

การวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย



นายคมสัน ตันติชูเกียรติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ต้นปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเก่าของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ส่งงานบัณฑิตวิทยาลัย
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

ANALYSIS OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION IN STEEL INDUSTRY OF THAILAND

Mr. Komsan Tantichukiad



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกลุ่ม
อุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย

โดย

นายคมสัน ตันติชูเกียรติ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาทิต ภัคดี)

คมสัน ตันติชูเกียรติ : การวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย. (ANALYSIS OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION IN STEEL INDUSTRY OF THAILAND) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.จิตติน แดงเที่ยง, 216 หน้า.

สำหรับอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย หากแบ่งประเภทโดยอาศัยชนิดผลิตภัณฑ์และกระบวนการหรือที่มาของผลิตภัณฑ์จะแบ่งได้เป็น 15 กระบวนการผลิต โดยในปัจจุบันการผลิตจะเริ่มที่กระบวนการผลิตเหล็กชั้นกลาง พลังงานที่ใช้ในการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กถือว่ามีความมีการใช้พลังงานมากเป็นอันดับต้นๆ ของพลังงานรวมทั้งประเทศ แต่ข้อมูลดังกล่าวยังไม่เพียงพอที่จะบอกว่าการใช้พลังงานจำนวนมากนี้มีประสิทธิผลมากหรือน้อยเพียงใด ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้ดัชนีมาชี้วัดถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน โดยดัชนีที่เลือกในงานวิจัยนี้ คือ ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต (SEC) โดยวัตถุประสงค์ในงานวิจัยนี้ เพื่อประมาณค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กทั้ง 15 กระบวนการ ประจำปีพ.ศ.2548-2553 โดยใช้ข้อมูลต่างๆ จากแบบสอบถามที่ส่งไปและได้รับกลับมาจากผู้ประกอบการ ผลการประมาณด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามพบว่าค่า SEC เฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง โดยกลุ่มผู้ผลิตที่มีเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า ได้แก่ กระบวนการที่ 1 3 5 และ 7 มีค่า SEC มากกว่ากลุ่มอื่นๆ ในขณะที่ผู้ประกอบการเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น มีค่า SEC น้อยที่สุด และนอกจากนี้ ผลจากแบบสอบถามยังแสดงการประมาณค่า SEC แยกตามกระบวนการผลิต ได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า กระบวนการอบร้อน กระบวนการรีดร้อน กระบวนการขึ้นรูปเย็น และกระบวนการเคลือบผิว

ผลการประมาณด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่มีที่น่าเชื่อถือ เพื่อให้ผลดังกล่าวน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นจึงต้องหาข้อมูลที่น่าเชื่อถือมาเปรียบเทียบ ข้อมูลดังกล่าวคือค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตในทางทฤษฎีของแต่ละกระบวนการ ทำให้เห็นถึงโอกาสหรือศักยภาพในการลดการใช้พลังงานในการผลิตของกระบวนการที่พิจารณา 4 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า กระบวนการอบร้อน กระบวนการรีด และกระบวนการเคลือบผิว

จากผลการประมาณทำให้ทราบว่ากระบวนการหลอมและกระบวนการอบร้อนมีค่าการใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการอื่นๆ มาก ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้ จึงได้นำเสนอแนวทางหรือวิธีการในการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งสำหรับกระบวนการหลอม จะเลือกวิธีการอุ่นเศษเหล็กก่อนเข้าสู่เตาหลอม จากการคำนวณโดยแบบจำลองที่สร้างขึ้น พบว่า เศษเหล็กทรงกลมขนาด 0.05 เมตร ถูกอุ่นในภาชนะขนาดสูง 2 เมตร กว้างและยาว 3.5 เมตร ด้วยไอเสียเข้าที่มีอุณหภูมิคงที่ $1,500^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 50 นาที สามารถอุ่นให้เศษเหล็กมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นถึง 757°C และเมื่อปรับปรุงแบบจำลองโดยใช้ภาชนะอุ่นขนาด สูง 1 เมตร กว้างและยาว 5 เมตร ด้วยเงื่อนไขไอเสียและอื่นๆเป็นแบบเดิม พบว่า สามารถอุ่นให้เศษเหล็กมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นถึง $1,134^{\circ}\text{C}$ และสำหรับการปรับปรุงและพัฒนากระบวนการอบร้อน จะใช้วิธีเปลี่ยนประสิทธิภาพของ Recuperator เพื่อดูว่าส่งผลต่อการบริโภคเชื้อเพลิงและลดการใช้พลังงานลงเช่นไร ซึ่งจากการวิเคราะห์โดยสมดุลมวลและพลังงาน พบว่า เมื่อใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น การบริโภคเชื้อเพลิงและการใช้พลังงานจะลดลง

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5370209021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION / STEEL INDUSTRY / THE THEORETICAL
VALUESCRAP PREHEATING / MASS AND ENERGY BALANCE / HIGH EFFICENCY OF RECUPERATOR

KOMSAN TANTICHUKIAD: ANALYSIS OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION IN STEEL
INDUSTRY OF THAILAND. ADVISOR: ASSOC. PROF.CHITTIN TANGTHIENG, 216 pp.

Steel industry has long been one of the most energy consumed businesses despite the fact that the effectiveness of the energy consumption is still debatable. Therefore, the use of index to indicate the efficacy is necessarily critical that is the Specific Energy Consumption (SEC). Generally, the steel industry in Thailand can be classified by their methods and products into 15 types. The results from solid query show that the SECs tend to decrease most of all processes. The production type 1 3 5 and 7 which produce by EAF furnace have more the SEC value than others. On the other hand, Cold formed production has the least of this value. What more the estimated results classified by process, steel melting, reheating, hot rolling, cold forming and coating are also shown.

The estimates with data from the questionnaires alone may not be reliable. To make it even more reliable, the data need reliable for the comparison. Such is the theoretical value of each process. The result of comparison will see the chance or the potential to reduce energy consumption in the production for the four main processes include melting process with an EAF furnace, reheating, hot rolling process and coating

The energy estimated show that the process of melting by EAF furnace and reheating are consumes more energy than other processes. Therefore, this thesis will propose guidelines or procedures for developing and improving energy efficiency. For the melting by EAF choose a procedure of the preheating scrap before melting process in the furnace. From the calculated by the physical model (preheating model), the spherical scraps having diameter 0.05 meter was heated in a container 2 meters height and 3.5 meters for width and length by the exhaust gases. The inlet temperature of exhaust gases is fixed at 1,500°C and preheated for 50 minutes. The results of preheating show that, the scraps is heated to the average temperatures about 757°C and then recalculated for the new container size with 1 meter height and 5 meters for width and length with the same initial conditions. The results show that the scrap was heated up to the average temperatures about 1,134°C. Whereas the improvement and development of reheating process for this thesis will proposes the method of changing the effectiveness of Recuperator and observe an influence of Recuperator's effectiveness to the fuel consumptions. By the analysis of mass and energy balances, if the effectiveness is increase, the energy use will be decrease.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ท่านอาจารย์ได้ให้ความรู้ คอยให้คำปรึกษา ตลอดจนแนวคิดที่มีคุณค่าต่อการดำเนินงานวิจัย นอกจากนี้ยังคอยให้โอกาสและคอยให้ความช่วยเหลืออย่างเอาใจใส่ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญาณกรณ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาทีต ภัคติกกรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการ ให้คำแนะนำ และเสนอแนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ได้

ขอขอบพระคุณ คุณ อนันติ จิตรานุเคราะห์ วิศวกรผู้เชี่ยวชาญด้านพลังงานจากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูล คอยให้คำปรึกษาเรื่องต่างๆ ในงานวิจัย ให้สถานที่ในการทำงาน ให้ปัจจัยที่สนับสนุนการทำงาน และให้ความช่วยเหลืออื่นๆ อีกมากมาย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านสำหรับการช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและเครือญาติ ที่คอยดูแลและสนับสนุนด้านการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ขอขอบคุณมิตรสหายทุกท่านที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ ให้ทุนสนับสนุน จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันใดที่อาจได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบให้เป็นกุศลบุญแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฎ |
| สารบัญรูป..... | ฐ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย..... | 4 |
| 1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 โครงสร้างและภาพรวมของกระบวนการผลิตเหล็กในประเทศไทย..... | 5 |
| 2.2 โครงสร้างของแต่ละกระบวนการผลิต..... | 7 |
| 2.2.1 กระบวนการผลิตเหล็กกึ่งสำเร็จรูป..... | 7 |
| 2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการรีด..... | 9 |
| 2.2.3 กระบวนการผลิตเหล็กเคลือบผิว..... | 10 |
| 2.3 ค่าการใช้พลังงาน..... | 12 |
| 2.4 ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต..... | 12 |
| 2.5 ดัชนีการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตในทางทฤษฎี..... | 13 |
| 2.5.1 กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า..... | 13 |
| 2.5.1.1 ขอบเขตระบบของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า..... | 14 |
| 2.5.1.2 พลังงานที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Energy Input)..... | 15 |
| 2.5.1.3 พลังงานที่ไหลออกจากระบบ (Energy Output)..... | 16 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.5.2 | กระบวนการอบร้อน (Reheating)..... | 18 |
| 2.5.2.1 | ขอบเขตระบบของเตาอุ่นเหล็ก | 19 |
| 2.5.2.2 | พลังงานที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Energy Input) | 20 |
| 2.5.2.3 | พลังงานที่ไหลออกจากระบบ (Energy Input) | 20 |
| 2.5.3 | กระบวนการรีด (Rolling)..... | 22 |
| 2.5.3.1 | ประเภทของกระบวนการรีด | 22 |
| 2.5.3.2 | ขั้นตอนในการรีด | 22 |
| 2.5.3.3 | การวิเคราะห์การเสียรูปของชิ้นงาน (Analysis of Deformation) | 23 |
| 2.5.3.4 | พลังงานในการเสียรูปแบบถาวร | 25 |
| 2.5.4 | กระบวนการเคลือบผิว (Coating)..... | 30 |
| 2.5.4.1 | กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน (Hot dipping)..... | 30 |
| 2.5.4.2 | กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electroplating)..... | 35 |
| บทที่ 3 | เครื่องมือในงานวิจัย | 46 |
| 3.1 | ภาพรวมของแบบสอบถาม | 46 |
| 3.2 | ข้อมูลปริมาณการผลิตเหล็ก..... | 47 |
| 3.3 | ข้อมูลการใช้พลังงาน | 48 |
| บทที่ 4 | ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม | 51 |
| 4.1 | ผลการคำนวณในภาพรวมของทั้ง 15 กระบวนการผลิต..... | 52 |
| 4.1.1 | กระบวนการผลิตที่ 1 เหล็กเส้นมีเตาหลอม EAF | 56 |
| 4.1.2 | กระบวนการผลิตที่ 2 เหล็กเส้นไม่มีเตาหลอม EAF | 57 |
| 4.1.3 | กระบวนการผลิตที่ 3 เหล็กหลอดมีเตาหลอม EAF..... | 59 |
| 4.1.4 | กระบวนการผลิตที่ 4 เหล็กหลอดไม่มีเตาหลอม EAF | 60 |
| 4.1.5 | กระบวนการผลิตที่ 5 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อนมีเตาหลอม EAF | 61 |
| 4.1.6 | กระบวนการผลิตที่ 6 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อนไม่มีเตาหลอม EAF | 63 |
| 4.1.7 | กระบวนการผลิตที่ 7 เหล็กแผ่นรีดร้อนมีเตาหลอม EAF | 64 |
| 4.1.8 | กระบวนการผลิตที่ 8 เหล็กแผ่นรีดร้อนไม่มีเตาหลอม EAF | 65 |
| 4.1.9 | กระบวนการผลิตที่ 9 เหล็กแผ่นรีดเย็น..... | 66 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.1.10 | กระบวนการผลิตที่ 10 เหล็กแผ่นชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน..... | 68 |
| 4.1.11 | กระบวนการผลิตที่ 11 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า | 69 |
| 4.1.12 | กระบวนการผลิตที่ 12 เหล็กแผ่นเคลือบดีบุก/โครเมียม..... | 70 |
| 4.1.13 | กระบวนการผลิตที่ 13 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น | 72 |
| 4.1.14 | กระบวนการผลิตที่ 14 ท่อเหล็ก ERW | 74 |
| 4.1.15 | กระบวนการผลิตที่ 15 ท่อเหล็กชุบสังกะสี..... | 75 |
| 4.2 | ผลการคำนวณโดยแบ่งตามกระบวนการผลิต | 77 |
| 4.2.1 | กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า..... | 77 |
| 4.2.2 | กระบวนการอบร้อน (Reheating)..... | 81 |
| 4.2.3 | กระบวนการรีดร้อน (Hot rolling)..... | 85 |
| 4.2.4 | กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) | 87 |
| 4.2.5 | กระบวนการเคลือบผิว (Coating)..... | 89 |
| 4.3 | การเปรียบเทียบค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต | 94 |
| 4.3.1 | การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการหลอม..... | 94 |
| 4.3.2 | การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการอบร้อน..... | 96 |
| 4.3.3 | การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการรีด | 100 |
| 4.3.4 | การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการเคลือบผิว | 106 |
| บทที่ 5 | การกำหนดแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน | 114 |
| 5.1 | กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า..... | 114 |
| 5.1.1 | แนวทางในการปรับปรุงและพัฒนา..... | 115 |
| 5.1.2 | สมดุลมวล..... | 116 |
| 5.1.3 | การพิจารณาสมการการเผาไหม้ | 118 |
| 5.1.4 | สมดุลพลังงาน | 125 |
| 5.1.5 | การนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่..... | 133 |
| 5.2 | กระบวนการอบร้อน (Reheating)..... | 160 |
| 5.2.1 | สมดุลมวล (Mass balance) | 160 |
| 5.2.2 | การเผาไหม้ (Combustion)..... | 163 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.3 สมดุลพลังงาน (Energy balance)..... | 165 |
| 5.2.4 ผลการประมาณ..... | 168 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย..... | 172 |
| 6.1 การใช้พลังงานต่อผลผลิตในภาพรวม..... | 172 |
| 6.2 การใช้พลังงานต่อผลผลิตในรายกระบวนการผลิต..... | 173 |
| 6.3 การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน..... | 174 |
| 6.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ..... | 177 |
| รายการอ้างอิง..... | 179 |
| ภาคผนวก ก. ตัวอย่างแบบสอบถามการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก..... | 184 |
| ภาคผนวก ข. การประมาณค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตเฉลี่ยในแต่ละกระบวนการผลิต..... | 204 |
| ภาคผนวก ค. ตัวแปรและค่าคงที่ที่สำคัญ..... | 212 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 216 |

สารบัญตาราง

หน้า

| | | |
|---------------|---|-----|
| ตารางที่ 1.1 | ประเภทของอุตสาหกรรมเหล็กที่ใช้ผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตเป็นเกณฑ์ | 2 |
| ตารางที่ 2.1 | แสดงข้อได้เปรียบของการรีดทั้ง 2 ชนิด | 23 |
| ตารางที่ 2.2 | คุณสมบัติทั่วไปของสังกะสี..... | 34 |
| ตารางที่ 3.1 | ชุด/ประเภทของแบบสอบถามกับกลุ่มของผู้ประกอบการประเภทต่างๆ และจำนวนแบบสอบถามที่ได้รับกลับคืนมา..... | 46 |
| ตารางที่ 4.1 | ภาพรวมข้อมูลของแบบสอบถาม | 51 |
| ตารางที่ 4.2 | รายละเอียดของแบบสอบถามของกระบวนการเคลือบผิวเหล็กแบบจุ่มร้อน .. | 90 |
| ตารางที่ 4.3 | อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปก่อนเข้าเตาอบร้อน..... | 98 |
| ตารางที่ 4.4 | ข้อมูลขนาดของผลิตภัณฑ์เหล็กก่อนและหลังรีดร้อน..... | 102 |
| ตารางที่ 4.5 | องค์ประกอบของเหล็กแผ่นคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน ASTM A283-03..... | 102 |
| ตารางที่ 4.6 | ข้อมูลขนาดของผลิตภัณฑ์เหล็กก่อนและหลังรีดเย็น | 105 |
| ตารางที่ 4.7 | องค์ประกอบของเหล็กแผ่นรีดเย็น..... | 105 |
| ตารางที่ 4.8 | มวลของสังกะสีและมวลของผลิตภัณฑ์เหล็กเคลือบสังกะสี | 108 |
| ตารางที่ 4.9 | มวลอะตอมและจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทต่อโมลของสังกะสี ดีบุกและโครเมียม | 110 |
| ตารางที่ 4.10 | ตัวแปรที่ใช้แทนค่าและพลังงานที่คำนวณได้สำหรับการเคลือบแต่ละประเภท | 111 |
| ตารางที่ 5.1 | มวลและจำนวนโมลของสารที่ใส่เข้าระบบโดยประมาณ | 118 |
| ตารางที่ 5.2 | จำนวนโมลของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาการเผาไหม้..... | 120 |
| ตารางที่ 5.3 | ปริมาณ <i>extra O₂ (λ)</i> , <i>CO</i> และ <i>CO₂</i> | 121 |
| ตารางที่ 5.4 | สมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของการหลอมเหล็ก 1 ตัน | 124 |
| ตารางที่ 5.5 | สมดุลพลังงานของกระบวนการเผาไหม้ | 128 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| ตารางที่ 5.6 | สมดุลพลังงานของกระบวนการเกิดสแลก..... | 128 |
| ตารางที่ 5.7 | พลังงานที่ใส่ให้กับระบบที่อุณหภูมิ 25 °C | 130 |
| ตารางที่ 5.8 | พลังงานที่ออกจากระบบที่ 1,600 °C | 131 |
| ตารางที่ 5.9 | คุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของเหล็ก (Carbon steel) ที่ 25 °C | 135 |
| ตารางที่ 5.10 | คุณสมบัติต่างๆ ของอากาศ ที่อุณหภูมิ 1,500 °C | 140 |
| ตารางที่ 5.11 | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่อัตราการไหล ต่างๆ..... | 143 |
| ตารางที่ 5.12 | เงื่อนไขเริ่มต้นและค่าคงที่ของตัวแปรต่างๆ | 145 |
| ตารางที่ 5.13 | แสดงประสิทธิภาพ Recuperator อุณหภูมิอากาศขาออก ปริมาณการใช้ มีเทน และพลังงานจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง..... | 168 |
| ตารางที่ 6.1 | เปรียบเทียบค่า SEC ของอดีตและปัจจุบัน | 172 |
| ตารางที่ 6.2 | สรุปการปรับปรุงและพัฒนาของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบ อาร์คไฟฟ้า..... | 175 |
| ตารางที่ 6.3 | สรุปการปรับปรุงและพัฒนาของกระบวนการอบร้อน..... | 176 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|-------------|--|
| รูปที่ 2.1 | โครงสร้างของกระบวนการผลิตเหล็กในประเทศไทย6 |
| รูปที่ 2.2 | โครงสร้างของกระบวนการผลิตเหล็กสำเร็จรูป8 |
| รูปที่ 2.3 | โครงสร้างของกระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการรีด9 |
| รูปที่ 2.4 | โครงสร้างของกระบวนการผลิตเหล็กเคลือบผิว11 |
| รูปที่ 2.5 | ขอบเขตและพลังงานที่ไหลเข้าและออกจากระบบของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า14 |
| รูปที่ 2.6 | โครงสร้างและพื้นที่ส่วนต่างๆ ของเตาอุ่นเหล็ก.....18 |
| รูปที่ 2.7 | ขอบเขตระบบของเตาอุ่นเหล็ก พลังงานที่ไหลเข้าและพลังงานที่ไหลออกจากระบบของกระบวนการอบร้อน19 |
| รูปที่ 2.8 | ภาพตัดขวางภายในเตาอุ่นร้อน และขอบเขตระบบของเตาอุ่นร้อน19 |
| รูปที่ 2.9 | แสดงลักษณะของการเสียรูปอย่างง่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการรีด.....24 |
| รูปที่ 2.10 | กล่องปริมาตรของวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous)25 |
| รูปที่ 2.11 | องค์ประกอบของความเค้น (Stress components) ใน 2 มิติ25 |
| รูปที่ 2.12 | ขั้นตอนการผลิตเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน (Hot Dip Galvanized).....32 |
| รูปที่ 2.13 | โครงสร้างของชั้นเคลือบสังกะสี.....32 |
| รูปที่ 2.14 | พลังงานของกระบวนการเคลือบผิวด้วยสังกะสีแบบวิธีจุ่มร้อน33 |
| รูปที่ 2.15 | การเคลือบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electroplating).....35 |
| รูปที่ 2.16 | การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลร้อนและวัตถุ40 |
| รูปที่ 2.17 | การไหลของก๊าซผ่านแพคเบด44 |
| รูปที่ 3.1 | ตัวอย่างของแบบสอบถาม เพื่อสอบถามข้อมูลปริมาณการผลิตในแต่ละปีของกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5 (เหล็กทรงยาวมีเตาหลอม).....47 |
| รูปที่ 3.2 | ตัวอย่างของแบบสอบถาม เพื่อสอบถามข้อมูลปริมาณการผลิตในแต่ละปีของกระบวนการผลิตที่ 10 (เหล็กแผ่นชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน).....47 |

| | | |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 3.3 | ตัวอย่างแบบสอบถาม ในส่วนของการใช้พลังงานรวมของผู้ประกอบการ รายหนึ่ง..... | 48 |
| รูปที่ 3.4 | ตัวอย่างแบบสอบถามการใช้พลังงานในการหลอมเหล็กของ กระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5 (เหล็กทรงยาวมีเตาหลอม)..... | 49 |
| รูปที่ 3.5 | ตัวอย่างแบบสอบถามการใช้พลังงานในกระบวนการชุบสังกะสีของ กระบวนการผลิตที่ 10 | 50 |
| รูปที่ 3.6 | ตัวอย่างแบบสอบถามการใช้พลังงานในการรีดเหล็กของกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5 (เหล็กทรงยาวมีเตาหลอม) | 50 |
| รูปที่ 4.1 | ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของผลิตภัณฑ์เหล็กจากกระบวนการผลิต ต่างๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2553..... | 52 |
| รูปที่ 4.2 | ค่าการใช้พลังงานรวม (TJ) ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กรวม (kton) และ SEC (MJ/ton) ตั้งแต่ปีพ.ศ.2548 -2553..... | 53 |
| รูปที่ 4.3 | แสดงแนวโน้มและการเปรียบเทียบค่า $SEC_{Y avg}$ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2542-2553..... | 54 |
| รูปที่ 4.4 | เปรียบเทียบค่า $SEC_{G avg}$ ของปี พ.ศ.2548-2553 กับ ปี พ.ศ.2542-2547 | 55 |
| รูปที่ 4.5 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 1 | 56 |
| รูปที่ 4.6 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 1..... | 57 |
| รูปที่ 4.7 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 2 | 58 |
| รูปที่ 4.8 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 2..... | 58 |
| รูปที่ 4.9 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 3..... | 59 |
| รูปที่ 4.10 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 3 | 60 |
| รูปที่ 4.11 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 4 | 61 |
| รูปที่ 4.12 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 4..... | 61 |
| รูปที่ 4.13 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 5 | 62 |
| รูปที่ 4.14 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 5..... | 62 |
| รูปที่ 4.15 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 6 | 63 |

| | | |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 4.16 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 6..... | 63 |
| รูปที่ 4.17 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 7 | 64 |
| รูปที่ 4.18 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 7..... | 65 |
| รูปที่ 4.19 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 8 | 66 |
| รูปที่ 4.20 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 8..... | 66 |
| รูปที่ 4.21 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 9 | 67 |
| รูปที่ 4.22 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 9..... | 67 |
| รูปที่ 4.23 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 10 | 68 |
| รูปที่ 4.24 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 10 | 69 |
| รูปที่ 4.25 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 11 | 70 |
| รูปที่ 4.26 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 11 | 70 |
| รูปที่ 4.27 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 12 | 71 |
| รูปที่ 4.28 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 12 | 72 |
| รูปที่ 4.29 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 13 | 73 |
| รูปที่ 4.30 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 13 | 73 |
| รูปที่ 4.31 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 14 | 74 |
| รูปที่ 4.32 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 14 | 75 |
| รูปที่ 4.33 | ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 15 | 76 |
| รูปที่ 4.34 | สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 15 | 76 |
| รูปที่ 4.35 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้กับปริมาณผลิตภัณฑ์หลักที่ผลิต ได้ในกระบวนการผลิตหลักชนิดต่าง ของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอม แบบอาร์คไฟฟ้า..... | 77 |
| รูปที่ 4.36 | ค่า SEC ของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า | 78 |
| รูปที่ 4.37 | เปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์หลักและค่า SEC เฉลี่ยของกระบวนการ หลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า..... | 79 |

| | |
|-------------|---|
| รูปที่ 4.38 | ค่าการใช้พลังงานชนิดต่างๆ และค่า SEC ของกระบวนการหลอมด้วยเตา EAF ..80 |
| รูปที่ 4.39 | สัดส่วนของพลังงานชนิดต่างๆ ในกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า81 |
| รูปที่ 4.40 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้กับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของกระบวนการอบร้อนแยกตามลักษณะของผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูป82 |
| รูปที่ 4.41 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้กับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของกระบวนการอบร้อนแยกกระบวนการผลิตต่างๆ83 |
| รูปที่ 4.42 | ค่า SEC ของกระบวนการอบร้อน (Reheating).....84 |
| รูปที่ 4.43 | ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้กับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของกระบวนการรีดโดยแยกตามประเภทของผลิตภัณฑ์85 |
| รูปที่ 4.44 | ค่า SEC ของกระบวนการรีดร้อน (Hot rolling).....86 |
| รูปที่ 4.45 | เปรียบเทียบปริมาณการผลิต (ตัน) และ SEC เฉลี่ยของกระบวนการรีดร้อน.....86 |
| รูปที่ 4.46 | ปริมาณการใช้พลังงานและปริมาณผลิตภัณฑ์ของกระบวนการขึ้นรูปเย็น.....88 |
| รูปที่ 4.47 | ค่า SEC ของกระบวนการรีดเย็น.....88 |
| รูปที่ 4.48 | ค่า SEC ของกระบวนการขึ้นรูปเย็นและกระบวนการผลิตท่อ ERW89 |
| รูปที่ 4.49 | ค่า SEC ของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน91 |
| รูปที่ 4.50 | ค่า SEC ของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า.....92 |
| รูปที่ 4.51 | ค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตและปริมาณผลิตภัณฑ์ของกระบวนการเคลือบผิว ...93 |
| รูปที่ 4.52 | สัดส่วนการใช้พลังงานของกระบวนการเคลือบผิว.....93 |
| รูปที่ 4.53 | เปรียบเทียบผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถามและจากทางทฤษฎีของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า.....95 |
| รูปที่ 4.54 | เปรียบเทียบผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถามและจากทางทฤษฎีของกระบวนการอบร้อน97 |
| รูปที่ 4.55 | ค่าเอนทัลปีของเหล็ก (Fe) ที่อุณหภูมิต่างๆ99 |
| รูปที่ 4.56 | การกำหนดทิศทางของการรีด..... 101 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| รูปที่ 4.57 | เปรียบเทียบผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถามและจากทางทฤษฎีของกระบวนการรีดร้อน..... | 103 |
| รูปที่ 4.58 | เปรียบเทียบผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถามและจากทางทฤษฎีของกระบวนการรีดเหล็กแผ่นรีดร้อน..... | 103 |
| รูปที่ 4.59 | เปรียบเทียบผลการประมาณค่า SEC ของพลังงานไฟฟ้าจากแบบสอบถามและ จากทางทฤษฎีของกระบวนการรีดเย็น..... | 106 |
| รูปที่ 4.60 | เปรียบเทียบผลการประมาณจากแบบสอบถามกับผลจากทางทฤษฎีของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน..... | 108 |
| รูปที่ 4.61 | เปรียบเทียบผลการประมาณจากแบบสอบถามกับผลจากทางทฤษฎีของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า..... | 111 |
| รูปที่ 4.62 | ลักษณะกายภาพของชั้นเคลือบแบบด้านเดียว..... | 112 |
| รูปที่ 5.1 | พัฒนาการของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า..... | 115 |
| รูปที่ 5.2 | ค่าเฉลี่ยของมวลสารทั้ง 31 รอบการผลิตของเตาหลอมขนาด 100 ตัน..... | 116 |
| รูปที่ 5.3 | ชนิดและปริมาณมวลสารที่ไหลเข้าและออกจากเตาหลอมสำหรับวิทยานิพนธ์นี้..... | 117 |
| รูปที่ 5.4 | ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะต่างๆ... .. | 119 |
| รูปที่ 5.5 | อิทธิพลของปริมาณ extra Oxygen (λ) ที่มีผลต่อปริมาณ CO และ CO ₂ .. | 122 |
| รูปที่ 5.6 | สมดุลมวลของการหลอมเหล็กจำนวน 1 ตัน..... | 124 |
| รูปที่ 5.7 | พลังงานที่ถูกถ่ายเทให้กับเหล็กเพื่อทำให้เหล็กมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 1,600 °C . | 126 |
| รูปที่ 5.8 | พลังงานที่คายออกมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้..... | 127 |
| รูปที่ 5.9 | พลังงานที่ระบบถ่ายเทให้กับไอเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ | 127 |
| รูปที่ 5.10 | (ก) พลังงานที่ถ่ายเทให้กับระบบจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของการเกิดสแลก และ (ข) พลังงานที่ระบบถ่ายเทให้กับสแลกเพื่อทำให้สแลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น.... | 129 |
| รูปที่ 5.11 | (ก) Sankey diagram ของการผลิตเหล็ก 1 ตัน และ (ข) สัดส่วนการใช้พลังงาน..... | 132 |
| รูปที่ 5.12 | แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานในการประมาณการอุณหภูมิเหล็กด้วยไอเสีย | 134 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| รูปที่ 5.13 | ทรงกลมที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะ..... | 135 |
| รูปที่ 5.14 | การจัดเรียงตัวของเศษเหล็กใน 1 หน่วยความยาว..... | 136 |
| รูปที่ 5.15 | จำนวนของทรงกลมใน 1 หน่วยความยาวของการเรียงตัวแบบต่างๆ..... | 136 |
| รูปที่ 5.16 | ลักษณะของภาชนะอุ่นเศษเหล็ก..... | 138 |
| รูปที่ 5.17 | ขนาดของภาชนะและลักษณะการจัดเรียงตัวของเศษเหล็ก | 139 |
| รูปที่ 5.18 | การไหลเข้าและออกของไอเสียจากภาชนะอุ่นเศษเหล็ก..... | 141 |
| รูปที่ 5.19 | ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมและอัตราการไหลต่างๆ..... | 144 |
| รูปที่ 5.20 | การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไอเสียและเศษเหล็ก..... | 146 |
| รูปที่ 5.21 | ขั้นตอนการทำงานในการประมาณอุณหภูมิเศษเหล็กและไอเสีย | 147 |
| รูปที่ 5.22 | ผลของช่วงเวลาต่อการประมาณค่าอุณหภูมิของเศษเหล็ก..... | 148 |
| รูปที่ 5.23 | ร้อยละของผลต่างของการเปรียบเทียบช่วงเวลา 3 6 และ 10 วินาที กับ 1 วินาที..... | 149 |
| รูปที่ 5.24 | อุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็กและไอเสียของการปรับแก้ในแต่ละครั้ง..... | 151 |
| รูปที่ 5.25 | ลักษณะของไอเสียที่ไหลผ่านเศษเหล็ก..... | 151 |
| รูปที่ 5.26 | ผลการประมาณอุณหภูมิของไอเสียที่ผ่านแถวต่างๆ และที่เวลาต่างๆ..... | 152 |
| รูปที่ 5.27 | ผลการประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็กที่แถวต่างๆ และที่เวลาต่างๆ | 153 |
| รูปที่ 5.28 | ปริมาณการลดลงของพลังงานเมื่อมีการอุ่นเศษเหล็ก..... | 154 |
| รูปที่ 5.29 | อุณหภูมิของเศษเหล็ก..... | 156 |
| รูปที่ 5.30 | อุณหภูมิของไอเสีย | 157 |
| รูปที่ 5.31 | เปรียบเทียบอุณหภูมิของเศษเหล็กเมื่อเสร็จสิ้นการอุ่นของทั้ง 2 กรณี..... | 158 |
| รูปที่ 5.32 | เปรียบเทียบอุณหภูมิของไอเสียเมื่อเสร็จสิ้นการอุ่นของทั้ง 2 กรณี..... | 158 |
| รูปที่ 5.33 | เปรียบเทียบพลังงานที่ลดลงเมื่ออุ่นเศษเหล็กด้วยภาชนะทั้ง 2 ขนาด | 159 |
| รูปที่ 5.34 | ปริมาตรควบคุมของเตา Reheating furnace และ Recuperator..... | 161 |
| รูปที่ 5.35 | สมดุลมวล (Mass balance) ของเตาอุ่นเหล็กขนาด 1 ตัน..... | 162 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| รูปที่ 5.36 | สมดุลพลังงาน (Energy balance) ของเตาอุณหเหล็ก | 165 |
| รูปที่ 5.37 | การแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศกับไอเสียใน Recuperator | 167 |
| รูปที่ 5.38 | ปริมาณการบริโภคเชื้อเพลิง (มีเทน) เมื่อ Recuperator มีประสิทธิภาพ ค่าต่างๆ กัน..... | 169 |
| รูปที่ 5.39 | ร้อยละของเชื้อเพลิงที่ลดลง | 169 |
| รูปที่ 5.40 | ประสิทธิภาพของ Recuperator ต่อพลังงานที่ต้องการจากการเผาไหม้..... | 170 |
| รูปที่ 5.41 | พลังงานจากการเผาไหม้และพลังงานจากอากาศร้อน..... | 171 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

หากมองย้อนไปในอดีตด้วยข้อมูลทางสถิติของการใช้พลังงานในประเทศไทย พบว่า อุตสาหกรรมหลักเป็นอุตสาหกรรมที่มีค่าการใช้พลังงาน (Energy Consumption) มากเป็นอันดับต้นๆ ของค่าการใช้พลังงานรวมทั้งประเทศ แต่ด้วยข้อมูลเพียงเท่านี้ยังไม่เพียงพอที่จะบอกว่า การใช้พลังงานดังกล่าวมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยเพียงใด เนื่องจากอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานสูง อาจใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพก่อให้เกิดผลผลิตในปริมาณมากหรือมีมูลค่าสูง ในทางกลับกันอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานน้อย แต่อาจไม่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานเลย พลังงานที่ใช้ไป กลับไม่คุ้มค่างกับผลที่ได้มา ดังนั้น การหาดัชนีมาชี้วัดถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน (Energy effectiveness) ในอุตสาหกรรมจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยทั่วไปมีดัชนีที่ใช้ชี้วัดอยู่หลายประเภทด้วยกัน เช่น ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต (Specific Energy Consumption; SEC) ค่าความเข้มข้นของการใช้พลังงาน (Energy Intensity; EI) ค่าความยืดหยุ่นการใช้พลังงาน (Energy Elasticity; EE) ฯลฯ

กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมหลักสามารถแบ่งตามโครงสร้างของการผลิตได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ อุตสาหกรรมหลักขั้นต้น ขั้นกลาง และขั้นปลาย ซึ่งปัจจุบันการผลิตในประเทศไทยจะเริ่มที่การผลิตขั้นกลาง นอกจากนี้หากแบ่งโดยใช้ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ร่วมกับกระบวนการผลิตหรือที่มาของผลิตภัณฑ์นั้น จะแบ่งออกเป็น 15 กระบวนการ ดังตารางที่ 1.1

กระบวนการผลิตเหล็ก (Steel making) ในประเทศไทยจะเริ่มจากการหลอมและหล่อ ออกมาได้เป็น เหล็กแท่งเล็ก (Billet) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) และเหล็กแผ่นแบน (Slab) ถูกเรียกรวมกันว่า ผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-finishing products) ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้หลอมส่วนใหญ่เป็นเศษเหล็ก (Scrap) ที่ถูกนำกลับมาใช้ หลังจากนั้นจะส่งต่อผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปไปยังกระบวนการผลิตขั้นปลาย ได้แก่ กระบวนการรีด กระบวนการขึ้นรูป กระบวนการเคลือบผิว เป็นต้น เพื่อแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย (finished products) และส่งไปยังอุตสาหกรรมการผลิตหรือแปรรูปขั้นต่อเนื่องอื่นๆ ต่อไป เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อากาศยาน ก่อสร้าง บรรจุภัณฑ์ เฟอร์นิเจอร์ เป็นต้น

การนำดัชนีมาชี้วัดถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็กได้เคยมีผู้ศึกษามาแล้วในอดีต [1] ซึ่งดัชนีที่ใช้คือค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต (SEC) โดยการศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของทั้ง 15 กระบวนการผลิตของปีพ.ศ.2542-2547 ผลการศึกษาบางส่วนดังแสดงในตารางที่ 1.1

สำหรับการศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะประมาณและวิเคราะห์ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต SEC ของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทยประจำปีพ.ศ.2548-2553 ด้วยข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม ซึ่งส่งไปและได้รับกลับมาจากผู้ประกอบการทั้ง 15 กระบวนการผลิต

ผลการประมาณที่ได้จากแบบสอบถาม จะเห็นถึงลักษณะของการใช้พลังงานและเห็นถึงกระบวนการที่มีการใช้พลังงานค่อนข้างมาก ซึ่งได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าและกระบวนการอบร้อน ซึ่งผลจากแบบสอบถามนี้จะถูกเพิ่มความมั่นใจโดยการเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ สมดุลมวล สมดุลพลังงาน และทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อนร่วมกัน เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้อง รวมถึงพัฒนาเทคนิคและวิธีการเพื่อปรับปรุงการใช้พลังงาน ตลอดจนพิจารณาศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของทั้งสองกระบวนการจากการพัฒนาดังกล่าว

ตารางที่ 1.1 ประเภทของอุตสาหกรรมเหล็กที่ใช้ผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตเป็นเกณฑ์

| ผลิตภัณฑ์ชนิดที่ | กระบวนการผลิต | | SECG avg 2542-2547 |
|--|---------------|-------------------------------|-----------------------|
| | ที่ | ชนิด | |
| 1. เหล็กเส้น | 1 | มีเตาหลอม EAF | 5,095 |
| | 2 | ไม่มีเตาหลอม EAF | 2,075 |
| 2. เหล็กถวด | 3 | มีเตาหลอม EAF | 6,442 |
| | 4 | ไม่มีเตาหลอม EAF | 3,212 |
| 3. เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ขึ้นรูปร้อน | 5 | มีเตาหลอม EAF | 6,051 |
| | 6 | ไม่มีเตาหลอม EAF | 2,886 |
| 4. เหล็กแผ่นรีดร้อน | 7 | มีเตาหลอม EAF | 4,710 |
| | 8 | ไม่มีเตาหลอม EAF | 2,246 |
| 5. เหล็กแผ่นรีดเย็น | 9 | - | 1,787 |
| 6. เหล็กแผ่นเคลือบผิว | 10 | เคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน | 1,493 |
| | 11 | เคลือบสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้า | 1,300 |
| | 12 | เคลือบดีบุกและโครเมียม | 876 |
| 7. เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ขึ้นรูปเย็นและท่อเหล็ก | 13 | เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูป | 21 |
| | 14 | ท่อเหล็ก ERW | 235 |
| | 15 | ท่อเหล็กชุบสังกะสี | 1,670 |

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อประมาณค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กทั้ง 15 กระบวนการผลิตตั้งแต่ปีพ.ศ.2548-2553 ด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม
- 1.2.2 วิเคราะห์และประมาณการใช้พลังงานในทางทฤษฎี กำหนดแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็ก ได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าและกระบวนการอบร้อน ตลอดจนประเมินศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของทั้งสองกระบวนการ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สืบหาข้อมูลชนิดและปริมาณการใช้พลังงานตลอดจนปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของทั้ง 15 กระบวนการผลิตตั้งแต่ปีพ.ศ.2548-2553 โดยส่งแบบสอบถามไปยังผู้ประกอบการที่ถูกจัดอยู่ใน 15 กระบวนการผลิต
- 1.3.2 ประมาณค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต (SEC) ด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามที่ได้รับกลับมา
- 1.3.3 สร้างแบบจำลองของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นเหล็ก โดยใช้สมมูลมวลสมมูลพลังงาน และทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อนร่วมกัน
- 1.3.4 พัฒนาเทคนิคและวิธีการเพื่อปรับปรุงการใช้พลังงานในเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นเหล็ก รวมถึงวิเคราะห์ผลที่ได้จากการปรับปรุงและประเมินศักยภาพในการลดการใช้พลังงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ภาพรวมของการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต ประจำปี พ.ศ.2548 - 2553 ซึ่งจะเป็นข้อมูลเชิงสถิติและสามารถนำไปเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานในอดีต
- 1.4.2 ได้แบบจำลองการใช้พลังงานอย่างง่ายของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นเหล็ก
- 1.4.3 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการใช้พลังงานตลอดจนประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กทั้ง 15 กระบวนการ
- 1.4.4 ทำให้เห็นถึงความเป็นไปได้หรือศักยภาพในการกำหนดแนวทางในการปรับปรุงส่งเสริมและการพัฒนาประสิทธิภาพของการใช้พลังงานในแต่ละกระบวนการผลิต

