกรณีเมชปกติและกรณีเมชละเอียดสามารถคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟได้อย่างถูกต้องทั้งสองกรณี และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ในบริเวณอื่นๆ พบว่า ภายใน Heating zone และ Soaking zone ของห้องเผาไหม้ซึ่งมีการติดตั้งหัวเผาไว้สำหรับเป็นแหล่งพลังงานความร้อนของเตาเผา นั้น การกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซโดยรอบเปลวไฟซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนมาจากเปลวไฟของทั้งสามกรณีมีความแตกต่างของอุณหภูมิของก๊าซในทุกๆ ตำแหน่งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยทั้งสามกรณียังคงมีอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซภายใน Heating zone และ Soaking zone อยู่ในระดับที่สูงกว่า 1000 °C เช่นเดียวกัน ในขณะที่การกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซใน preheating zone มีความแตกต่างที่สามารถเห็นได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ก) ซึ่งเห็นว่าในกรณีของเมชหยาบผลการคำนวณด้วย CFD นั้น จะมีบางบริเวณที่ก๊าซมีอุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C (พื้นที่สีฟ้าลักษณะเป็นวงกลมบริเวณมุมล่างขวาของรูป) แต่สำหรับกรณีของเมชปกติและเมชละเอียดไม่ปรากฏบริเวณของก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C แต่อย่างใด

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้กรณีจำนวนเมชเท่ากับ 1,000,092 1,448,692 และ 1,723,323

จำนวนเมช	อุณหภูมิ (°C)	ส่วนผสมของก๊าซเสีย (wt %)				
		O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
1,000,092	798	4.51	75.51	0.02 ppm	11.06	8.92
1,448,692	836	4.22	75.46	0.04 ppm	11.25	8.97
1,723,323	832	4.26	75.55	0.02 ppm	11.17	8.91

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิและส่วนผสมทางเคมีของก๊าซเสียที่ออกจากเตา โดยจะเห็นว่าส่วนผสมของก๊าซเสียของทั้งสามกรณีมีค่าของส่วนผสมทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าจำนวนเมฆทั้งสามระดับ (หยาบ ปกติ และละเอียด) สามารถคำนวณค่าของส่วนผสมของก๊าซจากการเผาไหม้ได้อย่างถูกต้อง

จากผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิเปลวไฟและการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซบนระนาบหัวเผาดังกล่าวจะเห็นว่ากรณีเมฆหยาบนั้น การคำนวณ CFD ให้ผลที่แตกต่างจากผลการคำนวณของกรณีเมฆปกติและเมฆละเอียดเป็นอย่างมาก ดังนั้นในแง่ของการคำนวณอุณหภูมิของการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนของก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้นั้นจึงควรแบ่งเอลิเมนต์ให้มีความละเอียดอย่างน้อย 1,448,692 เมฆ ซึ่งความละเอียดของเมฆจะไม่ส่งผลกระทบต่อผลการคำนวณในแง่ของอุณหภูมิอีกต่อไป

จากผลการศึกษาผลของการตัดปล่องก๊าซเสียโดยไม่คำนวณปริมาตรของปล่องก๊าซเสียและความละเอียดของเอลิเมนต์ โดยวิเคราะห์ลักษณะของเปลวไฟ การกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ และวิเคราะห์ก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการสร้างแบบจำลองของการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาเหล็กนี้ จะทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้ปริมาตรควบคุมที่ตัดปล่องก๊าซเสียและแบ่งเอลิเมนต์ของปริมาตรควบคุมให้มีความละเอียดระดับ 1,448,692 เมฆ ซึ่งผลการคำนวณอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้และอุณหภูมิและส่วนผสมของก๊าซเสียจากการเผาไหม้ได้อย่างถูกต้องแม่นยำโดยไม่เสียเวลาในการคำนวณมากนัก

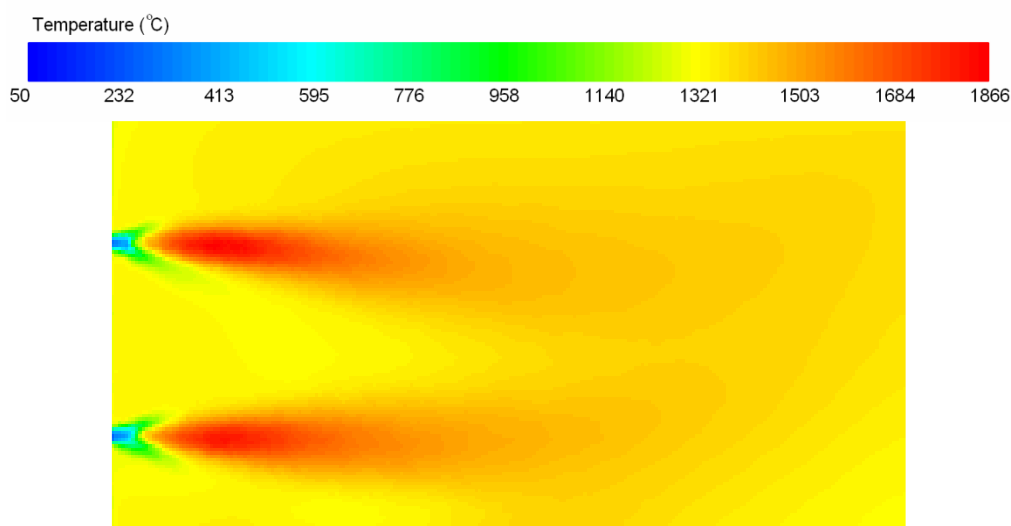
4.4 วิเคราะห์กระบวนการผลิต ณ ปัจจุบัน (การเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ (21% O₂))

4.4.1 การเผาไหม้ของเตา

การเผาไหม้เชื้อเพลิงของเตาเผาเหล็กนี้ใช้เชื้อเพลิงชนิดเหลวหรือน้ำมันเตาทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศปกติโดยอุ่นน้ำมันและอากาศให้ร้อน (preheated oil และ preheated air) ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 260 °C ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนอากาศเผาไหม้ต่อเชื้อเพลิง (Air/fuel ratio) เท่ากับ 11.5 อุณหภูมิเปลวไฟแอดิแบติก (Adiabatic Flame Temperature) ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงสามารถคำนวณได้โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์คือเอนทัลปีของสารตั้งต้นที่ความดันคงที่หรือผลรวมของเอนทัลปีของการก่อตัว (standard enthalpy of formation) ของทุกองค์ประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิงและอากาศเผาไหม้มีค่าเท่ากับเอนทัลปีของสารผลิตภัณฑ์ที่สภาวะสมดุลเคมีและความดันคงที่หรือผลรวมของเอนทัลปีของการก่อตัวและเอนทัลปีสัมผัสที่เพิ่มขึ้นของทุกองค์ประกอบในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ [19] หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและความร้อนที่ให้เข้าสู่ระบบทั้งหมดทำให้เกิดเปลวไฟที่มีอุณหภูมิ

สูงโดยความร้อนทั้งหมดจะไม่เกิดการถ่ายเทหรือสูญเสียออกจากระบบแต่จะสะสมอยู่ในก๊าซร้อน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้นั่นเอง จากหลักการข้างต้นสามารถคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟ แอเดียบาติกของการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สภาวะการเผาไหม้ ณ ปัจจุบันของทางโรงงานมีค่าเท่ากับ $2,675^{\circ}\text{C}$ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก)

สำหรับเปลวไฟที่เกิดขึ้นในสภาวะการเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กและสามารถคำนวณได้จากแบบจำลองนั้นควรมีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิเปลวไฟแอเดียบาติก เนื่องจากกำหนดให้การคำนวณเปลวไฟเป็นแบบ Non-adiabatic นั่นคือความร้อนจากเปลวไฟจะเกิดการสูญเสียสู่บริเวณโดยรอบ นั่นคือเมื่อพิจารณาเปลวไฟที่ได้จากการคำนวณ CFD จะต้องไม่มีตำแหน่งใด ๆ ที่มีอุณหภูมิของเปลวไฟที่สูงกว่าอุณหภูมิเปลวไฟแอเดียบาติกซึ่งจะสามารถสรุปได้ว่าผลการคำนวณการเผาไหม้เชื้อเพลิงของแบบจำลองมีความถูกต้อง



ภาพที่ 4.5 ลักษณะเปลวไฟที่เกิดจากเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ

ภาพที่ 4.5 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟด้วย CFD จะเห็นว่าที่ตำแหน่งของหัวเผา (พื้นที่สีน้ำเงิน) ซึ่งมีการพ่นอากาศเผาไหม้และน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่เตาเผาเหล็ก โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดเท่ากับอุณหภูมิอุณหภูมิจากอากาศเผาไหม้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 260°C จากนั้นเมื่ออากาศเผาไหม้และเชื้อเพลิงได้ถูกพ่นออกจากหัวเผาเข้าสู่ห้องเผาไหม้และมีสภาวะที่เหมาะสมจึงเกิดการเผาไหม้ขึ้น จากรูปแสดงให้เห็นบริเวณที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นคือพื้นที่สีแดงบริเวณด้านหน้ารูพ่นอากาศ และเชื้อเพลิงของหัวเผา การเผาไหม้ทำให้เกิดเปลวไฟลักษณะยาวพุ่งออกจากหัวเผามีอุณหภูมิสูงสุดหรืออุณหภูมิเปลวไฟเท่ากับ 1866°C จากนั้นความร้อนจากเปลวไฟจะถูกถ่ายเทไปสู่อากาศรอบข้างทำให้บริเวณโดยรอบเปลวไฟมีอุณหภูมิลดต่ำลงมา (พื้นที่สีส้มและสีเหลือง) ตามลำดับ

