

ยการศึกษาการออกแบบส่วนอ่อนแห่งเหล็กด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาเหล็ก

นายกิตติพงษ์ กังวานสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

A STUDY OF CHARGE PREHEATING CHAMBER DESIGN BY FLUE GAS FOR
REHEATING FURNACE

Mr. Kitipong Kangvanskol

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาการออกแบบส่วนอุ้งเท้าเหล็กด้วยไอเสีย

สำหรับเตาเผาเหล็ก

โดย

นายกิติพงศ์ กังวานสกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

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

กิตติพงษ์ กังวานสกล : การศึกษาการออกแบบส่วนอุ่นแห้งเหล็กด้วยไอเสียสำหรับเตาเผาเหล็ก. (A STUDY OF CHARGE PREHEATING CHAMBER DESIGN BY FLUE GAS FOR REHEATING FURNACE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.จิตติน แดงतीयง, 157 หน้า.

อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานมากเป็นลำดับต้นๆ เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาประเทศเนื่องจากผลผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กจะถูกป้อนให้กับอุตสาหกรรมปลายทางต่างๆ อุตสาหกรรมเหล็ก สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชั้นคือ ชั้นต้น ชั้นกลาง และชั้นปลาย ในส่วนที่จะศึกษาจะเป็นอุตสาหกรรมเหล็กชั้นปลายที่เป็นการนำเอาผลิตภัณฑ์เหล็กแห้งมาแปรรูปเป็นเหล็กแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการรีดเป็นแผ่นหรือการดึงเป็นเหล็กข้อ การที่จะแปรรูปเหล็กนั้นหลายๆ ครั้งจะต้องให้ความร้อนกับเหล็กเสียก่อน ซึ่งอุปกรณ์ที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นเหล็กก็คือเตาเผาเหล็ก ความร้อนจากเตาเผาเหล็กจะเป็นการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรงและจะเกิดไอเสียที่ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียมหาศาล ตามปกติแล้วโรงงานเหล็กจะนำเอาไอเสียที่ได้ไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศเพื่อนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ แต่จากการศึกษาข้อมูลพบว่าอุณหภูมิไอเสียหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศแล้วยังสูงถึง 350-450 °C หากปริมาณการผลิตสูง ความร้อนปริมาณมหาศาลก็จะสูญเสียไป การนำความร้อนกลับมาอุ่นเหล็กใหม่ก็เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ งานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นการศึกษาโดยการจำลองสภาพให้ไอเสียที่ยังมีความร้อนหลงเหลืออยู่นั้นไหลผ่านต่อเข้าสู่ส่วนอุ่นแห้งเหล็กที่ออกแบบขึ้น ซึ่งจะแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียกับแห้งเหล็กที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก เพื่อที่จะดูว่าสามารถประหยัดพลังงานได้มากขนาดไหน และมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่เท่าไร ผลการศึกษาที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งที่ใช้เตาเผาเหล็กขนาด 275 ตัน/ชม. วัตถุประสงค์ในการผลิตคือเหล็กแท่งแบน (Slab) และใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง พบว่าการนำไอเสียที่เหลือทิ้งจากเตาเผาเหล็กซึ่งมีอุณหภูมิขากออกอยู่ที่ 408.37°C มาอุ่น Slab ขนาดเฉลี่ย 250x1260x9240 mm หนัก 22.88 ตัน จำนวน 18 แท่ง เป็นเวลา 90 นาที จากการคำนวณสามารถเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นเหล็กได้จาก 30°C ขึ้นได้เป็น 95.57°C คิดเป็นจำนวนเงินที่ประหยัดได้จากการลดน้ำมันเชื้อเพลิงได้ 50,394 บาท/วัน มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 0.707 ปี

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5370207821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : REHEATING FURNACE/ PREHEATING CHAMBER/ FLUE GAS

KITIPONG KANGVANSKOL : A STUDY OF CHARGE PREHEATING CHAMBER BY FLUE GAS FOR REHEATING FURNACE. ADVISOR : ASS.PROF.CHITTING TANGTHIENG, Ph.D., 157 pp.

The iron and steel industry is one of the major industries for developing the country and is ranked as one of the highest energy consumption among all industrial sectors. It is also served as a primary industry that provides materials to secondary industries as well. This present study focuses on a slab, a product from a steelmaking process, which will be sent to a hot-rolling mill to form a final product. Before the rolling process, slab is heated to a proper temperature by charging into a reheating furnace. Heat is generated by a combustion process from direct-fired burners. In general, heat loss from the reheating furnace occurs by several mechanisms including the flue gas loss. Although a recuperator is used to reduce heat loss by recovering some of that to preheat the combustion air, the exit flue gas temperature is still as high as 350-450°C. This research studies the simulation of the flue gas flow with the remaining thermal energy into an additional design section for preheating the slab before charging into reheating furnace. This will result in a higher slab charging temperature and a reduction of fuel consumption. The case study is performed on a pusher-type reheating furnace using fuel oil. Another consideration includes the acid dew-point of the flue gas as the lowest criteria for the flue gas temp. The result from a 275-ton/hr reheating furnace shows that seventeen slabs with a size of 250x1260x9240 mm and a weight of 22.88 ton can be preheated from 30°C to 95.57°C. The preheating time is 90 minutes with the flue gas temperature of 408.37°C. The energy saving is calculated to be fuel cost of 50,394 bahts per day which gives a payback period of 0.707 years

Department : Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสสำคัญในการทำงานวิจัยฉบับนี้ รวมถึงให้ความกรุณาถ่ายทอด ความรู้ คำแนะนำ ประสบการณ์อันล้ำค่าต่างๆ ที่มีคุณค่ายิ่ง อันเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาทิต ภัคดี ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่สละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานชิ้นนี้ จนกระทั่ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา อันคุณค่าและประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ และสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ญ |
| สารบัญรูป | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 4 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็ก..... | 5 |
| 2.2 การประหยัดพลังงานด้วยการป้อนเหล็กร้อน (Hot charging) ในเตาเผาเหล็ก..... | 8 |
| 2.3 จุดน้ำค้างกรด (Acid dew point) | 11 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน | 15 |
| 3.1 การถ่ายเทความร้อน | 15 |
| 3.1.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer) | 15 |
| 3.1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)..... | 16 |
| 3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)..... | 17 |
| 3.1.4 การนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent conduction) | 19 |
| 3.1.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน | 22 |
| 3.1.5.1 ชั้นขอบเขต..... | 22 |
| 3.1.5.1.1 ชั้นขอบเขตของความเร็ว..... | 22 |
| 3.1.5.1.2 ชั้นขอบเขตของอุณหภูมิ | 23 |
| 3.1.5.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดกับเฉลี่ย | 24 |

| | | |
|-----------|--|----|
| 3.1.5.3 | การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกแบบบังคับ | 24 |
| 3.1.5.3.1 | การไหลแบบราบเรียบบนแผ่นราบ | 26 |
| 3.1.5.3.2 | การไหลแบบปั่นป่วนบนแผ่นราบ | 26 |
| 3.1.5.3.3 | ชั้นขอบเขตแบบผสม | 27 |
| 3.1.5.4 | การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบภายใน | 27 |
| 3.1.5.4.1 | การไหลแบบราบเรียบ | 28 |
| 3.1.5.4.2 | การไหลแบบปั่นป่วน | 29 |
| 3.1.5.4.3 | ท่อที่ไม่เป็นวงกลม | 29 |
| 3.2 | อุตสาหกรรมเหล็ก | 31 |
| 3.2.1 | อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น | 32 |
| 3.2.2 | อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง | 34 |
| 3.2.3 | อุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย | 37 |
| 3.3 | การเผาไหม้และเชื้อเพลิง | 38 |
| 3.3.1 | การเผาไหม้ | 38 |
| 3.3.2 | เชื้อเพลิง | 40 |
| 3.4 | สมดุลมวลและสมดุลความร้อน | 42 |
| 3.4.1 | สมดุลมวล | 42 |
| 3.4.1 | สมดุลความร้อน | 45 |
| 3.4.1.1 | สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก | 46 |
| 3.4.1.2 | สมดุลความร้อนของ Recuperator | 51 |
| บทที่ 4 | เตาเผาเหล็ก | 53 |
| 4.1 | ลักษณะของเตาเผาเหล็กที่จะศึกษา | 53 |
| 4.2 | การทำงานของเตาเผาเหล็ก | 55 |
| 4.3 | การเก็บข้อมูล | 59 |
| 4.4 | สมดุลมวลและสมดุลความร้อน | 61 |
| 4.4.1 | สมดุลมวล | 62 |
| 4.4.2 | สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก | 63 |
| 4.4.3 | สมดุลความร้อนของ recuperator | 64 |
| บทที่ 5 | การออกแบบและการคำนวณส่วนอุณหที่เหล็กของเตาเผาเหล็ก | 66 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 5.1 | เงื่อนไขในการออกแบบ | 66 |
| 5.2 | ลักษณะของอุปกรณ์อุณหิื้นเหล็กที่ออกแบบ | 67 |
| 5.3 | หลักที่ใช้ในการคำนวณ | 68 |
| 5.3.1 | การคำนวณการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิ | 68 |
| 5.3.2 | การคำนวณการสูญเสียอุณหภูมิของเหล็ก | 71 |
| 5.3.3 | การคำนวณค่าจุดน้ำค้างกรดของไอเสีย | 72 |
| บทที่ 6 | ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ | 73 |
| 6.1 | ผลการคำนวณ | 73 |
| 6.1.1 | ข้อมูลที่น่ามาใช้ในการคำนวณ | 73 |
| 6.1.2 | การคำนวณหาอุณหภูมิจุดน้ำค้างกรด | 73 |
| 6.1.3 | ผลการคำนวณอุณหภูมิขึ้นเหล็ก | 75 |
| 6.1.4 | พลังงานที่ประหยัดได้ | 80 |
| 6.1.5 | พลังงานที่ใช้สำหรับส่วนอุณหิื้นเหล็ก | 84 |
| 6.1.6 | การประมาณราคาของส่วนอุณหิื้นเหล็ก | 85 |
| 6.1.7 | ระยะเวลาคืนทุนสำหรับการอุณหิื้นเหล็กแต่ละแบบ | 87 |
| 6.2 | การวิเคราะห์การประหยัดพลังงาน | 88 |
| บทที่ 7 | สรุปผลการศีกษา | 93 |
| 7.1 | สรุปผลการศีกษา | 93 |
| 7.2 | ปัญหาและข้อเสนอแนะสำหรับการศีกษาเพิ่มเติม | 94 |
| | รายการอ้างอิง | 96 |
| | ภาคผนวก | 99 |
| | ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ | 100 |
| | ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ | 129 |
| | ภาคผนวก ค. ตัวอย่างโปรแกรม | 138 |
| | ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 157 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|--------------|--|----|
| ตารางที่ 3.1 | ตารางแสดงตัวเลขน้ำหนักเซลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มที่ ในท่อที่หน้าตัดไม่เป็นวงกลม | 30 |
| ตารางที่ 3.2 | ตารางแสดงองค์ประกอบของอากาศ | 38 |
| ตารางที่ 3.3 | ตารางแสดงองค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย | 41 |
| ตารางที่ 3.4 | ตารางแสดงคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันเตา | 41 |
| ตารางที่ 3.5 | ตารางแสดงสมมูลมวลที่ไหลเข้าและออกจากเตาเผาเหล็ก | 43 |
| ตารางที่ 3.6 | ตารางแสดงสมมูลความร้อนของเตาเผาเหล็ก | 46 |
| ตารางที่ 3.7 | ตารางแสดงสมมูลความร้อนที่ recuperator..... | 51 |
| ตารางที่ 4.1 | ตารางการทำงานในเดือนพฤศจิกายนของโรงงานในปี 2554 แยกตามวันที่ผลิต | 54 |
| ตารางที่ 4.2 | ตารางการผลิตเหล็กในเดือนพฤศจิกายน 2554 ที่ทำการศึกษา แยกตามวันที่ผลิต .. | 56 |
| ตารางที่ 4.3 | แสดงลักษณะของเตาเผาเหล็ก | 58 |
| ตารางที่ 4.4 | แสดงข้อมูลที่ต้องการ | 60 |
| ตารางที่ 4.5 | ตารางแสดงข้อมูลที่ต้องการวัดของโรงงานในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554..... | 61 |
| ตารางที่ 4.6 | ตารางแสดงสมมูลมวลของเตาเผาที่ 1 ในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554..... | 62 |
| ตารางที่ 4.7 | ตารางแสดงสมมูลความร้อนของเตาเผาที่ 1 ในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554..... | 63 |
| ตารางที่ 4.8 | ตารางแสดงสมมูลความร้อนของ recuperator ของเตาที่ 1 ในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554 | 64 |
| ตารางที่ 5.1 | แสดงความกว้างยาวสูงของส่วนอุ่นแห้งเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ | 68 |
| ตารางที่ 6.1 | ข้อมูลที่น่ามาใช้คำนวณ | 73 |
| ตารางที่ 6.2 | แสดงสัดส่วนโมลและความดันย่อยของสารผสมในไอเสีย | 74 |
| ตารางที่ 6.3 | อุณหภูมิที่เปลี่ยนและพลังงานที่ประหยัดได้สำหรับการอุ่น 1 ชั่วโมง | 80 |
| ตารางที่ 6.4 | อุณหภูมิที่เปลี่ยนและพลังงานที่ประหยัดได้สำหรับการอุ่น 2 ชั่วโมง | 81 |
| ตารางที่ 6.5 | อุณหภูมิที่เปลี่ยนและพลังงานที่ประหยัดได้สำหรับการอุ่น 3 ชั่วโมง | 82 |
| ตารางที่ 6.6 | อุณหภูมิที่เปลี่ยนและพลังงานที่ประหยัดได้สำหรับการอุ่น 4 ชั่วโมง | 83 |
| ตารางที่ 6.7 | พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับส่วนอุ่นแห้งเหล็กแต่ละแบบ..... | 84 |
| ตารางที่ 6.8 | ตารางแสดงความกว้างยาวสูงของเตาเพื่อใช้ประมาณราคา | 85 |
| ตารางที่ 6.9 | ตารางแสดงจำนวนเสาและคานที่ต้องใช้ในการรับน้ำหนักโครงสร้าง | 86 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| ตารางที่ 6.10 | ตารางแสดงราคาก่อสร้าง..... | 87 |
| ตารางที่ 6.11 | ตารางประมาณระยะเวลาคืนทุนของการก่อสร้าง | 87 |
| ตารางที่ 6.12 | ตารางแสดงสมมูลความร้อนส่วนอุ่นแห้งเหล็กในรอบเวลา 2 ชั่วโมง | 89 |
| ตารางที่ 6.13 | ตารางแสดงปริมาณสมมูลความร้อนส่วนอุ่นแห้งเหล็กในรอบเวลา 2 ชั่วโมง..... | 90 |
| ตารางที่ ก.1 | ตารางแสดงค่าความดันภายในเตา อัตราการใช้เชื้อเพลิง %ออกซิเจนใน ไอเสียและอัตราการไหลของอากาศ..... | 101 |
| ตารางที่ ก.2 | ตารางแสดงข้อมูลของอุณหภูมิไอเสีย และอุณหภูมิของอากาศขาเข้า | 115 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 สมดุลความร้อนขาเข้าและออกของเตาเผาเหล็กโดย W.H.Chen และ คณะ..... | 5 |
| รูปที่ 2.2 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กจากเตาเผาแบบ pusher ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง..... | 7 |
| รูปที่ 2.3 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กจากเตาเผาแบบ pusher ขนาด 12 tons/hr..... | 8 |
| รูปที่ 2.4 แสดงการลดลงของอุณหภูมิเหล็กแท่งเทียบกับเวลา..... | 10 |
| รูปที่ 2.5 แสดงพลังงานที่ใช้กับอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นเหล็ก | 10 |
| รูปที่ 2.6 ความร้อนที่สามารถใช้ได้จากไอเสียตามอุณหภูมิและออกซิเจนส่วนเกิน ใน ไอเสีย | 11 |
| รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบระหว่าง โมเดลของ ZareNezhad และ Alamnian กับ V.B. Correlation..... | 13 |
| รูปที่ 3.1 การถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติด้วยการนำความร้อน | 15 |
| รูปที่ 3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน | 17 |
| รูปที่ 3.3 การแผ่รังสีความร้อน ก. ที่พื้นผิว ข. ระหว่างพื้นผิวกับสิ่งแวดล้อม | 18 |
| รูปที่ 3.4 การเย็นตัวของชิ้นของแข็งที่จมอยู่ในของเหลว..... | 20 |
| รูปที่ 3.5 ชั้นขอบเขตของความเร็วบนแผ่นราบ | 22 |
| รูปที่ 3.6 ชั้นขอบเขตของอุณหภูมิมบนแผ่นราบ..... | 24 |
| รูปที่ 3.7 การไหลแบบขนานบนแผ่นราบ..... | 25 |
| รูปที่ 3.8 การพัฒนาของชั้นขอบเขตภายในท่อ | 28 |
| รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของอุตสาหกรรมเหล็ก | 31 |
| รูปที่ 3.10 กระบวนการใน blast furnace | 33 |
| รูปที่ 3.11 Basic Oxygen Furnace..... | 35 |
| รูปที่ 3.12 รูปแบบของเตา EAF | 36 |
| รูปที่ 4.1 ภาพเส้นทางการผลิตเหล็กในโรงงาน | 53 |
| รูปที่ 4.2 การทำงานของเตาเผาเหล็ก | 55 |
| รูปที่ 4.3 ลักษณะภายในเตาเผาเหล็ก | 59 |
| รูปที่ 4.4 แสดงสมดุลความร้อนของเตาเผาและ recuperator ในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554..... | 65 |
| รูปที่ 5.1 แผนผังของอุปกรณ์อุ่นแท่งเหล็กด้วยไอเสียแบบ batch..... | 67 |
| รูปที่ 5.2 แสดงการผ่านไอเสียเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับชิ้นเหล็ก | 68 |
| รูปที่ 5.3 แสดงการคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเหล็กกับ ไอเสีย | 70 |
| รูปที่ 6.1 แสดงผลการคำนวณการอุ่นชิ้นเหล็ก 1 ชั่วโมง | 76 |

| | | |
|------------|--|----|
| รูปที่ 6.2 | แสดงผลการคำนวณการอุ่นขึ้นเหล็ก 2 ชั่วโมง | 77 |
| รูปที่ 6.3 | แสดงผลการคำนวณการอุ่นขึ้นเหล็ก 3 ชั่วโมง | 78 |
| รูปที่ 6.4 | แสดงผลการคำนวณการอุ่นขึ้นเหล็ก 4 ชั่วโมง | 79 |
| รูปที่ 6.5 | รูปแสดงตำแหน่งของเสารับน้ำหนักพื้นทุกต้นในรูปแบบการอุ่นแบบ 1 ชั่วโมง | 86 |
| รูปที่ 6.6 | สมดุลความร้อนรวมเมื่อใส่ส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กเข้าไปในระบบ | 92 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่เป็นพื้นฐานสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เนื่องจากเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่ผลิตวัตถุดิบเพื่อส่งต่อไปยังผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมรถยนต์ อุตสาหกรรมอาหารกระป๋อง อุตสาหกรรมก่อสร้าง ฯลฯ เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานสูงมากอันดับต้นๆ ของประเทศและของโลก จากโครงการเกณฑ์การศึกษาการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก (2006) พบว่าในปี 2004 อุตสาหกรรมเหล็กพื้นฐานนั้นมีสัดส่วนการใช้พลังงานอยู่ที่ประมาณ 613 ktoe ซึ่งเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมรวมอยู่ที่ 939 ktoe จะอยู่ที่ประมาณ 65% ซึ่งถือได้ว่ามีค่าสูงมากและยังคงมีแนวโน้มที่จะขยายตัวขึ้นอีกด้วย การศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุตสาหกรรมเหล็กจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะช่วยลดการใช้พลังงานและการใช้เชื้อเพลิง ซึ่งราคาเชื้อเพลิงของตลาดโลกนั้นมีราคาสูงขึ้นทุกวันเนื่องจากทรัพยากรที่มีจำกัด นอกจากนี้ยังช่วยลดก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นต้นเหตุของภาวะโลกร้อนได้อีกด้วยเพราะอุตสาหกรรมเหล็กปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่คิดเป็นสัดส่วนแล้วอยู่ที่ 7 % ของทั้งหมด (Y.Kim และ E.Worrell, 2002) จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการศึกษาและปรับปรุง ให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ของอุตสาหกรรมเหล็ก เพื่อพัฒนาภาพรวมของอุตสาหกรรมของประเทศต่อไป

อุตสาหกรรมเหล็กแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคืออุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง และอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย สำหรับอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้นจะเป็นการนำเอาสินแร่มาถลุงเพื่อผลิตออกมาเป็นวัตถุดิบคือเหล็กถลุงและเหล็กพูนเพื่อส่งต่อไปยังอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง ปัจจุบันนี้ในประเทศไทยยังไม่มีอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กขั้นต้น อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางจะนำเอาเหล็กถลุงและเหล็กพูนรวมทั้งเศษเหล็กที่ได้จากการรีไซเคิลมาหลอมเพื่อปรับปรุงคุณภาพและส่วนผสมทางเคมี ผลิตออกมาเป็นเหล็กแท่งซึ่งมีอยู่ 3 ประเภทคือ เหล็กแท่งยาว (billet) เหล็กแท่งใหญ่ (bloom) และเหล็กแท่งแบน (slab) อุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลายจะเป็นการนำวัตถุดิบจากขั้นกลางมาอุ่นในเตาเผาเหล็ก (reheating furnace) เพื่อที่จะทำการรีดออกเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปทั้งเหล็กแผ่นเหล็กกลมต่อไป ซึ่งในส่วนเตาเผาเหล็กจะเป็นส่วนที่จะทำการศึกษาเพื่อดูการใช้พลังงานของโรงงานแบบนี้ในประเทศไทยและทำการวิเคราะห์เพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กต่อไป

สำหรับกระบวนการในเตาเผาเหล็กนั้นจะเป็นการส่งเหล็กเข้าไปในเตาเผาเพื่อเผาอ่อนเหล็ก ให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการทำการรีดแปรรูปแบบร้อน ซึ่งอุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 1100-1250°C ให้ความร้อนจากเชื้อเพลิงคือก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมันเตาผ่านเปลวไฟโดยตรง ภายในเตาเผาจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ส่วน preheat heating และ soaking ในส่วน preheat จะเป็นการอุ่นขึ้นเหล็กให้ร้อนจากไอเสียที่ไหลผ่าน ส่วน heating จะเป็นการเผาเหล็กให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงตามที่ต้องการ และในส่วน soaking จะเป็นการให้ความร้อนต่อจนขึ้นเหล็กมีค่าอุณหภูมิที่คงที่ตลอดชิ้นงาน สำหรับการให้ความร้อนกับชิ้นเหล็กผ่านหัวเผาโดยตรงนั้นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะต้องสมบูรณ์เพื่อให้พลังงานที่สูงที่สุดและเป็นการลดการเกิดก๊าซพิษด้วย ออกซิเจนที่เผาไหม้จะมาจากอากาศที่ประกอบด้วย ไนโตรเจนประมาณ 79% และออกซิเจน 21% การเผาไหม้ที่สมบูรณ์ในทางทฤษฎีจะเกิดขึ้นเมื่ออากาศกับเชื้อเพลิงผสมกันด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมเรียกว่าอัตราส่วนระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (stoichiometric air-fuel ratio)

$$AF_{\text{stoic}} = \left(\frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \right) \quad (1.1)$$

ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนไปตามชนิดของเชื้อเพลิงต่างๆ ถ้าสารผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าที่พอดี การเผาไหม้ก็ยังคงเกิดขึ้นได้และในทางปฏิบัตินั้นการจะผสมสารให้ทั่วถึงกันเพื่อทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์พอดีนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการป้อนอากาศเพิ่มเข้าไปกับการเผาไหม้ที่เรียกว่า อากาศส่วนเกิน (excess air) เพื่อให้การเผาไหม้มีค่าสมบูรณ์มากขึ้น

$$\% \text{ excess air} = \left(\frac{AF_{\text{actual}}}{AF_{\text{stoic}}} - 1 \right) \times 100\% \quad (1.2)$$

ตามปกตินั้นการตรวจสอบการเผาไหม้นั้นจะตรวจสอบจากปริมาณส่วนผสมต่างๆ ที่ออกมากับไอเสีย ถ้าการเผาไหม้มีค่าสมบูรณ์ตามทฤษฎีแล้วนั้น ไอเสียที่ออกมาจะมีเพียงส่วนผสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน และ ไอน้ำเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติจะพบคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ออกมากับไอเสียด้วย ซึ่งก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นก๊าซพิษที่ไม่ต้องการ การใส่อากาศส่วนเกินเล็กน้อยเพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น จะเป็นการลดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อีกทางหนึ่งด้วย เมื่อมาพิจารณาในมุมมองทางด้านพลังงานนั้น การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์นั้นจะทำให้พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มีค่าออกมาไม่เต็มที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการเผาไหม้นั้นต่ำลง แต่การใส่อากาศส่วนเกินที่มากจนเกินไปนั้น ออกซิเจนที่หลงเหลือจากการเผาไหม้จะเป็นตัวพาความร้อนออกไปกับไอเสียโดยตรงและทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนลดลงได้เช่นกัน จึงต้องกำหนดปริมาณอากาศส่วนเกินให้เหมาะสมกับเชื้อเพลิงที่ใช้ สำหรับการหาค่าปริมาณอากาศส่วนเกินนั้นสามารถทำได้จากการตรวจวิเคราะห์ไอเสียด้วยเครื่องมือที่เรียกว่า

เครื่องมือตรวจวิเคราะห์ไอเสีย (flue gas analyzer) ซึ่งมีลักษณะเป็นหัวโพรบสำหรับແห่ลงไปในท่อหรือปล่องซึ่งไอเสียที่จะทำการวัดไหลผ่าน หลังจากนั้นจะนำค่าปริมาณออกซิเจนในไอเสียมาคำนวณค่าอากาศส่วนเกิน ซึ่งมีค่าที่เหมาะสมสำหรับเชื้อเพลิงต่างๆ สำหรับน้ำมันเตา excess air จะอยู่ที่ 16-29% สำหรับก๊าซธรรมชาติจะอยู่ที่ 10-22%

การควบคุมความดันของห้องเผาไหม้ให้เหมาะสมก็เป็นส่วนสำคัญสำหรับการประหยัดพลังงานในการเผาไหม้ เพราะโดยทั่วไปแล้วความร้อนที่เข้าสู่เตาเผาจะเกิดการสูญเสียไปในลักษณะต่างๆ ทั้งการรั่วของไอเสีย การไหลเข้าของอากาศ ความดันที่เหมาะสมจะอยู่ที่ + 5 kPa เกจเนื่องจากไม่ต้องการให้อากาศภายนอกไหลเข้ามาผสมและพาความร้อนออกไปกับไอเสีย และก็ไม่ต้องการให้อากาศภายในรั่วไหลออกไปมากจนเกินไป เพราะความร้อนจากไอเสียยังสามารถนำไปใช้ต่อที่ recuperator เพื่อ preheat อากาศก่อนเข้าสู่เตาเผาได้

จากการศึกษารายงานฉบับสุดท้ายของโครงการปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเหล็กโดยการควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหมาะสมนั้นในโรงงานแห่งหนึ่งซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง เตาเผาที่ใช้เป็นเตาเผาแบบ pusher ขนาด 12 tons/hr นั้น พลังงานของไอเสียที่ออกจาก recuperator แล้วยังมีค่าถึง 19% จากค่าความร้อนทั้งหมดที่ใส่เข้าไป ซึ่งการนำเอาความร้อนที่ปล่อยทิ้งนั้นมาอุ่นขึ้นเหล็กที่มีอุณหภูมิเท่ากับอากาศภายนอกก่อนที่จะนำเข้าสู่เตาเผาจะเป็นอีกวิธีหนึ่ง ที่ช่วยประหยัดพลังงานได้ โดยจากการศึกษาของ M.Shamanian และ A.Najafizadeh (2004) นั้นพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของขึ้นเหล็กก่อนนำเข้าเตาเผาทุกๆ 100°C จะช่วยประหยัดพลังงานได้ประมาณ 80-120 kJ/kg การศึกษานี้จึงจะใช้แนวทางนี้ในการออกแบบและวิเคราะห์ถึงอุปกรณ์การอุ่นเหล็กด้วยความร้อนทิ้งจากไอเสีย เพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานในการผลิตเหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาถึงการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กที่ใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประสิทธิภาพของเตาเผาและการประเมินความร้อนทิ้งจากไอเสีย
2. เพื่อออกแบบและวิเคราะห์ถึงการประหยัดพลังงาน เชื้อเพลิง เมื่อใช้อุปกรณ์อุ่นเหล็กจากไอเสีย รวมทั้งวิเคราะห์ถึงความคุ้มค่าทางการลงทุน

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ตรวจสอบวัดและบันทึกข้อมูลการทำงานของเตาเผาเหล็ก และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กทั้งในแง่การใช้พลังงานและไอเสีย
2. ออกแบบอุปกรณ์อุ่นขึ้นเหล็กก่อนนำเข้าเตาเผาจากไอเสีย โดยการใช้ผลที่ได้จากการศึกษาเตาเผาเหล็กมาเป็นข้อมูลในการศึกษาออกแบบ
3. ทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์อุ่นขึ้นเหล็กที่ออกแบบด้านการลดการใช้พลังงาน รวมทั้งความคุ้มค่าทางการลงทุน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. ทราบถึงการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็กและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน เพื่อที่จะสามารถนำไปวิเคราะห์ต่อไปในการหาวิธีประหยัดพลังงานในเตาเผาเหล็ก
2. ทราบถึงวิธีการประหยัดพลังงานด้วยการนำไอเสียที่เหลือทิ้งมาอุ่นขึ้นเหล็กก่อนเข้าสู่เตาเผาเหล็ก รวมทั้งเป็นต้นแบบให้กับการสร้างอุปกรณ์อุ่นเหล็กด้วยความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียในอนาคต

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. รวบรวมข้อมูลที่สำคัญและวางแผนออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบการอุ่นเหล็กด้วยความร้อนทิ้งจากไอเสีย
3. ติดต่อประสานงานกับโรงงานที่เป็นเป้าหมาย
4. เข้าตรวจสอบวัดและบันทึกข้อมูลการทำงานของเตาเผาเหล็ก
5. วิเคราะห์การใช้พลังงานในเตาเผาและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก
6. ออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบการอุ่นเหล็กด้วยความร้อนทิ้งจากไอเสีย
7. วิเคราะห์การประหยัดพลังงานเมื่อใช้อุปกรณ์การอุ่นเหล็กด้วยไอเสียเหลือทิ้ง
8. สรุปผลการศึกษา และทำเอกสารเผยแพร่เพื่อขยายผลให้มีการนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริง

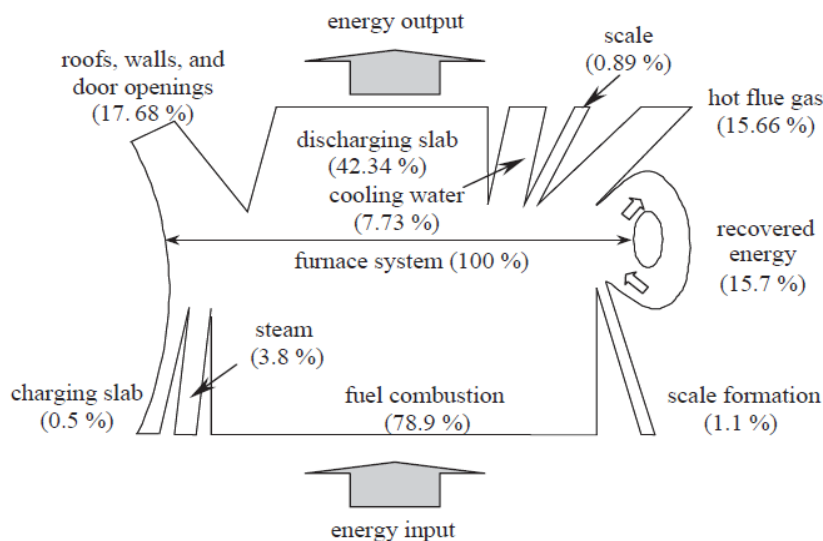
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำพลังงานความร้อนทิ้งของไอเสียจากเตาเผาเหล็กมาใช้ใหม่อีกครั้ง จึงสมควรทราบเกี่ยวกับรายละเอียดของการทำงานเกี่ยวกับเตาเผาเหล็กในงานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมาเสียก่อน เพื่อให้ทราบถึงปริมาณพลังงานที่หมุนเวียนในเตาเผาเหล็กและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการป้อนชิ้นเหล็กที่อุณหภูมิสูงเพื่อเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบเบื้องต้นในงานวิจัยชิ้นนี้

2.1 การศึกษาการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็ก

W.H. Chen และคณะ (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้พลังงานและประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กในโรงงานเหล็กรีดร้อนแห่งหนึ่งในประเทศไต้หวัน เตาเผาที่ศึกษาเป็นเตาเผาขนาด 250 tons/hr ยาว 40.52 m และกว้าง 10 m มี recuperator เพื่อนำความร้อนทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ เหล็กแท่งที่ใช้มีขนาด 1250 x 250 mm อุณหภูมิก่อนเข้าอยู่ที่ 25°C และขาออกอยู่ที่ 1250°C โดยการศึกษาจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการวิเคราะห์ พบว่าสมดุลความร้อนที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 2.2

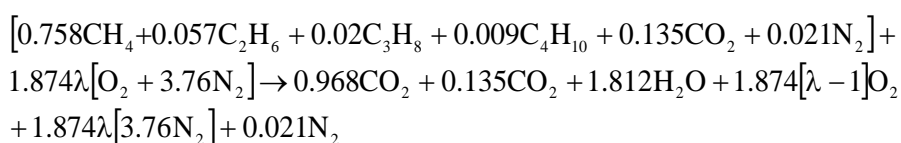


รูปที่ 2.1 สมดุลความร้อนขาเข้าและออกของเตาเผาเหล็กโดย W.H.Chen และ คณะ

(รูปและข้อมูลจาก W.H. Chen, 2005)

จากข้อมูลที่ได้พบว่าส่วนที่สำคัญของการศึกษานี้อยู่ที่ความร้อนทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 15.7% ของพลังงานทั้งหมด เหลือพลังงานที่ออกมากับไอเสีย 15.66% และเตาเผาเหล็กชนิดนี้มีประสิทธิภาพของการเปลี่ยนแปลงความร้อนถึง 86.33%

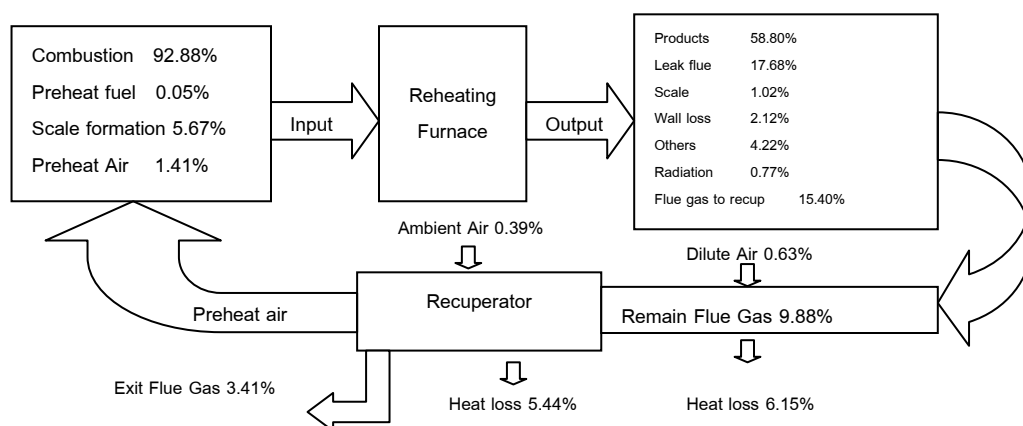
จิตติน แดงเที่ยง (2010) ได้ศึกษาถึงการวิเคราะห์ไอเสียเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก โดยตัวอย่างที่ศึกษาเป็นเตาเผาแบบ pusher ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง มีส่วนอุ่นอากาศร้อนด้วยไอเสีย (recuperator) เพื่อนำความร้อนเหลือทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง วัตถุดิบที่ใช้เป็นเหล็กแท่งขนาด 130 x 130 mm มีความยาว 6 หรือ 12 m การเดินเตาเป็นแบบ part load คือทำงานไม่เต็มที่เนื่องจากปริมาณการรีดเหล็กไม่สามารถทำได้ทันหากเดินเตาเต็มที วิเคราะห์สมดุลมวลจากปริมาณออกซิเจนในไอเสียจากสมการ



โดยที่พจน์ λ ในสมการคืออัตราส่วนแสดงอากาศส่วนเกินที่ใส่เข้าไปให้กับการเผาไหม้ นั่นเอง ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนด้วย flue gas analyzer ออกมาได้ตามสมการด้านล่าง ทำให้ได้ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลออกมา

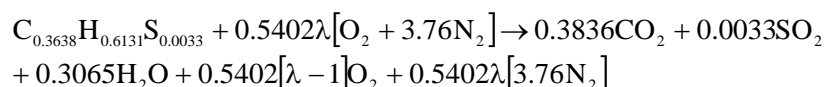
$$\lambda = \frac{1.874 - 0.750\left(\frac{\% \text{O}_2}{100}\right)}{1.874 - 0.892\left(\frac{\% \text{O}_2}{100}\right)} \quad (2.1)$$

เมื่อทำการวิเคราะห์สมดุลความร้อนก็จะได้ตามรูปที่ 2.1 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สมดุลความร้อนของโรงงานนี้จะพบว่าเมื่ออากาศที่ไหลเข้าไปผสมกับไอเสียก่อนที่จะเข้าสู่ recuperator ทำให้อุณหภูมิของไอเสียลดลงอย่างมาก ความร้อนที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ก็มีค่าลดลง



รูปที่ 2.2 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กจากเตาเผาแบบ pusher ขนาด 70 ตัน/ชั่วโมง

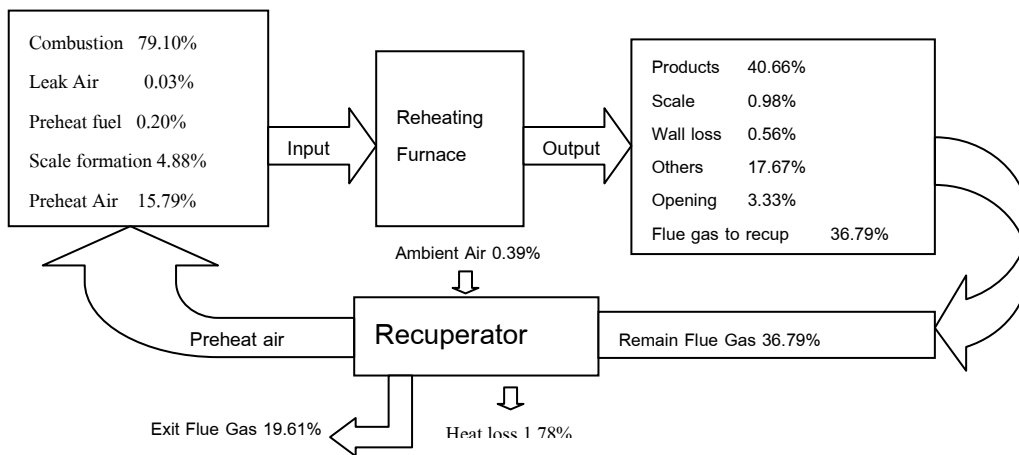
จากการศึกษารายงานฉบับสุดท้ายของโครงการศึกษาวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาเหล็ก(2010) โดยการควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหมาะสมนั้นตัวอย่างที่ศึกษาเป็นเตาเผาเหล็กขนาด 12 tons/hr มีอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงประมาณ 47 litres/ton เชื้อเพลิงที่ใช้เป็นน้ำมันเตาแบบ C เตาเป็นแบบ pusher มีเตาเผาเพียงโซนเดียวและมีหัวเผาอยู่ 2 หัว มี recuperator เพื่อนำความร้อนทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ วัสดุดิบที่ใช้เป็นเหล็กแท่งยาวขนาด 60x60 mm ถึง 120x120 mm ความยาว 2.5 m วิเคราะห์สมดุลมวลจากปริมาณออกซิเจนในไอเสียจากสมการ



โดยที่พจน์ λ ในสมการคืออัตราส่วนแสดงอากาศส่วนเกินที่ใส่เข้าไปให้กับการเผาไหม้ซึ่งสามารถหาได้จากกรวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนด้วย flue gas analyzer ออกมาได้ตามสมการทำให้ได้ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลออกมา

$$\lambda = \frac{0.540 - 0.153\left(\frac{\%O_2}{100}\right)}{0.540 - 2.571\left(\frac{\%O_2}{100}\right)} \quad (2.2)$$

เมื่อนำไปวิเคราะห์สมดุลความร้อนจะได้ตามรูปที่ 2.3 เหลือพลังงานที่ออกมากับไอเสีย 19.61%



รูปที่ 2.3 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กจากเตาเผาแบบ pusher ขนาด 12 tons/hr

จากข้อมูลที่มีผู้ศึกษาถึงปริมาณสมดุลความร้อนในเตาเผาเหล็ก พบว่าความร้อนที่เหลือทิ้งจากไอเสียก็ยังมีปริมาณมากพอสมควรสามารถนำมาให้ความร้อนกับชิ้นเหล็กก่อนที่จะนำเข้าสู่เตาเผาเหล็ก เพื่อเป็นการประหยัดพลังงานให้ได้สูงสุดต่อไป

2.2 การประหยัดพลังงานด้วยการป้อนเหล็กร้อน (Hot charging) ในเตาเผาเหล็ก

จากการศึกษาของ Minxing และคณะ (2010) เกี่ยวกับการใช้พลังงานในเตาเผาเหล็ก และการนำความร้อนทิ้งจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่โดยใช้โปรแกรม PHAST ในการคำนวณ ได้คำนวณการนำความร้อนทิ้งจากไอเสียกลับมาอุ่นชิ้นเหล็กจากสมการของ lump capacitance method

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T_{(t)} - T_a}{T_i - T_a} = \exp\left[-\left(\frac{hA_s}{\rho Vc}\right)t\right] \quad (2.3)$$

เมื่อ $T_{(t)}$ คือ อุณหภูมิที่ต้องการ (315°C), T_a คืออุณหภูมิของไอเสียที่ผ่านเข้ามา (815°C), T_i คืออุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นเหล็ก (2.7°C), ρ คือ ความหนาแน่นของเหล็ก 7800 kg/m^3 , c คือความจุความร้อนของเหล็ก, t คือเวลาที่ใส่ความร้อนให้กับตัวชิ้นงาน, A_s คือพื้นที่ผิวของเหล็กที่สัมผัสกับอากาศ, V คือปริมาตรของเหล็ก และ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของไอเสียที่ไหลผ่าน โดยที่การใช้สมการนี้มีเงื่อนไขอยู่ที่ตัวเลข Biot (Bi) ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 เสมอถึงจะสามารถใช้งานสมการนี้ได้ นิยามของตัวเลข Biot คือ

$$Bi = \frac{hL_c}{k} \quad (2.4)$$

โดยที่ $L_c = V/A_s$ และ k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของอากาศ

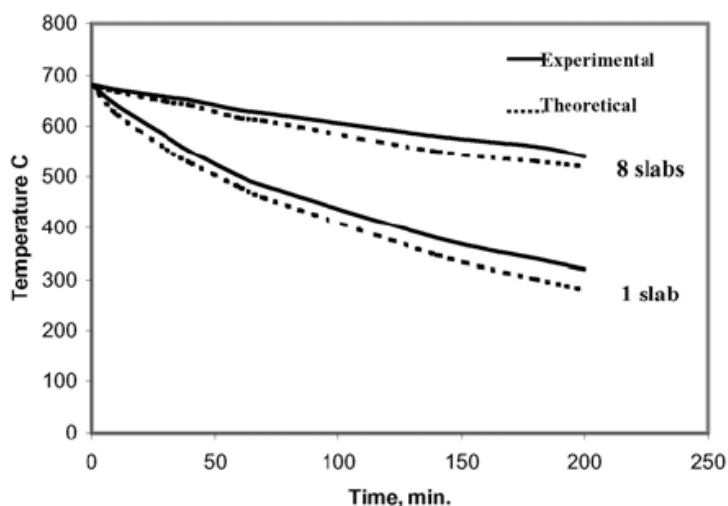
ผลจากการศึกษาพบว่า Bi ของเหล็กอยู่ที่ $0.03 (< 0.1)$ โดยที่ค่า h ที่ใช้คำนวณมีค่า $20 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ทำให้สามารถใช้ lump capacitance method ได้ และจากการคำนวณ เพื่อที่จะทำให้เหล็กมีอุณหภูมิจาก 2.7°C ขึ้นไปถึง 315°C จะใช้เวลา 1.48 ชั่วโมง และเพื่อที่จะทำให้ความเร็วของอากาศอยู่ที่ 19.05 ซม./นาที่ preheating box นี้จะต้องมีความยาว 1691.64 ซม. และจากการคำนวณด้วย PHAST พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิการป้อนชิ้นงานขึ้นไป 315°C จะสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 278.12 kJ/kg ประหยัดเงินได้ถึงปีละ $\$215,086$ หากคิดตามปริมาณการทำงานของแต่ละเตาเผาเหล็กที่ได้ศึกษา นอกจากนี้การศึกษาถึงสมดุลความร้อนในเตาเผาเหล็กที่สภาวะการทำงานต่างๆ ทำให้พบว่าการทำงานของแต่ละเตาเผาเหล็กที่สภาวะการทำงานเต็มทีนั้นจะทำให้เตาเผาเหล็กมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