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ศึกษา ค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหรืองานที่เคยศึกษาและเคยทำมาแล้วในอดีต
- 1.5.2 ส่งแบบสอบถามไปยังผู้ประกอบการหรือโรงงานในกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กทั้ง 15 กระบวนการ เพื่อสอบถามรายละเอียดของการใช้พลังงานในขั้นตอนต่างๆ และปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้
- 1.5.3 คำนวณและวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต ด้วยข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม และเปรียบเทียบกับของช่วงปีพ.ศ. 2542 - 2547
- 1.5.4 สร้างแบบจำลองของการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเตาอุ่นเหล็ก
- 1.5.5 พัฒนาเทคนิคและวิธีการเพื่อปรับปรุงการใช้พลังงาน และเปรียบเทียบเพื่อหาศักยภาพในการลดการใช้พลังงาน
- 1.5.6 สรุปผลการศึกษาและการวิจัย รวมถึงจัดทำเอกสารทางวิชาการเพื่อการเผยแพร่

1.6 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย 6 บท โดยเนื้อหาในบทแรกจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตและวิธีดำเนินงานวิจัย ตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ เนื้อหาในบทที่ 2 จะกล่าวถึงโครงสร้างของการผลิตเหล็กในประเทศไทย โครงสร้างและรายละเอียดของการผลิตในแต่ละกระบวนการผลิต ทฤษฎีที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบไปด้วยการคำนวณการใช้พลังงานและการคำนวณค่า SEC ตลอดจนรายละเอียดของแต่ละกระบวนการผลิต ในส่วนของบทที่ 3 จะอธิบายถึงเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ได้แก่ แบบสอบถาม และรายละเอียดของแบบสอบถามที่สำคัญ บทที่ 4 แสดงผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลจากข้อมูลที่ได้โดยแบบสอบถาม สำหรับบทที่ 5 จะนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยมุ่งเน้นไปที่กระบวนการที่มีการใช้พลังงานมากเป็นอันดับต้นๆ ซึ่งได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า (เตา EAF) และกระบวนการอบร้อน ซึ่งได้นำเสนอเทคนิคและวิธีการในการปรับปรุงและพัฒนา ซึ่งผลที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของทั้งสองกระบวนการดังกล่าว และสำหรับบทสุดท้าย บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัย รวมถึงปัญหาและข้อเสนอแนะที่เกิดขึ้นตลอดงานวิจัยนี้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทยจำนวน 15 กระบวนการผลิต ขั้นตอนในการทำวิจัยลำดับแรกคือการศึกษาถึงโครงสร้างและวิธีการของกระบวนการผลิตเหล็กในประเทศไทย จากนั้นศึกษาถึงวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์จากเอกสารและงานวิจัยที่ผ่านมา ตลอดจนการนำค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตไปใช้ประโยชน์ก็เป็นเรื่องที่ควรทราบไว้เช่นเดียวกัน ซึ่งเนื้อหาที่กล่าวมาได้รวบรวมไว้ในบทนี้

2.1 โครงสร้างและภาพรวมของกระบวนการผลิตเหล็กในประเทศไทย

โครงสร้างกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็ก สามารถแบ่งประเภทตามโครงสร้างของกระบวนการผลิตได้ 3 ประเภท คือ อุตสาหกรรมเหล็กขั้นต้น ชั้นกลาง และชั้นปลาย หากแบ่งโดยใช้ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ภายในประเทศไทยเป็นเกณฑ์ จะแบ่งออกเป็น 7 ชนิด และนอกจากนี้ หากแบ่งประเภทโดยอาศัยชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ร่วมกับกระบวนการผลิตหรือที่มาของผลิตภัณฑ์นั้นจะแบ่งออกเป็น 15 กระบวนการผลิต ดังได้แสดงมาแล้วในตารางที่ 1.1

สำหรับโครงสร้างการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทยจะเริ่มต้นจากกระบวนการผลิตเหล็กชั้นกลาง วัตถุดิบที่ใช้ในส่วนนี้จะเป็นเหล็กพูน หรือเหล็กถลุงที่ได้จากกระบวนการผลิตเหล็กขั้นต้น โดยการซื้อจากแหล่งผลิตอื่น หรือโดยการนำเศษเหล็กที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ กระบวนการผลิตในขั้นตอนนี้ จะให้วิธีการหลอมวัตถุดิบจนถึงจุดหลอมเหลว ซึ่งวิธีการหลอม อาจใช้เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction furnace) หรือเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า (Electric arc furnace; EAF) เมื่อหลอมวัตถุดิบจนกลายเป็นน้ำเหล็กแล้ว น้ำเหล็กจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous mold casting) ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ผลิตได้ในขั้นตอนนี้ ได้แก่ เหล็กแท่งเล็ก (Billet) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) และเหล็กแผ่นแบน (Slab) รวมเรียกว่า ผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-finishing products)

จากนั้น ผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปจะถูกส่งไปยังกระบวนการผลิตเหล็กชั้นปลาย ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะ แต่โดยหลักๆ แล้วก็เพื่อแปรรูปผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปให้มีรูปร่าง ขนาด หรือคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามความต้องการและตามการใช้งาน ซึ่งโครงสร้างการผลิตและผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของกระบวนการผลิตเหล็กในประเทศไทย

2.2 โครงสร้างของแต่ละกระบวนการผลิต

สำหรับกระบวนการผลิตเหล็กในประเทศไทย มีหลายกระบวนการผลิตที่มีโครงสร้างรูปแบบ รวมถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตมีลักษณะคล้ายกัน เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จึงจัดกลุ่มของกระบวนการผลิตเดียวกันเข้าด้วยกัน กระบวนการแรก คือ การผลิตเหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-finishing products) ผู้ประกอบการที่ผลิตเหล็กกึ่งสำเร็จรูป จะถูกจัดอยู่ในกระบวนการผลิตที่ 1-8 โดยกระบวนการผลิตสำหรับกระบวนการนี้ประกอบด้วย การหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า กระบวนการอบร้อน และกระบวนการรีดร้อน รายละเอียดของทั้ง 3 กระบวนการนี้จะกล่าวอย่างละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ถือเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นต้นที่นำไปใช้แปรรูปในขั้นต่อไป

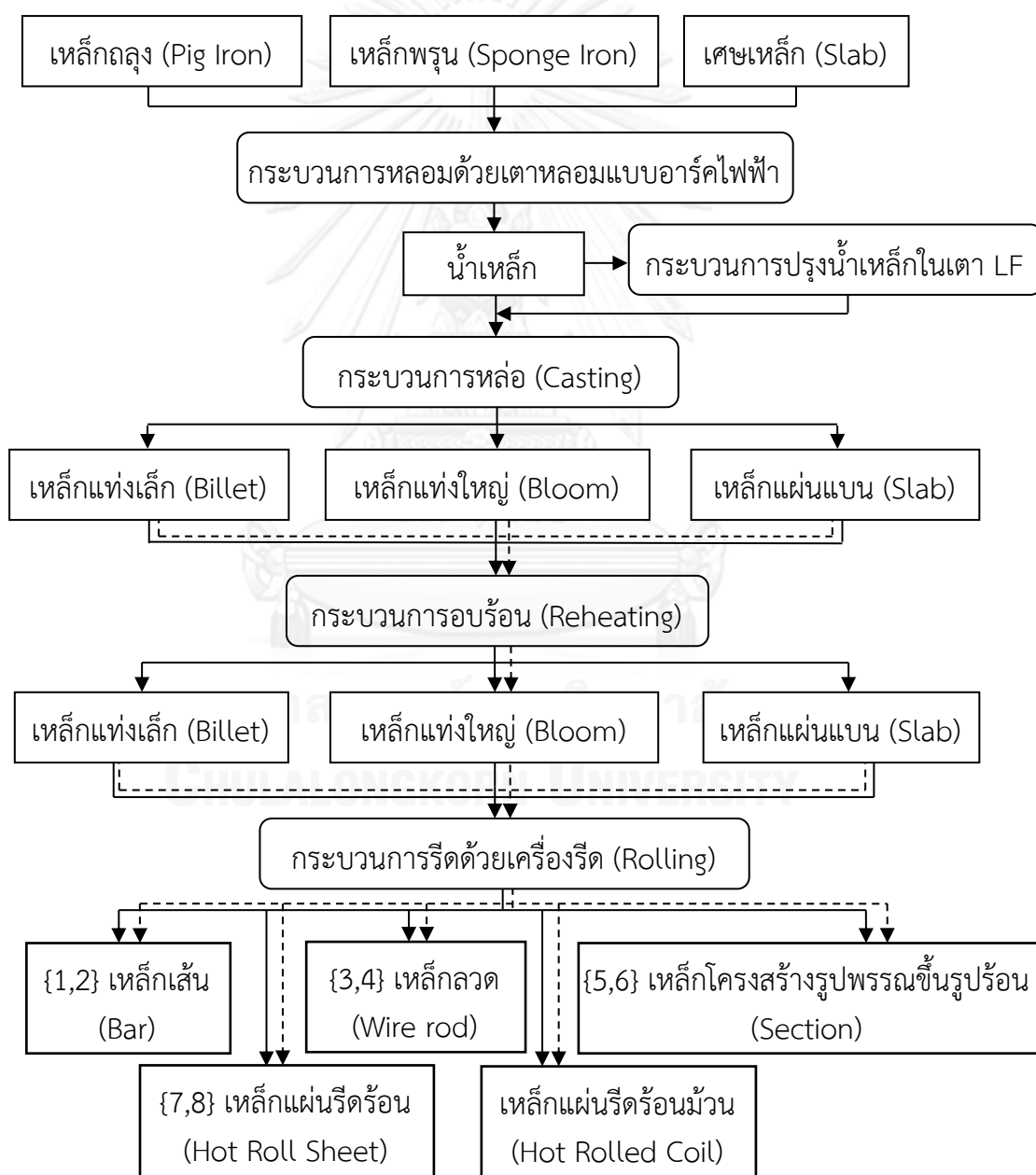
กระบวนการต่อไปคือ กระบวนการรีดและกระบวนการขึ้นรูป เป็นกระบวนการที่ใช้แปรรูปหรือเปลี่ยนแปลงขนาดของเหล็ก ซึ่งแบ่งเป็นกระบวนการรีดร้อน (Hot rolling) กระบวนการรีดเย็น (Cold rolling) และกระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot forming) กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) ทั้งสองวิธีต่างกันตรงที่อุณหภูมิของเหล็กขณะถูกแปรรูป ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จะถูกจัดอยู่ในกระบวนการผลิตที่ 5 และ 6 สำหรับกระบวนการขึ้นรูปร้อน กระบวนการผลิตที่ 7 และ 8 สำหรับกระบวนการรีดร้อน และกระบวนการผลิตที่ 9 และ 13 สำหรับกระบวนการรีดเย็นและกระบวนการขึ้นรูปเย็น ตามลำดับ นอกจากนี้กระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการรีด ยังมีกระบวนการเคลือบผิว ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อเพิ่มคุณค่าและมูลค่าให้ผลิตภัณฑ์เหล็ก ผู้ประกอบการที่ผลิตเหล็กเคลือบผิวถูกจัดอยู่ในกระบวนการผลิตที่ 10 11 12 และ 15

2.2.1 กระบวนการผลิตเหล็กกึ่งสำเร็จรูป

ผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้จากกระบวนการผลิตที่ 1-8 หรือผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปประกอบด้วย 5 ชนิดหลัก ได้แก่ เหล็กเส้น (Bar) เหล็กหลอด (Wire rod) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อน (Section) เหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot rolled sheet) และเหล็กแผ่นรีดร้อนม้วน (Hot rolled coil) โดยผลิตภัณฑ์ 4 อย่างแรกเป็นผลิตภัณฑ์ลำดับสุดท้ายในกระบวนการผลิตเหล็กขั้นปลาย ส่วนเหล็กแผ่นรีดร้อนม้วนจะกลายเป็นวัตถุดิบตั้งต้นเพื่อใช้สำหรับแปรรูปต่อไป โครงสร้างของการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์เหล็กทั้ง 5 ชนิด มีที่มาจาก 2 วิธีการผลิตหลัก คือ การผลิตโดยเริ่มต้นผลิตจากกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าและการผลิตโดยเริ่มต้นผลิตจากกระบวนการอบร้อน (Reheating)

สำหรับวิธีการแรก การผลิตโดยเริ่มต้นจากกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า จะเป็นวิธีการของกระบวนการผลิตที่ 1 3 5 และ 7 การผลิตจะเริ่มจากการหลอมวัตถุดิบ ได้แก่ เหล็กถลุง เหล็กพูน หรือเศษเหล็ก ด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า เมื่อวัตถุดิบหลอมและกลายเป็นน้ำเหล็กหมดแล้ว น้ำเหล็กอาจถูกส่งต่อไปยังเตาปรุงน้ำเหล็ก (Ladle furnace) เพื่อปรับปรุงส่วนผสมของน้ำเหล็กให้ได้ส่วนผสมและคุณสมบัติตามต้องการ

หรือไม่ก็ส่งต่อไปยังกระบวนการหล่อในทันที หลังจากการหล่อ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลักๆ จะมี 3 ลักษณะ รวมเรียกว่า ผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-finishing products) โดยรูปร่างของผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ เหล็กทรงยาว (Long products) ได้แก่ เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) และเหล็กแท่งเล็ก (Billet) และอีกรูปร่างหนึ่งคือ เหล็กทรงแบน (Flat products) ได้แก่ เหล็กแผ่นแบน (Slab) เหล็กทรงยาวจะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการแปรรูปเพื่อเปลี่ยนขนาดและรูปร่าง ซึ่งเป็นที่มาของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5 ในส่วนของเหล็กทรงแบนก็จะถูกส่งไปแปรรูปเช่นเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการผลิตที่ 7



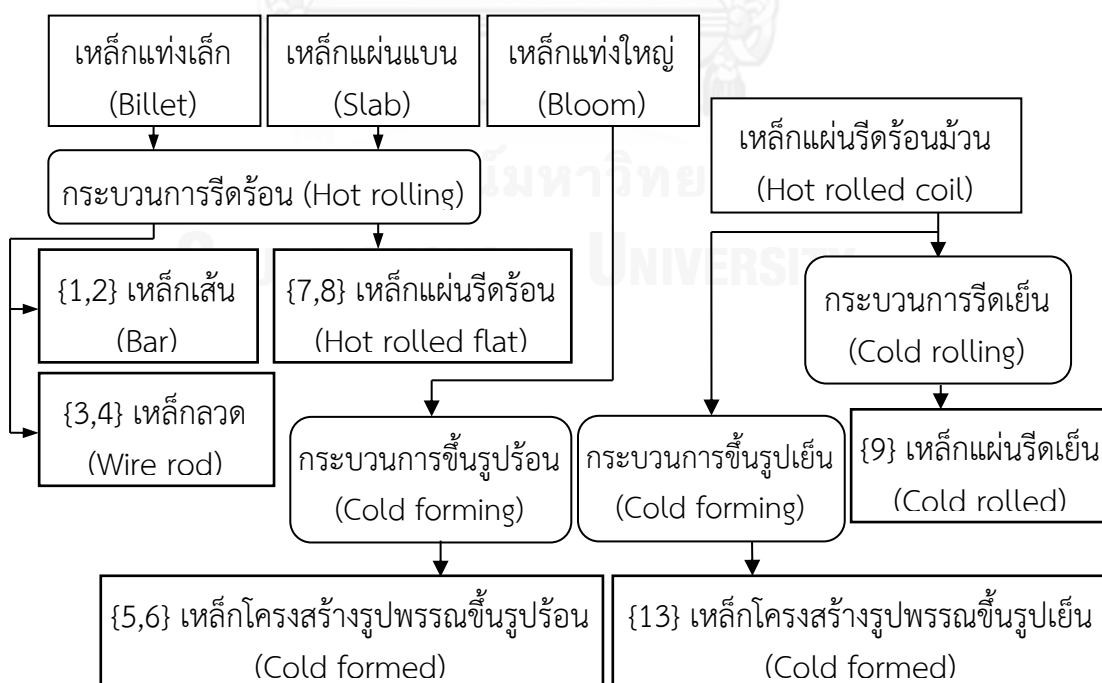
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของกระบวนการผลิตเหล็กกึ่งสำเร็จรูป

ส่วนการผลิตที่เริ่มต้นผลิตจากกระบวนการอบร้อน (Reheating) จะเป็นวิธีการของกระบวนการที่ 2 4 6 และ 8 ใช้ในการผลิต โรงงานหรือผู้ประกอบการในกลุ่มนี้จะไม่มีการผลิตผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูป แต่จะใช้วิธีสั่งซื้อจากแหล่งผลิตอื่น โดยผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปส่วนใหญ่จะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิแวดล้อมหรืออุณหภูมิห้อง ซึ่งในกระบวนการแปรรูปจำเป็นต้องอบผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปให้มีอุณหภูมิสูงก่อน ประมาณ $1,250^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ง่ายต่อการแปรรูปและเปลี่ยนขนาด เหล็กทรงยาวเมื่อถูกแปรรูปแล้ว ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะเป็นของกลุ่มที่ 2 4 และ 6 ขณะที่ เหล็กทรงแบนผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะเป็นของกลุ่มที่ 8

จากรูปที่ 2.2 โครงสร้างของกระบวนการผลิตที่ 1 3 5 และ 7 หรือเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการผลิตที่มีเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า ถูกแทนด้วยเส้นทึบ ส่วนโครงสร้างของกระบวนการผลิตที่ 2 4 6 และ 8 หรือกระบวนการผลิตที่ไม่มีเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าถูกแทนด้วยเส้นประ

2.2.2 กระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการรีด

ทั้งกระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการรีดจัดเป็นขั้นตอนหรือวิธีเพื่อใช้แปรรูปเหล็กให้มีรูปร่างและขนาดเป็นไปตามต้องการ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว กระบวนการรีดและกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งแบ่งเป็นกระบวนการรีดร้อน กระบวนการรีดเย็น กระบวนการขึ้นรูปร้อน และกระบวนการขึ้นรูปเย็น วิธีทั้งหมดต่างกันตรงที่อุณหภูมิของเหล็กขณะถูกแปรรูป วัตถุประสงค์ตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการผลิตส่วนใหญ่เป็นเหล็กสำเร็จรูปและเหล็กแผ่นรีดร้อนม้วน โครงสร้างกระบวนการผลิตดังแสดงในรูปที่ 2.3



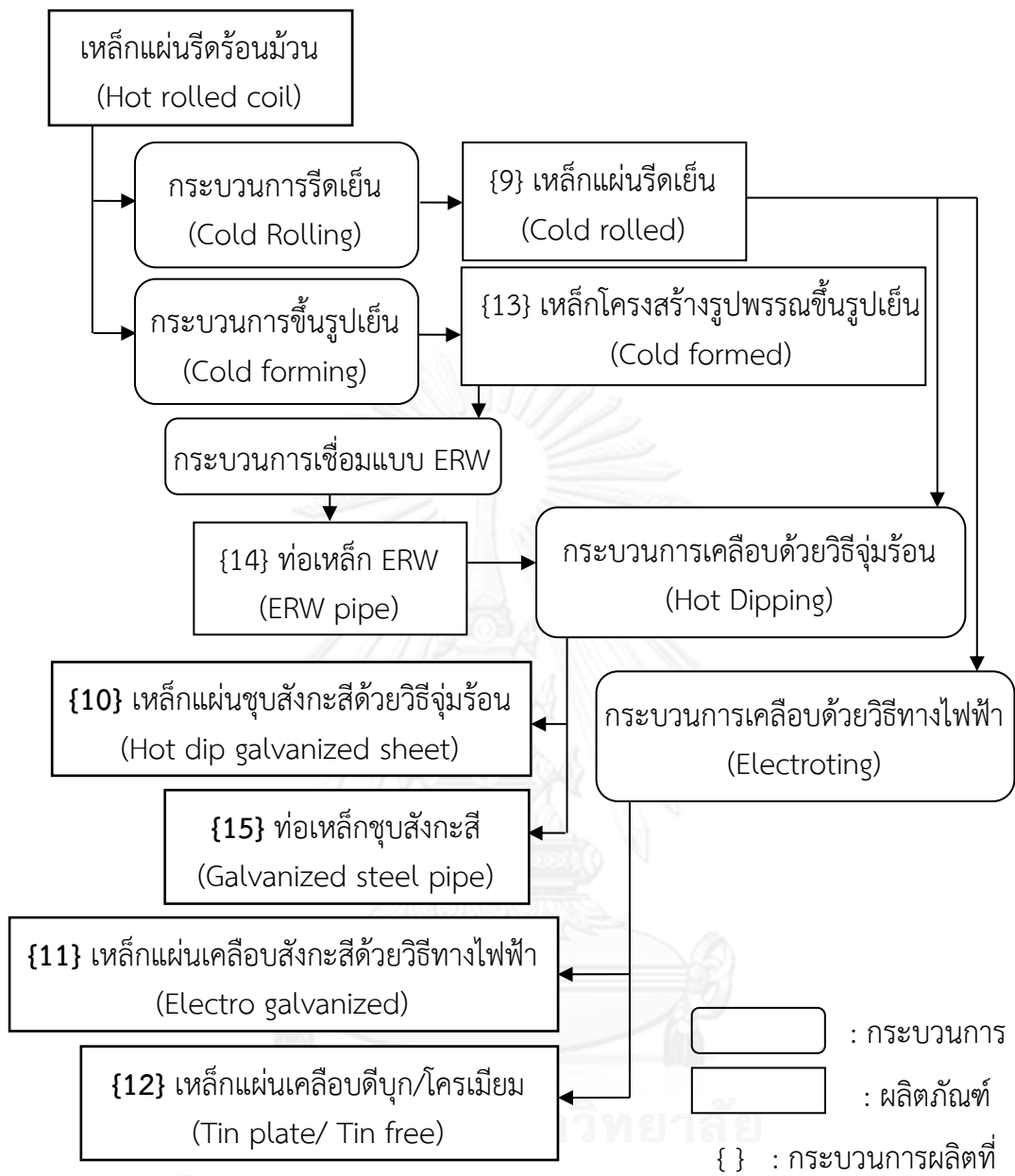
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของกระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการรีด

2.2.3 กระบวนการผลิตเหล็กเคลือบผิว

กระบวนการผลิตเหล็กเคลือบผิวหรือกระบวนการผลิตที่ 10 11 12 และ 15 มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อป้องกันการผุกร่อนจากการใช้งานและสภาพแวดล้อม ถือเป็นวิธีการยืดอายุการใช้งานของเหล็กให้ยาวนานขึ้น นอกจากนี้ การเคลือบผิวยังช่วยเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นให้สูงขึ้น

โครงสร้างของกระบวนการผลิตเหล็กเคลือบผิว จะเริ่มต้นด้วยวัตถุดิบอย่างเดียวกัน คือ เหล็กแผ่นรีดร้อนม้วน (Hot rolled Coil) ผ่านการแปรรูปด้วยกระบวนการรีดเย็น (Cold rolling) และกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold formed) ได้เป็น เหล็กแผ่นรีดเย็น (Cold rolled sheet) และเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น (Cold formed) ตามลำดับ ซึ่งเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็นจะถูกขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก จากนั้นทำการเชื่อมติดขอบของทรงกระบอกเข้าด้วยกันด้วยเครื่องเชื่อมแบบ ERW (Electric Resistance Welding) จนได้ออกมาเป็นท่อเหล็ก (Steel pipe)

ทั้งเหล็กแผ่นรีดเย็นและท่อเหล็ก จะถูกเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีที่แตกต่างกัน 2 ประเภท คือ การเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน (Hot dipping) และการเคลือบผิวด้วยวิธีการทางไฟฟ้า (Electroplating) เหล็กแผ่นรีดเย็นและท่อเหล็กที่เคลือบด้วยวิธีจุ่มร้อนจะใช้สังกะสีเป็นวัสดุ ที่นำมาเคลือบ ผลิตภัณฑ์สุดท้ายได้เป็น เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน (Hot dip galvanized sheet; HDG) และท่อเหล็กชุบสังกะสี (Galvanized steel pipe; GPS) ซึ่งถูกจัดเป็นกระบวนการผลิตที่ 10 และ 15 ตามลำดับ ในขณะที่ เหล็กแผ่นรีดเย็นสามารถนำมาเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้าได้เช่นกัน ซึ่งจะมีทั้งการเคลือบผิวด้วยสังกะสี ได้เป็น เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า (Electro galvanized; EG) และเคลือบผิวด้วยดีบุกหรือโครเมียม ได้เป็น เหล็กแผ่นเคลือบดีบุกและโครเมียม (Tin plate/Tin free; TPTF) และถูกจัดเป็นกระบวนการผลิตที่ 11 และ 12 ตามลำดับ โดยกระบวนการผลิตทั้งการเคลือบด้วยวิธีจุ่มร้อนและเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า จะได้กล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งในหัวข้อที่ 2.5 โครงสร้างของกระบวนการผลิตเหล็กเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกระบวนการผลิตเหล็กเคลือบผิว

2.3 ค่าการใช้พลังงาน

ในกระบวนการผลิตเหล็กขั้นต้นหนึ่ง พลังงานที่ใช้มาจากหลายประเภท เช่น พลังงานจากไฟฟ้า ซึ่งไฟฟ้าอาจมาจากการซื้อหรือมาจากการผลิตเอง พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงทั้งที่เป็นเชื้อเพลิงปิโตรเลียมหรือไม่ใช่ปิโตรเลียม [2] เป็นต้น

เมื่อพลังงานที่ใช้มีหลายชนิด หลายรูปแบบ หน่วยของพลังงานก็อาจมีทั้งหน่วยที่เหมือนกันหรือต่างกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบและรวมการใช้พลังงานเข้าด้วยกันได้ จึงจำเป็นต้องมีการแปลงหน่วยของพลังงานแต่ละชนิดให้เหมือนกันก่อน โดยที่นิยมใช้คือ หน่วยเมกะจูล (MJ) หรือ จิกกะจูล (GJ)

การแปลงหน่วยของปริมาณไฟฟ้าและเชื้อเพลิงที่ใช้ให้อยู่ในหน่วยของพลังงานไฟฟ้า (E_{elect}) และพลังงานความร้อน ($E_{thermal}$) จะแปลงโดยคูณด้วยค่าแฟคเตอร์การแปลง (Conversion factor) [3] เมื่อพลังงานทุกชนิดมีหน่วยเหมือนกันแล้ว ก็สามารถหาค่าการใช้พลังงานรวม (E_{total}) ได้โดยเป็นผลบวกของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมด ($\sum E_{elect}$) และพลังงานความร้อนทั้งหมด ($\sum E_{thermal}$) ดังสมการที่ (2.1)

$$E_{total} = \sum E_{Elect} + \sum E_{Thermal} \quad (2.1)$$

2.4 ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต

ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตเป็นค่าดัชนีที่ชี้วัดถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานรูปแบบหนึ่ง โดยหาได้จากอัตราส่วนของค่าการใช้พลังงานรวมต่อปริมาณผลผลิตที่ผลิตได้จากพลังงานนั้น เขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$SEC = \frac{E_{total}}{\sum P} \quad (2.2)$$

เนื่องจากข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากการสำรวจด้วยแบบสอบถามจากทั้ง 15 กระบวนการผลิตประจำปีพ.ศ.2548–2553 ข้อมูลที่ได้กลับมามีไม่ครบถ้วนหรือมีความสมบูรณ์ไม่เพียงพอ เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กแต่ละกระบวนการผลิตจะอาศัยการเฉลี่ย และเป็นการเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก ดังสมการที่ (2.3) และสมการที่ (2.4) เพื่อให้ค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตมีความถูกต้องและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

$$SEC_{G,avg} = \frac{\sum_{i=2548}^{2553} (SEC_i \times P_i)}{\sum_{i=2548}^{2553} P} \quad (2.3)$$

$$SEC_{Y,avg} = \frac{\sum_{j=1}^{15} (SEC_j \times P_j)}{\sum_{j=1}^{15} P} \quad (2.4)$$

2.5 ดัชนีการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตในทางทฤษฎี

ค่าการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมเหล็กอย่างยิ่ง เพราะทำให้อุตสาหกรรมเหล็กเห็นถึงสถานะในการใช้พลังงานของตัวเอง อุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานจริงสูงกว่าทางทฤษฎีมาก หมายความว่า อุตสาหกรรมนั้นมีพลังงานที่สูญเสียออกจากระบบเยอะ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน ตลอดจนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานที่ต้องเสียไปมากกว่าที่ควรจะเป็น

สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตของกระบวนการผลิตที่สำคัญในอุตสาหกรรมเหล็ก โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็นกระบวนการต่างๆ ได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า กระบวนการอบร้อน กระบวนการรีด กระบวนการขึ้นรูปเย็น และกระบวนการเคลือบผิว นอกจากนี้ประเด็นทางด้านพลังงานแล้ว ในหัวข้อนี้จะนำเสนอข้อมูลพื้นฐานของกระบวนการผลิตต่างๆ ด้วย

2.5.1 กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

กระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า จะใช้การอาร์คระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับวัตถุดิบ ไม่ว่าจะเป็น เศษเหล็ก เหล็กถลุง หรือ เหล็กพูน ด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณมาก (ประมาณ 50 kA) และในการอาร์ค อุณหภูมิที่เกิดในตำแหน่งของการอาร์คจะมีค่าสูง โดยมีค่าประมาณ 3,600 – 10,500 °C [4]

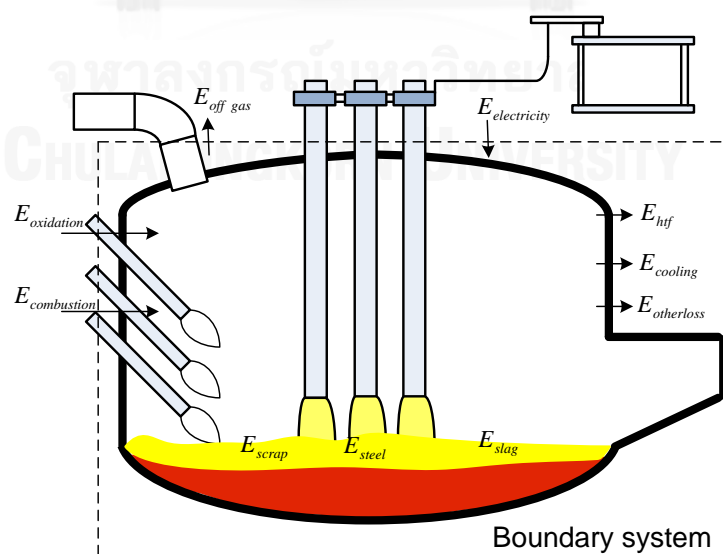
การพิจารณาถึงพลังงานที่ใช้ในเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า ค่อนข้างมีความซับซ้อน [4] เหตุผลเพราะ แหล่งที่มาของพลังงานค่อนข้างมีความหลากหลาย ไม่ว่าจะเป็น พลังงานจากไฟฟ้า พลังงานจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงที่ใช้ก็มีหลายประเภท เช่น น้ำมันเตา หรือ ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น หรือแม้กระทั่งพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเตาหลอม ซึ่งส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) เมื่อเกิดการออกซิเดชันระหว่างธาตุต่างๆ เช่น C, Si, Al, Fe, Cr, Mn [4-6] เป็นต้น ในระหว่างกระบวนการหลอมจะ

คายความร้อนออกมาให้กับระบบ นอกจากพลังงานที่ใส่ให้กับระบบดังกล่าวมาแล้ว พลังงานที่สูญเสียออกจากระบบก็มีความซับซ้อนเช่นเดียวกัน พลังงานหลักส่วนใหญ่จะเข้าสู่เนื้อเหล็กเพื่อทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลวและเปลี่ยนสถานะจากเหล็กในรูปของแข็งกลายเป็นน้ำเหล็กจากนั้นจะเพิ่มอุณหภูมิต่อไปยังจุดที่ต้องการ นอกจากพลังงานส่วนนี้แล้ว ในการหลอมเหล็ก เหล็กส่วนหนึ่งอาจกลายเป็นสแลกและจะมีพลังงานบางส่วนสูญเสียไปกับสแลกที่ถูกกำจัดออก และสำหรับกระบวนการหลอมที่เกิดขึ้นย่อมเกิดไอเสียจากการหลอม ซึ่งความร้อนที่ปล่อยออกมากับไอเสียก็เป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่ออกมาจากระบบ รายละเอียดของพลังงานในเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าจะกล่าวอย่างละเอียดอีกครั้งในบทที่ 5

เพื่อให้การพิจารณาทำได้ง่ายและสะดวกที่สุด วิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานในเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า คือ การวิเคราะห์สมดุลมวล (Mass balance) และสมดุลพลังงาน (Energy balance) [5] โดยจะเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ หรือกฎการอนุรักษ์พลังงาน กล่าวคือ พลังงานที่ใส่ให้กับระบบต้องเท่ากับพลังงานที่ออกมาจากระบบ ดังนั้น การระบุขอบเขตของระบบ (Boundary system) จึงเป็นสิ่งจำเป็น

2.5.1.1 ขอบเขตระบบของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

การระบุขอบเขตของระบบ (Boundary system of EAF) จะกำหนดขึ้นเพื่อพิจารณาว่ามีมวลและพลังงานใดที่ไหลเข้าและออกจากระบบ โดยในที่นี้จะสมมติให้ขอบเขตของระบบเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า เป็นดังเส้นประที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.5 และเมื่อกำหนดขอบเขตของระบบเป็นดังรูป จะทำให้เห็นว่ามีมวลและพลังงานที่ไหลเข้าและไหลออกจากระบบหลายประเภทด้วยกัน พลังงานที่ไหลเข้าและออกจากระบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 ขอบเขตและพลังงานที่ไหลเข้าและออกจากระบบของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

2.5.1.2 พลังงานที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Energy Input)

โดยทั่วไป พลังงานที่ใส่ให้กับระบบของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า ประกอบไปด้วย พลังงานจากไฟฟ้า (Electrical energy) เขียนแทนด้วย ($E_{electricity}$) พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Thermal Energy from combustion) เขียนแทนด้วย ($E_{combustion}$) พลังงานจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน เขียนแทนด้วย ($E_{oxidation}$) และสุดท้ายคือ พลังงานจากเศษเหล็กที่อุ่นร้อน เขียนแทนด้วย (E_{scrap})

พลังงานจากไฟฟ้า ($E_{electricity}$) เป็นพลังงานหลักที่ใช้ในกระบวนการหลอม เป็นพลังงานที่ได้จากการแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงไฟฟ้าให้เหลือแรงดันที่พอเหมาะแล้ว ส่งไฟฟ้ามายังเตาหลอมผ่านเข้าสู่ระบบโดยตรงเข้ากับแท่งอิเล็กโทรด (Electrod) [7] ปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าคือ ส่วนผสมของเศษเหล็กและกระบวนการผลิต หากเป็นเตาหลอมสมัยก่อน ประมาณ 25 -30 ปีที่ผ่านมา มีสัดส่วนของการใช้ไฟฟ้าสูงถึง 70-75% ในขณะที่เตาหลอมสมัยใหม่ สามารถลดปริมาณการใช้ไฟฟ้าลงมาอยู่ที่ 50% หรืออาจต่ำกว่านั้นซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานชนิดอื่นๆ [7]

พลังงานจากปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาออกซิเดชัน ($E_{oxidation}$) เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันของธาตุต่างๆ ระหว่างกระบวนการหลอม รวมถึงการรวมตัวกับออกซิเจนด้วย และจะคายความร้อนออกมาให้กับระบบ [8] ในบางครั้ง ก๊าซออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยานั้น จะถูกพ่นเข้าไปในน้ำเหล็ก ด้วย Oxygen lance และนอกจากออกซิเจนแล้ว การพ่นผงคาร์บอนก็เป็นอีกวิธีหนึ่ง เพื่อให้คาร์บอนเข้าทำปฏิกิริยากับธาตุต่างๆ ยังเป็นการปรับปรุงส่วนผสมของธาตุต่างๆ ในน้ำเหล็ก ให้มีปริมาณพอเหมาะและตรงกับความต้องการ

พลังงานจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ($E_{combustion}$) เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบด้วยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงเช่น ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล หรือ LPG ที่ถูกส่งผ่านจากภายนอกเข้าสู่ระบบด้วยหัวเผา (Burner) ไม่ว่าจะเป็น Gas burner และ Oxygen lance ที่ใส่เข้าไปให้แก่วัสดุเพื่อเพิ่มความพลังงานความร้อนในเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า และยังเป็นการหลีกเลี่ยงจุดเย็น (Cold spot) หรือจุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าหรือแตกต่างจากจุดอื่นๆ ในเตาหลอมที่มีรูปร่างไม่สมมาตรได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เพื่อต้องการให้ความร้อนกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงภายในเตาทั้งหมด เพื่อให้ปฏิกิริยาของการหลอมเหล็กเกิดได้เร็วขึ้น และเพื่อเพิ่มกำลังการผลิต (Productivity) และเพื่อเป็นการลดการใช้พลังงานจากไฟฟ้า [6]

พลังงานจากเศษเหล็กอุ่นร้อน (E_{scrap}) เป็นพลังงานให้กับระบบโดยติดมากับเศษเหล็กที่ถูกนำเข้าเตาหลอมจากภายนอก ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่เกิดจากการอุ่นเศษเหล็กก่อนเข้าเตาเผาด้วยความร้อนที่เหลือใช้ และส่วนใหญ่จะเป็นความร้อนที่ติดมากับไอเสีย (Off-gas) [7]

2.5.1.3 พลังงานที่ไหลออกจากระบบ (Energy Output)

ในกระบวนการหลอม พลังงานที่ใส่ให้กับระบบจะเท่ากับพลังงานที่ออกจากระบบตามกฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานส่วนหนึ่งที่ระบบได้รับ จะถูกทำให้เหล็กที่อยู่ภายในเตามีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลวและหลอมเหลวเหล็กจนกลายเป็นน้ำเหล็ก และยังคงอุ่นเพิ่มไปอีกจนถึงอุณหภูมิประมาณ $1,600^{\circ}\text{C}$ พลังงานในส่วนนี้สามารถเขียนแทนด้วย E_{steel} นอกจากนี้ พลังงานบางส่วนอาจสูญเสียออกจากระบบได้ในหลายรูปแบบ เช่น พลังงานที่สูญเสียไปกับการเกิดขึ้นของสแลก (E_{slag}) พลังงานที่สูญเสียไปกับไอเสียที่ถูกระบายออกจากเตาหลอม ($E_{off\ gas}$) พลังงานที่ถูกถ่ายเทออกในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อน (E_{hlf}) และระบบน้ำหล่อเย็นเตาหลอม ($E_{cooling}$) ตามผนัง ฝาปิดเตาหลอม และช่องเปิดต่างๆ เป็นต้น รวมถึงพลังงานที่สูญเสียออกจากระบบในรูปแบบอื่นๆ ด้วย ($E_{otherloss}$)

เมื่อทราบขอบเขตของระบบ ทราบพลังงานที่ไหลเข้าและไหลออกจากระบบ สามารถเขียนสมดุลพลังงานของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$E_{input} = E_{output} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$E_{input} = E_{electricity} + E_{oxidation} + E_{combustion} + E_{scrap} \quad (2.6)$$

และ

$$E_{output} = E_{steel} + E_{slag} + E_{off-gas} + E_{Dust} + E_{hlf} + E_{cooling} + E_{otherloss} \quad (2.7)$$

จัดรูปสมการ (2.7) ใหม่ให้ดูง่ายขึ้น โดยรวมเทอมของพลังงานที่สูญเสียออกจากระบบ (E_{loss}) เข้าด้วยกันได้เป็น

$$E_{output} = E_{steel} + E_{loss} \quad (2.8)$$

เมื่อ $E_{loss} = E_{slag} + E_{Dust} + E_{off-gas} + E_{hlf} + E_{cooling} + E_{otherloss}$ และเมื่อรวมสมการ (2.6) และ สมการ (2.8) เข้าด้วยกัน จะได้ว่า

$$E_{electricity} + E_{oxidation} + E_{combustion} + E_{scrap} = E_{steel} + E_{loss} \quad (2.9)$$

หารสมการที่ (2.9) ด้วยมวลของเหล็ก (m_{steel}) จะได้

$$\frac{E_{electricity} + E_{oxidation} + E_{fuel} + E_{scrap}}{m_{steel}} = \frac{E_{steel} + E_{loss}}{m_{steel}} \quad (2.10)$$

เพราะฉะนั้น

$$SEC = \frac{E_{in}}{m_{steel}} = \frac{E_{out}}{m_{steel}} \quad (2.11)$$

และจาก

$$E_{steel} = m_{steel}(h_2 - h_1) = m_{steel} \int c_{p,steel} dT + m_{steel} L_f \quad (2.12)$$

จัดรูป ได้ว่า

$$\frac{E_{steel}}{m_{steel}} = h_2 - h_1 = \int c_{ps} dT + L_f \quad (2.13)$$

จะได้ว่า

$$SEC = \frac{E_{in}}{m_{steel}} = \int c_{ps} dT + L_f + \frac{E_{loss}}{m_{steel}} \quad (2.14)$$

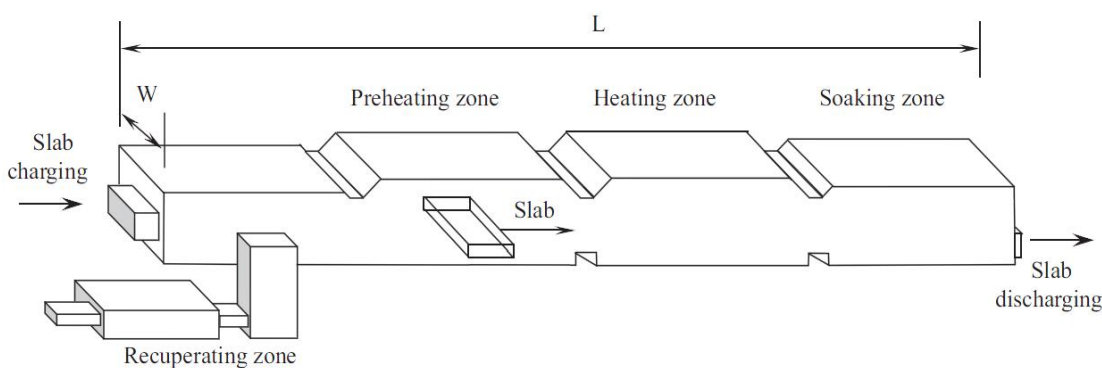
เพราะฉะนั้น ค่า SEC ในทางทฤษฎีที่น้อยที่สุดจะพิจารณาได้เมื่อพลังงานที่สูญเสียออกจากระบบ (E_{loss}) มีค่าเป็นศูนย์ จึงได้ค่า SEC ดังสมการที่ (2.15)

$$SEC = \frac{E_{in}}{m_{steel}} = \int c_{ps} dT + L_f = h_2 - h_1 \quad (2.15)$$