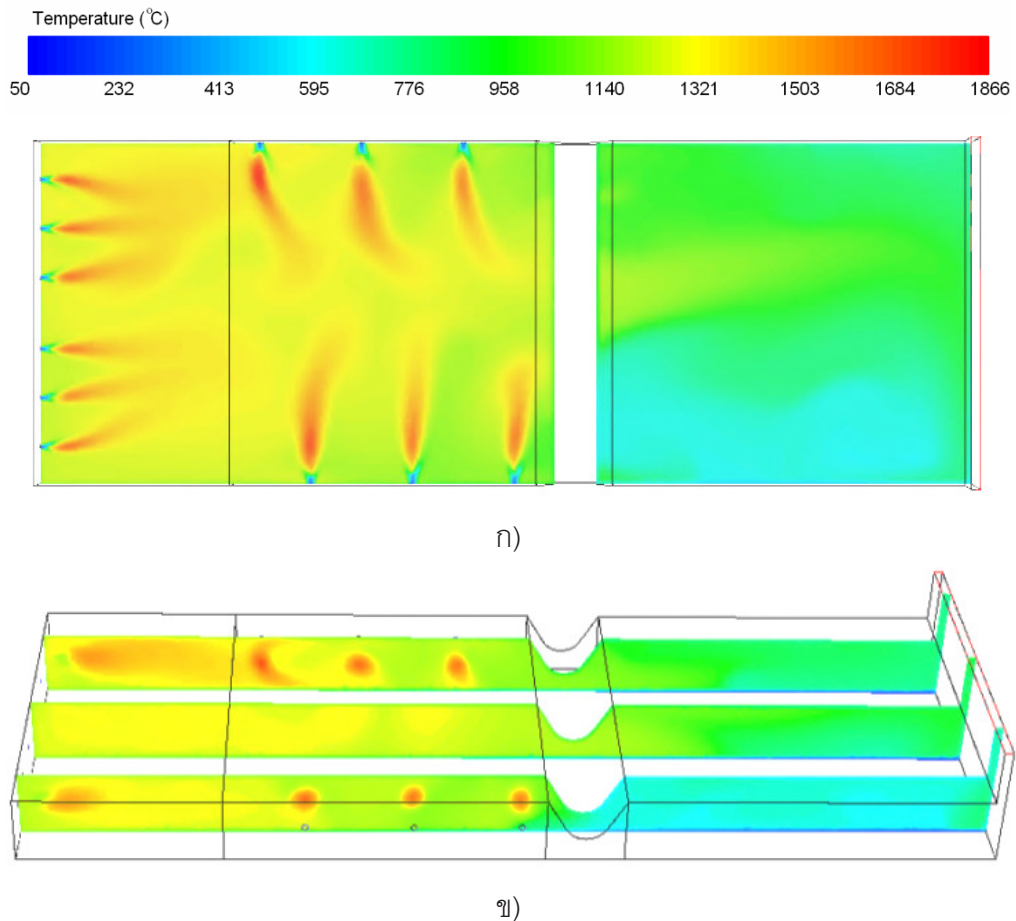
เปรียบเทียบกับอุณหภูมิเปลวไฟแอดเดียบาติกกับอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการคำนวณ CFD จะเห็นว่าอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการคำนวณ CFD มีค่าต่ำกว่าค่อนข้างมากคืออุณหภูมิเปลวไฟจากการคำนวณ CFD เท่ากับ $1866\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิเปลวไฟแอดเดียบาติกเท่ากับ $2675\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทั้งนี้ก็เนื่องจากการในการคำนวณแบบจำลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงของแบบการคำนวณ CFD กำหนดการเผาไหม้เป็นแบบนอนแอดเดียบาติก (Non-adiabatic Combustion) ซึ่งความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะเกิดการสูญเสียไปสู่ภายนอกระบบ นั่นคือความร้อนที่ขึ้นจากปฏิกิริยาเผาไหม้เชื้อเพลิงจะถ่ายเทไปสู่บริเวณโดยรอบเปลวไฟ โดยความร้อนจากเปลวไฟจะถ่ายเทไปสู่ก๊าซโดยรอบเปลวไฟ ซึ่งความร้อนที่สะสมในก๊าซดังกล่าวจะถ่ายเทไปสู่เหล็กแท่งบิลเลทที่วางอยู่บนพื้นเตา และไหลออกนอกเตาเผาทางปล่องก๊าซเสีย นอกจากนี้ความร้อนจากเปลวไฟและความร้อนในก๊าซร้อนยังถ่ายเทไปสู่โครงสร้างของเตาและสูญเสียออกสู่ภายนอกเตาได้อีกด้วย ดังนั้นอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการคำนวณ CFD จึงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเปลวไฟแอดเดียบาติกค่อนข้างมากซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับสิ่งที่ควรจะเป็น

4.4.2 การไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิก๊าซร้อนภายในเตา

การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทำให้เกิดเปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งพลังงานความร้อนหลักของเตาเผาเหล็ก โดยการคำนวณ CFD สามารถแสดงให้เห็นลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กได้

ภาพที่ 4.6 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิของก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ซึ่งได้จากการคำนวณ CFD โดยภาพที่ 4.6 ก) แสดงอุณหภูมิของก๊าซบนระนาบแนวนอนซึ่งตัดผ่านหัวเผาและภาพที่ 4.6 ข) แสดงอุณหภูมิของก๊าซบนระนาบแนวตั้งตามแนวความยาวของเตาที่ระยะต่างๆ จะเห็นว่าเมื่อพิจารณาอุณหภูมิของก๊าซตลอดแนวความยาวของเตาสามารถแบ่งออกได้เป็นสองโซนซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกันคือโซนที่มีอุณหภูมิสูงได้แก่ Soaking zone, heating zone และ nose ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงเกิน $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ และโซนที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ นั่นคือ preheating zone สำหรับโซนที่มีอุณหภูมิสูง (Soaking zone, heating zone และ nose) เนื่องจากในโซนนี้มีการติดตั้งหัวเผาไว้ทั้งหมด 12 ตัว โดยแบ่งเป็น heating zone และ soaking zone โซนละ 6 ตัว ทำให้มีแหล่งพลังงานความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของหัวเผาจำนวนมากภายในโซนนี้ สำหรับการถ่ายเทความร้อนในโซนนี้ซึ่งเป็นการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปสู่ก๊าซโดยรอบเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสี (Radiation heat transfer) เนื่องจากอุณหภูมิของโซนนี้มีค่าสูง (สูงกว่า $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$) การถ่ายเทความร้อนเริ่มต้นจากการแผ่รังสีความร้อนจากเปลวไฟสู่อนุภาคของก๊าซรอบเปลวไฟและจากอนุภาคของก๊าซร้อนรอบเปลวไฟก็จะถ่ายเทไปสู่

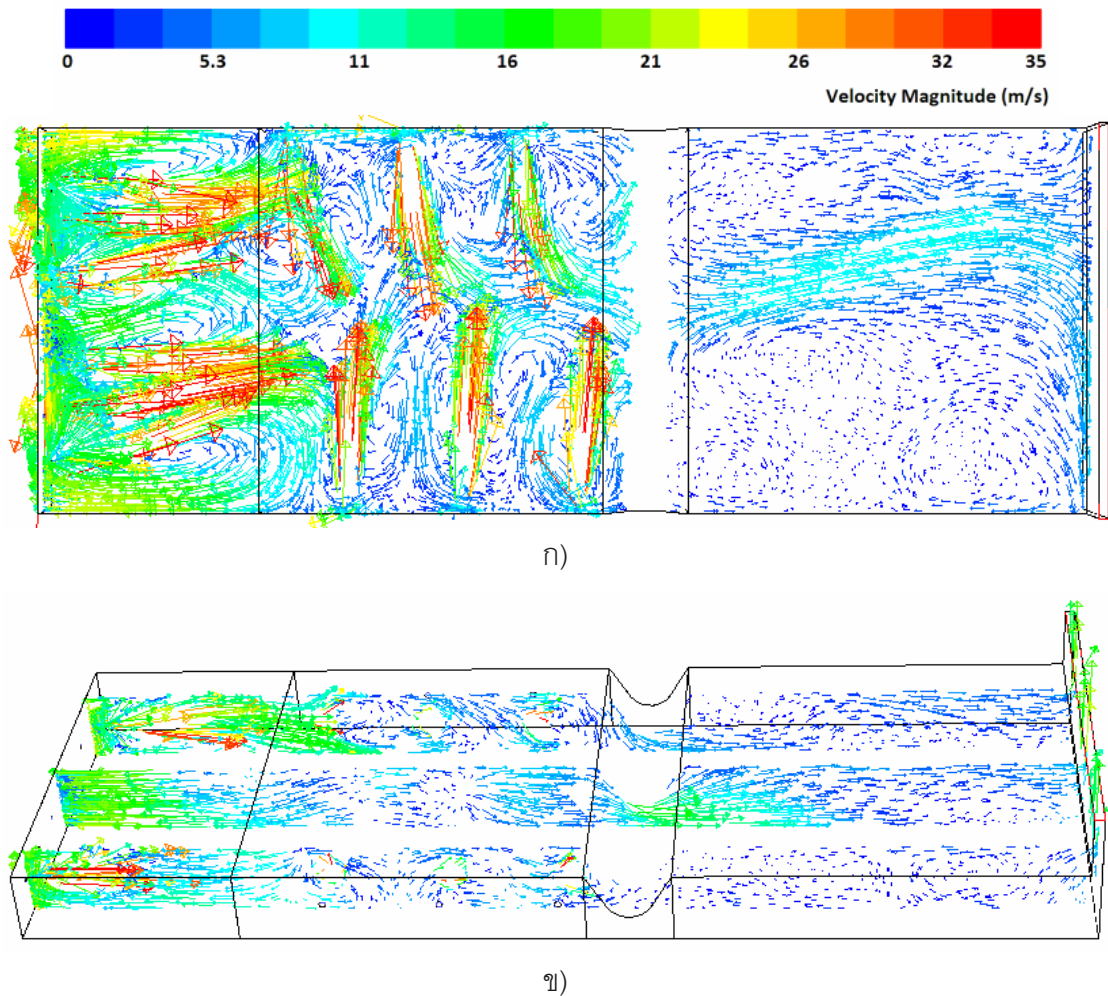
ก๊าซรอบข้างที่อยู่ไกลออกไปอีก ทำให้อุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของ soaking zone และ heating zone มีค่าสูงขึ้น



ภาพที่ 4.6 อุณหภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบ ก) ตัดผ่านหัวเผาและ ข) ตั้งฉากแนวความยาวเตาที่ ระยะ $y = 1.00, 3.83$ และ 6.66 เมตร

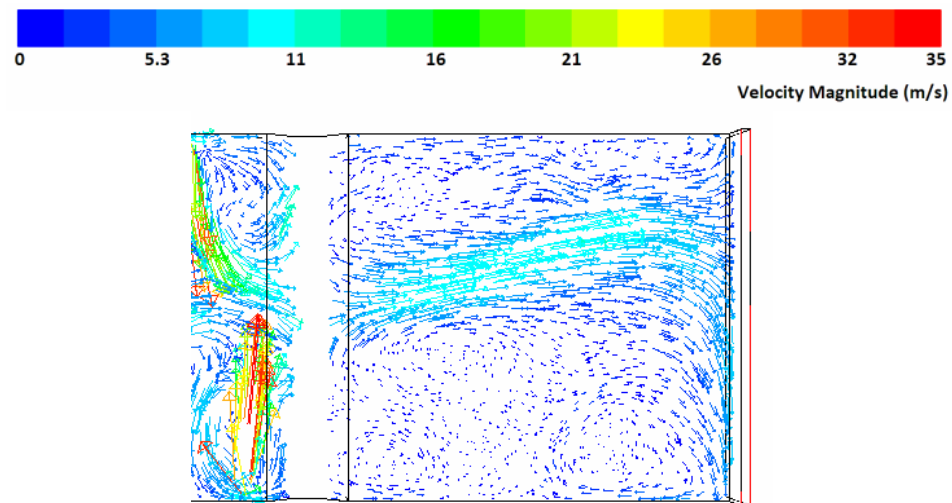
พิจารณาการไหลและความเร็วของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นทิศทางการไหลและความเร็วของการไหลของก๊าซในห้องเผาไหม้ โดยภาพที่ 4.7 ก) เป็นการไหลของก๊าซบนระนาบแนวนอนซึ่งตัดผ่านหัวเผาและภาพที่ 4.7 ข) เป็นการไหลของก๊าซบนระนาบแนวตั้งตามความยาวของเตาที่ระยะต่างๆ พบว่าการไหลของก๊าซในโซนที่มีอุณหภูมิสูง (Soaking zone และ Heating zone) เป็นการไหลที่มีความปั่นป่วนสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้งหัวเผาภายในห้องเผาไหม้ของเตาได้ถูกออกแบบมาให้ติดตั้งในตำแหน่งและทิศทางที่เหมาะสม อีกทั้งการพ่นอากาศเผาไหม้และน้ำมันเชื้อเพลิงของหัวเผาแต่ละตัวยังต้องการให้ได้เปลวไฟที่มีลักษณะยาว ให้ได้เปลวไฟที่สามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่บิลเลทซึ่งวางเรียงกันบนพื้นเตาได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นเตา การไหลอย่างปั่นป่วนของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของ soaking

zone และ heating zone ส่งผลดีต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปสู่ก๊าซรอบข้างคือทำให้ก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ไปยังส่วนต่างๆ และสามารถถ่ายเทความร้อนไปยังก๊าซรอบข้างได้เร็วขึ้นส่งผลให้ขั้นตอนของการให้ความร้อนแก่เตาเพื่อให้เตามีอุณหภูมิมีอุณหภูมิสม่ำเสมอมีอุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่ต้องการ (อุณหภูมิวัดร้อนของเหล็กเท่ากับ $1,150\text{ }^{\circ}\text{C}$) อย่างรวดเร็ว