จากการศึกษาของ Shamanian และ Najafidazeh (2004) เกี่ยวกับการป้อนเหล็กแท่งที่ยังร้อนอยู่เข้าสู่เตาเผาเหล็กที่ Mobarake Steel Company ซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กต่อเนื่องหลายขั้นนั้น เหล็กแท่งแบนจะถูกผลิตออกมาจากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง ขนาดคือ $20 \times 135 \times 1000 \text{ mm}$ อุณหภูมิที่ออกมาคือ 900°C เนื่องจากเหล็กที่ออกมานั้นจะต้องรอการผลิตในขั้นตอนต่อไป จึงต้องถูกนำไปวางทิ้งไว้ในพื้นที่โล่งและมีการสูญเสียความร้อนเกิดขึ้น การศึกษาของ Shamanian และ Najafidazeh จึงเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการลดของอุณหภูมิของเหล็กแท่งแบนต่อเวลา โดยเงื่อนไขในการศึกษานั้นจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ เมื่อวางเหล็กแท่งแบบเดียวกับ วางเหล็กแท่งซ้อนกัน 8 ชั้น โดยค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่เริ่มทำการวัดจะอยู่ที่ 660°C และได้ใช้สมการของ F.E Beiglzimer เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิที่ลดลงด้วย

$$T = (T_o - T_{os}) \exp \left[-0.0642 \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{nH} \right) \tau^{0.785} \right] + T_{os} \quad (2.5)$$

เมื่อ T และ T_{os} คืออุณหภูมิสุดท้ายและเริ่มต้นของเหล็กแท่ง, T_{os} คืออุณหภูมิของบรรยากาศ, T คือเวลา, H และ B คือความหนาและความกว้างของเหล็กแท่งแบน n คือ จำนวนเหล็กแท่งที่วางซ้อนกัน ผลการทดลองที่ได้จะออกมาตามรูปที่ 2.4 คือเมื่อผ่านไปหนึ่งชั่วโมงอุณหภูมิของเหล็กเดี่ยวจะลดไป 180°C แต่อุณหภูมิของเหล็ก 8 ชั้นวางทับกันจะลดลงไปเพียง 60°C แต่เมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองจริงกับผลที่ได้จากการประมาณของสมการของ Beiglzimer นั้นยังสรุปได้ว่าไม่แม่นยำเท่าที่ควร จึงนำมาปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ตามค่าที่ได้จากการทดลองได้ตามสมการ

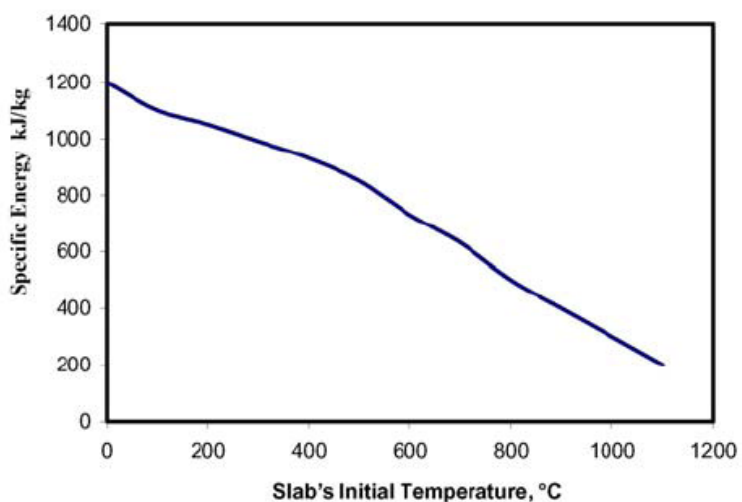
$$T = (T_o - T_{os}) \exp \left[-0.0530 \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{nH} \right) \tau^{0.848} \right] + T_{os} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.4 แสดงการลดลงของอุณหภูมิเหล็กแท่งเทียบกับเวลา

(Shamanian และ Najafidazeh, 2004)

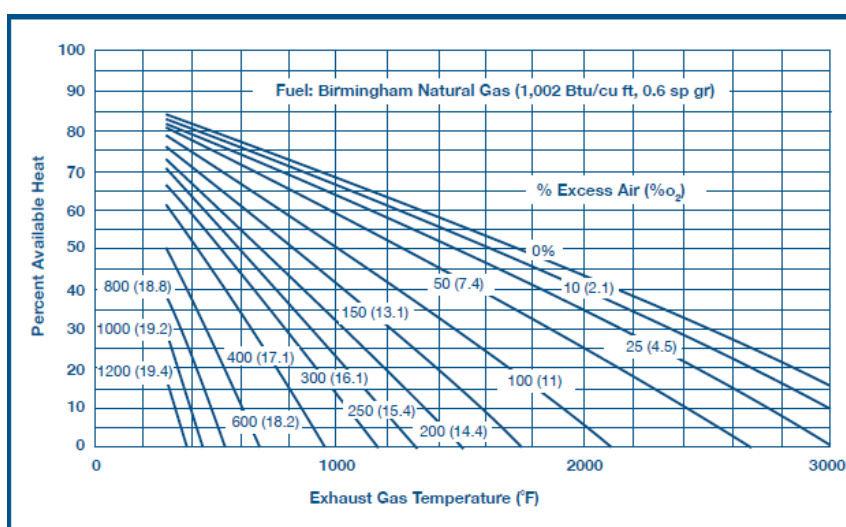
นอกจากนี้เมื่อนำผลการใช้พลังงานของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ ไปเขียนเป็นแผนภูมิตามรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าสามารถลดพลังงานได้ถึง 80-120 kJ/kg ทุกๆ การเพิ่ม 100°C ของอุณหภูมิเหล็กแท่งที่ป้อนเข้าสู่เตา



รูปที่ 2.5 แสดงพลังงานที่ใช้กับอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นเหล็ก

(Shamanian และ Najafidazeh, 2004)

จาก Energy Tips – Process heating เรื่อง Load Preheating Using Flue Gases from a Fuel Fire Heating System (2006) ได้กล่าวไว้ว่าประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการนำความร้อนจากไอเสียมาอุ่นวัตถุดิบที่จะใส่เข้าไปในระบบ การอุ่นวัตถุดิบสามารถทำได้หลากหลายวิธีเช่น ใช้ส่วนของเตาเผาที่ยังไม่โดนเปลวไฟให้ไอเสียไหลผ่านสัมผัสกับวัตถุดิบ ใช้ส่วนทำความร้อนภายนอกโดยการนำไอเสียออกจากเตาเข้าไปอุ่นวัตถุดิบในส่วนทำความร้อนก่อนใส่เข้าสู่เตาเผา และได้ให้ตารางคำนวณความร้อนที่ใช้ได้จากไอเสียในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความร้อนที่สามารถใช้ได้จากไอเสียตามอุณหภูมิและออกซิเจนส่วนเกินในไอเสีย
(Energy Tips – Process heating, 2006)

2.3 จุดน้ำค้างกรด (Acid dew point)

เนื่องจากไอเสียที่ได้จากน้ำมันเตานั้นมีส่วนประกอบของธาตุกำมะถันอยู่ด้วยทำให้เมื่ออุณหภูมิไอเสียลดต่ำลงจนถึงจุดที่เรียกว่า acid dew point สภาพของไอเสียจะเป็นกรด จึงต้องคำนึงถึงจุดและทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงกว่า acid dew point เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เสียหายจากสภาพกรดของไอเสีย ทั้งนี้ไอเสียที่ออกมานั้นอาจจะมี NO_x ออกมาด้วย แต่ออกมาในปริมาณที่น้อยมาก การคำนวณ acid dew point จึงจะเน้นไปที่กำมะถัน

จาก F.H.Verhoff และ J.T.Banchero (1974) ในงานวิจัยเกี่ยวกับ Acid dew point ของ SO_3 ได้ให้สมการความสัมพันธ์ (V.B. Correlation) ออกมาเป็น

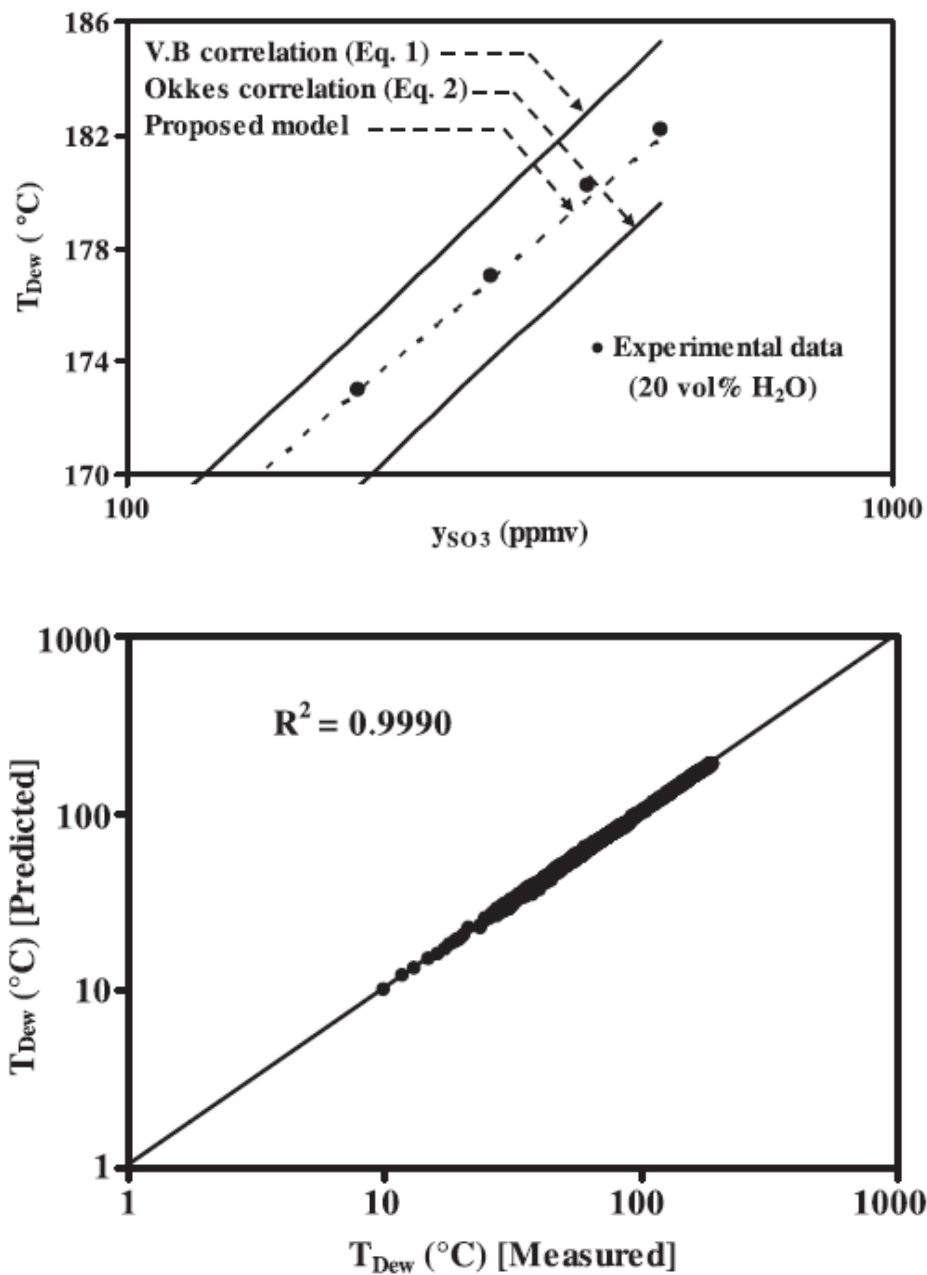
$$\frac{1000}{T_{\text{Dew}}} = 2.276 - 0.0294 \ln(P_{\text{H}_2\text{O}}) - 0.0858 \ln(P_{\text{SO}_3}) + 0.0062 \ln(P_{\text{H}_2\text{O}}) \ln(P_{\text{SO}_3}) \quad (2.7)$$

จาก Y.H.Kiang (1981) ในงานวิจัยเกี่ยวกับ Acid dew point ของ SO₂ ได้ให้สมการ ความสัมพันธ์ออกมาเป็น

$$\frac{1000}{T_{\text{Dew}}} = 3.9526 - 0.1863 \ln(P_{\text{H}_2\text{O}}) - 0.000867 \ln(P_{\text{SO}_2}) + 0.000913 \ln(P_{\text{H}_2\text{O}}) \ln(P_{\text{SO}_2}) \quad (2.8)$$

โดยที่สมการทั้งสองที่กล่าวข้างต้นอุณหภูมิมีหน่วยเป็น K และความดันย่อยของก๊าซแต่ละชนิดมีหน่วยเป็น mmHg ซึ่งจากสมการของน้ำมันเตานั้น ผลผลิตที่ได้ออกมาจากสมดุลเคมีจะเป็น SO₂ ที่มีค่า acid dew point ต่ำ แต่ในความเป็นจริงแล้วไอเสียที่ออกมาจะมี O₂ จากอากาศส่วนเกินปนอยู่ในปริมาณหนึ่ง จึงทำให้ SO₂ ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในไอเสียกลายเป็น SO₃ ที่มี acid dew point สูง การศึกษาเรื่องการเปลี่ยน SO₂ เป็น SO₃ จึงเป็นส่วนสำคัญที่ต้องศึกษาต่อไป

จากงานของ ZareNezhad และ Alamnian (2011) ได้ทำการคำนวณ acid dew point ของไอเสีย ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ เพื่อการคาดคะเนที่แม่นยำยิ่งขึ้นและนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ของ F.H.Verhoff และ J.T.Banchero ด้วย ผลที่ได้ตามรูปที่ 2.7 จะเห็นว่า V.B. Correlation ประมาณค่าสูงกว่าค่าประมาณของ ZareNezhad และ Alamnian ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ acid dew point ที่วัดได้จริงตามรูปที่ 2.8 จากงานชิ้นนี้สามารถทำให้สรุปได้ว่าการใช้ V.B. Correlation เพื่อประมาณค่าจะทำให้ค่า acid dew point ที่ประมาณได้นั้นมีค่าสูงกว่าความเป็นจริงซึ่งไม่ก่อให้เกิดผลเสียในการออกแบบ



รูปที่ 2.7 เปรียบเทียบระหว่างโมเดลของ ZareNezhad และ Alamnian กับ V.B. Correlation

(ZareNezhad และ Alamnian, 2011)

จากงานของ Y.Tan และคณะ(2006) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับไอเสียที่เกิดการเผาไหม้ของถ่านหิน ซึ่งมีกำมะถันเป็นส่วนประกอบเช่นกัน ผลการศึกษาโดยการวัดปริมาณ SO_2 และ SO_3 โดยตรงจากไอเสียที่ได้ปรากฏว่า ทั้งการใช้ออกซิเจนและอากาศเป็นส่วนผสมเริ่มต้นในการเผาไหม้ล้วนให้ปริมาณการเปลี่ยนแปลงจาก SO_2 เป็น SO_3 ในไอเสีย อยู่ที่ 1-5 % ขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถันซึ่งอยู่ในถ่านหิน การผสมกันของอากาศและเชื้อเพลิงและปริมาณออกซิเจนส่วนเกินในไอเสีย ซึ่งปริมาณกำมะถันในถ่านหินเมื่อเทียบกับในน้ำมันเตาแล้วมีปริมาณสูงกว่ามาก ทำให้สามารถอ้างอิงจากงานวิจัยนี้ได้ว่า ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของ SO_3 ในปฏิกิริยาที่ทำการศึกษานั้นจะมีค่าไม่เกิน 5%

บทที่ 3

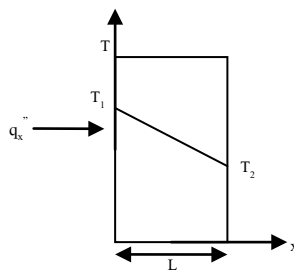
ทฤษฎีพื้นฐาน

3.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมของมันเป็นทางการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อไหร่ก็ตามที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารนั้นจะต้องเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น การถ่ายเทความร้อนนั้นมีอยู่ 3 รูปแบบที่แตกต่างกันคือ การนำความร้อน (Conduction heat transfer) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในของแข็งและของไหล จะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิในตัวกลางเกิดขึ้น การพาความร้อน (Convection heat transfer) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของสารจากการเคลื่อนที่ของของไหลที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ และการแผ่รังสีความร้อนจะเป็นการถ่ายเทพลังงานผ่านทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง โดยที่ทั้งสามแบบจะเป็นการถ่ายเทพลังงานจากตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังตัวกลางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

3.1.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานของอนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่าไปสู่อนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่าโดยอาศัยตัวกลาง สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ อนุภาคที่มีพลังงานสูงกว่าจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า เมื่อชนกับอนุภาคใกล้เคียงที่มีพลังงานต่ำกว่าจะเกิดการถ่ายเทพลังงานไปสู่อนุภาคที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ



รูปที่ 3.1 การถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติด้วยการนำความร้อน

สามารถเขียนการถ่ายเทความร้อนให้อยู่ในรูปสมการได้โดยการทำให้อยู่ในรูปการถ่ายเทพลังงานต่อเวลา สมการนี้มีชื่อว่ากฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ใช้อธิบายรูปที่ 3.1 การนำความร้อนในหนึ่งมิติ

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

เมื่อ

| | | |
|---------|-----|--|
| q''_x | คือ | อัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน x ต่อหน่วยพื้นที่ (W/m^2) |
| k | คือ | สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($W/m \cdot K$) |
| dT/dx | คือ | เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (K/m) |

ในสภาวะคงตัว หาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิเป็นสมการเส้นตรงสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$q''_x = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} = k \left(\frac{T_1 - T_2}{L} \right) \quad (3.2)$$

3.1.2 การพาความร้อน (Convection heat transfer)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนที่ผิวของแข็งและของไหลจากที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยผลจากการนำความร้อนและการเคลื่อนที่ของของไหล สามารถแยกออกได้อีกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหล คือ การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) จะเกิดเมื่อการไหลถูกบังคับด้วยอิทธิพลจากปัจจัยภายนอกเช่น พัดลม ปั๊ม หรือลมที่พัดมา และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Free or natural convection) การไหลจะเกิดขึ้นด้วยผลของแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างของความแตกต่างของอุณหภูมิก่อให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นขึ้น

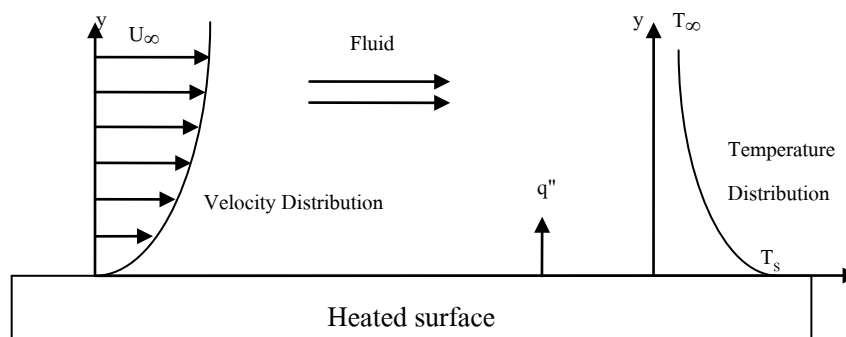
สมการอัตราการพาความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการที่ 3.3 มีชื่อว่าสมการการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3.3)$$

เมื่อ

| | | |
|-------|-----|--|
| q'' | คือ | ฟลักซ์ความร้อน (W/m^2) |
| h | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$) |
| T_s | คือ | อุณหภูมิผิว (K) |

T_∞ คือ อุณหภูมิของไหล (K)

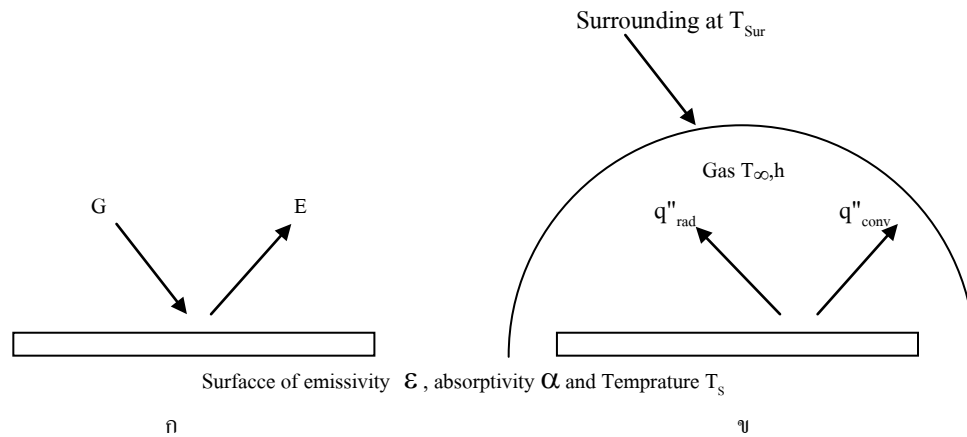


รูปที่ 3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

สัมประสิทธิ์การพาความร้อนนั้นจะเป็นค่าที่ขึ้นกับอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ทั้งคุณสมบัติของของไหล รูปแบบการไหล รูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ ฯลฯ ซึ่งการไหลนั้นโดยปกติจะเป็นไปตามรูปที่ 3.2 คือความเร็วของของไหลจะไม่เท่ากันทั้งระนาบจะมีความแตกต่างของความเร็วเกิดขึ้น ซึ่งจะต้องใช้ความรู้ของกลศาสตร์ของไหลและสมการชั้นขอบเขตเข้ามาช่วยในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยจะกล่าวถึงอีกทีในส่วนของการหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer)

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการส่งพลังงานปล่อยออกมาจากสสารที่มีอุณหภูมิไม่เป็นศูนย์องศาสัมบูรณ์ สามารถส่งได้จากทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เป็นการส่งพลังงานผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน ในขณะที่การนำความร้อนและการพาความร้อนต้องใช้สารเป็นสื่อในการส่งพลังงานแต่การแผ่รังสีความร้อนนั้นไม่จำเป็น และยังมีประสิทธิภาพที่สุดในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ ผลต่างของอัตราการแผ่รังสีโดยพื้นผิวและการดูดกลืนก็คือ การแผ่รังสีความร้อนสุทธิ ถ้าอัตราการดูดกลืนมากกว่าอัตราการแผ่รังสีจะเรียกพื้นผิวนั้นว่า ได้รับพลังงาน (Gaining) จากการแผ่รังสี แต่ถ้าอัตราการดูดกลืนน้อยกว่าอัตราการแผ่รังสีจะเรียกว่า สูญเสียพลังงาน (Losing) จากการแผ่รังสี



รูปที่ 3.3 การแผ่รังสีความร้อน ก. ที่พื้นผิว ข. ระหว่างพื้นผิวกับสิ่งแวดล้อม

เมื่อพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนตามรูปที่ 3.3ก การแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวจะเกิดจากพลังงานจากอุณหภูมิที่พื้นผิว ด้วยอัตราการปลดปล่อยพลังงานต่อหน่วยพื้นที่จะถูกเขียนด้วยพจน์ที่เรียกว่ากำลังการเปล่ง (Emissive power) ซึ่งจะมีค่าสูงสุดตามกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมาน (Stefan-Boltzmann law)

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (3.4)$$

เมื่อ

| | | |
|----------|-----|---|
| E_b | คือ | อัตราการแผ่รังสีสูงสุด (W) |
| σ | คือ | ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมาน ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) |
| T_s | คือ | อุณหภูมิของพื้นผิว |

โดยที่ค่าจากสมการที่ 3.4 จะเป็นค่าอัตราการแผ่รังสีสูงสุดที่เกิดขึ้นสำหรับพื้นผิวการแผ่รังสีในอุดมคติที่เรียกว่าวัตถุดำ (Blackbody) ซึ่งสำหรับพื้นผิวปกตินั้นอัตราการแผ่รังสีจะมีค่าน้อยกว่าวัตถุดำเสมอสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (3.5)$$

เมื่อ ϵ คือ ค่า emissivity ของพื้นผิวชนิดนั้น

นอกเหนือจากการปล่อยรังสีความร้อนออกไปแล้ว วัตถุอาจดูดกลืนพลังงานกลับเข้ามาได้ด้วยเช่นกัน อัตราที่วัตถุดูดกลืนพลังงานจะถูกเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$G_{\text{abs}} = \alpha G \quad (3.6)$$

ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนจะเป็นการรวมพจน์ทั้งสองเข้าด้วยกัน จากรูปที่ 3.3x แสดงการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวและสิ่งแวดล้อม อัตราการแผ่รังสีสุทธิระหว่างพื้นผิวทั้งสองสามารถหาได้จาก

$$q''_{\text{rad}} = \frac{q}{A} = \epsilon E_b - \alpha G = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (3.7)$$

เมื่อ

A คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ (m^2)

T_{sur} คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

และในกรณีที่พื้นผิวและค่าการแผ่รังสีของสิ่งแวดล้อมไม่มีอิทธิพลต่อการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนสุทธิ มักจะเขียนแสดงอัตราการแลกเปลี่ยนความรังสีความร้อนสุทธิตามสมการที่ 3.8 ดังนี้

$$q_{\text{rad}} = h_r A (T_s - T_{\text{sur}}) \quad (3.8)$$

เมื่อ

h_r คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนนิยามตามสมการที่ 3.9

$$h_r \equiv \epsilon \sigma (T_s + T_{\text{sur}})(T_s^2 + T_{\text{sur}}^2) \quad (3.9)$$

ในรูปที่ 3.3x นั้นนอกจากการแผ่รังสีความร้อนแล้วยังมีการพาความร้อนของของไหลเกิดขึ้นด้วย สามารถเขียนเป็นสมการการถ่ายเทความร้อนรวมได้

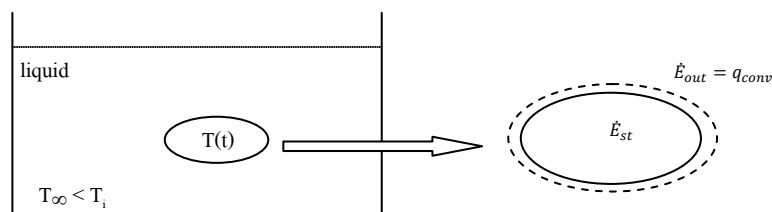
$$q_{\text{total}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} = hA(T_s - T_{\infty}) + \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (3.10)$$

3.1.4 การนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent conduction)

การนำความร้อนในส่วนก่อนหน้าที่กล่าวไปนั้นเป็นการนำความร้อนในหนึ่งมิติและสภาวะคงตัว แต่ยังไม่ได้กล่าวถึงการนำความร้อนที่มีเวลาเข้ามาเป็นปัจจัยเกี่ยวข้อง ปัญหาจะมีความซับซ้อนมากขึ้นเมื่อเงื่อนไขขอบเขตเปลี่ยนไปตามเวลาเช่น อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุมีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เช่นเมื่อ

นำแท่งเหล็กร้อนออกจากเตาเผาเหล็กไปวางในบรรยากาศปกติ ที่ผิวของแท่งเหล็กจะมีการสูญเสีย อุณหภูมิจากการพาความร้อนและการแผ่รังสี ในขณะที่เดียวกันในชั้นเหล็กนั้นเองก็จะมี การนำความร้อน ภายในออกไปสู่ผิวจนกว่าจะถึงสภาวะคงตัว จึงต้องมีสมการเข้ามาช่วยเพื่อให้สามารถทราบถึงอุณหภูมิ ที่เปลี่ยนไปของวัตถุ รวมไปถึงปริมาณความร้อนที่วัตถุส่งออกไปสู่สิ่งแวดล้อม สำหรับการถ่ายเทความร้อนของของแข็งอย่างง่าย ที่ไม่จำเป็นต้องสนใจความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของแข็ง วิธี lumped capacitance method เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาหาคำตอบได้

หัวใจของ lumped capacitance method คือการตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิภายในชั้นของแข็งมีค่าเท่ากันทั่วทั้งชิ้นทำให้ไม่ต้องสนใจความแตกต่างของอุณหภูมิภายใน



รูปที่ 3.4 การเขียนตัวของชั้นของแข็งที่จมอยู่ในของเหลว

จากรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณาด้วยกฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับปริมาตรควบคุมดังภาพแล้วสามารถเขียนเป็นสมการได้

$$-hA_s(T_s - T_\infty) = \rho Vc \frac{dT}{dt} \quad (3.11)$$

เมื่อจัดรูปสมการใหม่และหาปริพันธ์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานจะได้ออกมาเป็นสมการที่

3.12

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \exp\left[-\left(\frac{hA_s}{\rho Vc}\right)t\right] \quad (3.12)$$

เมื่อ

| | | |
|----------------|-----|------------------------------|
| T | คือ | อุณหภูมิ ณ เวลาใดๆ (K) |
| T _i | คือ | อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุ (K) |

| | | |
|--------------|-----|--|
| T_{∞} | คือ | อุณหภูมิของของเหลว (K) |
| h | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของเหลว ($W/m^2 \cdot K$) |
| A_s | คือ | พื้นที่ผิวของแข็งที่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น (m^2) |
| ρ | คือ | ความหนาแน่นของของแข็ง (kg/m^3) |
| V | คือ | ปริมาตรของของแข็ง (m^3) |
| c | คือ | ความจุความร้อนจำเพาะของของแข็ง ($J/kg \cdot K$) |

อย่างไรก็ตามสมการที่ 3.12 ก็มีเงื่อนไขในการใช้อยู่ เนื่องจากสมมติฐานที่ตั้งขึ้นมาในตอนแรกนั้นระบุว่าอุณหภูมิในชิ้นของแข็งจะต้องไม่มีความแตกต่าง ซึ่งจะต้องใช้ตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า (Biot number) เข้ามาช่วย

$$Bi = \frac{hL_c}{k} < 0.1 \quad (3.13)$$

โดยที่ $L_c = V/A_s$ เรียกว่า characteristic length ซึ่ง Biot number นี้เป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการนำความร้อนของวัตถุกับการพาความร้อน หากการพาความร้อนดีกว่าการนำความร้อนมากๆ จะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในตัวของแข็ง ก็จะไม่สามารถใช้ lumped capacitance method ในการคำนวณได้ โดยที่ Biot number ที่เหมาะสมและสามารถจะใช้ lumped capacitance method ได้นั้นจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 เสมอ และในการจะใช้ lumped capacitance method สิ่งแรกที่ต้องทำคือ คำนวณหา Biot number ก่อนเสมอ

และสำหรับพลังงานความร้อนที่ถูกถ่ายเทด้วย lumped capacitance method สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Q = (\rho Vc)\theta_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right] \quad (3.14)$$

เมื่อ $\tau_i = \frac{\rho Vc}{hA_s}$ และ Q คือ พลังงานความร้อนที่ถูกถ่ายเท (W)

3.1.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

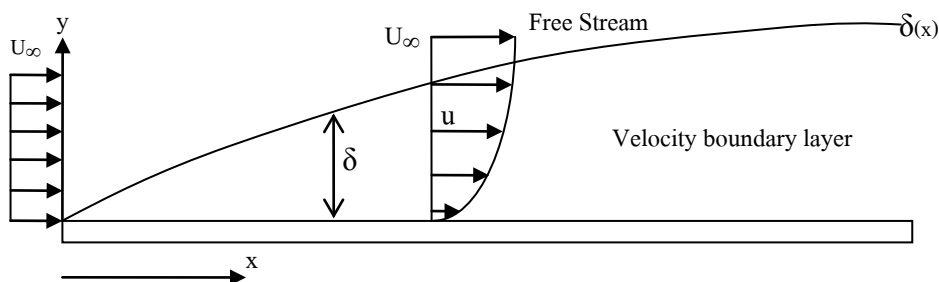
ในหัวข้อที่ผ่านมาได้พูดถึงการนำความร้อนที่ขึ้นกับเวลา ที่เป็นการนำของแข็งไปวางไว้ในกระแสของไหลในเงื่อนไขเวลาที่กำหนด ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญที่ต้องทราบในการหาค่าคือสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่เงื่อนไขนั้นๆ ซึ่งสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลในสถานะและเงื่อนไขต่างๆ ก็จะมีค่าแตกต่างกันตามเงื่อนไข

3.1.5.1 ชั้นขอบเขต

ชั้นขอบเขตเป็นหัวข้อสำคัญสำหรับความเข้าใจในการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนระหว่างพื้นผิวและของไหลที่ไหลผ่านไป

3.1.5.1.1 ชั้นขอบเขตของความเร็วน

แนวคิดของชั้นขอบเขตระหว่างของไหลที่ไหลผ่านกับพื้นผิวนั้นจะแบ่งของไหลออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกที่อยู่ติดกับพื้นผิวจะได้รับผลจากความหนืดโดยตรง โดยที่อนุภาคของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิวจะมีความเร็วเป็นศูนย์สำหรับพื้นผิวที่อยู่นิ่งหรือมีความเร็วเท่ากับความเร็วการเคลื่อนที่ของพื้นผิว และอนุภาคที่อยู่ในชั้นถัดไปก็จะได้รับของความหนืดต่อๆ กันไปทำให้เกิดเป็นรูปร่างความเร็วขึ้น และส่วนที่ 2 ที่อยู่นอกชั้นบางๆ ที่ $y = \delta$ ในส่วนนี้จะได้รับผลของแรงเสียดทานเนื่องจากความหนืดน้อยมากจนสามารถละทิ้งไปได้และไหลเป็นอิสระที่ความเร็ว U_∞



รูปที่ 3.5 ชั้นขอบเขตของความเร็วนบนแผ่นราบ

โดยพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดสภาพการไหลในชั้นขอบเขตคือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) สามารถเขียนได้เป็น

$$\text{Re} = \frac{\rho_f U_\infty x}{\mu} \quad (3.15)$$

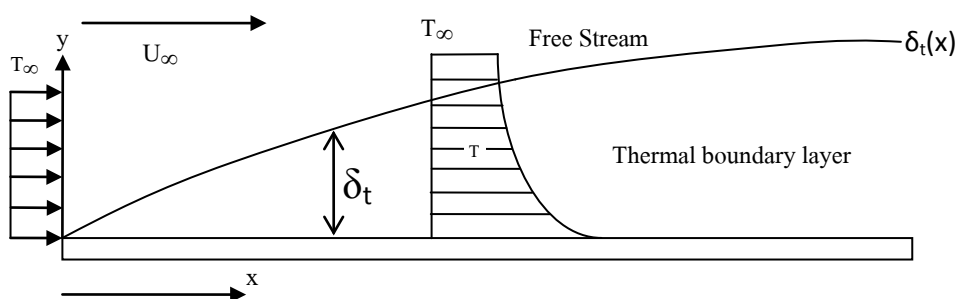
เมื่อ

| | | |
|----------|-----|--|
| x | คือ | ระยะตามการไหลที่วัดจากขอบ (m) |
| μ | คือ | ค่าความหนืดพลศาสตร์ของของไหล (N-s/m ²) |
| ρ_f | คือ | ค่าความหนาแน่นของของไหล (kg/m ³) |

การที่การไหลนั้นจะเป็น การไหลแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนนั้นตัวเลขเรย์โนลด์จะเป็นตัวกำหนดนั่นเอง จุดที่เปลี่ยนระหว่งการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วนจะมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ค่าหนึ่งซึ่งจะเรียกว่า ตัวเลขเรย์โนลด์วิกฤต (Critical Reynolds number) มีค่าเท่ากับ 5×10^5

3.1.5.1.2 ชั้นขอบเขตของอุณหภูมิ

เมื่อเกิดชั้นขอบเขตของความเร็วขึ้นบนแผ่นราบเมื่อเกิดการไหลของของไหล ก็จะเกิดชั้นขอบเขตของอุณหภูมิขึ้นเช่นกันเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6 ที่ขอบก่อนเข้าสู่แผ่นราบรูปร่างของอุณหภูมินั้นมีค่าเท่ากับ $T(y) = T_\infty$ แต่เมื่ออนุภาคของของไหลสัมผัสกับแผ่นราบก็จะเกิดการถ่ายเทพลังงานขึ้นเป็นทอดๆ ระหว่างของไหลกับพื้นผิวและของไหลกับของไหลในชั้นถัดไปทำให้เกิดการแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นในกระแสของไหล ในขอบเขตที่เกิดความแตกต่างของอุณหภูมินี้เองที่จะเรียกว่าชั้นขอบเขตของอุณหภูมิมิมีความหนาเท่ากับ δ_t และเมื่อห่างออกไปจากขอบเรื่อยๆ การถ่ายเทความร้อนก็จะมีอาณาเขตครอบคลุมมากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ชั้นขอบเขตของอุณหภูมิมิมีค่าใหญ่ขึ้น



รูปที่ 3.6 ชั้นขอบเขตของอุณหภูมิบนแผ่นราบ

3.1.5.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุดกับเฉลี่ย

จากที่อธิบายไปในเรื่องเงื่อนไขชั้นขอบเขตว่าการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการไหลของของไหลและตัวเลขเรย์โนลด์ ทำให้สัมประสิทธิ์การนำความร้อนจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการไหล โดย ณ จุดใดๆ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุด และสำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์ความร้อนเฉลี่ยจะนำมาเฉลี่ยกับพื้นที่ที่ของไหลไหลผ่านไป สำหรับแผ่นราบซึ่งเป็นการไหลในหนึ่งมิติจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h dx \quad (3.16)$$

เมื่อ

| | | |
|-----------|-----|--|
| \bar{h} | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย ($W/m^2 \cdot K$) |
| h | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุด ($W/m^2 \cdot K$) |
| L | คือ | ระยะทางของแผ่นราบที่นำมาเฉลี่ย (m) |

3.1.5.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกแบบบังคับ

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบภายนอก ชั้นขอบเขตจะสามารถพัฒนาและโตขึ้นได้เรื่อยๆ เนื่องจากอีกด้านของการไหลจะไม่มีพื้นผิวมาเป็นอุปสรรคใดๆ ซึ่งในส่วนนี้จะพิจารณาการพาความร้อนแบบบังคับที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะของของไหล และให้ความสนใจกับการ

ไหลที่เป็นการไหลบนแผ่นราบ ซึ่งคำตอบของสมการจะถูกเขียนออกมาในรูปอย่างง่าย เป็นพจน์ของตัวเลขนัสเซิล (Nusselt number)

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f} = CRe_L^m Pr^n \quad (3.17)$$

เมื่อ

k_f คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล (W/m²·K)

C, m, n คือ ค่าคงที่ตามเงื่อนไขของการไหล

Pr คือ ตัวเลขพรานเทิล (Prandtl number)

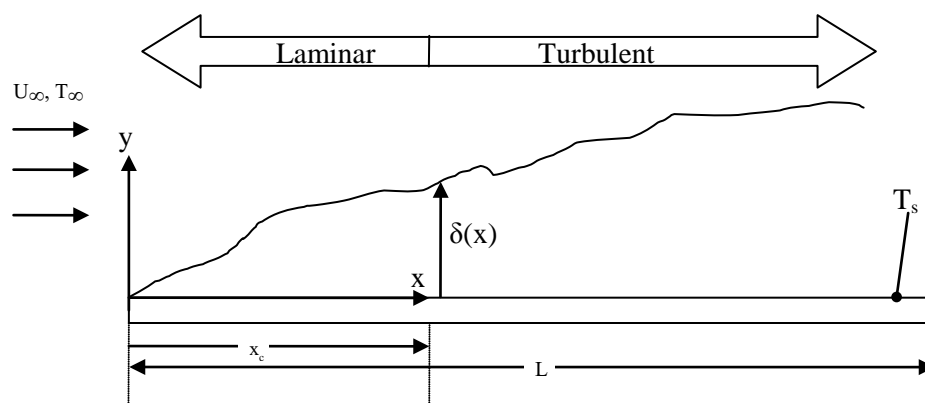
และสำหรับอุณหภูมิที่จะใช้เข้ามาหาคุณสมบัติของของไหลนั้นจะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของการไหลอิสระกับอุณหภูมิที่ผิวเรียกว่าอุณหภูมิชั้นฟิล์ม (Film temperature)

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (3.18)$$

เมื่อ

T_s คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

T_∞ คือ อุณหภูมิของการไหลอิสระ (K)



รูปที่ 3.7 การไหลแบบขนานบนแผ่นราบ

3.1.5.3.1 การไหลแบบราบเรียบบนแผ่นราบ

การไหลแบบราบเรียบบนแผ่นราบมีสมมติฐานก่อนการแก้สมการด้วยสมการชั้นขอบเขต ดังนี้คือ

1. เป็นการไหลแบบราบเรียบ
2. เป็นการไหลแบบอัดไม่ได้
3. เป็นการไหลแบบราบเรียบ
4. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความดันในแนวแกน x
5. คุณสมบัติของของไหลมีค่าคงที่

มีตัวเลขนัสเซลเฉพาะจุดตามสมการที่ 3.19

$$\text{Nu}_x = \frac{h_x x}{k_f} = 0.332 \text{Re}_x^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \quad \text{Pr} \geq 0.6 \quad (3.19)$$

สามารถหาค่าความหนาของชั้นขอบเขตความเร็วได้จากสมการ

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{\text{Re}_x}} \quad (3.20)$$

สามารถหาค่าความหนาของชั้นขอบเขตอุณหภูมิได้จากสมการ

$$\frac{\delta}{\delta_t} \approx \text{Pr}^{1/3} \quad (3.21)$$

3.1.5.3.2 การไหลแบบปั่นป่วนบนแผ่นราบ

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนมีตัวเลขนัสเซลเฉพาะจุดตามสมการที่ 3.22

$$\text{Nu}_x = \frac{h_x x}{k_f} = 0.0296 \text{Re}_x^{4/5} \text{Pr}^{1/3} \quad 0.6 \leq \text{Pr} \leq 60 \quad (3.22)$$

สามารถหาค่าความหนาของชั้นขอบเขตความเร็วได้จากสมการ 3.23 โดยที่เมื่อเป็นการไหลแบบปั่นป่วนการโตของชั้นขอบเขตทั้งสองจะไม่ขึ้นกับ Pr อีกต่อไป ทำให้สามารถหาชั้นขอบเขตของอุณหภูมิได้จากสมการเดียวกัน

$$\delta = \delta_t = 0.37x \text{Re}_x^{-1/5} \quad (3.23)$$

3.1.5.3.3 ชั้นขอบเขตแบบผสม

ในบางครั้งอาจจะมีสถานการณ์ที่จุดที่ต้องการจะหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอยู่ที่จุดเปลี่ยนระหว่างการการแบบราบเรียบกับการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งการหาค่าก็สามารถทำได้ด้วยนำเอาสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบเฉลี่ยในสมการที่ 3.16 มาเขียนใหม่ได้เป็น

$$\bar{h} = \frac{1}{x_2 - x_1} \left(\int_{x_1}^{x_c} h_{\text{lam}} dx + \int_{x_c}^{x_2} h_{\text{turb}} dx \right) \quad (3.24)$$

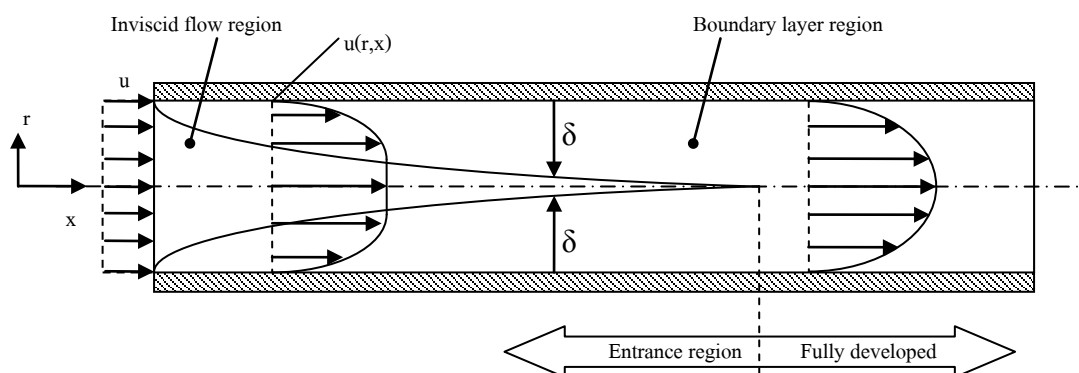
เมื่อ

| | | |
|-------------------|-----|---|
| x_1 และ x_2 | คือ | จุดเริ่มต้นและจุดปลายของค่าที่ต้องการจะหา |
| x_c | คือ | จุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหล |
| h_{lam} | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบราบเรียบ |
| h_{turb} | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบปั่นป่วน |

3.1.5.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบภายใน

หลังจากทราบวิธีหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบภายนอกไปแล้ว สิ่งต่อไปที่จะสนใจคือการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบภายในเนื่องจาก เจ็อนไซที่ออกแบบอาจจะไม่สามารถใช้การพาความร้อนแบบภายนอกได้หรือการพาความร้อนแบบภายในอาจจะมีประสิทธิภาพที่สูงกว่า ซึ่งการพาความร้อนแบบภายในนี้ก็จะแตกต่างกับการพาความร้อนแบบภายนอกตรงที่ การพาความร้อนแบบภายนอกชั้นขอบเขตสามารถเติบโตได้โดยไม่ต้องสนใจขอบเขตใดๆ แต่เมื่อใดที่ชั้นขอบเขตถูกจำกัดไว้ การพาความร้อนแบบภายในจึงจะถูกนำมาใช้เพื่อการหาค่าการถ่ายเทความร้อน