2.5.2 กระบวนการอบร้อน (Reheating)

ในกระบวนการผลิตเหล็ก ก่อนการแปรรูปผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-finishing products) เป็นเหล็กที่มีรูปร่างและขนาดที่ต่างกัันนั้น บางการผลิตอาจมีการอบหรืออุ่นเหล็กให้ร้อนก่อน ในเตาอุ่นเหล็ก หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) เพื่อให้การแปรรูปทำได้โดยง่าย [9] โดยทั่วไปกระบวนการอบร้อนจะประกอบด้วยขั้นตอนหลักอยู่ 3 ขั้นตอน [9-12] ได้แก่ กระบวนการอุ่น กระบวนการทำให้อุณหภูมิ และกระบวนการบ่มอุณหภูมิ

ขั้นตอนแรก ได้แก่ การอุ่น (Preheating) เพื่อไล่ความชื้นออกเหล็ก โดยจะอุ่นจนผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปมีอุณหภูมิประมาณ $700-800^{\circ}\text{C}$ [11] ขั้นตอนที่สอง คือ การให้อุณหภูมิ (Heating) จะให้ความร้อนต่อจนผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ $1,100-1,250^{\circ}\text{C}$ [11, 13] ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการรีด [14] และขั้นตอนสุดท้ายคือการบ่มอุณหภูมิ (Soaking) จะบ่มเพื่อให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น และมีอุณหภูมิประมาณ $1,100-1250^{\circ}\text{C}$ [11] และสำหรับเตาเผาเหล็กสมัยใหม่อาจเพิ่มส่วนที่สี่เข้ามา ได้แก่ ส่วนการนำความร้อนเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ (Recuperating zone) [10] โดยแต่ละส่วนมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 [10]

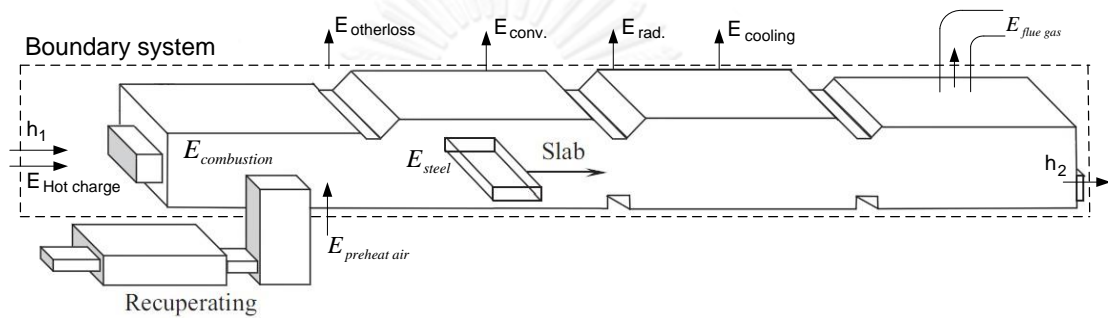


รูปที่ 2.6 โครงสร้างและพื้นที่ส่วนต่างๆ ของเตาอุ่นเหล็ก

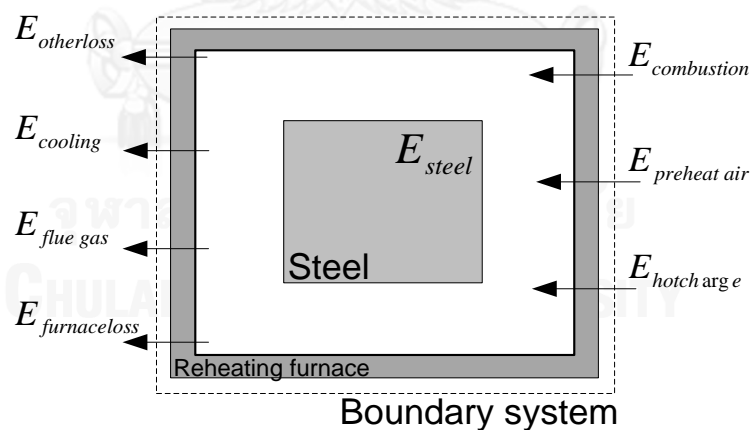
พลังงานหลักที่ใช้ในกระบวนการอบร้อนส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยการวิเคราะห์การใช้พลังงานในกระบวนการอบร้อนอย่างง่ายจะอาศัยสมดุลพลังงาน หรือ กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ คล้ายกับการวิเคราะห์ของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

2.5.2.1 ขอบเขตระบบของเตาอุ่นเหล็ก

การพิจารณาสมดุลพลังงานในเตาอุ่นเหล็ก จำเป็นต้องกำหนดขอบเขตของระบบ (Boundary system of reheating furnace) ที่ต้องการศึกษา โดยในที่นี้จะกำหนดให้ขอบเขตของระบบเป็นดังเส้นประที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 โดยขอบเขตของระบบจะครอบคลุมเตาอุ่นเหล็กทั้งหมด ดังนั้น สิ่งที่อยู่นอกเหนือตัวเตาจะถือว่าเป็นสิ่งแวดล้อม (Surrounding)



รูปที่ 2.7 ขอบเขตระบบของเตาอุ่นเหล็ก พลังงานที่ไหลเข้าและพลังงานที่ไหลออกจากระบบของกระบวนการอบร้อน



รูปที่ 2.8 ภาพตัดขวางภายในเตาอุ่นร้อน และขอบเขตระบบของเตาอุ่นร้อน

เมื่อกำหนดขอบเขตของระบบในลักษณะดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 ซึ่งครอบคลุมเตาอุ่นเหล็กทั้งหมด ทำให้ทราบว่า มีพลังงานชนิดใดผ่านเข้าและออกจากระบบบ้าง โดยรายละเอียดของพลังงานแต่ละชนิดมีดังต่อไปนี้

2.5.2.2 พลังงานที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Energy Input)

พลังงานที่ใช้ในเตาอุณหภูมิสูงส่วนใหญ่เป็นพลังงานความร้อน เพื่อให้เหล็กที่ถูกส่งเข้ามาในเตามีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยพลังงานความร้อนมาจากหลายแหล่งที่มา แต่โดยหลักๆ แล้วมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และถูกเขียนแทนด้วย ($E_{combustion}$) นอกจากนี้ พลังงานความร้อนบางส่วนมาจากความร้อนที่ถูกนำกลับมาใช้ใหม่โดย Recuperator จากความร้อนที่ถูกทิ้งออกมากับไอเสียจากการเผาไหม้ (flue gas) พลังงานนี้เขียนแทนด้วย ($E_{preheat\ air}$) และหากเหล็กที่ถูกใส่เข้าไปในเตาอุณหภูมิสูงซึ่งเรียกว่า hot charge เหล็กจะมีความร้อนที่ติดมากับเนื้อเหล็ก และพลังงานความร้อนนี้ได้ผ่านเข้าสู่ระบบ ซึ่งอาจถือว่าเป็นพลังงานที่ไหลเข้าสู่ระบบได้ ($E_{hotcharge}$)

2.5.2.3 พลังงานที่ไหลออกจากระบบ (Energy Output)

สำหรับพลังงานที่ไหลออกจากระบบก็มีหลายรูปแบบและหลายลักษณะเช่นเดียวกัน โดยพลังงานส่วนใหญ่ที่ระบบได้รับจะถูกทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนด พลังงานนี้ถูกเขียนแทนด้วย (E_{steel}) นอกจากนี้จะมีพลังงานบางส่วนที่ไหลออกจากระบบในรูปของการถ่ายเทความร้อน เมื่อเตาอุณหภูมิสูงมีการดำเนินงาน ความร้อนบางส่วนจากภายในเตาจะถูกส่งผ่านออกมายังผิวผนังภายนอกในรูปของการนำความร้อน เมื่อผิวเตามีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศที่อยู่ภายนอกก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศนั้นในรูปของการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน และหากเตาอุณหภูมิสูงมีการเปิดประตูเพื่อนำเหล็กเข้าและส่งเหล็กออก ทำให้อากาศร้อนภายในเกิดการถ่ายเทแลกเปลี่ยนกับอากาศเย็นภายนอก ซึ่งความร้อนทั้งหมดนี้ถูกเรียกรวมเป็น พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากเตา และเขียนแทนด้วย ($E_{furnacelos}$) และเมื่อเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในเตาอุณหภูมิสูง ก็จะเกิดก๊าซจากการเผาไหม้ ก๊าซเหล่านี้จะถูกทิ้งออกจากเตาทางท่อไอเสีย ซึ่งความร้อนบางส่วนจะติดออกมากับก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงด้วย โดยความร้อนนี้ถูกเขียนแทนด้วย ($E_{flue\ gas}$) สุดท้ายเป็นพลังงานอื่นๆ ที่สูญเสียออกจากระบบเขียนแทนด้วย ($E_{otherloss}$)

เมื่อทราบขอบเขตของระบบ และพลังงานที่ไหลเข้าและออกจากระบบและ กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เมื่อไม่มีงานให้หรือออกจากระบบ จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.16)

$$E_{input} = E_{output} \quad (2.16)$$

$$E_{input} = E_{steel} + E_{output} \quad (2.17)$$

และเมื่อ

$$E_{steel} = m_{steel}(h_2 - h_1) = m_{steel} \int c_{ps} dT \quad (2.18)$$

แทนสมการ (2.18) ลงในสมการ (2.17) จะได้ว่า

$$E_{input} = m_{steel}(h_2 - h_1) + E_{output} = m_{steel} \int c_{ps} dT + E_{output} \quad (2.19)$$

พลังงานที่สูญเสียออกจากระบบ (E_{out}) ที่เห็นทางด้านขวามือของสมการที่ (2.19) นั้น เป็นผลรวมของพลังงานจากการถ่ายเทความร้อน (E_{hf}) ไม่ว่าจะเป็นการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งเป็นเป็น $E_{furnacelos}$ นอกจากนี้ยังรวมเอาพลังงานที่สูญเสียจากระบบที่ไหลออกมากับน้ำหล่อเย็น ($E_{cooling}$) และพลังงานที่สูญเสียออกจากระบบในรูปแบบอื่นๆ ($E_{otherloss}$) ด้วย

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$SEC = \frac{E_{input}}{m_{steel}} = \int c_{ps} dT + \frac{E_{output}}{m_{steel}} \quad (2.20)$$

เมื่อพูดถึงประสิทธิภาพของเตาอ่อน หากเตาอ่อนมีประสิทธิภาพ 100% นั้นหมายความว่าพลังงานที่ใส่ให้กับระบบ จะถูกถ่ายเทไปยังเหล็กเพื่อทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นเท่านั้น หรือกล่าวคือ ไม่มีพลังงานที่สูญเสียออกจากระบบเลย ($E_{out} = 0$) ดังนั้น จากสมการที่ (2.20) SEC ในทางทฤษฎีที่น้อยที่สุดสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.21)

$$SEC = \frac{E_{input}}{m_{steel}} = \int c_{p,steel} dT = h_{125^\circ C} - h_{25^\circ C} \quad (2.21)$$

2.5.3 กระบวนการรีด (Rolling)

กระบวนการรีดเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานให้มีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปและมีขนาดเล็กลง โดยอาศัยแรงจากภายนอก ซึ่งเป็นแรงอัด (Compressive force) จากลูกรีด (Rotating roll) ที่มีค่ามากกว่าแรงยึดเหนี่ยวภายในหรือแรงต้านทานการเสียรูปร่างของวัสดุ (Deformation resistance) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic deformation) ผลิตภัณฑ์เหล็กกิ่งสำเร็จรูปที่ได้จากกระบวนการขึ้นก่อน อันได้แก่ เหล็กแท่งเล็ก (Billet) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) และเหล็กแผ่น (slab) จะกลายเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการรีด หลังจากการรีด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีหลายชนิดด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็น เหล็กเส้น (Bar) เหล็กลวด (Wire rod) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ (Section) และเหล็กแผ่น (Flat)

2.5.3.1 ประเภทของกระบวนการรีด

โดยทั่วไปกระบวนการรีดแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด [15] คือ กระบวนการรีดร้อน (Hot Rolling) และ กระบวนการรีดเย็น (Cold Rolling) ข้อแตกต่างอย่างหนึ่งของกระบวนการทั้งสองคือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เหล็กกิ่งสำเร็จรูปขณะรีด ในขั้นตอนของกระบวนการรีดร้อน ผลิตภัณฑ์เหล็กกิ่งสำเร็จรูปที่ได้จากกระบวนการผลิตเหล็กขึ้นกลาง (กระบวนการหล่อ) จะถูกนำไปอบร้อน (Reheat) ในเตาอบร้อน (Reheating furnace) ก่อน หรือในบางครั้ง จะถูกรีดในทันที (directly charge) หลังจากเพิ่งหล่อเสร็จใหม่ๆ (ผลิตภัณฑ์เหล็กกิ่งสำเร็จรูปยังมีอุณหภูมิสูง) ซึ่งแตกต่างกับกระบวนการรีดเย็นที่ไม่จำเป็นต้องอุ่นร้อนก่อนการรีด โดยการรีดจะกระทำที่อุณหภูมิห้อง (ambient temperature) นอกจากนี้ ในทางโลหะวิทยา ได้จำแนกถึงข้อแตกต่างของการรีดร้อนและการรีดเย็น โดยใช้อุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง [16-18] กล่าวคือ การรีดเย็น จะกระทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ ในขณะที่ การรีดร้อนจะกระทำที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิของการเกิดผลึกใหม่ และเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจและการสื่อสาร ในบางครั้งการแบ่งประเภทระหว่างกระบวนการรีดร้อนและกระบวนการรีดเย็น จะแบ่งโดยใช้เกณฑ์ที่ว่า ในขณะที่รีดมีการให้พลังงานความร้อนจากภายนอกเข้าไปในระบบหรือไม่

2.5.3.2 ขั้นตอนในการรีด

จากที่กล่าวมาว่าการรีดมีทั้ง การรีดที่อุณหภูมิสูงและการรีดที่อุณหภูมิต่ำ โดยขั้นตอนการผลิตของกระบวนการรีดร้อน เหล็กจะถูกส่งเข้าไปยังเตาเผาหรือเตาอุ่นเหล็ก เมื่อเหล็กมีอุณหภูมิเหมาะสมต่อการรีด เหล็กจะส่งมารีดที่เครื่องรีดหยาบ (Roughing mill) เป็นการรีดกลับไปกลับมา 5-7 ครั้งเพื่อลดขนาดให้บางลงเหลือประมาณ 28-40 มิลลิเมตร แต่ก่อน

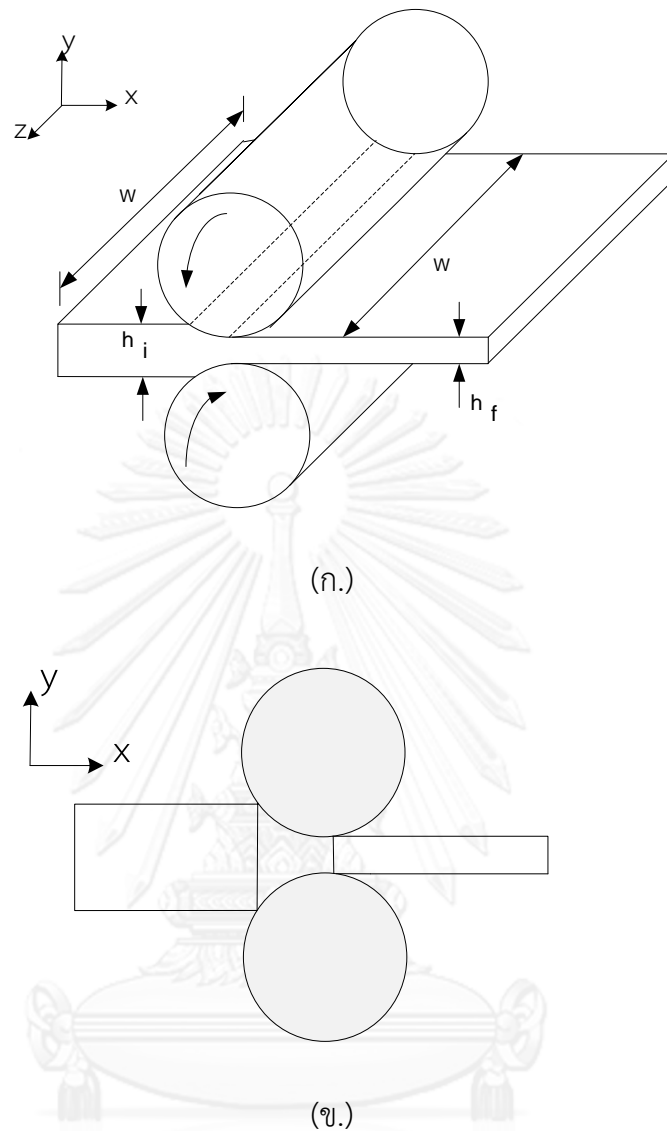
จะเข้าเครื่องรีดหยาบ เหล็กที่ออกจากเตาอ่อนร้อนจะถูกกำจัดสเกล (Scale) ที่เกาะอยู่ที่ผิวออก โดยการฉีดน้ำแรงดันสูงประมาณ 150-180 เพราะสเกลที่เกาะที่ผิว อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผิว เหล็กหลังการรีดหรืออาจก่อให้เกิดปัญหาด้านความแข็งแรงได้ bar หลังจากการรีดหยาบ เหล็กจะถูกอุ่นเพื่อให้อุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงาน จากนั้น เหล็กจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องรีดละเอียด (Finishing mill) เป็นการรีดลดขนาดครั้งสุดท้ายเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดตามต้องการ โดยชิ้นงานที่ได้มีชื่อเรียกที่แตกต่างกันตามขนาด [16] จะเรียกว่า Plate เมื่อความหนาของชิ้นงานมากกว่า 6 มิลลิเมตร เรียกว่า sheet เมื่อความหนาน้อยกว่า 6 มิลลิเมตรและความกว้างมากกว่า 600 มิลลิเมตร และเรียกว่า strip เมื่อความหนาน้อยกว่า 6 มิลลิเมตรและความกว้างน้อยกว่า 600 มิลลิเมตร ชิ้นงานที่ได้หลังจากการรีดละเอียดจะยังคงมีอุณหภูมิสูงประมาณ 520-680°C จึงต้องลดอุณหภูมิลงโดยผ่านม่านน้ำตก (laminar flow)

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อได้เปรียบของการรีดทั้ง 2 ชนิด

| กระบวนการรีดร้อน | กระบวนการรีดเย็น |
|---|--|
| - Flow stress ต่ำ ทำให้ใช้แรงและกำลังในการรีดต่ำ พลังงานในการรีดต่ำ | - ผิวของชิ้นงานมีความสวย เรียบ เงางาม และสะอาด กว่าวิธีการรีดร้อน เพราะการรีดร้อนจะเกิดออกไซด์ที่ผิวของเหล็ก |
| - มีความเหนียว (Ductility) สูง ทำให้ชิ้นงานสามารถเปลี่ยนแปลงรูปทรง (Formability) ได้มากกว่าการรีดเย็น | - สามารถรีดชิ้นงานให้มีขนาดบางมากๆ ได้ |
| - สามารถรีดชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ | - รูปร่างและคุณสมบัติของชิ้นงานใกล้เคียงกับที่ต้องการ |

2.5.3.3 การวิเคราะห์การเสียรูปของชิ้นงาน (Analysis of Deformation)

การเสียรูปของชิ้นงาน หรือ การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของชิ้นงานหลังจากถูกแรงกระทำ จะเริ่มพิจารณาจากกรณีง่ายๆ ก่อน นั่นคือชิ้นงานถูกแรงกระทำจากลูกรีดเพียง 1 คู่ โดยลักษณะการเสียรูปดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งในความเป็นจริงของกระบวนการรีด แต่ละโรงงานจะใช้ลูกรีดหลายชุด เรียงต่อกัน และแต่ละชุดก็มีหลายแบบ ลักษณะของลูกรีดก็ไม่ได้มีเฉพาะลูกรีดแบบคู่เดียว ซึ่งมีความซับซ้อนมากกว่าตัวอย่างที่ยกมา



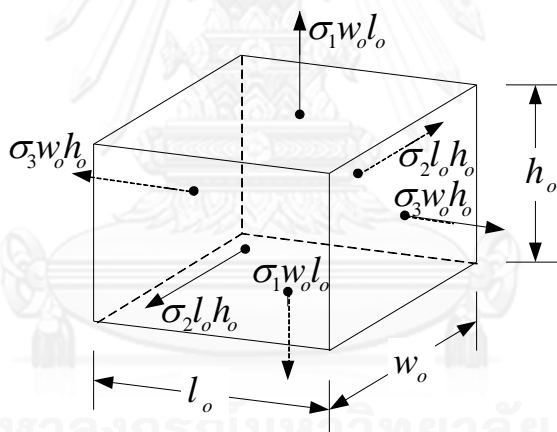
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของการเสียรูปอย่างง่ายที่เกิดขึ้นในกระบวนการรีด

ในกระบวนการรีดเหล็กแท่ง (Billet) จะเกิดการเสียรูปของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไป หรือเกิดความเครียด (Strain) ทั้ง 3 แกน กล่าวคือ พื้นที่หน้าตัดลดลงทั้งในส่วนของความกว้าง (w) และความสูง (h) ในขณะที่ความยาวของชิ้นงานก็จะยาวเพิ่มมากขึ้น และสำหรับการรีดเหล็กแผ่น (Slab) การเสียรูปของชิ้นงานจะเกิดขึ้นเพียง 2 ทิศทาง หรือเกิดความเครียด (Strain) เพียง 2 แกนเท่านั้น คือ ในทิศของความหนาชิ้นงาน และทิศของความยาว โดยส่วนใหญ่จะถือว่าด้านกว้างของชิ้นงานมีค่าคงที่ เมื่อพิจารณาการเสียรูปชิ้นงานจากรูปที่ 2.9 กรณีของการรีดเหล็กแท่งจะเกิดการเสียรูปหรือเกิดความเครียดทั้ง 3 แกน คือ ϵ_x , ϵ_y และ ϵ_z ในขณะที่การรีดเหล็กแผ่นจะถือว่า ϵ_z เท่ากับศูนย์

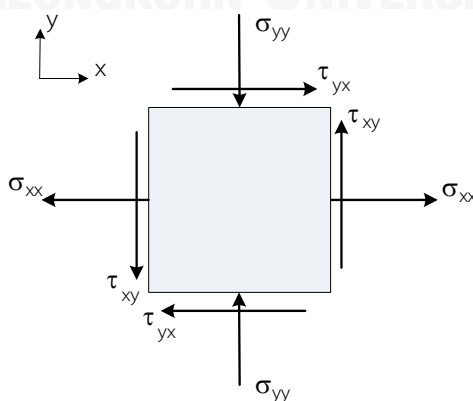
2.5.3.4 พลังงานในการเสียรูปแบบถาวร

กระบวนการเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) เป็นกระบวนการที่ย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible process) กล่าวคือ เมื่อวัสดุมีการเสียรูปร่างไปแล้ว วัสดุจะคงสภาพของรูปร่างสุดท้ายไว้ และไม่สามารถแปรกลับไปเป็นรูปร่างตั้งต้นได้ พลังงานงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุ Energy in plastic deformation นั้นเป็นพลังงานทางกล และโดยส่วนใหญ่แล้วจะเปลี่ยนรูปไปเป็นความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาในของวัสดุ ส่งผลให้วัสดุนั้นสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้

พิจารณาการเสียรูปของเนื้อวัสดุจากรูปที่ 2.9 โดยพิจารณาการเสียรูปเพียงปริมาณเล็กน้อย จะได้ลักษณะของกล่องปริมาตรของวัสดุที่มีเนื้อเดียว (Homogeneous) ดังรูปที่ 2.10 โดยกล่องนี้มีปริมาตร (V) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ ($w_o \times h_o \times l_o$) โดยแรงที่กระทำต่อด้านแต่ละด้านของวัตถุจะมีขนาดเท่ากับผลคูณของค่าความเค้นที่กระทำต่อวัตถุในแกนนั้นกับพื้นที่ผิวที่รองรับความเค้นนั้น ซึ่งความเค้นที่กระทำต่อวัตถุอาจมีทั้งความเค้นตั้งฉาก (Normal stress) และความเค้นเฉือน (Shear stress) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 กล่องปริมาตรของวัสดุเนื้อเดียว (Homogeneous)



รูปที่ 2.11 องค์ประกอบของความเค้น (Stress components) ใน 2 มิติ

$$\varepsilon_l = \varepsilon_x = \ln \frac{l_f}{l_i} \quad ; \dot{\varepsilon}_x = \frac{v_l}{l} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_h = \varepsilon_y = \ln \frac{h_f}{h_i} \quad ; \dot{\varepsilon}_y = \frac{v_h}{h} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_w = \varepsilon_z = \ln \frac{w_f}{w_i} \quad ; \dot{\varepsilon}_z = \frac{v_w}{w} \quad (2.24)$$

เมื่อวัสดุมีแรงหรือความเค้นมากระทำ จะทำให้วัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือเปลี่ยนความยาวไป โดยนิยามของค่าความเครียดในแนวแกน คือ ค่าความยาวที่เปลี่ยนไปในแนวที่แรงมากระทำต่อความยาวเดิม ดังนั้น ความเครียดที่เกิดขึ้นบนวัตถุในแต่ละแกน สามารถเขียนแสดงได้ดังสมการ (2.22) - (2.24) [16, 17] โดยผลรวมของค่าความเครียดทั้ง 3 แกนมีค่าเป็นศูนย์ เพราะ การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงหรือเสียรูปแบบถาวร (Plastic deformation) ซึ่งตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า ปริมาตรของวัสดุที่เกิดการเสียรูปมีค่าคงที่

$$dV = d(xyz) = 0 \quad (2.25)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (2.26)$$

การพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปทรงเหล็ก (Deformation energy) สามารถพิจารณาได้หลายแนวทาง โดยมีหลายตัวแปรและปัจจัยที่ส่งผลต่อพลังงานที่ใช้ เช่น อุณหภูมิของเหล็ก ส่วนผสมของธาตุต่างๆภายในเนื้อเหล็ก เป็นต้น ดังนั้น การพิจารณาพลังงาน

ในการเปลี่ยนรูปทรงจึงค่อนข้างซับซ้อน มีหลายทฤษฎีและงานวิจัยที่ได้เสนอแนวทางในการพิจารณาพลังงานในการเปลี่ยนรูปทรงของเหล็ก

ในการรีดเหล็กจากความยาวตั้งต้น l_0 และมีพื้นที่หน้าตัดเป็น $w_0 h_0$ จะต้องใช้แรงขนาด F กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดเพื่อทำให้วัตถุมีความยาวเปลี่ยนไป dl ดังนั้น จะต้องทำงาน dw เท่ากับ Fdl และเมื่อพิจารณาพลังงานที่ทำให้วัตถุปริมาตร (V) มีรูปทรงเปลี่ยนไป หรือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร จะเขียนได้ดังสมการที่ (2.27) [17]

$$dw = \frac{Fdl}{w_0 h_0 l_0} = \left(\frac{F}{w_0 h_0} \right) \left(\frac{dl}{l_0} \right) \quad (2.27)$$

$$dw = \sigma d\varepsilon \quad (2.28)$$

กระจายสมการ (2.28) ในสามแกนหลัก จะได้ว่า

$$dw = \sigma_1 d\varepsilon_1 + \sigma_2 d\varepsilon_2 + \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (2.29)$$

สมการที่ (2.29) เป็นสมการที่ใช้พิจารณาหางานหรือพลังงานต่อหน่วยปริมาตรเพื่อเปลี่ยนรูปทรงเหล็ก (Deformation energy per unit volume) ดังนั้น เมื่อพิจารณางานหรือพลังงานที่ใช้ในการรีด สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.30) [18] และ (2.31)

$$E_{in} = V \int_{t_i}^{t_f} (\sigma_1 \dot{\varepsilon}_1 + \sigma_2 \dot{\varepsilon}_2 + \sigma_3 \dot{\varepsilon}_3) dt \quad (2.30)$$

เมื่อ $\dot{\varepsilon} dt = d\varepsilon$ และ $V = m / \rho$

จะได้ว่า

$$E_{in} = \frac{m_{steel}}{\rho_{steel}} \int_0^{\epsilon_f} (\sigma_1 d\epsilon_1 + \sigma_2 d\epsilon_2 + \sigma_3 d\epsilon_3) \quad (2.31)$$

เมื่อจัดรูปสมการ (2.31) ใหม่ ให้อยู่ในรูปของพลังงานต่อหน่วยมวลหรือ SEC

จะได้ว่า

$$SEC = \frac{E_{in}}{m_{steel}} = \frac{1}{\rho_{steel}} \int_0^{\epsilon_f} (\sigma_1 d\epsilon_1 + \sigma_2 d\epsilon_2 + \sigma_3 d\epsilon_3) \quad (2.32)$$

- เมื่อ m_{steel} คือ มวลของเหล็ก (kg)
 σ คือ ค่าความเคียด (Normal stress) (N/m²)
 ϵ คือ ค่า Strain หรือ ค่า deformation
 ρ_{steel} คือ ความหนาแน่นของเหล็ก (kg/m³)
 V คือ ปริมาตรของเหล็ก (m³)

จะเห็นว่า การพิจารณา SEC จากสมการที่ (2.32) จะต้องทราบความหนาแน่นของเหล็กที่อุณหภูมิขณะรีด ค่าความเค้นและค่าความเคียดในแต่ละทิศทางของการรีด ซึ่งโดยปกติ ค่าความเค้น (Stress) เป็นฟังก์ชันของค่าความเคียด (Strain) ค่าอัตราการเปลี่ยนความเคียด (Rate of strain) อุณหภูมิ (Temperature) และค่าพลังงานกระตุ้นหรือพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.33) [19]

$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T, Q) \quad (2.33)$$

ดังที่ได้กล่าวมาว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าความเค้น โดยการรีด เมื่อมีทั้งการรีดที่อุณหภูมิสูงและที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งสองสภาวะก็ส่งผลต่อค่าความเค้นที่แตกต่างกัน นอกจากนี้สัดส่วนของส่วนผสมภายในเนื้อเหล็กที่แตกต่างกันย่อมส่งผลต่อค่าความเค้นด้วย ดังนั้น สมการหรือความสัมพันธ์ที่ใช้อธิบายค่าความเค้นจึงมีได้หลากหลายสมการ

เพราะฉะนั้น การพิจารณา SEC จากสมการที่ (2.32) จึงต้องรู้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและค่าความเครียด (Stress-strain relations) ก่อน แล้วจึงแทนค่าลงไปในสมการได้

สำหรับความสัมพันธ์ของค่าความเค้นและค่าความเครียด มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาและค้นคว้า และได้กำหนดกฎยกกำลัง (Power law) ไว้ เมื่อเป็นการรีดเย็นความสัมพันธ์จะถูกเขียนแทนด้วยสมการที่ (2.34) [20] ในขณะที่ หากเป็นการรีดร้อน ความสัมพันธ์ถูกเขียนได้ดังสมการที่ (2.35) [20]

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2.34)$$

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^m \quad (2.35)$$

- เมื่อ σ คือ ค่า Stress (N/m^2 , Pa)
 ε คือ ค่า Strain หรือ ค่า deformation
 $\dot{\varepsilon}$ คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนความเครียด (Rate of Strain) ($/\text{s}^{-1}$)
 K คือ ค่าคงที่ของวัสดุ (Material constant) หรือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านการดึง (Strength coefficient)
 C คือ ค่าคงที่ของวัสดุ (Material constant)
 n คือ ค่าเลขชี้กำลังการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Strain hardening exponent)
 m คือ ค่า Strain rate hardening exponent

2.5.4 กระบวนการเคลือบผิว (Coating)

กระบวนการเคลือบผิวเหล็ก (Coating) เป็นกระบวนการห่อหุ้มผิวเหล็กด้วยสารเคลือบต่างๆ การห่อหุ้มก็เพื่อป้องกันการผุกร่อนของเหล็กจากการใช้งานและสภาพแวดล้อม โดยให้สารเคลือบทำหน้าที่ผุกร่อนแทนเนื้อเหล็ก (Sacrificial protection) นอกจากการป้องกันการผุกร่อนแล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์เหล็ก และเพิ่มความสวยงามอีกด้วย ซึ่งสารเคลือบที่ใช้อาจเป็นกลุ่มโลหะ ที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สังกะสี หรือไมก็ เป็น ดีบุกและโครเมียม นอกจากนั้นแล้ว อาจเป็นกลุ่มที่ไม่ใช่โลหะ เช่น เคลือบด้วยสี หรือสารเคลือบเงา (Vanish) ซึ่งปัจจุบันวิธีการที่ใช้เคลือบก็มีมากมายหลากหลายวิธีด้วยกัน อาทิเช่น การเคลือบด้วยวิธีจุ่มร้อน (Hot dipping) การเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electroplating or Electro galvanizing) การทาหรือการพ่น เป็นต้น

2.5.4.1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน (Hot dipping)

การเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อนเป็นการเคลือบที่เหมาะสมสำหรับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ [21] โดยจะใช้วิธีจุ่มวัสดุที่ต้องการเคลือบผิวลงในอ่างของโลหะหลอมเหลวที่จะนำไปเคลือบ ซึ่งการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อนในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะพิจารณาเฉพาะการเคลือบด้วยสังกะสีลงบนผิวเหล็ก 2 ประเภท ได้แก่ เหล็กแผ่น (Hot dip galvanized steel sheet; HDG) และท่อเหล็ก (Galvanized steel pipe; GSP)

ขั้นตอนการผลิตเริ่มจากการเตรียมชิ้นงาน โดยในการผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีจะต้องเชื่อมต่อเหล็กแผ่นรีดเย็นระหว่างมันเข้าด้วยกัน เพื่อให้การผลิตมีความต่อเนื่อง และจึงผ่านเหล็กแผ่นเข้าสู่ Accumulator เพื่อปรับความเร็วให้ผ่านไปยังขั้นตอนของการเคลือบได้อย่างสม่ำเสมอ แต่ก่อนถึงขั้นตอนของการเคลือบผิว เหล็กแผ่นจะถูกทำความสะอาดผิว ซึ่งถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะสิ่งสกปรกที่เกาะที่ผิวเหล็กจะเป็นตัวขัดขวางปฏิกิริยาเคมีหรือพันธะทางเคมีที่จะเกิดขึ้นระหว่างผิวเหล็กและสังกะสีหลอมเหลว [21] ส่วนขั้นตอนการผลิตของการเคลือบผิวท่อเหล็กชุบสังกะสี จะนำท่อเหล็ก ERW ที่ได้จากการขึ้นรูปเย็นเหล็กแผ่นรีดร้อนเป็นรูปท่อ และเชื่อมตามขอบรอยต่อด้วยเครื่องเชื่อมแบบ ERW (Electric Resistance Welding) ท่อเหล็กจะถูกส่งไปทำความสะอาดผิวก่อนเช่นเดียวกัน ซึ่งขั้นตอนการทำความสะอาดแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ

- 1) การทำความสะอาดด้วยเบสร้อน (Hot alkaline solution) เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) เพื่อขจัดคราบน้ำมันและเศษฝุ่นที่เกาะที่ผิว
- 2) การทำความสะอาดด้วยกรด ซึ่งอาจเป็นสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) หรือสารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เจือจาง [21] เพื่อขจัดคราบฟลักซ์และสนิมออก

3) การทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า เพื่อล้างชิ้นงานให้สะอาดอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งทำให้สังกะสีที่เคลือบสามารถเกาะติดที่ผิวได้ดีขึ้น

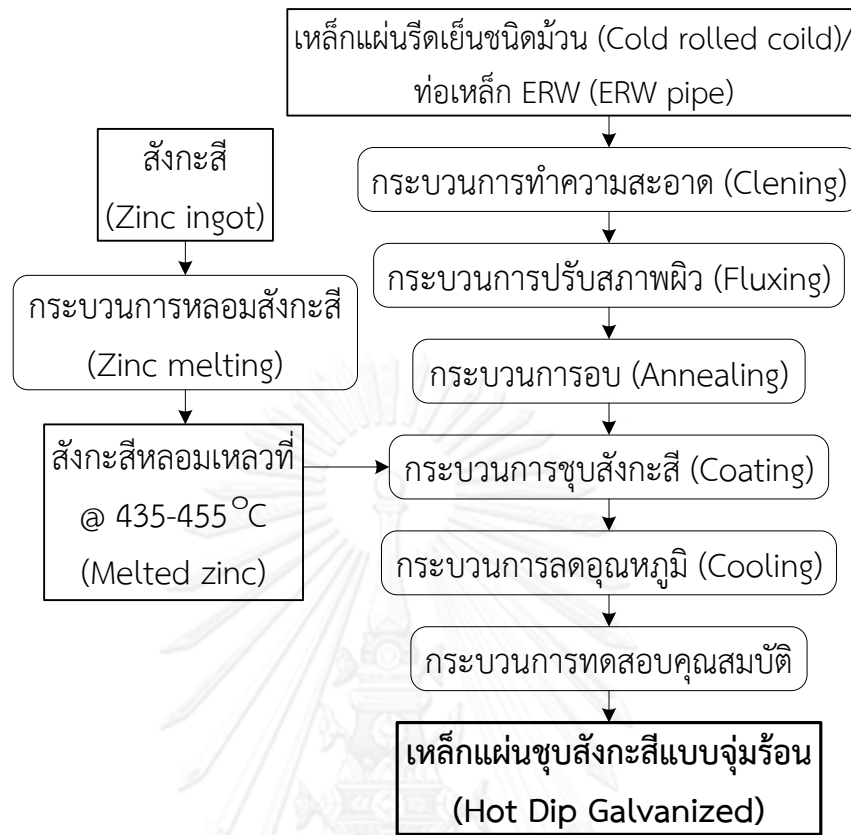
ชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วจะถูกส่งไปยังกระบวนการปรับสภาพผิว (Fluxing) โดยจุ่มลงในบ่อฟลักซ์หรือบ่อสารละลายซิงค์แอมโมเนียมคลอไรด์ (Zinc Ammonium Chloride solution) [21] เพื่อปรับสภาพผิว นอกจากเป็นการขจัดออกไซด์แล้ว ยังเป็นการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของผิวเหล็กก่อนการชุบอีกด้วย ทำให้สังกะสีที่จะชุบยึดติดแน่นยิ่งขึ้น โดยกระบวนการปรับสภาพผิวหรือการจุ่มฟลักซ์มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีการ [22] คือ

- 1) การจุ่มฟลักซ์แบบเปียก สารละลายซิงค์แอมโมเนียมคลอไรด์จะลอยเป็นชั้นอยู่เหนือสังกะสีหลอมเหลว เหล็กจะถูกจุ่มผ่านชั้นฟลักซ์และผ่านต่อไปยัง ชั้นของสังกะสีหลอมเหลวทันที
- 2) การจุ่มฟลักซ์แบบแห้ง เหล็กแผ่นจะถูกจุ่มลงในสารละลายซิงค์แอมโมเนียมคลอไรด์และรอให้ชิ้นงานแห้งก่อน แล้วจึงจุ่มชิ้นงานลงในบ่อสังกะสี

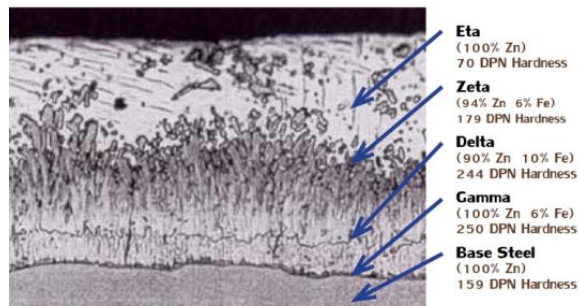
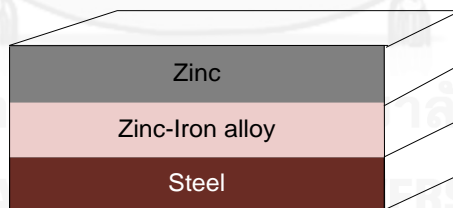
เมื่อทำความสะอาดผิวแล้วเสร็จ เหล็กแผ่นหรือท่อเหล็กจะถูกนำเข้าสู่เตาอบ (Annealing furnace) นอกจากทำให้เหล็กที่ผ่านการรีดเย็นหรือการเชื่อมเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) แล้ว ยังเป็นการลดความเครียด หลังจากการรีดเย็นหรือการเชื่อมอีกด้วย เมื่อชิ้นงานมีสภาพพร้อมที่จะเคลือบ ชิ้นงานจะถูกจุ่มลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลว (Zinc bath) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 435-455°C [21, 22] เหล็กแผ่นที่เคลือบสังกะสีแล้ว จะผ่าน Gas-knives หรือ Air blower ซึ่งใช้อากาศหรือไอเพื่อควบคุมปริมาณและความหนาของสังกะสีที่เคลือบ จากนั้นจึงลดอุณหภูมิของชิ้นงานลงจนเหลือเท่ากับอุณหภูมิห้อง ขั้นตอนสุดท้ายคือ การตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น การตรวจสอบสภาพผิวและความหนาของสังกะสี การทดสอบแรงดัด เป็นต้น ขั้นตอนการผลิตดังกล่าวมาได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.12