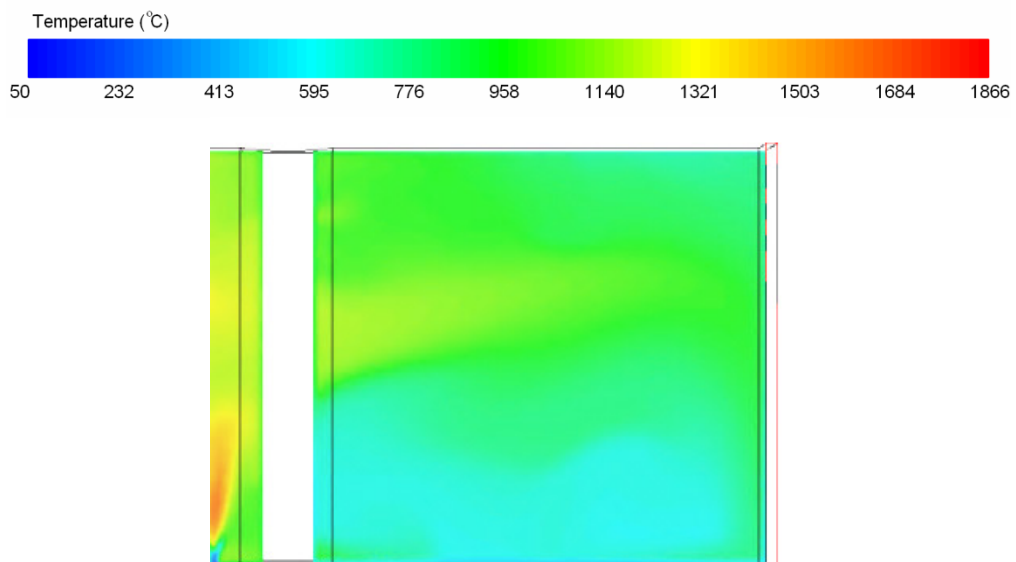
ภาพที่ 4.7 การไหลของก๊าซร้อนบนระนาบ ก) ตัดผ่านหัวเผาและ ข) ตั้งฉากแนวความยาวเตาที่ ระยะ $y = 1.00, 3.83$ และ 6.66 เมตร ใน Soaking zone และ Heating zone

ในขณะที่ Preheating zone ซึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากใน preheating zone ไม่มีการติดตั้งหัวเผาไว้ ก๊าซร้อนจาก soaking zone และ heating zone จะไหลผ่าน nose มายัง preheating zone และไหลออกจากห้องเผาไหม้ทางปล่องก๊าซเสีย nose จะทำให้ก๊าซร้อนที่ไหลผ่านไหลช้าลงและมีทิศทางที่เป็นระเบียบมากขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.8



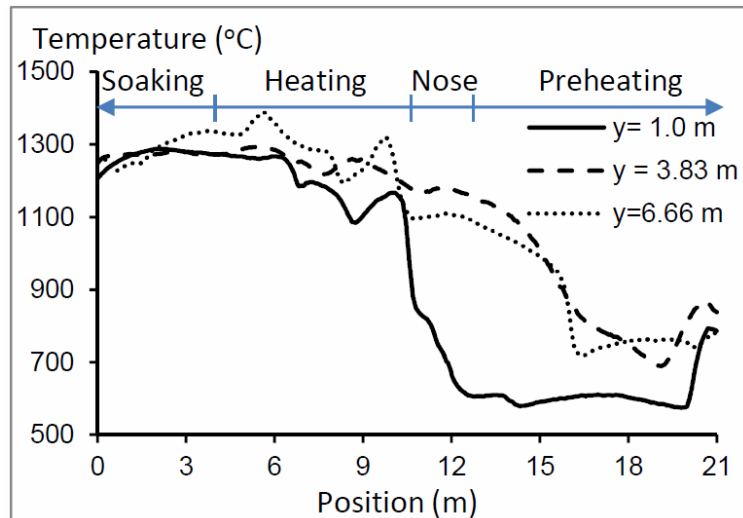
ภาพที่ 4.8 การไหลของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผาใน Preheating zone

จากภาพที่ 4.8 ซึ่งแสดงทิศทางและความเร็วของก๊าซที่ไหลจาก Heating zone เข้าสู่ preheating zone บนระนาบแนวนอนซึ่งตัดผ่านหัวเผาจะเห็นว่าก๊าซร้อนซึ่งไหลมาจาก heating zone ผ่าน nose มาสู่ preheating zone จะไหลอย่างมีระเบียบและมีทิศทางเดียวกัน (ลูกศรสีฟ้า) จากนั้นก๊าซร้อนดังกล่าวจะเกิดการไหลวนอยู่ใน preheating zone ด้วยความเร็วที่ต่ำมาก (บริเวณด้านล่างของภาพที่ 4.8)



ภาพที่ 4.9 อุณหภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผาใน Preheating zone

และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของก๊าซ ณ ตำแหน่งดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 4.9 พบว่าบริเวณที่ก๊าซร้อนเกิดการไหลวนอยู่นั้นก๊าซจะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าบริเวณอื่นๆ ทั้งนี้ก็เนื่องจากการที่ก๊าซร้อนไหลวนอย่างช้าๆ ทำให้ก๊าซร้อนมีเวลามากขึ้นที่จะสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่บิลเลทได้ ก๊าซบริเวณดังกล่าวจึงมีอุณหภูมิต่ำกว่าบริเวณที่ก๊าซไหลอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 4.10 อุณหภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบเหนือจากพื้นเตา 0.1 เมตร ตลอดแนวยาวเตาที่ระยะ $y = 1$ เมตร, 3.83 เมตร และ 6.66 เมตร

ภาพที่ 4.10 เป็นกราฟแสดงอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ที่ระนาบเหนือจากพื้นเตา 0.1 เมตร ตามแนวยาวของเตา ซึ่งกราฟเส้น $y = 1.0$ เมตร นั้นลากผ่านบริเวณที่ก๊าซไหลวนด้วยความเร็วต่ำใน preheating zone (พื้นที่สีฟ้าในภาพที่ 4.9) พบว่าก๊าซในบริเวณนี้มีอุณหภูมิต่ำคืออยู่ที่ประมาณ 600°C ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิของก๊าซใน preheating zone ในบริเวณอื่นๆ ซึ่งแสดงดังเส้นกราฟ $y = 3.83$ เมตร และ $y = 6.66$ เมตร ซึ่งลากผ่านบริเวณที่ก๊าซไหลด้วยความเร็วที่สูงกว่าเส้นกราฟ $y = 1.0$ เมตร ดังนั้นก๊าซใน preheating zone ที่เส้นกราฟทั้งสองเส้นลากผ่านนั้นจะมีเวลาให้ก๊าซร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่เหล็กแท่งบิลเลทได้น้อย อุณหภูมิของก๊าซซึ่งลากผ่านเส้นกราฟ $y = 3.83$ เมตร และ $y = 6.66$ เมตร จึงมีค่าสูงกว่าก๊าซซึ่งลากผ่านเส้นกราฟ $y = 1.0$ เมตร

จากการพิจารณาการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเร็วในการไหลของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ ณ ตำแหน่งต่างๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าในขณะที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นและก๊าซร้อนเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนภายใน Soaking zone และ heating zone การถ่ายเทความร้อนภายในโซนนี้จะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีเป็นหลักเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิสูง โดยระดับอุณหภูมิของก๊าซภายใน Soaking zone และ heating zone นี้จะขึ้นกับ

อุณหภูมิของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้เป็นหลักคือกรณีที่เปลวไฟมีอุณหภูมิสูงก๊าซจะมีอุณหภูมิที่สูงด้วย เมื่อก๊าซร้อนเคลื่อนที่ผ่าน nose เข้าสู่ preheating zone ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าโซนแรก การถ่ายเทความร้อนจะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีเช่นเดียวกัน ซึ่งใน preheating zone นี้ความเร็วในการไหลของก๊าซร้อนจะส่งผลต่อระดับอุณหภูมิของก๊าซเป็นอย่างมากคือบริเวณที่ก๊าซไหลอย่างรวดเร็วจะทำให้ก๊าซสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่ผิวบิลเลทได้น้อย ทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่มีการไหลของก๊าซร้อนอย่างช้าๆ

4.4.3 การสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสีย (Sensible heat loss)

ก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาตั้งแต่ Soaking zone, heating zone ผ่าน nose และ preheating zone ในระหว่างที่ก๊าซร้อนเคลื่อนที่ภายในเตา ความร้อนซึ่งสะสมอยู่ในก๊าซเหล่านี้จะถูกถ่ายเทไปสู่บิลเลทและทำให้บิลเลทมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สุดท้ายก๊าซร้อนก็จะไหลออกจากห้องเผาไหม้ของเตาเผาทางปล่องก๊าซเสีย ก๊าซร้อนหรือก๊าซเสียที่ถูกปล่อยทิ้งออกจากเตาเผานี้เป็นก๊าซที่ยังคงมีอุณหภูมิสูงหรือมีพลังงานความร้อนสะสมอยู่ในปริมาณมาก

การคำนวณ CFD สามารถคำนวณอุณหภูมิของก๊าซเสียที่ปลายปล่องทางออกของเตาได้ อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซเสียเท่ากับ $836\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอัตราการไหลของก๊าซเสียออกจากเตามีค่าเท่ากับ $91,044\text{ Nm}^3/\text{hr}$ ซึ่งสามารถคำนวณค่าพลังงานความร้อนซึ่งสะสมอยู่ในก๊าซเสียและถูกปล่อยออกจากเตาทางปล่องก๊าซเสียต่อชั่วโมง ($\text{Heat}_{\text{gas}_i}$) ได้จากสมการ

$$\text{Heat}_{\text{gas}_i} = F_{\text{gas}_i} \int_{T_{\text{in}}}^{T_{\text{out}}} C_p(T)_{\text{gas}_i} dT \quad (4.1)$$

โดย F_{gas_i} คือ อัตราการไหลออกของก๊าซชนิด i

$C_p(T)_{\text{gas}_i}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซชนิด i

ดังนั้นค่าพลังงานความร้อนซึ่งสะสมอยู่ในก๊าซแต่ละชนิดของก๊าซเสียซึ่งคำนวณได้จากสมการด้านบนสามารถสรุปดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซต่างๆ ของก๊าซเสีย

ก๊าซ	ปริมาณก๊าซ (%vol)	พลังงานความร้อนสะสม	
		MJ/hr.	%
O ₂	4.22	882	3.82
N ₂	75.46	17,808	77.04
CO ₂	11.25	2,083	9.01
H ₂ O	8.97	2,343	10.13
รวม	100	23,166	100

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งแสดงปริมาณของก๊าซและปริมาณความร้อนที่สะสมในก๊าซเสีย โดยแบ่งเป็นปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซเสียก่อนถูกปล่อยออกจากเตาเผาทางปล่องก๊าซเสีย จะเห็นว่าก๊าซไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซที่มีอยู่ในอากาศเผาไหม้มากที่สุด (79% โดยปริมาตร) เมื่อการเผาไหม้เกิดขึ้นและก๊าซเสียถูกปล่อยออกจากเตาเผา ในก๊าซเสียทั้งหมดจะประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนมากที่สุดคือ 75.46% โดยปริมาตร ดังนั้นความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซไนโตรเจนจึงมีค่าสูงมากมีค่าเท่ากับ 17,808 MJ/hr และคิดเป็น 77.04% ของปริมาณความร้อนสะสมอยู่ในก๊าซเสียทั้งหมด ในขณะที่ H₂O, CO₂ และ O₂ ซึ่งมีปริมาณและมีพลังงานความร้อนลดลงมาโดยมีพลังงานความร้อนสะสมในก๊าซเหล่านี้เท่ากับ 2,343, 2,083 และ 882 MJ/hr หรือคิดเป็น 10.13%, 9.01% และ 3.82% ตามลำดับ สำหรับปริมาณความร้อนทั้งหมดที่สะสมในก๊าซเสียและปล่อยออกจากเตาทางปล่องก๊าซเสียมีค่ามากถึง 23,166 MJ/hr