สำหรับการพาความร้อนแบบภายนอก สิ่งแรกที่จะต้องหาคือเป็นการไหลแบบปั่นป่วนหรือแบบราบเรียบ แต่สำหรับการพาความร้อนแบบภายในนั้น สิ่งที่ต้องสนใจเพิ่มเติมจากเดิมคือจะมีการไหลในย่านขาเข้า (Entrance region) กับ การไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully developed)



รูปที่ 3.8 การพัฒนาของชั้นขอบเขตภายในท่อ

สำหรับการไหลภายในนั้นตัวเลขเรย์โนลด์จะถูกนิยามเป็น

$$Re_D = \frac{\rho_f u_m D}{\mu} \quad (3.25)$$

เมื่อ

u_m คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล (m/s)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อ (m)

โดยที่ค่าเรย์โนลด์วิกฤตของการไหลในท่อจะอยู่ที่ 2,300

3.1.5.4.1 การไหลแบบราบเรียบ

สำหรับการไหลแบบราบเรียบภายในท่อที่พัฒนาเต็มที่ และมีอุณหภูมิผิวคงที่ จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้จาก

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 3.66 \quad (3.26)$$

3.1.5.4.2 การไหลแบบปั่นป่วน

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้นจะใช้ Gnielinski correlation (Incropera, 2007) มาหาค่า

$$\text{Nu}_D = \frac{hD}{k} = \frac{(f/8)(\text{Re}_D - 1000)\text{Pr}}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (3.27)$$

โดยที่ f เป็นค่าของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

3.1.5.4.3 ท่อที่ไม่เป็นวงกลม

ในความเป็นจริง ปัญหาที่เกิดขึ้นในทางวิศวกรรมอาจไม่เป็นวงกลมเสมอไป เมื่อท่อที่ใช้ไม่เป็นวงกลมจะต้องนิยามตัวแปรขึ้นมาเพื่อใช้ในการหาค่าเรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter)

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (3.28)$$




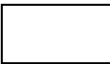
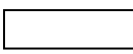
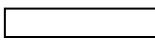
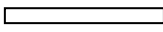
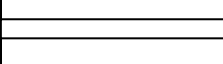

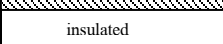

เมื่อ

A_c คือ พื้นที่ภาคตัดตั้งฉากกับการไหล (m^2)

P คือ เส้นรอบรูปของพื้นที่ภาคตัด (m)

ในการไหลแบบปั่นป่วนนั้น จะสามารถใช้สมการที่ 3.28 ควบคู่ไปกับสมการที่ 3.27 ได้เลย แต่สำหรับการไหลแบบราบเรียบนั้นจะต้องใช้ค่าตามตารางที่ 3.1

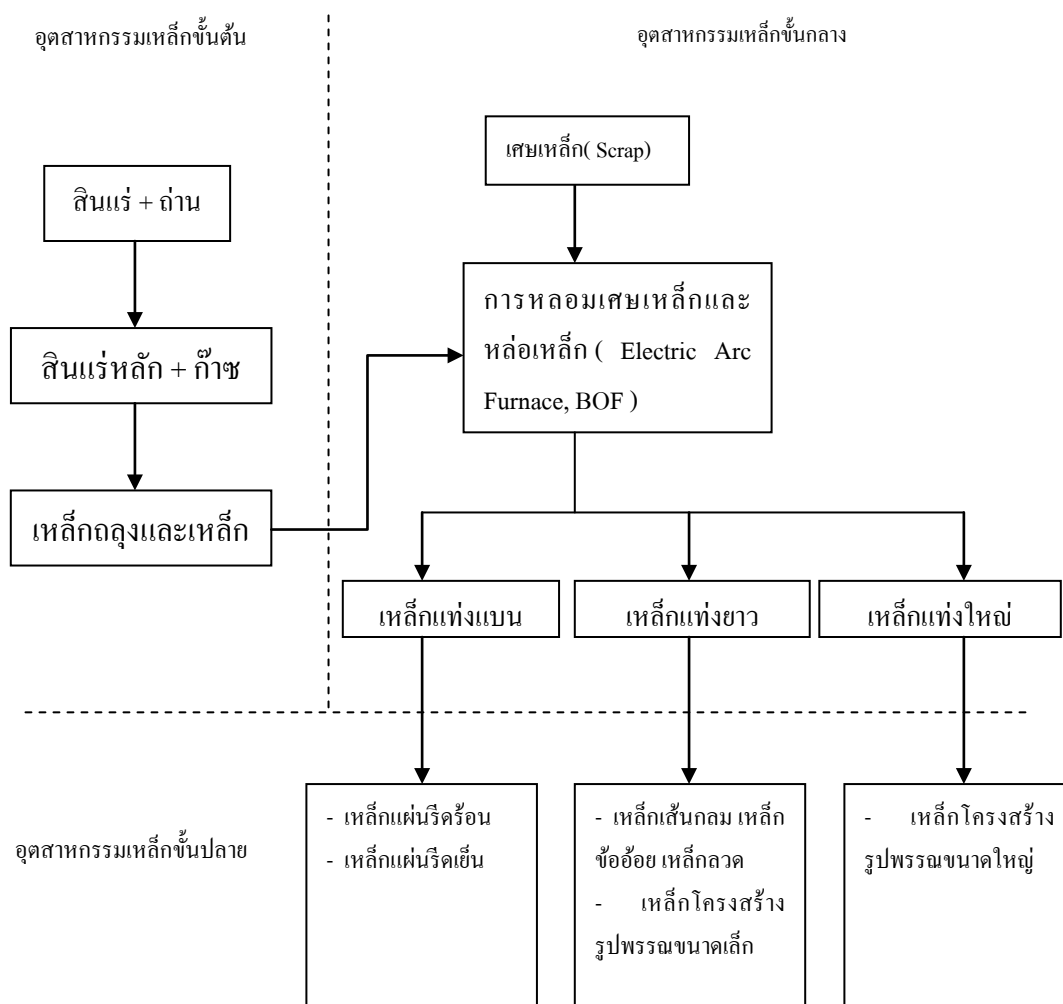
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงตัวเลขนัสเซลและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสำหรับการไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มที่ ในท่อที่หน้าตัดไม่เป็นวงกลม (Incropera, 2007)

| Cross Section | $\frac{b}{a}$ | $Nu_D = \frac{hD_h}{k}$ | | $f Re_{Dh}$ |
|---|---------------|-------------------------|---------------|-------------|
| | | Uniform q_s'' | Uniform T_s | |
|  | - | 4.36 | 3.66 | 64 |
|  | 1.0 | 3.61 | 2.98 | 57 |
|  | 1.43 | 3.73 | 3.08 | 59 |
|  | 2.0 | 4.12 | 3.39 | 62 |
|  | 3.0 | 4.79 | 3.96 | 69 |
|  | 4.0 | 5.33 | 4.44 | 73 |
|  | 8.0 | 6.49 | 5.60 | 82 |
|  | ∞ | 8.23 | 7.54 | 96 |
|  | ∞ | 5.39 | 4.86 | 96 |
|  | ∞ | | | |
|  | - | 3.11 | 2.49 | 53 |

หมายเหตุ : b/a เป็นอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวเมื่อ a เป็นความกว้างและ b เป็นความยาวของพื้นที่ภาคตัด

3.2 อุตสาหกรรมเหล็ก

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าถือเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งของไทยที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่ใช้ผลิตภัณฑ์เพื่อส่งต่อไปให้กับอุตสาหกรรมชนิดอื่นๆ ต่อไป ซึ่ง โครงสร้างของอุตสาหกรรมเหล็กแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนตามรูปที่ 3.9 คือ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น ขั้นกลาง และขั้นปลาย



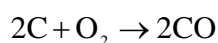
รูปที่ 3.9 แสดงโครงสร้างของอุตสาหกรรมเหล็ก

3.2.1 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น

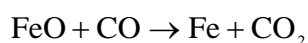
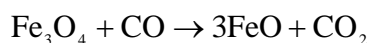
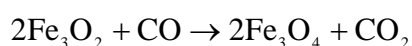
อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น เป็นอุตสาหกรรมเหล็กถลุง (Pig iron) และเหล็กพูน (Sponge iron) ซึ่งจัดได้ว่าเป็นกระบวนการเริ่มต้นของอุตสาหกรรมเหล็กที่มีความสำคัญอย่างมากต่อศักยภาพในการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กและอุตสาหกรรมที่ต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็ก สำหรับประเทศไทย ปัจจุบันยังไม่มี การจัดตั้งโรงงานผลิตเหล็กขั้นต้น โดยแต่เดิมนั้น แนวทางการพัฒนาถูกกำหนดโดยความต้องการของตลาดในประเทศมากกว่าจากนโยบายของภาครัฐทำให้อุตสาหกรรมเหล็กเริ่มต้นพัฒนาจากขั้นปลาย เพื่อทดแทนการนำเข้าจากต่างประเทศแทนการพัฒนาจากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น

สำหรับขั้นตอนการถลุงเหล็กจากแร่เหล็กในขั้นต้นนั้นจะเริ่มจากแร่เหล็กดิบ ซึ่งประเทศที่ผลิตแร่เหล็กได้มากที่สุดในโลกปัจจุบันคือประเทศจีน ซึ่งก็เป็นประเทศที่มีอัตราการบริโภคเหล็กสูงที่สุดในโลกด้วย ในโมเลกุลของแร่เหล็กจะประกอบด้วยเหล็กและออกซิเจนประกอบกัน (Fe_2O_3) และเพื่อที่จะแปรสภาพให้เป็นเหล็กบริสุทธิ์ แร่เหล็กจะต้องถูกหลอมและผ่านกระบวนการรีดักชันเพื่อกำจัดออกซิเจนออกไป แต่ว่าพันธะระหว่างเหล็กกับออกซิเจนมีความแข็งแรงมากเพื่อที่จะทำให้หลุดออกจากกันได้จะต้องนำพันธะที่แข็งแรงกว่ามาดึงตัวออกซิเจนออกไปจากเหล็ก ซึ่งคาร์บอนจะถูกใช้ในกระบวนการนี้เนื่องจากพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนจะมีความแข็งแรงกว่าที่อุณหภูมิสูง ถ่านโค้ก (Coke) จึงถูกนำมาเผาพร้อมกับแร่เหล็กในเตาหลอม (Blast furnace) เพื่อให้คาร์บอนเข้าไปในกระบวนการรวมทั้งเป็นเชื้อเพลิงที่ให้ความร้อนด้วยตามสมการเคมีดังนี้

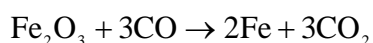
ถ่านโค้กเพื่อผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์

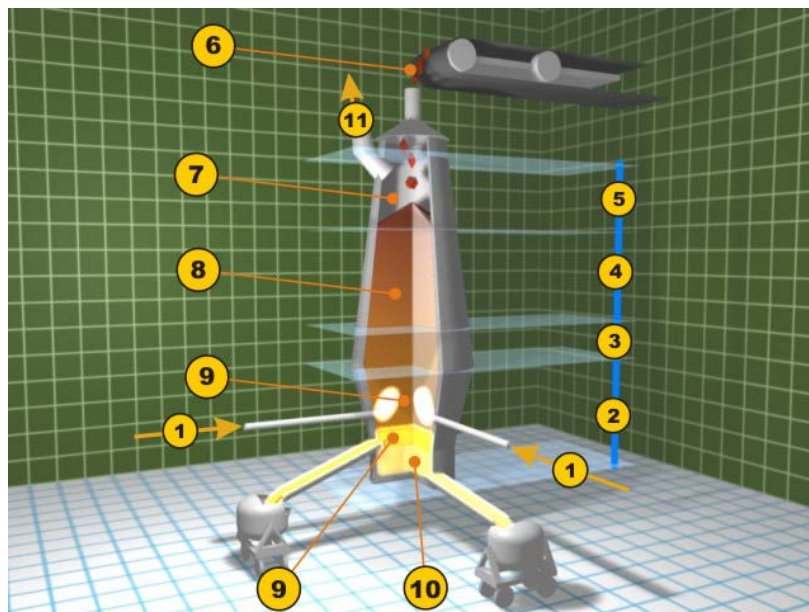


นำคาร์บอนมอนอกไซด์เพื่อดึงออกซิเจน



เมื่อรวมสมการจะได้ดังนี้





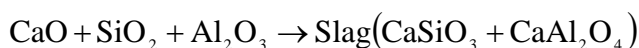
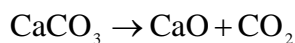
รูปที่ 3.10 กระบวนการใน blast furnace

(ภาพและข้อมูลจาก http://en.wikipedia.org/wiki/Blast_furnace)

จากภาพ 3.10 สามารถเรียงกระบวนการได้ดังนี้

1. ลมร้อนจาก cowper stoves
2. melting zone
3. ส่วนรีดักชั้นของ ferrous oxide
4. ส่วนรีดักชั้นของ ferric oxide
5. ส่วนอุ่นแห้งเหล็ก
6. ส่วนการป้อนแร่ เหล็ก หินปูนและถ่าน ไม้
7. ไอเสีย
8. ชั้นของแร่เหล็ก หินปูนและถ่าน ไม้
9. ส่วนที่ดึงslag ออก
10. ส่วนที่น้ำเหล็กร้อนไหลออก
11. ส่วนการไหลของไอเสีย

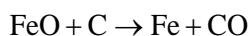
นอกจากนี้จะยังมีการใส่หินปูน (CaCO_3) เข้าไปในกระบวนการหลอมแร่เหล็กใน เตาหลอม ด้วยเพื่อดึง slag ของธาตุชนิดอื่นๆ ที่ปนอยู่ในตัวสินแร่ออกไปตามสมการ



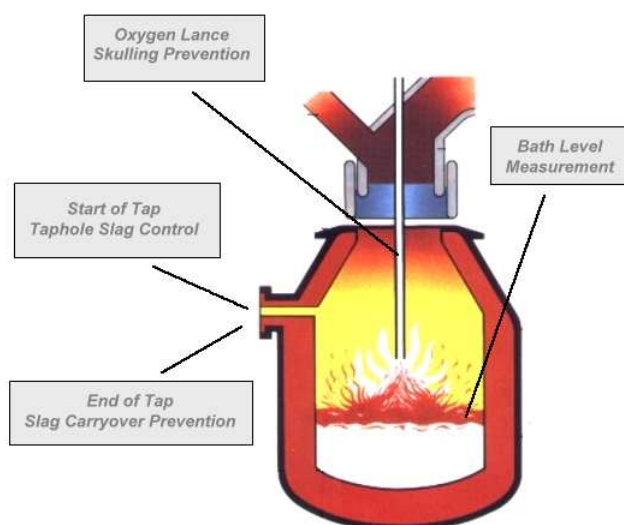
เหล็กถลุงที่ได้จากกระบวนการข้างต้นจะประกอบด้วยคาร์บอนในปริมาณสูงที่ 4-5% ทำให้มีคุณสมบัติที่ค่อนข้างจะเปราะ บางส่วนอาจจะนำไปทำเหล็กหล่อ แต่ส่วนใหญ่จะนำไปสู่กระบวนการต่อไปเพื่อลดปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กเพื่อที่จะผลิตเหล็กกล้าที่มีคุณภาพต่อไป

3.2.2 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลาง

อุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางจะเป็นการนำเอาวัตถุดิบที่ได้จากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้นมาเพื่อหล่อเป็นเหล็กแท่งสำเร็จรูปเพื่อที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลายซึ่งเป็นการแปรรูปเหล็กต่อไป การผลิตเหล็กกล้าจากเหล็กถลุงนั้นจะใช้เตา BOF (Basic oxygen furnace) ตามรูปที่ 3.11 ในการผลิตโดยมีขั้นตอนคร่าวๆ คือ เพื่อที่จะลดปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็ก วัตถุดิบจะถูกหลอมภายในเตา และถูกพ่นด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ทำให้เหล็กหลอมเหลวกลายเป็นเหล็กออกไซด์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนกลายเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์



จะมีการเติมหินปูนเข้าไปในกระบวนการเพื่อรวมกับ FeO , SiO_2 ทำให้เกิด slag ขึ้นมาซึ่งจะทำปฏิกิริยากับน้ำเหล็กเพื่อที่จะลดธาตุ sulfur และ phosphorus ในน้ำเหล็ก ซึ่ง slag จะถูกกำจัดออกได้ เพราะว่ามีควมต่งจำเพาะต่ำกว่าเหล็กทำให้ลอยตัวที่ผิวหน้า ส่วนน้ำเหล็กที่ได้จะถูกหล่อเป็น slab, billet และ bloom ต่อไป



รูปที่ 3.11 Basic Oxygen Furnace

(รูปจาก <http://www.mpe-us.com/bof.htm>)

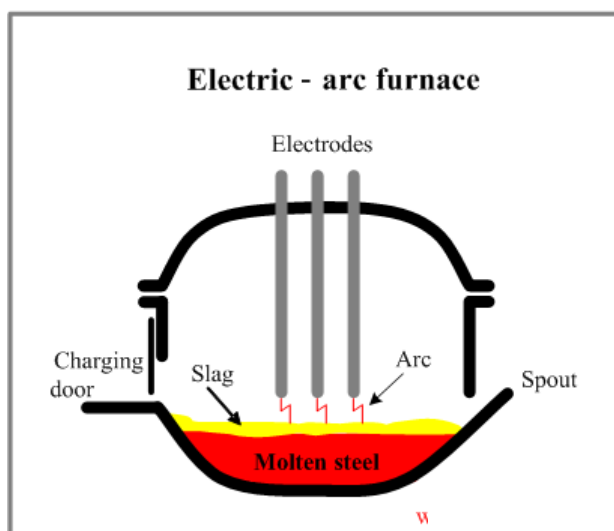
แต่สำหรับประเทศไทยที่ไม่มีแร่เหล็กนั้น วัตถุดิบในอุตสาหกรรมเหล็กชั้นกลางจะเป็นการนำเอาเศษเหล็ก (scrap) มาหลอมใหม่เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติและส่วนผสมทางเคมีเพื่อให้ได้เป็นเหล็กกล้า โดยส่วนใหญ่จะใช้เตาอาร์คไฟฟ้า (EAF) ในการผลิตซึ่งจะใช้พลังงานต่ำกว่าเตา BOF การทำงานของเตาอาร์คไฟฟ้าจะใช้กระแสไฟฟ้าให้การให้ความร้อนกับเหล็กตามขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนการใส่วัตถุดิบลงให้เตาอาร์คไฟฟ้า

วัตถุดิบหลักที่ใช้ใส่ลงในเตาคือเศษเหล็ก โดยในขั้นแรกเศษเหล็กจะถูกใส่เอาไว้ในถังบรรจุเศษเหล็กเป็นชั้นๆ โดยในแต่ละชั้นจะเป็นเศษเหล็กชนิดที่แตกต่างกัน การจัดเรียงชั้นเศษเหล็กจะต้องทำให้เหล็กหลอมได้ง่าย สม่่าเสมอและรวดเร็ว โดยจะจัดเรียงเศษเหล็กจากความหนาแน่นน้อยที่สุดจะอยู่ด้านล่าง เศษเหล็กที่มีความหนาแน่นมากและปานกลางจะอยู่ในชั้นถัดมา เศษเหล็กที่มีน้ำหนักเบาจะเอาไว้ที่ชั้นบนสุดเพื่อให้แท่ง electrode จมลงในเศษเหล็กได้อย่างรวดเร็วในช่วงที่เริ่มต้นการหลอม เมื่อเรียบร้อยแล้ว ถังบรรจุเศษเหล็กจะถูกยกมาเหนือเตาหลอมและเปิดถังจากด้านล่างเพื่อเทเศษเหล็กลงในเตาหลอม

2. ขั้นตอนการหลอม

หลังจากที่เศษเหล็กลงในเตาหลอมเรียบร้อยแล้ว จะทำการลดระดับ electrode ทั้ง 3 แห่งลง ไปใกล้เศษเหล็กและใส่กระแสไฟฟ้าให้กับแท่ง electrode เพื่อเริ่มทำการหลอมเศษเหล็ก



รูปที่ 3.12 รูปแบบของเตา EAF

(รูปจาก WWW.SUBSTECH.COM)

3. ขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกออก

เป็นขั้นตอนหลังจากที่เศษเหล็กถูกหลอมหมดเรียบร้อยแล้ว โดยขั้นตอนนี้จะเป็นการลดและควบคุมปริมาณธาตุต่างๆ ที่อยู่ในน้ำเหล็กให้มีความเหมาะสม โดยจะเติมออกซิเจนลงไปใต้น้ำเหล็กหลอมเหลวเพื่อให้ธาตุต่างๆ (Al, Mn, Si, C) ปฏิกิริยากับออกซิเจน ซึ่งเมื่อธาตุเหล่านี้ทำปฏิกิริยาเรียบร้อยแล้วจะลอยตัวขึ้นมาที่ผิวหน้าของน้ำเหล็กเป็น slag เพื่อที่จะถูกกำจัดต่อไป ซึ่งปกติแล้วนั้น Slag ที่เกิดมาจะมีความเป็นกรดที่สูงทำให้เกิดความเสียหายแก่ผนังเตา จึงมีการเติมสารที่เรียกว่า flux ลงไปเพื่อลดความเป็นกรดของ slag ด้วย

4. ขั้นตอนการริน slag ออกจากเตาอาร์คไฟฟ้า

หลังจากที่ได้ให้น้ำเหล็กตามที่ต้องการแล้ว เตาหลอมจะถูกเอียงประมาณ 15-20 องศาเพื่อริน slag ออกจากประตูด้านหน้าของเตาที่เรียกว่า slag door โดยจะริน slag ออกให้เหลือปริมาณเล็กน้อยเพื่อปกคลุมผิวหน้าของน้ำเหล็กไม่ให้สัมผัสกับอากาศ

5. ขั้นตอนการเทน้ำเหล็กออกจากเตาอาร์คไฟฟ้า

เมื่อได้น้ำเหล็กที่มีส่วนผสมและอุณหภูมิตามที่ต้องการแล้ว น้ำเหล็กจะถูกเทออกจากเตา การเทจะมีอยู่ 2 แบบ หลักๆ คือ แบบ Sprout ซึ่งเป็นแบบตั้งเค็ม โดยจะต้องเอียงเตาประมาณ 45 องศา หรือแบบ Eccentric bottom tapping ซึ่งเป็นแบบรูเทที่อยู่ด้านล่างเตา ซึ่งจะต้องเอียงเตาประมาณ 15-20 องศา ขั้นตอนการเทคือจะต้องไม่มี slag ออกจากเตาหลอม ไปติดกับเนื้อเหล็ก เนื่องจาก FeO ที่ติดไปจะส่งผลเสียต่อการปรับปรุงน้ำเหล็กในถังปรุงน้ำเหล็ก (Ladle) ในระหว่างการเทน้ำเหล็กสู่ถังปรุงน้ำเหล็กจะมีการธาตุที่เป็น oxidizer เพื่อลดปริมาณออกซิเจนในน้ำเหล็ก และเติมธาตุที่เป็น alloy เพื่อปรับปรุงส่วนผสมของน้ำเหล็ก

6. ขั้นตอนการตรวจสภาพและบำรุงรักษาเตาอาร์คไฟฟ้า

เป็นขั้นตอนหลังจากที่เทน้ำเหล็กออกจากเตาและก่อนที่จะทำการหลอมครั้งต่อไป โดยจะต้องทำการตรวจสภาพและบำรุงตัวเตา โดยจะเน้นไปที่วัสดุกันความร้อนที่เคลือบผนังเตา และแผงระบายความร้อน น้ำเหล็กที่ได้จะนำไปหล่อเป็นชิ้นเหล็ก ซึ่งมีอยู่ 3 ประเภทคือ slab billet และ bloom เพื่อที่จะนำไปทำการผลิตต่อไปในอุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย

3.2.3 อุตสาหกรรมเหล็กขั้นปลาย

เป็นอุตสาหกรรมที่นำเอาวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมเหล็กขั้นกลางมาแปรรูปด้วยการรีด ดึง ฯลฯ ซึ่งมีทั้งการรีดร้อนและรีดเย็น สำหรับการรีดร้อนนั้นต้องทำการเผาเหล็กให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมเสียก่อน อุปกรณ์หลักที่จะใช้เผาเหล็กคือ reheating furnace แท่งเหล็กที่ถูกนำเข้ามาเผาจะมีอยู่ 3 ประเภทคือ slab, billet และ bloom ซึ่งอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในประเทศจะใช้แท่งเหล็กที่เรียกว่า billet ขั้นตอนคือการป้อน billet สู่อ่าง reheating furnace ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 1100-1250°C ก่อนที่จะถูกส่งไปให้โรงรีดเหล็กเพื่อประรูปชิ้นเหล็กต่อไป reheating furnace จะใช้การเผาโดยตรงผ่านหัว burner

เชื้อเพลิงที่ใช้มีอยู่ 2 ประเภท คือ น้ำมันเตากับก๊าซธรรมชาติ กระบวนการเผาเหล็กแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ preheat, heating และ soaking โดยที่ส่วน preheat นั้นจะเป็นการนำความร้อนเหลือจากไอเสียมาแลกเปลี่ยนเพื่ออุ่นเหล็กให้ร้อน ส่วน heating นั้นจะเป็นการนำเหล็กเข้าสู่เตาแล้วให้ความร้อนจนเหล็กมีอุณหภูมิที่ต้องการ แล้วส่งต่อไปที่ส่วน soaking เพื่อให้ค่าความร้อนของเหล็กมีค่าคงที่ตลอดตัวชิ้นงาน

3.3 การเผาไหม้และเชื้อเพลิง

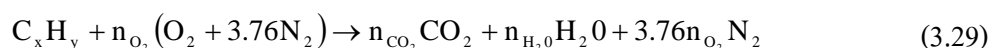
3.3.1 การเผาไหม้

การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงกับสารออกซิไดส์ซึ่งมักจะเป็นออกซิเจน โดยที่เชื้อเพลิงจะถูกออกซิไดส์และปลดปล่อยพลังงานออกมาสามารถเขียนเป็นสมการทางเคมีได้ และในขณะที่เกิดการเผาไหม้ขึ้นน้ำหนักของสารทั้งหมดจะคงที่จึงสามารถใช้กฎการอนุรักษ์มวลกับปฏิกิริยาเผาไหม้ได้ โดยที่การเผาไหม้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีสภาวะที่เหมาะสม (ส่วนใหญ่จะมีแหล่งความร้อนเพื่อจุดไฟขึ้น) โดยจากเรียกสารตั้งต้นว่า ตัวทำปฏิกิริยา (Reactant) ซึ่งประกอบด้วยเชื้อเพลิงและออกซิเจน และสารที่เกิดขึ้นหลังจากเกิดปฏิกิริยาว่าสารผลิตภัณฑ์ (Product)

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงองค์ประกอบของอากาศ

| องค์ประกอบ | | | | | | |
|---------------------|----------------|----------------|---------|-----------------|----------|----------------|
| อัตราส่วน | N ₂ | O ₂ | Ar | CO ₂ | Ne | H ₂ |
| โดยปริมาตร | 0.78090 | 0.20950 | 0.00930 | 0.0003 | 0.00018 | 0.0000052 |
| โดยน้ำหนัก | 0.7552 | 0.23150 | 0.0128 | 0.00046 | 0.000012 | 0.00000072 |
| ค่าประมาณองค์ประกอบ | | | | | | |
| อัตราส่วน | O ₂ | | | N ₂ | | |
| โดยปริมาตร | 0.21 | | | 0.79 | | |
| โดยน้ำหนัก | 0.232 | | | 0.768 | | |

ในกระบวนการเผาไหม้ส่วนใหญ่จะใช้ออกซิเจนจากอากาศมาเป็นสารผสมให้การเผาไหม้ จากตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของอากาศนั้นประกอบด้วย ไนโตรเจน 78% ออกซิเจน 21% และอาร์กอน 1% โดยโมล ไนโตรเจนและอาร์กอนจะถูกสมมติให้ไม่ทำปฏิกิริยา และในการเผาไหม้ปกติแล้วนั้นจะไม่สนใจอาร์กอนคือให้ไนโตรเจนเป็น 79% และออกซิเจนเป็น 21% ไปเลย จากร้อยละของส่วนผสมตามที่กล่าวมาจะทำให้เวลาคิด 1 โมลของออกซิเจนในปฏิกิริยาเคมีจะต้องพ่วง อีก 3.76 โมลของอากาศเข้าไปในสมการสมดุลเคมีด้วย



โดยที่ปริมาณอากาศที่น้อยที่สุดที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์ทางทฤษฎีจะเรียกว่าปริมาณอากาศทางทฤษฎี (Theoretical air) จะเรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นว่า ปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์ทางทฤษฎี (Stoichiometric combustion) และค่าทางทฤษฎีที่ใช้เรียกอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศเรียกว่า อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎี (Stoichiometric air-fuel ratio) เขียนเป็นสมการได้

$$AF_{\text{stoic}} = \left(\frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{fuel}}} \right) \quad (3.30)$$

เมื่อ

m_{air} คือ มวลของอากาศ (kg)

m_{fuel} คือ มวลของเชื้อเพลิง (kg)

ซึ่งค่าของอัตราส่วนนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของเชื้อเพลิงต่างๆ หากส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่านี้ การเผาไหม้ก็ยังคงเกิดขึ้นได้แต่จะต้องไม่ห่างจากค่าอากาศที่พอดีมากเกินไปและพลังงานที่ได้จะมีค่าไม่เต็มที่ ซึ่งในการเผาไหม้ปกติการที่จะทำให้ส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงผสมกันได้อย่างสม่ำเสมอในห้องเผาไหม้ด้วยอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีนั้นเป็นไปได้ยากอีกทั้งการป้อนอากาศให้ได้เท่ากับอัตราที่ต้องการนั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงมักมีการใส่อากาศเข้าไปเพิ่มในการเผาไหม้เพื่อให้เชื้อเพลิงกับอากาศสามารถผสมกันได้ดีขึ้น อากาศส่วนเกินที่ใส่เข้าไปนี้จะเรียกว่า อากาศส่วนเกิน (Excess air) สามารถเขียนเป็นสมการให้อยู่ในรูปร้อยละของอัตราส่วนอากาศกับเชื้อเพลิงทางทฤษฎีได้ตามสมการ

$$\% \text{ excess air} = \left(\frac{AF_{\text{actual}}}{AF_{\text{stoic}}} - 1 \right) \times 100\% \quad (3.31)$$

โดยที่

AF_{actual} คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงที่ใส่จริง

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปร้อยละตามสมการที่ 3.31 ตามปกติการใส่ค่าอากาศส่วนเกินไม่สมควรเกินร้อยละ 30

การตรวจสอบการเผาไหม้นั้นจะดูจากสารผสมต่างๆ ที่ออกมากับไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้สามารถคำนวณกลับตามสมการทางเคมีของเชื้อเพลิงนั้นๆ สารที่ออกมากับไอเสียนั้นตามทฤษฎีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ก็จะมี คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำและไนโตรเจน รวมทั้งก๊าซอื่นๆ ที่อาจมีผสมมาจากส่วนผสมของเชื้อเพลิง นอกจากก๊าซที่กล่าวมานั้นอาจจะพบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยสำหรับการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ และออกซิเจนที่ออกมาจากอากาศส่วนเกิน ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณออกซิเจนกับคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นจะมีค่าสวนทางกัน ตามปริมาณการใส่อากาศส่วนเกิน แต่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเป็นอันตรายต่อสุขภาพการใส่อากาศส่วนเกินนั้นเพื่อให้เกิดออกซิเจนออกมานั้นจึงมีความเหมาะสมมากกว่าในด้านสิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณาต่อถึงมุมมองในด้านพลังงานนั้น การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะเนื่องมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ค่าพลังงานความร้อนที่ได้มีค่าไม่เต็มที่ ในทางกลับกันการใส่ออกซิเจนเข้าไปก็จะเกิดการพาความร้อนของการเผาไหม้สูญเสียออกไปกับไอเสียส่งผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าลดลงเช่นกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้งสองมุมมองรวมกันแล้วการใส่อากาศส่วนเกินในปริมาณที่เหมาะสมนั้นน่าจะมีความเหมาะสมมากที่สุด

3.3.2 เชื้อเพลิง

สำหรับการหาค่าอากาศส่วนเกินนั้นสามารถหาได้จากการวัดปริมาณออกซิเจนที่ออกมากับไอเสีย โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ไอเสีย ซึ่งจะมีลักษณะเป็นหัวโพรบใช้สอดเข้าไปในรูท่อที่ไอเสียไหลผ่าน หลังจากนั้นก็จะสามารถนำค่าปริมาณออกซิเจนที่ได้มาคำนวณกลับหาค่าปริมาณอากาศส่วนเกินที่ใส่เข้าไปให้กับการเผาไหม้ได้ รวมทั้งสามารถดูสมการเคมีเพื่อหาอัตราของส่วนผสมทั้งด้านขาเข้าและขาออกของปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ด้วย ซึ่งเชื้อเพลิงหลักๆ ที่ใช้ในประเทศไทยพบอยู่สองประเภทคือน้ำมันเตาและก๊าซธรรมชาติ

สำหรับน้ำมันเตานั้นส่วนผสมจะเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมีอะตอมของคาร์บอนต่อกันเป็นห่วงโซ่ น้ำมันเตานั้นมีอยู่หลายชนิดทั้งน้ำมันเตาประเภทไอ ประเภทปานกลาง และ

ประเภทชั้นจำแนกตามความหนืดของสาร ซึ่งน้ำมันเตาที่ใช้สำหรับเตาเผาเหล็กนั้นสามารถจำแนกส่วนผสมของน้ำมันเตาได้ตามตารางที่ 3.3 ซึ่งจากปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักก็สามารถนำเอามวลโมเลกุลของแต่ละธาตุมาหารเพื่อทำเป็นอัตราส่วนโมลได้

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงองค์ประกอบของธาตุในน้ำมันเตาโดยเฉลี่ย (จิตติน แดงเที่ยง, 2010)

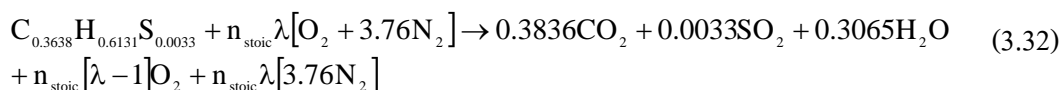
| องค์ประกอบ | ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก | มวลโมเลกุล | จำนวนโมล | ร้อยละโดยโมล |
|------------|------------------------|------------|----------|--------------|
| C | 86.4 | 12 | 7.2 | 0.3836 |
| H | 11.6 | 1 | 11.6 | 0.6131 |
| S | 2.0 | 32 | 0.0625 | 0.0033 |

สำหรับคุณสมบัติของเชื้อเพลิงนั้น ค่าที่จะนำมาวิเคราะห์ได้แก่ มวลโมเลกุล ค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงสูงและต่ำ แสดงไว้ตามตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงคุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันเตา (จิตติน แดงเที่ยง, 2010)

| คุณสมบัติ | ค่า | หน่วย |
|-----------------------|-------|----------|
| มวลโมเลกุล | 5.32 | kg/kmol |
| ความถ่วงจำเพาะ | 0.96 | - |
| ความจุความร้อนจำเพาะ | 1.884 | kJ/kg-K |
| ความร้อนเชื้อเพลิงสูง | 42.1 | MJ/liter |
| ความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ | 39.6 | MJ/liter |

เมื่อได้องค์ประกอบของน้ำมันเตาเรียบร้อยแล้วก็สามารถนำเอามาเขียนสมการการเผาไหม้ทางเคมีของน้ำมันเตาได้เป็น (จิตติน แดงเที่ยง, 2010)



เมื่อ n_{stoic} คืออัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อหนึ่งโมลของเชื้อเพลิงทางทฤษฎีซึ่งหาได้จากอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎีของน้ำมันเตา มีค่าเท่ากับ $0.5402 \text{ kmol}_{\text{O}_2}/\text{kmol}_{\text{fuel}}$ และ λ คืออัตราส่วนของอากาศที่ใส่ให้กับการเผาไหม้เทียบกับอากาศที่เหมาะสมกับการเผาไหม้

เมื่อทำการวัดค่าปริมาณออกซิเจนจากไอเสียจากเครื่องมือตรวจวิเคราะห์ไอเสียจะพบว่าจากสมการของการเผาไหม้น้ำมันเตาด้านบนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของร้อยละโดยมวลได้ตามสมการ

$$\% \text{O}_2 = \frac{(\lambda - 1)n_{\text{stoic}}}{0.3836 + 0.0033 + (\lambda - 1)n_{\text{stoic}} + 3.76n_{\text{stoic}}} \quad (3.33)$$

เนื่องจากค่าที่ทราบจากการตรวจวัดไอเสียคือค่าปริมาณของออกซิเจนจึงเขียนสมการด้านบนใหม่ให้อยู่ในรูปค่า λ และทำการแทนค่า n_{stoic} เข้าไปในสมการจะได้สมการที่ ซึ่งสามารถแทนค่าเพื่อหาอากาศส่วนเกินและค่าต่างๆ ในสมการการเผาไหม้ได้

$$\lambda = \frac{0.540 - 0.153 \left(\frac{\% \text{O}_2}{100} \right)}{0.540 - 2.571 \left(\frac{\% \text{O}_2}{100} \right)} \quad (3.34)$$

3.4 สมดุลมวลและสมดุลความร้อน

3.4.1 สมดุลมวล

การคำนวณสมดุลมวลของเตาเผาเหล็กนั้นจะเขียนให้อยู่ในรูปมวลต่อเวลา และเนื่องจากกฎการอนุรักษ์มวลที่กล่าวว่ามวลจะไม่สูญหายไป

$$\sum \dot{M}_{\text{in}} - \sum \dot{M}_{\text{out}} = \Delta \dot{M}_{\text{cv}} \quad (3.35)$$

เมื่อ

$\Delta \dot{M}_{\text{cv}}$ คือ มวลที่ถูกสะสมในระบบ (kg)

$\sum \dot{M}_{\text{in}}$ คือ มวลที่ไหลเข้าสู่ระบบ (kg)

$\sum \dot{M}_{\text{out}}$ คือ มวลที่ไหลออกจากระบบ (kg)

เมื่อให้ว่าไม่มีปริมาณมวลหลงเหลืออยู่ในเตาเผาเหล็กทำให้อัตราการไหลของมวลขาเข้ากับขาออกของเตาต้องมีปริมาณเท่ากัน ในที่นี้นั้นจะไม่มีกรคำนวณสมดุลมวลที่ recuperator เนื่องจากสารไม่

มีการเปลี่ยนแปลงสถานะและไม่มีการสัมผัสหรือผสมกันระหว่างสาร มีเพียงแค่การแลกเปลี่ยนความร้อนเท่านั้น ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านั้นส่วนใหญ่จะเก็บค่าให้อยู่ในรูปปริมาตรต่อเวลา จึงต้องทำการแปลงหน่วยด้วยความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงซึ่งแสดงให้เห็นในตารางแล้วในส่วนที่ผ่านมา สำหรับสมดุลมวลของน้ำมันเตาเข้าและขาออกสามารถจำแนกได้ตามตารางที่ 3.5 ดังนี้คือ

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงสมดุลมวลที่ไหลเข้าและออกจากเตาเผาเหล็ก

| มวลไหลเข้า | มวลไหลออก |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. อัตราการไหลของเชื้อเพลิง | 4. อัตราการไหลของไอเสียออก |
| 2. อัตราการไหลของอากาศ | 5. อัตราการไหลของไอเสียที่รั่วออก |
| 3. อัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้า | |

แต่ละค่าที่ระบุไว้สามารถคำนวณได้ตามนิยาม

1. อัตราการไหลของเชื้อเพลิง

อัตราการไหลของเชื้อเพลิงหาได้จากการวัดค่าปริมาตรของเชื้อเพลิงขาเข้าต่อเวลา เมื่อนำมาคูณกับค่าความถ่วงจำเพาะของเชื้อเพลิงจะได้ค่าอัตราการไหลของมวลเชื้อเพลิงออกมา

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = \rho_{\text{fuel}} \times \dot{V}_{\text{fuel}} \quad (3.36)$$

โดยที่

ρ_{fuel} คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงและ (kg/m^3)

\dot{V}_{fuel} คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงขาเข้าต่อเวลาที่ใช้ (m^3/s)

2. อัตราการไหลของอากาศ

อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ตามอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎีและค่าอากาศส่วนเกินที่วัดออกมาจากเครื่องตรวจวิเคราะห์ไอเสียและนำไปคำนวณหาค่าอากาศส่วนเกินออกมา

$$\% \text{O}_2 = \frac{(\lambda - 1)n_{\text{stoic}}}{0.3836 + 0.0033 + (\lambda - 1)n_{\text{stoic}} + 3.76n_{\text{stoic}}} \quad (3.37)$$

เมื่อ

n_{stoic} คือ อัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎี
 λ คือ ร้อยละของอากาศส่วนเกินที่ใส่เข้าไปให้การเผาไหม้

3. อัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

อัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตานั้นจะเกิดเมื่อความดันภายในเตามีค่าน้อยกว่าค่าความดันของอากาศภายนอก ซึ่งจะทำให้อากาศภายนอกไหลเข้าสู่ภายในเตาตามรอยรั่วของเตาและประตูทางเข้าทางออกของเหล็กที่เข้ามาสู่เตาซึ่งสามารถคำนวณได้จากปริมาณ O_2 ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่เนื่องจากปริมาณ O_2 ที่ทำการวัดนั้นวัดจากไอเสียอยู่แล้ว อัตราการไหลของอากาศในส่วนนี้จึงถูกคำนวณไปพร้อมกับไอเสีย

4. อัตราการไหลของไอเสียไปยัง recuperator

ปกติแล้วนั้นอัตราการไหลของไอเสียที่ไหลออกไปยัง recuperator นั้นมักจะนิยมวัดจากไอเสียจริงที่ออกจากปล่อง โดยมักจะใช้เครื่องมือจำพวก pitot tube เพื่อวัดความเร็วของไอเสียแล้วนำมาคำนวณจากสมการการไหล

$$\dot{m}_{\text{flue}} = \rho_{\text{flue}} \times V_{\text{stack}} \times A_{\text{stack}} \quad (3.38)$$

เมื่อ

ρ_{flue} คือ ความหนาแน่นของไอเสีย (kg/m^3)
 V_{stack} คือ ความเร็วของไอเสียที่ไหลผ่านปล่อง (m/s)
 A_{stack} คือ พื้นที่หน้าตัดของปล่อง (m^2)

5. อัตราการไหลของไอเสียที่รั่วออกจากเตาเผา

อัตราการไหลของไอเสียที่รั่วออกจากเตานั้นสามารถคำนวณได้จากสมดุลมวลตามสมการที่ว่า อัตราการไหลเข้าของมวลจะเท่ากับอัตราการไหลออก

$$\dot{m}_{\text{flue,leak}} = \dot{m}_{\text{flue}} + \dot{m}_{\text{air}} - \dot{m}_{\text{flue}} \quad (3.39)$$

3.4.1 สมดุลความร้อน

เนื่องจากเรื่องที่น่าสนใจจะศึกษาเป็นเรื่องเกี่ยวกับการให้ความร้อนแก่ชิ้นเหล็กในสภาวะควบคุม เรื่องสำคัญที่ต้องเข้ามาเกี่ยวข้องคือเรื่องสมดุลความร้อนและกฎของการอนุรักษ์พลังงาน สำหรับความร้อนที่ป้อนให้อุปกรณ์หรืองานจากการสันดาปของเชื้อเพลิงส่วนหนึ่งนั้นจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่อีกส่วนจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ เป็นความร้อนที่สูญเสียหรือต้องปล่อยทิ้งไป จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะต้องสร้างสมดุลความร้อนขึ้นมาเพื่อให้เข้าใจถึงการใช้พลังงานในอุปกรณ์และหาประโยชน์จากความร้อนสูญเสียให้ได้เต็มที่ที่สุด

หัวใจสำคัญในการศึกษาเกี่ยวกับสมดุลความร้อนคือ กฎการอนุรักษ์พลังงาน ที่ว่า พลังงานไม่สามารถสร้างขึ้นหรือทำลายได้แต่สามารถเปลี่ยนรูปได้ หากคิดที่สภาวะคงตัว (Steady state) ที่ระบบปิดในปริมาตรควบคุมจะได้ว่า

$$\Delta \dot{E}_{st} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \quad (3.40)$$

เมื่อ

| | | |
|-----------------------|-----|------------------------------|
| $\Delta \dot{E}_{st}$ | คือ | พลังงานที่ถูกสะสมในระบบ (W) |
| \dot{E}_{in} | คือ | พลังงานที่ไหลเข้าสู่ระบบ (W) |
| \dot{E}_{out} | คือ | พลังงานที่ไหลออกจากระบบ (W) |

สำหรับระบบที่ไม่มีการสะสมความร้อนเอาไว้ $\Delta \dot{E}_{st}$ จะมีค่าเป็นศูนย์นั่นคือพลังงานที่ไหลเข้าสู่ระบบจะมีค่าเท่ากับพลังงานที่ไหลออกจากระบบ เป็นสมดุลความร้อนนั่นเอง และสำหรับการคำนวณพลังงานที่ไหลจากการไหลของมวลนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (3.41)$$

เมื่อ

| | | |
|-----------|-----|---|
| \dot{m} | คือ | อัตราการไหลของมวลที่พาพลังงานเข้าสู่ระบบ (kg/s) |
| c_p | คือ | ความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg•K) |
| T_{out} | คือ | อุณหภูมิขาออก (K) |
| T_{in} | คือ | อุณหภูมิขาเข้า (K) |