หลังจากจุ่มเหล็กลงในอ่างสังกะสีหลอมเหลว สังกะสี (Zn) จะเข้าทำปฏิกิริยากับ (Fe) ที่ผิวของเนื้อเหล็ก เกิดเป็นสารประกอบโลหะ (Metallic compound) [21] ระหว่างกัน ได้เป็นชั้นของสารประกอบสังกะสี-ไอรอน (Zinc-Iron alloy) โดยในส่วนบนสุดจะเป็นชั้นของสังกะสี [23, 24] ซึ่งร้อยละของสังกะสีที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบสังกะสี-ไอรอนจะเพิ่มขึ้นตามลำดับความหนาของสังกะสี ดังแสดงในรูปที่ 2.13 [23]

นอกจากนี้การพิจารณาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อนจะพิจารณาเฉพาะช่วงของการรักษาระดับปริมาณสังกะสีในบ่อสังกะสี (Zinc bath) เพียงอย่างเดียว กล่าวคือ จะพิจารณาเฉพาะพลังงานที่ให้กับสังกะสีที่ถูกเติมลงในบ่อสังกะสีหลอมเหลว โดยไม่ได้สนใจพลังงานที่ใช้เพื่อหลอมสังกะสีในขั้นตอนแรกของการดำเนินการ



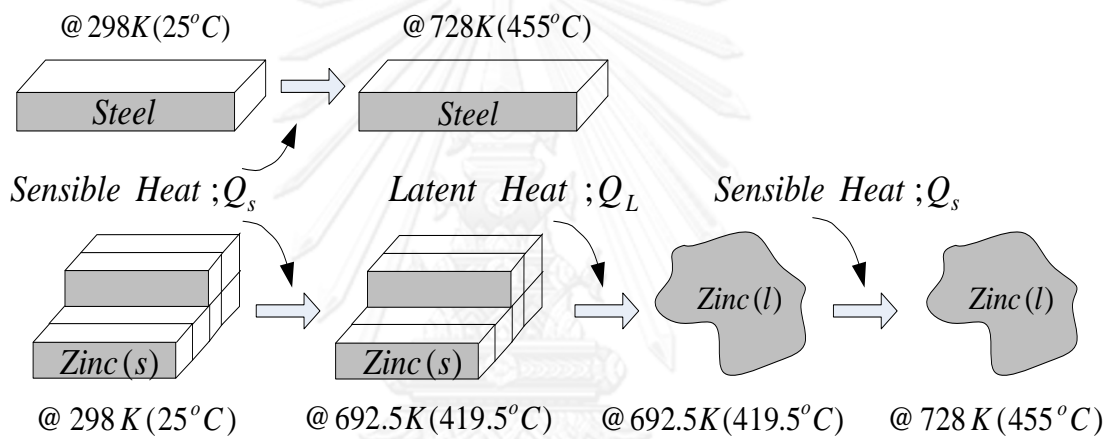
รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการผลิตเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อน (Hot Dip Galvanized)



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของชั้นเคลือบสังกะสี

ในขั้นตอนการเคลือบ วัสดุที่ต้องการเคลือบผิว จะถูกจุ่มลงในบ่อสังกะสีหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 435-455°C [21, 22] ดังนั้น พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้สำหรับการผลิตด้วยวิธีนี้คือ พลังงานความร้อนเพื่อทำให้สังกะสีและเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Sensible heat; Q_s) พลังงานความร้อนเพื่อทำให้สังกะสีหลอมเหลว (Latent heat; Q_L) และยังมีพลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นสังกะสีให้ร้อนและเหลวอยู่ตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งค่าพลังงานความร้อนที่ใช้สามารถหาได้จากสมการที่ (2.36) และ (2.37)

เพราะฉะนั้น ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกระบวนการเคลือบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อนสามารถพิจารณาได้ด้วยสมการที่ (2.39)



รูปที่ 2.14 พลังงานของกระบวนการเคลือบผิวด้วยสังกะสีแบบวิธีจุ่มร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$Q = Q_{s,zn} + Q_{L,zn} + Q_{s,st} \quad (2.36)$$

$$Q = \int m_{zn} c_{p,zn} dT + m_{zn} L_{f,zn} + \int m_{steel} c_{ps} dT \quad (2.37)$$

$$\frac{Q}{m_{total}} = \int \frac{m_{zn}}{m_{total}} c_{p,zn} dT + \frac{m_{zn}}{m_{total}} L_{f,zn} + \int \frac{m_{steel}}{m_{total}} c_{ps} dT \quad (2.38)$$

เมื่อ $m_{total} = m_{zn} + m_{steel}$

$$\text{ดังนั้น} \quad SEC = \int \frac{m_{zn}}{m_{total}} c_{p,zn} dT + \frac{m_{zn}}{m_{total}} L_{f,zn} + \int \frac{m_{steel}}{m_{total}} c_{ps} dT \quad (2.39)$$

เมื่อ m_{zn} คือ มวลของสังกะสี (kg)

m_{steel} คือ มวลของเหล็ก (kg)

$c_{p,zn}$ คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของสังกะสี (J/kg·K)

c_{ps} คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก (J/kg·K)

T คือ อุณหภูมิ (K)

$L_{f,zn}$ คือ ค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของสังกะสี (J/kg)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทั่วไปของสังกะสี

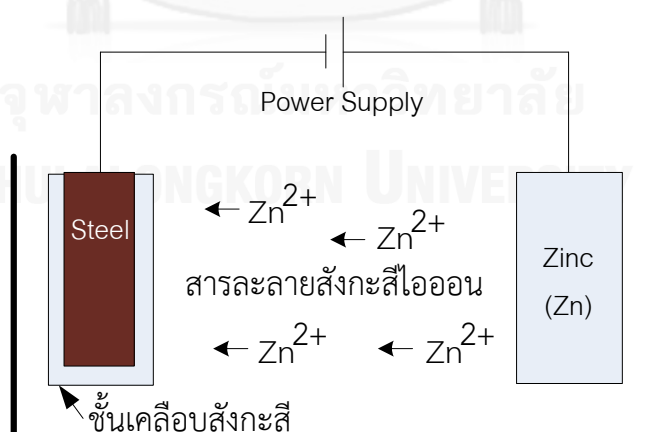
| ตัวแปร | ฟังก์ชัน/ปริมาณ | หน่วย |
|-------------------------------|------------------|----------|
| Melting point (MP.) [25] | 692.5 | (K) |
| C_p of Zn(s) | $0.1542T+343.74$ | (J/kg·K) |
| C_p of Zn(l) | 481.87 | (J/kg·K) |
| L_f (latent heat of fusion) | 111.8 | (kJ/kg) |

2.5.4.2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า (Electroplating)

กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electroplating/Electrodepositing) นับเป็นการเคลือบวิธีหนึ่งที่ย่าง รวดเร็วและใช้ต้นทุนไม่สูงมากนัก [26, 27] เพื่อเคลือบโลหะหรือโลหะผสม เช่น สังกะสี ทองแดง ดีบุกหรือโครเมียม ลงบนผิวของชิ้นงานที่ต้องการ โดยใช้ไฟฟ้าเป็นกลไกที่ทำให้เกิดขึ้นของชั้นเคลือบผิว โดยวัตถุประสงค์ของการเคลือบผิว (Coating) นอกจากเป็นการเพิ่มความสวยงาม เพิ่มมูลค่าให้กับชิ้นงานแล้วยังเป็นการป้องกันการผุกร่อนจากสภาพแวดล้อมและจากการใช้งานอีกด้วย [26, 27]

กระบวนการเคลือบผิว จะใช้กระแสไฟฟ้าเป็นกลไกทำให้เกิดขึ้นของชั้นเคลือบผิว กระแสไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นไฟกระแสตรง (Direct current; DC) ที่มีความดันต่ำ (Low voltage) โดยวัสดุที่ต้องการเคลือบผิว ได้แก่ เหล็ก จะถูกต่อไว้กับขั้วลบ (Cathode) และวัสดุที่ใช้เคลือบ ได้แก่ สังกะสี ดีบุกหรือโครเมียม จะถูกต่อเข้ากับขั้วบวก (Anode) ของแหล่งจ่าย ทั้งแผ่นที่ถูกต่อเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบถูกจุ่มอยู่ในสารละลายหรืออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ที่สามารถแตกตัวและนำไฟฟ้าได้ ทำให้ทั้งแหล่งจ่าย ขั้วบวก ขั้วลบ และสารละลายต่อกันแบบครบวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.15

สำหรับสารละลายที่ใช้จะเป็นสารอะไร ก็ขึ้นอยู่กับว่า ขั้วบวกที่จุ่มในสารละลายเป็นโลหะใด เช่น ถ้าเป็นสังกะสี สารละลายที่ใช้จะเป็น สารละลายซิงค์ซัลเฟต (Zinc sulphate; $ZnSO_4$) ถ้าเป็นดีบุกหรือโครเมียม สารละลายที่ใช้จะเป็นสารละลายทินไนเตรต (Tin nitrate; $SnNO_3$) และสารละลายกรดโครมิก (Chromic acid; CrO_3) [28] ตามลำดับ



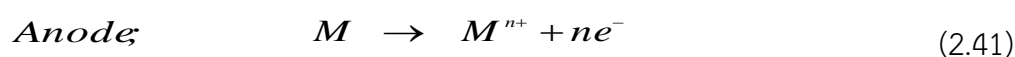
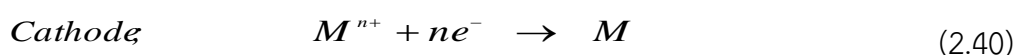
รูปที่ 2.15 การเคลือบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (Electroplating)

การเคลือบด้วยวิธีนี้จะทำที่อุณหภูมิห้อง โดยก่อนการเคลือบ เหล็กแผ่นจะผ่านขั้นตอนของการเตรียมผิว (Surface preparation) เพื่อให้ผิวชิ้นงานสะอาดและมีคุณสมบัติที่เหมาะสม โดยทั่วไป การเตรียมผิวชิ้นงานจะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก [29] ได้แก่ การทำความสะอาด (Surface cleaning) การปรับสภาพผิว (Surface treatment) และการล้าง (Rinsing)

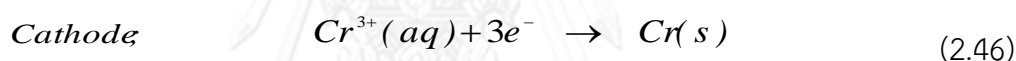
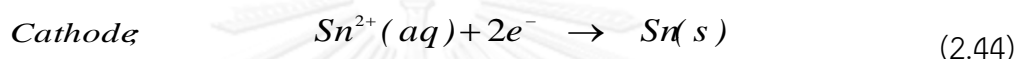
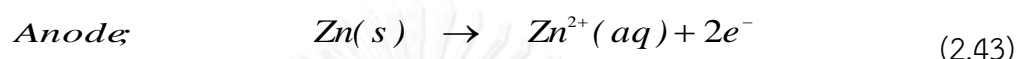
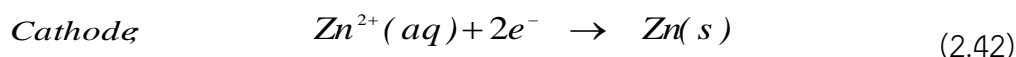
ในการทำความสะอาดผิวเหล็กเพื่อขจัดสิ่งสกปรก เช่น คราบน้ำมัน คราบสนิม และเศษฝุ่นที่เกาะอยู่ที่ผิวออก ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะเป็นตัวขัดขวางการเคลือบ ทำให้การเคลือบมีคุณภาพลดลง โดยมีข้อที่ควรระวังที่สุดคือ การทำความสะอาดจะต้องไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับผิวของเหล็ก โดยทั่วไปมี 2 วิธีการคือ การทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมีและวิธีทางกล การทำความสะอาดด้วยวิธีทางเคมี ได้แก่ การทำความสะอาดด้วยเบส เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) เพื่อขจัดคราบไขมันหรือสารอินทรีย์ต่างๆ การทำความสะอาดด้วยกรด เพื่อขจัดออกไซด์หรือสเกล (Scale) ที่ติดอยู่ที่ผิวเหล็กออก โดยจุ่มลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) หรือสารละลายกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) การทำความสะอาดด้วยน้ำ เพื่อขจัดสารละลายที่อาจติดมาจากขั้นตอนก่อนนี้ หรือขจัดสิ่งสกปรกอีกครั้งหนึ่งก่อนจะส่งชิ้นงานไปยังขั้นตอนต่อไป การทำความสะอาดโดยวิธีทางกล (Mechanical approaches) เช่น การขัด (Polishing) เพื่อทำให้ผิวเรียบสม่ำเสมอ

สมการปฏิกิริยา

เมื่อเกิดการถ่ายเทของอิเล็กตรอนและไอออนต่างๆขณะเกิดปฏิกิริยา ไอออนบวกจะเคลื่อนไปหาขั้วลบ และไอออนลบก็จะเคลื่อนไปหาขั้วบวก วัสดุที่ต่อกับขั้วบวกจะได้รับ e^- จากสารละลายเรียกว่าเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) ส่วนวัสดุที่ต่อกับขั้วลบจะสูญเสีย e^- ให้กับสารละลายเรียกว่าเป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) หรือกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) จะเกิดขึ้นที่ขั้วบวก (Anode) และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) จะเกิดขึ้นที่ขั้วลบ (Cathode) โดย สมการปฏิกิริยาทั่วไปที่เกิดขึ้นที่ทั้ง 2 ขั้วในสารละลายสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.40) และ (2.41) [30]



ดังนั้น ในการเคลือบผิวด้วยสังกะสี (*Zn*) ดีบุก (*Sn*) และโครเมียม (*Cr*) สามารถเขียนปฏิกิริยาเคมีได้ดังสมการที่ (2.42) - (2.47)



เนื่องจากกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นเคลือบผิวในลักษณะนี้ ใช้ไฟฟ้าเป็นกลไกหลักในการผลิต และจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการถ่ายเทหรือเคลื่อนย้ายของประจุไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่ใช้ ปริมาณประจุและปริมาณหรือมวลของสารที่เคลือบอยู่บนผิว (Mass deposited) สัมพันธ์กันตามกฎข้อที่ 1 ของฟาราเดย์ (Faraday's first law of electrolysis) ที่ได้กล่าวไว้ว่า ปริมาณของวัสดุที่เคลือบที่ผิวแปรผันโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.48)

$$m \propto Q \quad (2.48)$$

โดยปริมาณไฟฟ้า (I) 1 แอมแปร์ คือปริมาณประจุไฟฟ้า (Q) ที่ผ่านที่ใดๆ ในเวลา (t) 1 วินาที เขียนได้ดังสมการที่ (2.49) ซึ่งประจูดังกล่าวคือ อิเล็กตรอน

$$Q = \int Idt \quad (2.49)$$

โดยปกติ สสาร 1 โมล ประกอบด้วยอิเล็กตรอน 6.02×10^{23} อิเล็กตรอน และอิเล็กตรอน 1 ตัว มีประจุไฟฟ้า 1.6×10^{-19} คูลอมป์ ดังนั้น อิเล็กตรอน 1 โมล จะมีประจุไฟฟ้าประมาณ 96,500 คูลอมป์ ซึ่งเป็นที่มาของค่าคงที่ของฟาราเดย์ (K_F) โดย 1 ฟาราเดย์ (F) มีค่าเท่ากับ 96,500 คูลอมป์ เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.50)

$$K_F = (6.02 \times 10^{23}) \cdot (1.6 \times 10^{-19}) = 96,500 = 9.65 \times 10^4 \text{ C/mol} \quad (2.50)$$

เขียนได้เป็น

$$Q = Mn_e N_a Q_e \quad (2.51)$$

$$M = \frac{Q}{n_e K_F} \quad (2.52)$$

มวลของโลหะที่เคลือบอยู่ที่ผิว พิจารณาได้จากสมการ (2.53)

$$m_d = \frac{AW}{n_e K_F} \int Idt \quad (2.53)$$

โดยงานในการย้ายประจุ (Q) ในบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้า (V) เป็นไปตามสมการที่ (2.54)

$$W = QV = V \int Idt = E \quad (2.54)$$

แทนค่าสมการ (2.54) ลงในสมการ (2.53) จะได้มวล (m) ของสังกะสี ดีบุกหรือโครเมียมที่เคลือบอยู่ที่ผิวของเหล็กดังสมการที่ (2.55)

$$m_d = \frac{AW.}{n_e \cdot K_F V} V \int Idt = \frac{AW.}{n_e \cdot K_F V} E \quad (2.55)$$

ดังนั้น ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ต่อมวลของโลหะที่มากลือบที่ผิว (m_d) จะหาได้จากสมการที่ (2.56)

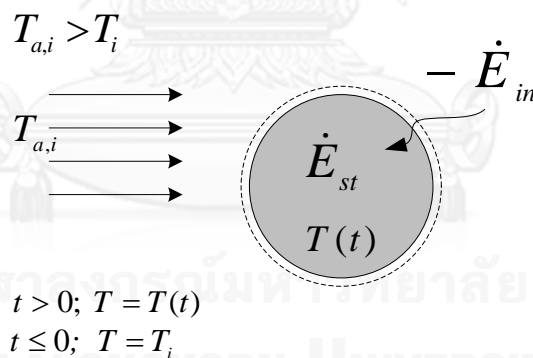
$$SEC_d = \frac{E}{m_d} = \frac{n_e \cdot K_F V}{AW.} \quad (2.56)$$

| | | |
|-------|-------|---|
| เมื่อ | Q | คือ ปริมาณประจุไฟฟ้า (C) |
| | M | คือ โมลอะตอมของโลหะ |
| | n_e | คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยา |
| | N_a | คือ ตัวเลขอาโวกาโดร (Avogadro's number) หรือ จำนวนอะตอมใน 1 โมล |
| | Q_e | คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าต่ออิเล็กตรอน (C) |
| | K_F | คือ ค่าคงตัวของฟาราเดย์ (Faraday's constant) |
| | AW | คือ น้ำหนักอะตอมของโลหะ (g/mol) |
| | I | คือ กระแสไฟฟ้า (A) |
| | V | คือ ค่าความต่างศักย์ (V) |
| | m_d | คือ มวลของโลหะที่เคลือบอยู่ที่ผิว (g) |

2.6 ทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของวัตถุผิวเรียบที่มีอุณหภูมิเริ่มต้น T_i ซึ่งถูกวางไว้ และมีของไหลซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ $T_{a,i}$ ไหลผ่านโดยรอบโดยที่ $T_{a,i} > T_i$ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เมื่อเวลาผ่านไป จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากของไหลซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าสู่วัตถุโดยการพาความร้อน (Convection) ไปยังที่ผิวสัมผัสของวัตถุกับของไหล จากนั้นอุณหภูมิของวัตถุจะค่อยๆเพิ่มขึ้น โดยค่อยๆเพิ่มขึ้นจากที่ผิวภายนอกซึ่งเป็นบริเวณที่สัมผัสกับของไหลเข้าสู่จุดกึ่งกลางของทรงกลมตามแนวรัศมี

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุใดๆ จะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดและขนาดของวัสดุ กล่าวคือ วัสดุแต่ละชนิดจะมีสมบัติหรือความสามารถในการนำความร้อนได้แตกต่างกัน สมบัตินี้ถูกเรียกว่า สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity; k) และสำหรับวัตถุที่มีขนาดใหญ่ก็จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ช้ากว่าวัตถุขนาดเล็ก ขนาดของวัตถุนี้บางครั้งอาจเรียกว่า ความยาวคุณลักษณะ (Characteristic length; L_c) ปัจจัยทั้งสองดังที่ได้กล่าวมาจะเป็นตัวแปรที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ ถือเป็นความต้านทานภายใน (Internal resistance; R_{internal}) ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในเนื้อวัตถุ [31]



รูปที่ 2.16 การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลร้อนและวัตถุ

นอกจากนี้ การถ่ายเทความร้อนจากของไหลสู่วัตถุจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ พื้นที่ผิวสัมผัสและสัมประสิทธิ์การพาความร้อน กล่าวคือ พื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area; A_s) คือ พื้นที่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ยิ่งพื้นที่สัมผัสมาก การถ่ายเทความร้อนยิ่งเกิดขึ้นได้รวดเร็ว และยังไปกว่านั้น หากค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูง การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลและวัตถุจะเกิดขึ้นดีและรวดเร็ว ทั้งพื้นที่ผิวสัมผัสและค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนปัจจัยที่ส่งผลต่อการถ่ายโอนระหว่างพลังงานความร้อนจาก

ของไหลไปสู่วัตถุ ซึ่งนับว่าเป็นความต้านทานภายนอกของการถ่ายเทความร้อน (External resistance; R_{external}) หรืออาจเรียกเป็น ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่ผิว (Surface resistance; R_{surface}) โดยในที่นี้จะขอใช้คำว่า ความต้านทานภายนอกของการถ่ายเทความร้อน

ดังนั้น จากระบบของการถ่ายเทความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.16 จึงสรุปได้ว่าการถ่ายเทความร้อนหรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในระบบขึ้นอยู่กับ ความต้านทานภายในและความต้านทานภายนอก หากระบบหรือวัตถุมีความต้านทานภายในต่ำ หรือมีค่าความต้านทานผิวสูง ระบบหรือวัตถุนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในระบบต่ำไปด้วย

จากปัจจัยที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน ไม่ว่าจะเป็นทั้งความต้านทานภายในและความต้านทานภายนอกดังที่กล่าวมา สามารถนิยามเป็นตัวแปรได้เพิ่มอีกหนึ่งตัว ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความต้านทานภายในต่อความต้านทานภายนอก ตัวแปรชนิดนี้มีชื่อว่า ตัวเลขไบออต (Biot Number)

สำหรับตัวเลขไบออต (Biot Number) เป็นตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless) ที่แทนความสัมพันธ์ของความต้านทานภายใน (R_{internal}) ต่อความต้านทานภายนอก (R_{external}) เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.57) [31]

$$Bi = \frac{R_{\text{internal}}}{R_{\text{external}}} = \frac{\left(\frac{L_c}{kA_s} \right)}{\left(\frac{1}{hA_s} \right)} \quad (2.57)$$

เมื่อ L_c แทน ความยาวคุณลักษณะ (m)

h แทน สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)

k แทน สภาพการนำความร้อนของวัสดุ ($W/m \cdot K$)

A_s แทน พื้นที่ผิวของวัสดุ (m^2)

สำหรับความยาวคุณลักษณะ (Characteristic length; L_c) ของวัสดุ จะนิยามเป็นอัตราส่วนของปริมาตร (V) ต่อพื้นที่ผิว (A_s) ของวัสดุนั้น เพราะฉะนั้น สำหรับทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) หรือรัศมี ($r = d/2$) จะให้ค่าความยาวคุณลักษณะดังสมการที่ (2.59)

$$\text{จาก} \quad L_c = \frac{V}{A_s} \quad (2.58)$$

เมื่อ $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ และ $A_s = 4\pi r^2$

ดังนั้น
$$L_c = \frac{r}{3} = \frac{d}{6} \quad (2.59)$$

และเมื่อแทนค่า L_c จากสมการที่ (2.59) ลงในสมการที่ (2.58) จะได้ค่า Bi ถูกเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.60) [31]

$$Bi = \frac{h r}{k 3} \quad (2.60)$$

2.6.1 การถ่ายเทความร้อนระบบก้อน (Lumped Capacitance Method)

สำหรับการถ่ายเทความร้อนระบบก้อน จะตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อวัสดุเท่ากันตลอด นั่นหมายถึง ที่ตำแหน่งใดๆ ในทรงกลมจะมีอุณหภูมิเท่ากัน ($dT/dr = 0$) ซึ่งสมมติฐานนี้จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อ ความต้านทานภายในเนื้อวัสดุมีค่าต่ำมากและความต้านทานภายนอกมีค่าสูงมาก หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า สภาพการนำความร้อนของวัสดุ (k) มีค่าสูง ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าต่ำ โดยจะพิจารณาจากค่า Bi ซึ่งต้องมีค่าน้อยกว่า 0.1 ($Bi < 0.1$) [31] ดังนั้น จากเงื่อนไขทั้งหมดที่กล่าวมา จะทำให้การถ่ายเทความร้อนขึ้นกับเวลาเพียงอย่างเดียว

การพิจารณาหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอาศัยสมการสมดุลพลังงาน กล่าวคือ อัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนของของไหลที่ผิวของวัตถุจะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของวัตถุ โดยละเว้นการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อวัตถุ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.61)

$$-\dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (2.61)$$

หรือ
$$-hA_s(T - T_{a,i}) = \rho_s V_s c_{p,s} \frac{dT}{dt} \quad (2.62)$$

จัดรูปสมการ จะได้ว่า

$$\frac{d(T - T_{a,i})}{(T - T_{a,i})} = -\frac{hA_s}{\rho_s V_s c_{p,s}} dt \quad (2.63)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.63) จากเงื่อนไขตั้งต้น คือ ที่เวลา $t = 0$, $T = T_i$ ไปจนถึงที่เวลา t ใดๆ

$$\int_{T=T_i}^{T(t)} \frac{d(T - T_{a,i})}{(T - T_{a,i})} = \int_{t=0}^t -\frac{hA_s}{\rho_s V_s c_{p,s}} dt \quad (2.64)$$

จะได้ว่า

$$\frac{T - T_{a,i}}{T_i - T_{a,i}} = \exp\left(-\frac{hA_s}{\rho_s V_s c_{p,s}} t\right) \quad (2.65)$$

เพราะฉะนั้น อุณหภูมิของวัตถุที่เวลา t ใดๆ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.66) และ อุณหภูมิของอากาศขาออก (Outlet air temperature) หาได้จากสมการที่ (2.67)

$$T_s(t) = T_{a,i} + (T_{s,i} - T_{a,i}) \exp\left(-\frac{hA_s}{\rho_s V_s c_{p,s}} t\right) \quad (2.66)$$

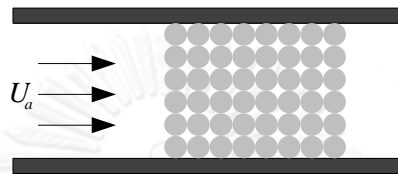
$$T_{a,o}(t) = T_s + (T_{a,i} - T_s) \exp\left(-\frac{hA_s}{\dot{m}_a c_{p,a}} t\right) \quad (2.67)$$

นอกจากนี้ เวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.68)

$$t = \frac{\rho_s V_s c_{p,s}}{hA_s} \ln \frac{T_{s,i} - T_{a,i}}{T - T_{a,i}} \quad (2.68)$$

2.6.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านแพคเบด (Packed beds)

เมื่อของไหลที่มีอุณหภูมิสูงไหลผ่านแพคเบดหรือกลุ่มอนุภาคของแข็งซึ่งถูกจัดวางให้มีตำแหน่งคงที่ดังรูปที่ 2.17 จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากของไหลสู่แพคเบด และทำให้แพคเบดมีอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 2.17 การไหลของก๊าซผ่านแพคเบด

การไหลของของไหลผ่านแพคเบดจะไม่ใช้การไหลที่มีแบบแผนที่พบเห็นได้โดยทั่วไป เพราะเป็นการไหลผ่านช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในแพคเบด ซึ่งช่องว่างนี้เกิดขึ้นจากการจัดวางของอนุภาคเล็กๆ ที่อยู่ภายในแพคเบด ยกตัวอย่างเช่น ช่องว่างการจัดเรียงของอนุภาคทรงกลมภายในกล่องสี่เหลี่ยม โดยการไหลของของไหลผ่านช่องว่างในลักษณะนี้จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนและช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเกิดได้ดีขึ้น

สำหรับสมการที่ใช้อธิบายการไหลของของไหลผ่านแพคเบดมีหลายสมการขึ้นอยู่กับลักษณะ ขนาด และความหนาแน่นของแพคเบด ซึ่งสมการที่ใช้อธิบายถึงการไหลของอากาศผ่านแพคเบดที่ประกอบด้วยอนุภาคทรงกลมสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.69) [31]

$$\varepsilon_s \bar{j}_H = 2.06 Re_d^{-0.575} \quad (2.69)$$

โดยมีเงื่อนไขอยู่ว่า $\left[\begin{array}{l} Pr \approx 0.7 \\ 90 \leq Re_d \leq 4000 \end{array} \right]$

เมื่อ ε_s แทน ความพรุนหรือเปอร์เซ็นต์ช่องว่างของเหล็ก
 \bar{j}_H แทน Colburn j factor

สำหรับค่า Re_d จากสมการที่ (2.69) นิยามได้เป็น

$$Re_d = \frac{U_a d_s}{\nu_a} \quad (2.70)$$

และความเร็วของของไหล U_a หาได้จาก

$$U_a = \frac{\dot{Q}}{A_c} = \left(\frac{\dot{m}_a}{\rho_a} \right) \left(\frac{1}{A_c} \right) \quad (2.71)$$

โดย
$$\bar{j}_H = \bar{St} Pr^{2/3} = \left(\frac{h}{\rho_s U_a c_{p,a}} \right) (Pr^{2/3}) \quad (2.72)$$

เมื่อ \bar{St} แทน ตัวเลขสแตนต์ตัน
 Pr แทน ตัวเลขแพลนเดิล

จะได้ว่า
$$\varepsilon_s \bar{j}_H = \varepsilon_s \bar{St} Pr^{2/3} = \varepsilon_s \left(\frac{h}{\rho_s U_a c_{p,a}} \right) (Pr^{2/3}) \quad (2.73)$$

แทนค่า สมการที่ (2.73) ลงในสมการที่ (2.69) จะได้ว่า

$$\varepsilon_s \left(\frac{h}{\rho_s U_a c_{p,a}} \right) (Pr^{2/3}) = 2.06 Re_d^{-0.575} \quad (2.74)$$

จัดรูปใหม่ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ได้เป็น

$$h = \frac{2.06}{\varepsilon_s} \rho_a U_a c_{p,a} Re_d^{-0.575} Pr^{-2/3} \quad (2.75)$$

บทที่ 3

เครื่องมือในงานวิจัย

การคำนวณและการประมาณค่าการใช้พลังงาน (Energy consumption) และค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต (Specific Energy Consumption) ในงานวิจัยนี้ อาศัยข้อมูลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ รวมถึงชนิดและปริมาณพลังงานที่ใช้ในการผลิตนั้นๆ ของผู้ประกอบการแต่ละประเภทจากแบบสอบถามที่ได้ส่งไปยังผู้ประกอบการในกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กทั้ง 15 ประเภท ซึ่งสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยเป็นองค์กรหลักในการจัดทำแบบสอบถาม รวมถึงส่งและรวบรวมแบบสอบถามกลับคืนมาจากผู้ประกอบการ โดยตัวอย่างของแบบสอบถามทั้งหมดที่ส่งไปยังผู้ประกอบการ สามารถดูได้จากภาคผนวก ก. ซึ่งรายละเอียดของแบบสอบถามมีดังต่อไปนี้

3.1 ภาพรวมของแบบสอบถาม

ประเภทของแบบสอบถามที่ส่งไปยังผู้ประกอบการหรือโรงงานมีด้วยกัน 10 ชุดหรือ 10 ประเภท โดยชุดของแบบสอบถามกับกลุ่มของผู้ประกอบการ รวมถึงจำนวนแบบสอบถามที่ได้รับกลับมามีตามชุดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ประเภทแบบสอบถามทั้ง 10 ชุด จะมีลักษณะของคำถามที่แตกต่างกันออกไปในบางประเด็นและจะมีบางคำถามที่ถามเหมือนกันในทุกๆ กระบวนการผลิต เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่ต้องการ คำถามจะมีความจำเพาะ โดยสอบถามรายละเอียดของการใช้พลังงานว่ามีที่มาจากอะไรบ้าง ใช้ในกระบวนการไหนและใช้ในปริมาณเท่าใด และปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ว่ามีกี่ชนิด อะไรบ้างและแต่ละชนิดมีปริมาณเท่าใด

ตารางที่ 3.1 ชุด/ประเภทของแบบสอบถามกับกลุ่มของผู้ประกอบการประเภทต่างๆ และจำนวนแบบสอบถามที่ได้รับกลับคืนมา

| ชุด/ประเภทที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------------|---------|---------|---|---|---|----|----|----|------------|
| กระบวนการผลิตที่ | 1, 3, 5 | 2, 4, 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13, 14, 15 |
| จำนวนแบบสอบถามที่ได้รับกลับคืน | 6 | 7 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 8 |

3.2 ข้อมูลปริมาณการผลิตเหล็ก

แบบสอบถามในส่วนนี้ ต้องการรายละเอียด ไม่ว่าจะเป็นชนิดและปริมาณการผลิตของผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผู้ประกอบการผลิตได้ในแต่ละปี หน่วยเป็นตัน ซึ่งแบบสอบถามแต่ละชุดที่ส่งไป ได้ระบุชนิดของผลิตภัณฑ์ไว้แล้ว ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นตัวอย่างของแบบสอบถามชุดที่ 1 ที่ส่งไปยังกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5 เพื่อสอบถามปริมาณการผลิตโดยได้ระบุชนิดของผลิตภัณฑ์ที่อาจผลิตได้ในกระบวนการเหล่านี้ ได้แก่ บิลเล็ต เหล็กกลมและเหล็กข้ออ้อย เหล็กเพลลา เหล็กลวด และเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน และในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นตัวอย่างของแบบสอบถามชุดที่ 6 ที่ส่งไปยังกระบวนการผลิตที่ 10 โดยได้ระบุผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ในกระบวนการนี้คือ เหล็กแผ่นชุบสังกะสี



แบบสอบถามภาพรวมการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมเหล็กทรงยาวมีเตาหลอม (กลุ่ม 1,3,5)
(ภาพรวมของทั้งปีเพื่อประมวลผล SEC Energy Intensity และ Energy Elasticity ของอุตสาหกรรม)

| ข้อมูลทั่วไป | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าของบริษัท ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - กำลังการผลิตสินค้าทั้งหมด | 800,000 | 800,000 | 800,000 | 800,000 | 800,000 | 800,000 |
| - บิลเล็ต | 300,000 | 300,000 | 300,000 | 300,000 | 300,000 | 300,000 |
| - เหล็กกลมและเหล็กข้ออ้อย | 500,000 | 500,000 | 500,000 | 500,000 | 500,000 | 500,000 |
| - เหล็กเพลลา | - | - | - | - | - | - |
| - เหล็กลวด | - | - | - | - | - | - |
| - เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน | - | - | - | - | - | - |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เศษเหล็ก | 316,851 | 223,015 | 355,328 | 290,702 | 47,407 | 231,230 |
| - เหล็กปิก (Pig iron) | - | - | - | - | - | - |
| - เหล็กพูน (Sponge iron, HBI) | - | - | - | - | - | - |
| - บิลเล็ต (กรณีนำเข้าเพิ่มเติม) | - | - | - | - | - | - |

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของแบบสอบถาม เพื่อสอบถามข้อมูลปริมาณการผลิตในแต่ละปีของกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5 (เหล็กทรงยาวมีเตาหลอม)



แบบสอบถามภาพรวมการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมเหล็กแผ่นชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (กลุ่ม 10)
(ภาพรวมของทั้งปีเพื่อประมวลผล SEC Energy Intensity และ Energy Elasticity ของอุตสาหกรรม)

| ข้อมูลทั่วไป | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|--------|------|--------|-------|--------|-------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าของบริษัท ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นชุบสังกะสี | 20,629 | - | 31,647 | 8,898 | 28,252 | 4,776 |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดเย็น | 19,310 | - | 29,321 | 8,203 | 25,658 | 4,370 |
| - สังกะสีอินกอต | 1,317 | - | 2,223 | 542 | 2,264 | 369 |

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของแบบสอบถาม เพื่อสอบถามข้อมูลปริมาณการผลิตในแต่ละปีของกระบวนการผลิตที่ 10 (เหล็กแผ่นชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน)

3.3 ข้อมูลการใช้พลังงาน

แบบสอบถามในส่วนของการใช้พลังงานจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ สอบถามการใช้พลังงานรวมของผู้ประกอบการ และ สอบถามในรายละเอียดของกระบวนการ จะสอบถามถึงชนิดและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงหรือพลังงานในรูปแบบต่างๆ โดยเมื่อกระบวนการหรือกรรมวิธีต่างกัน ก็จะมีลักษณะรวมถึงปริมาณการใช้พลังงานที่แตกต่างกันด้วย ดังที่เคยกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ว่าพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะมาจากสองประเภทหลักๆ คือ พลังงานจากไฟฟ้า และพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงหลายชนิด อาทิเช่น น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา LPG หรือ ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ดังนั้นแบบสอบถามในส่วนแรกจะถามถึงปริมาณการใช้ไฟฟ้าและปริมาณการใช้เชื้อเพลิงรวมทั้งหมดของแต่ละชนิดในแต่ละปี โดยปริมาณการใช้ไฟฟ้าอาจแบ่งเป็นไฟฟ้าในกระบวนการผลิต ไฟฟ้าในระบบพ่วง (Utility) และไฟฟ้าในสำนักงาน ในขณะที่ เชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีหน่วยของการใช้ที่แตกต่างกัน เช่น LPG มีหน่วยเป็นกิโลกรัม น้ำมันดีเซล มีหน่วยเป็นลิตร เป็นต้น นอกจากนี้ในแบบสอบถามยังได้ถามถึงเชื้อเพลิงทางเลือกที่ผู้ประกอบการอาจนำมาใช้ในกระบวนการผลิตด้วย แบบสอบถามในส่วนแรกนี้จะเหมือนกันในทุกๆชุด ตัวอย่างของแบบสอบถามในส่วนนี้แสดงในรูปที่ 3.3

| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมของบริษัท <i>ในแต่ละปี</i> | | | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------------------------|
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | 179,192,246 | 149,208,535 | 241,093,490 | 176,242,312 | 30,926,682 | 91,932,995 | พลังงาน จาก ไฟฟ้า |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | 6,236,888 | 4,283,672 | 5,374,640 | 4,914,669 | 959,068 | 1,940,345 | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | 1,266,928 | 1,358,310 | 1,306,617 | 1,438,980 | 1,586,390 | 1,228,203 | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | 186,696,062 | 154,850,517 | 247,774,747 | 182,595,961 | 33,472,140 | 95,101,543 | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | - | - | - | - | - | - | พลังงาน จาก เชื้อเพลิง |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | 750 | 750 | 832 | 714 | 395 | 395 | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | 15,276,500 | 11,290,194 | 15,084,802 | 12,620,800 | 2,620,295 | 5,950,000 | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | 2,291,633 | 1,416,086 | 2,010,391 | 1,269,582 | 138,500 | 401,500 | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | - | - | - | - | - | - | |
| - ปริมาณการใช้ออกซิเจน (ลบ.ม.; Nm ³) | 14,772,096 | 10,134,254 | 13,198,299 | 11,415,730 | 1,398,787 | 4,810,251 | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | | |
| 1. หน่วย: | - | - | - | - | - | - | |
| 2. หน่วย: | - | - | - | - | - | - | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมของบริษัท <i>ในแต่ละปี</i> | | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | 361,784 | 271,839 | 27,111 | 129,726 | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | - | - | - | - | - | - | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | - | - | - | - | - | - | |

*ล้านบีทียู = MMBTU

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแบบสอบถาม ในส่วนของการใช้พลังงานรวมของผู้ประกอบการรายหนึ่ง

สำหรับแบบสอบถามในส่วนที่สอง จะสอบถามเจาะจงถึงการใช้พลังงานในขั้นตอนหลักของการผลิต ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างๆ อาจมีขั้นตอนและปริมาณการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน เพราะฉะนั้นแบบสอบถามในส่วนนี้จะระบุอย่างชัดเจนว่า ในการผลิตหลักประเภทหนึ่งมีขั้นตอนใดบ้าง และใช้พลังงานหลักๆ เป็นพลังงานอะไร ผู้ประกอบการที่ผลิตหลักประเภทเดียวกัน จะได้รับชุดแบบสอบถามเหมือนกัน ตัวอย่างของแบบสอบถามในส่วนหลังนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าในเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า และในเตา LF รวมถึงปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจนและการใช้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ในการหลอม ส่วนในรูปที่ 3.5 แสดงตัวอย่างข้อมูลการใช้พลังงานในกระบวนการชุบสังกะสี และในรูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างข้อมูลการใช้พลังงานในขั้นตอนของการอุ่นร้อนและการรีดเหล็ก ซึ่งจะเห็นว่าทั้ง 3 รูป จะสอบถามในข้อมูลที่แตกต่างกันและจะเจาะจงลงไปถึงกรรมวิธีและรายละเอียดของชนิดและปริมาณการใช้พลังงาน โดยตัวอย่างของชุดแบบสอบถามทั้งหมดในส่วนนี้สามารถดูได้อย่างละเอียดในภาคผนวก ก.

| การหลอมเหล็กกล้าและการหล่อ | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|
| ส่วนการใช้พลังงานเฉลี่ย (ต่อตัน) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน EAF (กิโวลต์-ชั่วโมง) | 528.7 | 516.75 | 532.96 | 500.84 | 537.67 | 517.96 |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน LF (กิโวลต์-ชั่วโมง) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ใน EAF (ลบ.ม.) | 14,276,170 | 9,686,495 | 12,793,697 | 11,047,615 | 1,174,758 | 4,612,012 |
| - ปริมาณแก๊สอิเล็กโทรดที่ใช้ใน EAF (กิโกรัม) | 3.60 | 3.47 | 3.73 | 4.34 | 3.95 | 4.00 |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโกรัม) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | 1,382,500 | 1,068,500 | 1,563,135 | 127,607 | 318,379 | 749,532 |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | - | - | - | - | - | - |
| 2. หน่วย: | - | - | - | - | - | - |
| - Yield การหลอมและหล่อจากเศษเหล็ก (%) | 87.63 | 89.09 | 88.85 | 89.21 | 85.60 | 87.54 |