4.4.4 การใช้พลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็ก

พลังงานความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาเหล็กได้แก่ความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเป็นหลักและอีกบางส่วนเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากความร้อนของการอุ่นอากาศเผาไหม้และน้ำมันเชื้อเพลิง โดยพลังงานความร้อนที่ให้เข้าสู่เตาจะถ่ายเทไปสู่เหล็กเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เหลือจะสูญเสียออกจากเตาในรูปแบบต่างๆ ดังนั้นจากผลการคำนวณ CFD และข้อมูลที่รวบรวมจากทางโรงงาน ทำให้สามารถประเมินการใช้พลังงานความร้อนของเตาเผาเหล็กได้ดังนี้

1. พลังงานความร้อนเข้า (Heat Input) หรือความร้อนที่ให้เข้าสู่เตาเผาเหล็ก ได้แก่
 - ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Heat from fuel combustion) โดยค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สามารถคำนวณได้จากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้คูณกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิงดังนี้

$$\text{Heat}_{\text{fuel combustion}} = \text{Gross calorific value} \times F_{\text{fuel}} \quad (4.2)$$

เมื่อ Gross calorific value = 10,118 cal/g = 42,346 J/g

และ F_{fuel} คือ อัตราการไหลของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 1644 kg/hr

$$\text{Heat}_{\text{fuel combustion}} = 42,346 * (1,644 * 1,000) / 1,000,000 = 69,616 \text{ MJ/hr}$$

ดังนั้นความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 69,616 MJ/hr

- ความร้อนจากการอุ่นน้ำมันเชื้อเพลิง (Heat from preheated oil) และอากาศเผาไหม้ (Heat from preheated air) ซึ่งความร้อนนี้มีค่าเท่ากับความร้อนสะสมในอากาศเผาไหม้และน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งถูกอุ่นร้อนที่อุณหภูมิ 260 °C และ 70 °C ตามลำดับ ก่อนการพ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้

$$\text{Heat}_{\text{preheated air\&oil}} = \left[\dot{m}_{\text{air}} \times \int_{298}^{\text{preheated air } T} C_p(T)_{\text{air}} dT \right] + \left[\dot{m}_{\text{oil}} \times \int_{298}^{\text{preheated oil } T} C_p(T)_{\text{oil}} dT \right] \quad (4.3)$$

เมื่อ \dot{m}_{air} คืออัตราการไหลของอากาศเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ 21,610 Nm³/hr = 964,732 mol/hr

\dot{m}_{oil} คืออัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 1,644 kg/hr

$C_{p,\text{air}}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศเผาไหม้ (cal/g mol) โดย

$$C_{p,\text{air}} = 6.713 + 0.04697 * 10^{-4} T + 0.01147 * 10^{-10} T^2 - 0.4696 * 10^{-18} T^3$$

$C_{p,\text{oil}}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะน้ำมันเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 2 kJ/kg.K

และ preheated air T และ preheated oil T คืออุณหภูมิอุ่นร้อนของอากาศเผาไหม้และน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 533 K (260 °C) และ 343 K (70 °C) ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าและทำการคำนวณค่าทั้งหมดจะได้ว่า $\text{Heat}_{\text{preheated air\&oil}}$ มีค่าเท่ากับ 6,371 + 148 = 6,519 MJ/hr

ดังนั้นความร้อนที่ให้เข้าสู่เตาเผาเหล็กทั้งหมด ($\text{Heat}_{\text{Fuel Combustion}} + \text{Heat}_{\text{Preheated Air}} + \text{Heat}_{\text{Preheated Oil}}$) เท่ากับ 69,616+6,519 = 76,135 MJ/hr

2. ความร้อนออกจากเตา (Heat Output) หรือพลังงานความร้อนที่ออกจากเตาในรูปแบบต่างๆ ได้แก่

- ความร้อนในบิลเลท เป็นความร้อนที่ถ่ายเทไปสู่บิลเลทและทำให้บิลเลทมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งผลการคำนวณ CFD สามารถคำนวณค่าความร้อนดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 33,912 MJ/hr

- ความร้อนที่สูญเสียไปกับก๊าซเสีย โดยก๊าซเสียที่ถูกปล่อยออกจากเตาที่มีอุณหภูมิสูงจะเอาความร้อนออกไปด้วย โดยค่าความร้อนที่สูญเสียไปดังกล่าวมีค่าเท่ากับความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซเสียต่างๆ ได้แก่ O_2 , N_2 , CO_2 , CO และ H_2O ซึ่งผลการคำนวณ CFD สามารถคำนวณค่าความร้อนดังกล่าวดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยมีค่าความร้อนรวมเท่ากับ 23,166 MJ/hr

- ความร้อนที่สูญเสียทางผนังเตา เป็นความร้อนซึ่งถ่ายเทออกสู่อากาศภายนอกทางผนังเตาโดยการแผ่รังสีและการพาความร้อน ผลการคำนวณ CFD แสดงเป็นค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียออกทางผนังรวมทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 708 MJ/hr

- ความร้อนที่สูญเสียในรูปแบบอื่นๆ ได้แก่ ความร้อนที่ออกไปกับ CO และ H_2 ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (chemical heat in off-gas) ความร้อนที่ออกไปจากทางเข้าและทางออกของเตา ความร้อนที่ออกไปกับก๊าซที่รั่วออกจากเตาและความร้อนที่สะสมอยู่ภายในสเกล เป็นต้น ซึ่งจากผลการคำนวณ CFD และข้อมูลจากโรงงานไม่สามารถประเมินปริมาณการสูญเสียความร้อนดังกล่าวได้โดยตรง แต่เนื่องจากกฎสมดุลพลังงานซึ่งกำหนดให้พลังงานที่เข้าสู่เตามีค่าเท่ากับพลังงานที่ออกจากเตา ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่าการสูญเสียความร้อนในรูปแบบอื่นๆ ดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 18,354 MJ/hr

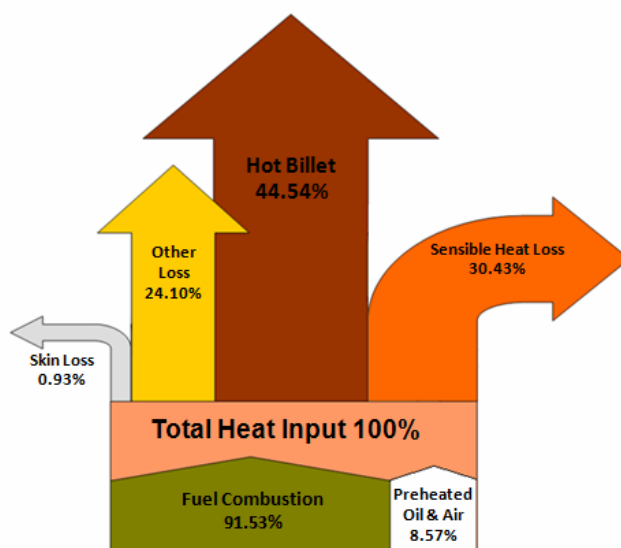
จากผลการประเมินพลังงานความร้อนเข้าสู่เตาและค่าพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทไปสู่บิลเลททำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพทางความร้อน (Thermal Efficiency) ของเตาเผาเหล็กได้ ซึ่งหมายถึงปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทไปสู่บิลเลทต่อพลังงานความร้อนที่ให้เข้าสู่เตาทั้งหมด หรือ

$$\eta = \frac{\text{Heat}_{\text{Billet}}}{\text{Heat}_{\text{Input}}} \times 100\% \quad (4.2)$$

โดย H_{Billet} คือค่าพลังงานความร้อนซึ่งถ่ายเทไปสู่บิลเลท มีค่าเท่ากับ 33,912 MJ/hr

H_{Input} คือค่าพลังงานความร้อนที่ให้เข้าสู่เตาทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 76,135 MJ/hr

ดังนั้น ประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็ก = $(33,912 / 76,135) \times 100 = 44.54 \%$



ภาพที่ 4.11 แผนภาพ Sankey ของเตาเผาเหล็ก

ภาพที่ 4.11 ซึ่งเป็นแผนภาพแสดงค่าความร้อนเข้าสู่เตาและออกจากเตาในรูปแบบต่างๆ หรือเรียกว่า Sankey Diagram ของเตาเผาเหล็ก ซึ่งในที่นี้จะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของความร้อนแต่ละชนิดเทียบกับค่าพลังงานทั้งหมดที่ให้เข้าสู่เตา จะเห็นว่าปริมาณความร้อนคิดเป็น 44.54% ของความร้อนทั้งหมดที่ให้เข้าสู่เตาทำให้เหล็กแท่งบิลเล็ตร้อนขึ้น ในขณะที่ความร้อนจะสูญเสียออกจากเตาในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสียมากถึง 30.43% และสูญเสียความร้อนจากผนังเตาเท่ากับ 0.93% ในขณะที่ความร้อนสูญเสียในรูปแบบอื่นๆ ซึ่งไม่สามารถแยกได้สูงถึง 25.03%

บทที่ 5 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง

ในบทนี้เป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายหรือทำนายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กเมื่อทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิต ในที่นี้เป็นการทำนายและอธิบายผลของการประยุกต์ใช้เทคนิคการเผาไหม้แบบ Oxygen enrichment เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมและความเป็นไปได้ก่อนนำไปประยุกต์ใช้จริงแทนการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติในโรงงาน

5.1 การประยุกต์ใช้การเผาไหม้แบบ Oxygen-Enriched Combustion (OEC)

การศึกษาผลของการประยุกต์ใช้เทคนิคการเผาไหม้แบบ OEC ทำโดยการเพิ่มสัดส่วนของปริมาณออกซิเจนในอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ให้มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงขึ้น ในที่นี้จะศึกษาทั้งหมด 2 กรณี คือ 23%OEC และ 25%OEC

ตารางที่ 5.1 ส่วนผสมทางเคมีและปริมาตรของอากาศเผาไหม้กรณีเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC

อากาศเผาไหม้	ส่วนผสม (%vol.)		ปริมาตร (Nm ³ /hr.)		
	O ₂	N ₂	O ₂	N ₂	รวม
21% O ₂	21	79	4,539	17,076	21,615
23%OEC	23	77	4,539	15,196	19,735
25%OEC	25	75	4,539	13,617	18,156

ตารางที่ 5.1 แสดงส่วนผสมทางเคมีและปริมาตรของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ในกรณีการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23% และ 25% เปรียบเทียบกับกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ (21%O₂) ซึ่งจะเห็นว่าในการสร้างแบบจำลองของการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC จะควบคุมให้ปริมาณของก๊าซออกซิเจนในอากาศเผาไหม้ที่พ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อทำปฏิกิริยากับน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าคงที่คือมีค่าเท่ากับ 4,539 Nm³/hr ในขณะที่ปริมาณก๊าซไนโตรเจนจะน้อยลงเมื่อค่าความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้นเป็น 23% และ 25% ตามลำดับ

5.2 ผลการประยุกต์ใช้การเผาไหม้แบบ OEC

การศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการเผาไหม้แบบ OEC ที่ 23%OEC และ 25%OEC ซึ่งควบคุมปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ให้มีปริมาณคงที่เท่ากับปริมาณออกซิเจนในอากาศเผาไหม้ในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ คือควบคุมให้มีปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในก๊าซเสียที่ปล่อยออกจากเตาเท่ากับ 4.20% โดยปริมาตร ซึ่งปริมาณก๊าซออกซิเจนส่วนเกินและปริมาณของก๊าซอื่นๆ ในก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งได้จากการคำนวณ CFD แสดงดังตารางที่ 5.2 จะเห็นว่าปริมาณก๊าซออกซิเจนส่วนเกินในก๊าซเสียในกรณีของ 23%OEC และ 25%OEC มีค่าเท่ากับ 4.52% และ 4.31% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ (21% O₂) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.20%

ตารางที่ 5.2 ปริมาณและส่วนผสมของก๊าซเสียจากการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23%OEC และ 25%OEC