3.4.1.1 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

รายละเอียดของสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กในสภาวะการทำงานปกติจะเป็นไปตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตารางแสดงสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

| พลังงานความร้อนขาเข้า | พลังงานความร้อนขาออก |
|--------------------------------------|---|
| 1. ความร้อนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ | 6. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก |
| 2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า | 7. ความร้อนสัมผัสของไอเสียไปยัง recuperator |
| 3. ความร้อนของการ preheat อากาศ | 8. ความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกล |
| 4. ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล | 9. ความร้อนสูญเสียผ่านการแผ่รังสี |
| 5. ความร้อนสัมผัสของอากาศที่รั่วเข้า | 10. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา |
| | 11. ความร้อนสูญเสียของไอเสียที่รั่วออก |
| | 12. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ |

1. ความร้อนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้จะเป็นค่าความร้อนหลักของเตาเผาเหล็กจะคำนวณจากค่าอัตราการไหลของเชื้อเพลิงคูณด้วยค่าความร้อนของเชื้อเพลิง และเนื่องจากไอเสียที่เผาไหม้ออกมาได้แล้วนั้นมีอุณหภูมิสูงสถานะของไอเสียจะอยู่ในรูปของก๊าซและไอน้ำ ค่าความร้อนที่ใช้คำนวณจึงใช้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำ (low heating value) สามารถหาค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ได้ตามสมการ

$$\dot{Q}_{\text{comb}} = \text{LHV} \times \dot{m}_{\text{fuel}} \quad (3.42)$$

เมื่อ

LHV คือ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงต่ำ (kJ/m^3)

2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า

ค่าความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้าเป็นพลังงานที่เชื้อเพลิงนำเข้ามาในปริมาณควบคุมจากอุณหภูมิของตัวเอง เพราะว่าตัวเชื้อเพลิงเองก็ต้องถูกอุ่นให้ร้อนเพื่อลดความหนืดของเชื้อเพลิง และสามารถฉีดเป็นละอองได้โดยง่าย สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\dot{Q}_{\text{fuel, sen}} = \dot{m}_{\text{fuel}} (T_{\text{fuel}} - T_0) \quad (3.43)$$

เมื่อ

| | | |
|-------------------|-----|--|
| c_{fuel} | คือ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (kJ/kg·K) |
| T_{fuel} | คือ | อุณหภูมิของเชื้อเพลิงขาเข้า (K) |
| T_0 | คือ | อุณหภูมิอ้างอิงกำหนดให้เป็น 298.15 K (25°C) |

3. ความร้อนของการ preheat อากาศที่ recuperator

ค่าความร้อนของการ preheat อากาศที่ recuperator นั้นจะเป็นค่าความร้อนสัมผัสของอากาศขาเข้าที่ผ่านเข้าสู่ recuperator และแลกเปลี่ยนความร้อนกับไอเสียทำให้อากาศที่ไหลเข้ามาในเตาเผานั้นมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นการประหยัดพลังงานเชื้อเพลิงทางหนึ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{air}} c_{\text{air}} (T_{\text{air, preheat}} - T_0) \quad (3.44)$$

เมื่อ

| | | |
|---------------------------|-----|---|
| c_{air} | คือ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศขาเข้าซึ่งจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ (kJ/kg·K) |
| $T_{\text{air, preheat}}$ | คือ | อุณหภูมิของอากาศขาเข้าที่ไหลผ่าน recuperator มาเรียบร้อยแล้ว (K) |

4. ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล

ค่าความร้อนจากการก่อตัวของสเกลเป็นค่าความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อเหล็กรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศและเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์หรือสเกลนั่นเอง ซึ่งกระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นกระบวนการคายความร้อนให้ความร้อนออกมาเท่ากับ 5161 kJ/kg_{scale} สามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{\text{scale}} = \dot{m}_{\text{slab}} \left(\frac{\% \text{scale}}{100} \right) HV_{\text{scale}} \quad (3.45)$$

โดยที่สเกลที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นร้อยละต่อปริมาณเหล็กทั้งหมด และ

\dot{m}_{slab} คือ อัตราการใส่แท่งเหล็กเข้าสู่เตา (kg/s)

HV_{scale} คือ ค่าความร้อนจากการก่อตัวของสเกล (kJ/kg)

5. ความร้อนของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

ความร้อนของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีอากาศไหลเข้าหรือไหลออกจากเตาเผา อากาศนั้นจะนำพาพลังงานความร้อนสัมผัสไปกับตัวของอากาศด้วยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{air,leak} = \dot{m}_{air,leak} c_{air} (T_{amb} - T_0) \quad (3.46)$$

เมื่อ

T_{amb} คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอกเตาเผา (K)

6. ความร้อนสัมผัสเข้าสู่เหล็ก

ความร้อนสัมผัสเข้าสู่เหล็กจะเป็นพลังงานความร้อนที่เหล็กได้รับจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เพื่อให้อุณหภูมิของเหล็กมีค่าตามที่ต้องการคือ 1100-1250°C เป็นความร้อนหลักที่ต้องการทางด้านขาออก ซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็ก สามารถหาได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{slab,sen} = \dot{m}_{slab} c_{slab} (T_{slab,out} - T_{slab,in}) \quad (3.47)$$

เมื่อ

C_{slab} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กจะมีค่าประมาณ 0.78 kJ/kg-K

$T_{slab,in}$ คือ ค่าอุณหภูมิขาเข้าของเหล็ก (K)

$T_{slab,out}$ คือ ค่าอุณหภูมิขาออกของเหล็ก (K)

7. ความร้อนสัมผัสของไอเสียไปยัง recuperator

ค่าความร้อนสัมผัสของไอเสียไปยัง recuperator เป็นค่าความร้อนสัมผัสที่ไอเสียพาไปยัง recuperator จะมีค่าอยู่ประมาณ 20-40% ของพลังงานความร้อนขาเข้าทั้งหมด ซึ่งค่าความร้อนนี้จะถูกกลับไปอุ่นอากาศขาเข้าให้ร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{\text{flue, furnace}} = \dot{m}_{\text{flue}} c_{\text{flue}} (T_{\text{flue, furnace}} - T_0) \quad (3.48)$$

เมื่อ

c_{flue} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอเสีย สามารถทำการคำนวณได้เมื่อทราบส่วนผสมของไอเสียที่ไหลออกมา (kJ/kg•K)

$T_{\text{flue, furnace}}$ คือ ค่าอุณหภูมิของไอเสียหลังจากออกจากเตาเผาเหล็กก่อนที่จะเข้าสู่ recuperator (K)

8. ความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกล

ค่าความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกลเป็นค่าที่สเกลได้รับจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเช่นเดียวกับตัวชิ้นเหล็ก สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{\text{scale, sen}} = \dot{m}_{\text{slab}} \left(\frac{\% \text{scale}}{100} \right) c_{\text{scale}} (T_{\text{scale, out}} - T_{\text{scale, in}}) \quad (3.49)$$

เมื่อ

c_{scale} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสเกล โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.90 kJ/kg-K

$T_{\text{scale, out}}$ และ $T_{\text{scale, in}}$ คืออุณหภูมิขาเข้าและขาออกของสเกลซึ่งจะมีค่าเท่ากับตัวเหล็ก

9. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา

ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตานั้นจะเกิดได้ 2 กรณีคือการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนนั่นเอง มีค่าขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ฉนวนความร้อนของผนัง อุณหภูมิภายนอก ความเร็วของกระแสลมที่พัดผ่าน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{wall}} = \sum [h_{\text{wall}} A_{\text{wall}} (T_{\text{wall}} - T_{\text{amb}}) + \epsilon \sigma A_{\text{wall}} (T_{\text{wall}}^4 - T_{\text{amb}}^4)] \quad (3.50)$$

เมื่อ

h_{wall} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m²•K)

A_{wall} คือ พื้นที่ผิวด้านนอกของผนังเตา (m²)

T_{wall} คือ อุณหภูมิของผนังเตา (K)

10. ความร้อนสูญเสียผ่านน้ำหล่อเย็น

เป็นความร้อนสูญเสียที่เกิดจากน้ำหล่อเย็นที่เข้ามาหล่อเย็นอุปกรณ์ภายในเตาแล้วไหลออกไปนำพลังงานออกไปด้วย

$$\dot{Q}_{\text{water}} = \dot{m}_{\text{water}} c_{\text{water}} (T_{\text{water,out}} - T_{\text{water,in}}) \quad (3.51)$$

เมื่อ

| | | |
|--------------------------|-----|---|
| \dot{m}_{water} | คือ | อัตราการไหลของมวลน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าสู่เตา (kg/s) |
| c_{water} | คือ | ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น (kJ/kg-K) |
| $T_{\text{water,in}}$ | คือ | อุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็น (K) |
| $T_{\text{water,out}}$ | คือ | อุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็น (K) |

11. ความร้อนสูญเสียของไอเสียที่รั่วออกจากเตา

ความร้อนสูญเสียของไอเสียที่รั่วออกจากเตา เป็นค่าความร้อนที่ไอเสียที่รั่วออกพาออกไปจากเตาเผาเหล็กผ่านทางช่องเปิด หรือรูรั่วต่างๆ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{\text{flue,leak}} = \dot{m}_{\text{flue,leak}} c_{\text{flue,leak}} (T_{\text{flue,leak}} - T_0) \quad (3.52)$$

เมื่อ

| | | |
|------------------------|-----|---|
| $c_{\text{flue,leak}}$ | คือ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอเสียที่รั่วออกจากเตา (kJ/kg-K) |
| $T_{\text{flue,leak}}$ | คือ | อุณหภูมิของไอเสียที่รั่วออกจากเตาจะประมาณให้เท่ากับอุณหภูมิภายในเตา (K) |

โดยปกติแล้วนั้นค่าความร้อนสูญเสียของไอเสียที่รั่วออกจากเตานั้นจะเป็นค่าที่ประมาณได้ยาก เนื่องจากมีขนาดน้อยมากจึงอาจให้ไปรวมกับความร้อนสูญเสียอื่นๆ ได้

12. ความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ

ความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ เป็นส่วนที่ไม่ทราบหรือไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง การคำนวณค่าความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ จึงจะมีจากการคำนวณสมดุลความร้อนนั่นเอง

3.4.1.2 สมดุลความร้อนของ Recuperator

นอกจากสมดุลความร้อนที่เตาเผาเหล็กแล้ว ยังต้องทำการคำนวณสมดุลความร้อนที่ recuperator ด้วย แม้จะไม่มีสมดุลมวลที่ recuperator แต่ก็มี การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียที่ไหลออก และ อากาศที่ไหลเข้ามาสู่เตาเผาเหล็ก สมดุลความร้อนที่ recuperator จะเป็นไปตามตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ตารางแสดงสมดุลความร้อนที่ recuperator

| พลังงานความร้อนขาเข้า | พลังงานความร้อนขาออก |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลเข้า | 3. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลออก |
| 2. ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลเข้า | 4. ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลออก |
| | 5. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ |

1. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลเข้า

ความร้อนจากไอเสียที่ไหลเข้านี้มีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไปสู่ recuperator (สมการ 3.48) ในส่วนก่อนนั่นเอง เพราะจะไม่คิดการสูญเสียระหว่างทาง

2. ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลเข้า

ความร้อนจากอากาศที่ไหลเข้าสู่ recuperator เป็นค่าความร้อนสัมผัสของอากาศที่ไหลเข้าสู่ recuperator สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\dot{Q}_{\text{air, inlet}} = \dot{m}_{\text{air, inlet}} c_{\text{air, inlet}} (T_{\text{amb}} - T_0) \quad (3.53)$$

3. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลออก

ความร้อนจากไอเสียที่ไหลออกเป็นความร้อนสัมผัสที่ไอเสียไหลออกพาไปกับตัวไอเสียด้วย สามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$\dot{Q}_{\text{flue, recup}} = \dot{m}_{\text{flue, recup}} c_{\text{flue, recup}} (T_{\text{flue, recup}} - T_0) \quad (3.54)$$

เมื่อ

- $c_{flue,recup}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอเสีย สามารถทำการคำนวณได้
เมื่อทราบส่วนผสมของไอเสียที่ไหลออกมา ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$)
- $T_{flue,recup}$ คือ ค่าอุณหภูมิของไอเสียหลังออกจาก recuperator (K)

4. ค่าความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลออก

ความร้อนจากอากาศที่ไหลออกจาก recuperator เป็นความร้อนสัมผัสของอากาศที่ทำการ preheat เรียบร้อยแล้ว จะมีค่าเท่ากับความร้อนของการ preheat อากาศที่ recuperator (สมการ 3.44 *)

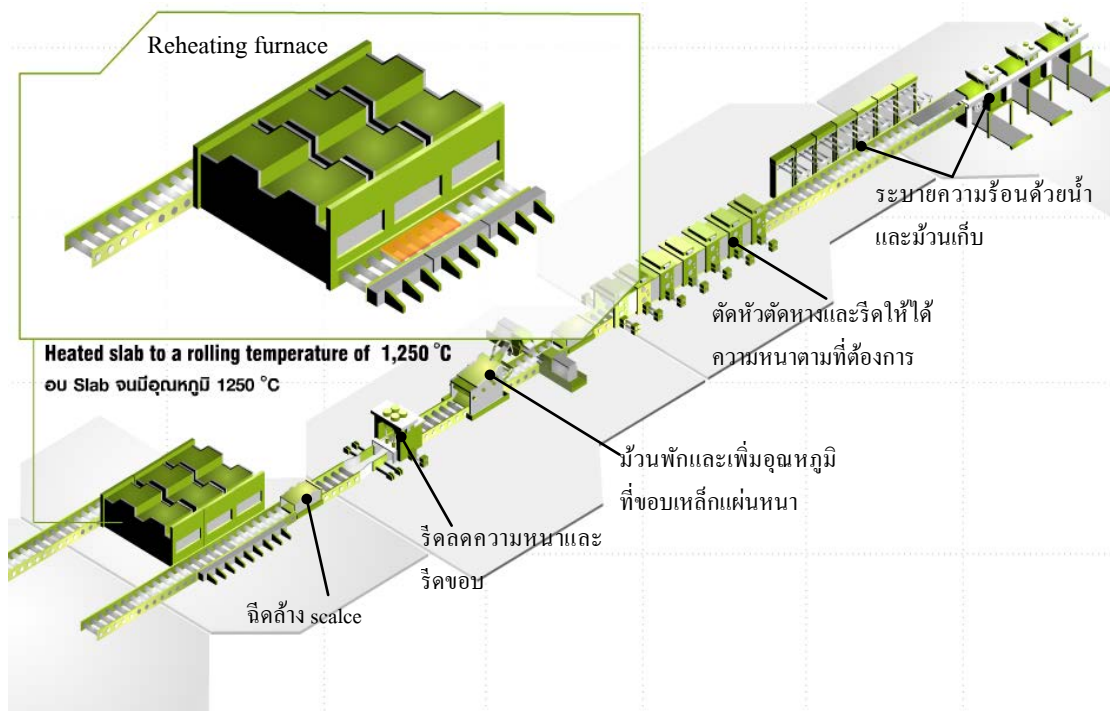
5. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

ความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ เป็นส่วนที่ไม่ทราบหรือไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง การคำนวณค่าความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ จึงมาจากการคำนวณสมดุลความร้อน

บทที่ 4 เตาเผาเหล็ก

4.1 ลักษณะของเตาเผาเหล็กที่จะศึกษา

เตาเผาเหล็กที่จะใช้ทำการศึกษาคือเตาเผาเหล็กจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล็กชั้นปลายแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นโรงงานผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนขนาดใหญ่ โดยมีวัตถุดิบเป็นเหล็กแท่งแบน การทำงานของโรงงาน จะมีเตาเผาเหล็กทั้งหมด 3 เตา มีการผลิตเหล็กตลอด 24 ชั่วโมง แต่ไม่ได้ดำเนินการผลิต 24 ชั่วโมงทุกเตา ซึ่งจะเดินเตาหมายเลขใดขึ้นอยู่กับปริมาณการผลิตและความเหมาะสม มีการวางผังตามรูปที่ 4.1 และปริมาณการผลิตในเดือนพฤศจิกายนปี 2554 ตามตารางที่ 4.1



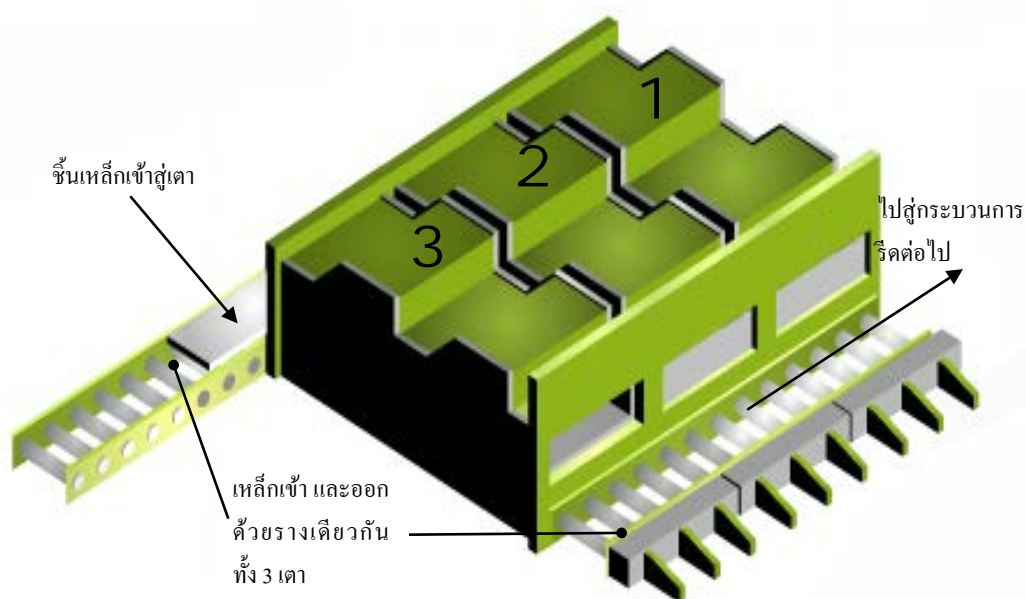
รูปที่ 4.1 ภาพเส้นทางการผลิตเหล็กในโรงงาน

ตารางที่ 4.1 ตารางการทำงานในเดือนพฤศจิกายนของโรงงานในปี 2554 แยกตามวันที่ผลิต

| วันที่ | เวลาทำงานตามปฏิทิน | เวลาที่หยุดงาน | เวลาทำงาน | เวลาหยุดเนื่องจากเครื่องจักร | เวลาทำงานจริง | %การทำงาน |
|----------|--------------------|----------------|-----------|------------------------------|---------------|-----------|
| 1/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 4.80 | 19.20 | 80.00% |
| 2/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 1.78 | 22.22 | 92.57% |
| 3/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 2.07 | 21.93 | 91.39% |
| 4/11/54 | 24 | 13.83 | 10.17 | 0.55 | 9.62 | 94.59% |
| 5/11/54 | 24 | 10.12 | 13.88 | 0.37 | 13.52 | 97.36% |
| 6/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.40 | 23.60 | 98.33% |
| 7/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.43 | 23.57 | 98.19% |
| 8/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 1.02 | 22.98 | 95.76% |
| 9/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 1.63 | 22.37 | 93.19% |
| 10/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 1.80 | 22.20 | 92.50% |
| 11/11/54 | 24 | 3.00 | 21.00 | 0.77 | 20.23 | 96.35% |
| 12/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 1.08 | 22.92 | 95.49% |
| 13/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.55 | 23.45 | 97.71% |
| 14/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.85 | 23.15 | 96.46% |
| 15/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 3.37 | 20.63 | 85.97% |
| 16/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 6.83 | 17.17 | 71.53% |
| 17/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 2.45 | 21.55 | 89.79% |
| 18/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 1.22 | 22.78 | 94.93% |
| 19/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.77 | 23.23 | 96.81% |
| 20/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.57 | 23.43 | 97.64% |
| 21/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.57 | 23.43 | 97.64% |
| 22/11/54 | 24 | 2.00 | 22.00 | 2.47 | 19.53 | 88.79% |
| 23/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.72 | 23.28 | 97.01% |
| 24/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 0.65 | 23.35 | 97.29% |
| 25/11/54 | 24 | 13.30 | 10.70 | 5.88 | 4.82 | 45.02% |
| 26/11/54 | 24 | 2.67 | 21.33 | 4.18 | 17.15 | 80.39% |
| 27/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 1.15 | 22.85 | 95.21% |
| 28/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 5.18 | 18.82 | 78.40% |
| 29/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 1.20 | 22.80 | 95.00% |
| 30/11/54 | 24 | 0.00 | 24.00 | 6.68 | 17.32 | 72.15% |

4.2 การทำงานของเตาเผาเหล็ก

เตาเผาเหล็กของโรงงานนั้นมีด้วยกันทั้งหมด 3 เตา ซึ่งเตาที่ 1 กับเตาที่ 2 จะใช้ท่อไอเสียและ stack ร่วมกัน เตาที่ 3 นั้นสร้างหลังจากเตาที่ 1 และ 2 จึงใช้ระบบแยกกัน การทำงานของเตาทั้ง 3 ตัวจะควบคุมโดยห้องควบคุมที่เดียวกัน การเดินเตาเป็นแบบอัตโนมัติโดยมีคนเป็นผู้ควบคุมอีกที โดยการดำเนินงานจะส่งเหล็กเข้าสู่เตาและออกด้วยรางเดียวกันตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การทำงานของเตาเผาเหล็ก

เตาเผาตัวที่ 1 และตัวที่ 2 มีขนาดการผลิตสูงสุด 275 ตันต่อชั่วโมงและตัวที่ 3 มีอัตราการผลิต 250 ตันต่อชั่วโมง จึงพิจารณาเตาที่มีการผลิตสูงกว่าเนื่องจากว่าต้องการนำเอาไอเสียมาใช้ เตาที่มีการผลิตสูงกว่าจะให้ไอเสียและพลังงานที่ออกมากับไอเสียมากกว่า โดยในเดือนพฤศจิกายนที่เก็บข้อมูลมา มีการผลิตดังตาราง ก.1 ในภาคผนวก ก พบว่าในเดือนพฤศจิกายนมีการเดินเตาเพียงตัวเดียวและส่วนใหญ่เป็นการเดินเตาตัวที่ 1 จึงเลือกเอาวันที่มีการผลิตสูงสุดคือวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554 มาเป็นหลักในการคำนวณ

ตารางที่ 4.2 ตารางการผลิตเหล็กในเดือนพฤศจิกายน 2554 ที่ทำการศึกษา แยกตามวันที่ผลิต

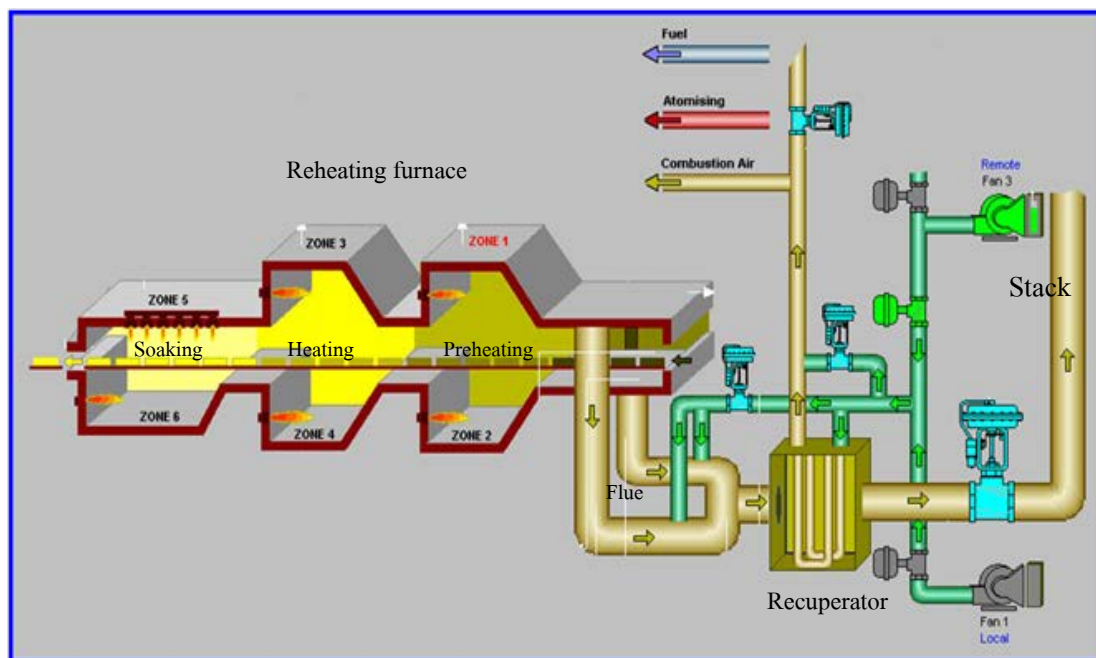
| วันที่ | ขนาดการผลิต | | น้ำหนักเฉลี่ยของแท่งเหล็ก (ตันต่อชิ้น) |
|----------|-------------|-----------------|---|
| | (ตัน) | (ตันต่อชั่วโมง) | |
| 1/11/54 | 7,070.350 | 368.2 | 21.0 |
| 2/11/54 | 7,981.715 | 359.3 | 22.9 |
| 3/11/54 | 7,544.665 | 344.0 | 22.9 |
| 4/11/54 | 4,178.150 | 434.5 | 22.8 |
| 5/11/54 | 2,717.675 | 201.1 | 23.0 |
| 6/11/54 | 4,271.195 | 181.0 | 23.0 |
| 7/11/54 | 4,772.065 | 202.5 | 22.9 |
| 8/11/54 | 4,146.095 | 180.4 | 22.7 |
| 9/11/54 | 4,096.418 | 183.1 | 22.8 |
| 10/11/54 | 4,352.415 | 196.1 | 22.9 |
| 11/11/54 | 4,098.625 | 202.6 | 22.9 |
| 12/11/54 | 4,496.675 | 196.2 | 22.8 |
| 13/11/54 | 4,629.680 | 197.4 | 22.6 |
| 14/11/54 | 4,549.320 | 196.5 | 22.2 |
| 15/11/54 | 4,086.625 | 198.1 | 22.2 |
| 16/11/54 | 3,315.750 | 193.2 | 22.1 |
| 17/11/54 | 3,961.350 | 183.8 | 22.2 |
| 18/11/54 | 3,638.765 | 159.7 | 22.6 |
| 19/11/54 | 3,725.805 | 160.4 | 22.6 |
| 20/11/54 | 4,361.060 | 186.1 | 22.5 |
| 21/11/54 | 4,266.890 | 182.1 | 22.5 |
| 22/11/54 | 3,865.480 | 197.9 | 22.3 |
| 23/11/54 | 4,411.885 | 189.5 | 20.6 |
| 24/11/54 | 4,485.405 | 192.1 | 22.3 |
| 25/11/54 | 939.730 | 195.1 | 22.8 |
| 26/11/54 | 3,415.785 | 199.2 | 22.8 |
| 27/11/54 | 4,457.920 | 195.1 | 22.7 |
| 28/11/54 | 3,073.405 | 163.3 | 22.6 |
| 29/11/54 | 3,737.485 | 163.9 | 22.3 |
| 30/11/54 | 2,749.745 | 158.8 | 22.8 |

ลักษณะภายในเตาจะแบ่งออกเป็น 3 โซนคือ preheating heating และ soaking มีหัวเผาทั้งหมด 81 หัว แบ่งเป็นหัวเผาในโซน preheating 18 หัว โซน heating 18 หัว และในโซน soaking 45 หัว มีลักษณะของเตาดังนี้

1. เตาเป็นแบบ walking beam type จึงต้องมีน้ำหล่อเย็น
2. เตาเผามีขนาด 12,650x42,000 mm
3. ภายในเตาเผาเหล็กยังแบ่งย่อยออกเป็น 6 โซนย่อยคือ preheating heating และ soaking ในด้าน top และ bottom
4. อุณหภูมิภายในเตาเผาแบ่งเป็น
 - a. Preheating 700°C
 - b. Heating 1200°C
 - c. Soaking 1250°C
5. เตามี recuperator เพื่อนำความร้อนที่กลับมาอุ่นอากาศเข้า
6. ไอเสียใช้ natural draught เพื่อดึงไอเสียออกจากเตา ไม่มี blower แต่มี damper เพื่อควบคุม
7. ใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต มี heater เพื่ออุ่นน้ำมันเตาไปที่ 110°C เพื่อลดความหนืดของเชื้อเพลิง
8. การควบคุมความดันภายในเตาจะให้อยู่ที่ +0.8 mmHg
9. อัตราการใช้เชื้อเพลิงต่อการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 36.77 litres/ton
10. ขนาดของ slab เป็นไปตามนี้คือ
 - a. ความหนา 160-255 mm
 - b. ความกว้าง 750-1550 mm
 - c. ความยาว 4300-10800 mm
 - d. น้ำหนักสูงสุด 36 ตัน
11. ขนาดของท่อไอเสียที่ออกเป็นท่อวงกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.40 m
12. อากาศที่ไหลเข้าประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อากาศที่ใช้เผาไหม้ (Combustion air) กับ อากาศอัด (Atomize air) ที่ใช้เพื่อฉีดเชื้อเพลิงให้เป็นละอองมีความดันประมาณ 6.10 บาร์

ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะของเตาเผาเหล็ก

| Item | Description | Furnace no.1 & 2 |
|------|----------------------------------|------------------|
| 1 | Reheating Furnace Type | Walking Beam |
| 2 | Furnace Capacity (Tons / Hr) | 275 |
| 3 | Manufacturer | ITALIMPIANTI |
| 4 | Furnace Dimension (mm) | 12,650 x 42,000 |
| | - Width inside wall | 11,800 |
| | - Length inside walls | 40,800 |
| | - Height (Above pass - line) | 3,800 |
| | - Depth (Below pass - line) | 3,200 |
| | <i>Preheating Zone</i> | |
| | - Width inside wall | 11,800 |
| | - Length inside walls | 19,220 |
| | - Height (Above pass - line) | 3,800 |
| | - Depth (Below pass - line) | 3,200 |
| | <i>Heating Zone</i> | |
| | - Width inside wall | 11,800 |
| | - Length inside walls | 12,000 |
| | - Height (Above pass - line) | 3,500 |
| | - Depth (Below pass - line) | 3,200 |
| | <i>Soaking Zone</i> | |
| | - Width inside wall | 11,800 |
| | - Length inside walls | 9,580 |
| | - Height (Above pass - line) | 1,500 |
| | - Depth (Below pass - line) | 2,800 |
| 5 | Burner Type & Quantity | |
| | - Radiant Burner | 36 |
| | - Frontal Burner | 45 |
| | - Side Burner | - |
| 6 | Furnace Zone Temperature Control | 6 Zone |



รูปที่ 4.3 ลักษณะภายในเตาเผาเหล็ก

4.3 การเก็บข้อมูล

สำหรับการเก็บข้อมูลนั้น เนื่องจากโรงงานนี้เป็นระบบอัตโนมัติเกือบทั้งหมด จากการเข้าเยี่ยมชมพบว่ามีการบันทึกข้อมูลไว้อย่างละเอียด ทำให้สามารถขอข้อมูลจากโรงงานได้ทันที มีข้อมูลที่ต้องการดังตารางที่ 4.3 และข้อมูลที่เก็บมาจะแสดงเอาไว้ในภาคผนวก ก วันที่เข้าไปเยี่ยมชมโรงงานคือวันที่ พฤษภาคม 2555 ข้อมูลที่ได้จากโรงงานจะเป็นข้อมูลตั้งแต่เดือนตุลาคม 2554 ถึง มีนาคม 2555 แต่เดือนที่มีการเดินเตาตัวที่ 1 เพียงตัวเดียวคือเดือนพฤศจิกายน 2554 ถึงต้นเดือน ธันวาคม 2554 จึงเลือกเดือนพฤศจิกายนมาพิจารณาตามเหตุผลที่กล่าวไปข้างต้น

ตารางที่ 4.4 แสดงข้อมูลที่ต้องการ

| ข้อมูลที่ต้องการ | |
|--|-----------------------|
| อัตราการผลิตของแท่งเหล็ก | \dot{m}_{slab} |
| ขนาดของแท่งเหล็ก | |
| อัตราการไหลของอากาศขาเข้า | $\dot{m}_{air,inlet}$ |
| อุณหภูมิของอากาศขาเข้า | T_{air} |
| อัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง | \dot{m}_{fuel} |
| % ของออกซิเจนในไอเสีย | % O ₂ |
| อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตา | T_{flue} |
| อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจาก recuperator | $T_{flue,recup}$ |
| อุณหภูมิของอากาศก่อน preheat | $T_{air,inlet}$ |
| อุณหภูมิของผนังเตา (จากภาคผนวก) | T_{wall} |
| อุณหภูมิของแท่งเหล็กที่เข้าสู่เตา | $T_{slab,in}$ |
| อุณหภูมิของแท่งเหล็กที่ออกจากเตา | $T_{slab,out}$ |
| อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น | \dot{m}_{water} |
| อุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็น | $T_{water,in}$ |
| อุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็น | $T_{water,out}$ |

4.4 สมดุลมวลและสมดุลความร้อน

จากตารางที่ 4.4 จะนำเอาข้อมูลของเตาเผาเหล็กในวันที่ 7 จากภาคผนวก ก มาเฉลี่ยเพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณสมดุลมวลและสมดุลความร้อนได้ตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงข้อมูลที่ต้องการวัดของโรงงานในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554

| ข้อมูลที่ต้องการวัด | ตัวแปร | ค่าของข้อมูล |
|--|------------------------------|-------------------------------|
| อัตราการผลิตของแท่งเหล็ก | \dot{m}_{slab} | 55.61 kg/s |
| ขนาดของแท่งเหล็ก | | 0.25x1.26x9.24 m ³ |
| อัตราการไหลของอากาศขาเข้า | $\dot{m}_{\text{air,inlet}}$ | 24.49 kg/s |
| อุณหภูมิของอากาศขาเข้า | T_{air} | 475.07°C |
| อัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง | \dot{m}_{fuel} | 1.815 kg/s |
| % ของออกซิเจนในไอเสีย | %O ₂ | 0.9883 |
| อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจากเตา | T_{flue} | 723.44°C |
| อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจาก recuperator | $T_{\text{flue,recup}}$ | 408.37°C |
| อุณหภูมิของอากาศก่อน preheat | $T_{\text{air,inlet}}$ | 30°C |
| อุณหภูมิของเชื้อเพลิงขาเข้า | T_{wall} | 120°C |
| อุณหภูมิของแท่งเหล็กที่เข้าสู่เตา | $T_{\text{slab,in}}$ | 30°C |
| อุณหภูมิของแท่งเหล็กที่ออกจากเตา | $T_{\text{slab,out}}$ | 1289.73°C |
| อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น | \dot{m}_{water} | 1095.6 kg/s |
| อุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็น | $T_{\text{water,in}}$ | 33.2°C |
| อุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็น | $T_{\text{water,out}}$ | 39.8°C |

จากตารางที่ 4.5 สมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554 เป็นไปตามนี้คือ

4.4.1 สมดุลมวล

สมดุลมวลจะถูกแสดงในตารางที่ 4.6 อัตราการไหลของน้ำมันเชื้อเพลิงจะได้มาจากการวัดค่าจริง อัตราการไหลของอากาศที่วัดมานั้นจะไม่ได้รวมอากาศอัดเข้าไปด้วย จึงใช้ %O₂ เข้ามาช่วยเพื่อประมาณอากาศเข้าแทนและแสดงในสมดุลมวล ซึ่งปริมาณที่คำนวณออกมานั้นจะมีค่ามากกว่าที่วัดได้จริง คิดเป็นอัตราส่วนอากาศอัดต่ออากาศไหลเข้าทั้งหมดคือ 0.0497 ส่วนอัตราการไหลของไอเสียนั้นเป็นค่าจากสมดุลมวล

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงสมดุลมวลของเตาเผาที่ 1 ในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554

| สมดุลมวลขาเข้า | kg/s | สมดุลมวลขาออก | kg/s |
|--------------------------------|--------|--------------------------|--------|
| 1. อัตราการไหลน้ำมันเชื้อเพลิง | 1.815 | 1. อัตราการไหลของ ไอเสีย | 26.305 |
| 2. อัตราการไหลของอากาศ | 24.490 | | |
| รวม | 26.305 | | 26.305 |

4.4.2 สมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงสมดุลความร้อนของเตาเผาที่ 1 ในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554

| สมดุลความร้อนขาเข้า | kW | % | สมดุลความร้อนขาออก | kW | % |
|--|-----------|---------|---|-----------|---------|
| 1. ความร้อนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ | 78,203.67 | 82.24% | 1. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก | 54,643.51 | 57.47% |
| 2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า | 314.42 | 0.33% | 2. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียไปยัง recuperator | 22,953.22 | 24.14% |
| 3. ความร้อนจากการ preheat อากาศที่ recuperator | 11,977.01 | 12.60% | 3. ความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกล | 1,008.80 | 1.06% |
| 4. ความร้อนจากการก่อดัวของสเกล | 4,592.20 | 4.83% | 4. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา | 3,267.96 | 3.44% |
| 5. ความร้อนสัมผัสของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผาเหล็ก | 0.00 | 0.00% | 5. ความร้อนสูญเสียจากน้ำหล่อเย็น | 8,395.95 | 8.83% |
| | | | 6. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | 4,817.86 | 5.07% |
| รวม | 95,087.3 | 100.00% | รวม | 95,087.3 | 100.00% |

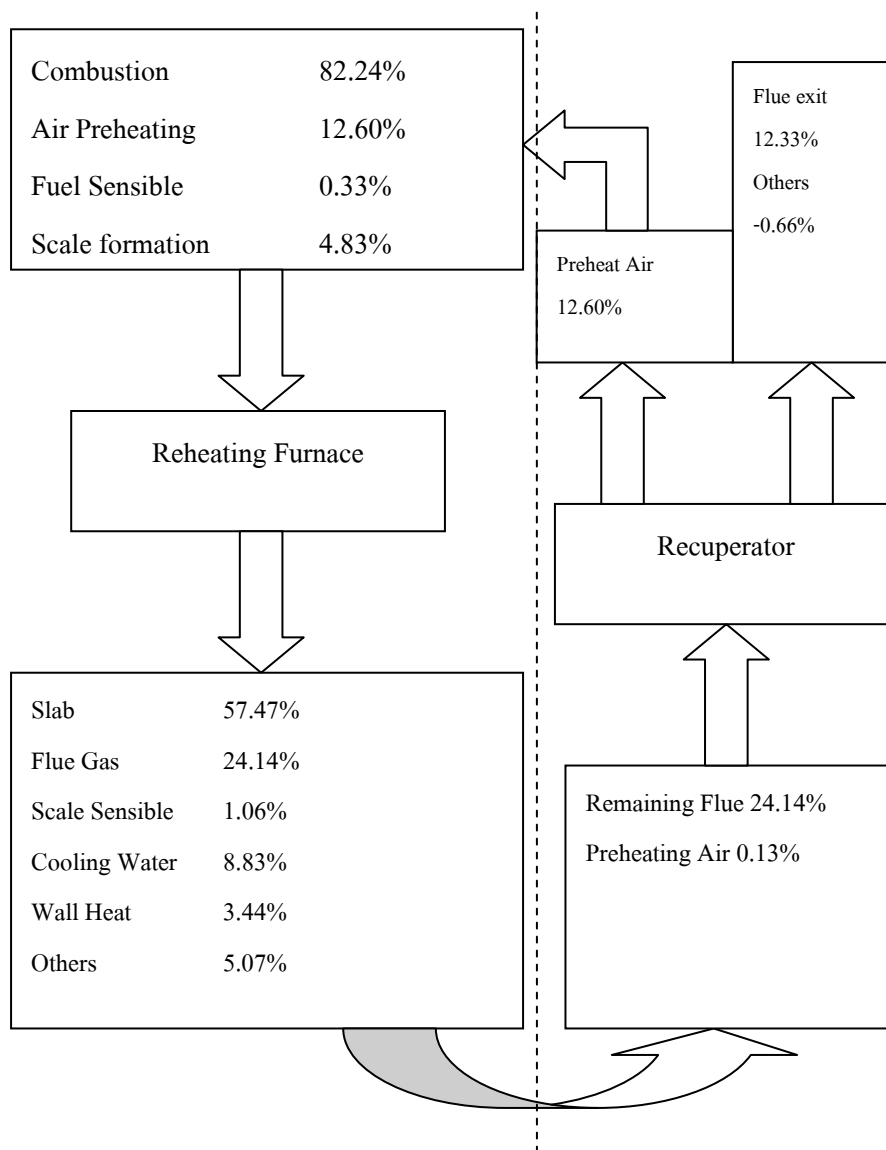
4.4.3 สมดุลความร้อนของ recuperator

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงสมดุลความร้อนของ recuperator ของเตาที่ 1 ในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554

| Input | kW | % | | kW | % |
|---|-----------|--------|---|-----------|--------|
| 1. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลเข้าสู่ recuperator | 22,953.22 | 24.14% | 1. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลออก | 11,727.06 | 12.33% |
| 2. ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลเข้าสู่ recuperator | 123.33 | 0.13% | 2. ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลออกจาก recuperator | 11,977.01 | 12.60% |
| | | | 3. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ | -627.528 | -0.66% |
| รวม | 23,076.54 | 24.27% | รวม | 23,076.54 | 24.27% |

หมายเหตุ: ความร้อนสูญเสียอื่นๆ มีค่าเป็นลบอาจเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัด

จากตารางที่ 4.8 ค่า effective ness ของ recuperator จะมีค่า 0.6418 เมื่อนำสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กและสมดุลความร้อนของ recuperator มาเขียนเป็นแผนภาพขึ้นเพื่อแสดงอัตราส่วนของพลังงานจะสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า recuperator สามารถนำพลังงานจากไอเสียกลับมาใช้ได้ 12.60 % และยังคงหลงเหลือพลังงานในไอเสียอยู่ 12.26% ซึ่งเมื่อเทียบจากการผลิตของเตาที่มีขนาดถึง 200 กว่าตันต่อชั่วโมงคิดเป็นปริมาณพลังงานที่สูงมาก สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกมากมาย



รูปที่ 4.4 แสดงสมดุลความร้อนของเตาเผาและ recuperator ในวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554

บทที่ 5

การออกแบบและการคำนวณส่วนอุ่นแห้งเหลือของเตาเผาเหล็ก

5.1 เงื่อนไขในการออกแบบ

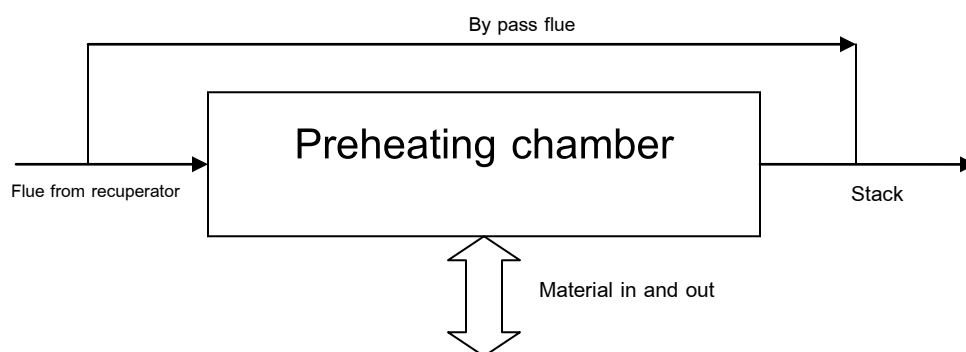
เนื่องจากการออกแบบในครั้งนี้เป็นการสร้างแบบจำลองขึ้นมาก่อน จึงต้องกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการออกแบบเสียก่อนซึ่งมีดังนี้คือ

1. จะใช้ไอเสียที่ออกจาก recuperator มาเป็นแหล่งความร้อนสำหรับการอุ่นเหล็ก ซึ่งจากข้อมูลที่ได้นั้น พบว่าอุณหภูมิของไอเสียที่ออกจาก recuperator นั้นจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 400 °C (ข้อมูล ณ วันที่คำนวณ) สามารถนำมาให้ความร้อนกับชิ้นเหล็กก่อนที่จะเข้าสู่เตาเผาเหล็กได้ และเนื่องจากไอเสียจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันตามส่วนผสม การคำนวณคุณสมบัติของสารจะเป็นการเฉลี่ยของทั้งวันที่ทำการคำนวณ
2. เนื่องจากเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับเตาเผาเหล็กสำหรับ โรงงานนี้คือ น้ำมันเตา ซึ่งมีส่วนผสมของกำมะถันอยู่ด้วยสามารถทำให้มีส่วนผสมของ SO₂ ในไอเสียที่สามารถทำให้ไอเสียกลายเป็นกรดได้ที่สภาวะอุณหภูมิเหมาะสมหรือ acid dew point นั่นเอง ไอเสียที่ผ่านส่วนอุ่นแห้งเหล็กนี้จะต้องไม่ต่ำกว่า acid dew point เพื่อไม่ก่อให้เกิดสภาวะกรดขึ้น
3. อุปกรณ์อุ่นเหล็กที่ออกแบบมาจะใช้การอุ่นเป็นแบบ batch คือมีการอุ่นเป็นรอบๆ โดยกำหนดระยะเวลาในการอุ่นให้สอดคล้องกับปริมาณการผลิตของโรงงาน และเพื่อเวลาในการขนย้ายเอาไว้ 25% ของเวลาทั้งหมด ชิ้นเหล็กที่ถูกอุ่นแล้วจะถูกนำออกมาจากเตาเพื่อมารอการผลิตต่อไป โดยแต่ละชิ้นจะมีระยะเวลาการรอการผลิตที่ต่างกันซึ่งจะอธิบายในส่วนต่อไป
4. การคำนวณจะถือว่าไม่มีพัดลม blower เข้ามาช่วยในการดันไอเสีย เพื่อให้ความเร็วของไอเสียที่ออกจาก recuperator มีค่าคงที่และสามารถควบคุมความดันที่จะส่งผลกระทบต่อสภาวะกลับเข้าสู่เตาเผาได้ ซึ่งเวลาคำนวณระยะเวลาคืนทุนจะต้องนำเอาการใช้พลังงานของ blower เข้าไปคิดในการประหยัดพลังงานด้วย
5. การออกแบบจะให้มีความร้อนในด้านอื่นๆ ทุกด้าน เพื่อให้ความร้อนสูญเสียมีค่าน้อยที่สุด และสำหรับการคำนวณจะถือว่าไม่มีความร้อนสูญเสียออกสู่ผนัง