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างแบบสอบถามการใช้พลังงานในการหลอมเหล็กของกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5 (เหล็กทรงยาวมีเตาหลอม)

| กระบวนการชุบสังกะสี | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|--|--------------|---------|--------|---------|---------|---------|
| การชุบสังกะสี (Zinc Pot) (ต่อต้น) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยในการหลอมสังกะสี (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | ไม่มีมิเตอร์ | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติในการหลอมสังกะสี (ล้านบีทียู) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตาในการหลอมสังกะสี (ลิตร) | 503,976 | 544,744 | 52,476 | 330,385 | 139,293 | 358,699 |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซลในการหลอมสังกะสี (ลิตร) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้ LPG ในการหลอมสังกะสี (ลิตร) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | - | - | - | - | - | - |
| 2. หน่วย: | - | - | - | - | - | - |

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างแบบสอบถามการใช้พลังงานในกระบวนการชุบสังกะสีของ
กระบวนการผลิตที่ 10

| กระบวนการรีดเหล็กเส้น | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| การใช้พลังงานใน Reheating Furnace (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | 43.21 | 39.60 | 40.57 | 43.81 | 53.03 | 43.19 |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | - | - | - | - | - | - |
| - ปริมาณการใช้ LPG (ลิตร) | 495,925 | 447,758 | 404,601 | 368,115 | 224,029 | 198,239 |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |

| | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| การใช้พลังงานใน Hot Rolling (ต่อต้น) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กกลม (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | - | - | - | - | - | - |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กกลม (%) | - | - | - | - | - | - |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยในการรีดเหล็กข้ออ้อย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | 84.96 | 88.12 | 83.11 | 87.29 | 108.43 | 97.87 |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กข้ออ้อย (%) | 97.15 | 96.73 | 96.99 | 97.03 | 96.42 | 96.10 |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยในการรีดเหล็กเพลลา (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | - | - | - | - | - | - |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กเพลลา (%) | - | - | - | - | - | - |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยในการรีดเหล็กหลอด (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | - | - | - | - | - | - |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กหลอด (%) | - | - | - | - | - | - |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ยในการรีดเหล็ก รูปพรรณ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | - | - | - | - | - | - |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กรูปพรรณ (%) | - | - | - | - | - | - |

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างแบบสอบถามการใช้พลังงานในการรีดเหล็กของกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ
5 (เหล็กทรงยาวมีเตาหลอม)

บทที่ 4

ผลการคำนวณและวิเคราะห์ผลด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม

ก่อนการประมาณค่าด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม แบบสอบถามที่ได้รับกลับมาจะถูกคัดกรองเพื่อเลือกเอาข้อมูลที่มีความครบถ้วน ถูกต้องและน่าเชื่อถือมาใช้คำนวณ ซึ่งภาพรวมของข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามที่ได้กลับมาทั้งหมด ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยส่วนใหญ่แล้วข้อมูลที่ได้กลับมาจากผู้ประกอบการหรือโรงงาน มีกำลังการผลิตรวมกันมากกว่า 50% ของกำลังการผลิตรวมในแต่ละกระบวนการผลิต และมีเพียง 3 กระบวนการผลิต ที่ได้ข้อมูลกลับมา 100% ซึ่งได้แก่ กระบวนการผลิตที่ 7 มีผู้ประกอบการ 2 ราย กระบวนการที่ 8 มีผู้ประกอบการ 3 ราย และกระบวนการผลิตที่ 11 ซึ่งมีผู้ประกอบการในประเทศเพียงรายเดียว

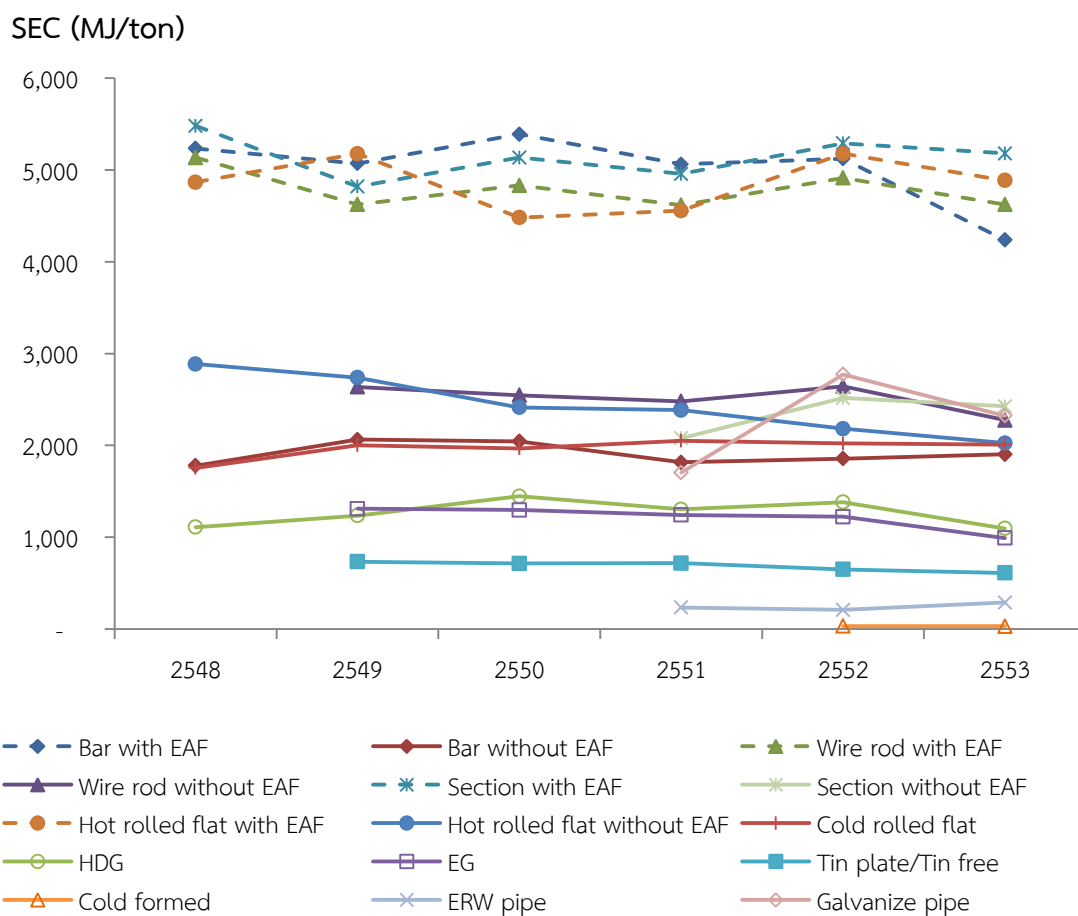
ตารางที่ 4.1 ภาพรวมข้อมูลของแบบสอบถาม

| กระบวนการที่ | จำนวนแบบสอบถามที่ส่งไป | กำลังการผลิตรวมทั้งกระบวนการ | จำนวนแบบสอบถามที่ได้กลับคืน | กำลังการผลิตจากแบบสอบถาม | % ของกำลังการผลิตที่ได้ |
|--------------|------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 11 | 2,838,000 | 4 | 2,090,000 | 74% |
| 2 | 22 | 3,978,120 | 4 | 1,284,100 | 32% |
| 3 | 4 | 960,000 | 2 | 590,000 | 61% |
| 4 | 3 | 1,180,001 | 2 | 800,000 | 68% |
| 5 | 3 | 960,000 | 2 | 888,000 | 93% |
| 6 | 5 | 575,000 | 1 | 240,000 | 42% |
| 7 | 2 | 3,000,000 | 2 | 3,000,000 | 100% |
| 8 | 3 | 5,000,000 | 3 | 5,000,000 | 100% |
| 9 | 3 | 2,650,000 | 2 | 2,200,000 | 83% |
| 10 | 6 | 528,000 | 3 | 248,000 | 47% |
| 11 | 1 | 180,000 | 1 | 180,000 | 100% |
| 12 | 2 | 816,000 | 1 | 516,000 | 63% |
| 13 | 12 | 99,314 | 3 | 58,400 | 59% |
| 14 | 6 | 1,903,166 | 3 | 433,000 | 23% |
| 15 | 4 | 75,000 | 2 | 61,000 | 81% |

ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตในบทนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลัก คือ ผลแบบภาพรวมของทั้ง 15 กระบวนการผลิต ดังจะกล่าวถึงในส่วนแรกของบทนี้ และในส่วนถัดไป จะกล่าวถึงผลการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตต่างๆ ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญสำหรับการผลิตเหล็กในประเทศไทย ได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า กระบวนการอบร้อน กระบวนการรีดร้อน กระบวนการขึ้นรูปเย็น และกระบวนการเคลือบผิว

4.1 ผลการคำนวณในภาพรวมของทั้ง 15 กระบวนการผลิต

ข้อมูลการใช้พลังงานและปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของแต่ละกระบวนการจากแบบสอบถามถูกนำมาคำนวณเพื่อหาค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต ข้อมูลในแบบสอบถามของกระบวนการผลิตทั้ง 15 กระบวนการ มีความครบถ้วนบ้าง หรือไม่ครบถ้วนบ้าง บางกระบวนการให้ข้อมูลมาครบทุกปี บางกระบวนการข้อมูลได้มาบางส่วน ไม่ครบทุกปี ซึ่งผลการคำนวณดังกล่าวปรากฏในรูปที่ 4.1

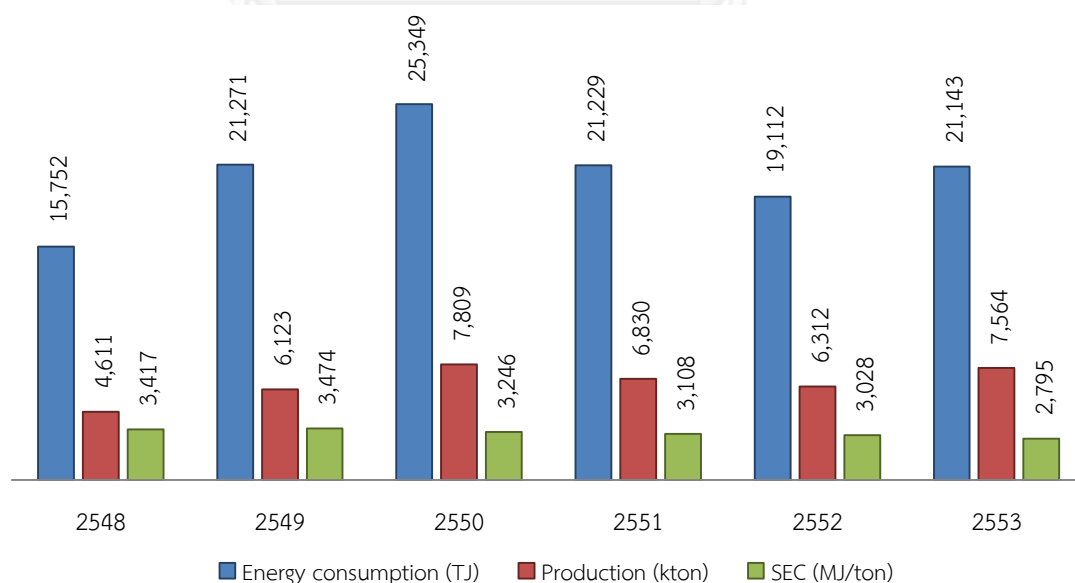


รูปที่ 4.1 ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของผลิตภัณฑ์เหล็กจากกระบวนการผลิตต่างๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2553

จากกราฟในรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า SEC ของกระบวนการผลิตทั้ง 15 กระบวนการ ถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงอย่างชัดเจน คือ ช่วง SEC ที่มีค่ามากกว่า 4,500 MJ/ton และช่วงที่มีค่าต่ำกว่า 3,000 MJ/ton กระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ที่มีค่า SEC มากกว่า 4,500 MJ/ton ได้แก่ กระบวนการผลิตที่ 1 เหล็กเส้น กระบวนการผลิตที่ 3 เหล็กหลอด กระบวนการผลิตที่ 5 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อน และกระบวนการผลิตที่ 7 เหล็กแผ่นรีดร้อน โดยทั้ง 4 กระบวนการผลิตเป็นกระบวนการที่มีเตาหลอม EAF และเริ่มผลิตจากการหลอมวัตถุดิบได้เป็นน้ำเหล็กและหล่อออกมาเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป และนำไปแปรรูปจนได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย นอกจากนี้ที่กล่าวมา ก็จะเป็นกระบวนการผลิตที่มีค่า SEC ต่ำกว่า 3,000 MJ/ton

ด้วยข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม หากพิจารณาพลังงานรวมที่ใช้ในแต่ละปี ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กรวมที่ผลิตได้ในแต่ละปี และค่า SEC เฉลี่ยรวมของทุกกระบวนการผลิตในแต่ละปี ได้ผลดังรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า การใช้พลังงานในภาพรวมของอุตสาหกรรมเหล็ก มีค่าใกล้เคียงกันแต่จะสลับเพิ่มมากขึ้นบ้างหรือลดน้อยลงบ้าง ส่วนค่าในปีแรกจะน้อยกว่าปีอื่นๆ ค่อนข้างมาก สาเหตุส่วนหนึ่งมาจากข้อมูลที่ได้กลับมาจากแบบสอบถาม ซึ่งในช่วงปีแรกๆ ข้อมูลค่อนข้างขาดหาย บางโรงงานไม่ได้ให้ข้อมูลของปี พ.ศ. 2548 มาเลย ก็ไม่ทราบด้วยเหตุผลประการใด ส่วนค่าในช่วงปีหลังจะค่อนข้างใกล้เคียงกัน เพราะ ข้อมูลที่ได้ค่อนข้างครบถ้วน โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 21,000 TJ



รูปที่ 4.2 ค่าการใช้พลังงานรวม (TJ) ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กรวม (kton) และ SEC (MJ/ton) ตั้งแต่ปี.ศ.2548 -2553

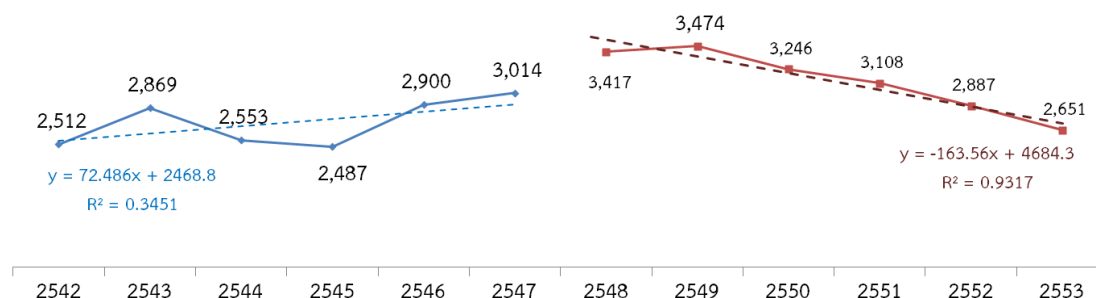
ปริมาณผลิตภัณฑ์หลักรวมในแต่ละปีมีค่าค่อนข้างแตกต่างกันเพิ่มขึ้นและลดลง ประมาณ 1 พันตัน ยกเว้นปีแรกที่มีค่าต่างกับปีอื่นๆ มาก เหตุผลมากความไม่ครบถ้วนของข้อมูล เช่นเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้ว

ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต มีแนวโน้มที่ลดลงในเกือบทุกๆ ปี กล่าวคือลดลงจากปีพ.ศ.2549 ที่มีค่า 3,474 MJ/ton ไปอยู่ที่ 2,795 MJ/ton ในปีพ.ศ.2553

เมื่อเฉลี่ยค่า SEC ของกระบวนการผลิตนั้นๆ ด้วยสมการที่ (2.3) และเปรียบเทียบกับค่า $SEC_{G\ avg}$ ประจำปีพ.ศ.2542-2547 จะได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 4.4 จะพบว่าค่า $SEC_{G\ avg}$ ของปีพ.ศ.2548-2553 มีค่าน้อยกว่าในแทบทุกกระบวนการผลิต ยกเว้นกระบวนการผลิตที่ 7 8 9 13 14 และ 15 ที่มีค่ามากกว่า โดยในกระบวนการผลิตที่มีเตาหลอม EAF ยังเป็นการผลิตที่มีการใช้พลังงานสูงมากเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ และในกระบวนการผลิตที่ 3 ซึ่งในอดีตมีค่า $SEC_{G\ avg}$ มากที่สุด แต่ในปัจจุบันไม่ได้มากที่สุดแต่ก็ถือว่ายังมีค่ามากอยู่ดี ส่วนกระบวนการผลิตที่มีค่า $SEC_{G\ avg}$ น้อยที่สุด คือ กระบวนการผลิตที่ 13 กระบวนการขึ้นรูปเหล็กโครงสร้างรูปพรรณแบบขึ้นรูปเย็น

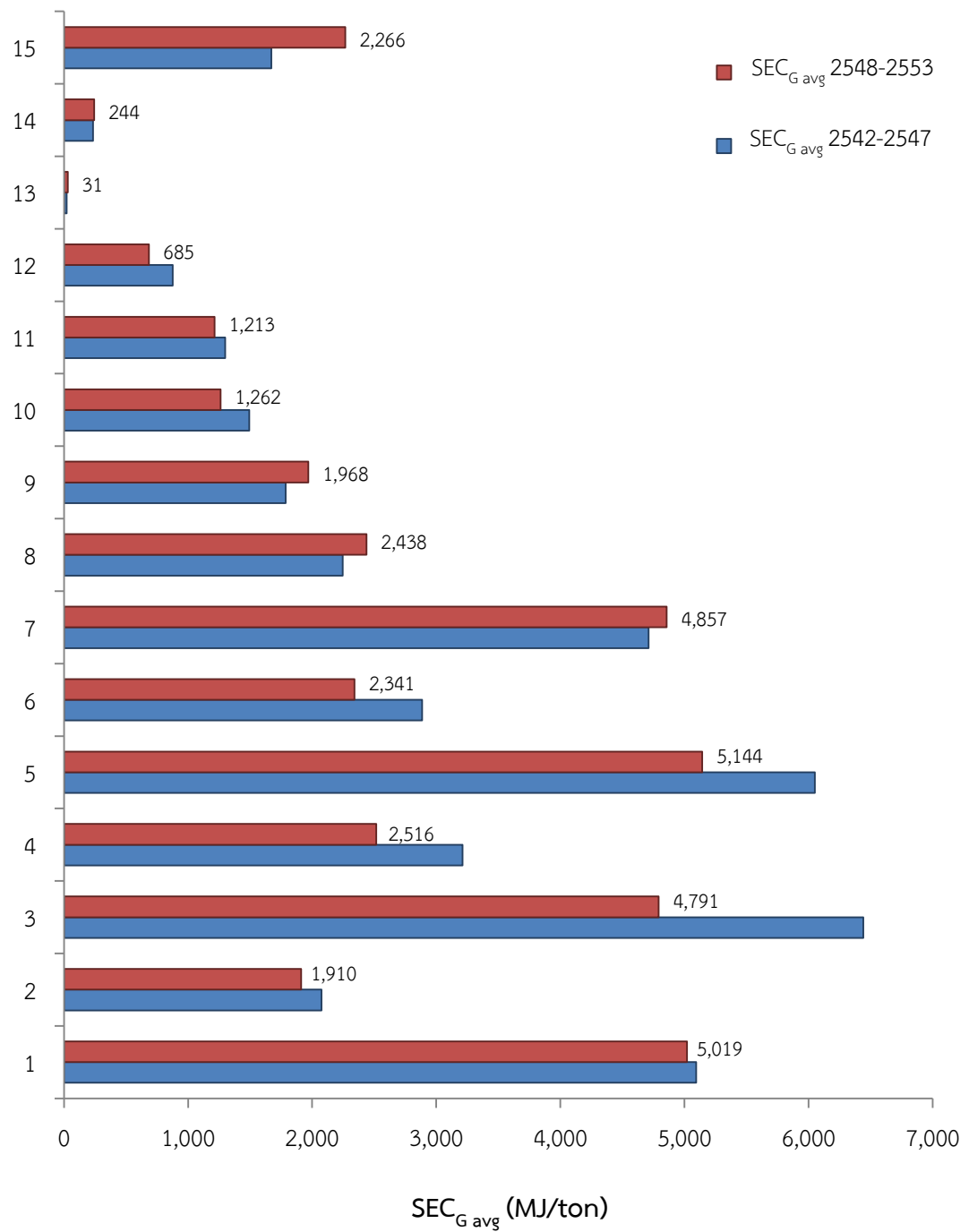
เมื่อเฉลี่ยค่า SEC ของทั้ง 15 กระบวนการผลิต ในแต่ละปี ด้วยสมการที่ (2.4) และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่า $SEC_{Y\ avg}$ ประจำปี พ.ศ.2542-2547 [32] จะได้ผลดังรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่า ภาพรวมของค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตเฉลี่ยแบบรายปี ($SEC_{Y\ avg}$) ตั้งแต่ปีพ.ศ.2542 มีการเพิ่มขึ้นถึงแม้ค่าในบางปีจะตกลงมากก็ตาม แต่โดยเฉลี่ยแล้วก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นไปจนถึงปีพ.ศ.2549 แต่หลังจากนั้น ค่า $SEC_{Y\ avg}$ กลับลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกๆ ปี ซึ่งเป็นสัญญาณที่ดีของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย

$SEC_{Y\ avg}$ (MJ/ton)



รูปที่ 4.3 แสดงแนวโน้มและการเปรียบเทียบค่า $SEC_{Y\ avg}$ ตั้งแต่ปี พ.ศ.2542-2553

กระบวนการผลิตที่



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่า SEC_{G avg} ของปี พ.ศ.2548-2553 กับ ปี พ.ศ.2542-2547

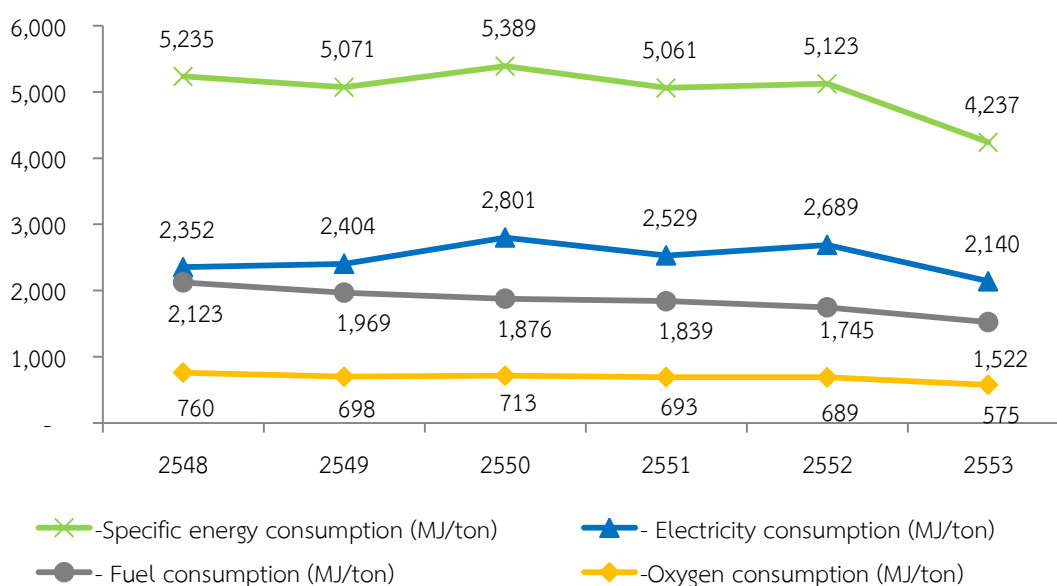
4.1.1 กระบวนการผลิตที่ 1 เหล็กเส้นมีเตาหลอม EAF

จากข้อมูลที่ได้โดยแบบสอบถาม พบว่ามีผู้ประกอบการในกระบวนการผลิตเหล็กเส้นชนิดมีเตาหลอม EAF ให้ข้อมูลมาทั้งสิ้น 4 ราย แต่มีเพียง 3 ราย ที่สามารถนำข้อมูลมาใช้ได้ กระบวนการผลิตเหล็กเส้นจะมีการใช้พลังงานต่อผลผลิตค่อนข้างสูง ทั้งนี้เพราะการผลิตเริ่มใช้พลังงานตั้งแต่การหลอมเศษเหล็กและวัตถุดิบต่างๆ การปรับส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็ก การหล่อน้ำเหล็กเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูป การอบร้อนผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปไปจนกระทั่งการรีดร้อน และได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กเส้น (เหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อย)

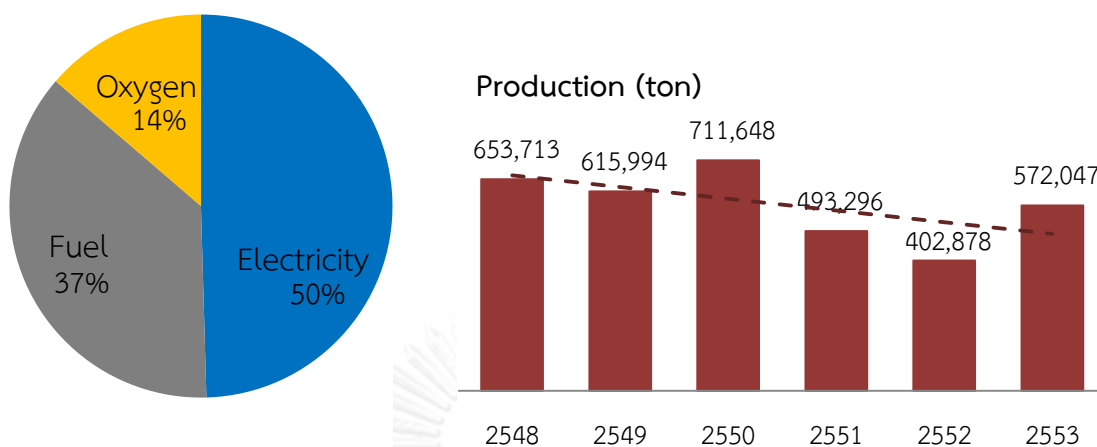
ด้วยข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม พบว่ากำลังการผลิตสูงสุดของผู้ประกอบการในกระบวนการผลิตที่ 1 นี้รวมกันมีมากถึง 6.8 ล้านตัน แต่ในการผลิตจริง สามารถผลิตได้เฉลี่ยเพียง 5.7 แสนตัน แนวโน้มในการผลิตตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2553 มีแนวโน้มที่ลดลง ดังจะเห็นได้จากเส้นประในรูปที่ 4.6

นอกจากนี้ จากกราฟในรูปที่ 4.5 จะเห็นลักษณะและปริมาณการใช้พลังงานของพลังงานแต่ละชนิด โดยดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตรวม (SEC) อยู่ในช่วง 4,200 – 5,300 MJ/ton และมีแนวโน้มของการใช้พลังงานที่ลดลง ค่าการใช้พลังงานรวมสูงสุดอยู่ที่ปีพ.ศ.2550 โดยมีค่าเท่ากับ 5,389 MJ/ton และในปีนี่ยังเป็นปีที่มีการผลิตสูงสุดด้วย โดยมีการผลิตรวมอยู่ที่ 7.1 แสนตัน สัดส่วนของการใช้พลังงานชนิดต่างๆ จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าพลังงานจากไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดถึง 50% รองลงมาคือพลังงานจากเชื้อเพลิง 37% ส่วนพลังงานจากก๊าซออกซิเจนมีค่าน้อยสุดคิดเป็น 14%

SEC (MJ/ton)



รูปที่ 4.5 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 1

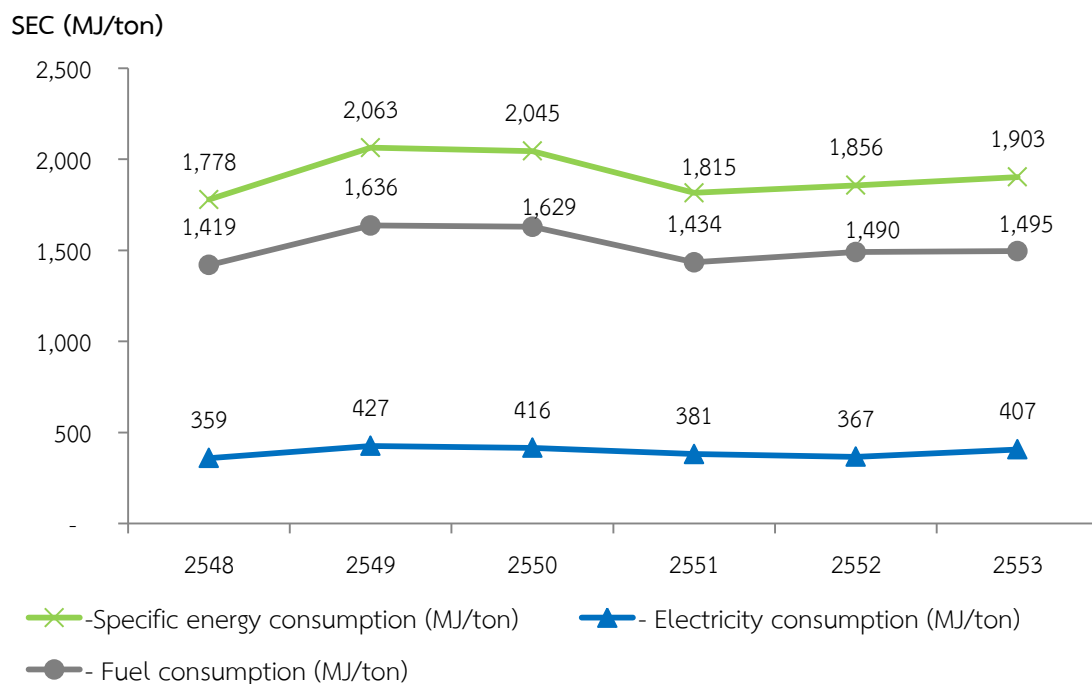


รูปที่ 4.6 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 1

4.1.2 กระบวนการผลิตที่ 2 เหล็กเส้นไม่มีเตาหลอม EAF

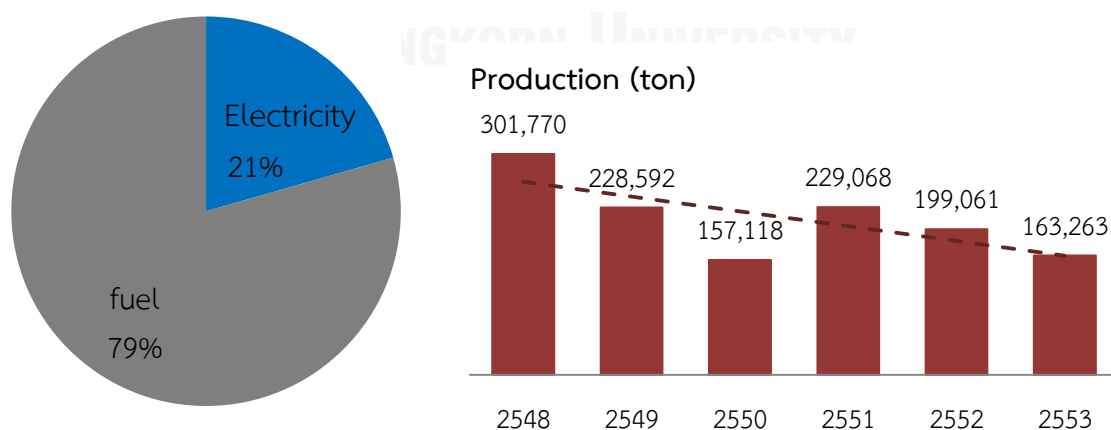
ลักษณะกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กเส้นไม่มีเตาหลอม EAF จะเหมือนกับกระบวนการผลิตในส่วนของการอบร้อนไปจนถึงการรีดร้อนของกระบวนการผลิตที่ 1 แต่ต่างกันตรงที่กระบวนการผลิตที่ 2 ไม่มีเตาหลอม EAF นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างในเรื่องของเทคโนโลยีและเครื่องจักรกลที่ใช้ สำหรับโรงงานที่เป็นโรงรีดเหล็กเส้นขนาดเล็ก จะใช้เครื่องรีดเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติแบบรีดกลับไปกลับมา เป็นผลให้มีผลิตภาพที่ต่ำกว่า และส่วนใหญ่เป็นจะมีการเดินเครื่องจักรเพื่อผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง ขณะที่โรงงานขนาดใหญ่จะผลิตโดยใช้เครื่องจักรที่ทันสมัย และเป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยหากภาวะตลาดดี ผู้ประกอบการบางรายอาจมีการผลิตตลอด 24 ชั่วโมง

ข้อมูลจากแบบสอบถาม พบว่ามีผู้ประกอบการให้ข้อมูลมาเป็นจำนวน 3 ราย หนึ่งในนั้นให้ข้อมูลเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 เป็นต้นไป ซึ่งทำให้ได้ว่าปีพ.ศ.2548-2549 มีผู้ให้ข้อมูลทั้งสิ้น 2 ราย ผลการประมาณจากรูปที่ 4.8 พบว่าปริมาณการผลิตเหล็กเส้นของโรงงานในกระบวนการนี้มีแนวโน้มลดลงจากประมาณ 3 แสนตันในปีพ.ศ.2548 ไปเป็น 1.6 แสนตันในปีพ.ศ.2553 เมื่อพิจารณาถึงการใช้พลังงานต่อผลผลิตของพลังงานชนิดต่างๆ และพลังงานรวมต่อผลผลิต (SEC) ดังรูปที่ 4.7 พบว่ามีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอในทุกปี โดยพลังงานรวมต่อผลผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 1,910 MJ/ton



รูปที่ 4.7 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 2

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของการใช้พลังงานชนิดต่างๆ จะพบว่ามีการใช้พลังงานอยู่ 2 ชนิด นั่นคือ พลังงานจากไฟฟ้าและพลังงานจากเชื้อเพลิง โดยประมาณ 84% ของการใช้พลังงานทั้งหมด เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิง ซึ่งส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้กับการอบร้อนบิลเล็ต ในขณะที่อีก 16% จะเป็นพลังงานจากไฟฟ้าซึ่งถูกนำไปใช้สำหรับกระบวนการรีดเพื่อรีดลดขนาดจากเหล็กแท่งเล็กหรือบิลเล็ตมาเป็นเหล็กเส้น ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 2

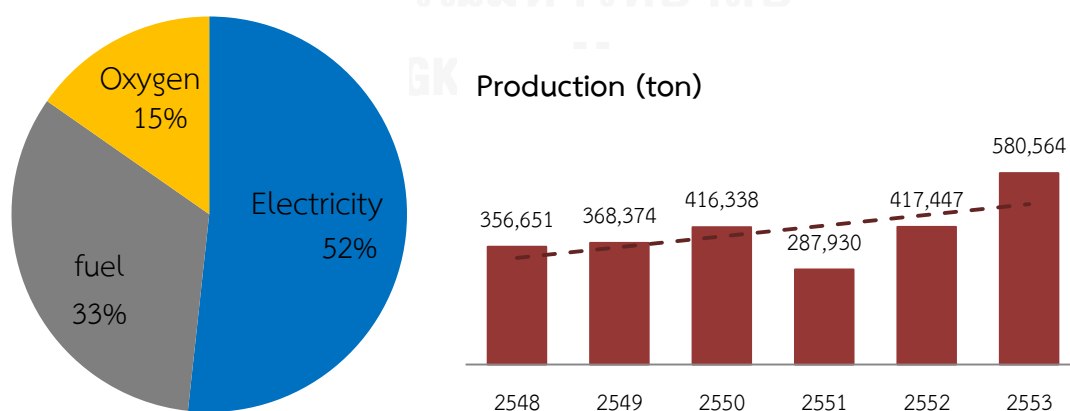
4.1.3 กระบวนการผลิตที่ 3 เหล็กถลุงมีเตาหลอม EAF

โดยทั่วไปผู้ประกอบการของกระบวนการผลิตที่ 3 จะไม่ได้มีโรงงานเพื่อผลิตเหล็กถลุงแต่เพียงอย่างเดียว แต่จะมีโรงงานที่ผลิตได้ทั้งเหล็กเส้น และเหล็กถลุง ภายในโรงงานเดียวกัน เนื่องจากปริมาณความต้องการเหล็กถลุงภายในประเทศมีค่อนข้างน้อย และน้อยกว่าเหล็กเส้นอยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นโรงงานจึงไม่ได้ตั้งขึ้นเพื่อผลิตเหล็กถลุงแต่เพียงอย่างเดียว โดยธรรมชาติแล้วความแตกต่างระหว่างเหล็กเส้นและเหล็กถลุงจะอยู่ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการรีดร้อนให้ได้เป็นเหล็กถลุงจึงมีค่าที่สูงกว่าการรีดเหล็กเส้น

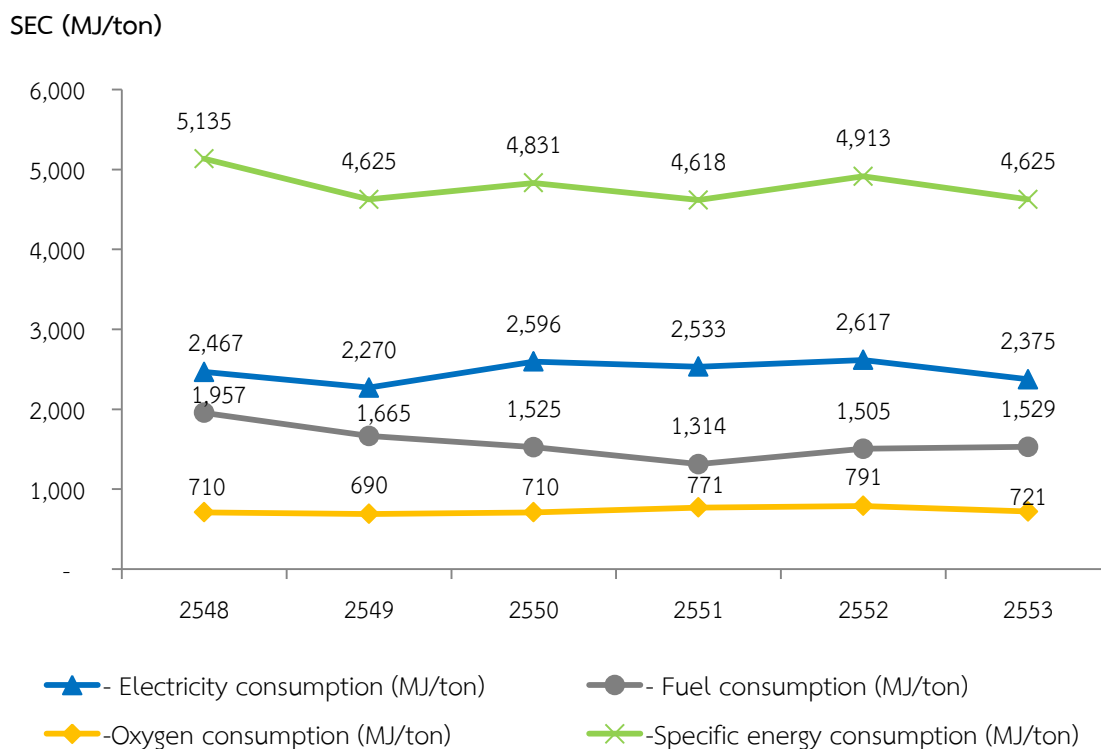
จากข้อมูลที่ได้โดยแบบสอบถาม พบว่า ในกระบวนการนี้มีผู้ประกอบการให้ข้อมูลมาทั้งสิ้นจำนวน 2 รายและเป็นข้อมูลของทุกปี มีขนาดกำลังการผลิตรวมประมาณ 590,000 ตัน โดยจากรูปที่ 4.9 จะเห็นถึงแนวโน้มของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้ที่มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น โดยในปีพ.ศ.2553 มีปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 5.8 แสนตัน

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิตของแต่ละชนิด พลังงานจากไฟฟ้าก็ยังคงเป็นชนิดที่มีการใช้มากที่สุดสำหรับกระบวนการที่มีเตาหลอม EAF รองลงมาคือพลังงานจากความร้อน ส่วนพลังงานจากการใช้ออกซิเจนมีค่าน้อยที่สุด โดยมีสัดส่วนของการใช้พลังงานแต่ละชนิดเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นว่า การใช้พลังงานจากไฟฟ้าต่อตันของผลผลิตคิดเป็น 52% การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงต่อตันผลผลิตคิดเป็น 33% และสำหรับพลังงานจากการใช้ออกซิเจนต่อตันผลผลิตคิดเป็น 15%

เมื่อพิจารณาพลังงานรวมต่อตันผลผลิตในรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าแนวโน้มลดลงเล็กน้อยจากปีพ.ศ.2548 ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ 5,135 MJ/ton นอกจากนี้ค่าเฉลี่ยของพลังงานรวมต่อตันผลผลิตอยู่ที่ 4,791 MJ/ton