อากาศเผาไหม้	ปริมาณก๊าซเสีย (Nm ³ /s)	ส่วนผสมของก๊าซเสีย (vol. %)				
		O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
21% O ₂	25.29	4.22	75.46	0.04 ppm	11.25	8.97
23%OEC	23.05	4.52	73.23	3.62 ppm	12.33	9.82
25%OEC	20.24	4.31	70.91	2.12 ppm	13.72	10.93

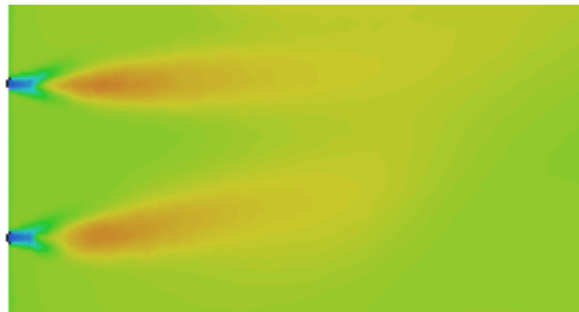
ในขณะที่ปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่สามารถคำนวณได้จะมีค่าลดลงจาก 75.46% สำหรับการเผาไหม้ปกติเป็น 73.23% และ 70.91% สำหรับการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ตามลำดับ สำหรับจุดประสงค์หลักของการใช้การเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ก็คือการลดลงของปริมาณไนโตรเจนในก๊าซเสีย เนื่องจากว่าก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซที่มีปริมาณมากที่สุดในอากาศเผาไหม้และไม่ก่อประโยชน์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่จะดึงความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ไปสะสมไว้และถูกปล่อยออกจากเตาไป ดังนั้นการลดลงของปริมาณไนโตรเจนในก๊าซเสียจึงทำให้ปริมาณการสูญเสียความร้อนของเตาเผาหลักลดลงได้

ในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซเสียออกจากปล่องก๊าซเสียก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคืออัตราการไหลของก๊าซเสียออกจากเตาสำหรับกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติมีค่าสูงสุดเท่ากับ 25.29 Nm³/s รองลงมาคือกรณีการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 23.05 Nm³/s และ 20.24 Nm³/s ตามลำดับ

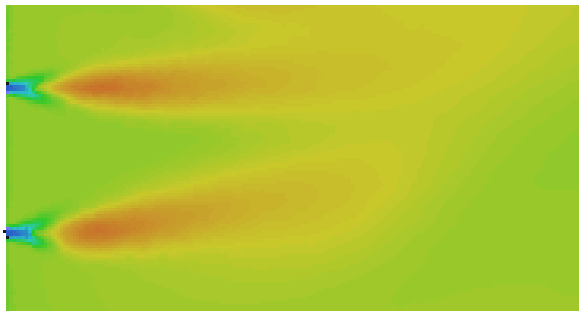
5.2.1 เปรียบเทียบการเผาไหม้

จากผลการคำนวณ CFD แสดงให้เห็นผลการคำนวณการเผาไหม้ของการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ซึ่งจะให้ผลที่เหมือนกันคือเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ขึ้นบริเวณด้านหน้าของรูพ่นอากาศและเชื้อเพลิงส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิสูงหรือเรียกว่าเปลวไฟ สิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนสำหรับการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC คืออุณหภูมิเปลวไฟที่ได้จากการเผาไหม้ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 5.1 และเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบลักษณะของเปลวไฟที่เกิดขึ้นของทั้งสองกรณีอย่างชัดเจนจึงทำการแสดงผลของอุณหภูมิเปลวไฟในช่วงอุณหภูมิเดียวกันคือ $50^{\circ}\text{C} - 2030^{\circ}\text{C}$

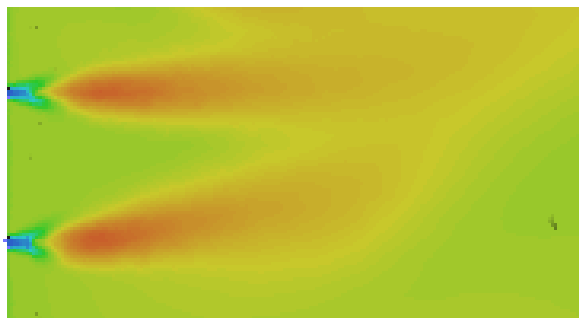
Static Temperature (C)



ก)



ข)



ค)

ภาพที่ 5.1 ลักษณะเปลวไฟจากการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23%OEC และ ค) 25%OEC

ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ (ภาพที่ 5.1 ก)) จะมีอุณหภูมิต่ำที่สุด ในขณะที่เปลวไฟของการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23%OEC (ภาพที่ 5.1 ข)) และ 25%OEC (ภาพที่ 5.1 ค)) จะมีอุณหภูมิเปลวไฟสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งค่าของอุณหภูมิเปลวไฟหรืออุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการคำนวณ CFD สรุปดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 อุณหภูมิเปลวไฟและอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC

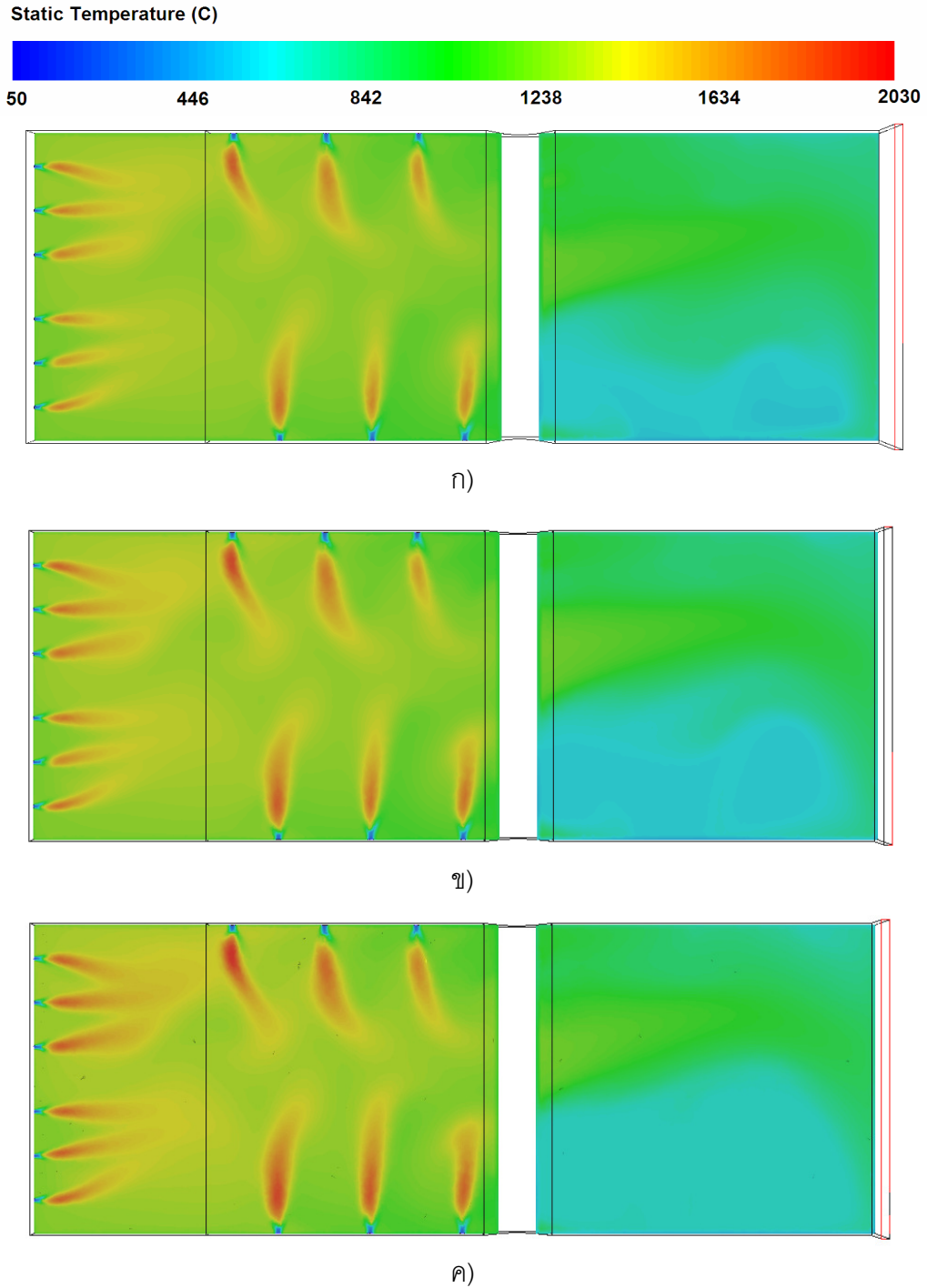
อากาศเผาไหม้	อุณหภูมิสูงสุด (เปลวไฟ) (°C)	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)
21% O ₂	1865	1088
23%OEC	1956	1093
25%OEC	2027	1108

จากการคำนวณ CFD สามารถคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟของการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC มีค่าเท่ากับ 1865 °C 1956 °C และ 2027 °C ตามลำดับ การที่เปลวไฟจากการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติก็เนื่องมาจากการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC นั้นใช้อากาศเผาไหม้ที่มีส่วนผสมทางเคมีที่ประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนน้อยกว่าการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติซึ่งประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนถึง 79% โดยปริมาตร การลดลงของก๊าซไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้คือทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เกิดการสูญเสียลดลงความร้อนซึ่งดูดซับโดยก๊าซไนโตรเจนมีค่าลดลง ดังนั้นอุณหภูมิเปลวไฟของการเผาไหม้ด้วยเทคนิคจึงมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นสอดคล้องกับความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศเผาไหม้ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเปลวไฟในกรณีใช้การเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC นั้นส่งผลให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนภายในเตามีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วย จากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าการเผาไหม้ด้วย 25%OEC มีอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาสูงที่สุดคือเท่ากับ 1108 °C รองลงมาคือการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติตามลำดับ

5.2.2 เปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อน

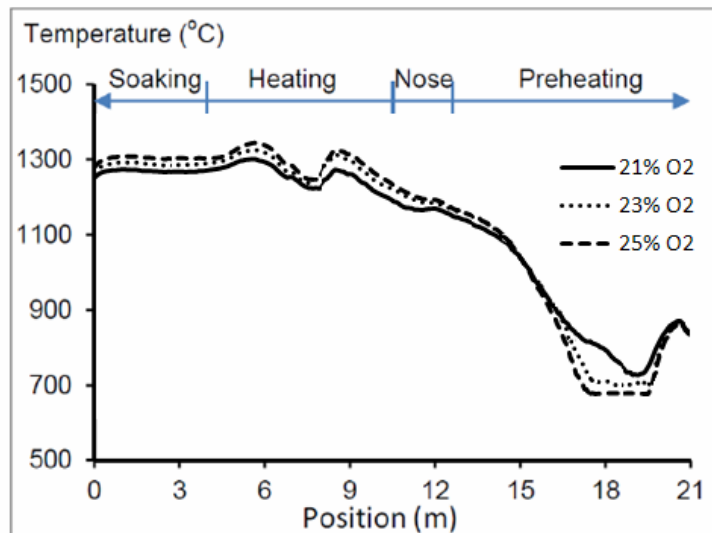
การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 โซนได้แก่ โซนที่มีอุณหภูมิสูงคือ Soaking zone และ Heating zone และโซนที่มีอุณหภูมิต่ำคือ Preheating zone



ภาพที่ 5.2 อุณหภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผาสำหรับการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23%OEC และ ค) 25%OEC