6. เนื่องจากการอุ่นเป็นแบบ batch จึงต้องมีการ by pass ไอเสียออกจากเตาในช่วงที่เอาเหล็กเข้าออกด้วยเพื่อความปลอดภัยของผู้ทำงาน

5.2 ลักษณะของอุปกรณ์อุ่นขึ้นเหล็กที่ออกแบบ

อุปกรณ์อุ่นขึ้นเหล็กที่ออกแบบนั้นจะเป็นแบบ batch คือ มีการอุ่นเป็นรอบๆ ไปโดยที่จะเอาไอเสียจาก recuperator มาเพื่อให้ความร้อนกับเหล็กด้วยการผ่านความร้อนเข้าไปกับ preheating box เพื่อแลกเปลี่ยนอุณหภูมิกัน และมีการ by pass ไอเสียเพื่อความปลอดภัยในการทำงาน



รูปที่ 5.1 แผนผังของอุปกรณ์อุ่นแท่งเหล็กด้วยไอเสียแบบ batch

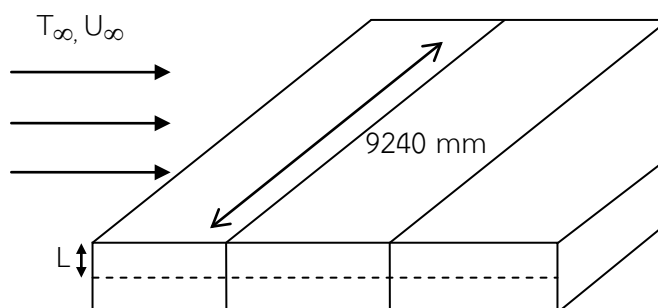
สำหรับการใส่ชิ้นเหล็กนั้น เหล็กที่จะใส่เข้าไปให้กับ preheating box นั้นจะใส่เป็นรอบๆ ตามปริมาณการผลิตเช่น สำหรับวันที่จะใช้คำนวณคือวันที่ 7 พฤศจิกายน 2554 มีการผลิตประมาณ 200 ตันต่อชั่วโมง คิดเป็น slab แล้วก็คือ 9 ชิ้นต่อชั่วโมงนั่นเอง หากต้องการอุ่น slab รอบละ 9 ชิ้นก็จะมีเวลาทั้งหมด 1 ชั่วโมงในการอุ่นและนำ slab ออกมาการผลิตสำหรับชั่วโมงถัดไป และจะทำวนรอบแบบนี้ไปเรื่อยๆ สำหรับในเวลา 1 ชั่วโมงจะใช้เวลาในการอุ่น 75 % และการขนย้ายอีก 25% คิดเป็นเวลาอุ่น 45 นาทีและเวลาขนย้ายอีก 15 นาที และหากต้องการอุ่น slab มากขึ้นเป็น 18 ชิ้น หรือ 27 ชิ้นเวลาการอุ่นและขนาดของ preheating box ก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วยสอดคล้องไปกับปริมาณการผลิตเหล็กของโรงงาน ซึ่งการคำนวณก็จะเปรียบเทียบระหว่าง 9, 18, 27 และ 36 ชิ้น เปรียบเทียบการประหยัดพลังงานที่ได้ในแต่ละแบบเพื่อเลือกขนาดของ preheating box ให้เหมาะสมที่สุด โดยที่ขนาดและเวลาที่ใช้ในการอุ่นของ preheating box จะอยู่ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงความกว้างยาวสูงของส่วนอุ่นแห้งเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ

| เวลาในการอุ่น | ความกว้าง (m) | ความสูง (m) | ความยาว (m) | เวลา (s) |
|---------------|---------------|-------------|-------------|----------|
| 1 ชั่วโมง | 10 | 0.75 | 11.34 | 2700 |
| 2 ชั่วโมง | 10 | 0.75 | 22.68 | 5400 |
| 3 ชั่วโมง | 10 | 0.75 | 34.02 | 8100 |
| 4 ชั่วโมง | 10 | 0.75 | 45.36 | 10800 |

5.3 หลักที่ใช้ในการคำนวณ

5.3.1 การคำนวณการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิ



รูปที่ 5.2 แสดงการผ่านไอเสียเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับชิ้นเหล็ก

จากรูปที่ 5.2 การวาง slab ภายใน preheating box จะวางเรียงในทิศทางขวางการไหลของไอเสีย ทำให้ลักษณะของแผ่นเหล็กที่ได้นั้นจะคล้ายกับแผ่นราบในด้านของการวางชิ้นเหล็ก และด้านบนเป็นผนังของ preheating box ซึ่งในขั้นตอนแรกจะคำนวณแบบการไหลภายนอกก่อน เพื่อที่จะดูว่ารูปร่างของความเร็วมันจะไปชนชั้นขอบเขตหรือไม่ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าหากใช้การคำนวณด้วยการไหลแบบภายนอก ชั้นขอบเขตจะขึ้นไปชนกันตั้งแต่ชั้นแรกๆ ของ slab จึงสมควรใช้การคำนวณด้วยการไหลแบบภายใน ซึ่งจากทฤษฎีของการไหลระหว่างแผ่นราบสองแผ่นที่ขนานกันสามารถคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางได้จากสมการ โดยที่ค่า Re จะอยู่ที่ประมาณ 7.5×10^4 ซึ่งมากกว่าค่าวิกฤติของการไหลแบบภายในทำให้คำนวณการไหลแบบปั่นป่วนได้

$$D_h = \frac{4A}{P} = \lim_{b \rightarrow \infty} \frac{4(bh)}{2b + 2h} = 2h \quad (5.1)$$

โดยที่ b, h คือ ความกว้างและความสูงของช่องการไหล
 A คือ พื้นที่ของช่องการไหล
 P คือ เส้นรอบรูปของช่องการไหล

สามารถหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้จากสมการที่ 5.2 (White, 2006)

$$\frac{1}{f^{1/2}} = 2.0 \log(0.64 \text{Re}_{D_h} f^{1/2}) - 0.08 \quad (5.2)$$

เมื่อ

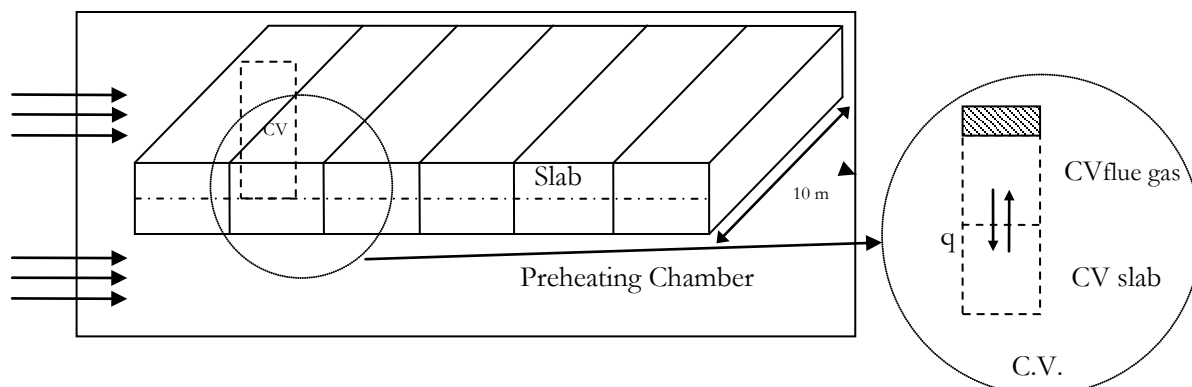
f คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลระหว่างแผ่นราบ
 Re_{D_h} คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลแบบภายใน

ซึ่งสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานนี้จะนำไปใช้สำหรับการคำนวณการใช้พลังงานของพัดลม ที่ใช้เป่าและยังใช้คำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้วย จากสมการที่ 5.2 จะสามารถหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลได้ ทำให้สามารถความดันตกได้จากสมการ

$$(P_1 - P_2) = \rho_{\text{fluid}} g \frac{fL}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad (5.3)$$

ซึ่งความดันที่ลดลงนี้จะสามารถนำไปหาค่ากำลังไฟฟ้าที่พัดลม ต้องใช้ได้ ทำให้สามารถประมาณค่าไฟฟ้าที่ต้องใช้กับ blower ได้ สามารถคำนวณสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของการไหลได้จากสมการ

$$\text{Nu}_{D_h} = \frac{hD_h}{k} = \frac{(f/8)(\text{Re}_{D_h} - 1000)\text{Pr}}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3} - 1)} \quad (3.27)$$



รูปที่ 5.3 แสดงการคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเหล็กกับ ไอเสีย

การคำนวณอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจะแบ่งส่วนคำนวณตามระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยแบ่งส่วนการคำนวณออกเป็นส่วนย่อยๆ (dx) โดยจะถือว่า slab สมมาตรในทั้งสองด้านของการไหลและด้านที่เป็นผนังถือว่าไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเพราะว่าเป็นฉนวน แบ่งส่วนเวลาตั้งแต่เวลาแรกจนถึงเวลาสุดท้ายเป็น dt โดยที่ ณ เวลาที่ $t = 0$ อุณหภูมิของไอเสียจะเริ่มเข้าจาก 408.37°C และอุณหภูมิของ slab ทุกจุดจะเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้องคือ 30°C ณ จุดเริ่มต้น ($x = 0$) จะคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่จุดแรก หลังจากนั้นจะใช้ Newton's law of cooling เพื่อหาความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างไอเสียกับ slab เขียนได้เป็นสมการ

$$q = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (5.4)$$

| | | | |
|-------|--------------|-----|---|
| เมื่อ | T_s | คือ | อุณหภูมิของ slab (K) |
| | T_{∞} | คือ | อุณหภูมิของ ไอเสีย (K) |
| | A | คือ | พื้นที่ผิวสัมผัสกันของ slab และ ไอเสีย (m^2) |

เมื่อมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างกันจะทำให้อุณหภูมิของไอเสียลดลง และอุณหภูมิของชิ้นเหล็กเพิ่มขึ้น โดยที่ตั้งสมมติฐานให้อุณหภูมิของ slab ใน control volume ย่อยๆ มีค่าเท่ากันทั่วทั้งชิ้น โดยจะตรวจสอบจาก Biot number แบบเดียวกับ lumped capacitance method คือ Biot number จะต้องมียค่ามากกว่า 0.1 นั่นเอง อุณหภูมิของไอเสียที่เข้าสู่ control volume ย่อย $x = dx$ จะมีค่าลดลง โดยที่หาได้จากสมการ

$$q_x = \rho_{\text{flue}} V_{\text{flue}} c_{\text{flue}} (T_{\text{flue},x} - T_{\text{flue},x+dx}) \quad (5.5)$$

$$T_{\text{flue},x+dx} = T_{\text{flue},x} + \frac{q_x}{\rho_{\text{flue}} V_{\text{flue}} c_{\text{flue}}} \quad (5.6)$$

ใน control volume ย่อยๆ ถัดไปก็จะคำนวณแบบเดิม แต่เมื่ออุณหภูมิของไอเสียลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนก็จะลดลงไปด้วย และจะทำซ้ำจนถึงจุดปลายของ slab เป็นอันจบที่เวลา $t = 0$ ที่เวลาถัดไปคือ $t = dt$ อุณหภูมิขาเข้าของไอเสียจะมีค่าเท่าเดิมเพราะถือว่าเป็นไอเสียใหม่ที่มาจากร recuperator แต่ที่เปลี่ยนไปคืออุณหภูมิของ slab ที่ได้รับความร้อนจากไอเสียที่ผ่านไปเป็นเวลา $t = 0$

$$T_{\text{slab},x,t+dt} = T_{\text{slab},x,t} + \frac{q_x}{\rho_{\text{slab}} V_{\text{slab}} c_{\text{slab}}} \quad (5.7)$$

และจะคำนวณแบบเดิมซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงเวลาสุดท้ายก็จะได้อุณหภูมิของ slab ที่ถูกอุ่นออกมา รวมทั้งได้อุณหภูมิของไอเสียที่ทุกจุดและทุกเวลา เพื่อที่จะดูว่าต่ำกว่า acid dew point หรือไม่ โดยที่อุณหภูมิของ slab ที่ได้จะนำมาเฉลี่ย เพื่อหาอุณหภูมิของ slab แต่ละชั้น

5.3.2 การคำนวณการสูญเสียอุณหภูมิของเหล็ก

สำหรับการอุ่นเหล็กในครั้งนี้จะเป็นการอุ่นเหล็กแบบ batch คืออุ่นเป็นรอบๆ ไปและนำเหล็กออกมาวางทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติเพื่อรอการผลิตต่อไป อุณหภูมิของเหล็กที่ถูกวางในบรรยากาศปกติ นั้น จะใช้สมการที่ 2.6 เพื่อมาคำนวณการสูญเสียอุณหภูมิของชิ้นเหล็ก ซึ่งอุณหภูมิของเหล็กแต่ละชั้นที่ถูกใส่เข้าไปในเตาก็จะมีค่าไม่เท่ากันเพราะเวลาในการรอการผลิตของเหล็กแต่ละชั้นก็จะต่างกัน

จากการศึกษาของ Shamanian และ Najafidazeh (2001) ได้ทำการศึกษาถึงการสูญเสียอุณหภูมิของเหล็กที่ถูกวางในบรรยากาศปกติ นั้น จะใช้สมการนั้นเพื่อมาคำนวณการสูญเสียอุณหภูมิของชิ้นเหล็ก

$$T = (T_o - T_{os}) \exp \left[-0.0530 \left(\frac{1}{B} + \frac{1}{nH} \right) \tau^{0.848} \right] + T_{os} \quad (2.6)$$

เมื่อ

T และ T_o คือ อุณหภูมิสุดท้ายและเริ่มต้นของเหล็กแท่ง ($^{\circ}\text{C}$)

| | | |
|----------|-----|---|
| T_{os} | คือ | อุณหภูมิของบรรยากาศ (°C) |
| τ | คือ | เวลาที่ถูกลงเอาไว้ในอุณหภูมิของบรรยากาศ (ชั่วโมง) |
| H และ B | คือ | ความหนาและความกว้างของเหล็กแท่งแบน (m) |
| n | คือ | จำนวนเหล็กแท่งที่วางซ้อนกัน |

5.3.3 การคำนวณค่าจุดน้ำค้างกรดของไอเสีย

การคำนวณค่า acid dew point ของไอเสียเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากสมการของน้ำมันเตานั้น สารผสมที่ออกมาจะมีสารที่จะทำให้เกิดกรดอยู่ด้วยคือ SO_2 และ SO_3 ซึ่ง acid dew point ของ SO_3 จะมีค่าสูงกว่า จึงจะต้องมีการคำนวณ acid dew point ของสารผสม ซึ่งเป็นไปตามสมการ V.B Correlation (Verhoff and Banchemo, 1974) สำหรับการประมาณค่า acid dew point ของ SO_3 โดยให้ปริมาณการเปลี่ยนแปลงจาก SO_2 เป็น SO_3 อยู่ที่ค่าสูงสุดคือ 5%

$$\frac{1000}{T_{Dew}} = 2.276 - 0.0294 \ln(P_{H_2O}) - 0.0858 \ln(P_{SO_3}) + 0.0062 \ln(P_{H_2O}) \ln(P_{SO_3}) \quad (2.7)$$

เมื่อ T_{DEW} เป็น Acid dew point temp หน่วยเป็น K และ ความดันทั้งหมดหน่วยเป็น mmHg โดยสามารถคำนวณค่าความดันย่อยด้วยอัตราส่วนโมลจากการหาคุณสมบัติของไอเสีย

$$P_a = y_a P \quad (5.8)$$

เมื่อ P_a และ y_a เป็นความดันย่อยและอัตราส่วนโมลของก๊าซชนิด a และ P เป็นความดันรวมของไอเสีย หาได้จากการวัดค่าโดยตรง

บทที่ 6

ผลการคำนวณและการวิเคราะห์

6.1 ผลการคำนวณ

6.1.1 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการคำนวณ

จากข้อมูลของเตาเผาเหล็กในภาคผนวก ก และ สมดุลความร้อนจะมีข้อมูลที่ต้องนำมาใช้คำนวณตามตารางที่ 6.1 ดังนี้

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลที่นำมาใช้คำนวณ

| ข้อมูลที่นำมาใช้คำนวณ | ค่าที่ใช้ |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| %O ₂ | 0.9883% |
| อุณหภูมิไอเสีย | 408.37°C |
| ความดันรวม | 101.198 kPa |
| อัตราการไหลของไอเสีย | 50.45 m ³ /s |
| พื้นที่หน้าตัดส่วนอุ่นแห้งเหล็ก | 0.5 x 10 m ² |
| ขนาดของชิ้นเหล็ก | 0.25 x 1.26 x 9.24 m ³ |
| ความหนาแน่นของเหล็ก | 7869.53 kg/m ³ |

เมื่อได้ข้อมูลมาเรียบร้อยแล้ว สิ่งที่ต้องทราบต่อไปก่อนที่จะคำนวณการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอเสียกับชิ้นเหล็กคือ ค่าของอุณหภูมิจุดน้ำค้างกรด

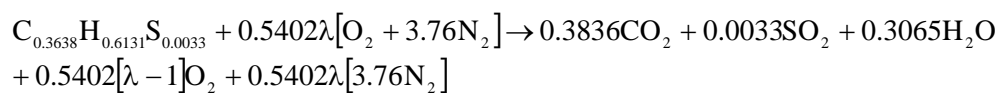
6.1.2 การคำนวณหาอุณหภูมิจุดน้ำค้างกรด

จากตารางที่ 6.1 ข้อมูลที่จะใช้คำนวณสำหรับจุดน้ำค้างกรดคือ อุณหภูมิไอเสียซึ่งมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 408.37°C และ %O₂ เฉลี่ยอยู่ที่ 0.9883% จากสมการที่ 2.2

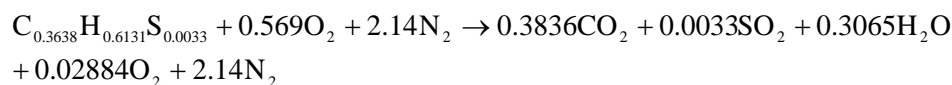
$$\lambda = \frac{0.540 - 0.153 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)}{0.540 - 2.571 \left(\frac{\%O_2}{100} \right)} \quad (2.2)$$

จะได้ $\lambda = 1.0534$ เป็นอัตราส่วนของอากาศส่วนเกินเฉลี่ยที่ถูกใส่ให้กับเตาเผาเหล็ก

จากสมการเคมีของการเผาไหม้



เมื่อแทนที่ค่า $\lambda = 1.0534$ เข้าไปในสมการจะได้



จากสารผสมที่ออกมาจะให้ SO_2 เปลี่ยนเป็น SO_3 ที่ปริมาณ 5% (Y.Tan and Others, 2006) ทำให้ได้สัดส่วน โมลของไอเสีย และสามารถคำนวณความดันย่อยได้จากสมการที่ 5.6 ออกมาได้เป็นตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แสดงสัดส่วนโมลและความดันย่อยของสารผสมในไอเสีย

| สาร | สัดส่วนโมล | % โมล | ความดันย่อย (mmHg) |
|------------------|------------|---------|--------------------|
| CO ₂ | 0.3836 | 14.2155 | 108.0274 |
| SO ₂ | 0.0003135 | 0.1162 | 0.8828 |
| H ₂ O | 0.3065 | 11.3583 | 86.3128 |
| O ₂ | 0.02667 | 0.9883 | 7.5105 |
| N ₂ | 1.9784 | 73.3156 | 557.1328 |
| SO ₃ | 0.000165 | 0.0061 | 0.04647 |

จากสมการที่ 2.7

$$\frac{1000}{T_{\text{Dew}}} = 2.276 - 0.0294 \ln(P_{\text{H}_2\text{O}}) - 0.0858 \ln(P_{\text{SO}_3}) + 0.0062 \ln(P_{\text{H}_2\text{O}}) \ln(P_{\text{SO}_3}) \quad (2.7)$$

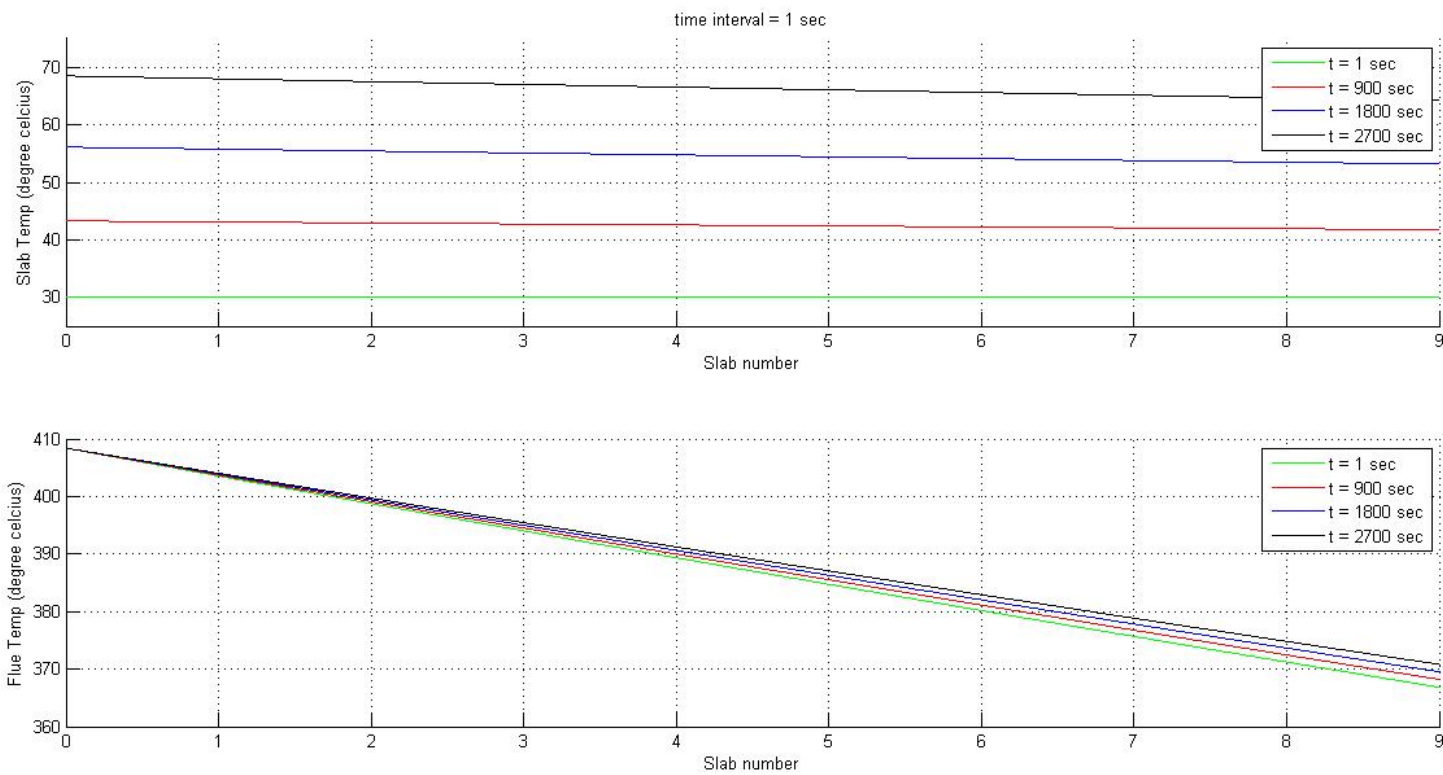
จะสามารถคำนวณ T_{dew} ของ SO_3 ออกมาได้เป็น 157.25 °C และจากสมการที่ 2.8

$$\frac{1000}{T_{\text{Dew}}} = 3.9526 - 0.1863 \ln(P_{\text{H}_2\text{O}}) - 0.000867 \ln(P_{\text{SO}_2}) + 0.000913 \ln(P_{\text{H}_2\text{O}}) \ln(P_{\text{SO}_2}) \quad (2.8)$$

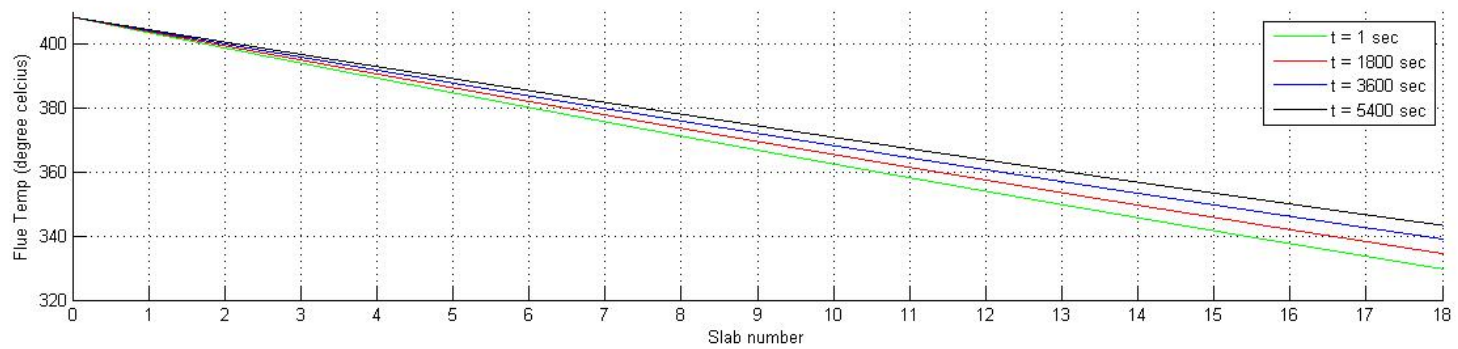
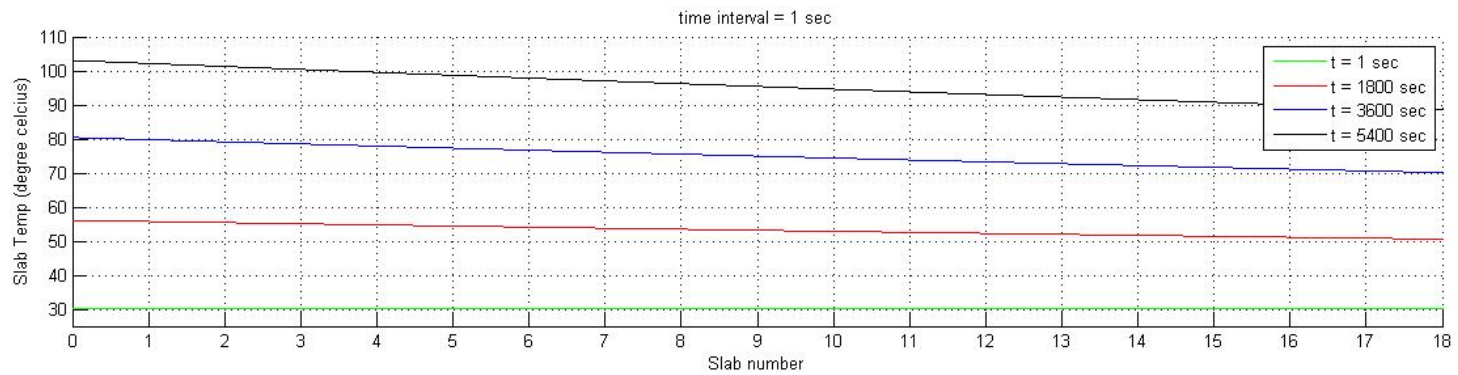
จะสามารถคำนวณ T_{dew} ของ SO_2 ออกมาได้เป็น 47.19 °C ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าต่ำกว่า T_{dew} ของ SO_3 เพราะฉะนั้นจะใช้ T_{dew} ที่ 157.25 °C ซึ่งไอเสียที่ผ่านส่วนอุ่นแห้งเหล็กจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 157.25 °C

6.1.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิขึ้นเหล็ก

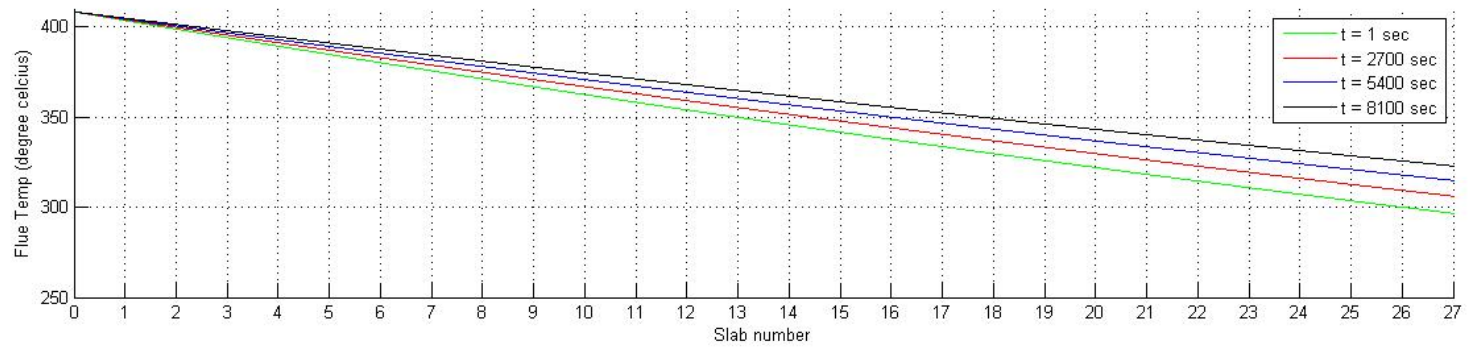
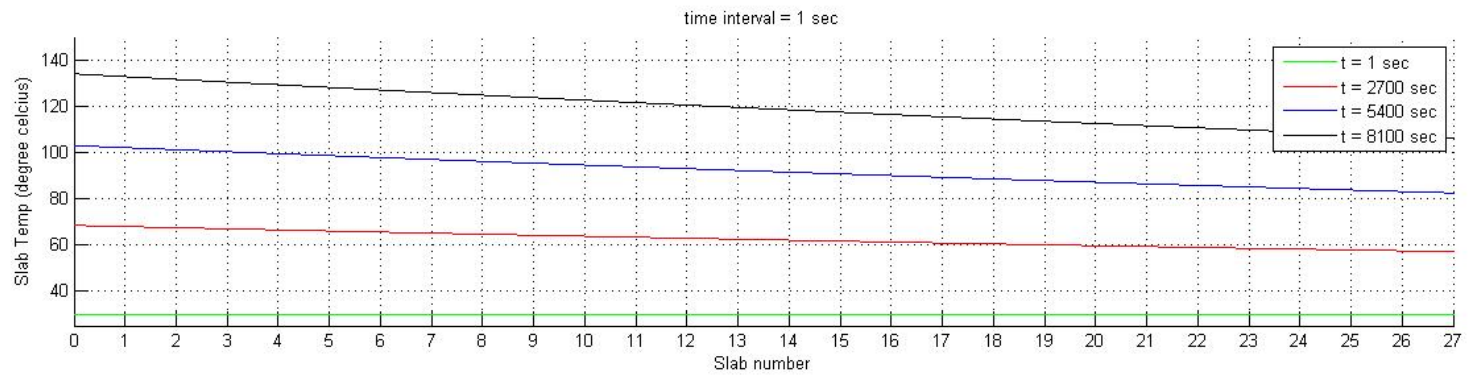
ผลการคำนวณอุณหภูมิของขึ้นเหล็กจะแบ่งเห็น 1,2,3 และ 4 ชั่วโมงตามลำดับ โดยที่ใช้ $dx = 0.01 \text{ m}$ และ $dt = 1 \text{ s}$ ซึ่งเป็น dt ที่เหมาะสมจากการคำนวณด้วยโปรแกรมในโปรแกรมที่แสดงในภาคผนวก ค โดยที่ Biot number จะอยู่ที่ประมาณ 0.034-0.035 ซึ่งยังคงน้อยกว่า 0.1 ทำให้สามารถประมาณได้ว่าอุณหภูมิของเหล็กในปริมาตรควบคุมมีค่าเท่ากัน สามารถแสดงผลได้ดังนี้



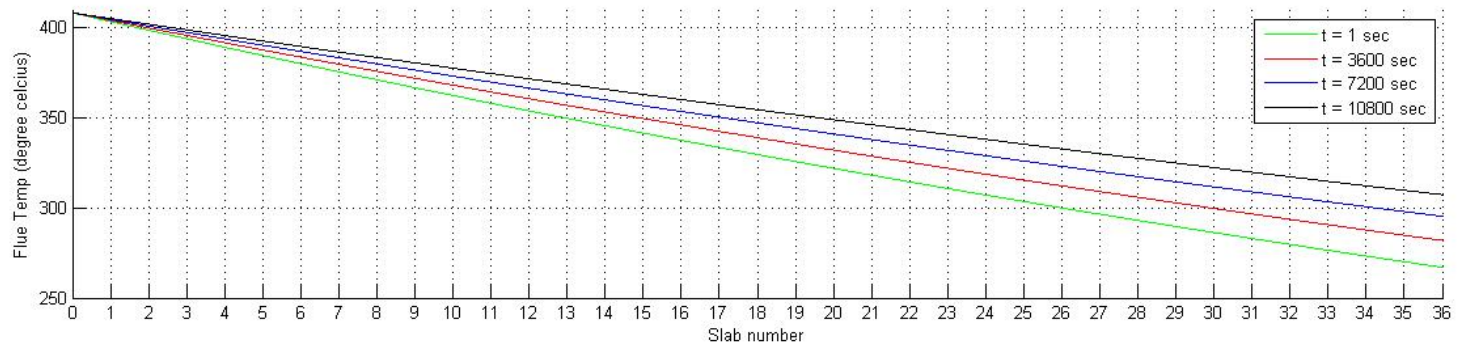
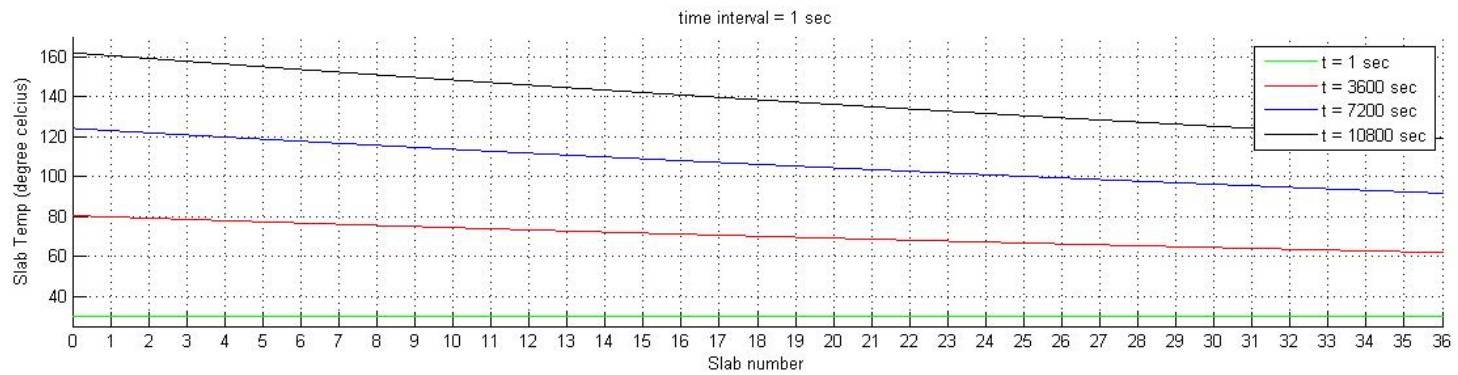
รูปที่ 6.1 แสดงผลการคำนวณการอุ่นขึ้นเหล็ก 1 ชั่วโมง



รูปที่ 6.2 แสดงผลการคำนวณการอุ่นขึ้นเหล็ก 2 ชั่วโมง



รูปที่ 6.3 แสดงผลการคำนวณการอุ่นขึ้นเหล็ก 3 ชั่วโมง



รูปที่ 6.4 แสดงผลการคำนวณการอุ่นขึ้นเหล็ก 4 ชั่วโมง

6.1.4 พลังงานที่ประหยัดได้

ชั้นเหล็กที่ถูกอุ่นแล้วจะต้องถูกนำไปวางในบรรยากาศทำให้อุณหภูมิของชั้นเหล็กลดลงตามเวลา ซึ่งจะคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 สามารถแสดงพลังงานที่ประหยัดได้ของการอุ่นชั้นเหล็ก 1-4 ชั่วโมงได้ตามตารางที่ 6.3-6.6

ตารางที่ 6.3 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและพลังงานที่ประหยัดได้สำหรับการอุ่น 1 ชั่วโมง

| Slab No. | อุณหภูมิออกจากส่วนอุ่น แท่งเหล็ก (°C) | เวลาที่รอ (ชั่วโมง) | อุณหภูมิตอนที่ได้ เข้าเตาเผาเหล็ก (°C) | พลังงานที่ ประหยัดได้ (kJ) |
|---|--|------------------------|---|-------------------------------|
| 1 | 68.247 | 0.363 | 64.346 | 341,048.82 |
| 2 | 67.751 | 0.476 | 62.971 | 327,401.88 |
| 3 | 67.262 | 0.589 | 61.684 | 314,617.75 |
| 4 | 66.781 | 0.702 | 60.471 | 302,570.81 |
| 5 | 66.305 | 0.815 | 59.323 | 291,172.32 |
| 6 | 65.837 | 0.928 | 58.233 | 280,355.15 |
| 7 | 65.374 | 1.041 | 57.197 | 270,065.99 |
| 8 | 64.918 | 1.154 | 56.210 | 260,261.09 |
| 9 | 64.468 | 1.267 | 55.267 | 250,903.60 |
| พลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 รอบการอุ่น (1 ชั่วโมง) | | | | 2,638,397.42 |
| พลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 วัน | | | | 63,321,538.07 |

ตารางที่ 6.4 อุณหภูมิที่เปลี่ยนและพลังงานที่ประหยัดได้สำหรับการอุ่น 2 ชั่วโมง

| Slab No. | อุณหภูมิออกจากส่วนอุ่น แห้งเหล็ก (°C) | เวลาที่รอ (ชั่วโมง) | อุณหภูมิตอนที่ใส่ เข้าเตาเผาเหล็ก (°C) | พลังงานที่ ประหยัดได้ (kJ) |
|---|--|------------------------|---|-------------------------------|
| 1 | 102.629 | 0.613 | 91.411 | 609,808.24 |
| 2 | 101.741 | 0.726 | 89.110 | 586,960.99 |
| 3 | 100.864 | 0.839 | 86.931 | 565,318.36 |
| 4 | 99.998 | 0.952 | 84.860 | 544,758.30 |
| 5 | 99.144 | 1.065 | 82.889 | 525,183.39 |
| 6 | 98.301 | 1.178 | 81.009 | 506,513.27 |
| 7 | 97.469 | 1.291 | 79.213 | 488,680.05 |
| 8 | 96.647 | 1.404 | 77.495 | 471,625.24 |
| 9 | 95.835 | 1.517 | 75.851 | 455,297.67 |
| 10 | 95.034 | 1.630 | 74.275 | 439,652.08 |
| 11 | 94.243 | 1.743 | 72.764 | 424,647.97 |
| 12 | 93.462 | 1.856 | 71.314 | 410,248.81 |
| 13 | 92.691 | 1.969 | 69.922 | 396,421.45 |
| 14 | 91.930 | 2.082 | 68.584 | 383,135.58 |
| 15 | 91.178 | 2.195 | 67.298 | 370,363.37 |
| 16 | 90.436 | 2.308 | 66.061 | 358,079.16 |
| 17 | 89.702 | 2.421 | 64.870 | 346,259.16 |
| 18 | 88.978 | 2.534 | 63.724 | 334,881.30 |
| พลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 รอบการอุ่น (2 ชั่วโมง) | | | | 8,217,834.38 |
| พลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 วัน | | | | 98,614,012.51 |

ตารางที่ 6.5 อุณหภูมิที่เปลี่ยนและพลังงานที่ประหยัดได้สำหรับการอุ่น 3 ชั่วโมง

| Slab No. | อุณหภูมิออกจากส่วนอุ่นแห้ง เหล็ก (°C) | เวลาที่รอ (ชั่วโมง) | อุณหภูมิตอนที่ใส่เข้า เตาเผาเหล็ก (°C) | พลังงานที่ประหยัด ได้ (kJ) |
|---|--|------------------------|---|-------------------------------|
| 1 | 133.536 | 0.863 | 112.740 | 821,598.89 |
| 2 | 132.342 | 0.976 | 109.793 | 792,339.78 |
| 3 | 131.162 | 1.089 | 106.985 | 764,457.08 |
| 4 | 129.997 | 1.202 | 104.305 | 737,840.25 |
| 5 | 128.845 | 1.315 | 101.742 | 712,395.61 |
| 6 | 127.707 | 1.428 | 99.290 | 688,042.31 |
| 7 | 126.583 | 1.541 | 96.940 | 664,709.50 |
| 8 | 125.472 | 1.654 | 94.687 | 642,334.42 |
| 9 | 124.375 | 1.767 | 92.524 | 620,860.86 |
| 10 | 123.290 | 1.880 | 90.447 | 600,238.08 |
| 11 | 122.218 | 1.993 | 88.452 | 580,420.00 |
| 12 | 121.159 | 2.106 | 86.533 | 561,364.48 |
| 13 | 120.112 | 2.219 | 84.687 | 543,032.78 |
| 14 | 119.078 | 2.332 | 82.910 | 525,389.17 |
| 15 | 118.056 | 2.445 | 81.199 | 508,400.53 |
| 16 | 117.046 | 2.558 | 79.551 | 492,036.08 |
| 17 | 116.047 | 2.671 | 77.963 | 476,267.12 |
| 18 | 115.060 | 2.784 | 76.432 | 461,066.80 |
| 19 | 114.085 | 2.897 | 74.956 | 446,409.97 |
| 20 | 113.121 | 3.010 | 73.532 | 432,273.00 |
| 21 | 112.168 | 3.123 | 72.159 | 418,633.66 |
| 22 | 111.227 | 3.236 | 70.833 | 405,470.98 |
| 23 | 110.296 | 3.349 | 69.554 | 392,765.18 |
| 24 | 109.376 | 3.462 | 68.318 | 380,497.54 |
| 25 | 108.467 | 3.575 | 67.125 | 368,650.32 |
| 26 | 107.568 | 3.688 | 65.973 | 357,206.74 |
| 27 | 106.679 | 3.801 | 64.859 | 346,150.83 |
| พลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 รอบการอุ่น (3 ชั่วโมง) | | | | 1,4740,851.95 |
| พลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 วัน | | | | 117,926,815.63 |

ตารางที่ 6.6 อุณหภูมิที่เปลี่ยนและพลังงานที่ประหยัดได้สำหรับการอุ่น 4 ชั่วโมง

| Slab No. | อุณหภูมิออกจากส่วนอุ่น แท่งเหล็ก (°C) | เวลาที่รอ (ชั่วโมง) | อุณหภูมิตอนที่ใส่ เข้าเตาเผาเหล็ก (°C) | พลังงานที่ ประหยัดได้ (kJ) |
|----------|--|------------------------|---|-------------------------------|
| 1 | 161.3107 | 1.113 | 129.420 | 987,237.10 |
| 2 | 159.8832 | 1.226 | 126.029 | 953,562.92 |
| 3 | 158.4718 | 1.339 | 122.785 | 921,345.94 |
| 4 | 157.0761 | 1.452 | 119.677 | 890,486.91 |
| 5 | 155.696 | 1.565 | 116.697 | 860,898.75 |
| 6 | 154.3312 | 1.678 | 113.838 | 832,504.22 |
| 7 | 152.9816 | 1.791 | 111.092 | 805,234.06 |
| 8 | 151.647 | 1.904 | 108.452 | 779,025.75 |
| 9 | 150.3271 | 2.017 | 105.914 | 753,822.41 |
| 10 | 149.0218 | 2.13 | 103.472 | 729,572.02 |
| 11 | 147.7309 | 2.243 | 101.121 | 706,226.76 |
| 12 | 146.4542 | 2.356 | 98.857 | 683,742.46 |
| 13 | 145.1915 | 2.469 | 96.675 | 662,078.20 |
| 14 | 143.9426 | 2.582 | 94.572 | 641,195.89 |
| 15 | 142.7074 | 2.695 | 92.544 | 621,060.02 |
| 16 | 141.4857 | 2.808 | 90.588 | 601,637.38 |
| 17 | 140.2773 | 2.921 | 88.701 | 582,896.82 |
| 18 | 139.0821 | 3.034 | 86.880 | 564,809.07 |
| 19 | 137.8999 | 3.147 | 85.121 | 547,346.58 |
| 20 | 136.7305 | 3.26 | 83.423 | 530,483.37 |
| 21 | 135.5739 | 3.373 | 81.782 | 514,194.89 |
| 22 | 134.4297 | 3.486 | 80.198 | 498,457.92 |
| 23 | 133.298 | 3.599 | 78.666 | 483,250.46 |
| 24 | 132.1785 | 3.712 | 77.186 | 468,551.65 |
| 25 | 131.071 | 3.825 | 75.755 | 454,341.67 |
| 26 | 129.9755 | 3.938 | 74.371 | 440,601.68 |
| 27 | 128.8919 | 4.051 | 73.033 | 427,313.77 |

| Slab No. | อุณหภูมิออกจากส่วนอุ่น แห้งเหล็ก (°C) | เวลาที่รอ (ชั่วโมง) | อุณหภูมิตอนที่ใส่ เข้าเตาเผาเหล็ก (°C) | พลังงานที่ ประหยัดได้ (kJ) |
|---|--|------------------------|---|-------------------------------|
| 28 | 127.8199 | 4.164 | 71.739 | 414,460.87 |
| 29 | 126.7594 | 4.277 | 70.486 | 402,026.71 |
| 30 | 125.7103 | 4.39 | 69.275 | 389,995.76 |
| 31 | 124.6725 | 4.503 | 68.102 | 378,353.20 |
| 32 | 123.6458 | 4.616 | 66.968 | 367,084.88 |
| 33 | 122.6302 | 4.729 | 65.869 | 356,177.27 |
| 34 | 121.6254 | 4.842 | 64.806 | 345,617.42 |
| 35 | 120.6314 | 4.955 | 63.776 | 335,392.93 |
| 36 | 119.648 | 5.068 | 62.779 | 325,491.93 |
| พลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 รอบการอุ่น (4 ชั่วโมง) | | | | 21,256,479.66 |
| พลังงานที่ประหยัดได้ใน 1 วัน | | | | 127,538,877.96 |