รูปที่ 4.9 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 3

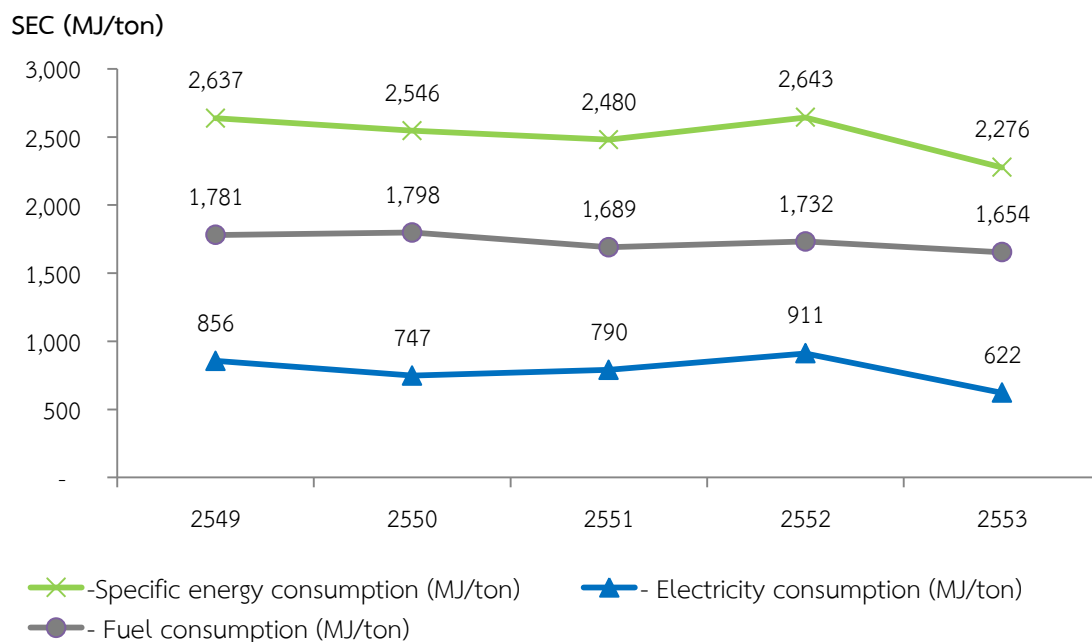


รูปที่ 4.10 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 3

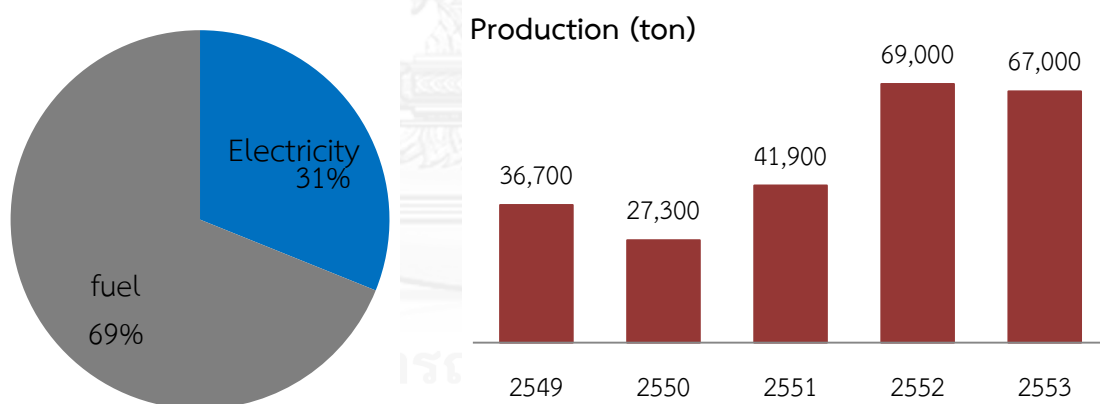
4.1.4 กระบวนการผลิตที่ 4 เหล็กถลุงไม่มีเตาหลอม EAF

โรงงานในกระบวนการผลิตที่ 4 จะเหมือนกับกระบวนการผลิตในกระบวนการอบร้อน และกระบวนการรีดร้อนของโรงงานในกระบวนการผลิตที่ 3 ข้อมูลที่ได้จากผู้ผลิตในกลุ่มนี้มีเพียง 2 ราย โดยในปีพ.ศ.2549-2551 มีข้อมูลใช้ได้เพียงรายเดียว จากนั้นในปีพ.ศ.2552 และ 2553 มีข้อมูลใช้ได้ 2 ราย เมื่อพิจารณาปริมาณการผลิตเหล็กถลุงจากรูปที่ 4.12 ไม่สามารถบอกแนวโน้มของปริมาณการผลิตแน่ชัด เนื่องจาก จำนวนข้อมูลของแต่ละปีไม่เท่ากันทั้งหมด ดังนั้นจึงขอกกล่าวถึงแนวโน้มในแต่ละโรงงาน จากข้อมูลของทั้งสองโรงงาน โรงงานหนึ่งให้ข้อมูลมา 2 ปีและพบว่า ในปีพ.ศ.2553 ผลิตได้มากกว่าปีพ.ศ.2552 อยู่ 10,000 ตัน ส่วนอีกโรงงานหนึ่งให้ข้อมูลจากปีพ.ศ.2549-2553 โดยมีแนวโน้มของการผลิตลดลงถึงแม้การผลิตจะผลิตมากบ้างและน้อยบ้างสลับกันไป โดยสามารถดูรายละเอียดของข้อมูลได้ในส่วนของภาคผนวก

ปริมาณการใช้พลังงานรวมต่อตันผลผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 2,516 MJ/ton เมื่อดูจากแนวโน้มของการใช้พลังงานชนิดต่างๆ จากรูปที่ 4.11 พบว่าทุกชนิดมีแนวโน้มของการใช้ที่ลดลง โดยการผลิตในกลุ่มนี้จะใช้พลังงานอยู่ 2 ชนิด คือ พลังงานจากไฟฟ้าและพลังงานจากเชื้อเพลิง โดยมีสัดส่วนของการใช้พลังงานจากไฟฟ้าต่อพลังงานจากเชื้อเพลิงเฉลี่ยอยู่ที่ 31% : 69%



รูปที่ 4.11 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 4



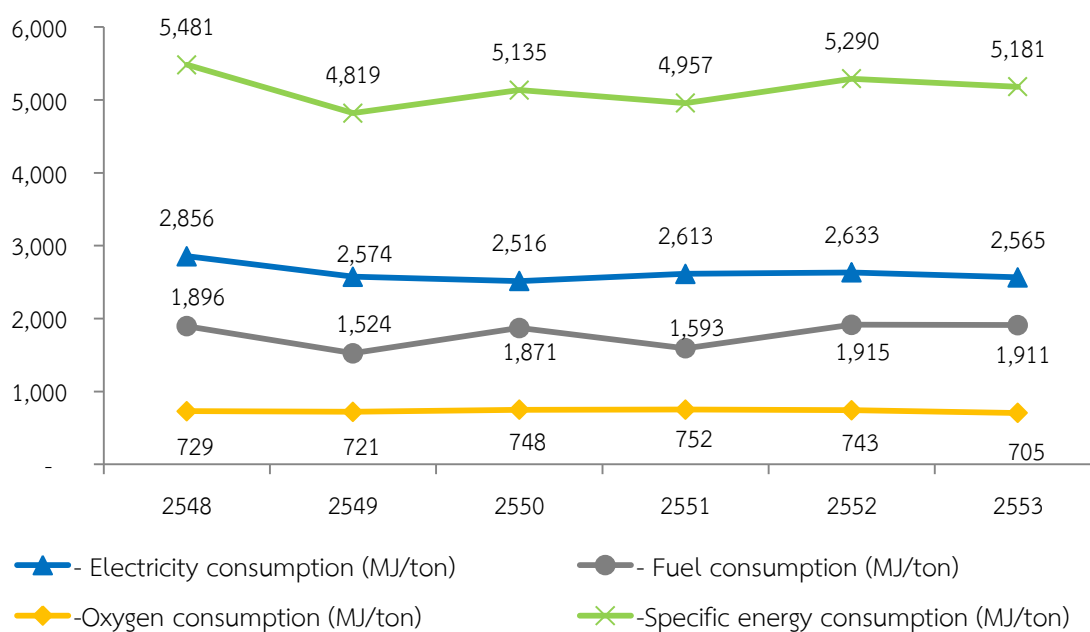
รูปที่ 4.12 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 4

4.1.5 กระบวนการผลิตที่ 5 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อนมีเตาหลอม EAF

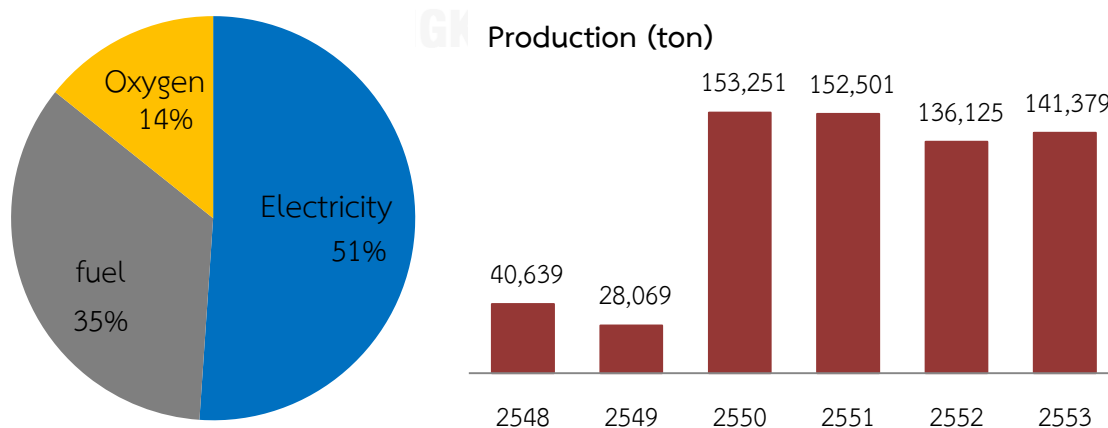
กระบวนการผลิตที่ 5 มีผู้ประกอบการตอบแบบสอบถามมาทั้งสิ้น 2 ราย โดยมีผู้ประกอบการรายหนึ่งได้ให้ข้อมูลและสามารถใช้ได้โดยเป็นข้อมูลของปีพ.ศ.2550-2553 จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่า ทั้งสองรายมีกำลังการผลิตรวมอยู่ที่ประมาณ 1.45 แสนตันต่อปี เมื่อดูแนวโน้มของปริมาณการผลิตในช่วง 4 ปีหลังซึ่งเป็นช่วงปีที่มีข้อมูลครบ จะเห็นว่าปริมาณผลผลิตมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยของปริมาณผลผลิตอยู่ที่ 37,172 ตันต่อปี

ปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิตของพลังงานชนิดต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.13 โดยปริมาณการใช้พลังงานรวมต่อผลผลิตมีค่าอยู่ระหว่าง 4,800-5,500 MJ/ton และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 5,144 MJ/ton และสำหรับสัดส่วนของพลังงานชนิดต่างๆ ซึ่งในกระบวนการผลิตที่มีเตาหลอม EAF มีการใช้พลังงาน 3 ชนิด โดยพบว่า การใช้พลังงานจากไฟฟ้ามีค่ามากที่สุดคือ 51% รองลงมาเป็นพลังงานจากเชื้อเพลิง 35% และสุดท้ายพลังงานจากการใช้ออกซิเจน มีค่า 14%

SEC (MJ/ton)



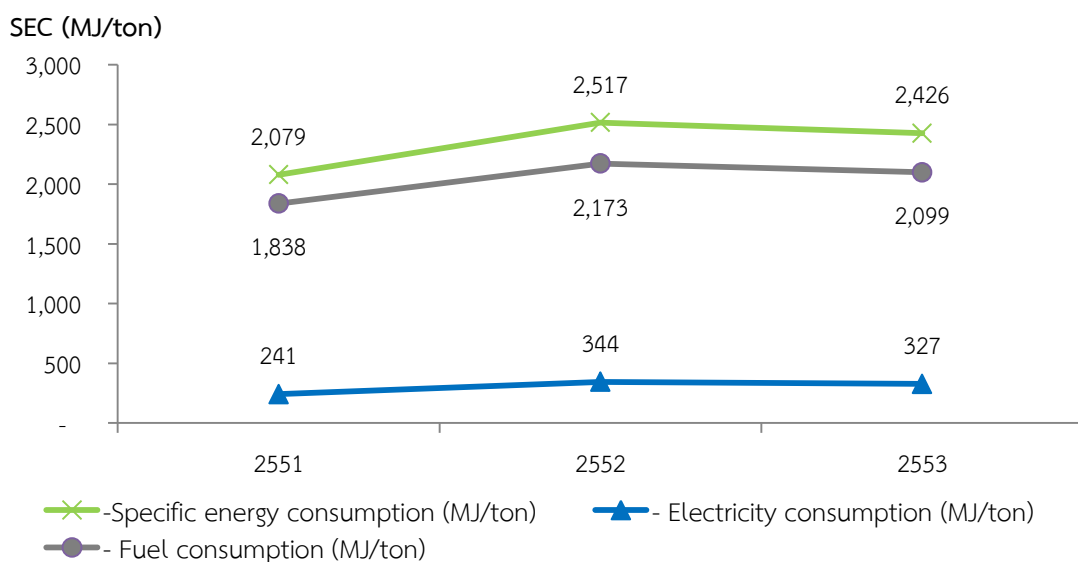
รูปที่ 4.13 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 5



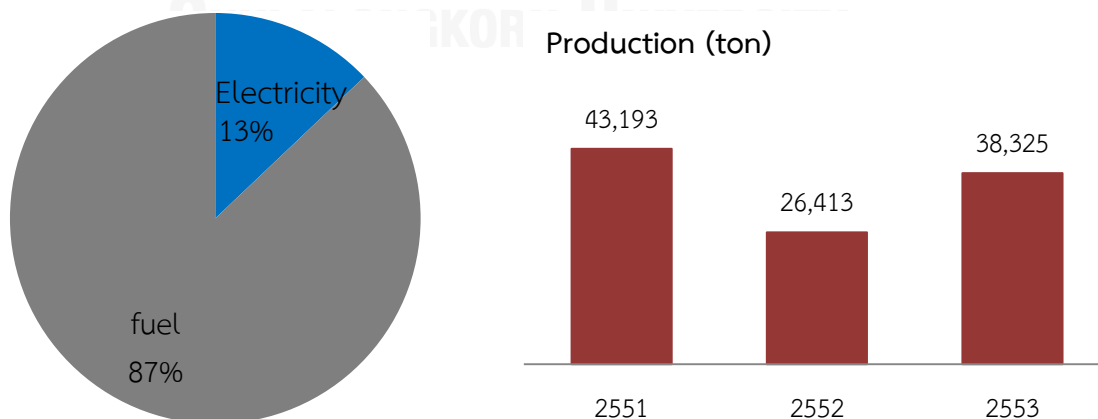
รูปที่ 4.14 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 5

4.1.6 กระบวนการผลิตที่ 6 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อนไม่มีเตาหลอม EAF

กระบวนการผลิตที่ 6 ในส่วนของกระบวนการอบร้อนและกระบวนการรีดเหมือนกับของกระบวนการผลิตที่ 5 แต่ต่างกันตรงที่กระบวนการผลิตนี้จะไม่มีการเตาหลอม EAF ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ เป็นเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อนขนาดเล็กที่ผลิตมาจากบิลเล็ต ในขณะที่กระบวนการผลิตที่ 5 ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีเตาหลอม EAF จะสามารถผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อนขนาดใหญ่ โดยผู้ประกอบการที่ตอบแบบสอบถามกลับมามีเพียงรายเดียวและเป็นข้อมูลของปีพ.ศ.2551-2553 ผลการประมาณจากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 พบว่าปริมาณการผลิตมีน้อยสุดในปีพ.ศ.2552 นอกจากนี้จะเห็นว่า ค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตของทั้ง 3 ปี ค่อนข้างคงที่ โดยมีสัดส่วนของการใช้พลังงานจากความร้อนมากถึง 87%



รูปที่ 4.15 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 6



รูปที่ 4.16 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 6

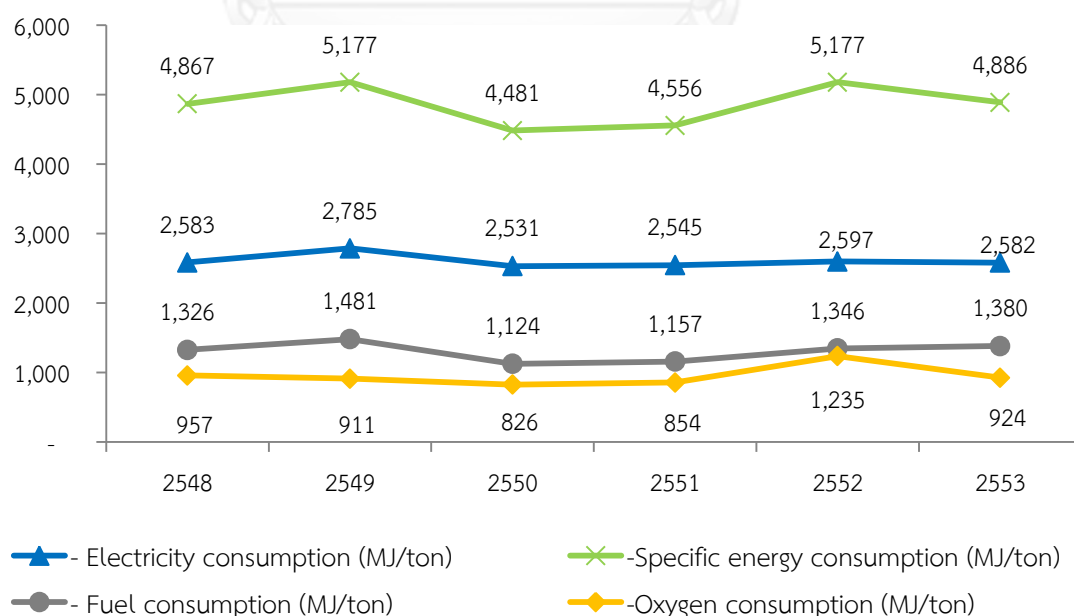
4.1.7 กระบวนการผลิตที่ 7 เหล็กแผ่นรีดร้อนมีเตาหลอม EAF

ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามของผู้ประกอบการในกระบวนการผลิตนี้มี 2 รายซึ่งคิดเป็นข้อมูลของทั้งกลุ่ม เพราะมีผู้ผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนมีเตาหลอม EAF ภายในประเทศเพียง 2 รายเท่านั้น จากข้อมูลพบว่า กำลังการผลิตของทั้ง 2 รายมีค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตของผลิตภัณฑ์เหล็กทรงยาว โดยในปัจจุบันผู้ประกอบการทั้ง 2 ราย มีกำลังการผลิตรวมกันประมาณ 1- 2 ล้านตันต่อปี สำหรับข้อมูลที่ทั้งสองรายตอบแบบสอบถามกลับมา 1 ใน 2 ราย ได้ให้ข้อมูลกลับมาครบถ้วนทุกปี ส่วนอีกรายหนึ่งขาดข้อมูลของปีพ.ศ.2548-2549

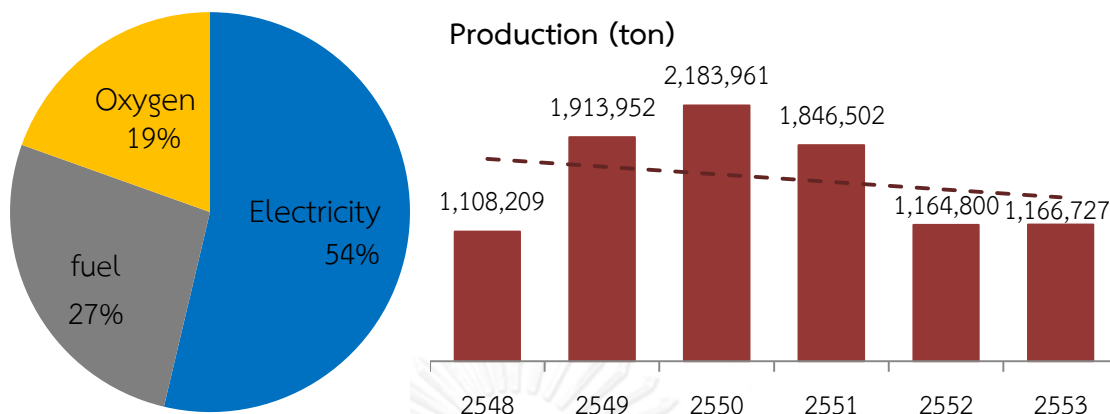
เมื่อพิจารณาปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตตั้งแต่ปีพ.ศ.2550-2553 จะเห็นว่ามียาลดลง จาก 2.2 ล้านตันต่อปี เหลือเพียง 1.2 ล้านตันต่อปี ดังรูปที่ 4.18 เมื่อปริมาณการผลิตลดลง ผลที่น่ายินดีก็คือปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิตมีค่าเพิ่มขึ้น แต่จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าปริมาณการใช้พลังงานรวม พลังงานจากไฟฟ้า พลังงานจากเชื้อเพลิง และพลังงานจากการใช้ออกซิเจนต่อผลผลิตกลับมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยปริมาณการใช้พลังงานรวมต่อผลผลิตมีค่าอยู่ในช่วง 4,400-5,200 MJ/ton และมีค่าเฉลี่ยของพลังงานรวมต่อผลผลิตเป็น 4,851 MJ/ton

เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนของการใช้พลังงานชนิดต่างๆ พบว่าในกระบวนการผลิตที่มีเตาหลอม EAF พลังงานจากไฟฟ้ายังคงมีสัดส่วนของการใช้มากกว่าพลังงานชนิดอื่นๆ โดยมีค่าประมาณ 54% รองลงมาเป็นพลังงานจากเชื้อเพลิงมีค่า 27% และสุดท้ายคือพลังงานจากการใช้ออกซิเจนในขั้นตอนการหลอมเศษเหล็ก 19%

SEC (MJ/ton)



รูปที่ 4.17 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 7

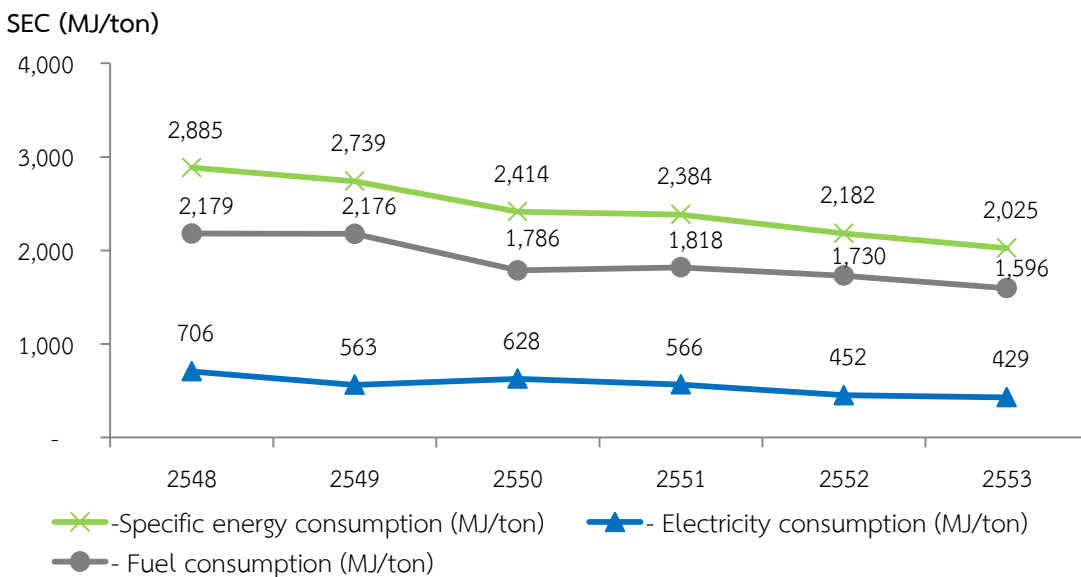


รูปที่ 4.18 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 7

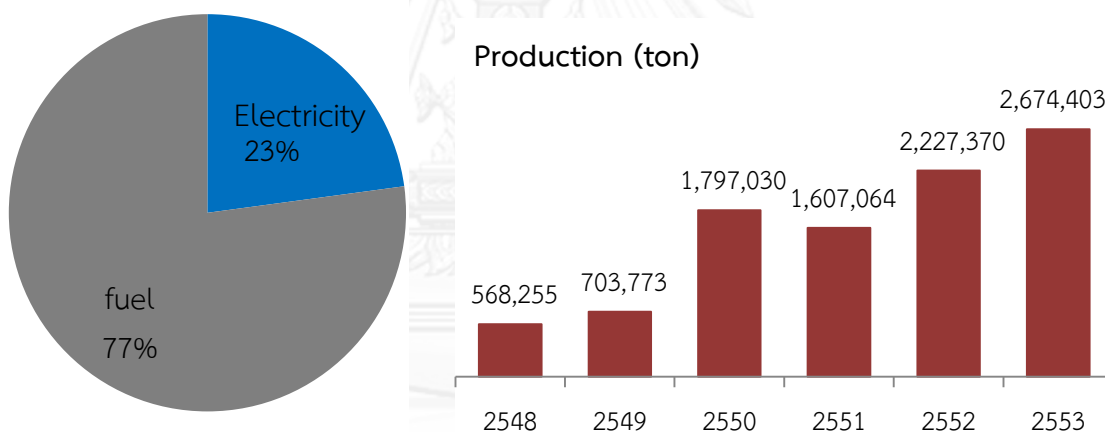
4.1.8 กระบวนการผลิตที่ 8 เหล็กแผ่นรีดร้อนไม่มีเตาหลอม EAF

ลักษณะการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนของกระบวนการผลิตที่ไม่มีเตาหลอม EAF จะมีส่วนที่เหมือนและส่วนที่ต่างจากกระบวนการผลิตที่มีเตาหลอม EAF กล่าวคือ กระบวนการผลิตนี้มีขั้นตอนการผลิตเหมือนกับกระบวนการผลิตที่ 7 ในส่วนของกระบวนการอบร้อนและกระบวนการรีดร้อน แต่จะต่างกันตรงที่ กระบวนการนี้ไม่มีขั้นตอนของการหลอมและหล่อสแลป โดยสแลปที่ใช้จะสั่งซื้อมาจากผู้ผลิตสแลปอีกต่อหนึ่ง นอกจากนี้ ลักษณะของกระบวนการผลิตที่ 7 เป็นกระบวนการผลิตที่ผลิตอย่างต่อเนื่องตั้งแต่การหลอมเศษเหล็กการหล่อ ไปจนถึงการรีดร้อนสแลปจนได้ออกมาเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน ซึ่งกระบวนการผลิตที่ 8 สแลปที่สั่งซื้อมาและโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดหนากว่า และเนื่องจากการให้ความร้อนกับสแลปจากอุณหภูมิห้อง ส่งผลให้ใช้เวลาในการอบร้อนนานกว่า และใช้พลังงานมากกว่า

ข้อมูลจากแบบสอบถามของกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนไม่มีเตาหลอม EAF พบว่ามีผู้ประกอบการให้ข้อมูลจำนวน 3 ราย จากผู้ผลิตภายในประเทศจำนวน 3 ราย คิดเป็น 100% แต่ข้อมูลที่ได้มาไม่ได้ครบถ้วน 100% โดยในปีพ.ศ.2548-2549 มีข้อมูลใช้ได้เพียง 2 โรงงานเท่านั้น เมื่อพิจารณาปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กตั้งแต่ปีพ.ศ.2550-2553 พบว่ามีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดคือ 2.67 ล้านตันต่อปีของปีพ.ศ.2553 จากการเพิ่มขึ้นของปริมาณการผลิต ทำให้ปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิตมีการลดลงอย่างต่อเนื่องในทุกชนิดพลังงาน ดังรูปที่ 4.19 โดยจะเห็นว่าพลังงานรวมต่อผลผลิต (SEC) ลดลงจาก 2,885 MJ/ton เป็น 2,025 MJ/ton โดยการลดลงคิดเป็น 30% ในกระบวนการนี้ใช้พลังงาน 2 ชนิดคือ พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงในการอบร้อนเหล็ก และพลังงานจากไฟฟ้าในการรีดร้อนเหล็ก โดยมีสัดส่วนของการใช้พลังงานพลังงานจากไฟฟ้าต่อพลังงานจากเชื้อเพลิงเป็น 23% ต่อ 77% ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 8



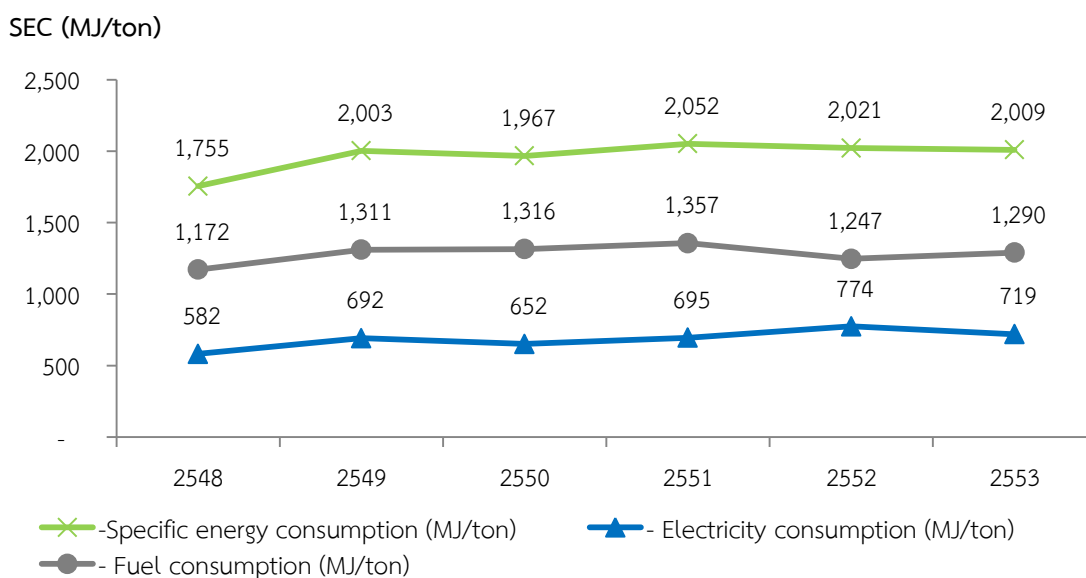
รูปที่ 4.20 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 8

4.1.9 กระบวนการผลิตที่ 9 เหล็กแผ่นรีดเย็น

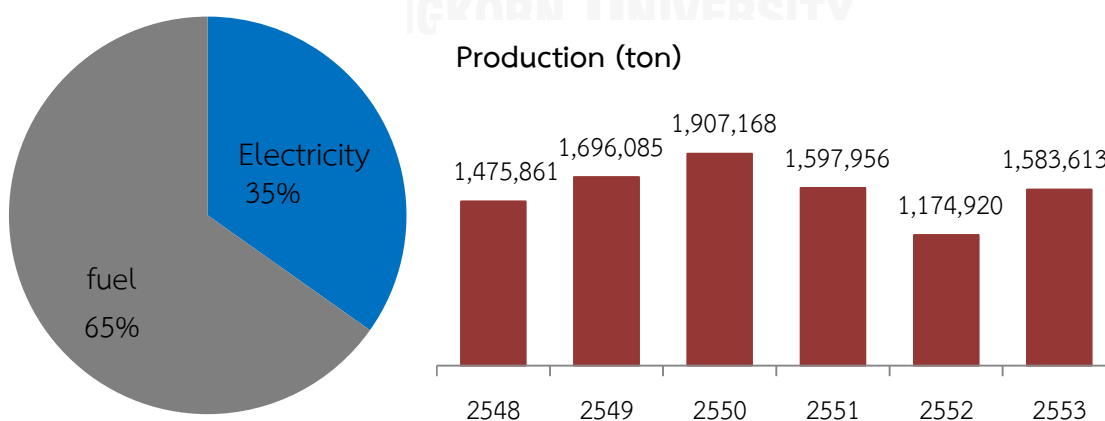
ข้อมูลของกระบวนการผลิตที่ได้จากแบบสอบถามซึ่งมีผู้ประกอบการให้ข้อมูลกลับมาจำนวน 3 ราย คิดเป็น 100% ของจำนวนผู้ผลิตทั้งหมด โรงงานในกระบวนการผลิตนี้เป็นผู้ประกอบการรายใหญ่จำนวน 2 ราย และขนาดกลาง 1 ราย อย่างไรก็ตาม ในความเป็นจริงผู้ประกอบการทั้งสองรายจะมีความแตกต่างในด้านกระบวนการผลิต ซึ่งจะมีผลต่อประเภทผลิตภัณฑ์เหล็กแผ่นม้วนรีดเย็นที่ผลิตด้วย โดยโรงงานหนึ่งจะมีขั้นตอนของการอบอ่อนเหล็กแผ่นหลังจากการรีดเย็นแบบต่อเนื่อง (Continuous annealing) ขณะที่อีกโรงงานจะใช้การอบอ่อนเป็นแบบอบเป็นม้วนซ้อนกัน (Batch annealing) ดังนั้นข้อมูลของการใช้พลังงานที่

ได้จากการสำรวจ จะบอกได้เพียงภาพรวมของการใช้พลังงานเท่านั้น แต่หากจะนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับผู้ประกอบการรายอื่น จำเป็นต้องพิจารณาในรายละเอียดของประเภทเครื่องจักรในการผลิตด้วย จากการประมาณพบว่า ปริมาณการผลิตรวมของโรงงานที่ให้ข้อมูลมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.57 ล้านตันต่อปี โดยในปีพ.ศ.2550 มีปริมาณการผลิตมากที่สุดถึง 1.9 ล้านตัน ส่วนปีพ.ศ.2552 มีปริมาณการผลิตน้อยที่สุด โดยผลิตเพียง 1.2 ล้านตัน ดังรูปที่ 4.22

สำหรับปริมาณการใช้พลังงานต่อผลผลิต ไม่ว่าจะเป็พลังงานจากไฟฟ้าหรือพลังงานจากเชื้อเพลิง มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ในช่วง 4 ปีแรก คือ ตั้งแต่ปีพ.ศ.2548-2551 และสูงที่สุดในปี พ.ศ. 2551 คาดว่าเพราะปริมาณการผลิตที่ลดต่ำลงจนน้อยที่สุด ส่งผลให้อัตราการใช้พลังงานต่อหน่วยผลผลิตสูงที่สุด แต่ก็ไม่มากไปกว่าปีข้างเคียงมากนัก สำหรับสัดส่วนของการใช้พลังงานจากไฟฟ้าจะต่ำกว่าเชื้อเพลิง คืออยู่ที่ 35% : 65%



รูปที่ 4.21 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 9



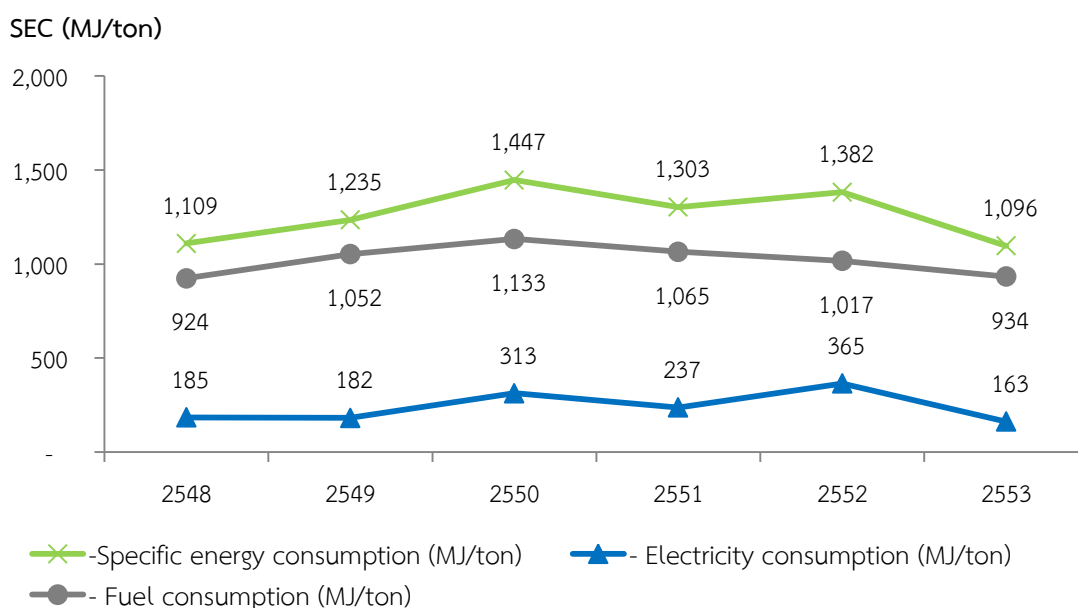
รูปที่ 4.22 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 9

4.1.10 กระบวนการผลิตที่ 10 เหล็กแผ่นชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน

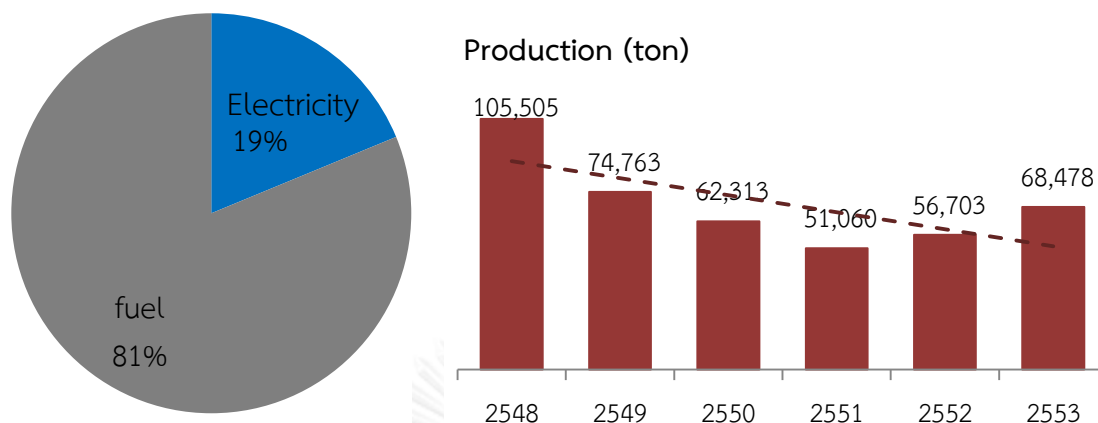
ข้อมูลดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต (SEC) ของกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นชุบสังกะสีชนิดจุ่มร้อนจะคล้ายกับของกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น กล่าวคือ ข้อมูลที่ได้สามารถบอกได้เพียงภาพรวมของการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเท่านั้น เนื่องจากลักษณะของกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นชุบสังกะสีด้วยกระบวนการ HDG จะเป็นไปได้หลายลักษณะ ทั้งที่ใช้เหล็กแผ่นรีดเย็น ซึ่งต้องนำมาผ่านขั้นตอนของการอบอ่อนก่อนแล้วจึงนำเหล็กไปชุบสังกะสี หรืออาจไม่จำเป็นต้องอบอ่อน ซึ่งในบางโรงงานจะมีการผลิตทั้งสองแบบอยู่ในโรงงานเดียวกัน โดยข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถาม พบว่ามีผู้ประกอบการให้ข้อมูลจำนวน 3 รายจากผู้ผลิตในกระบวนการผลิตนี้จำนวน 5 ราย

จากข้อมูลในรูปที่ 4.24 พบว่าปริมาณการผลิตในปี พ.ศ. 2548 มีค่าสูงถึงหลักแสนตันต่อปี และปริมาณการผลิตค่อยๆลดลงและมาทรงตัวอยู่ในระดับ ห้าถึงหกหมื่นตันต่อปี สำหรับการใช้พลังงานรวมในกระบวนการผลิตพบว่าจะอยู่ที่ระดับ 1,000 – 1,400 MJ/ton

พลังงานที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด แบ่งเป็นสัดส่วนของการใช้ไฟฟ้าประมาณ 19% และ การใช้พลังงานจากเชื้อเพลิง 81% ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของการผลิตที่ส่วนใหญ่จะใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง (น้ำมันเตา และ LPG) สำหรับการผลิตไอน้ำเพื่ออุ่นและผสมกับต่างสำหรับการทำความสะอาดผิวก่อนการเคลือบ เพื่อล้างน้ำมันออกจากเหล็กแผ่นรีดเย็น และ สำหรับการหลอมสังกะสีเป็นหลัก ในส่วนของพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่จะใช้กับระบบการลำเลียงแผ่นเหล็กในสายการผลิตและสาธารณูปโภค (Utility) เป็นหลัก



รูปที่ 4.23 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 10



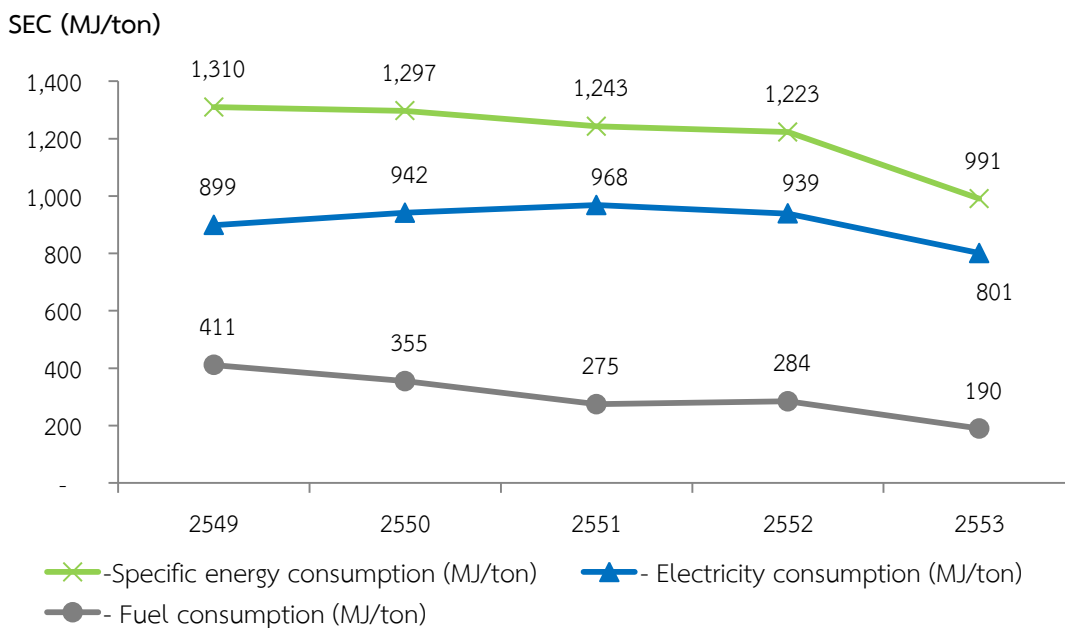
รูปที่ 4.24 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 10