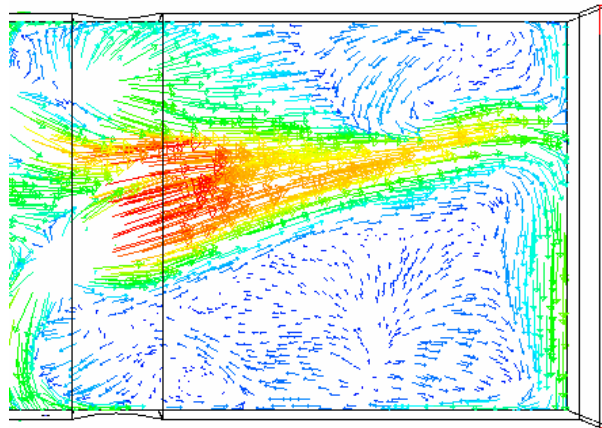
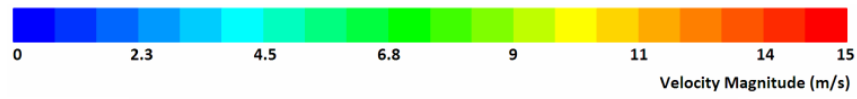
ภาพที่ 5.2 เปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของก๊าซร้อนภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กบนระนาบซึ่งตัดผ่านระนาบของหัวเผาของการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC พบว่าในโซนที่มีอุณหภูมิสูงซึ่งได้แก่ Soaking zone และ heating zone นั้น การเผาไหม้ด้วย 25%OEC และ 23%OEC มีอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่สูงกว่าการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ และเมื่อ

พิจารณารูปเปรียบเทียบอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาในภาพที่ 5.3 จะเห็นว่าใน Soaking zone และ heating zone (ตำแหน่งแกน x เท่ากับ 0 – 11 m) ก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ด้วย 25%OEC จะมีอุณหภูมิสูงสุดในทุกๆ ตำแหน่ง รองลงมาคือก๊าซร้อนจากการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติตามลำดับ

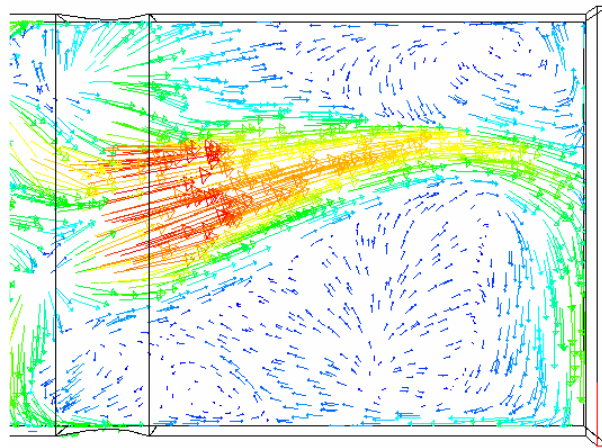


ภาพที่ 5.3 อุณหภูมิของก๊าซร้อนบนระนาบเหนือจากพื้นเตา 0.1 เมตร ตลอดแนวยาวเตาสำหรับการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23%OEC และ ค) 25%OEC

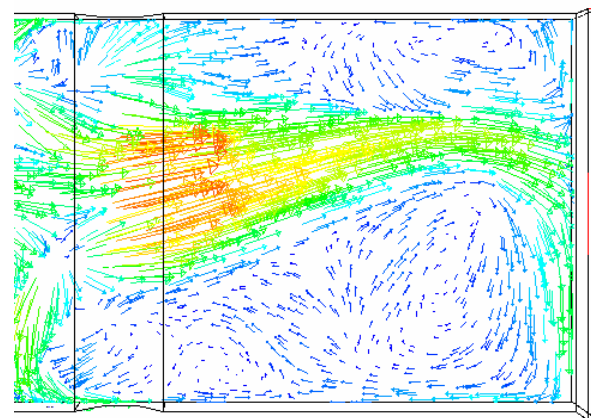
สาเหตุที่ก๊าซร้อนในกรณีการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC มีอุณหภูมิสูงกว่าการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติทั้งนี้ก็เนื่องจากการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ให้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงกว่าส่งผลให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีจากเปลวไฟไปสู่ก๊าซโดยรอบดีขึ้น โดยพิจารณาได้จากสมการการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีซึ่งพบว่าความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีจากเปลวไฟไปสู่ก๊าซโดยรอบขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเปลวไฟคือจะแปรผันตรงกับ T_f^4 เมื่อ T_f คืออุณหภูมิของเปลวไฟ นั่นคือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเปลวไฟเพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีไปยังบริเวณโดยรอบเพิ่มขึ้นอย่างมาก สำหรับกรณีการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ที่มีเปลวไฟจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นตามลำดับ ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีจากเปลวไฟไปยังก๊าซโดยรอบสูงขึ้น ดังนั้นก๊าซร้อนภายใน Soaking zone และ heating zone ของเตาเผาจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่ากรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ



ก)



ข)



ค)

ภาพที่ 5.4 การไหลของก๊าซร้อนบนระนาบเหนือจากพื้นเตา 0.1 เมตร สำหรับการเผาไหม้ด้วย ก)

อากาศปกติ ข) 23%OEC และ ค) 25%OEC

สำหรับอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ใน Preheating zone ซึ่งเป็นโซนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าก๊าซร้อนใน soaking zone และ heating zone กลับให้ผลที่แตกต่างกัน (พิจารณาภาพที่ 5.3 ตำแหน่ง $x = 12$ ถึง $x = 21$ m) จะเห็นว่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนในกรณีของการเผาไหม้ด้วยการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติกลับมีอุณหภูมิสูงสุดและรองลงมาคือกรณีการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ตามลำดับ ทั้งนี้ก็เนื่องจากใน preheating zone ไม่มีการติดตั้งหัวเผาไว้ ดังนั้นก๊าซร้อนใน preheating zone นี้จะมีอุณหภูมิสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลและความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของก๊าซร้อนนั้นเป็นหลัก

ภาพที่ 5.4 เปรียบเทียบความเร็วและทิศทางการไหลของก๊าซร้อนภายใน preheating zone ของเตาเผาที่ระนาบเหนือจากพื้นเตาเท่ากับ 0.1 เมตร โดยภาพที่ 5.4 ก) เป็นการไหลของก๊าซร้อนในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ ภาพที่ 5.4 ข) และภาพที่ 5.4 ค) เป็นการไหลของก๊าซร้อนของการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ตามลำดับ จะเห็นว่าลักษณะการไหลของก๊าซร้อนจาก heating zone ซึ่งไหลผ่าน nose มายัง preheating zone จะไหลในลักษณะที่มีระเบียบและมีทิศทางเดียวกัน เมื่อก๊าซร้อนไหลผ่าน nose เข้าสู่ preheating zone เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะเห็นว่าก๊าซร้อนบางส่วนจะไหลวนอยู่ใน preheating zone นี้ (เวกเตอร์สีน้ำเงิน) ก่อนจะไหลออกจากเตาทางปล่องก๊าซเสียต่อไป จากภาพที่ 5.4 ก) ซึ่งแสดงการไหลของก๊าซสำหรับกรณีเผาไหม้ด้วยอากาศปกติจะเห็นว่าความเร็วการไหลของก๊าซร้อนภายใน preheating zone มีความเร็วสูงสุดรองลงมาคือการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ในภาพที่ 5.4 ข) และภาพที่ 5.4 ค) ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ความเร็วในการไหลของก๊าซภายในห้องเผาไหม้มีความเร็วลดลงเมื่อใช้การเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC เนื่องจากการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC นี้เป็นการลดปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนในอากาศเผาไหม้ลงและควบคุมให้ปริมาณออกซิเจนคงเดิม ส่งผลให้ปริมาตรรวมของอากาศเผาไหม้ (ออกซิเจน+ไนโตรเจน) ที่พ่นเข้าสู่เตาจึงมีค่าลดลงกว่าการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ ดังนั้นความเร็วการไหลของก๊าซร้อนซึ่งเป็นผลมาจากความเร็วในการพ่นอากาศเผาไหม้เข้าสู่เตาในกรณีของการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC จึงไหลช้ากว่ากรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกตินั่นเอง

จากผลของความเร็วการไหลของก๊าซร้อนต่อความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของก๊าซร้อนภายใน Preheating zone ที่ได้พิจารณาในการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าลักษณะการไหลของก๊าซร้อนภายใน preheating zone อย่างช้าๆ จะทำให้ก๊าซร้อนมีเวลามากขึ้นที่จะสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่บิลเลทได้ทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนบริเวณดังกล่าวลดต่ำกว่าบริเวณที่มีการไหลด้วยความเร็วสูงๆ ดังนั้นในกรณีการเผาไหม้ด้วย 25%OEC ซึ่งมีความเร็วการไหลของก๊าซร้อนภายใน preheating zone ต่ำที่สุด จึงทำให้ก๊าซร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่บิลเลทได้มากอุณหภูมิของก๊าซร้อนบริเวณนั้นจึงมีค่าต่ำ ในขณะที่เดียวกันกรณีการเผาไหม้ด้วย 23%OEC

และการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ ซึ่งมีความเร็วในการไหลของก๊าซร้อนที่สูงขึ้นจึงกลับมีอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่สูงขึ้นตามลำดับ

5.2.3 เปรียบเทียบการสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสีย

ก๊าซเสียที่เกิดจากการเผาไหม้และไหลออกจากห้องเผาไหม้ของเตาเผาทางปล่องก๊าซเสีย สำหรับกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC มีอุณหภูมิและปริมาตรของก๊าซเสียที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 5.4 อุณหภูมิของก๊าซเสียออกจากเตาสำหรับการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC

อากาศเผาไหม้	อุณหภูมิก๊าซเสีย (°C)
21% O ₂	839
23%OEC	828
25%OEC	814

จากตารางที่ 5.4 ซึ่งทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซเสียที่ไหลออกจากเตา ณ ตำแหน่งทางออกของปล่องก๊าซเสีย (ทางออกจากโดเมนของปัญหา) พบว่าสำหรับกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ (21% O₂) มีอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซเสีย ณ ตำแหน่งทางออกจากปล่องก๊าซเสียสูงที่สุดคือมีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 839 °C ในขณะที่การเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC มีอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 828 °C และ 814 °C ตามลำดับ การที่อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซเสียในกรณีการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23%OEC และ 25%OEC มีค่าลดลงก็เนื่องจากในขณะที่ก๊าซร้อนเคลื่อนที่ผ่าน preheating zone ความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซร้อนจะเกิดการถ่ายเทไปสู่บิลเลทได้มาก ทำให้อุณหภูมิของก๊าซเสียลดลง ซึ่งมีผลดีต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาคือทำให้การสูญเสียความร้อนซึ่งสะสมในก๊าซต่างๆ ลดลง

ตารางที่ 5.5 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) เปรียบเทียบปริมาณความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซต่างๆ ของก๊าซเสียสำหรับการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23%OEC และ 25%OEC พบว่าสำหรับการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ (21% O₂) มีค่าพลังงานความร้อนสะสมในก๊าซไนโตรเจนสูงกว่าการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC คือมีค่าเท่ากับ 17,808 MJ/hr, 15,565 MJ/hr และ 13,316 MJ/hr ตามลำดับ นั่นคือพลังงานความร้อนสะสมในก๊าซไนโตรเจนกรณี 23%OEC และ 25%OEC มีค่าต่ำกว่ากรณีการเผาไหม้

ด้วยอากาศปกติถึง 12% และ 25% ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในส่วนผสมของก๊าซเสียตัวอื่นๆ ได้แก่ O_2 , CO_2 และ H_2O ก็มีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกันแต่จะลดลงในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้ก็เนื่องจากการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC นั้นส่งผลให้อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ออกจากเตามีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติอีกทั้งอัตราการปล่อยก๊าซเสียยังน้อยกว่าด้วย จึงทำให้ปริมาณความร้อนสะสมในก๊าซเหล่านี้ลดลง แต่เนื่องจากการที่สัดส่วนของ O_2 , CO_2 และ H_2O ในก๊าซเสียมีปริมาณเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก๊าซ N_2 ดังนั้นความร้อนสะสมจึงลดลงเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 5.5 ความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซต่างๆ ของก๊าซเสียสำหรับการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ และการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23%OEC และ 25%OEC