6.1.5 พลังงานที่ใช้สำหรับส่วนอุ่นแห้งเหล็ก

ส่วนอุ่นแห้งเหล็กนั้นจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้าไปกับพัดลมสำหรับดันไอเสียให้ส่วนอุ่นแห้งเหล็กด้วย จึงต้องมีการคำนวณพลังงานในส่วนนี้เพื่อที่จะสามารถคำนวณการประหยัดพลังงานจริงและระยะเวลาคืนทุนได้สามารถแสดงการคำนวณได้ตามตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับส่วนอุ่นแห้งเหล็กแต่ละแบบ

| รูปแบบ การอุ่น | ความยาวของ ส่วนอุ่นแห้ง เหล็ก (m) | ΔP (kPa) | กำลังทาง กล (kW) | กำลังไฟฟ้า (kW) | หน่วยไฟฟ้า (kW-Hr) | จำนวนเงินต่อ วัน (บาท) |
|-------------------|---|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 ชั่วโมง | 11.34 | 0.278403 | 14.04 | 43.89 | 1,053.41 | 3,792 |
| 2 ชั่วโมง | 22.68 | 0.29134 | 14.70 | 45.93 | 1,102.36 | 3,968 |
| 3 ชั่วโมง | 34.02 | 0.304278 | 15.35 | 47.97 | 1,151.31 | 4,144 |
| 4 ชั่วโมง | 45.36 | 0.317216 | 16.00 | 50.01 | 1,200.27 | 4,320 |

6.1.6 การประมาณราคาของส่วนอุ้มน้ำแห่งหลัก

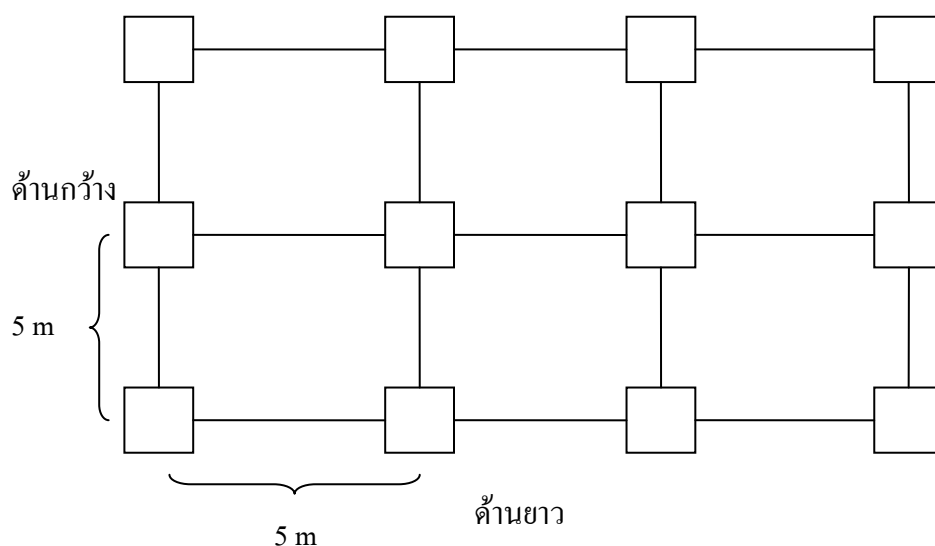
จากตารางที่ 5.1 ซึ่งแสดงความกว้างความยาวและความสูงของส่วนอุ้มน้ำร้อน จะประมาณความยาวของเตาให้เป็นจำนวนเต็มที่หาร 5 ลงตัวเพื่อความสะดวกในด้านการประมาณราคาของโครงสร้าง ทำให้สามารถประมาณขนาดของเตาได้ตามตารางที่ 6.8

ตารางที่ 6.8 ตารางแสดงความกว้างยาวสูงของเตาเพื่อใช้ประมาณราคา

| เวลาในการอุ่น | ความกว้าง (m) | ความสูง (m) | ความยาว (m) | พื้นที่ (m ²) |
|---------------|---------------|-------------|-------------|---------------------------|
| 1 ชั่วโมง | 10 | 0.75 | 15 | 150 |
| 2 ชั่วโมง | 10 | 0.75 | 25 | 250 |
| 3 ชั่วโมง | 10 | 0.75 | 40 | 400 |
| 4 ชั่วโมง | 10 | 0.75 | 50 | 500 |

จากตารางที่ 6.8 โครงสร้างจะถูกรวบรวมฐานรากโดยกำหนดให้ลักษณะของการวางเสาเป็นจุดที่ห่างกันเสาละ 5 เมตร ก่อนที่จะวางพื้นแต่ละเสาจะต้องมีคานเชื่อมกันทุกเสา โดยฐานรากจะต้องลงเสาเข็มเพื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกของชั้นหลักและโครงสร้างของส่วนอุ้มน้ำแห่งหลัก กำหนดพื้นรองรับหนา 20 เซนติเมตร โดยให้เหล็กเสริมในคอนกรีตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร และระยะห่างของเหล็กเสริมแต่ละท่อนเป็น 20 กำหนดคานรองรับน้ำหนักพื้นให้เป็นคานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีขนาด 0.4x0.7 เมตร เสริมเหล็กรับแรงดึงเรียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร จำนวนสามเส้น โดยมีช่วงคานยาวขึ้นอยู่กับความห่างของแต่ละเสาคือ 5 เมตร สามารถคำนวณน้ำหนักรับของคานได้คือประมาณ 4.6 ตันต่อเมตร ซึ่งเพียงพอต่อการรับน้ำหนักโครงสร้างและเหล็กที่นำเข้ามาอุ่นในส่วนอุ้มน้ำแห่งหลัก ซึ่งรูปที่ 6.5 ได้แสดงแผนผังการวางเสาของรูปแบบการอุ่นแบบ 1 ชั่วโมง ซึ่งจะมีเสาทั้งหมด 12 ต้น และคานรองรับพื้นทั้งหมด 17 ชั้น ซึ่งเมื่อขนาดเตายาวขึ้นจำนวนเสาและคานที่ต้องใช้ก็จะมากขึ้น โดยที่การประมาณน้ำหนักคอนกรีตจะให้ น้ำหนักคอนกรีต 2.4 ตันต่อคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (วินิต ช่อวิเชียร, 2542) สำหรับส่วนที่เป็นส่วนอุ้มน้ำแห่งหลักจะมีเสาขนาดสูงจากพื้น 0.75 เมตร ซึ่งเป็นรูปแบบเดียวกัน ต่างกันตรงที่จะตัดเสาตรงกลางทิ้งไปเนื่องจากเหล็กจะถูกรวบรวมยาวตลอดความกว้างของเตา และขนาดของพื้นที่เป็นหลังคาของเตาจะลดความหนาเหลือ 9 เซนติเมตร เหล็กเสริมในคอนกรีตมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ระยะห่างของแต่ละท่อนคือ 20 เซนติเมตร คานในส่วนที่

รองรับน้ำหนักของหลังคาเตาสำหรับส่วนอุ่นร้อนสำหรับรูปแบบ 1 ชั่วโมงคือ 10 ตันทำให้มีคานรวมทั้งพื้นและส่วนอุ่นแห้งเหล็ก 27 อัน ซึ่งสำหรับแบบการอุ่นแบบอื่นจะแสดงเอาไว้ในตารางที่ 6.9



รูปที่ 6.5 รูปแสดงตำแหน่งของเสารับน้ำหนักพื้นทุกต้นในรูปแบบการอุ่นแบบ 1 ชั่วโมง

ตารางที่ 6.9 ตารางแสดงจำนวนเสาและคานที่ต้องใช้ในการรับน้ำหนักโครงสร้าง

| เวลาในการอุ่น | จำนวนเสา | จำนวนคานรวม | น้ำหนักคอนกรีตในส่วน ของพื้นและคาน (ตัน) | น้ำหนักของ เหล็ก (ตัน) | น้ำหนัก รวม (ตัน) |
|---------------|----------|-------------|---|---------------------------|----------------------|
| 1 ชั่วโมง | 12 | 27 | 198.72 | 205.92 | 404.64 |
| 2 ชั่วโมง | 18 | 43 | 324.48 | 411.84 | 736.32 |
| 3 ชั่วโมง | 27 | 69 | 519.84 | 617.76 | 1137.6 |
| 4 ชั่วโมง | 33 | 83 | 638.88 | 823.68 | 1462.56 |

จากตารางที่ 6.9 น้ำหนักที่เสาแต่ละต้นได้รับจะมีขนาด 40-45 ตัน จึงเลือกเสาเข็มแบบไอ 0.35x0.35x21m มาใช้เป็นเสาเข็ม (กวี หวังนิเวศกุล, 2547)

วัสดุที่ใช้ทำผนังฉนวนความร้อนจะใช้ เซรามิกส์ไฟเบอร์แบบ Module (บรรจุเวกซ์ สังกะสี, 2551: 242) ขนาดหนา 4x12x12 นิ้ว และราคาและค่าแรงของวัสดุอื่นจะใช้จากเอกสาร ราคาของวัสดุ และค่าแรงงานก่อสร้างปี 2555 ทำให้สามารถคำนวณต้นทุนการก่อสร้างส่วนอุ้งแห้งเหล็กได้ตามตารางที่ 6.10 ดังนี้

ตารางที่ 6.10 ตารางแสดงราคาก่อสร้าง

| เวลาในการอุ้ง | ราคาฉนวน | ราคาคอนกรีต | ราคาเหล็ก | ค่าแรง | ค่าเสาเข็ม | ราคารวม |
|---------------|------------|-------------|-----------|---------|------------|------------|
| 1 ชั่วโมง | 6,127,647 | 506,736 | 45,956 | 379,412 | 162,960 | 7,180,003 |
| 2 ชั่วโมง | 10,212,744 | 827,424 | 73,189 | 478,451 | 244,440 | 11,768,233 |
| 3 ชั่วโมง | 16,340,391 | 1,325,592 | 117,444 | 629,578 | 366,660 | 18,670,523 |
| 4 ชั่วโมง | 20,425,489 | 1,629,144 | 141,273 | 726,047 | 448,140 | 23,238,806 |

6.1.7 ระยะเวลาคืนทุนสำหรับการอุ้งแห้งเหล็กแต่ละแบบ

เมื่อได้ปริมาณพลังงานที่ประหยัดได้ในหนึ่งวันเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำปริมาณพลังงานมาแปลงเป็นจำนวนเงินที่ต้องใช้หากจะใช้น้ำมันเตาเพื่อเผาไหม้เป็นพลังงานจำนวนนั้น จากนั้นจะเป็นการคำนวณระยะเวลาคืนทุนของการอุ้งแห้งแต่ละแบบ เพื่อเปรียบเทียบและเลือกรูปแบบการอุ้งแห้งเหล็กที่เหมาะสมไปวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

ตารางที่ 6.11 ตารางประมาณระยะเวลาคืนทุนของการก่อสร้าง

| Hr | ราคาก่อสร้าง (บาท) | ค่าไฟฟ้า (บาท/วัน) | พลังงานที่ประหยัด (บาท/วัน) | ระยะเวลาคืนทุน(ปี) |
|----|--------------------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | 7,180,003 | 3,792 | 32,358 | 0.707 |
| 2 | 11,768,233 | 3,968 | 50,393 | 0.707 |
| 3 | 18,670,523 | 4,144 | 60,263 | 0.925 |
| 4 | 23,238,806 | 4,320 | 65,175 | 1.061 |

6.2 การวิเคราะห์การประหยัดพลังงาน

จากข้อมูลที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรม เบื้องต้นผู้วิจัยได้คำนวณสมมูลมวลและสมมูลความร้อนของระบบที่มีอยู่แล้วคือเตาเผาเหล็กและ recuperator โดยที่จะเลือกวันที่มีการผลิตสูงสุดในเดือนที่มีการเก็บข้อมูล นั่นคือวันที่ 7 พฤศจิกายน 2556 ซึ่งมีการเดินเตาเพียงหนึ่งตัวจากทั้งหมด 3 ตัวมาเพื่อคำนวณสมมูลความร้อนของระบบ ผลที่ได้คือ เตาเผาเหล็กมีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง 1.815 kg/s ในเวลาการเดินเตา ทำให้เกิดไอเสีย 26.305 kg/s ซึ่งจะตั้งสมมติฐานให้ไม่มีการรั่วไหลของไอเสีย จากสมมูลไอเสียในตารางที่ 4.6 พลังงานที่ใส่ให้กับเตาเผาเหล็กจากน้ำมันเชื้อเพลิงคือ 82.24% ของพลังงานขาเข้าทั้งหมด ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนที่เข้าสู่เหล็ก 57.47% คิดเป็นประสิทธิภาพของเตาอยู่ที่ 69.9% โดยพลังงานความร้อนขาเข้าส่วนหนึ่งจะเป็นความร้อนของอากาศที่มาจาก recuperator ที่ 12.60% ซึ่ง recuperator นำความร้อนจากไอเสียขาออกของเตาเผาเหล็กไปเปลี่ยนเป็นความร้อนของอากาศขาเข้า ซึ่งความร้อนจากไอเสียนี้มีค่าประมาณ 24.14% ของพลังงานขาเข้าทั้งหมด คิดเป็นประสิทธิภาพของ recuperator อยู่ที่ 0.523 และมีไอเสียไหลออกจาก recuperator คิดเป็นพลังงาน 12.33% ของพลังงานขาเข้าทั้งหมด ซึ่งพลังงานส่วนนี้เองที่จะนำมาคำนวณเพื่ออุ่นขึ้นเหล็กตามที่กล่าวไป

จากตารางที่ 6.11 จะเห็นว่า การอุ่นด้วยรูปแบบการอุ่น 1 ชั่วโมงและ 2 ชั่วโมงจะให้ระยะเวลาคืนทุนที่เร็วที่สุดคือ 0.707 ปี นั่นคือน่าจะมีความเหมาะสมในการลงทุนมากที่สุด ซึ่งเมื่อรูปแบบการอุ่นเปลี่ยนไปด้วยเวลาที่มากขึ้นระยะเวลาคืนทุนก็จะมากขึ้นตามไปด้วย แต่ด้วยเหตุผลของขั้นตอนในการทำงาน การอุ่นด้วยรูปแบบการอุ่น 1 ชั่วโมงจะทำให้ขั้นตอนการทำงานมีความถี่มากจนเกินไป เนื่องจากเวลาการอุ่นจะเป็น 45 นาทีและนำเหล็กเข้าออกอีก 15 นาที ในทุกๆ ชั่วโมงของการทำงาน จึงจะเป็นการยุ่งยากจนเกินไปหากจะใช้การอุ่นด้วยรูปแบบการอุ่น 1 ชั่วโมง การอุ่นที่น่าจะมีความเหมาะสมมากที่สุด จึงน่าจะเป็นการอุ่นด้วยเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 0.707 ปีนั่นเอง และจะนำการอุ่นในรูปแบบ 2 ชั่วโมงไปคำนวณการอุ่นต่อไป

การอุ่นในรูปแบบ 2 ชั่วโมงจากตารางที่ 6.4 จะเห็นว่าเหล็กทั้ง 18 ชั้นมีอุณหภูมิของแต่ละชั้นที่ออกจากส่วนอุ่นแห้งเหล็กไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการวางเหล็กจะวางเรียงกันทำให้ไอเสียที่ร้อนที่สุดจะผ่านเข้าสู่เหล็กชั้นแรกก่อนเสมอเมื่อเข้าสู่ส่วนอุ่นแห้งเหล็ก เหล็กชั้นเหล็กจึงจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงสุดเสมออยู่ที่ 102.63°C และเรียงกันไปจนชั้นสุดท้ายจะทำอุณหภูมิได้ต่ำสุดเสมอที่ 88.98°C เมื่อเฉลี่ยอุณหภูมิของทุกชั้นจะอยู่ที่ 95.57°C ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิของเหล็กเพิ่มขึ้นจาก 30°C ก่อนอุ่นมา 65.57°C

สำหรับไอเสียสิ่งแรกที่ต้องตรวจสอบคืออุณหภูมิต่ำสุดของไอเสียที่เกิดขึ้นเพื่อที่จะดูว่าต่ำกว่าอุณหภูมิของจุดน้ำค้างกรดหรือไม่ จากรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิต่ำสุดของไอเสียจะอยู่ที่เวลาแรก เนื่องจากว่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิของไอเสียกับชิ้นเหล็กจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งอุณหภูมิจะอยู่ที่ 329.7°C ซึ่งยังคงสูงกว่าอุณหภูมิของจุดน้ำค้างกรดที่ 157.25°C อยู่ถึงสองเท่า ทำให้มั่นใจได้ว่าจะไม่เกิดสภาวะกรดขึ้นสำหรับอุณหภูมิเฉลี่ยของไอเสีย

จากข้อมูลของอุณหภูมิที่ได้ของชิ้นเหล็กที่ผ่านส่วนอุ่นแห้งเหล็กมาแล้ว จะนำอุณหภูมิเฉลี่ยขาเข้าและขาออกของชิ้นเหล็กมาคำนวณสมดุลความร้อนของเหล็กเพื่อที่จะดูว่าสามารถนำพลังงานกลับมาใช้ได้มากเท่าไรสำหรับส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็ก สำหรับสมดุลมวลนั้นจะไม่มีการคำนวณเนื่องจากจะถือว่าไอเสียจะไหลทางเดียวและไม่มีการรั่วออกของไอเสียออกจากส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็ก โดยที่สมดุลความร้อนจะมีดังนี้คือ

ตารางที่ 6.12 ตารางแสดงสมดุลความร้อนส่วนอุ่นแห้งเหล็กในรอบเวลา 2 ชั่วโมง

| พลังงานความร้อนขาเข้า | พลังงานความร้อนขาออก |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1. ความร้อนสัมผัสไอเสียที่ไหลเข้า | 2. ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ไหลออก |
| | 3. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก |

1. ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ไหลเข้าสู่ส่วนอุ่นแห้งเหล็ก

ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ไหลเข้าสู่ส่วนอุ่นแห้งเหล็กจะใช้อุณหภูมิของไอเสียที่ออกจาก recuperator มาคำนวณ โดยที่ ตั้งสมมติฐานว่าไม่มีการสูญเสียหรือเพิ่มอุณหภูมิระหว่างทางที่ไหลมาจาก recuperator เข้าสู่ส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็ก

$$\dot{Q}_{\text{flue, chamber, in}} = \dot{m}_{\text{flue, chamber}} c_{\text{flue, chamber}} (T_{\text{flue, chamber, in}} - T_0) \quad (6.1)$$

เมื่อ

| | | |
|----------------------------------|-----|--|
| $\dot{m}_{\text{flue, chamber}}$ | คือ | อัตราการไหลของมวลไอเสีย (kg/s) |
| $c_{\text{flue, chamber}}$ | คือ | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของไอเสีย สามารถทำการคำนวณได้เมื่อทราบส่วนผสมของไอเสียที่ไหลออกมา (kJ/kg•K) |
| $T_{\text{flue, chamber, in}}$ | คือ | ค่าอุณหภูมิของไอเสียที่เข้าสู่ส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็ก (มีค่า 681.52K) |

2. ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ไหลออก

ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ไหลออกจากส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กจะใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของไอเสีย

ขอออกมาคำนวณ

$$\dot{Q}_{\text{flue, chamber, out}} = \dot{m}_{\text{flue, chamber}} c_{\text{flue, chamber}} (T_{\text{flue, chamber, out}} - T_0) \quad (6.2)$$

เมื่อ

$T_{\text{flue, chamber, in}}$ คือ ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของไอเสียที่ออกจากส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็ก (มีค่า 366.68 K)

3. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก

$$\dot{Q}_{\text{slab, chamber, sen}} = \dot{m}_{\text{slab}} c_{\text{slab}} (T_{\text{slab, chamber, out}} - T_{\text{slab, chamber, in}}) \quad (6.3)$$

เมื่อ

$\dot{m}_{\text{slab, chamber}}$ คือ จะเป็นการเฉลี่ยน้ำหนักเหล็กต่อเวลาที่อุ่นขึ้นเหล็ก (kg/s)

C_{slab} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กจะมีค่าประมาณ 0.78 kJ/kg-K

$T_{\text{slab, chamber, in}}$ คือ ค่าอุณหภูมิขาเข้าของเหล็กจากส่วนอุ่นแห้งเหล็ก (K)

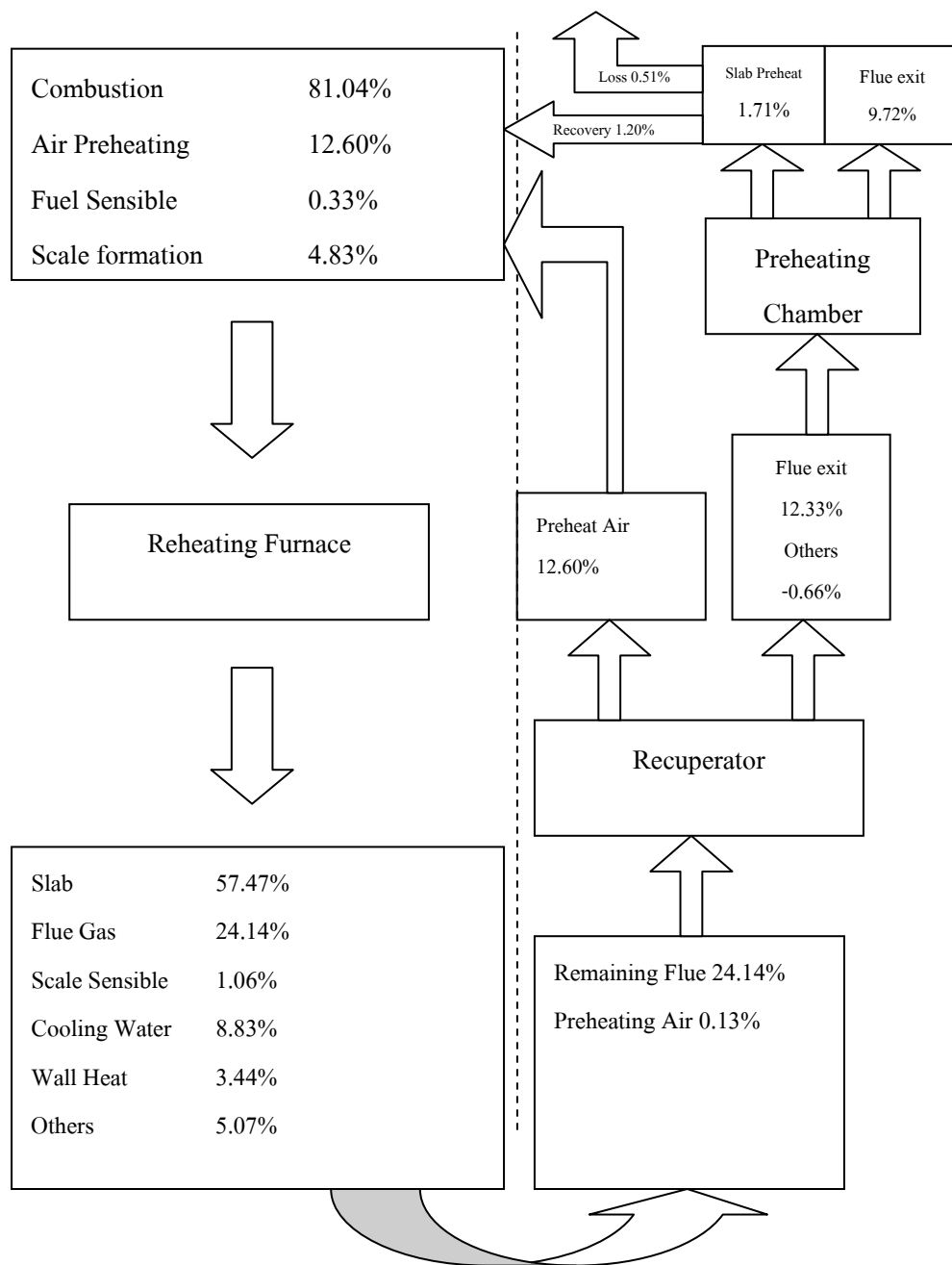
$T_{\text{slab, chamber, out}}$ คือ ค่าอุณหภูมิขาออกของเหล็กจากส่วนอุ่นแห้งเหล็กจะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยของเหล็กทุกชิ้น (K)

ตารางที่ 6.13 ตารางแสดงปริมาณสมดุลความร้อนส่วนอุ่นแห้งเหล็กในรอบเวลา 2 ชั่วโมง

| พลังงานความร้อนขาเข้า | kW | % | พลังงานความร้อนขาออก | kW | % |
|--------------------------------------|-----------|-------|-------------------------------------|----------|-------|
| 1. ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ไหลเข้า | 11,573.17 | 12.27 | 2. ความร้อนสัมผัสของไอเสียที่ไหลออก | 9,945.38 | 10.56 |
| | | | 3. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก | 1627.79 | 1.71 |

จะเห็นได้ว่าจากความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็กสำหรับส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็ก จะมีค่าประมาณ 2.54 % ของพลังงานเริ่มต้น แต่เมื่อเข้าสู่เตาเผาเหล็กแล้วค่าพลังงานนี้จะมีค่าน้อยลงอีก

เนื่องจากว่าเหล็กจะสูญเสียความร้อนเมื่อถูกนำไปวางในอุณหภูมิบรรยากาศเพื่อรอการผลิต จากตารางที่ 6.4 จะเห็นว่าชั้นเหล็กเมื่อถูกวางเอาไว้ในบรรยากาศแล้วแต่ละชั้นจะสูญเสียอุณหภูมิไม่เท่ากัน เนื่องจากเวลาที่รอการผลิตจะต่างกันไป ซึ่งเมื่อคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยแล้วจะอยู่ที่ 75.98°C ซึ่งหากคำนวณเป็นพลังงานที่สูญเสียแล้วจะมีค่าประมาณ 486.43 kW ทำให้ความร้อนที่เหล็กนำกลับมาใช้จริงอยู่ที่ 1,141.37 kW หรือคิดเป็น 1.20% ของพลังงานขาเข้าทั้งหมดของเตาเผาเหล็ก ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพแล้ว ส่วนอุณหภูมิลูกเหล็กนี้จะมีประสิทธิภาพในการนำพลังงานกลับมาใช้ที่รูปแบบการอุ่นเหล็ก 2 ชั่วโมงอยู่ที่ 13.93 % ซึ่งหากติดตั้งอุปกรณ์อุ่นแท่งเหล็กเข้าไปในระบบสามารถเขียนสมดุลความร้อนได้ตามรูปที่ 6.6 เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.4 ซึ่งจากภาพ พลังงานที่นำกลับมาใช้ใหม่จากส่วนอุณหภูมิลูกเหล็กของเตาเผาเหล็กจะทำให้พลังงานขาเข้าของเตาเผาเหล็กลดลงเหลือ 81.04% เพราะพลังงานที่ต้องใส่ให้กับเหล็กลดลงเนื่องจากเหล็กมีอุณหภูมิขาเข้าที่สูงขึ้น พลังงานที่ต้องใส่ให้กับเหล็กมีค่า 57.47% ซึ่งเมื่อคิดเป็นประสิทธิภาพเตาใหม่แล้วจะอยู่ที่ 70.91%



รูปที่ 6.6 สมดุลความร้อนรวมเมื่อใส่ส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กเข้าไปในระบบ

บทที่ 7

สรุปผลการศึกษา

7.1 สรุปผลการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก โดยจะเริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เตาเผาเหล็กในการผลิต และนำข้อมูลที่ได้มาพิจารณาสมดุลความร้อนและการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก หลังจากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้เพื่อมาคำนวณและออกแบบส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กเพิ่มเติมจากส่วนที่มีอยู่แล้ว เพื่อที่จะหาการประหยัดพลังงานเพิ่มเติมให้กับเตาเผาเหล็กหากเพิ่มส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กนี้เข้าไปในระบบ โดยมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กนี้จะต้องไม่รบกวนการทำงานของระบบเดิม โดยการเลือกส่วนอุ่นแห้งเหล็กของระบบจะเลือกตามการผลิตของโรงงาน

จากการศึกษาการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็กขนาด 250 ตันซึ่งมี recuperator เพื่อนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้พบว่า เตาเผาเหล็กของโรงงานนั้นมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 69.9% ซึ่งเป็นค่าที่สูงเนื่องมาจากการใช้ recuperator ที่มีประสิทธิภาพนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ทางการแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศเข้าที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่สมดุลมวลและสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็กแล้ว พบว่าปริมาณความร้อนที่สูญเสียมากที่สุดคือสูญเสียไปกับไอเสีย การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่ที่ recuperator จึงเป็นวิธีที่ดี โดยที่ effectiveness ของ recuperator อยู่ที่ 0.6418 นั่นคือสามารถนำความร้อนที่ทิ้งไปกับไอเสียกลับมาใช้ได้เกินกึ่งหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามพบว่าความร้อนที่ทิ้งไปกับไอเสียที่อุณหภูมิ 407.38°C ยังคงมีปริมาณที่สูงมากที่สุดของปริมาณความร้อนสูญเสียรวมของระบบอยู่ที่ และไอเสียที่อุณหภูมินั้นยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ต่อ จึงได้มีการออกแบบส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กขึ้นเพื่อนำความร้อนที่สูญเสียไปกับไอเสียกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงคืออุณหภูมิของจุดน้ำค้างกรด เนื่องจากว่าเตาเผาเหล็กใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งมีส่วนผสมของกำมะถันอยู่ด้วย หากลดอุณหภูมิของไอเสียจนถึงจุดๆ หนึ่งอาจจะทำให้ไอเสียมีสถานะเป็นกรดได้ ก่อให้เกิดผลเสียกับเหล็กและระบบ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าไอเสียที่ออกมาจากเตาเผาเหล็กจะมีอุณหภูมิจุดน้ำค้างกรดอยู่ที่ 157.25°C ซึ่งไอเสียเมื่อผ่านส่วนอุ่นแห้งเหล็กแล้วจะต้องมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่าอุณหภูมินี้

การศึกษาจะดำเนินต่อไปในทางการคำนวณปริมาณอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเมื่อผ่านไอเสียไป แลกเปลี่ยนความร้อนกับเหล็กโดยตรงในส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็ก ซึ่งส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กนี้จะใช้การอุ่นเป็นรอบๆ ไป โดยที่ปริมาณการอุ่นในแต่ละรอบนั้นจะขึ้นอยู่กับการผลิตของโรงงาน ซึ่งในวันที่นำข้อมูลมาใช้ในการคำนวณนั้นปริมาณการผลิตจะอยู่ที่ประมาณ 200 ตันต่อชั่วโมงหรือประมาณ 9 แห่งต่อชั่วโมง แบ่งการคำนวณการอุ่นออกเป็น 4 แบบคือตามการผลิต 1-4 ชั่วโมง จำนวนชิ้นในการอุ่นก็จะเป็น 9,18,27 และ 36 แห่งตามลำดับ เวลาในการอุ่นและขนาดของส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กก็จะแตกต่างกันไป โดยที่การอุ่นในแต่ละแบบจะเพื่อเวลาการขนย้ายเอาไว้ที่ 15% ของการเวลาทั้งหมดที่มี แห่งเหล็กที่ได้รับการอุ่นเรียบร้อยแล้วจะถูกนำมาวางรอการผลิตในบรรยากาศปกติ และจะสูญเสียพลังงานและอุณหภูมิไปตามเวลาที่รอการผลิต ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วรูปแบบการอุ่นที่มีความเหมาะสมที่สุดคือแบบ 2 ชั่วโมง จะมีการอุ่นชิ้นเหล็กที่ 18 แห่งใช้เวลาในการอุ่น 1 ชั่วโมง 30 นาที และเวลาขนย้ายอีก 30 นาที อุณหภูมิของแห้งเหล็กที่ออกมาจากส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กเฉลี่ยแล้วจะอยู่ที่ 95.57°C เมื่อถูกนำไปวางรอการผลิตในบรรยากาศจะเกิดการสูญเสียอุณหภูมิทำให้อุณหภูมิของแห้งเหล็กเฉลี่ยที่ใส่เข้าสู่เตาอยู่ที่ 88.98°C เมื่อคิดเป็นพลังงานความร้อนที่ประหยัดได้จะประมาณ 1,141.37 kW หรือคิดเป็น 1.2% ของพลังงานขาเข้าทั้งหมด มีระยะเวลาคืนทุนของการลงทุนอยู่ที่ 0.707 ปี ซึ่งหากติดตั้งอุปกรณ์ส่วนอุ่นแห้งเหล็กของเตาเผาเหล็กนี้เข้าไปให้กับระบบแล้วจะทำให้สมดุลความร้อนเปลี่ยนไป โดยที่ประสิทธิภาพของเตาเผาเหล็กจะเปลี่ยนไปอยู่ที่ประมาณ 70.91%

7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาเพิ่มเติม

1. การวัดอากาศขาเข้าสำหรับเตาเผาเหล็กจะมีอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ซึ่งได้รับการวัด และอีกส่วนคืออากาศอัดสำหรับทำให้น้ำมันแตกตัว ซึ่งไม่ได้รับการวัดโดยตรง ทำให้เมื่อจะคำนวณอัตราการไหลของไอเสียรวมต้องคำนวณจากปริมาณออกซิเจนในไอเสีย ซึ่งไม่สามารถเทียบได้ว่าถูกต้องหรือไม่ ซึ่งน่าจะมีอุปกรณ์วัดการไหลของอากาศอัดได้ น่าจะทำให้สมดุลมวลนั้นมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น
2. ข้อมูลสำหรับในบางวันที่การผลิตไม่ต่อเนื่องจะทำให้ค่าที่วัดได้กว้าง ไม่ว่าจะเป็นค่าปริมาณออกซิเจนในไอเสียหรือความดันภายใน จึงต้องเลือกวันที่มีการผลิตสูงและ

ต่อเนื่องเพื่อมาคำนวณ ซึ่งสำหรับวันอื่นที่มีการผลิตน้อยลง ความสามารถในการอุ่นแห้ง เหล็กก็จะมีค่าน้อยลงไปด้วย

3. การวัดปริมาณออกซิเจนในไอเสียซึ่งวัดที่ทางออกเตาโดยทางโรงงานเอง กับ การวัดปริมาณออกซิเจนในไอเสียที่ทางผู้รับเหมาด้านนอกมาวัดให้ที่ท่อไอเสีย มีค่าต่างกันอย่างมาก ทำให้เกิดการสงสัยว่าจะมีการรั่วเข้าของอากาศที่ระหว่างทางออกของไอเสีย
4. ข้อมูลที่ได้สำหรับการประมาณราคาเป็นราคาต่อตารางเมตรซึ่งเป็นการประมาณ และจะเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง ซึ่งตามจริงแล้ว หากสร้างส่วนอุ่นแห้งเหล็กให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ราคาจะไม่เพิ่มขึ้นเป็นลักษณะแปรผันตรงกับขนาดการก่อสร้าง แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางข้อมูลทำให้จำเป็นต้องประมาณราคาในแบบเส้นตรง ซึ่งหากมีข้อมูลการก่อสร้างส่วนอุ่นแห้งเหล็กที่ดีขึ้น การประมาณราคาของส่วนอุ่นแห้งเหล็กและระยะเวลาคืนทุนน่าจะทำได้ตรงกับความเป็นจริงมากขึ้น
5. เนื่องจากโรงงานที่นำข้อมูลมาคำนวณใช้ slab เป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งตัว slab ที่มีขนาดใหญ่อาจจะดูดกลืนความร้อนได้ไม่ดีเท่ากับ billet ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า หากเป็นโรงงานที่ใช้ billet เป็นวัตถุดิบอาจจะทำให้ประสิทธิภาพของการอุ่นเหล็กดีขึ้น
6. การอุ่นแห้งเหล็กหากเป็นแบบต่อเนื่องก็จะทำให้การทำงานไม่ซับซ้อน แต่ก็อาจจะทำให้การลงทุนสูงขึ้น อาจจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุน ซึ่งต้องทำการศึกษากันในขั้นต่อไป

รายการอ้างอิง

- กวี หวังนิเวศน์กุล. การประมาณราคางานวิศวกรรมก่อสร้าง. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2547.
- โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมและอาคารต่างๆ (SEC). กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2549.
- โครงการเกณฑ์การศึกษาการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก (รายงานฉบับสุดท้ายโครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานต่างๆ). สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย เสนอต่อกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2549.
- จิตติน แดงเที่ยง. การวิเคราะห์ไอเสียเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, 4-7 พฤศจิกายน 2552 ณ จังหวัดเชียงใหม่, 2552.
- บรรยเวกษ์ก์ สงฤทธิ์. การศึกษารลดการสูญเสียพลังงานจากการสะสมความร้อนในผนังเตาเผาเหล็กโดยใช้เซรามิกไฟเบอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- วินิต ช่อวิเชียร. การออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก : โดยวิธีหน่วยแรงใช้งาน = Reinforced concrete design (working stress design: WSD). พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- B. ZareNezhad, A. Almanian. Accurate prediction of the dew point of acidic combustion gases by using an artificial neural network model. Energy Conversion and Management 52 (2011): 911-916.
- E.H. Verhoff, J.T. Banchemo. Predicting dew points of flue gases. Chemical Engineering Progress, Vol. 70 (1974): 71-72.

- F.M. White. Fluid mechanics (6th edition): McGraw Hill, 2006.
- F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine. Introduction to Heat Transfer (5th edition): John Wiley and Sons (Asia), 2007.
- M. Si, S. Thompson, K. Calder. Energy efficiency assessment by process heating assessment and survey tool (PHAST) and easibility analysis of waste heat recovery in the reheat furnace at steel company. Renewable and Sustainable Energy Review 15 (2011): 2904-2908.
- M. Si. The feasibility of waste heat recovery and energy efficiency assessment in a steel plant. Master's Thesis, Faculty of environment earth and resources, University of Manitoba, 2011.
- M. Shamanian, A. Najafizadeh. Hot charge of continuously cast slabs in reheating furnaces. International Journal of ISSI, Vol.1, No. 1 (2004): 35-37.
- U.S. Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy, Energy Tips – Process Heating. Load Preheating Using Flue Gases from a Fuel Fired Heating System, Process Heating Tip Sheet #9, January 2006.
- W.H. Chen, Y.C. Chung, J.L. Liu. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill. International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 32(5) (2005): 695-706
- Y.H. Kiang. Predicting dew points of acid gases. Journal of Chemical Engineering, (Feb 1981): 127
- Y.Kim , E. Worrell. International comparison of CO₂ emission trends in the iron and steel industry. Energy Policy 30(10) (2002): 827-838

Y.Tan, E. Croiset, M.A. Douglas, K.V. Thambimuthu. Combustion characteristics of coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas. Fuel 85 (2006): 507-512

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงค่าความดันภายในเตา อัตราการใช้เชื้อเพลิง %ออกซิเจนในไอเสียและอัตราการไหลของอากาศ