4.1.11 กระบวนการผลิตที่ 11 เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า

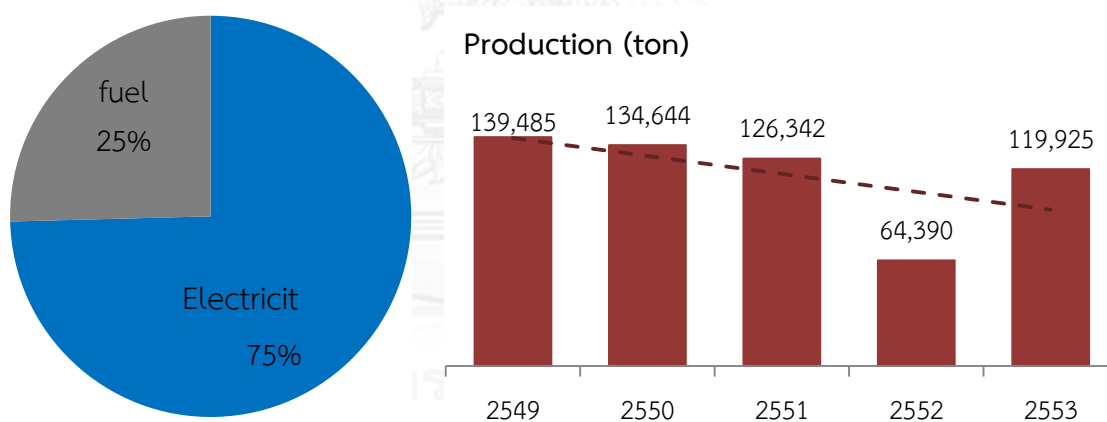
ผู้ประกอบการในกระบวนการผลิตนี้มีอยู่เพียงรายเดียวในประเทศไทยและเป็นรายเดียวในอาเซียน ดังนั้นข้อมูลการใช้พลังงานของผู้ประกอบการรายนี้จึงบ่งบอกได้ถึงประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตทั้งกลุ่มได้อย่างชัดเจน

ผู้ประกอบการเพียงรายเดียวนี้มีกำลังการผลิตสูงสุด 1.8 แสนตันต่อปี และโดยเฉลี่ยแล้วสามารถผลิตได้จริงประมาณ 1.2 แสนตันต่อปี คิดเป็นร้อยละ 66.67 ของกำลังการผลิตสูงสุด แนวโน้มของการผลิตจากรูปที่ 4.26 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าลดลงในทุกๆ ปี ส่งผลให้ปริมาณการใช้พลังงานรวมในกระบวนการผลิตมีแนวโน้มที่ลดลงเช่นเดียวกัน กล่าวคือ ลดลงจาก 1,310 MJ/ton ในปีพ.ศ.2549 ไปเป็น 991 MJ/ton ในปีพ.ศ.2553 และมีค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานรวมอยู่ที่ 1,217 MJ/ton

นอกจากปริมาณการใช้พลังงานรวมที่กล่าวมา หากพิจารณาถึงสัดส่วนของการใช้พลังงานแต่ละชนิด จะพบว่า 75% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมดเป็นพลังงานจากไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของกระบวนการผลิตที่ใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีในการเคลือบชั้นสังกะสีลงบนผิวของเหล็กแผ่นรีดเย็น ในขณะที่อีก 25% เป็นพลังงานจากเชื้อเพลิง โดยหลักๆ จะถูกใช้ไปกับการหลอมสังกะสี นอกจากนี้จะใช้สำหรับการให้ความร้อนกับกรดเพื่อใช้ล้างน้ำมันที่ติดบนผิวของเหล็กแผ่นรีดเย็นก่อนการเคลือบ และใช้สำหรับการให้ความร้อนเพื่ออบชั้นเคลือบให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งาน



รูปที่ 4.25 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 11



รูปที่ 4.26 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 11

4.1.12 กระบวนการผลิตที่ 12 เหล็กแผ่นเคลือบตีบุก/โครเมียม

ผู้ประกอบการในกระบวนการผลิตเหล็กแผ่นเคลือบตีบุกและโครเมียมของไทยมีอยู่ด้วยกัน 2 ราย โดยทั้ง 2 รายได้ร่วมทุนกับบริษัทต่างประเทศ และผลิตผลิตภัณฑ์หลัก 2 ประเภทด้วยกัน คือ เหล็กแผ่นเคลือบตีบุก และเหล็กแผ่นเคลือบโครเมียม ซึ่งทั้งสองประเภทมีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน

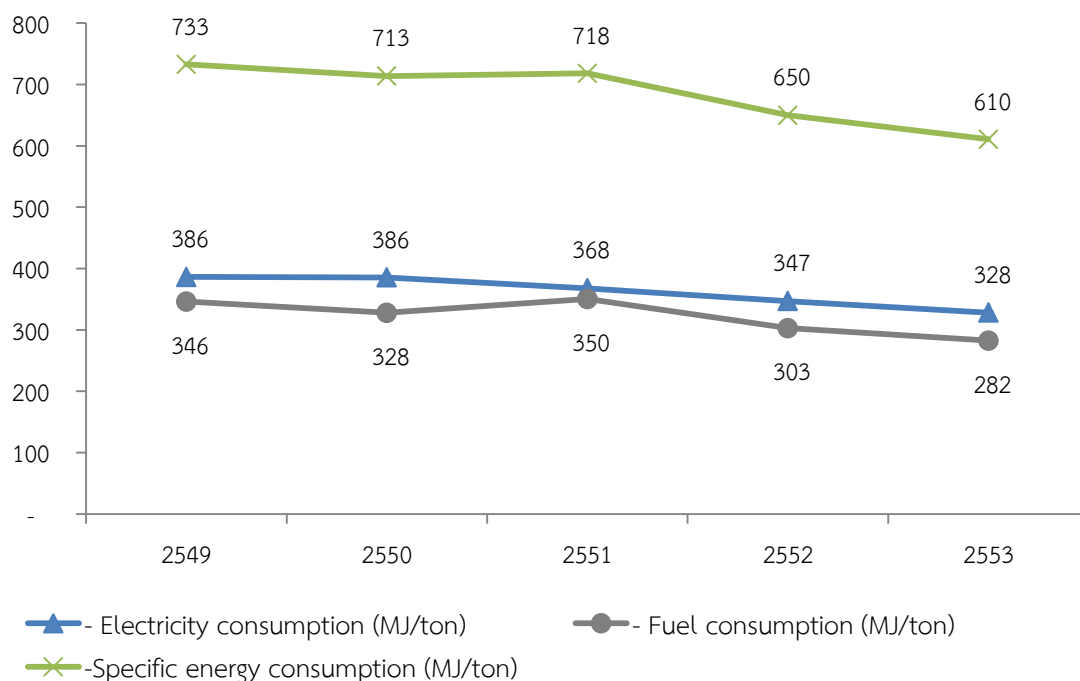
เหล็กแผ่นเคลือบดีบุกถูกนำไปใช้สำหรับผลิตบรรจุภัณฑ์กระป๋อง เช่น ป๊อป กาแฟ กระป๋อง ผักหรือผลไม้กระป๋อง เป็นต้น ส่วนเหล็กแผ่นเคลือบโครเมียมใช้สำหรับบรรจุของแห้งหรือของที่มีฤทธิ์ไม่กัดกร่อนรุนแรง เช่น กระป๋องใส่ขนมแห้ง กระป๋องน้ำมัน กระป๋องปลาทูน่า กระป๋องใส่อาหารแมว เนื้อกระป๋อง เป็นต้น อย่างไรก็ตามทั้ง 2 ประเภทมีกระบวนการผลิตที่คล้ายกัน คือ จะผลิตหรือเคลือบผิวโดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

จากวิธีการผลิตที่กล่าวมา น่าจะประเมินได้ว่า พลังงานจากไฟฟ้าน่าจะเป็นพลังงานหลักในกระบวนการผลิต ซึ่งจากรูปที่ 4.28 ทำให้เห็นสัดส่วนของการใช้พลังงาน โดยพลังงานจากไฟฟ้ามีการใช้มากที่สุดถึง 53% และรองลงมาเป็นพลังงานจากเชื้อเพลิง 47%

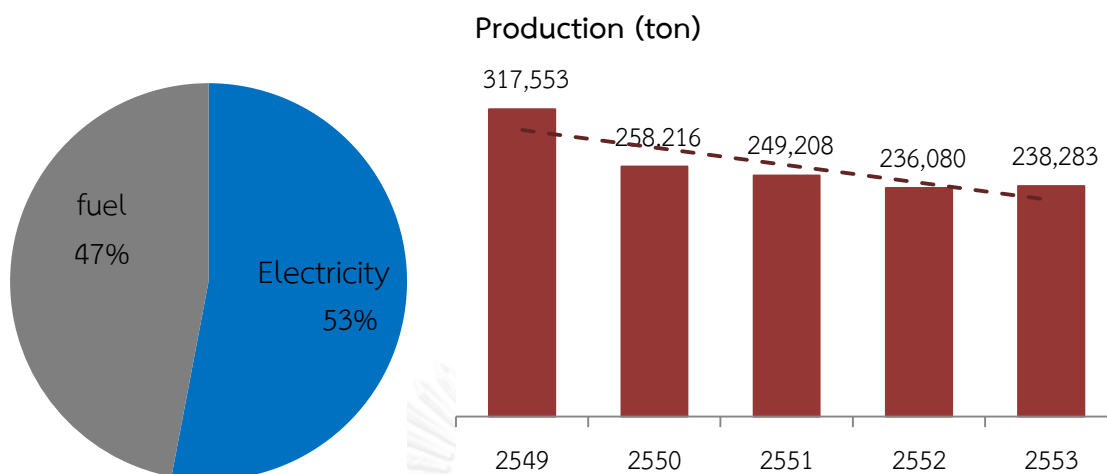
เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ในแต่ละปี พบว่า พลังงานแต่ละชนิดมีแนวโน้มที่จะลดลง โดยปริมาณการใช้พลังงานรวมเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 685 MJ/ton ดังรูปที่ 4.27 ปริมาณการใช้พลังงานแต่ละชนิดที่ลดลงในทุกๆ ปี ส่วนหนึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณการผลิตที่มีแนวโน้มลดลงในทุกๆ ปีเช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.28

ในกระบวนการนี้ได้ข้อมูลแบบสอบถามกลับมาเพียงรายเดียว ซึ่งเป็นรายที่มีกำลังการผลิตค่อนข้างสูง โดยสามารถผลิตได้สูงสุด 516,000 ตันต่อปี แต่จากข้อมูลจริง โรงงานมีการผลิตเพียงร้อยละ 50 เท่านั้น โดยปีพ.ศ.2549 มีการผลิตสูงสุดถึง 3.2 แสนตันต่อปี

SEC (MJ/ton)



รูปที่ 4.27 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 12



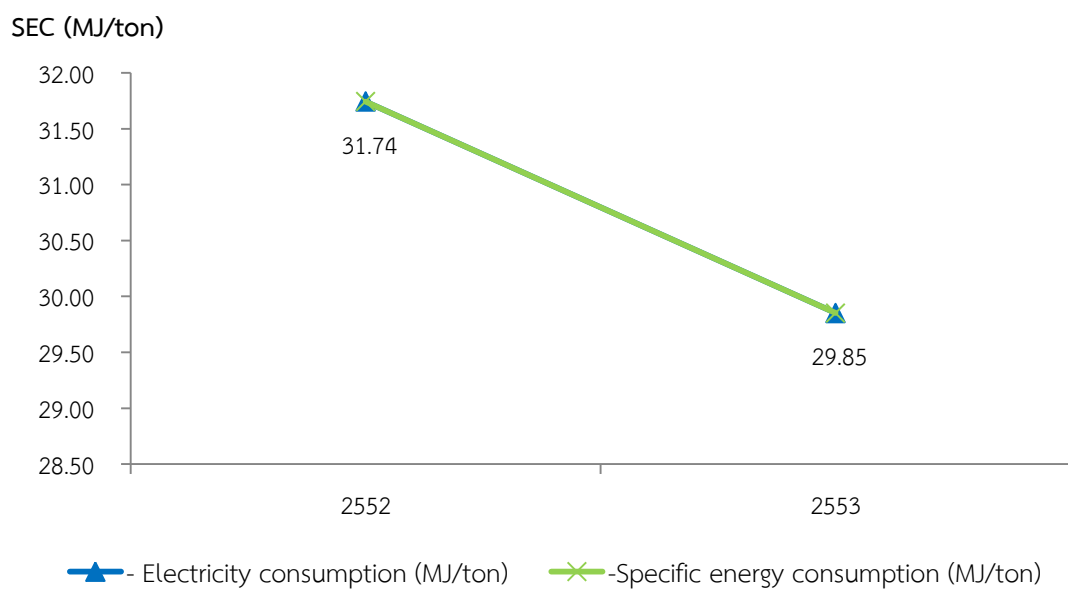
รูปที่ 4.28 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 12

4.1.13 กระบวนการผลิตที่ 13 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น

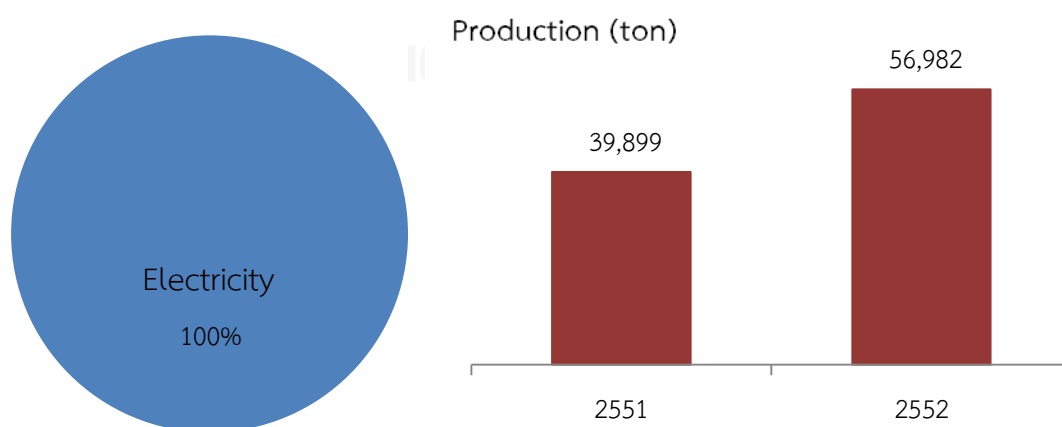
กระบวนการผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็นมีขั้นตอนที่สั้นที่สุดและใช้พลังงานต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เหล็กกระบวนการอื่นๆ เป็นโรงงานที่ใช้เงินลงทุนต่ำกว่ากระบวนการผลิตอื่น ในกระบวนการผลิตมีขั้นตอนสำคัญเพียงขั้นตอนเดียวคือการนำเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot rolled coil) มาคลี่ออกและผ่านเข้าเครื่อง Slitting เพื่อตัดแบ่งให้ได้เหล็กแผ่นที่มีหน้าตัดแคบลง จากนั้นจึงผ่านเหล็กแผ่นหน้าแคบไปยังเครื่องขึ้นรูป เพื่อพับแผ่นเหล็กให้ได้รูปร่างและขนาดตามต้องการ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้เช่น เหล็กฉาก เหล็กตัวซี เหล็กตัวไอ เป็นต้น ดังนั้นพลังงานที่ใช้ทั้งหมดจึงเป็นพลังงานจากไฟฟ้า

จากข้อมูลในแบบสอบถาม จะสังเกตได้ว่า ผู้ประกอบการในกระบวนการผลิตนี้ จะไม่ผลิตเพียงเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็นแต่เพียงอย่างเดียว แต่จะผลิต ท่อเหล็ก รวมไปถึงท่อเหล็กชุบสังกะสีด้วย ทั้งนี้เนื่องจากหากผลิตเพียงอย่างเดียวอาจไม่คุ้มกับการลงทุนและประกอบกับขั้นตอนบางขั้นตอนมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันหรือเครื่องจักรสามารถผลิตสินค้าได้ทั้งสองประเภท ดังนั้น ในการประเมินการใช้พลังงานของสินค้าเหล่านี้จำเป็นต้องทราบข้อมูลการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์แต่ละประเภทอย่างชัดเจน หากผู้ประกอบการไม่ได้ให้ข้อมูลมา ทางผู้วิจัยจะประเมินโดยทางอ้อม ซึ่งอาศัยข้อมูลในส่วนที่สองจากแบบสอบถาม ที่ทางโรงงานจะให้ข้อมูลปริมาณการใช้ไฟฟ้าในการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท และหากผู้ประกอบการไม่ได้ให้ข้อมูลในส่วนนี้มากอีก ทางผู้วิจัยก็ไม่สามารถประเมินการใช้พลังงานได้ และจำเป็นต้องตัดข้อมูลของผู้ประกอบการนี้ออกจากการคำนวณ

สำหรับข้อมูลที่ได้กลับมาจากผู้ประกอบการมีเพียง 3 ราย และเป็นข้อมูลที่ใช้ได้เพียงปีพ.ศ.2552 – 2553 ซึ่งปีพ.ศ.2552 สามารถใช้ข้อมูลได้เพียง 2 โรงงาน โดยจากรูปที่ 4.30 พบว่า แม้จะมีข้อมูลเพียง 2 ปี แต่ก็ทำให้เห็นว่าปริมาณการผลิตมีค่าใกล้เคียงกันหากมีข้อมูลครบทั้ง 3 โรงงานเท่ากัน โดยปริมาณการผลิตหลักโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็นมีค่ามากที่สุดในปี 2553 ที่จำนวน 5.7 หมื่นตันต่อปี สำหรับพลังงานรวมในการผลิตจะเป็นพลังงานจากไฟฟ้าทั้งหมดซึ่งมีปริมาณน้อยมากเฉลี่ยประมาณ 31 MJ/ton ดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 13



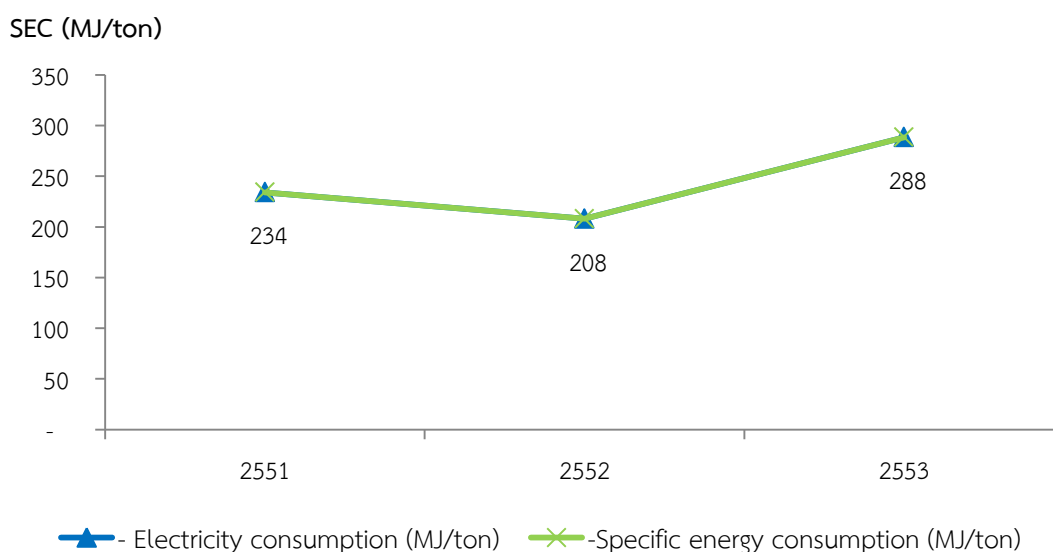
รูปที่ 4.30 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 13

4.1.14 กระบวนการผลิตที่ 14 ท่อเหล็ก ERW

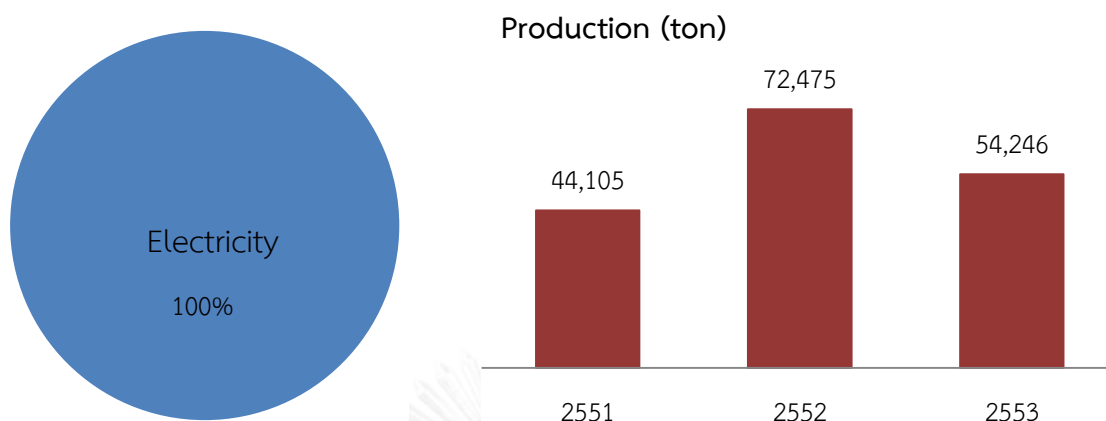
ลักษณะการผลิตของผู้ผลิตท่อเหล็ก ERW มีขั้นตอนที่ไม่แตกต่างไปจากกระบวนการผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น เช่น เหล็กรูปตัวซี เหล็กรูปตัว H แต่จะมีขั้นตอนที่เพิ่มขึ้นมา นั่นคือ หลังจากที่ขึ้นรูปเหล็กจนมีลักษณะเป็นท่อกลมแบบเปิดแล้ว จากนั้นจะผ่านท่อเหล็กนี้ เข้ายังเครื่องเชื่อมไฟฟ้าแบบ ERW ซึ่งอาศัยการเหนี่ยวนำของขดลวดที่อยู่ภายในให้บริเวณรอยต่อของท่อเหล็กเกิดความร้อนขึ้น จากนั้นจึงอัดรอยต่อเข้าหากัน เพื่อประสานให้ขอบทั้งสองติดกัน เมื่อได้ท่อเหล็กกลมแล้วจะทำการไสตะเข็บที่เกิดขึ้นให้เรียบ ก่อนจะนำท่อเหล็กกลมที่ผลิตได้เข้าเครื่องตัดท่อให้ตรง จากขั้นตอนที่กล่าวมาทั้งหมด จะเห็นว่าพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้พลังงานจากไฟฟ้า

จากข้อมูลที่ได้โดยแบบสอบถาม พบว่ามีผู้ประกอบการที่ให้ข้อมูลและสามารถนำมาใช้ได้จำนวน 3 รายและเป็นข้อมูลของปีพ.ศ.2551-2553 โดยข้อมูลของปีพ.ศ.2551 สามารถนำมาใช้ได้เพียง 2 ราย โดยในที่นี่ผู้ประกอบการทั้ง 3 รายที่เป็นผู้ผลิตเหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็นรูปตัวซีก็จะเป็นผู้ผลิตท่อเหล็ก ERW ด้วย

การใช้พลังงานรวมในกระบวนการผลิตจะเป็นพลังงานจากไฟฟ้าทั้งหมด คิดเป็น 100% โดยมีค่าเฉลี่ยของพลังงานจากไฟฟ้าอยู่ที่ 244 MJ/ton ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานในการผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น จะพบว่ากระบวนการเชื่อมท่อเหล็กจะใช้พลังงานจากไฟฟ้าในค่อนข้างสูง ประมาณ 200 MJ/ton อย่างไรก็ตาม นอกจากขั้นตอนการเชื่อมท่อเหล็กแล้ว ท่อเหล็กกลมซึ่งเป็นท่อตรงบางส่วนจะถูกนำไปผ่านเข้าเครื่องตัดท่อ เพื่อตัดให้ท่อเหล็กมีลักษณะต่างๆ และบางส่วนจะถูกกดเพื่อเปลี่ยนรูปจากท่อกลมมาเป็นท่อสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4.31 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 14

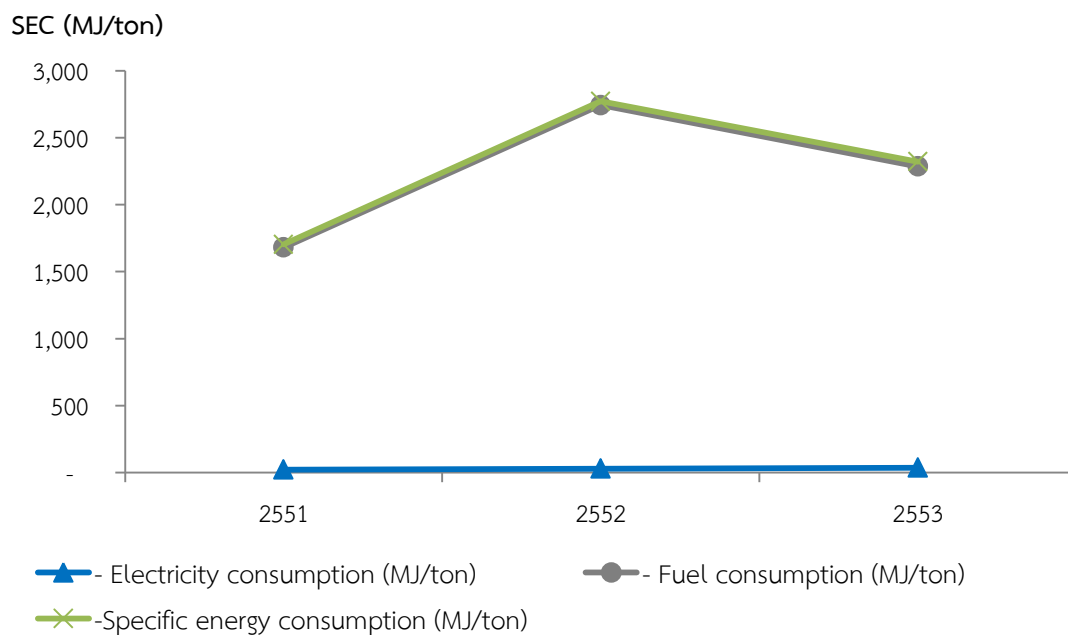


รูปที่ 4.32 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 14

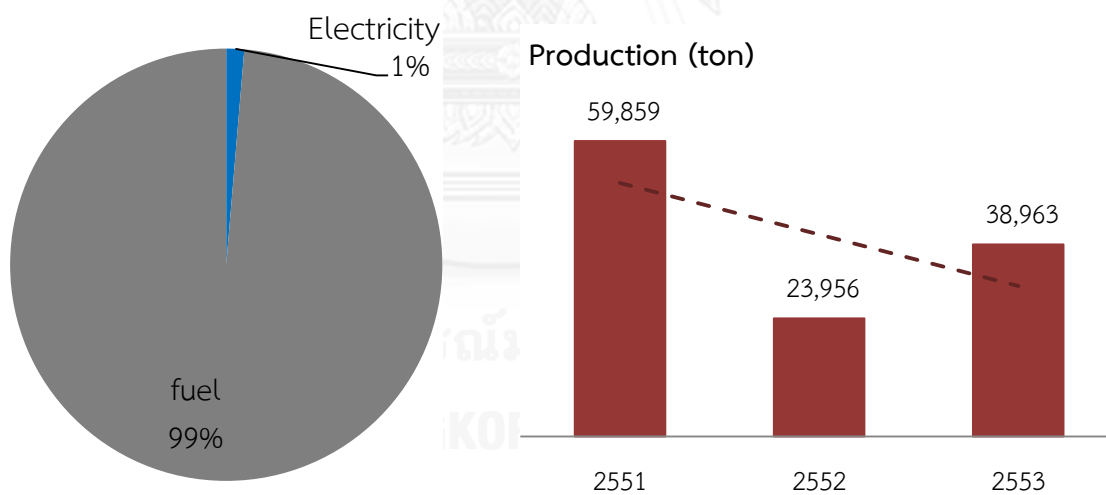
4.1.15 กระบวนการผลิตที่ 15 ท่อเหล็กชุบสังกะสี

โรงงานในกระบวนการนี้ไม่ได้ตั้งขึ้นเพื่อชุบสังกะสีเพียงอย่างเดียว แต่กระบวนการชุบสังกะสีจะผนวกเข้ากับโรงงานของผู้ผลิตท่อเหล็ก เพื่อทำการชุบสังกะสีจากท่อเหล็กที่ผลิตได้เพิ่มเติม เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ของบริษัท ขั้นตอนในการชุบสังกะสีให้กับท่อเหล็กก็ไม่ซับซ้อน กล่าวคือ จะผ่านท่อเหล็กลงไปในอ่างสังกะสีหลอมเหลวที่ละท่อน และตั้งทิ้งไว้เพื่อรอให้สังกะสีแห้ง ในบางโรงงานอาจใช้ลมหรือลมร้อนเป่า เพื่อให้สังกะสีแห้งเร็วขึ้น พลังงานที่ใช้ในส่วนนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ พลังงานที่ใช้หลอมเหลวสังกะสี และพลังงานที่ใช้ลำเลียงท่อเหล็กและเป่าแห้งท่อเหล็ก โดยพลังงานที่ใช้สำหรับการหลอมสังกะสีอาจมาจากทั้งพลังงานจากเชื้อเพลิงและ/หรือพลังงานจากไฟฟ้า

ข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามของกระบวนการนี้ มีผู้ประกอบการให้ข้อมูลและนำมาใช้ได้จำนวน 2 รายและเป็นข้อมูลของปีพ.ศ.2551-2553 จากข้อมูลในแบบสอบถาม พบว่าแนวโน้มของปริมาณการผลิตท่อเหล็กชุบสังกะสีลดลงจาก 6 หมื่นตันต่อปีในปีพ.ศ.2551 เป็น 4 หมื่นตันต่อปีในปีพ.ศ.2553 ดังแสดงในรูปที่ 4.34 สำหรับภาพรวมการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตนี้มีค่าอยู่ในช่วง 1,700 – 2,800 MJ/ton โดยจากรูปที่ 4.33 จะเห็นได้ว่าปริมาณการใช้พลังงานส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิง ส่วนพลังงานไฟฟ้ามักมีการใช้น้อยมาก เมื่อคิดเป็นสัดส่วนของการใช้พลังงานจากไฟฟ้าต่อเชื้อเพลิง เท่ากับ 1% : 99% โดยจากข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้พลังงานไฟฟ้าเพียง 1% นี้ จะถูกใช้ไปกับการผลิตท่อเหล็ก การลำเลียงและอาจใช้ในการหลอมสังกะสีด้วย โดยมีปริมาณการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 29 MJ/ton และสำหรับเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหลอมสังกะสีมาจากน้ำมันเตาทั้งหมด ซึ่งเมื่อคิดเป็นการใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเฉลี่ยเท่ากับ 2,237 MJ/ton



รูปที่ 4.33 ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆ ต่อผลผลิตของกระบวนการผลิตที่ 15



รูปที่ 4.34 สัดส่วนของการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 15

ในหัวข้อที่ 2.1 และ 2.2 ได้กล่าวถึงโครงสร้างของแต่ละกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมเหล็ก ซึ่งทำให้ทราบว่า กว่าที่จะได้ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดต้องใช้ขั้นตอนหรือกรรมวิธีใดบ้างในการผลิต ซึ่งในหัวข้อต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นว่า ในการผลิตของกระบวนการต่างๆ มีการใช้พลังงานอะไรและใช้เป็นจำนวนเท่าใด

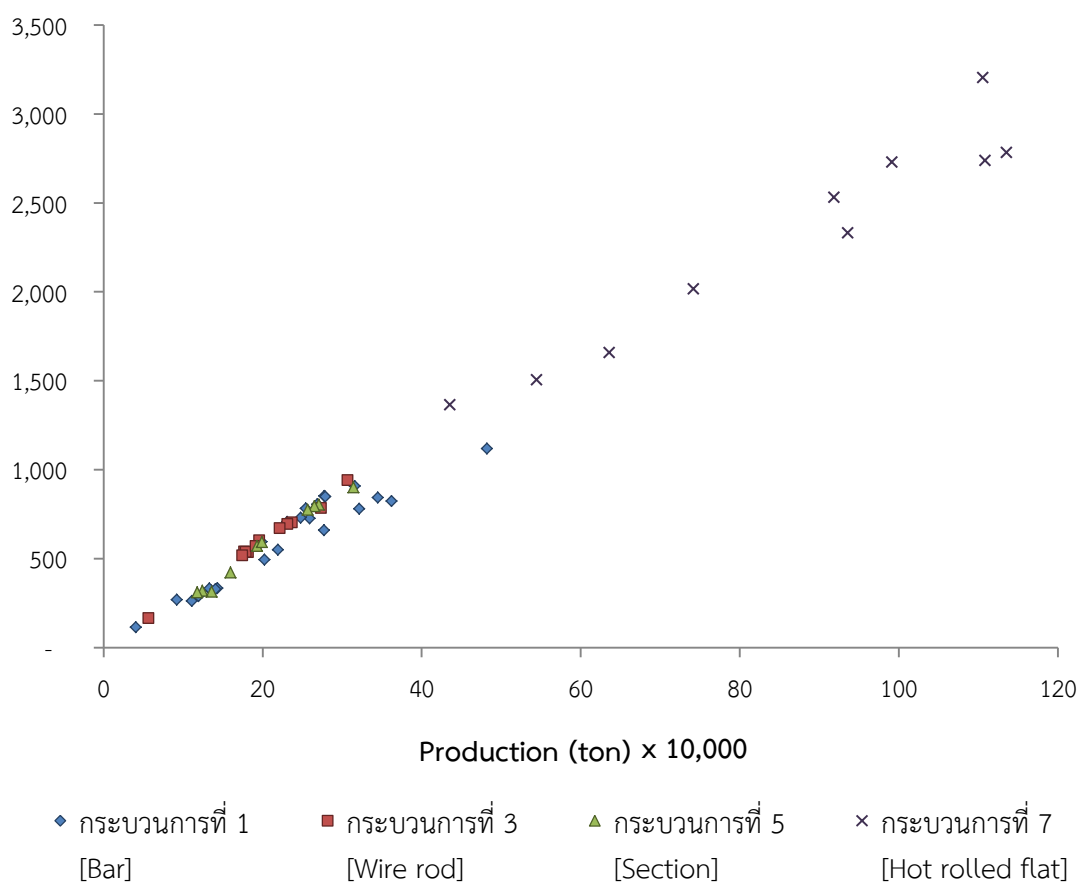
4.2 ผลการคำนวณโดยแบ่งตามกระบวนการผลิต

ในส่วนนี้ จะนำเสนอผลการประมาณค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกระบวนการที่สำคัญด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม ได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า กระบวนการอบร้อน (Reheating) กระบวนการรีดร้อน (Hot rolling) กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) และกระบวนการเคลือบผิว (Coating)

4.2.1 กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

การใช้พลังงานในส่วนนี้ จะมีเฉพาะกระบวนการผลิตที่ 1 3 5 และ 7 เพราะเป็นกระบวนการที่เริ่มผลิตจากการหลอมวัตถุดิบด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า แบบสอบถามได้ถามถึงการใช้พลังงานในการผลิตนี้แค่เพียง 2 ส่วน นั่นคือ ส่วนของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า และ เตาปรงน้ำเหล็ก, LF (Ladle furnace) โดยไม่นับรวมการใช้พลังงานในกระบวนการหล่อ

Energy consumption (TJ)

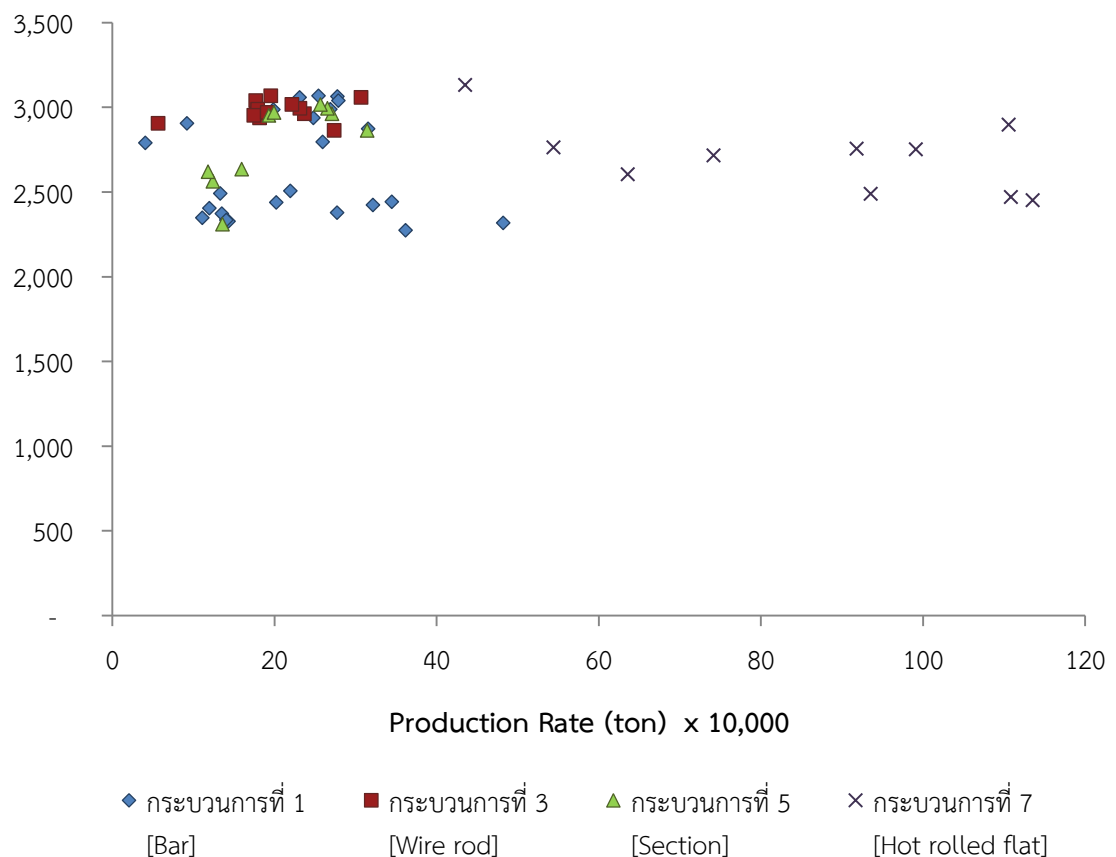


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้กับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ในกระบวนการผลิตเหล็กชนิดต่าง ของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

เมื่อนำค่าการใช้พลังงานในกระบวนการหลอม ของทุกปีการผลิต มาเขียนกราฟเทียบกับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของแต่ละกระบวนการ ได้ผลดังรูปที่ 4.35 โดยเมื่อมีการผลิตเพิ่มมากขึ้น ก็ย่อมที่จะใช้พลังงานมากขึ้นไปด้วย โดยจากภาพจะเห็นว่ากระบวนการผลิตที่ 7 (เหล็กแผ่นรีดร้อน) มีปริมาณการผลิตสูงกว่ากระบวนการอื่นอยู่มาก ทำให้มีปริมาณการใช้พลังงานมากกว่ากระบวนการอื่นเช่นกัน

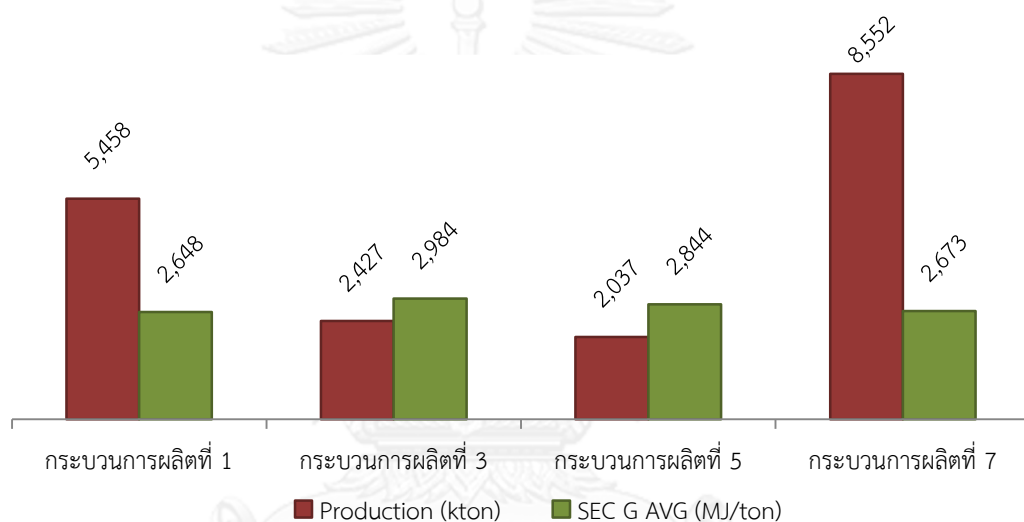
เมื่อนำค่า SEC ซึ่งได้จากการประมาณด้วยข้อมูลการใช้พลังงานของทั้งสองเตา (EAF และ LF) และปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กกิ่งสำเร็จรูปที่ผลิตได้ มาเขียนกราฟเทียบกับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กของแต่ละกระบวนการ ได้ผลดังรูปที่ 4.36 จากกราฟพบว่า ค่า SEC ของทั้ง 4 กระบวนการ มีค่าใกล้เคียงกันไม่ว่าปริมาณการผลิตจะมากหรือน้อย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 2,250-3,200 MJ/ton และจากกราฟยังพบว่า ค่า SEC สูงสุดเป็นของกระบวนการผลิตที่ 7 มีค่า 3,132 MJ/ton และค่า SEC น้อยสุด เป็นของกระบวนการผลิตที่ 1 มีค่า 2,274 MJ/ton

SEC (MJ/ton)