อากาศเผาไหม้	ปริมาณความร้อนสะสม (MJ/hr)				
	O_2	N_2	CO_2	H_2O	รวม
21% O_2	882	17,808	2,083	2,393	23,166
23%OEC	842	15,565	2,060	2,348	20,815
25%OEC	718	13,316	2,021	2,292	18,346

การประยุกต์ใช้เทคนิคการเผาไหม้แบบ OEC ซึ่งเป็นการลดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่เป็นส่วนผสมในอากาศเผาไหม้และส่งผลทำให้พลังงานความร้อนสะสมในก๊าซเสียลดลงคือลดลงจาก 23,166 MJ/hr เป็น 20,815 MJ/hr และ 18,346 MJ/hr ตามลำดับ เมื่อใช้การเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ซึ่งการเปลี่ยนจากการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติเป็นการเผาไหม้ด้วย 23%OEC สามารถลดปริมาณการสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสียได้ 10.15% ในขณะที่เมื่อใช้การเผาไหม้ด้วย 25%OEC จะสามารถลดปริมาณการสูญเสียความร้อนในก๊าซเสียได้มากถึง 20.81%

5.2.4 เปรียบเทียบการใช้พลังงานความร้อนของเตาเผาเหล็ก

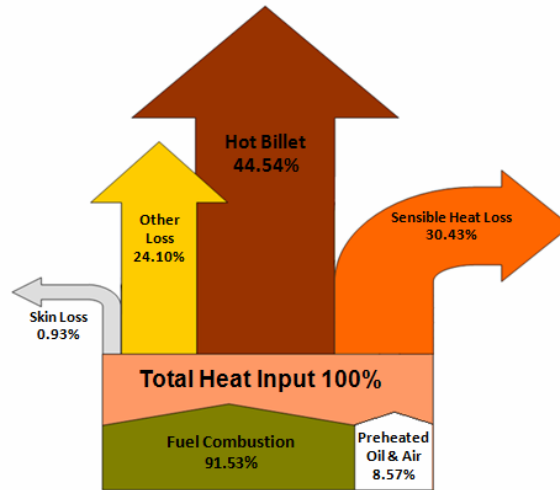
สำหรับปริมาณความร้อนที่ให้เข้าสู่เตาเผาเหล็ก ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทไปสู่บิลเลท และปริมาณความร้อนที่สูญเสียในรูปแบบต่างๆ สำหรับกรณีการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC เปรียบเทียบกับกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติแสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบการใช้พลังงานความร้อนของการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติกับการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC

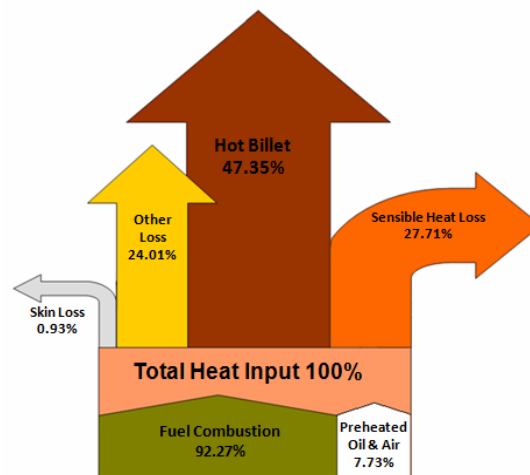
	ปริมาณความร้อน (MJ/hr)		
	21%O ₂	23%OEC	25%OEC
ความร้อนจากการเผาไหม้	69,616	69,616	69,616
ความร้อนจากการอุ่นอากาศ, น้ำมัน	6,524	5,507	4,903
ความร้อนถ่ายเทให้บิลเลท	33,912	35,572	37,998
ความร้อนสูญเสียโดยก๊าซเสีย	23,166	20,815	18,346
ความร้อนสูญเสียจากผนังเตา	708	708	708
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	18,354	18,028	17,467

จากตารางจะเห็นว่าปริมาณความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC มีค่าเท่ากันทั้งนี้ก็เนื่องจากการเผาไหม้ทั้งสามกรณีจะใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเท่ากันและควบคุมให้ปริมาณก๊าซออกซิเจนในอากาศเผาไหม้มีค่าเท่ากันด้วย ดังนั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้ปริมาณความร้อนที่ได้จึงมีค่าเท่ากันคือมีค่าเท่ากับ 69,616 MJ/hr ทั้งสามกรณี สำหรับปริมาณความร้อนจากการอุ่นอากาศและน้ำมันเมื่อใช้การเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC มีค่าลดลงเล็กน้อยตามลำดับ เนื่องจากการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC จะผสมก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ลงไป ในอากาศปกติทำให้อากาศปกติที่ใช้ในการเผาไหม้มีปริมาตรลดลงส่งผลให้ปริมาณความร้อนจากการอุ่นอากาศและน้ำมันมีค่าลดลงด้วย

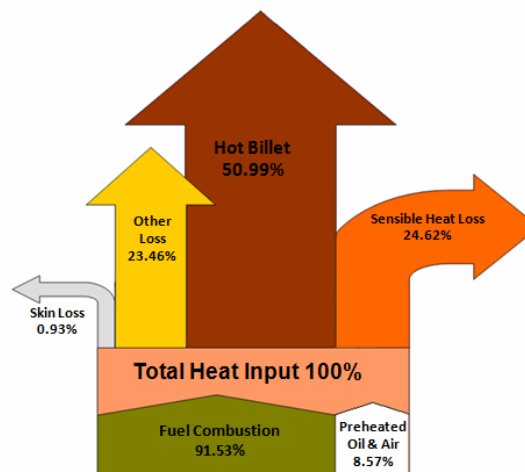
สำหรับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทไปสู่บิลเลทและความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซเสียสำหรับการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC นั้น พบว่าการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC มีปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทไปสู่บิลเลทเพิ่มขึ้น ในขณะที่การสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสียมีค่าลดลง ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กสำหรับการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติและการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC จึงแสดงเป็นแผนภาพ Sankey ดังภาพที่ 5.5



ก)



ข)



ค)

ภาพที่ 5.5 เปรียบเทียบการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กด้วย Sankey Diagram สำหรับการเผาไหม้ด้วย ก) อากาศปกติ ข) 23%OEC และ ค) 25%OEC

จากภาพที่ 5.5 จะเห็นว่าการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเหล็กเพิ่มขึ้นคือเพิ่มขึ้นจาก 44.54% ในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ เป็น 47.35% และ 50.99% เมื่อใช้การเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ตามลำดับ ทั้งนี้ก็เป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซภายในเตาทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีไปสู่ผิวบิลเลทดีขึ้น ในขณะเดียวกันการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ยังทำให้ปริมาณการสูญเสียความร้อนในก๊าซเสียลดลงด้วยคือลดลงจาก 30.42% ในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติเป็น 27.71% และ 24.62% ในกรณีการเผาไหม้ด้วย 23%OEC และ 25%OEC ตามลำดับ ทั้งนี้ก็เนื่องจากการลดลงของปริมาณก๊าซไนโตรเจนในก๊าซเสียและการลดลงของอุณหภูมิของก๊าซเสียทำให้ปริมาณความร้อนที่สะสมในก๊าซเสียและถูกปล่อยออกจากเตาทางปล่องก๊าซเสียลดลงด้วย

บทที่ 6

สรุปผลการพัฒนาและการประยุกต์ใช้แบบจำลอง

6.1 สรุปผล

จากการศึกษาและการสร้างแบบจำลองการไหลของก๊าซ การเผาไหม้เชื้อเพลิง และการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กโดยการประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล ได้ข้อสรุปดังต่อไปนี้

1. การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยประยุกต์ใช้การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรม FLUENT ซึ่งกำหนดให้การไหลของก๊าซเป็นการไหลแบบปั่นป่วน การเผาไหม้เป็นแบบ non-premixed และปฏิกิริยาเคมีเกิดที่สภาวะสมดุล (Equilibrium Chemistry) โดยเลือกใช้ Realizable 2-equation k- ϵ model สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ใช้ Discrete phase model สำหรับจำลองการไหลของน้ำมัน ใช้ The mixture/assumed PDF model สำหรับการเผาไหม้ และใช้ Discrete Ordinate Model (DO) สำหรับการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีและ Weighted-Sum-of-Gray-gases Model (WSGGM) สำหรับคำนวณค่า Absorption Coefficient ของก๊าซร้อน ทำให้สามารถพัฒนาแบบจำลองซึ่งสามารถทำนายการไหลของก๊าซ การเกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิง และการกระจายของอุณหภูมิของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กได้อย่างถูกต้องใกล้เคียงกับปรากฏการณ์จริง
2. การใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายการไหลของก๊าซ การเผาไหม้เชื้อเพลิง และการถ่ายเทความร้อนภายในเตาเผาเหล็กภายใต้สภาวะการทำงานจริงในปัจจุบันของโรงงานได้ข้อสรุปที่น่าสนใจดังนี้
 - 2.1 อุณหภูมิของก๊าซร้อนภายใน Soaking zone และ Heating zone เกิดจากการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีจากเปลวไฟซึ่งมีอุณหภูมิสูงคือมีค่าเท่ากับ 1865 °C ทำให้ก๊าซร้อนในโซนนี้มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่า 1000 °C
 - 2.2 อุณหภูมิของก๊าซร้อนภายใน preheating zone ของเตาเผาเหล็กขึ้นกับความเร็วในการไหลของก๊าซคือบริเวณที่ก๊าซไหลเร็วจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่ก๊าซไหลอย่างช้าๆ โดยก๊าซร้อนใน preheating zone มีอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า 1000 °C
 - 2.3 ประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กซึ่งพิจารณาจากปริมาณความร้อนซึ่งถูกดูดซับโดยผิวของบิลเลตต่อความร้อนที่ให้เข้าสู่เตาทั้งหมดสำหรับกระบวนการผลิตในปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 44.54%

- 2.4 ปริมาณการสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสียของเตาเผาเหล็กสำหรับกระบวนการผลิตในปัจจุบันมีค่าเท่ากับ 30.53%
3. การประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อทำนายและอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเตาเมื่อใช้การเผาไหม้ด้วยเทคนิค Oxygen-enriched combustion ที่ 23% OEC และ 25% OEC ได้ผลที่น่าสนใจดังนี้
- 3.1 การเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23% OEC และ 25% OEC ให้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงกว่าการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติคือมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1865 °C เป็น 1956 °C และ 2027 °C ตามลำดับ และอุณหภูมิเปลวไฟที่สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซภายในเตาสูงขึ้นด้วยคือมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1088 °C เป็น 1093 °C และ 1108 °C ตามลำดับ
- 3.2 อุณหภูมิของก๊าซร้อนภายใน Soaking zone และ Heating zone ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ โดยในกรณีการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ซึ่งได้เปลวไฟที่มีอุณหภูมิสูงทำให้ก๊าซร้อนมีอุณหภูมิสูงกว่ากรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติ
- 3.3 อุณหภูมิของก๊าซร้อนภายใน preheating zone ซึ่งขึ้นอยู่กับการไหลของก๊าซร้อน โดยในกรณีการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ที่ 23% OEC และ 25% OEC มีความเร็วในการไหลของก๊าซต่ำกว่าการไหลของก๊าซร้อนในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติทำให้อุณหภูมิของก๊าซร้อนในกรณีของการเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC มีค่าต่ำกว่า
- 3.4 การเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ทำให้อุณหภูมิของก๊าซเสียที่ปล่อยออกจากเตามีค่าลดลงคือลดลงจาก 839 °C ในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติเป็น 828 °C และ 814 °C ในกรณีการเผาไหม้ด้วย 23% OEC และ 25% OEC ตามลำดับ
- 3.5 การเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ทำให้ปริมาณการสูญเสียความร้อนโดยก๊าซเสียลดลงคือลดลงจาก 30.42% ในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติเป็น 27.71% และ 24.62% ในกรณีการเผาไหม้ด้วย 23% OEC และ 25% OEC ตามลำดับ
- 3.6 การเผาไหม้ด้วยเทคนิค OEC ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนไปสู่เหล็กแท่งบิลเลทหรือประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาเผาเหล็กเพิ่มขึ้นคือเพิ่มขึ้นจาก 44.54% ในกรณีการเผาไหม้ด้วยอากาศปกติเป็น 47.35% และ 50.99% ในกรณีการเผาไหม้ด้วย 23% OEC และ 25% OEC ตามลำดับ