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง (kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|-------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 00:02:00 | 0.94 | 7071.36 | 0.67 | 70324.40 |
| 2011-11-07 | 00:06:00 | 0.98 | 7058.98 | 0.65 | 70238.21 |
| 2011-11-07 | 00:12:00 | 0.94 | 6970.75 | 0.67 | 69268.88 |
| 2011-11-07 | 00:16:00 | 1.03 | 6891.88 | 0.65 | 68919.92 |
| 2011-11-07 | 00:22:00 | 0.79 | 6846.40 | 0.65 | 66930.65 |
| 2011-11-07 | 00:26:00 | 0.65 | 6833.61 | 0.63 | 66252.90 |
| 2011-11-07 | 00:32:00 | 0.72 | 6986.52 | 0.65 | 66700.00 |
| 2011-11-07 | 00:36:00 | 0.65 | 6858.24 | 0.65 | 65704.64 |
| 2011-11-07 | 00:42:00 | 0.68 | 6824.65 | 0.65 | 65048.32 |
| 2011-11-07 | 00:46:00 | 0.75 | 6829.19 | 0.65 | 65320.08 |
| 2011-11-07 | 00:52:00 | 0.76 | 6624.95 | 0.68 | 63979.43 |
| 2011-11-07 | 00:56:00 | 0.73 | 6571.50 | 0.69 | 63277.43 |
| 2011-11-07 | 01:02:00 | 0.65 | 6411.59 | 0.73 | 62001.53 |
| 2011-11-07 | 01:06:00 | 0.77 | 6301.96 | 0.72 | 61153.48 |
| 2011-11-07 | 01:12:00 | 0.77 | 6321.96 | 0.73 | 61052.19 |
| 2011-11-07 | 01:16:00 | 0.77 | 6418.39 | 0.76 | 62333.04 |
| 2011-11-07 | 01:22:00 | 0.69 | 6546.56 | 0.75 | 63944.08 |
| 2011-11-07 | 01:26:00 | 0.88 | 6680.73 | 0.75 | 65387.23 |
| 2011-11-07 | 01:32:00 | 0.83 | 6734.14 | 0.80 | 65808.80 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 01:36:00 | 0.72 | 6805.58 | 0.80 | 66718.95 |
| 2011-11-07 | 01:42:00 | 0.85 | 6827.69 | 0.80 | 67308.29 |
| 2011-11-07 | 01:46:00 | 0.68 | 6803.46 | 0.80 | 66609.90 |
| 2011-11-07 | 01:52:00 | 0.82 | 6739.05 | 0.85 | 66127.45 |
| 2011-11-07 | 01:56:00 | 0.68 | 6723.74 | 0.83 | 65925.39 |
| 2011-11-07 | 02:02:00 | 0.72 | 6680.88 | 0.85 | 65445.79 |
| 2011-11-07 | 02:06:00 | 1.18 | 6674.27 | 0.83 | 64915.76 |
| 2011-11-07 | 02:12:00 | 0.83 | 6666.02 | 0.84 | 64372.00 |
| 2011-11-07 | 02:16:00 | 0.97 | 6576.15 | 0.81 | 63463.85 |
| 2011-11-07 | 02:22:00 | 0.76 | 6553.98 | 0.81 | 63049.03 |
| 2011-11-07 | 02:26:00 | 0.77 | 6517.17 | 0.80 | 61980.98 |
| 2011-11-07 | 02:32:00 | 0.86 | 6368.13 | 0.81 | 60181.60 |
| 2011-11-07 | 02:36:00 | 0.77 | 6345.52 | 0.81 | 59950.15 |
| 2011-11-07 | 02:42:00 | 0.82 | 6370.87 | 0.83 | 60336.16 |
| 2011-11-07 | 02:46:00 | 0.80 | 6402.47 | 0.86 | 60529.89 |
| 2011-11-07 | 02:52:00 | 0.76 | 6468.47 | 0.88 | 61479.54 |
| 2011-11-07 | 02:56:00 | 0.83 | 6336.81 | 0.90 | 61755.60 |
| 2011-11-07 | 03:02:00 | 0.46 | 6636.07 | 0.92 | 64531.87 |
| 2011-11-07 | 03:06:00 | 0.73 | 6664.50 | 0.92 | 64919.36 |
| 2011-11-07 | 03:12:00 | 0.80 | 6754.96 | 0.94 | 64730.87 |
| 2011-11-07 | 03:16:00 | 0.68 | 6665.54 | 0.97 | 63824.08 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 03:22:00 | 0.68 | 6694.77 | 0.97 | 64118.20 |
| 2011-11-07 | 03:26:00 | 0.71 | 6716.19 | 0.95 | 64402.51 |
| 2011-11-07 | 03:32:00 | 0.80 | 6736.87 | 0.98 | 65075.65 |
| 2011-11-07 | 03:36:00 | 0.94 | 6884.94 | 1.01 | 66470.67 |
| 2011-11-07 | 03:42:00 | 0.73 | 6794.02 | 1.03 | 66199.30 |
| 2011-11-07 | 03:46:00 | 0.80 | 6784.16 | 1.01 | 65672.77 |
| 2011-11-07 | 03:52:00 | 0.72 | 6891.64 | 1.03 | 66434.95 |
| 2011-11-07 | 03:56:00 | 0.79 | 6938.52 | 1.05 | 67096.66 |
| 2011-11-07 | 04:02:00 | 0.74 | 6915.84 | 1.06 | 66855.16 |
| 2011-11-07 | 04:06:00 | 0.65 | 6935.27 | 1.06 | 67310.65 |
| 2011-11-07 | 04:12:00 | 0.81 | 6930.13 | 1.09 | 67244.47 |
| 2011-11-07 | 04:16:00 | 0.80 | 6917.12 | 1.09 | 66959.52 |
| 2011-11-07 | 04:22:00 | 0.79 | 6885.62 | 1.13 | 66651.73 |
| 2011-11-07 | 04:26:00 | 0.78 | 6899.27 | 1.14 | 67037.66 |
| 2011-11-07 | 04:32:00 | 0.62 | 6861.74 | 1.15 | 66240.90 |
| 2011-11-07 | 04:36:00 | 0.83 | 6887.29 | 1.13 | 66923.82 |
| 2011-11-07 | 04:42:00 | 0.86 | 6875.11 | 1.10 | 66695.73 |
| 2011-11-07 | 04:46:00 | 0.67 | 6882.28 | 1.10 | 66103.24 |
| 2011-11-07 | 04:52:00 | 0.74 | 6876.62 | 1.13 | 66275.48 |
| 2011-11-07 | 04:56:00 | 0.73 | 6867.13 | 1.13 | 66630.61 |
| 2011-11-07 | 05:02:00 | 0.89 | 6879.79 | 1.16 | 66675.38 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 05:06:00 | 0.79 | 6890.34 | 1.15 | 66364.78 |
| 2011-11-07 | 05:12:00 | 0.89 | 6873.91 | 1.15 | 66547.00 |
| 2011-11-07 | 05:16:00 | 1.11 | 6897.09 | 1.15 | 66633.86 |
| 2011-11-07 | 05:22:00 | 0.56 | 6811.50 | 1.15 | 65595.13 |
| 2011-11-07 | 05:26:00 | 0.84 | 6718.15 | 1.15 | 65406.18 |
| 2011-11-07 | 05:32:00 | 0.77 | 6727.54 | 1.15 | 65069.05 |
| 2011-11-07 | 05:36:00 | 0.75 | 6685.96 | 1.10 | 64871.09 |
| 2011-11-07 | 05:42:00 | 0.95 | 6679.72 | 1.09 | 64590.85 |
| 2011-11-07 | 05:46:00 | 0.81 | 6591.71 | 1.06 | 64103.36 |
| 2011-11-07 | 05:52:00 | 0.91 | 6595.92 | 0.95 | 63922.30 |
| 2011-11-07 | 05:56:00 | 0.93 | 6655.04 | 0.93 | 64648.46 |
| 2011-11-07 | 06:02:00 | 0.79 | 6619.40 | 0.91 | 63693.59 |
| 2011-11-07 | 06:06:00 | 0.84 | 6623.78 | 0.90 | 63868.12 |
| 2011-11-07 | 06:12:00 | 0.65 | 6428.42 | 0.87 | 62273.66 |
| 2011-11-07 | 06:16:00 | 0.82 | 6451.44 | 0.84 | 62119.56 |
| 2011-11-07 | 06:22:00 | 0.79 | 6238.60 | 0.85 | 60057.77 |
| 2011-11-07 | 06:26:00 | 0.72 | 6013.92 | 0.82 | 57342.68 |
| 2011-11-07 | 06:32:00 | 0.87 | 6126.55 | 0.85 | 58325.53 |
| 2011-11-07 | 06:36:00 | 0.84 | 6072.52 | 0.84 | 57869.57 |
| 2011-11-07 | 06:42:00 | 0.68 | 6127.70 | 0.80 | 58638.15 |
| 2011-11-07 | 06:46:00 | 0.74 | 6091.08 | 0.79 | 58610.36 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 06:52:00 | 0.88 | 6255.88 | 0.75 | 59667.52 |
| 2011-11-07 | 06:56:00 | 0.84 | 6246.81 | 0.74 | 59737.21 |
| 2011-11-07 | 07:02:00 | 0.68 | 6268.54 | 0.72 | 59933.81 |
| 2011-11-07 | 07:06:00 | 0.74 | 6197.95 | 0.69 | 59377.26 |
| 2011-11-07 | 07:12:00 | 0.86 | 6075.66 | 0.68 | 58548.01 |
| 2011-11-07 | 07:16:00 | 0.72 | 6030.70 | 0.72 | 58221.70 |
| 2011-11-07 | 07:22:00 | 0.82 | 6002.28 | 0.72 | 57674.13 |
| 2011-11-07 | 07:26:00 | 0.76 | 6061.72 | 0.73 | 58165.85 |
| 2011-11-07 | 07:32:00 | 0.80 | 6308.25 | 0.76 | 60663.80 |
| 2011-11-07 | 07:36:00 | 0.51 | 6512.06 | 0.79 | 62731.81 |
| 2011-11-07 | 07:42:00 | 0.72 | 6629.45 | 0.80 | 64325.86 |
| 2011-11-07 | 07:46:00 | 0.79 | 6249.75 | 0.82 | 60678.12 |
| 2011-11-07 | 07:52:00 | 0.66 | 6214.23 | 0.85 | 59662.45 |
| 2011-11-07 | 07:56:00 | 0.54 | 6216.35 | 0.85 | 60139.64 |
| 2011-11-07 | 08:02:00 | 0.82 | 6293.06 | 0.85 | 60735.96 |
| 2011-11-07 | 08:06:00 | 0.87 | 6471.96 | 0.85 | 63513.19 |
| 2011-11-07 | 08:12:00 | 0.52 | 6286.41 | 0.85 | 61478.29 |
| 2011-11-07 | 08:16:00 | 0.83 | 6765.89 | 0.87 | 66284.15 |
| 2011-11-07 | 08:22:00 | 0.89 | 7085.88 | 0.87 | 69986.77 |
| 2011-11-07 | 08:26:00 | 0.94 | 7207.99 | 0.90 | 70715.20 |
| 2011-11-07 | 08:32:00 | 0.78 | 7035.88 | 0.91 | 68811.40 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 08:36:00 | 0.77 | 7107.04 | 0.91 | 69305.72 |
| 2011-11-07 | 08:42:00 | 0.85 | 7236.63 | 0.95 | 70417.49 |
| 2011-11-07 | 08:46:00 | 1.00 | 7242.55 | 0.94 | 70217.70 |
| 2011-11-07 | 08:52:00 | 0.88 | 7151.94 | 0.91 | 68898.80 |
| 2011-11-07 | 08:56:00 | 1.19 | 7023.16 | 0.86 | 68293.26 |
| 2011-11-07 | 09:02:00 | 0.78 | 6986.47 | 0.90 | 67696.77 |
| 2011-11-07 | 09:06:00 | 0.77 | 6950.72 | 0.93 | 67084.29 |
| 2011-11-07 | 09:12:00 | 0.76 | 6975.17 | 0.95 | 67368.67 |
| 2011-11-07 | 09:16:00 | 0.80 | 6993.27 | 0.98 | 67603.62 |
| 2011-11-07 | 09:22:00 | 0.95 | 7010.60 | 1.02 | 67601.80 |
| 2011-11-07 | 09:26:00 | 0.74 | 6946.95 | 1.06 | 67587.97 |
| 2011-11-07 | 09:32:00 | 0.66 | 6909.34 | 1.10 | 67272.45 |
| 2011-11-07 | 09:36:00 | 0.72 | 6957.82 | 1.10 | 67568.84 |
| 2011-11-07 | 09:42:00 | 0.75 | 6960.60 | 1.12 | 67183.06 |
| 2011-11-07 | 09:46:00 | 0.23 | 6883.12 | 1.16 | 66621.62 |
| 2011-11-07 | 09:52:00 | 0.67 | 6843.13 | 1.17 | 66071.75 |
| 2011-11-07 | 09:56:00 | 0.78 | 6900.30 | 1.19 | 66361.63 |
| 2011-11-07 | 10:02:00 | 0.72 | 6857.28 | 1.22 | 66194.38 |
| 2011-11-07 | 10:06:00 | 0.61 | 6820.17 | 1.22 | 65614.11 |
| 2011-11-07 | 10:12:00 | 0.35 | 6764.83 | 1.27 | 65512.17 |
| 2011-11-07 | 10:16:00 | 0.75 | 6741.66 | 1.26 | 64693.22 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 10:22:00 | 0.82 | 6723.13 | 1.27 | 64513.09 |
| 2011-11-07 | 10:26:00 | 0.85 | 6746.66 | 1.27 | 64679.46 |
| 2011-11-07 | 10:32:00 | 0.40 | 6619.50 | 1.29 | 67088.91 |
| 2011-11-07 | 10:36:00 | 1.07 | 6740.17 | 1.34 | 70770.66 |
| 2011-11-07 | 10:42:00 | 1.09 | 6904.41 | 1.37 | 71911.79 |
| 2011-11-07 | 10:46:00 | 1.16 | 7023.11 | 1.39 | 72660.63 |
| 2011-11-07 | 10:52:00 | 0.79 | 6712.09 | 1.42 | 67213.97 |
| 2011-11-07 | 10:56:00 | 1.21 | 6734.26 | 1.39 | 67720.43 |
| 2011-11-07 | 11:02:00 | 0.76 | 6840.60 | 1.44 | 68989.13 |
| 2011-11-07 | 11:06:00 | 0.80 | 6701.32 | 1.43 | 67529.63 |
| 2011-11-07 | 11:12:00 | 0.80 | 6691.64 | 1.44 | 67181.48 |
| 2011-11-07 | 11:16:00 | 0.77 | 6799.25 | 1.41 | 68440.34 |
| 2011-11-07 | 11:22:00 | 1.31 | 6771.84 | 1.37 | 68170.22 |
| 2011-11-07 | 11:26:00 | 0.87 | 6654.59 | 1.37 | 67279.68 |
| 2011-11-07 | 11:32:00 | 0.85 | 6676.95 | 1.35 | 67288.71 |
| 2011-11-07 | 11:36:00 | 0.58 | 6637.99 | 1.28 | 66912.10 |
| 2011-11-07 | 11:42:00 | 0.70 | 6742.88 | 1.24 | 67683.26 |
| 2011-11-07 | 11:46:00 | 0.78 | 6652.36 | 1.20 | 66848.60 |
| 2011-11-07 | 11:52:00 | 0.59 | 6388.49 | 1.16 | 63595.44 |
| 2011-11-07 | 11:56:00 | 0.70 | 6321.78 | 1.09 | 62729.66 |
| 2011-11-07 | 12:02:00 | 0.89 | 6034.98 | 1.03 | 60070.42 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 12:06:00 | 0.86 | 5976.71 | 0.92 | 58824.86 |
| 2011-11-07 | 12:12:00 | 0.67 | 5784.53 | 0.90 | 56882.46 |
| 2011-11-07 | 12:16:00 | 0.93 | 5745.98 | 0.86 | 56340.13 |
| 2011-11-07 | 12:22:00 | 0.75 | 5764.77 | 0.86 | 56441.87 |
| 2011-11-07 | 12:26:00 | 0.96 | 5969.03 | 0.84 | 58981.61 |
| 2011-11-07 | 12:32:00 | 1.10 | 6245.86 | 0.80 | 63564.82 |
| 2011-11-07 | 12:36:00 | 0.97 | 6694.59 | 0.79 | 68908.65 |
| 2011-11-07 | 12:42:00 | 0.70 | 6858.06 | 0.75 | 70927.35 |
| 2011-11-07 | 12:46:00 | 0.63 | 6613.03 | 0.77 | 68368.10 |
| 2011-11-07 | 12:52:00 | 0.78 | 6482.19 | 0.86 | 65490.73 |
| 2011-11-07 | 12:56:00 | 0.80 | 6344.55 | 0.88 | 63277.95 |
| 2011-11-07 | 13:02:00 | 0.74 | 6094.55 | 0.83 | 60505.43 |
| 2011-11-07 | 13:06:00 | 0.79 | 6042.81 | 0.77 | 59152.85 |
| 2011-11-07 | 13:12:00 | 0.75 | 5949.31 | 0.70 | 57899.78 |
| 2011-11-07 | 13:16:00 | 0.79 | 5919.12 | 0.67 | 57463.17 |
| 2011-11-07 | 13:22:00 | 0.74 | 6151.24 | 0.62 | 59899.73 |
| 2011-11-07 | 13:26:00 | 0.92 | 6281.87 | 0.58 | 62994.09 |
| 2011-11-07 | 13:32:00 | 0.85 | 6744.81 | 0.61 | 69150.75 |
| 2011-11-07 | 13:36:00 | 0.85 | 6828.75 | 0.68 | 70289.59 |
| 2011-11-07 | 13:42:00 | 1.03 | 6987.89 | 0.72 | 72703.38 |
| 2011-11-07 | 13:46:00 | 0.80 | 7012.74 | 0.77 | 72704.76 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 13:52:00 | 1.03 | 7018.61 | 0.77 | 73001.20 |
| 2011-11-07 | 13:56:00 | 1.02 | 7017.60 | 0.75 | 72901.80 |
| 2011-11-07 | 14:02:00 | 0.98 | 7009.42 | 0.72 | 72836.81 |
| 2011-11-07 | 14:06:00 | 1.02 | 6960.41 | 0.69 | 72396.12 |
| 2011-11-07 | 14:12:00 | 1.15 | 6938.21 | 0.66 | 72584.76 |
| 2011-11-07 | 14:16:00 | 1.08 | 6989.96 | 0.69 | 73142.77 |
| 2011-11-07 | 14:22:00 | 0.99 | 6853.86 | 0.73 | 71217.59 |
| 2011-11-07 | 14:26:00 | 0.91 | 6834.74 | 0.74 | 70891.17 |
| 2011-11-07 | 14:32:00 | 0.95 | 6827.59 | 0.79 | 70697.68 |
| 2011-11-07 | 14:36:00 | 0.42 | 6757.46 | 0.83 | 69959.13 |
| 2011-11-07 | 14:42:00 | 0.90 | 6840.76 | 0.86 | 71076.38 |
| 2011-11-07 | 14:46:00 | 0.98 | 6865.31 | 0.84 | 71175.08 |
| 2011-11-07 | 14:52:00 | 0.92 | 6898.94 | 0.84 | 71290.07 |
| 2011-11-07 | 14:56:00 | 1.04 | 6852.74 | 0.82 | 71158.19 |
| 2011-11-07 | 15:02:00 | 0.47 | 6835.55 | 0.85 | 70645.76 |
| 2011-11-07 | 15:06:00 | 1.09 | 6827.42 | 0.81 | 72933.34 |
| 2011-11-07 | 15:12:00 | 0.88 | 6918.29 | 0.95 | 70572.54 |
| 2011-11-07 | 15:16:00 | 0.77 | 6800.86 | 0.91 | 68648.47 |
| 2011-11-07 | 15:22:00 | 0.42 | 6888.57 | 0.85 | 69533.59 |
| 2011-11-07 | 15:26:00 | 0.96 | 6953.29 | 0.85 | 70558.74 |
| 2011-11-07 | 15:32:00 | 0.87 | 6972.54 | 0.77 | 71046.27 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 15:36:00 | 0.89 | 6927.00 | 0.72 | 70455.10 |
| 2011-11-07 | 15:42:00 | 1.01 | 6909.60 | 0.72 | 70227.75 |
| 2011-11-07 | 15:46:00 | 0.83 | 6941.76 | 0.74 | 70227.62 |
| 2011-11-07 | 15:52:00 | 0.86 | 6857.94 | 0.73 | 69815.19 |
| 2011-11-07 | 15:56:00 | 0.97 | 6909.28 | 0.79 | 70470.04 |
| 2011-11-07 | 16:02:00 | 0.88 | 6887.43 | 0.80 | 69978.99 |
| 2011-11-07 | 16:06:00 | 0.61 | 6531.85 | 0.77 | 67019.80 |
| 2011-11-07 | 16:12:00 | 0.62 | 6405.80 | 1.01 | 64846.02 |
| 2011-11-07 | 16:16:00 | 0.83 | 6536.61 | 1.09 | 66059.53 |
| 2011-11-07 | 16:22:00 | 0.74 | 6452.91 | 1.02 | 65256.45 |
| 2011-11-07 | 16:26:00 | 0.89 | 6392.91 | 1.02 | 64874.52 |
| 2011-11-07 | 16:32:00 | 0.70 | 6473.91 | 1.01 | 65220.21 |
| 2011-11-07 | 16:36:00 | 0.73 | 6425.23 | 1.02 | 65207.74 |
| 2011-11-07 | 16:42:00 | 0.77 | 6384.58 | 1.06 | 64790.52 |
| 2011-11-07 | 16:46:00 | 0.78 | 6452.86 | 1.06 | 65204.25 |
| 2011-11-07 | 16:52:00 | 0.74 | 6374.47 | 1.06 | 64518.34 |
| 2011-11-07 | 16:56:00 | 0.80 | 6371.09 | 1.05 | 64222.55 |
| 2011-11-07 | 17:02:00 | 0.80 | 6316.05 | 1.05 | 64252.71 |
| 2011-11-07 | 17:06:00 | 0.71 | 6363.22 | 1.03 | 63920.31 |
| 2011-11-07 | 17:12:00 | 0.81 | 6271.61 | 1.22 | 63338.50 |
| 2011-11-07 | 17:16:00 | 0.79 | 6162.42 | 1.32 | 62106.56 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 17:22:00 | 0.87 | 5930.49 | 1.44 | 59820.63 |
| 2011-11-07 | 17:26:00 | 0.86 | 5876.12 | 1.45 | 58957.10 |
| 2011-11-07 | 17:32:00 | 0.83 | 5579.48 | 1.11 | 56373.70 |
| 2011-11-07 | 17:36:00 | 0.79 | 5497.84 | 1.14 | 55252.36 |
| 2011-11-07 | 17:42:00 | 0.69 | 5428.46 | 1.30 | 54239.14 |
| 2011-11-07 | 17:46:00 | 0.64 | 5349.87 | 1.27 | 53541.16 |
| 2011-11-07 | 17:52:00 | 0.81 | 5356.82 | 1.27 | 53345.99 |
| 2011-11-07 | 17:56:00 | 0.88 | 5345.45 | 1.33 | 53615.32 |
| 2011-11-07 | 18:02:00 | 0.71 | 5367.20 | 1.28 | 53903.73 |
| 2011-11-07 | 18:06:00 | 0.76 | 5583.40 | 1.29 | 56155.57 |
| 2011-11-07 | 18:12:00 | 0.83 | 5548.87 | 1.27 | 55602.45 |
| 2011-11-07 | 18:16:00 | 0.69 | 5523.98 | 1.20 | 55285.09 |
| 2011-11-07 | 18:22:00 | 0.83 | 5582.24 | 1.20 | 56132.25 |
| 2011-11-07 | 18:26:00 | 0.89 | 5689.25 | 1.31 | 56794.13 |
| 2011-11-07 | 18:32:00 | 0.70 | 5624.00 | 1.33 | 56293.50 |
| 2011-11-07 | 18:36:00 | 0.66 | 5665.13 | 1.30 | 56803.66 |
| 2011-11-07 | 18:42:00 | 0.85 | 5625.67 | 1.37 | 56607.95 |
| 2011-11-07 | 18:46:00 | 0.74 | 5481.50 | 1.31 | 55201.59 |
| 2011-11-07 | 18:52:00 | 0.47 | 5425.62 | 1.27 | 54220.50 |
| 2011-11-07 | 18:56:00 | 0.75 | 5577.24 | 1.27 | 55496.04 |
| 2011-11-07 | 19:02:00 | 0.77 | 5551.67 | 1.21 | 55867.16 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 19:06:00 | 0.81 | 5655.35 | 1.24 | 56437.66 |
| 2011-11-07 | 19:12:00 | 0.74 | 5857.45 | 1.31 | 58933.87 |
| 2011-11-07 | 19:16:00 | 0.74 | 6041.95 | 1.20 | 60650.66 |
| 2011-11-07 | 19:22:00 | 0.45 | 6200.55 | 1.21 | 62525.48 |
| 2011-11-07 | 19:26:00 | 0.71 | 6287.98 | 1.31 | 63336.49 |
| 2011-11-07 | 19:32:00 | 0.84 | 6241.88 | 1.27 | 63388.25 |
| 2011-11-07 | 19:36:00 | 0.74 | 6322.61 | 1.31 | 64028.38 |
| 2011-11-07 | 19:42:00 | 0.78 | 6374.42 | 1.33 | 64685.77 |
| 2011-11-07 | 19:46:00 | 0.72 | 6390.25 | 1.27 | 64688.25 |
| 2011-11-07 | 19:52:00 | 0.50 | 6431.58 | 1.27 | 65231.92 |
| 2011-11-07 | 19:56:00 | 0.64 | 6463.12 | 1.40 | 65371.63 |
| 2011-11-07 | 20:02:00 | 0.79 | 6353.97 | 1.29 | 64328.95 |
| 2011-11-07 | 20:06:00 | 0.79 | 6289.46 | 1.24 | 63504.74 |
| 2011-11-07 | 20:12:00 | 1.12 | 6194.12 | 1.29 | 62742.38 |
| 2011-11-07 | 20:16:00 | 0.76 | 6151.35 | 1.24 | 62143.17 |
| 2011-11-07 | 20:22:00 | 0.77 | 6041.31 | 1.37 | 61272.29 |
| 2011-11-07 | 20:26:00 | 0.80 | 6066.21 | 1.38 | 61409.59 |
| 2011-11-07 | 20:32:00 | 0.44 | 6101.94 | 1.27 | 61927.32 |
| 2011-11-07 | 20:36:00 | 0.71 | 6214.58 | 1.29 | 62902.91 |
| 2011-11-07 | 20:42:00 | 0.86 | 6318.03 | 1.20 | 64084.55 |
| 2011-11-07 | 20:46:00 | 0.85 | 6414.21 | 1.16 | 64886.85 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 20:52:00 | 0.90 | 6539.64 | 1.19 | 66455.97 |
| 2011-11-07 | 20:56:00 | 0.78 | 6455.91 | 1.16 | 65756.30 |
| 2011-11-07 | 21:02:00 | 0.61 | 6468.40 | 1.27 | 65474.82 |
| 2011-11-07 | 21:06:00 | 0.87 | 6534.70 | 1.24 | 66291.67 |
| 2011-11-07 | 21:12:00 | 1.17 | 6447.66 | 1.23 | 65348.30 |
| 2011-11-07 | 21:16:00 | 0.92 | 6478.40 | 1.20 | 65731.89 |
| 2011-11-07 | 21:22:00 | 0.68 | 6445.64 | 1.23 | 65349.55 |
| 2011-11-07 | 21:26:00 | 0.66 | 6576.64 | 1.28 | 66663.00 |
| 2011-11-07 | 21:32:00 | 0.76 | 6576.10 | 1.28 | 66922.51 |
| 2011-11-07 | 21:36:00 | 0.51 | 6629.77 | 1.24 | 67135.57 |
| 2011-11-07 | 21:42:00 | 0.84 | 6588.50 | 1.20 | 67111.62 |
| 2011-11-07 | 21:46:00 | 0.68 | 6590.76 | 1.24 | 66766.26 |
| 2011-11-07 | 21:52:00 | 0.87 | 6622.25 | 1.16 | 67165.82 |
| 2011-11-07 | 21:56:00 | 0.48 | 6568.64 | 1.17 | 66639.66 |
| 2011-11-07 | 22:02:00 | 0.71 | 6588.36 | 1.14 | 66834.04 |
| 2011-11-07 | 22:06:00 | 0.76 | 6616.70 | 1.12 | 66980.80 |
| 2011-11-07 | 22:12:00 | 0.80 | 6666.70 | 1.12 | 67639.58 |
| 2011-11-07 | 22:16:00 | 0.79 | 6702.62 | 1.12 | 67945.95 |
| 2011-11-07 | 22:22:00 | 0.44 | 6658.31 | 1.12 | 67607.57 |
| 2011-11-07 | 22:26:00 | 0.88 | 6695.12 | 1.14 | 68244.98 |
| 2011-11-07 | 22:32:00 | 0.79 | 6780.82 | 1.16 | 68850.73 |

| Log_Date | Log_Time | ความดันภายในเตา (mmWC) | อัตราการใช้เชื้อเพลิง(kg/hr) | % O ₂ ในไอเสีย | อัตราการไหลของอากาศ (Nm ³ /hr) |
|------------|----------|------------------------|------------------------------|---------------------------|---|
| 2011-11-07 | 22:36:00 | 0.73 | 6695.31 | 1.12 | 68250.63 |
| 2011-11-07 | 22:42:00 | 1.14 | 7193.55 | 0.97 | 72293.42 |
| 2011-11-07 | 22:46:00 | 1.32 | 7278.81 | 0.80 | 73740.95 |
| 2011-11-07 | 22:52:00 | 1.11 | 7243.15 | 0.68 | 73006.31 |
| 2011-11-07 | 22:56:00 | 1.06 | 7172.75 | 0.61 | 72212.23 |
| 2011-11-07 | 23:02:00 | 1.17 | 7151.98 | 0.57 | 72143.23 |
| 2011-11-07 | 23:06:00 | 1.54 | 7185.55 | 0.59 | 72384.17 |
| 2011-11-07 | 23:12:00 | 0.94 | 6987.09 | 0.59 | 70423.17 |
| 2011-11-07 | 23:16:00 | 1.06 | 6893.91 | 0.64 | 69881.16 |
| 2011-11-07 | 23:22:00 | 0.71 | 6844.92 | 0.79 | 66186.00 |
| 2011-11-07 | 23:26:00 | 0.42 | 6748.60 | 0.76 | 64459.54 |
| 2011-11-07 | 23:32:00 | 0.62 | 6555.62 | 0.80 | 62798.36 |
| 2011-11-07 | 23:36:00 | 0.82 | 6457.51 | 0.69 | 62011.86 |
| 2011-11-07 | 23:42:00 | 0.84 | 6201.24 | 0.61 | 59227.68 |
| 2011-11-07 | 23:46:00 | 0.80 | 6069.10 | 0.61 | 58425.15 |
| 2011-11-07 | 23:52:00 | 0.74 | 5991.48 | 0.66 | 56855.52 |
| 2011-11-07 | 23:56:00 | 0.65 | 5804.71 | 0.72 | 55056.72 |

ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงข้อมูลของอุณหภูมิไอเสีย และอุณหภูมิของอากาศขาเข้า

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 00:02:00 | 690.60 | 797.60 | 415.50 | 481.70 | 477.20 |
| 2011-11-07 | 00:06:00 | 689.50 | 792.10 | 415.20 | 482.00 | 477.30 |
| 2011-11-07 | 00:12:00 | 687.00 | 788.30 | 414.90 | 482.00 | 477.10 |
| 2011-11-07 | 00:16:00 | 685.10 | 786.40 | 414.40 | 481.80 | 476.80 |
| 2011-11-07 | 00:22:00 | 684.00 | 774.60 | 413.90 | 481.40 | 476.40 |
| 2011-11-07 | 00:26:00 | 673.70 | 776.50 | 413.50 | 481.50 | 476.50 |
| 2011-11-07 | 00:32:00 | 670.10 | 783.50 | 413.10 | 481.60 | 476.50 |
| 2011-11-07 | 00:36:00 | 672.00 | 777.30 | 413.60 | 482.00 | 476.80 |
| 2011-11-07 | 00:42:00 | 664.50 | 786.90 | 412.90 | 482.50 | 477.30 |
| 2011-11-07 | 00:46:00 | 665.40 | 779.70 | 411.90 | 482.50 | 477.00 |
| 2011-11-07 | 00:52:00 | 667.50 | 773.90 | 411.30 | 482.40 | 477.00 |
| 2011-11-07 | 00:56:00 | 662.70 | 776.00 | 410.10 | 482.10 | 476.80 |
| 2011-11-07 | 01:02:00 | 666.30 | 765.80 | 407.90 | 481.50 | 476.00 |
| 2011-11-07 | 01:06:00 | 666.20 | 757.20 | 406.40 | 480.80 | 475.60 |
| 2011-11-07 | 01:12:00 | 663.90 | 759.90 | 403.90 | 479.30 | 474.20 |
| 2011-11-07 | 01:16:00 | 666.10 | 756.20 | 403.00 | 478.20 | 473.00 |
| 2011-11-07 | 01:22:00 | 664.80 | 760.10 | 403.40 | 476.90 | 471.60 |
| 2011-11-07 | 01:26:00 | 667.30 | 765.30 | 404.00 | 476.20 | 470.80 |
| 2011-11-07 | 01:32:00 | 671.80 | 760.20 | 406.10 | 475.80 | 470.30 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 01:36:00 | 664.60 | 769.70 | 407.20 | 475.50 | 470.10 |
| 2011-11-07 | 01:42:00 | 665.80 | 769.80 | 407.90 | 475.50 | 470.30 |
| 2011-11-07 | 01:46:00 | 668.50 | 764.10 | 408.70 | 475.60 | 470.40 |
| 2011-11-07 | 01:52:00 | 661.20 | 772.30 | 408.70 | 475.60 | 470.50 |
| 2011-11-07 | 01:56:00 | 663.20 | 765.00 | 408.70 | 475.80 | 470.50 |
| 2011-11-07 | 02:02:00 | 660.50 | 764.80 | 408.40 | 475.30 | 470.10 |
| 2011-11-07 | 02:06:00 | 662.80 | 764.40 | 407.90 | 475.20 | 470.10 |
| 2011-11-07 | 02:12:00 | 664.80 | 760.90 | 407.30 | 475.40 | 470.30 |
| 2011-11-07 | 02:16:00 | 666.90 | 766.30 | 406.90 | 475.70 | 470.80 |
| 2011-11-07 | 02:22:00 | 669.10 | 775.00 | 406.20 | 476.80 | 471.90 |
| 2011-11-07 | 02:26:00 | 676.20 | 780.50 | 405.90 | 478.20 | 473.50 |
| 2011-11-07 | 02:32:00 | 671.80 | 786.70 | 404.70 | 480.30 | 475.60 |
| 2011-11-07 | 02:36:00 | 667.00 | 784.70 | 403.50 | 481.30 | 476.60 |
| 2011-11-07 | 02:42:00 | 668.20 | 776.00 | 403.40 | 481.50 | 477.00 |
| 2011-11-07 | 02:46:00 | 667.00 | 778.50 | 403.40 | 481.50 | 476.80 |
| 2011-11-07 | 02:52:00 | 667.70 | 774.20 | 403.60 | 481.50 | 476.50 |
| 2011-11-07 | 02:56:00 | 666.20 | 767.10 | 403.60 | 481.20 | 475.90 |
| 2011-11-07 | 03:02:00 | 666.00 | 775.70 | 403.50 | 479.10 | 473.60 |
| 2011-11-07 | 03:06:00 | 667.90 | 771.60 | 404.60 | 478.40 | 472.90 |
| 2011-11-07 | 03:12:00 | 663.60 | 788.90 | 406.20 | 478.40 | 472.90 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 03:22:00 | 664.10 | 783.00 | 405.80 | 479.70 | 474.30 |
| 2011-11-07 | 03:26:00 | 662.00 | 785.80 | 405.40 | 479.60 | 474.30 |
| 2011-11-07 | 03:32:00 | 666.40 | 783.20 | 405.60 | 479.90 | 474.40 |
| 2011-11-07 | 03:36:00 | 667.00 | 779.60 | 406.00 | 479.80 | 474.20 |
| 2011-11-07 | 03:42:00 | 668.50 | 797.20 | 407.90 | 480.20 | 474.80 |
| 2011-11-07 | 03:46:00 | 666.50 | 786.40 | 408.50 | 480.80 | 475.50 |
| 2011-11-07 | 03:52:00 | 666.00 | 789.80 | 408.90 | 481.10 | 475.70 |
| 2011-11-07 | 03:56:00 | 670.20 | 788.70 | 409.60 | 481.30 | 476.00 |
| 2011-11-07 | 04:02:00 | 667.30 | 788.70 | 411.50 | 482.10 | 477.00 |
| 2011-11-07 | 04:06:00 | 666.00 | 790.30 | 411.80 | 482.50 | 476.90 |
| 2011-11-07 | 04:12:00 | 667.00 | 793.30 | 412.50 | 482.60 | 477.30 |
| 2011-11-07 | 04:16:00 | 663.70 | 791.60 | 412.70 | 483.20 | 477.80 |
| 2011-11-07 | 04:22:00 | 666.40 | 785.00 | 412.40 | 483.50 | 478.00 |
| 2011-11-07 | 04:26:00 | 667.80 | 790.00 | 412.70 | 483.60 | 478.00 |
| 2011-11-07 | 04:32:00 | 665.60 | 789.20 | 412.80 | 483.70 | 478.00 |
| 2011-11-07 | 04:36:00 | 668.10 | 782.10 | 413.00 | 483.70 | 478.00 |
| 2011-11-07 | 04:42:00 | 664.50 | 786.90 | 412.70 | 483.50 | 477.80 |
| 2011-11-07 | 04:46:00 | 667.50 | 789.50 | 412.50 | 483.60 | 478.00 |
| 2011-11-07 | 04:52:00 | 666.80 | 790.30 | 412.50 | 483.70 | 478.10 |
| 2011-11-07 | 04:56:00 | 663.20 | 791.10 | 412.30 | 483.80 | 478.10 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 05:06:00 | 667.20 | 794.40 | 412.60 | 484.30 | 478.70 |
| 2011-11-07 | 05:12:00 | 668.90 | 801.40 | 412.80 | 485.00 | 479.50 |
| 2011-11-07 | 05:16:00 | 672.50 | 797.00 | 413.10 | 485.60 | 480.30 |
| 2011-11-07 | 05:22:00 | 670.60 | 790.50 | 414.20 | 486.00 | 480.60 |
| 2011-11-07 | 05:26:00 | 670.30 | 789.20 | 413.90 | 486.10 | 480.60 |
| 2011-11-07 | 05:32:00 | 674.30 | 780.80 | 414.00 | 486.10 | 480.60 |
| 2011-11-07 | 05:36:00 | 670.30 | 779.40 | 413.60 | 486.00 | 480.50 |
| 2011-11-07 | 05:42:00 | 675.90 | 775.00 | 412.10 | 485.30 | 479.70 |
| 2011-11-07 | 05:46:00 | 676.30 | 773.20 | 411.80 | 484.80 | 479.60 |
| 2011-11-07 | 05:52:00 | 677.00 | 778.00 | 411.30 | 484.60 | 479.60 |
| 2011-11-07 | 05:56:00 | 683.70 | 773.80 | 411.50 | 484.50 | 479.40 |
| 2011-11-07 | 06:02:00 | 681.70 | 774.70 | 412.20 | 484.60 | 479.60 |
| 2011-11-07 | 06:06:00 | 675.80 | 775.40 | 411.60 | 484.40 | 479.50 |
| 2011-11-07 | 06:12:00 | 676.70 | 766.00 | 410.40 | 483.60 | 478.60 |
| 2011-11-07 | 06:16:00 | 672.20 | 767.50 | 409.40 | 483.20 | 478.30 |
| 2011-11-07 | 06:22:00 | 670.20 | 759.60 | 406.50 | 482.20 | 477.10 |
| 2011-11-07 | 06:26:00 | 667.50 | 744.90 | 404.40 | 481.10 | 476.10 |
| 2011-11-07 | 06:32:00 | 659.40 | 744.90 | 400.00 | 478.60 | 473.40 |
| 2011-11-07 | 06:36:00 | 659.90 | 739.20 | 397.90 | 476.70 | 471.40 |
| 2011-11-07 | 06:42:00 | 658.40 | 738.00 | 396.80 | 474.10 | 468.90 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 06:52:00 | 657.10 | 740.60 | 394.50 | 470.40 | 465.30 |
| 2011-11-07 | 06:56:00 | 656.50 | 741.60 | 394.50 | 469.40 | 464.40 |
| 2011-11-07 | 07:02:00 | 653.10 | 745.80 | 393.30 | 468.40 | 463.40 |
| 2011-11-07 | 07:06:00 | 655.40 | 743.50 | 393.10 | 467.90 | 463.00 |
| 2011-11-07 | 07:12:00 | 653.20 | 742.80 | 393.10 | 467.40 | 462.50 |
| 2011-11-07 | 07:16:00 | 650.40 | 740.40 | 392.40 | 467.00 | 462.20 |
| 2011-11-07 | 07:22:00 | 652.80 | 731.90 | 391.50 | 466.30 | 461.40 |
| 2011-11-07 | 07:26:00 | 653.10 | 732.70 | 391.70 | 465.70 | 460.80 |
| 2011-11-07 | 07:32:00 | 654.80 | 739.30 | 392.60 | 464.90 | 460.30 |
| 2011-11-07 | 07:36:00 | 661.50 | 740.40 | 394.90 | 464.70 | 460.30 |
| 2011-11-07 | 07:42:00 | 662.10 | 752.60 | 398.80 | 465.50 | 461.10 |
| 2011-11-07 | 07:46:00 | 661.70 | 748.20 | 399.90 | 466.30 | 462.00 |
| 2011-11-07 | 07:52:00 | 663.60 | 736.30 | 399.00 | 467.20 | 462.90 |
| 2011-11-07 | 07:56:00 | 662.30 | 741.70 | 398.80 | 467.30 | 463.10 |
| 2011-11-07 | 08:02:00 | 662.80 | 741.90 | 399.10 | 467.50 | 463.20 |
| 2011-11-07 | 08:06:00 | 664.20 | 748.50 | 399.40 | 467.30 | 462.90 |
| 2011-11-07 | 08:12:00 | 662.30 | 738.50 | 399.10 | 467.40 | 462.90 |
| 2011-11-07 | 08:16:00 | 665.20 | 742.80 | 398.70 | 466.40 | 461.80 |
| 2011-11-07 | 08:22:00 | 667.00 | 761.40 | 401.20 | 465.20 | 460.30 |
| 2011-11-07 | 08:26:00 | 670.50 | 776.10 | 403.70 | 465.60 | 460.80 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 08:36:00 | 671.10 | 781.00 | 407.60 | 470.30 | 465.80 |
| 2011-11-07 | 08:42:00 | 676.00 | 793.10 | 409.50 | 472.10 | 467.40 |
| 2011-11-07 | 08:46:00 | 675.60 | 805.50 | 409.90 | 473.80 | 469.20 |
| 2011-11-07 | 08:52:00 | 679.30 | 805.80 | 410.70 | 477.30 | 472.40 |
| 2011-11-07 | 08:56:00 | 677.80 | 805.90 | 411.70 | 479.40 | 474.60 |
| 2011-11-07 | 09:02:00 | 673.20 | 800.30 | 412.10 | 481.20 | 476.30 |
| 2011-11-07 | 09:06:00 | 671.10 | 797.90 | 412.30 | 481.70 | 476.60 |
| 2011-11-07 | 09:12:00 | 668.30 | 801.80 | 412.00 | 482.00 | 476.90 |
| 2011-11-07 | 09:16:00 | 672.50 | 796.40 | 412.00 | 482.70 | 477.50 |
| 2011-11-07 | 09:22:00 | 674.90 | 800.00 | 412.30 | 483.50 | 478.40 |
| 2011-11-07 | 09:26:00 | 673.90 | 805.50 | 412.50 | 484.00 | 478.90 |
| 2011-11-07 | 09:32:00 | 675.20 | 796.60 | 413.10 | 484.40 | 479.10 |
| 2011-11-07 | 09:36:00 | 672.90 | 801.90 | 413.50 | 484.80 | 479.60 |
| 2011-11-07 | 09:42:00 | 672.20 | 803.10 | 414.00 | 486.00 | 480.70 |
| 2011-11-07 | 09:46:00 | 671.60 | 806.00 | 414.20 | 486.30 | 481.10 |
| 2011-11-07 | 09:52:00 | 668.00 | 799.40 | 413.80 | 486.50 | 481.10 |
| 2011-11-07 | 09:56:00 | 672.10 | 794.40 | 413.50 | 486.50 | 481.20 |
| 2011-11-07 | 10:02:00 | 670.60 | 798.80 | 413.30 | 487.00 | 481.80 |
| 2011-11-07 | 10:06:00 | 673.90 | 803.10 | 413.10 | 487.40 | 482.20 |
| 2011-11-07 | 10:12:00 | 675.40 | 803.60 | 412.50 | 487.90 | 482.50 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 10:22:00 | 675.70 | 798.50 | 410.80 | 488.40 | 483.10 |
| 2011-11-07 | 10:26:00 | 675.40 | 802.40 | 410.50 | 488.40 | 483.00 |
| 2011-11-07 | 10:32:00 | 675.40 | 798.30 | 410.20 | 488.30 | 482.70 |
| 2011-11-07 | 10:36:00 | 676.70 | 777.60 | 410.50 | 486.10 | 480.30 |
| 2011-11-07 | 10:42:00 | 684.00 | 778.50 | 411.50 | 481.80 | 476.00 |
| 2011-11-07 | 10:46:00 | 691.50 | 779.70 | 411.40 | 480.00 | 474.40 |
| 2011-11-07 | 10:52:00 | 687.70 | 775.70 | 411.10 | 479.40 | 474.20 |
| 2011-11-07 | 10:56:00 | 686.00 | 775.20 | 412.30 | 480.10 | 475.20 |
| 2011-11-07 | 11:02:00 | 688.40 | 773.40 | 415.00 | 480.80 | 476.10 |
| 2011-11-07 | 11:06:00 | 689.20 | 770.40 | 416.10 | 481.10 | 476.30 |
| 2011-11-07 | 11:12:00 | 690.10 | 770.70 | 416.60 | 481.50 | 476.80 |
| 2011-11-07 | 11:16:00 | 692.00 | 767.70 | 416.40 | 481.30 | 476.80 |
| 2011-11-07 | 11:22:00 | 693.20 | 770.10 | 416.40 | 481.30 | 476.80 |
| 2011-11-07 | 11:26:00 | 690.00 | 765.10 | 416.30 | 481.20 | 476.80 |
| 2011-11-07 | 11:32:00 | 691.50 | 760.90 | 416.60 | 480.60 | 476.00 |
| 2011-11-07 | 11:36:00 | 691.80 | 765.70 | 416.80 | 480.50 | 475.90 |
| 2011-11-07 | 11:42:00 | 697.10 | 763.70 | 416.80 | 480.80 | 476.50 |
| 2011-11-07 | 11:46:00 | 699.40 | 759.60 | 417.00 | 480.80 | 476.70 |
| 2011-11-07 | 11:52:00 | 692.60 | 764.10 | 416.10 | 481.10 | 476.90 |
| 2011-11-07 | 11:56:00 | 688.90 | 761.90 | 414.60 | 481.50 | 477.40 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 12:06:00 | 682.90 | 754.20 | 408.30 | 480.70 | 476.60 |
| 2011-11-07 | 12:12:00 | 678.80 | 747.70 | 402.90 | 479.70 | 475.50 |
| 2011-11-07 | 12:16:00 | 679.00 | 739.70 | 400.50 | 478.80 | 474.50 |
| 2011-11-07 | 12:22:00 | 675.60 | 742.00 | 398.00 | 477.10 | 472.80 |
| 2011-11-07 | 12:26:00 | 678.00 | 744.80 | 397.50 | 476.10 | 471.70 |
| 2011-11-07 | 12:32:00 | 683.20 | 743.20 | 397.70 | 474.50 | 470.10 |
| 2011-11-07 | 12:36:00 | 683.20 | 754.00 | 400.40 | 472.80 | 468.20 |
| 2011-11-07 | 12:42:00 | 689.20 | 766.10 | 405.90 | 470.80 | 466.20 |
| 2011-11-07 | 12:46:00 | 693.10 | 759.70 | 409.00 | 471.60 | 467.20 |
| 2011-11-07 | 12:52:00 | 687.50 | 761.10 | 410.70 | 473.40 | 469.30 |
| 2011-11-07 | 12:56:00 | 687.90 | 762.50 | 409.40 | 474.50 | 470.50 |
| 2011-11-07 | 13:02:00 | 689.90 | 752.80 | 406.70 | 475.70 | 471.60 |
| 2011-11-07 | 13:06:00 | 685.30 | 755.70 | 404.90 | 476.10 | 472.00 |
| 2011-11-07 | 13:12:00 | 683.40 | 755.20 | 401.40 | 476.40 | 472.30 |
| 2011-11-07 | 13:16:00 | 683.30 | 749.40 | 399.70 | 476.60 | 472.50 |
| 2011-11-07 | 13:22:00 | 681.40 | 758.70 | 399.10 | 476.30 | 472.10 |
| 2011-11-07 | 13:26:00 | 686.10 | 756.20 | 400.00 | 476.00 | 471.70 |
| 2011-11-07 | 13:32:00 | 689.10 | 763.00 | 403.20 | 474.50 | 470.00 |
| 2011-11-07 | 13:36:00 | 693.40 | 766.40 | 406.20 | 473.70 | 469.10 |
| 2011-11-07 | 13:42:00 | 695.90 | 765.40 | 410.50 | 473.00 | 468.40 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 13:52:00 | 698.60 | 766.80 | 412.40 | 472.40 | 467.90 |
| 2011-11-07 | 13:56:00 | 696.60 | 773.10 | 412.00 | 472.10 | 467.70 |
| 2011-11-07 | 14:02:00 | 700.90 | 769.00 | 411.60 | 472.00 | 467.50 |
| 2011-11-07 | 14:06:00 | 699.10 | 774.70 | 411.80 | 472.00 | 467.70 |
| 2011-11-07 | 14:12:00 | 700.40 | 768.20 | 412.10 | 472.60 | 468.20 |
| 2011-11-07 | 14:16:00 | 701.00 | 772.10 | 412.50 | 472.60 | 468.30 |
| 2011-11-07 | 14:22:00 | 701.40 | 773.50 | 413.40 | 473.20 | 468.90 |
| 2011-11-07 | 14:26:00 | 703.10 | 767.80 | 414.20 | 474.30 | 470.10 |
| 2011-11-07 | 14:32:00 | 699.40 | 769.10 | 415.20 | 475.00 | 470.90 |
| 2011-11-07 | 14:36:00 | 699.10 | 768.00 | 415.40 | 475.30 | 471.20 |
| 2011-11-07 | 14:42:00 | 698.00 | 767.30 | 416.10 | 475.70 | 471.50 |
| 2011-11-07 | 14:46:00 | 696.20 | 770.20 | 416.10 | 475.90 | 471.70 |
| 2011-11-07 | 14:52:00 | 698.90 | 765.20 | 415.90 | 475.80 | 471.50 |
| 2011-11-07 | 14:56:00 | 697.50 | 766.50 | 415.50 | 475.50 | 471.10 |
| 2011-11-07 | 15:02:00 | 697.20 | 768.20 | 414.30 | 474.90 | 470.70 |
| 2011-11-07 | 15:06:00 | 698.20 | 766.00 | 414.30 | 474.80 | 470.60 |
| 2011-11-07 | 15:12:00 | 697.90 | 773.00 | 413.40 | 474.00 | 469.60 |
| 2011-11-07 | 15:16:00 | 696.80 | 768.70 | 413.20 | 474.60 | 470.30 |
| 2011-11-07 | 15:22:00 | 694.50 | 768.10 | 414.20 | 475.50 | 471.20 |
| 2011-11-07 | 15:26:00 | 692.50 | 770.40 | 414.80 | 476.00 | 471.70 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 15:36:00 | 698.30 | 779.40 | 415.30 | 477.00 | 472.70 |
| 2011-11-07 | 15:42:00 | 698.90 | 780.80 | 415.70 | 478.20 | 473.90 |
| 2011-11-07 | 15:46:00 | 699.20 | 774.80 | 416.20 | 478.80 | 474.50 |
| 2011-11-07 | 15:52:00 | 697.30 | 776.30 | 416.90 | 479.40 | 475.10 |
| 2011-11-07 | 15:56:00 | 697.60 | 777.90 | 417.00 | 479.70 | 475.40 |
| 2011-11-07 | 16:02:00 | 700.20 | 781.50 | 417.30 | 480.50 | 476.10 |
| 2011-11-07 | 16:06:00 | 699.10 | 782.20 | 417.60 | 481.40 | 477.10 |
| 2011-11-07 | 16:12:00 | 694.60 | 767.50 | 418.60 | 483.10 | 479.00 |
| 2011-11-07 | 16:16:00 | 694.10 | 764.70 | 418.20 | 483.60 | 479.40 |
| 2011-11-07 | 16:22:00 | 695.80 | 769.10 | 416.40 | 483.40 | 479.00 |
| 2011-11-07 | 16:26:00 | 698.20 | 765.10 | 415.50 | 483.20 | 478.70 |
| 2011-11-07 | 16:32:00 | 693.60 | 763.80 | 414.40 | 482.30 | 477.90 |
| 2011-11-07 | 16:36:00 | 695.30 | 766.70 | 414.00 | 481.80 | 477.30 |
| 2011-11-07 | 16:42:00 | 696.90 | 764.20 | 414.00 | 481.90 | 477.60 |
| 2011-11-07 | 16:46:00 | 698.40 | 763.30 | 414.20 | 481.90 | 477.60 |
| 2011-11-07 | 16:52:00 | 698.30 | 764.60 | 414.10 | 482.00 | 477.80 |
| 2011-11-07 | 16:56:00 | 698.60 | 761.40 | 413.80 | 482.10 | 477.80 |
| 2011-11-07 | 17:02:00 | 699.00 | 758.80 | 413.80 | 481.70 | 477.40 |
| 2011-11-07 | 17:06:00 | 698.00 | 760.80 | 413.80 | 481.70 | 477.50 |
| 2011-11-07 | 17:12:00 | 702.10 | 758.80 | 413.10 | 481.60 | 477.60 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 17:22:00 | 696.30 | 757.20 | 411.90 | 482.10 | 478.20 |
| 2011-11-07 | 17:26:00 | 698.20 | 753.40 | 409.10 | 482.20 | 478.20 |
| 2011-11-07 | 17:32:00 | 695.50 | 741.40 | 405.60 | 481.50 | 477.60 |
| 2011-11-07 | 17:36:00 | 688.80 | 741.50 | 403.50 | 480.90 | 476.90 |
| 2011-11-07 | 17:42:00 | 680.60 | 734.60 | 399.40 | 479.50 | 475.40 |
| 2011-11-07 | 17:46:00 | 678.40 | 726.30 | 397.50 | 478.10 | 473.70 |
| 2011-11-07 | 17:52:00 | 671.90 | 726.30 | 394.70 | 475.50 | 471.20 |
| 2011-11-07 | 17:56:00 | 670.00 | 723.80 | 393.40 | 474.10 | 469.70 |
| 2011-11-07 | 18:02:00 | 670.90 | 716.60 | 392.00 | 471.90 | 467.50 |
| 2011-11-07 | 18:06:00 | 668.10 | 722.40 | 391.70 | 470.50 | 466.10 |
| 2011-11-07 | 18:12:00 | 669.80 | 725.20 | 391.60 | 468.90 | 464.60 |
| 2011-11-07 | 18:16:00 | 670.40 | 720.00 | 391.60 | 468.20 | 464.00 |
| 2011-11-07 | 18:22:00 | 667.30 | 723.80 | 390.70 | 467.00 | 462.80 |
| 2011-11-07 | 18:26:00 | 667.40 | 724.70 | 390.50 | 466.40 | 462.10 |
| 2011-11-07 | 18:32:00 | 668.70 | 719.60 | 390.50 | 465.30 | 461.10 |
| 2011-11-07 | 18:36:00 | 665.20 | 724.20 | 390.10 | 464.60 | 460.60 |
| 2011-11-07 | 18:42:00 | 666.50 | 725.20 | 390.30 | 464.40 | 460.30 |
| 2011-11-07 | 18:46:00 | 665.80 | 718.50 | 390.90 | 464.30 | 460.10 |
| 2011-11-07 | 18:52:00 | 662.00 | 720.10 | 389.30 | 463.70 | 459.60 |
| 2011-11-07 | 18:56:00 | 663.90 | 720.80 | 387.20 | 463.20 | 459.10 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 19:06:00 | 668.00 | 721.70 | 388.00 | 462.20 | 458.20 |
| 2011-11-07 | 19:12:00 | 674.70 | 727.60 | 390.50 | 462.70 | 458.70 |
| 2011-11-07 | 19:16:00 | 679.60 | 730.60 | 392.90 | 462.90 | 459.00 |
| 2011-11-07 | 19:22:00 | 678.10 | 744.20 | 396.00 | 463.70 | 459.90 |
| 2011-11-07 | 19:26:00 | 681.30 | 747.30 | 397.80 | 464.60 | 460.80 |
| 2011-11-07 | 19:32:00 | 684.60 | 743.10 | 401.00 | 465.70 | 462.00 |
| 2011-11-07 | 19:36:00 | 682.20 | 749.40 | 402.80 | 467.00 | 463.30 |
| 2011-11-07 | 19:42:00 | 686.60 | 752.40 | 404.00 | 468.40 | 464.60 |
| 2011-11-07 | 19:46:00 | 691.10 | 747.80 | 405.10 | 469.10 | 465.30 |
| 2011-11-07 | 19:52:00 | 689.50 | 755.70 | 406.90 | 470.10 | 466.30 |
| 2011-11-07 | 19:56:00 | 691.20 | 757.40 | 407.80 | 471.20 | 467.40 |
| 2011-11-07 | 20:02:00 | 694.10 | 752.80 | 408.60 | 472.00 | 468.30 |
| 2011-11-07 | 20:06:00 | 692.20 | 756.10 | 408.70 | 472.70 | 469.00 |
| 2011-11-07 | 20:12:00 | 693.40 | 756.10 | 408.40 | 474.20 | 470.40 |
| 2011-11-07 | 20:16:00 | 693.60 | 751.00 | 408.20 | 475.00 | 471.10 |
| 2011-11-07 | 20:22:00 | 694.80 | 754.50 | 409.30 | 476.30 | 472.70 |
| 2011-11-07 | 20:26:00 | 693.70 | 752.00 | 408.60 | 476.60 | 472.70 |
| 2011-11-07 | 20:32:00 | 691.50 | 748.40 | 407.40 | 476.40 | 472.50 |
| 2011-11-07 | 20:36:00 | 689.70 | 749.00 | 407.00 | 476.00 | 472.00 |
| 2011-11-07 | 20:42:00 | 693.10 | 743.40 | 408.10 | 475.00 | 470.90 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 20:52:00 | 696.00 | 749.10 | 409.80 | 474.10 | 470.00 |
| 2011-11-07 | 20:56:00 | 695.20 | 749.70 | 410.40 | 473.80 | 469.80 |
| 2011-11-07 | 21:02:00 | 692.60 | 753.50 | 411.30 | 474.30 | 470.30 |
| 2011-11-07 | 21:06:00 | 696.80 | 752.60 | 411.60 | 474.70 | 470.50 |
| 2011-11-07 | 21:12:00 | 695.30 | 754.30 | 412.10 | 475.00 | 471.00 |
| 2011-11-07 | 21:16:00 | 694.00 | 753.90 | 412.00 | 475.30 | 471.20 |
| 2011-11-07 | 21:22:00 | 692.00 | 749.70 | 412.90 | 475.40 | 471.20 |
| 2011-11-07 | 21:26:00 | 688.90 | 751.90 | 413.80 | 475.40 | 471.20 |
| 2011-11-07 | 21:32:00 | 691.90 | 750.50 | 414.10 | 475.00 | 470.70 |
| 2011-11-07 | 21:36:00 | 691.60 | 752.50 | 414.20 | 474.50 | 470.30 |
| 2011-11-07 | 21:42:00 | 692.50 | 754.40 | 414.50 | 474.80 | 470.50 |
| 2011-11-07 | 21:46:00 | 693.40 | 750.80 | 415.10 | 475.00 | 470.80 |
| 2011-11-07 | 21:52:00 | 690.60 | 754.10 | 414.80 | 475.10 | 471.00 |
| 2011-11-07 | 21:56:00 | 691.90 | 753.70 | 414.40 | 475.00 | 470.80 |
| 2011-11-07 | 22:02:00 | 689.90 | 752.20 | 413.50 | 474.50 | 470.20 |
| 2011-11-07 | 22:06:00 | 686.70 | 753.40 | 413.50 | 474.30 | 470.00 |
| 2011-11-07 | 22:12:00 | 692.20 | 751.50 | 414.00 | 474.30 | 469.90 |
| 2011-11-07 | 22:16:00 | 692.40 | 755.70 | 414.50 | 474.10 | 469.90 |
| 2011-11-07 | 22:22:00 | 694.00 | 757.10 | 414.90 | 474.20 | 470.10 |
| 2011-11-07 | 22:26:00 | 694.10 | 754.10 | 415.40 | 474.80 | 470.60 |

| Log_Date | Log_Time | อุณหภูมิไอเสียไป recup (°C) | | อุณหภูมิไอเสียไปยังปล่อง(°C) | อุณหภูมิอากาศ Preheat (°C) | |
|------------|----------|-----------------------------|--------|------------------------------|----------------------------|--------|
| 2011-11-07 | 22:36:00 | 695.80 | 757.60 | 416.90 | 475.30 | 471.20 |
| 2011-11-07 | 22:42:00 | 699.10 | 772.70 | 416.90 | 475.20 | 470.80 |
| 2011-11-07 | 22:46:00 | 702.40 | 790.30 | 416.30 | 475.30 | 470.80 |
| 2011-11-07 | 22:52:00 | 706.50 | 808.40 | 415.90 | 477.00 | 472.70 |
| 2011-11-07 | 22:56:00 | 706.90 | 805.80 | 416.00 | 479.00 | 474.80 |
| 2011-11-07 | 23:02:00 | 704.80 | 806.90 | 416.00 | 480.80 | 476.50 |
| 2011-11-07 | 23:06:00 | 706.20 | 804.60 | 416.10 | 481.40 | 476.90 |
| 2011-11-07 | 23:12:00 | 702.90 | 798.10 | 416.00 | 482.20 | 477.60 |
| 2011-11-07 | 23:16:00 | 700.40 | 791.40 | 415.90 | 482.60 | 477.90 |
| 2011-11-07 | 23:22:00 | 701.50 | 790.80 | 416.40 | 482.70 | 477.90 |
| 2011-11-07 | 23:26:00 | 693.60 | 794.20 | 417.40 | 484.70 | 480.30 |
| 2011-11-07 | 23:32:00 | 693.70 | 787.00 | 417.70 | 487.40 | 483.10 |
| 2011-11-07 | 23:36:00 | 696.30 | 780.80 | 416.40 | 488.20 | 483.90 |
| 2011-11-07 | 23:42:00 | 687.80 | 781.50 | 413.30 | 488.40 | 484.00 |
| 2011-11-07 | 23:46:00 | 683.00 | 774.80 | 410.80 | 488.40 | 483.90 |
| 2011-11-07 | 23:52:00 | 682.20 | 761.70 | 407.20 | 487.30 | 482.60 |
| 2011-11-07 | 23:56:00 | 677.50 | 762.20 | 404.20 | 485.90 | 481.20 |

ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณสมดุลมวลของเตาเผาเหล็ก

ตารางแสดงสมดุลมวลของเตาเผาเหล็ก

| มวลไหลเข้า | มวลไหลออก |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 1. อัตราการไหลของเชื้อเพลิง | 4. อัตราการไหลของไอเสียออก |
| 2. อัตราการไหลของอากาศ | |
| 3. อัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้า | |

1. อัตราการไหลของเชื้อเพลิง

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = 1.815 \text{ kg/s}$$

2. อัตราการไหลของอากาศ

อัตราการไหลของอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของเชื้อเพลิง ตามอัตราส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงทางทฤษฎีและค่าอากาศส่วนเกินที่วัดออกมาจากเครื่องตรวจวิเคราะห์ไอเสียและนำไปคำนวณหาค่าอากาศส่วนเกินออกมา

$$\frac{\%O_2}{100} = \frac{(\lambda - 1)n_{\text{stoic}}}{0.3836 + 0.0033 + (\lambda - 1)n_{\text{stoic}} + 3.76n_{\text{stoic}}}$$

$$\dot{m}_{\text{air}} = 1.0534 \times AF \times \dot{m}_{\text{fuel}}$$

เมื่อ $n_{\text{stoic}} = 0.5402$ และ $\%O_2 = 0.9883$ จะได้ λ ออกมาเท่ากับ 1.0534 อัตราการไหลของอากาศจะเป็น

$$\dot{m}_{\text{air}} = 1.0534 \times 12.82 \times 1.815 = 24.49 \text{ kg/s}$$

3. อัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

อัตราการไหลของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตานั้นจะเกิดเมื่อความดันภายในเตามีค่าน้อยกว่าค่าความดันของอากาศภายนอก ซึ่งจะทำให้อากาศภายนอกไหลเข้าสู่ภายในเตาตามรอยรั่วของเตาและประตูทางเข้าทางออกของเหล็กที่เข้ามาสู่เตาซึ่งสามารถคำนวณได้จากปริมาณ O_2 ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่เนื่องจาก

ปริมาณ O_2 ที่ทำการวัดนั้นวัดจากไอเสียอยู่แล้ว อัตราการไหลของอากาศในส่วนนี้จึงถูกคำนวณไปพร้อมกับไอเสีย

4. อัตราการไหลของไอเสียไปยัง recuperator

$$\dot{m}_{\text{flue}} = \dot{m}_{\text{fuel}} + \dot{m}_{\text{air}} = 26.305$$

การคำนวณสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

ตารางแสดงสมดุลความร้อนของเตาเผาเหล็ก

| พลังงานความร้อนขาเข้า | พลังงานความร้อนขาออก |
|--------------------------------------|---|
| 1. ความร้อนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ | 6. ความร้อนสัมผัสที่เข้าสู่เหล็ก |
| 2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า | 7. ความร้อนสัมผัสของไอเสียไปยัง recuperator |
| 3. ความร้อนของการ preheat อากาศ | 8. ความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกล |
| 4. ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล | 9. ความร้อนสูญเสียผ่านการแผ่รังสี |
| 5. ความร้อนสัมผัสของอากาศที่รั่วเข้า | 10. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา |
| | 11. ความร้อนสูญเสียของไอเสียที่รั่วออก |
| | 12. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ |

1. ความร้อนของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้

$$\dot{Q}_{\text{comb}} = \text{LHV} \times \dot{m}_{\text{fuel}}$$

จากข้อมูลที่ได้ LHV ของน้ำมันเตามีค่าเท่ากับ 43069.63 kJ/kg และ อัตราการไหลของน้ำมันเตาจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลดิบมีค่าเท่ากับ 1.815 kg/s หรือ

$$\dot{Q}_{\text{comb}} = 43069.63 \times 1.815 = 78203.67 \text{ kW}$$

2. ความร้อนสัมผัสของเชื้อเพลิงขาเข้า

$$\dot{Q}_{\text{fuel, sen}} = \dot{m}_{\text{fuel}} c_{\text{fuel}} (T_{\text{fuel}} - T_0)$$

จากข้อมูลที่ได้ ความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ 1.924 kJ/kg-K และ อุณหภูมิของเชื้อเพลิงขาเข้าอยู่ที่ 120°C

$$\dot{Q}_{\text{fuel, sen}} = 1.815 \times 1.924 \times (120 - 30) = 314.42 \text{ kW}$$

3. ความร้อนของการ preheat อากาศที่ recuperator

$$\dot{Q}_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{air}} c_{\text{air}} (T_{\text{air,preheat}} - T_0)$$

จากข้อมูลที่ได้อุณหภูมิของอากาศขาเข้าอยู่ที่ 475.07°C ทำให้ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศขาเข้าเป็น 1.087 kJ/kg-K และอัตราการไหลของอากาศขาเข้าอยู่ที่ 24.49 kg/s

$$\dot{Q}_{\text{air}} = 24.49 \times 1.087 \times (475.07 - 30) = 11977.01 \text{ kW}$$

4. ความร้อนจากการก่อตัวของสเกล

$$\dot{Q}_{\text{scale}} = \dot{m}_{\text{slab}} \left(\frac{\% \text{scale}}{100} \right) \text{HV}_{\text{scale}}$$

จากข้อมูลที่ได้อัตราการการผลิตของ slab อยู่ที่ 55.61 kg/s มี % การเกิดของสเกลอยู่ที่ 0.016% ค่าความร้อนจากการก่อตัวของสเกลอยู่ที่ $5161 \text{ kJ/kg}_{\text{scale}}$

$$\dot{Q}_{\text{scale}} = 55.61 \times (0.016) \times 5161 = 4592.20 \text{ kW}$$

5. ความร้อนของอากาศที่รั่วเข้าสู่เตาเผา

$$\dot{Q}_{\text{air,leak}} = \dot{m}_{\text{air,leak}} c_{\text{air}} (T_{\text{amb}} - T_0)$$

จากข้อมูลที่ได้อาจจะถือว่าไม่มีอากาศรั่วออกจากเตาเผาเหล็ก

$$\dot{Q}_{\text{air,leak}} = 0 \text{ kW}$$

6. ความร้อนสัมผัสเข้าสู่เหล็ก

$$\dot{Q}_{\text{billet, sen}} = \dot{m}_{\text{slab}} c_{\text{slab}} (T_{\text{slab,out}} - T_{\text{slab,in}})$$

จากข้อมูลที่ได้อัตราการการผลิตของ slab อยู่ที่ 55.61 kg/s ความจุความร้อนจำเพาะของ slab อยู่ที่ 0.78 kJ/kg-K อุณหภูมิขาออกของ slab อยู่ที่ 1289.73°C และอุณหภูมิขาเข้าอยู่ที่ 30°C

$$\dot{Q}_{\text{billet, sen}} = 55.61 \times 0.78 \times (1289.73 - 30) = 54643.51 \text{ kW}$$

7. ความร้อนสัมผัสของไอเสียไปยัง recuperator

$$\dot{Q}_{\text{flue, furnace}} = \dot{m}_{\text{flue}} c_{\text{flue}} (T_{\text{flue, furnace}} - T_0)$$

จากข้อมูลที่ได้ อัตราการไหลของไอเสียอยู่ที่ 26.305 kg/s มีอุณหภูมิอยู่ที่ 723.44°C ทำให้ความจุความร้อนจำเพาะมีค่าเท่ากับ 1.249 kJ/kg-K

$$\dot{Q}_{\text{flue, furnace}} = 26.305 \times 1.249 \times (723.44 - 25) = 22953.22 \text{ kW}$$

8. ความร้อนสัมผัสเข้าสู่สเกล

$$\dot{Q}_{\text{scale, sen}} = \dot{m}_{\text{slab}} \left(\frac{\% \text{scale}}{100} \right) c_{\text{scale}} (T_{\text{scale, out}} - T_{\text{scale, in}})$$

จากข้อมูลที่ได้ อัตราการการผลิตของ slab อยู่ที่ 55.61 kg/s ความจุความร้อนจำเพาะของสเกลอยู่ที่ 0.90 kJ/kg-K โดยที่อุณหภูมิขาเข้าและออกของสเกลจะให้มีค่าเท่ากับของ slab

$$\dot{Q}_{\text{scale, sen}} = 55.61 \times (0.016) \times 0.90 \times (1289.73 - 30) = 1008.80 \text{ kW}$$

9. ความร้อนสูญเสียผ่านผนังเตา

$$\dot{Q}_{\text{wall}} = hA_{\text{wall}} (T_{\text{wall}} - T_{\text{amb}}) + \varepsilon \sigma A_{\text{wall}} (T_{\text{wall}}^4 - T_{\text{amb}}^4)$$

จากข้อมูลที่ได้ ผนังเตาจะมีหลายด้านและอุณหภูมิแตกต่างกันสามารถเขียนเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางแสดงข้อมูลอุณหภูมิและพื้นที่ของส่วนต่างๆ ของเตาเผาเหล็ก

| Preheating Zone | | | Heating Zone | | | Soaking Zone | | | Unfire Zone | | |
|-----------------|---------------------------|---------------|--------------|---------------------------|---------------|--------------|---------------------------|---------------|-------------|---------------------------|---------------|
| ส่วน | พื้นที่ (m ²) | อุณหภูมิ (°C) | ส่วน | พื้นที่ (m ²) | อุณหภูมิ (°C) | ส่วน | พื้นที่ (m ²) | อุณหภูมิ (°C) | ส่วน | พื้นที่ (m ²) | อุณหภูมิ (°C) |
| Roof | 62.8 | 83.31 | Roof | 137.6 | 113.51 | Roof | 120.9 | 115.84 | Roof | 142.1 | - |
| Side | 151.2 | 103.35 | Side | 173.2 | 109.89 | Side | 124.1 | 112.87 | Side | 103.7 | 77.74 |
| Heart | 96.5 | 98.85 | Heart | 152.8 | 122.18 | Heart | 130.7 | 113.34 | Heart | 124.1 | 81.62 |

ซึ่งเมื่อกำหนดด้วย สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ $5.2 \text{ W/m}^2\text{-K}$ จะได้

$$\dot{Q}_{\text{wall}} = 3267.96 \text{ kW}$$

10. ความร้อนสูญเสียผ่านน้ำหล่อเย็น

$$\dot{Q}_{\text{water}} = \dot{m}_{\text{water}} c_{\text{water}} (T_{\text{water,out}} - T_{\text{water,in}})$$

จากข้อมูลที่ได้ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นอยู่ที่ 1100 litre/s หรือ 1095.6 kg/s มีอุณหภูมิของน้ำไหลเข้าและออกอยู่ที่ 33.2°C และ 39.8°C ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำอยู่ที่ 4.18 kJ/kg-K

$$\dot{Q}_{\text{water}} = 1095.6 \times 4.18 \times (39.8 - 33.2) = 8395.95 \text{ kW}$$

11. ความร้อนสูญเสียของไอเสียที่รั่วออกจากเตา

$$\dot{Q}_{\text{flue,leak}} = \dot{m}_{\text{flue,leak}} c_{\text{flue,leak}} (T_{\text{flue,leak}} - T_0)$$

จากข้อมูลที่ได้จะถือว่าไม่มีไอเสียรั่วออกจากเตาเผาเหล็ก

$$\dot{Q}_{\text{flue,leak}} = 0 \text{ kW}$$

12. ความร้อนสูญเสียในส่วนอื่นๆ

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{other}} = & \dot{Q}_{\text{comb}} + \dot{Q}_{\text{fuel,sen}} + \dot{Q}_{\text{air}} + \dot{Q}_{\text{scale}} + \dot{Q}_{\text{air,leak}} - \dot{Q}_{\text{billet,sen}} - \dot{Q}_{\text{flue,furnace}} - \dot{Q}_{\text{scale,sen}} \\ & - \dot{Q}_{\text{wall}} - \dot{Q}_{\text{water}} - \dot{Q}_{\text{flue,leak}} = 4817.86 \text{ kW} \end{aligned}$$

การคำนวณสมดุลความร้อนของ recuperator

ตารางแสดงสมดุลความร้อนของ recuperator

| พลังงานความร้อนขาเข้า | พลังงานความร้อนขาออก |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลเข้า | 3. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลออก |
| 2. ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลเข้า | 4. ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลออก |
| | 5. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ |

1. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลเข้า

ความร้อนจากไอเสียที่ไหลเข้านี้มีค่าเท่ากับความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไปสู่ recuperator

$$\dot{Q}_{\text{flue, furnace}} = 22953.22 \text{ kW}$$

2. ความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลเข้า

$$\dot{Q}_{\text{air, inlet}} = \dot{m}_{\text{air, inlet}} c_{\text{air, inlet}} (T_{\text{amb}} - T_0)$$

จากข้อมูลที่ได้ อัตราการไหลของอากาศขาเข้าอยู่ที่ 24.49 kg/s มีอุณหภูมิของอากาศขาเข้าอยู่ที่ 30°C ทำให้ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศอยู่ที่ 1.007 kJ/kg-K

$$\dot{Q}_{\text{air, inlet}} = 24.49 \times 1.007 \times (30 - 25) = 11727.06 \text{ kW}$$

3. ความร้อนสัมผัสจากไอเสียที่ไหลออก

$$\dot{Q}_{\text{flue, recup}} = \dot{m}_{\text{flue, recup}} c_{\text{flue, recup}} (T_{\text{flue, recup}} - T_0)$$

จากข้อมูลที่ได้ อัตราการไหลของไอเสียอยู่ที่ 26.305 kg/s มีอุณหภูมิขาออกของไอเสียจาก recuperator อยู่ที่ 408.37°C ทำให้ความจุความร้อนจำเพาะของไอเสียเป็น 1.163 kJ/kg-K

$$\dot{Q}_{\text{flue, recup}} = 26.305 \times 1.163 \times (408.37 - 25) = 11977.01 \text{ kW}$$

4. ค่าความร้อนสัมผัสจากอากาศที่ไหลออก

ความร้อนจากอากาศที่ไหลออกจาก recuperator เป็นความร้อนสัมผัสของอากาศที่ทำการ preheat เรียบร้อยแล้ว จะมีค่าเท่ากับความร้อนของการ preheat อากาศที่ recuperator

$$\dot{Q}_{\text{air,preheat}} = 11977.01 \text{ kW}$$

5. ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

$$\dot{Q}_{\text{other,recup}} = \dot{Q}_{\text{flue,furnace}} + \dot{Q}_{\text{air,inlet}} - \dot{Q}_{\text{flue,recup}} - \dot{Q}_{\text{air,preheat}} = -627.53 \text{ kW}$$

ภาคผนวก ค. ตัวอย่างโปรแกรม

โปรแกรมสำหรับคำนวณ slab แบบ 1 ชั่วโมง

```

dt = 1;
dx = 0.01;
a = 17.7E-6;
A = 5;
Q = 50.45;
t = 2700;
D = 4*(9.24*0.25)/2/(9.24+0.25);
k = 60.5;
Tinf = 408.37+273.15;
L = 1.26*9;
Vin = Q/A;
rho = 0.5215;
rhoslab = 7869.53;
Cslab = 434;
Vslab = 0.125*0.01*9.24;
mass = Q*rho/2;
for i = 1:1134
    Tslab(1,i) = 30+273.15;
end
for p = 1:2700/dt
    Tflue(p,1) = Tinf;
    j = 1;
    for i = 0.01:dx:L
        mu = viscos(Tflue(p,j));
        Pr = Pran(Tflue(p,j));
        kflue = kf(Tflue(p,j));
    end
end

```



```

cflue = 1000*Cap(Tflue(p,j));
As = 9.24*0.01;
Re = rho*Vin*D/mu;
fric = 0.020964608739258141109929823507598;
%   fric = solve(2*log10(0.64*Re*f^0.5)-0.8-(1/f^0.5));
Nu = ((fric/8)*(Re-1000)*Pr)/(1+12.7*(fric/8)^0.5*(Pr^(2/3)-1));
h = Nu*kflue/D;
Bi = h*(Vslab/As)/k;
Q = h*As*(Tflue(p,j) - Tslab(p,j));
Tflue(p,j+1) = -Q/mass/cflue + Tflue(p,j);
Tslab(p+1,j) = Q*dt/(rhoslab*Vslab*Cslab)+Tslab(p,j);
j = j+1;
end
end
slab = 9;
for p = 1:slab;
    Tslabsum(p) = 0;
    for q = (126*(p-1)+1):126*p
        Tslabsum(p) = Tslabsum(p)+Tslab(2701,q);
    end
    Tslabav(p) = Tslabsum(p)/126;
end

subplot(2,1,1)
hold on
plot(Tslab(2,:)-273.15,'g');
plot(Tslab(900/dt+1,:)-273.15,'r');
plot(Tslab(1800/dt+1,:)-273.15);

```

```
plot(Tslab(2700/dt+1,:)-273.15,'k');
axis([0 9*126 25 75]);
grid on
set(gca,'XTick',0:126:126*9);
set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9'})
ylabel('Slab Temp (degree celcius)');
xlabel('Slab number');
legend('t = 1 sec','t = 900 sec','t = 1800 sec','t = 2700 sec')
title(['time interval = ',int2str(dt),' sec'])

subplot(2,1,2)
hold on
plot(Tflue(1,:)-273.15,'g');
plot(Tflue(900/dt,:)-273.15,'r');
plot(Tflue(1800/dt,:)-273.15);
plot(Tflue(2700/dt,:)-273.15,'k');
axis([0 9*126 360 410]);
grid on
set(gca,'XTick',0:126:126*9);
set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9'})
ylabel('Flue Temp (degree celcius)');
xlabel('Slab number');
legend('t = 1 sec','t = 900 sec','t = 1800 sec','t = 2700 sec')
```

โปรแกรมสำหรับคำนวณ slab แบบ 2 ชั้น โมง

```

dt = 1;
dx = 0.01;
a = 17.7E-6;
A = 5;
Q = 50.45;
t = 5400;
D = 4*(9.24*0.25)/2/(9.24+0.25);
k = 60.5;
Tinf = 408.37+273.15;
L = 1.26*18;
Vin = Q/A;
rho = 0.5215;
rhoslab = 7869.53;
Cslab = 434;
Vslab = 0.125*0.01*9.24;
mass = Q*rho/2;
for i = 1:2268
    Tslab(1,i) = 30+273.15;
end
for p = 1:5400/dt
    Tflue(p,1) = Tinf;
    j = 1;
    for i = 0.01:dx:L
        mu = viscos(Tflue(p,j));
        Pr = Pran(Tflue(p,j));
        kflue = kf(Tflue(p,j));
    end
end

```

```

cflue = 1000*Cap(Tflue(p,j));
As = 9.24*0.01;
Re = rho*Vin*D/mu;
fric = 0.020964608739258141109929823507598;
%   fric = solve(2*log10(0.64*Re*f^0.5)-0.8-(1/f^0.5));
Nu = ((fric/8)*(Re-1000)*Pr)/(1+12.7*(fric/8)^0.5*(Pr^(2/3)-1));
h = Nu*kflue/D;
Bi = h*(Vslab/As)/k;
Q = h*As*(Tflue(p,j) - Tslab(p,j));
Tflue(p,j+1) = -Q/mass/cflue + Tflue(p,j);
Tslab(p+1,j) = Q*dt/(rhoslab*Vslab*Cslab)+Tslab(p,j);
j = j+1;
end
end
slab = 18;
for p = 1:slab;
    Tslabsum(p) = 0;
    for q = (126*(p-1)+1):126*p
        Tslabsum(p) = Tslabsum(p)+Tslab(5401,q);
    end
    Tslabav(p) = Tslabsum(p)/126;
end
for p = 1:slab;
    Tfluesum(p) = 0;
    for q = (126*(p-1)+1):126*p
        Tfluesum(p) = Tfluesum(p)+Tflue(5400,q);
    end
    Tflueav(p) = Tslabsum(p)/126;

```

```

end

subplot(2,1,1)

hold on

plot(Tslab(2,:)-273.15,'g');
plot(Tslab(1800/dt+1,:)-273.15,'r');
plot(Tslab(3600/dt+1,:)-273.15);
plot(Tslab(5400/dt+1,:)-273.15,'k');
axis([0 18*126 25 110]);

grid on

set(gca,'XTick',0:126:126*18);
set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17','18'})
ylabel('Slab Temp (degree celcius)');
xlabel('Slab number');

legend('t = 1 sec','t = 1800 sec','t = 3600 sec','t = 5400 sec')

title(['time interval = ',int2str(dt),' sec'])

subplot(2,1,2)

hold on

plot(Tflue(1,:)-273.15,'g');
plot(Tflue(1800/dt,:)-273.15,'r');
plot(Tflue(3600/dt,:)-273.15);
plot(Tflue(5400/dt,:)-273.15,'k');
axis([0 18*126 320 410]);

grid on

set(gca,'XTick',0:126:126*18);
set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17','18'})
ylabel('Flue Temp (degree celcius)');
xlabel('Slab number');

legend('t = 1 sec','t = 1800 sec','t = 3600 sec','t = 5400 sec')

```

โปรแกรมสำหรับคำนวณ slab แบบ 3 ชั่วโมง

```

dt = 1;
dx = 0.01;
a = 17.7E-6;
A = 5;
Q = 50.45;
t = 8100;
D = 4*(9.24*0.25)/2/(9.24+0.25);
k = 60.5;
Tinf = 408.37+273.15;
L = 1.26*27;
Vin = Q/A;
rho = 0.5215;
rhoslab = 7869.53;
Cslab = 434;
Vslab = 0.125*0.01*9.24;
mass = Q*rho/2;
for i = 1:126*27
    Tslab(1,i) = 30+273.15;
end
for p = 1:8100/dt
    Tflue(p,1) = Tinf;
    j = 1;
    for i = 0.01:dx:L
        mu = viscos(Tflue(p,j));
        Pr = Pran(Tflue(p,j));
    end
end

```

```

kflue = kf(Tflue(p,j));
cflue = 1000*Cap(Tflue(p,j));
As = 9.24*0.01;
Re = rho*Vin*D/mu;
fric = 0.020964608739258141109929823507598;
%   fric = solve(2*log10(0.64*Re*f^0.5)-0.8-(1/f^0.5));
Nu = ((fric/8)*(Re-1000)*Pr)/(1+12.7*(fric/8)^0.5*(Pr^(2/3)-1));
h = Nu*kflue/D;
Bi = h*(Vslab/As)/k;
Q = h*As*(Tflue(p,j) - Tslab(p,j));
Tflue(p,j+1) = -Q/mass/cflue + Tflue(p,j);
Tslab(p+1,j) = Q*dt/(rhoslab*Vslab*Cslab)+Tslab(p,j);
j = j+1;
end
end
slab = 27;
for p = 1:slab;
    Tslabsum(p) = 0;
    for q = (126*(p-1)+1):126*p
        Tslabsum(p) = Tslabsum(p)+Tslab(8101,q);
    end
    Tslabav(p) = Tslabsum(p)/126;
end
subplot(2,1,1)
hold on
plot(Tslab(2,:)-273.15,'g');
plot(Tslab(2700/dt+1,:)-273.15,'r');
plot(Tslab(5400/dt+1,:)-273.15);

```

```

plot(Tslab(8100/dt+1,:)-273.15,'k');
axis([0 27*126 25 150]);
grid on
set(gca,'XTick',0:126:126*27);
set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17','18','19','20',
'21','22','23','24','25','26','27'})
ylabel('Slab Temp (degree celcius)');
xlabel('Slab number');
legend('t = 1 sec','t = 2700 sec','t = 5400 sec','t = 8100 sec')
title(['time interval = ',int2str(dt),' sec'])

subplot(2,1,2)
hold on
plot(Tflue(1,:)-273.15,'g');
plot(Tflue(2700/dt,:)-273.15,'r');
plot(Tflue(5400/dt,:)-273.15);
plot(Tflue(8100/dt,:)-273.15,'k');
axis([0 27*126 250 410]);
grid on
set(gca,'XTick',0:126:126*27);
set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17','18','19','20',
'21','22','23','24','25','26','27'})
ylabel('Flue Temp (degree celcius)');
xlabel('Slab number');
legend('t = 1 sec','t = 2700 sec','t = 5400 sec','t = 8100 sec')

```


โปรแกรมสำหรับคำนวณ slab แบบ 4 ชั่วโมง

```

dt = 1;
dx = 0.01;
a = 17.7E-6;
A = 5;
Q = 50.45;
t = 10800;
D = 4*(9.24*0.25)/2/(9.24+0.25);
k = 60.5;
Tinf = 408.37+273.15;
L = 1.26*36;
Vin = Q/A;
rho = 0.5215;
rhoslab = 7869.53;
Cslab = 434;
Vslab = 0.125*0.01*9.24;
mass = Q*rho/2;
for i = 1:36*126
    Tslab(1,i) = 30+273.15;
end
for p = 1:10800/dt
    Tflue(p,1) = Tinf;
    j = 1;
    for i = 0.01:dx:L
        mu = viscos(Tflue(p,j));
        Pr = Pran(Tflue(p,j));
        kflue = kf(Tflue(p,j));
    end
end

```

```

cflue = 1000*Cap(Tflue(p,j));
As = 9.24*0.01;
Re = rho*Vin*D/mu;
fric = 0.020964608739258141109929823507598;
%   fric = solve(2*log10(0.64*Re*f^0.5)-0.8-(1/f^0.5));
Nu = ((fric/8)*(Re-1000)*Pr)/(1+12.7*(fric/8)^0.5*(Pr^(2/3)-1));
h = Nu*kflue/D;
Bi = h*(Vslab/As)/k;
Q = h*As*(Tflue(p,j) - Tslab(p,j));
Tflue(p,j+1) = -Q/mass/cflue + Tflue(p,j);
Tslab(p+1,j) = Q*dt/(rhoslab*Vslab*Cslab)+Tslab(p,j);
j = j+1;
end
end
slab = 36;
for p = 1:slab;
    Tslabsum(p) = 0;
    for q = (126*(p-1)+1):126*p
        Tslabsum(p) = Tslabsum(p)+Tslab(10800,q);
    end
    Tslabav(p) = Tslabsum(p)/126;
end
subplot(2,1,1)
hold on
plot(Tslab(2,:)-273.15,'g');
plot(Tslab(3600/dt+1,:)-273.15,'r');
plot(Tslab(7200/dt+1,:)-273.15);
plot(Tslab(10800/dt+1,:)-273.15,'k');

```

```

axis([0 36*126 25 170]);

grid on

set(gca,'XTick',0:126:126*36);

set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17','18','19','20',
'21','22','23','24','25','26','27','28','29','30','31','32','33','34','35','36'})

ylabel('Slab Temp (degree celcius)');

xlabel('Slab number');

legend('t = 1 sec','t = 3600 sec','t = 7200 sec','t = 10800 sec')

title(['time interval = ',int2str(dt),' sec'])

subplot(2,1,2)

hold on

plot(Tflue(1,:)-273.15,'g');

plot(Tflue(3600/dt,:)-273.15,'r');

plot(Tflue(7200/dt,:)-273.15);

plot(Tflue(10800/dt,:)-273.15,'k');

axis([0 36*126 250 410]);

grid on

set(gca,'XTick',0:126:126*36);

set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17','18','19','20',
'21','22','23','24','25','26','27','28','29','30','31','32','33','34','35','36'})

ylabel('Flue Temp (degree celcius)');

xlabel('Slab number');

legend('t = 1 sec','t = 3600 sec','t = 7200 sec','t = 10800 sec')

```

โปรแกรมสำหรับเปรียบเทียบ dt และ dx

```
dt1 = 0.5;
dt2 = 1;
dt3 = 5;
dt4 = 10;
dt5 = 60;
dx1 = 0.01;
dx2 = 0.001;
dx3 = 0.1;
Tslab1 = slabflue(dt1);
Tflue1 = flueslab(dt1);
for i = 1:2142
    x1(i) = Tslab1(5400/dt1,i);
    y1(i) = Tflue1(5400/dt1,i);
end
Tslab2 = slabflue(dt2);
Tflue2 = flueslab(dt2);
for i = 1:2142
    x2(i) = Tslab2(5400/dt2,i);
    y2(i) = Tflue2(5400/dt2,i);
end
Tslab3 = slabflue(dt3);
Tflue3 = flueslab(dt3);
for i = 1:2142
    x3(i) = Tslab3(5400/dt3,i);
    y3(i) = Tflue3(5400/dt3,i);
end
```

```
Tslab4 = slabflue(dt4);
Tflue4 = flueslab(dt4);
for i = 1:2142
    x4(i) = Tslab4(5400/dt4,i);
    y4(i) = Tflue4(5400/dt4,i);
end
Tslab5 = slabflue(dt5);
Tflue5 = flueslab(dt5);
for i = 1:2142
    x5(i) = Tslab5(5400/dt5,i);
    y5(i) = Tflue5(5400/dt5,i);
end
x6 = slabflu(0.01)+273.15;
error = 0;
for i = 1:2142
    g(i) = abs(x1(i)-x2(i))/x1(i)*100;
    h(i) = abs(x1(i)-x3(i))/x1(i)*100;
    j(i) = abs(x1(i)-x4(i))/x1(i)*100;
    k(i) = abs(x1(i)-x5(i))/x1(i)*100;
    l(i) = abs(x1(i)-x6(i))/x1(i)*100;

    a(i) = abs(y1(i)-y2(i))/y1(i)*100;
    b(i) = abs(y1(i)-y3(i))/y1(i)*100;
    c(i) = abs(y1(i)-y4(i))/y1(i)*100;
    d(i) = abs(y1(i)-y5(i))/y1(i)*100;

%   error = g(i)^2+error;
end
```

```

x6 = slabflu(dx1)+273.15;
x7 = slabflu(dx2)+273.15;
x8 = slabflu(dx3)+273.15;

for i = 1:2142
    err1(i) = abs(x6(i) - x7(10*i-9))/x6(i)*100;
end
for i = 1:214
    err2(i) = abs(x8(i) - x6(10*i+1))/x6(i)*100;
end
compa1 = max(err1);
compa2 = max(err2);

% com = error;
com1 = max(g);
com2 = max(h);
com3 = max(j);
com4 = max(k);
com5 = max(l);

comp1 = max(a);
comp2 = max(b);
comp3 = max(c);
comp4 = max(d);

fprintf('Tslab Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and %5.2f sec is %7.3f
percent',dt1,dt2,com1);
fprintf('\n')

```

```

fprintf('Tslab Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and %5.2f sec is %7.3f
percent',dt1,dt3,com2);
fprintf('\n')
fprintf('Tslab Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and %5.2f sec is %7.3f
percent',dt1,dt4,com3);
fprintf('\n')
fprintf('Tslab Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and %5.2f sec is %7.3f
percent',dt1,dt5,com4);
fprintf('\n')
fprintf('Tslab Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and lump capacitance method is
%7.3f percent',dt1,com5);
fprintf('\n')
fprintf('\n')
fprintf('Tflue Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and %5.2f sec is %7.3f
percent',dt1,dt2,comp1);
fprintf('\n')
fprintf('Tflue Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and %5.2f sec is %7.3f
percent',dt1,dt3,comp2);
fprintf('\n')
fprintf('Tflue Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and %5.2f sec is %7.3f
percent',dt1,dt4,comp3);
fprintf('\n')
fprintf('Tflue Compare at 5400s between dt of %5.2f sec and %5.2f sec is %7.3f
percent',dt1,dt5,comp4);
fprintf('\n')
fprintf('\n')
fprintf('Tflue Compare at 5400s between dx of %5.3f m and %5.3f m is %7.3f
percent',dx1,dx2,compa1);

```

```

fprintf('\n')
fprintf('Tflue Compare at 5400s between dx of %5.3f m and %5.3f m is %7.3f
percent',dx1,dx3,compa2);
fprintf('\n')

subplot(2,1,1)
hold on
plot(x1-273.15),plot(x2-273.15,'g'),plot(x3-273.15,'r'),plot(x4-273.15,'c'),plot(x5-
273.15,'k'),plot(x6-273.15,'m')
axis([0 17*126 25 110]);
grid on
%set(gca,'XGrid','on');
set(gca,'XTick',0:126:126*17);
set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17'})
ylabel('Slab Temp (degree celcius)');
xlabel('Slab number');
legend('dt = 0.5 sec','dt = 1 sec','dt = 5 sec','dt = 10 sec','dt = 50 sec','lump capacitance
method')
title(['Slab Temperature time interval comparison at const dx = 0.01 m'])

subplot(2,1,2)
hold on
plot(y1-273.15),plot(y2-273.15,'g'),plot(y3-273.15,'r'),plot(y4-273.15,'c'),plot(y5-273.15,'m')
axis([0 17*126 320 410]);
grid on
%set(gca,'XGrid','on');
set(gca,'XTick',0:126:126*17);
set(gca,'XTickLabel',{'0','1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12','13','14','15','16','17'})

```



```
ylabel('flue temp Temp (degree celcius)');  
xlabel('Slab number');  
legend('dt = 1 sec','dt = 5 sec','dt = 10 sec','dt = 50 sec','dt = 100 sec')  
title(['Flue Temperature time interval comparison at const dx = 0.01 m'])
```

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิติพงษ์ กังวานสกุล เกิดเมื่อวันที่ 15 มกราคม พ.ศ. 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 สำหรับผลงานวิจัย ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารการประชุมวิชาการ เครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26