6.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหล การเผาไหม้เชื้อเพลิง และการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาเหล็กนี้ให้สามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุดนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมดังนี้

1. เปลี่ยนปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณให้มีลักษณะเหมือนจริงมากที่สุด เช่น สร้างช่องเปิดต่างๆ ที่มีอยู่จริง ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการไหลออกของก๊าซจากช่องเปิดได้ เป็นต้น
2. ในการสร้างแบบจำลองควรคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนภายในแท่งเหล็กบิลเลทซึ่งวางอยู่บนพื้นเตาแทนการกำหนดเป็นค่าอุณหภูมิของผิวบิลเลทซึ่งจะทำให้สามารถทำนายอุณหภูมิของผิวบิลเลทที่ควรจะเป็นได้อย่างถูกต้อง

การกำหนดเงื่อนไขต่างๆ หรือการสร้างแบบจำลองของโดเมนที่มีความซับซ้อนและมีลักษณะใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น นั้น จะทำให้ได้ผลเฉลยที่ความแม่นยำสูงแต่จะทำให้ต้องใช้เวลาในการคำนวณสูงขึ้นด้วย ดังนั้นคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับคำนวณจึงต้องมีความเร็วในการคำนวณสูงมากจึงจะสามารถแก้ปัญหาที่มีความละเอียดและซับซ้อนมากๆ ได้

รายการอ้างอิง

- [1] British Independent Steel Producers Association (BISPA) and British Steel Technical, Energy Consumption Guide, *Guide No 9 Continuous steel reheating furnace*, Crown, 1991.
- [2] Jong Gyu Kim, Kang Y. Huh and Tae Kim, *Three-dimensional dimensional analysis of the walking-beam-type slab reheating furnace*, Numerical Heat Transfer Part A, 38:589-609, 2000
- [3] Chen, W.H., Chung, Y.C. and Liu, J.L., *Analysis on energy consumption and performance of reheating*, International Communications in Heat and Mass Transfer 32 (2005) 695–706.
- [4] The Energy Technology Support Unit (ETSU) and British Steel Technical, *Continuous steel reheating furnace: operation and maintenance*, Crown, 1993.
- [5] Charles, E. and Baukal, Jr., *Industrial burners handbook, Industrial combustion series*, Boca Raton London New York Washington, D.C.: CRC press, 2003.
- [6] Pfeifer, H., *Process technology of metals 3 (Industrial Furnaces)*, WS, 2006.
- [7] Charles, E. and Baukal, Jr., *Industrial combustion pollution and control*, New York – Basel: Marcel dekker, 2004.
- [8] The Energy Technology Support Unit (ETSU) and British Steel Technical, *Continuous steel reheating furnace: specification, design and equipment*, Crown, 1993.
- [9] สำเร็จ จักรใจ, การเผาไหม้ (COMBUSTION), *เทอร์โมไดนามิกส์ของการเผาไหม้*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย., 2547.
- [10] Charles, E. and Baukal, Jr., *Heat transfer in industrial combustion*, Boca Raton New York: CRC Press, 2000.
- [11] Moyeda, D., Sheldon M. and Koppang R., *Advance steel reheat furnace*, AFRC International symposium 1997.
- [12] Man Young Kim, *A heat transfer model 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 50 (2007): 3740–3748.
- [13] Bureau of Energy Efficiency, *Furnaces*, 2004.

- [14] Jiyuan Tu, Guan Heng Yeoh and Chaoqun Liu, *Computational Fluid Dynamics A practical Approach*, Oxford, UK: Elsevier, 2008.
- [15] Jong Gyu KIM and Kang Y. HUH, *Prediction of transient slab temperature distribution in the re-heating furnace of a walking-beam type for rolling of steel slabs*, *ISIJ International* 40,11 (2000): 1115–1123.
- [16] Jung Hyun JANG, Dong Eun LEE, Chongmin KIM and Man Young KIM, *Prediction of Furnace Heat Transfer and Its Influence on the Steel Slab Heating and Skid Mark Formation in a Reheating Furnace*, *ISIJ International* 48,10 (2008): 1325–1330.
- [17] Valerio Battaglia, Enrico Malfa and Massimiliano FantuzziMoyeda, *CFD simulation of combustion systems for steel reheating furnaces*, EnginSoft International Conference, 2009.
- [18] Energy Efficiency Guide for Industry in Asia, *Thermal Energy Equipment: Furnaces and Refractories*, 2006
- [19] S.H. Chan and H.M. Wang, *Thermodynamic analysis of natural-gas fuel processing for fuel cell applications*, *International Journal of Hydrogen Energy* 25 (2000) 441-449.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

การคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟโดยอาศัยของการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศปกติ

การเผาไหม้เชื้อเพลิง ณ สภาวะปัจจุบันของทางโรงงาน ซึ่งใช้น้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งมีสูตรเคมีคือ $C_7H_{11.2}$ ทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศปกติ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 12 สามารถเขียนเป็นสมการเคมีของการเผาไหม้ได้ดังนี้



การคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟโดยอาศัยที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นอยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่าความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้และความร้อนที่ให้เข้าสู่ระบบจะไม่มี การสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก ระบบ ดังนั้น ความร้อนที่ให้เข้าสู่ระบบและความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จึงมีค่าเท่ากับ ความร้อนที่สะสมอยู่ในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ทั้งหมด ดังนี้

$$Heat_{\text{combustion}} + Heat_{\text{preheated air \& oil}} = Heat_{\text{combustion product}} \quad (1)$$

- จำนวน $Heat_{\text{combustion}}$

คือปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Heat_{\text{combustion}} = \text{Gross calorific value} \times F_{\text{fuel}} \quad (2)$$

เมื่อ Gross calorific value = 10,118 cal/g = 42,346 J/g

F_{fuel} คืออัตราการไหลของเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 1644 kg/hr

ดังนั้น $Heat_{\text{combustion}} = 42,346 * (1,644 * 1,000) / 1,000,000 = 69,616 \text{ MJ/hr}$

- จำนวน $Heat_{\text{combustion}}$

คือความร้อนที่สะสมอยู่ในอากาศเผาไหม้และน้ำมันเชื้อเพลิงขณะที่ทำการพ่นเข้าสู่ห้องเผาไหม้ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Heat}_{\text{preheated air\&oil}} = \left[\dot{m}_{\text{air}} \times \int_{298}^{\text{preheated air } T} C_p(T)_{\text{air}} dT \right] + \left[\dot{m}_{\text{oil}} \times \int_{298}^{\text{preheated oil } T} C_p(T)_{\text{oil}} dT \right] \quad (3)$$

เมื่อ \dot{m}_{air} คืออัตราการไหลของอากาศเผาไหม้ มีค่าเท่ากับ $21,610 \text{ Nm}^3/\text{hr} = 964,732 \text{ mol/hr}$

\dot{m}_{oil} คืออัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ $1,644 \text{ kg/hr}$

$C_{p,\text{air}}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศเผาไหม้ (cal/g mol) โดย

$$C_{p,\text{air}} = 6.713 + 0.04697 \cdot 10^{-4} T + 0.01147 \cdot 10^{-10} T^2 - 0.4696 \cdot 10^{-18} T^3$$

$C_{p,\text{oil}}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะน้ำมันเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับ 2 kJ/kg.K

และ preheated air T และ preheated oil T คืออุณหภูมิอุ่นร้อนของอากาศเผาไหม้และน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 533 K และ 343 K ตามลำดับ

เมื่อแทนค่าและคำนวณค่าทั้งหมดจะได้ว่า $\text{Heat}_{\text{preheated air\&oil}}$ มีค่าเท่ากับ $6,371 + 148 = 6,519 \text{ MJ/hr}$

ดังนั้นความร้อนที่เข้าสู่ระบบทั้งหมดจึงมีค่าเท่ากับ $69,616 + 6,519 = 76,135 \text{ MJ/hr}$

- คำนวณ $\text{Heat}_{\text{combustion product}}$

ความร้อนที่สะสมอยู่ภายในก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการเผาไหม้ซึ่งในที่นี้ซึ่งกำหนดให้เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ ดังนั้นก๊าซผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ได้แก่ CO_2 H_2O O_2 และ N_2

$$\begin{aligned} \text{Heat}_{\text{combustion product}} = & \left[\dot{m}_{\text{CO}_2} \times \int_{298}^T C_p(T)_{\text{CO}_2} dT \right] + \left[\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \times \int_{298}^T C_p(T)_{\text{H}_2\text{O}} dT \right] \\ & + \left[\dot{m}_{\text{O}_2} \times \int_{298}^T C_p(T)_{\text{O}_2} dT \right] + \left[\dot{m}_{\text{N}_2} \times \int_{298}^T C_p(T)_{\text{N}_2} dT \right] \end{aligned} \quad (4)$$

เมื่อ \dot{m}_{CO_2} , $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$, \dot{m}_{O_2} และ \dot{m}_{N_2} คืออัตราการไหลของก๊าซ CO_2 , H_2O , O_2 และ N_2 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 118,031 94,425 37,351 และ 762,138 mol/hr ตามลำดับ

$C_p(T)_{\text{CO}_2}$, $C_p(T)_{\text{H}_2\text{O}}$, $C_p(T)_{\text{O}_2}$ และ $C_p(T)_{\text{N}_2}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของ H_2O , O_2 และ N_2 ตามลำดับ (cal/g mol) มีค่าดังนี้

$$C_p(T)_{\text{CO}_2} = 5.316 + 1.4285 * 10^{-4} T - 0.8362 * 10^{-10} T^2 + 1.784 * 10^{-18} T^3$$

$$C_p(T)_{\text{H}_2\text{O}} = 7.7 + 0.04594 * 10^{-4} T + 0.2521 * 10^{-10} T^2 - 0.8587 * 10^{-18} T^3$$

$$C_p(T)_{\text{O}_2} = 6.085 + 0.3631 * 10^{-4} T - 0.1709 * 10^{-10} T^2 + 0.3133 * 10^{-18} T^3$$

$$C_p(T)_{\text{N}_2} = 6.903 - 0.03573 * 10^{-4} T + 0.193 * 10^{-10} T^2 - 0.6861 * 10^{-18} T^3$$

ค่าตัวแปรและจัดรูปสมการได้

$$\text{Heat}_{\text{com. pro.}} = -8,537 + 28.6373T + 0.3304 * 10^{-4} T^2 + 0.0918 * 10^{-10} T^3 - 0.3994 * 10^{-18} T^4$$

จากสมการ $\text{Heat}_{\text{combustion}} + \text{Heat}_{\text{preheated air\&oil}} = \text{Heat}_{\text{combustion product}}$ จะได้ว่า

$$76,135 = -8,537 + 28.6373T + 0.3304 * 10^{-4} T^2 + 0.0918 * 10^{-10} T^3 - 0.3994 * 10^{-18} T^4$$

หรือ

$$-0.3994 * 10^{-18} T^4 + 0.0918 * 10^{-10} T^3 + 0.3304 * 10^{-4} T^2 + 28.6373T + 84,672 = 0$$

แก้สมการหาค่า T ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,948 K

ดังนั้นเปลวไฟแอดเดียบาติกของการเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 2,948 K หรือ 2,675 °C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจีรวัตร ตีรีพิเชษฐกุล เกิดวันที่ 11 สิงหาคม พ.ศ.2524 จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิตจากสาขาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2547 และเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร ฝ่ายวิจัยและพัฒนาโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จากนั้นได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2551 เป็นต้นมา