รูปที่ 4.36 ค่า SEC ของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

กราฟนี้จะเปรียบเทียบกับผู้ประกอบการที่นำมาใช้เปรียบเทียบค่า SEC ของกระบวนการผลิตของตัวเองว่ามีค่ามากหรือน้อยกว่าของผู้ประกอบการรายอื่นอยู่เท่าใด โดยอาจเปรียบเทียบในกระบวนการผลิตเดียวกัน เช่น กระบวนการผลิตที่ 1 มีผู้ประกอบการ 3 รายให้ข้อมูลกลับมา ผู้ประกอบการรายหนึ่งสามารถเปรียบเทียบกับอีก 2 รายที่เหลือได้ เพื่อดูสถานะภาพการใช้พลังงานของตัวเอง หากมากกว่าจะได้หาวิธีเพื่อลดค่า SEC ให้น้อยลง นอกจากนี้ ผู้ประกอบการของกระบวนการหนึ่งอาจเปรียบเทียบกับผู้ประกอบการของอีกกระบวนการหนึ่งได้ เนื่องจากเป็นการผลิตด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า เหมือนกัน ผลของการเปรียบเทียบจะสะท้อนให้เห็นถึงเทคโนโลยีที่ผู้ประกอบการนำมาใช้ว่าดีพอและดีกว่ารายอื่นมากน้อยเพียงใด

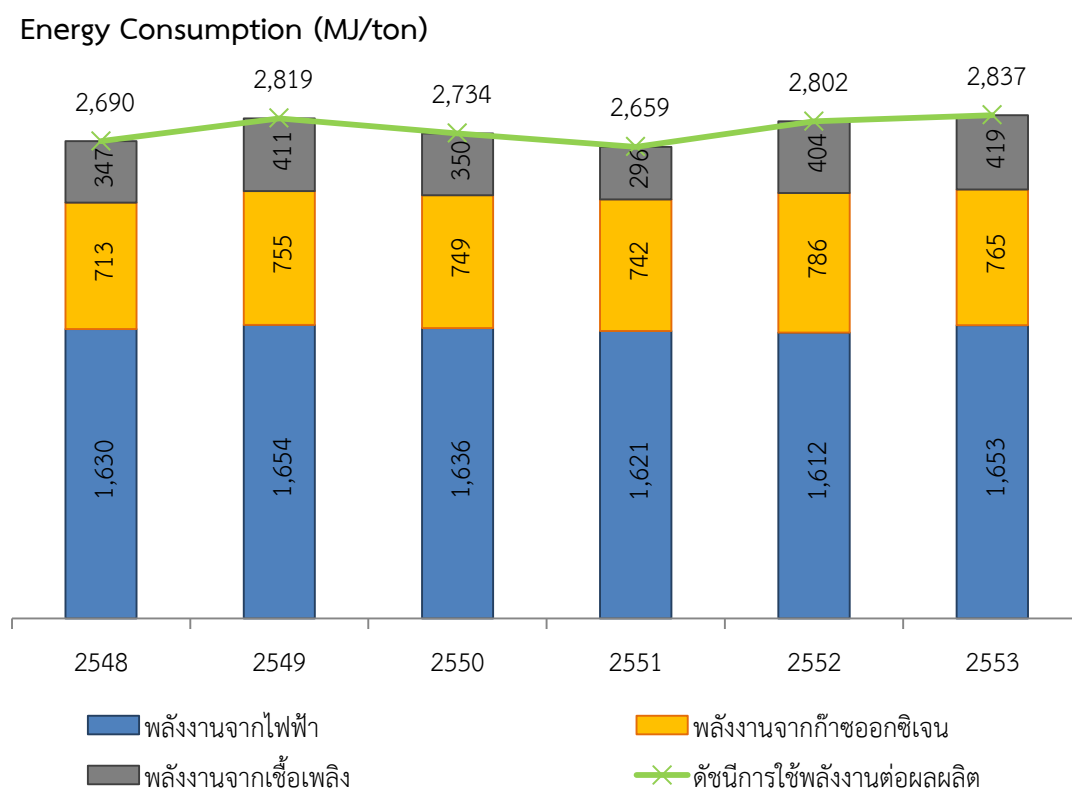


รูปที่ 4.37 เปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กและค่า SEC เฉลี่ยของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

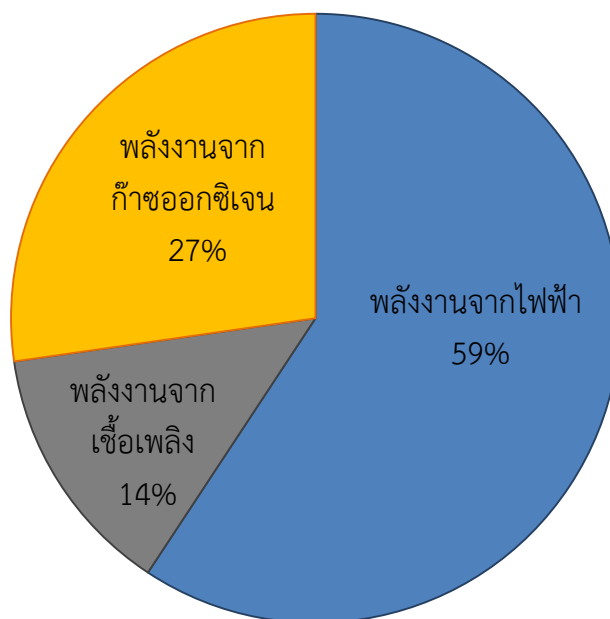
รูปที่ 4.37 เป็นกราฟแท่งเพื่อสรุปและเปรียบเทียบปริมาณการผลิตโดยรวมตลอดทั้ง 6 ปีตั้งแต่ปีพ.ศ.2548-2553 และค่า SEC โดยเฉลี่ยของข้อมูลทั้ง 6 ปีนั้นของทั้ง 4 กระบวนการที่ผลิตด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า จากกราฟพบว่า ทั้ง 4 กระบวนการมีปริมาณการผลิตเหล็กรวมแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยกระบวนการผลิตที่ 7 มีปริมาณการผลิต (ตัน) มากที่สุดและมากกว่ากระบวนการอื่นๆอยู่มาก มีค่าประมาณ 8.5 ล้านตัน รองลงมาคือ กระบวนการที่ 1 ส่วนกระบวนการผลิตที่ 5 มีปริมาณการผลิตรวมน้อยสุดอยู่ที่ 2 ล้านตัน ซึ่งสำหรับปริมาณการผลิตยังไม่สามารถบอกอะไรได้มาก เพราะจำนวนแบบสอบถามที่ได้กลับมาของแต่ละผู้ประกอบการมีจำนวนไม่เท่ากัน และสำหรับค่า SEC ของกระบวนการผลิตที่ 1 3 5 และ 7 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยโดยประมาณเป็น 2.6 MJ/ton 3 MJ/ton 2.8 MJ/ton และ 2.7 MJ/ton ตามลำดับ

ในกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า พลังงานหลักที่ใช้คือ พลังงานจากไฟฟ้า เพื่อใช้อาร์ควัตถุบซึ่งส่วนใหญ่เป็นเศษเหล็ก ให้หลอมกลายเป็นน้ำเหล็ก ในบางโรงงานได้พัฒนาเทคโนโลยีหรือวิธีการเพื่อลดการใช้พลังงาน โดยการพ่นเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล หรือก๊าซธรรมชาติ เพื่อให้วัตถุบหลอมได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น รวมถึงการพ่นก๊าซออกซิเจนและผงคาร์บอนลงไปในเตาหลอม เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยาเคมีกับธาตุต่างๆ ในน้ำเหล็กและปล่อยพลังงานออกมา [6] เพราะฉะนั้น พลังงานที่ใช้ในกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า จึงมีหลายรูปแบบ หลายแหล่งที่มา ซึ่งโดยหลักๆ แล้วสามารถแบ่งออกเป็น พลังงานจากไฟฟ้า พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง และพลังงานจากการใช้ออกซิเจน

ปริมาณการใช้พลังงานชนิดต่างๆเฉลี่ยในแต่ละปีดังแสดงในรูปที่ 4.38 ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณการใช้พลังงานจากไฟฟ้ามีมากที่สุด โดยมีค่าประมาณ 1,600 MJ/ton รองลงมาคือ พลังงานจากการใช้ออกซิเจน ประมาณ 750 MJ/ton ส่วนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 300-400 MJ/ton และหากเฉลี่ยปริมาณการใช้พลังงานแต่ละชนิดในทุกๆ ปี และคิดเป็นสัดส่วน พบว่า การใช้พลังงานจากไฟฟ้ามีสัดส่วนมากที่สุดถึง 59% รองลงมาคือพลังงานจากการใช้ออกซิเจนคิดเป็น 27% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.38 ค่าการใช้พลังงานชนิดต่างๆ และค่า SEC ของกระบวนการหลอมด้วยเตา EAF



รูปที่ 4.39 สัดส่วนของพลังงานชนิดต่างๆ ในกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

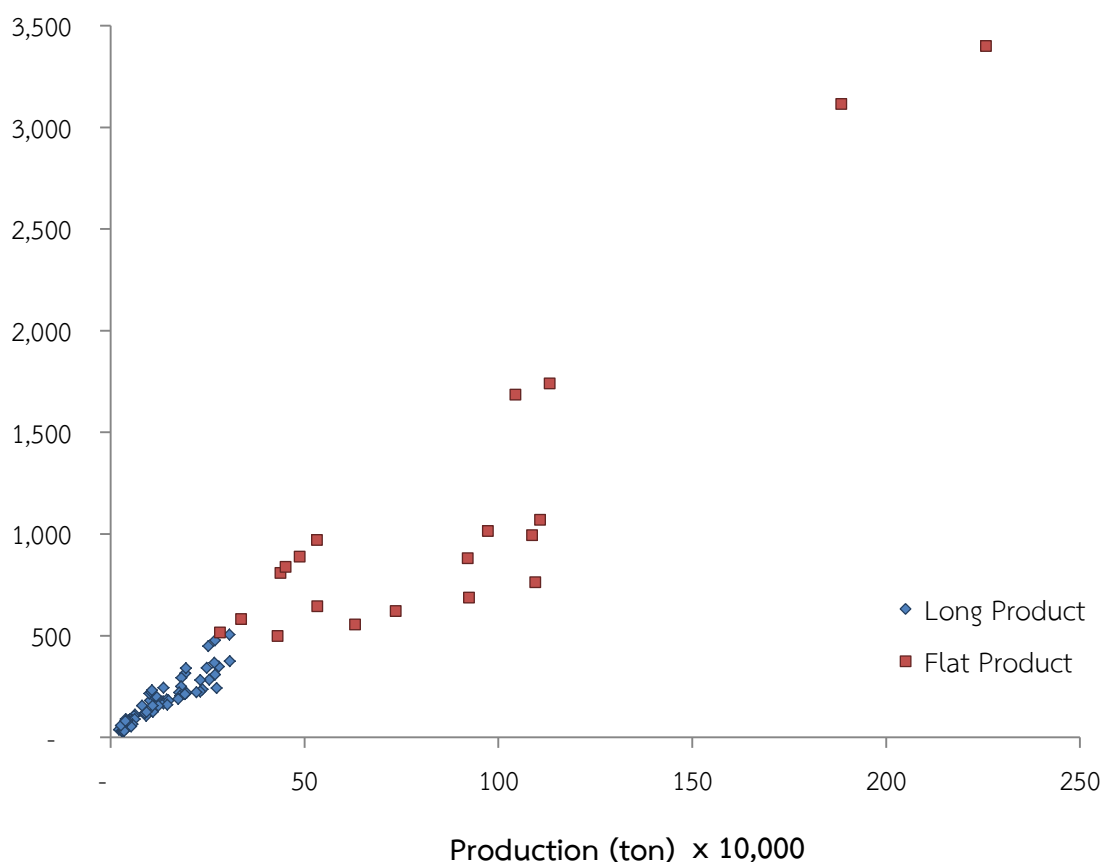
4.2.2 กระบวนการอบร้อน (Reheating)

กระบวนการอบร้อน หรืออีกชื่อหนึ่งคือ กระบวนการเผาเหล็ก เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิต เพราะก่อนที่ผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูป ไม่ว่าจะเป็นเหล็กแท่งเล็ก (Billet) เหล็กแท่งใหญ่ (Bloom) หรือเหล็กแผ่น (Slab) ที่ได้จากกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า และกระบวนการหล่อ จะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการรีดร้อน เหล็กเหล่านั้นจะถูกอบให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนซึ่งโดยปกติจะอยู่ที่ประมาณ 1,100 ถึง 1,250°C เพื่อให้ง่ายต่อการรีด ผลิตภัณฑ์เหล็กที่ถูกอบร้อนจะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ เหล็กทรงยาว (Long product) และเหล็กทรงแบน (Flat product)

พลังงานที่ใช้ในเตาอบร้อนจะเป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา น้ำมันดีเซล แก๊ส LPG หรือ ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น โดยเมื่อนำค่าการใช้พลังงานความร้อนมาเขียนกราฟเทียบกับปริมาณการผลิต ได้ผลดังรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41

สำหรับรูปที่ 4.40 ได้แสดงปริมาณการใช้พลังงานและปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของกระบวนการอบร้อน แยกตามลักษณะของผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูป เป็นเหล็กทรงยาว และเหล็กทรงแบน ซึ่งจะเห็นว่าเหล็กทรงแบนมีปริมาณการผลิตมาก ดังนั้น พลังงานที่ใช้จึงมีค่ามากตามไปด้วย

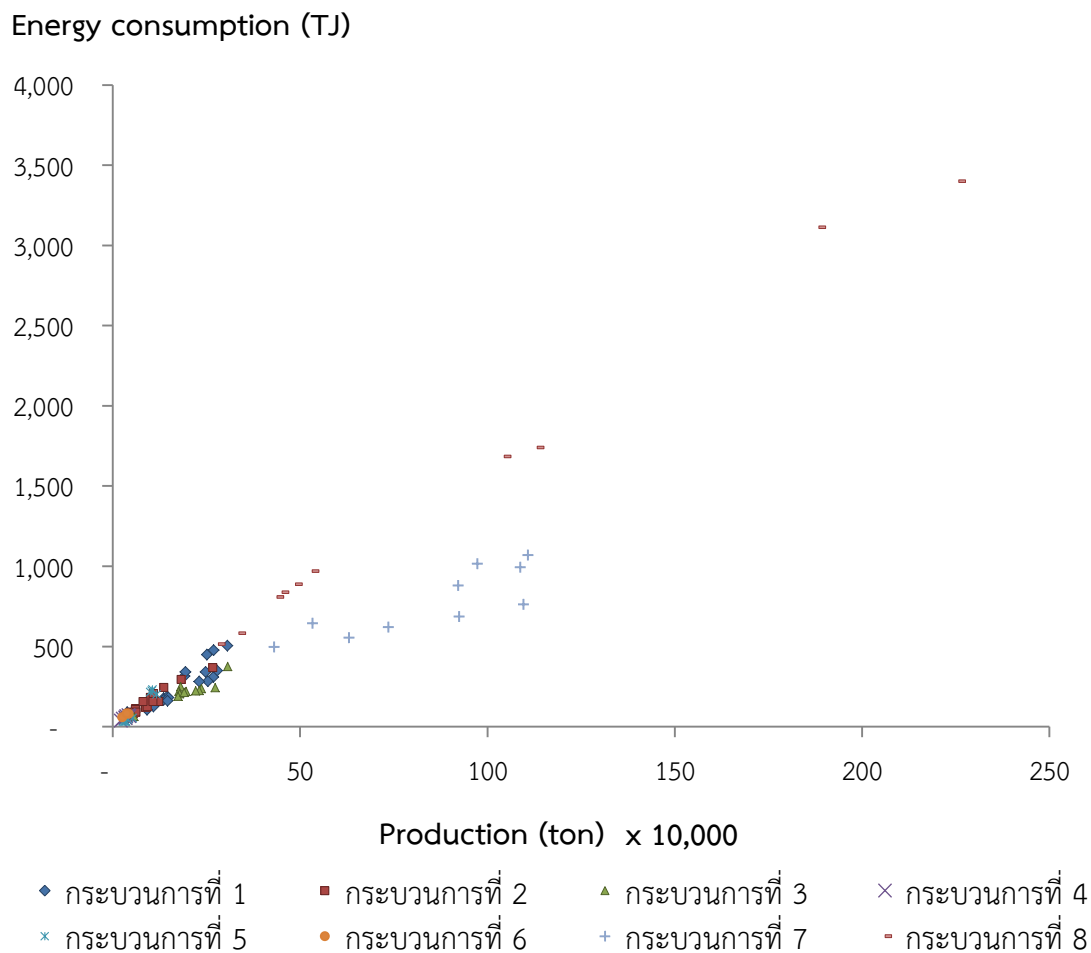
Energy consumption (TJ)



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้กับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของกระบวนการอบร้อนแยกตามลักษณะของผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยจากรูปที่ 4.41 จะเห็นลักษณะการใช้พลังงานในกระบวนการอบร้อนซึ่งแสดงปริมาณพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงของแต่ละโรงงานและของแต่ละปีและของแต่ละกระบวนการผลิตตั้งแต่กระบวนการที่ 1 – 8 ซึ่งจุดข้อมูลแต่ละจุดในกราฟได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามของผู้ประกอบการแต่ละรายในแต่ละปี เช่น กระบวนการผลิตที่ 6 มีข้อมูลจากผู้ประกอบการเพียงรายเดียว และมีข้อมูล 3 ปี ดังนั้น จุดข้อมูลในกราฟของกระบวนการผลิตที่ 6 จึงมีเพียง 3 จุด ผลการประมาณที่ได้ พบว่า บางกระบวนการใช้พลังงานสูง ในขณะที่บางกระบวนการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานค่อนข้างมากและมากกว่ากระบวนการอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด คือ กระบวนการผลิตที่ 7 และ 8 (เหล็กแผ่นรีดร้อน)



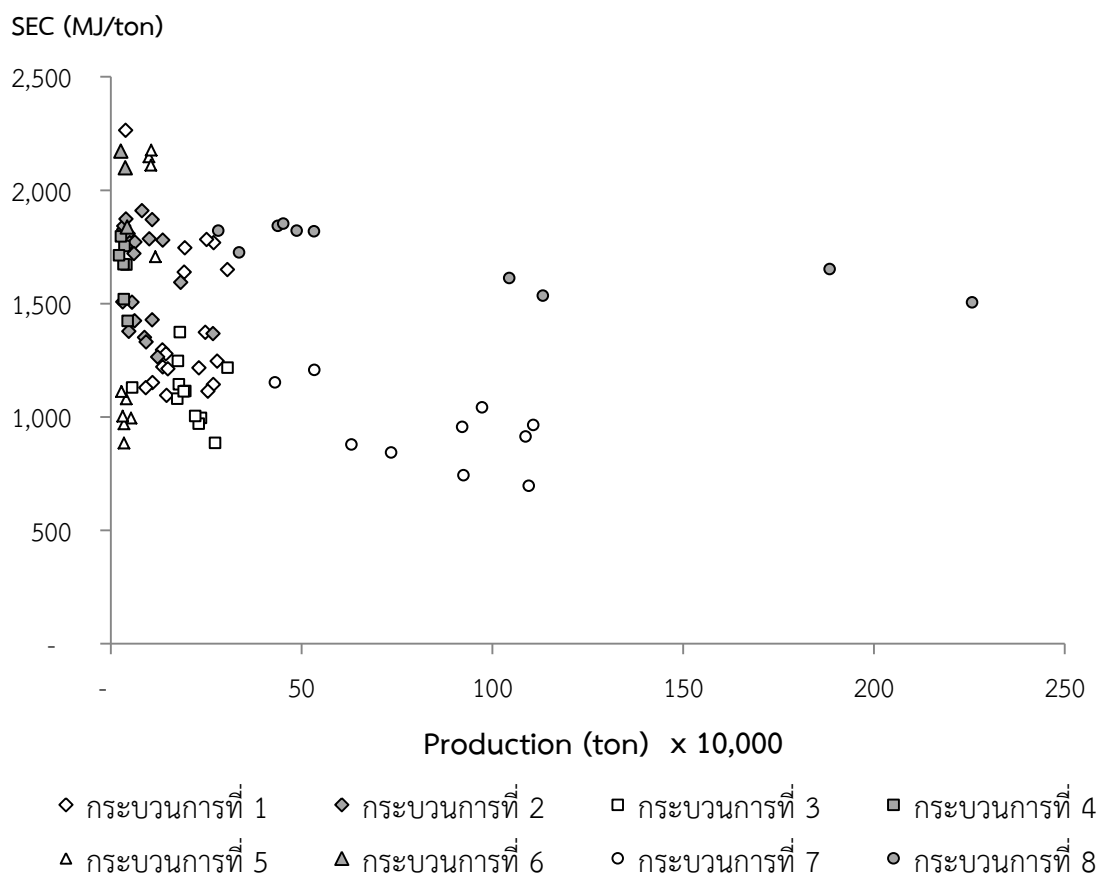
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้กับปริมาณผลิตภัณฑ์หลักที่ผลิตได้ของกระบวนการอบร้อนแยกกระบวนการผลิตต่างๆ

เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุที่มีผลต่อค่าพลังงานที่ใช้ในเตาอบร้อน พบว่าสาเหตุหนึ่งมาจากอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปก่อนเข้าเตาอบร้อน เมื่ออุณหภูมิก่อนเข้าเตาอบร้อนมีค่าต่ำ พลังงานที่ใช้เพื่ออบร้อนให้ได้อุณหภูมิถึงตามที่กำหนดจึงต้องใช้มากกว่ากรณีที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น สมมติฐานที่ได้ก็คือ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปก่อนเข้าเตามีผลต่อพลังงานที่ใช้ในเตาอบร้อน

หากกระบวนการผลิตมีความต่อเนื่อง กระบวนการผลิตที่มีเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า ซึ่งได้แก่กระบวนการผลิตที่ 1 3 5 และ 7 ก็น่าจะเป็นกลุ่มที่ใช้พลังงานในเตาอบร้อนน้อยกว่า กระบวนการผลิตที่ 2 4 6 และ 8 ซึ่งไม่มีเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปที่ได้ใหม่ๆจากกระบวนการผลิตที่มีเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า จะยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่มาก หากส่งต่อเข้าเตาอบร้อนเลย ก็จะใช้พลังงานอีกไม่มากเพื่ออบให้อุณหภูมิถึงที่กำหนด

แต่หากกระบวนการผลิตไม่ได้ผลอย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้จะถูกนำไปเก็บเพื่อรอความต้องการจากลูกค้า เมื่อมีคำสั่งแปรรูป ผลิตภัณฑ์เหล่านั้น ซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 – 35°C) จะถูกนำมาอบให้ร้อนจนถึง 1,250°C ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันเกือบหนึ่งองศาเซลเซียส ส่งผลให้การใช้พลังงานในการอบจึงมีค่ามาก

จากสมมติฐานดังกล่าว จึงพิจารณาข้อมูลของกระบวนการอบร้อนในทุกกระบวนการผลิตของทุกโรงงาน และพบว่าสาเหตุหนึ่งที่กระบวนการผลิตที่ 7 มีการใช้พลังงานต่อผลผลิตน้อยที่สุดเทียบกับกระบวนการผลิตอื่นๆ เพราะการผลิตมีความต่อเนื่อง ทำให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปก่อนเข้าเตาอบร้อนมีค่าสูง จากแบบสอบถามพบว่า มีค่าประมาณ 900°C และ 980°C ซึ่งอบร้อนเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อย ก็จะถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ส่งผลให้กระบวนการผลิตนี้ใช้พลังงานในการอบน้อยที่สุด ซึ่งวิธีการนี้ถูกเรียกว่า “hot charge” โดยต่างจากกระบวนการผลิตที่เริ่มอบจากอุณหภูมิห้องหรือประมาณ 30°C ซึ่งเรียกววิธีการนี้ถูกเรียกว่า “cold charge” ผลการประมาณค่า SEC ของกระบวนการอบร้อน (Reheating) ดังแสดงในรูปที่ 4.42



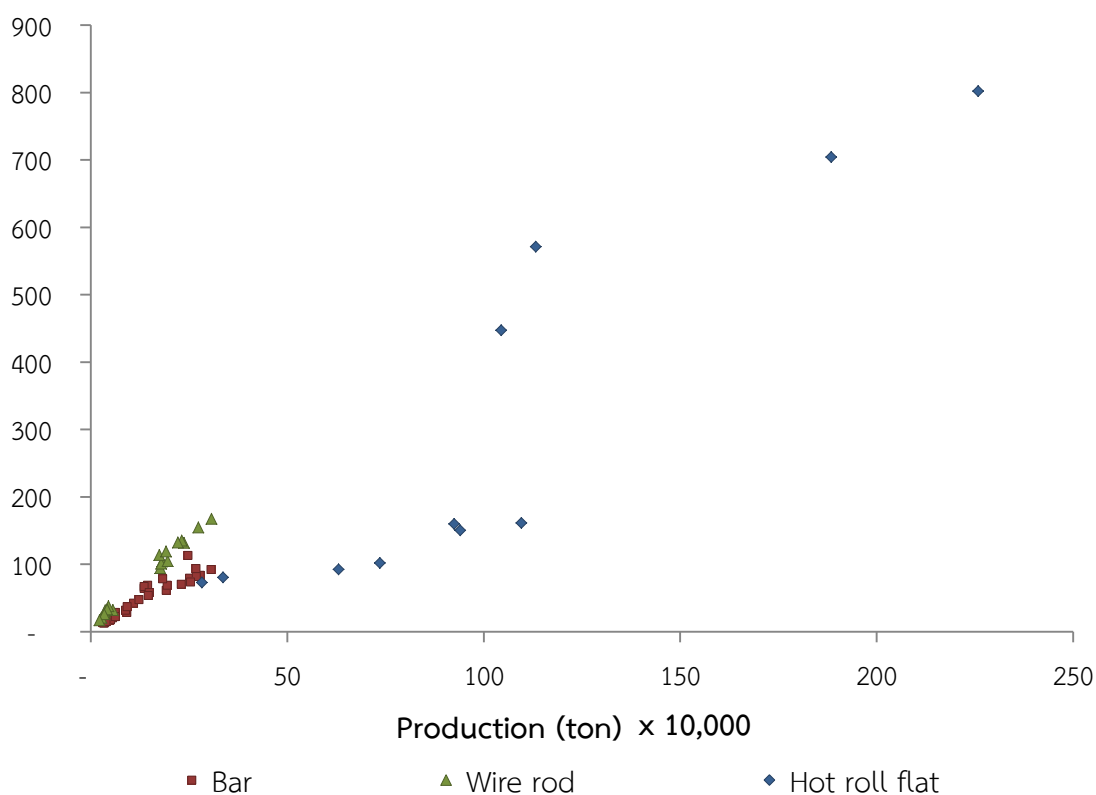
รูปที่ 4.42 ค่า SEC ของกระบวนการอบร้อน (Reheating)

4.2.3 กระบวนการรีดร้อน (Hot rolling)

ในส่วนของการรีดร้อน จะใช้พลังงานจากไฟฟ้า 100 % เพื่อเปลี่ยนรูปผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปให้มีรูปร่างหรือขนาดที่เปลี่ยนไป ได้เป็น เหล็กเส้น (Bar) เหล็กหลอด (Wire rod) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อน (Section) เหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot roll flat) โดยอุณหภูมิของเหล็กในการรีดจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

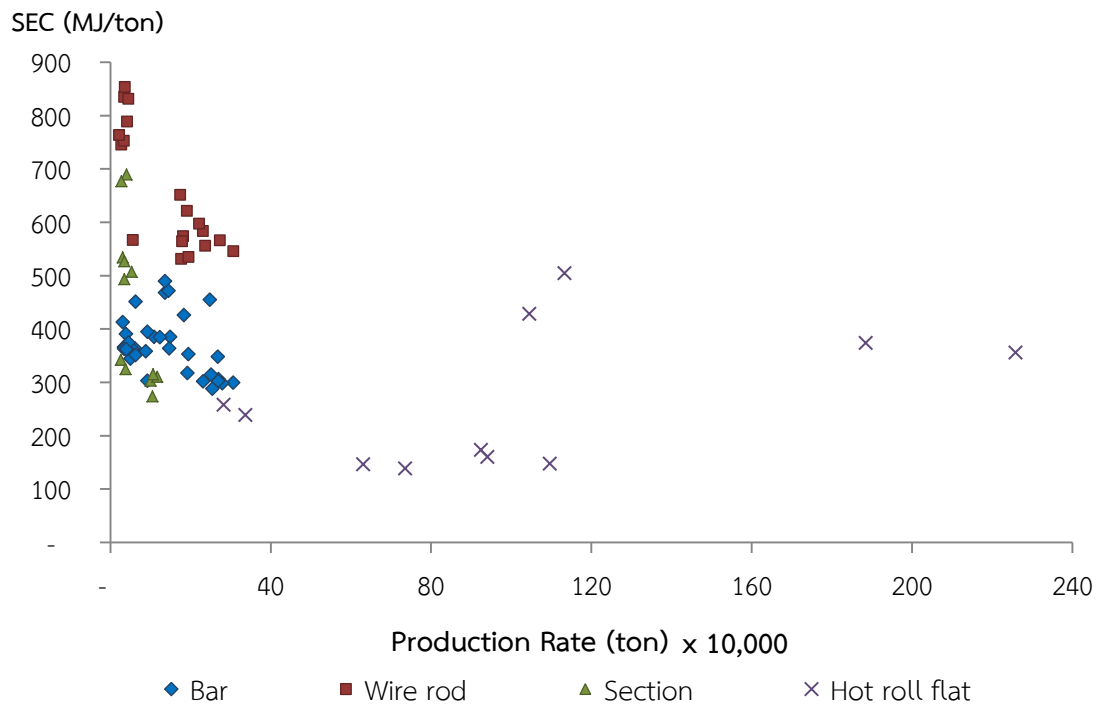
ผลการประมาณค่าการใช้พลังงานในการผลิต ได้ผลดังรูปที่ 4.43 และจากภาพจะเห็นถึงการใช้พลังงานในการรีดร้อนของผลิตภัณฑ์เหล็กชนิดต่างๆ โดยการรีดเหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot rolled flat) ซึ่งมีปริมาณการผลิตมากกว่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ มีการใช้พลังงานในการผลิตมากที่สุด ส่วนการใช้พลังงานในการรีดเมื่อปริมาณการผลิตเท่ากัน พบว่าเหล็กหลอด (Wire rod) มีการใช้มากกว่าการรีดเหล็กเส้น (Bar) เส้นประในภาพซึ่งได้จากการประมาณเชิงเส้นตรงของข้อมูล (Linear regression) ความชันของเส้นตรงสามารถบ่งบอกถึงค่า SEC ได้คร่าวๆ และพบว่า ค่า SEC ของการรีดเหล็กหลอดมีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ เหล็กแผ่นรีดร้อน ส่วนเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปร้อนมีค่า SEC น้อยที่สุด

Energy consumption (TJ)

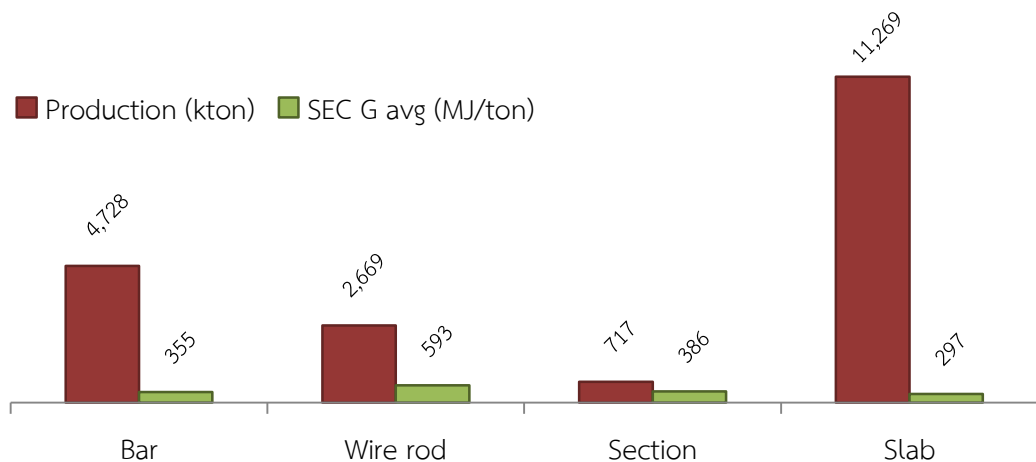


รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณพลังงานที่ใช้กับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กที่ผลิตได้ของกระบวนการรีดโดยแยกตามประเภทของผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.44 พบว่า ในปริมาณการผลิตที่เท่ากัน การรีดเหล็กจะใช้พลังงานต่อผลผลิตมากกว่าเหล็กเส้นอย่างเห็นได้ชัด เหตุผลเพราะ ขนาดและรูปร่างของการรีด โดยเหล็กจะต้องรีดลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางลงมามากกว่าเหล็กเส้น สำหรับการรีดเหล็กเส้นใช้พลังงานต่อผลผลิตในการรีดเหล็กโครงสร้างรูปพรรณจะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของผลิตภัณฑ์ ลักษณะกราฟที่ได้จึงมีการกระจายตัวของจุดข้อมูลค่อนข้างสูง และสำหรับการใช้พลังงานต่อผลผลิตของการรีดเหล็กแผ่นรีดร้อนมีค่าค่อนข้างต่ำและข้อมูลก็มีการกระจายค่อนข้างมากเช่นกัน



รูปที่ 4.44 ค่า SEC ของกระบวนการรีดร้อน (Hot rolling)



รูปที่ 4.45 เปรียบเทียบปริมาณการผลิต (ตัน) และ SEC เฉลี่ยของกระบวนการรีดร้อน

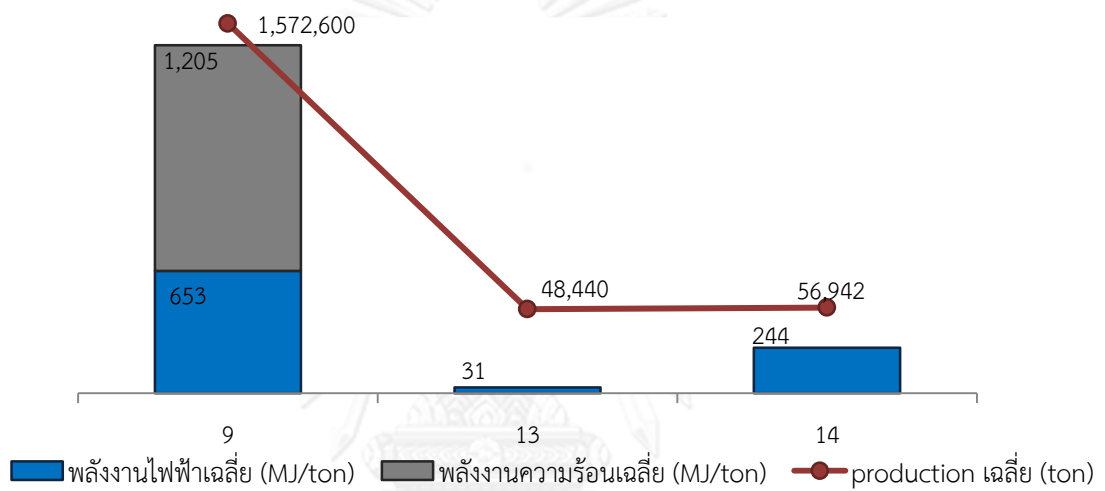
4.2.4 กระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold forming)

สำหรับกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold forming) เป็นกระบวนการแปรรูปเหล็กจากเหล็กที่มีรูปร่างและขนาดตั้งต้นไปยังเหล็กที่มีรูปร่างและขนาดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยแรงจากภายนอกมากกระทำ ซึ่งกระบวนการทั้งหมดจะกระทำที่อุณหภูมิห้อง จากกระบวนการผลิตทั้ง 15 กระบวนการ มีอยู่ 3 กระบวนการที่มีลักษณะหรือกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิตเป็นแบบเดียวกับกระบวนการขึ้นรูปเย็น นั่นคือ กระบวนการผลิตที่ 9 ผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น (Cold rolled) กระบวนการที่ 13 ผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น (Cold formed) และกระบวนการผลิตที่ 14 ผลิตท่อเหล็ก ERW ซึ่งทั้งสามกระบวนการนี้ใช้วัตถุดิบตั้งต้นชนิดเดียวกัน ได้แก่ เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน (Hot rolled coil)

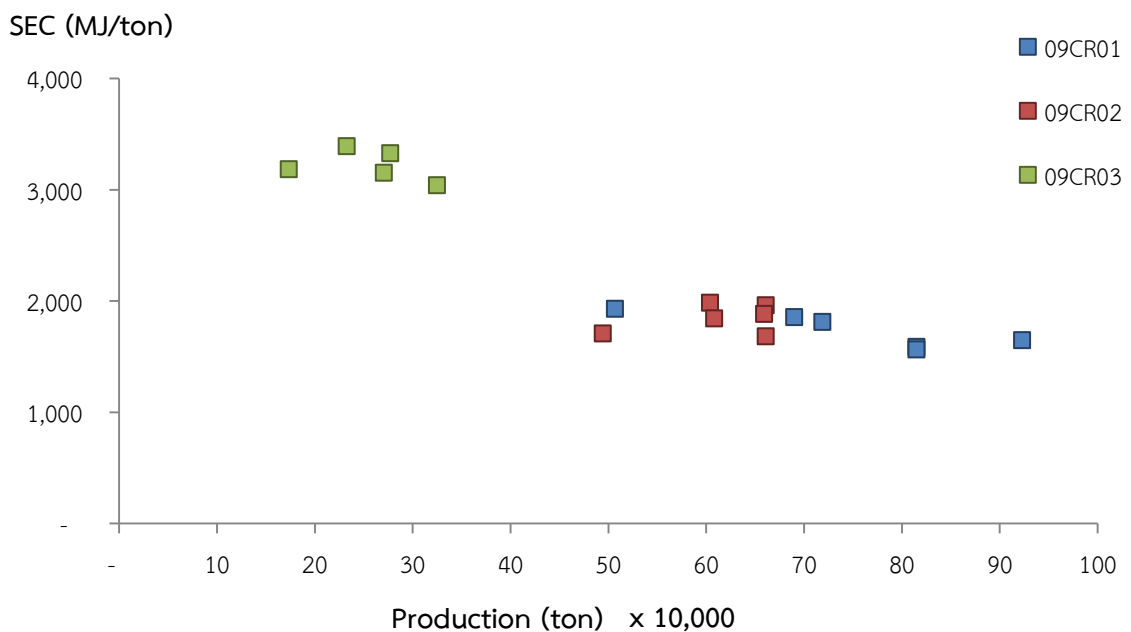
การใช้พลังงานของทั้ง 3 กระบวนการผลิตมีลักษณะการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุผลสำคัญคือ ขั้นตอนหรือลักษณะของการผลิตที่ต่างกัน กล่าวคือ กระบวนการผลิตที่ 9 จะมีการใช้พลังงาน 2 ชนิด โดยใช้พลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่ไปกับการรีดเพื่อเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของวัตถุดิบเป็นหลัก และในส่วนของพลังงานความร้อนจะถูกใช้ไปกับการทำความสะอาผิวของวัตถุดิบก่อนการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง นอกจากนี้ พลังงานความร้อนส่วนหนึ่งได้ถูกใช้ในกระบวนการอบอ่อน (Annealing) เพื่อให้คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหลังจากรีดมีความเหมาะสม สำหรับกระบวนการที่ 13 มีการใช้พลังงานเพียงชนิดเดียว นั่นคือ พลังงานจากไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนขนาดและรูปร่างของเหล็ก โดยกระบวนการนี้ไม่มีการใช้ความร้อนในการผลิตและสุดท้าย สำหรับกระบวนการผลิตที่ 14 มีการใช้พลังงานจากไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยใช้ในขั้นตอนของการตัดและขึ้นรูปเหล็กให้เป็นรูปทรงกระบอก และเชื่อมขอบเข้าด้วยกันกลายเป็นท่อเหล็ก โดยผู้ประกอบการในกระบวนการผลิตที่ 14 เหมือนกับได้รวมการผลิตของกระบวนการผลิตที่ 13 เข้าด้วยกัน พลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมาจากกระบวนการที่ 13 ก็คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อม ดังนั้นแล้ว การเปรียบถึงการใช้พลังงานของกระบวนการที่ 9 13 และ 14 ไม่สามารถเปรียบเทียบร่วมกันได้

ผลจากการคำนวณด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม ได้ผลดังรูปที่ 4.46 พบว่าทั้ง 3 กระบวนการผลิตมีปริมาณการใช้พลังงาน รวมถึงปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันมาก ปริมาณการใช้พลังงานจากไฟฟ้าของกระบวนการผลิตที่ 9 ใช้มากถึง 653 MJ/ton ในขณะที่กระบวนการผลิตที่ 13 ใช้ไปเพียง 31 MJ/ton ซึ่งต่างกันถึง 20 เท่า สำหรับกระบวนการผลิตที่ 14 ใช้ไป 244 MJ/ton เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตที่ 13 และ 14 เมื่อ กระบวนการผลิตที่ 13 ผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น เป็นผลิตภัณฑ์เหล็กรูปร่างต่างๆ ส่วนกระบวนการผลิตที่ 14 เป็นการผลิตท่อเหล็กด้วยวิธีการเชื่อมแบบ ERW ซึ่งก่อนจะเชื่อมต้องมีการตัดเพื่อเปลี่ยนรูปของเหล็กให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกรูปร่างคล้ายท่อแล้วจึงเชื่อมปิดได้เป็นท่อเหล็ก ดังนั้นแล้ว อาจกล่าวได้ว่า กระบวนการผลิตที่ 14 มีการใช้พลังงานในการขึ้นรูป ประมาณ 30 MJ/ton และได้ว่าพลังงานที่ใช้ในการเชื่อมมีค่าประมาณ 210 MJ/ton

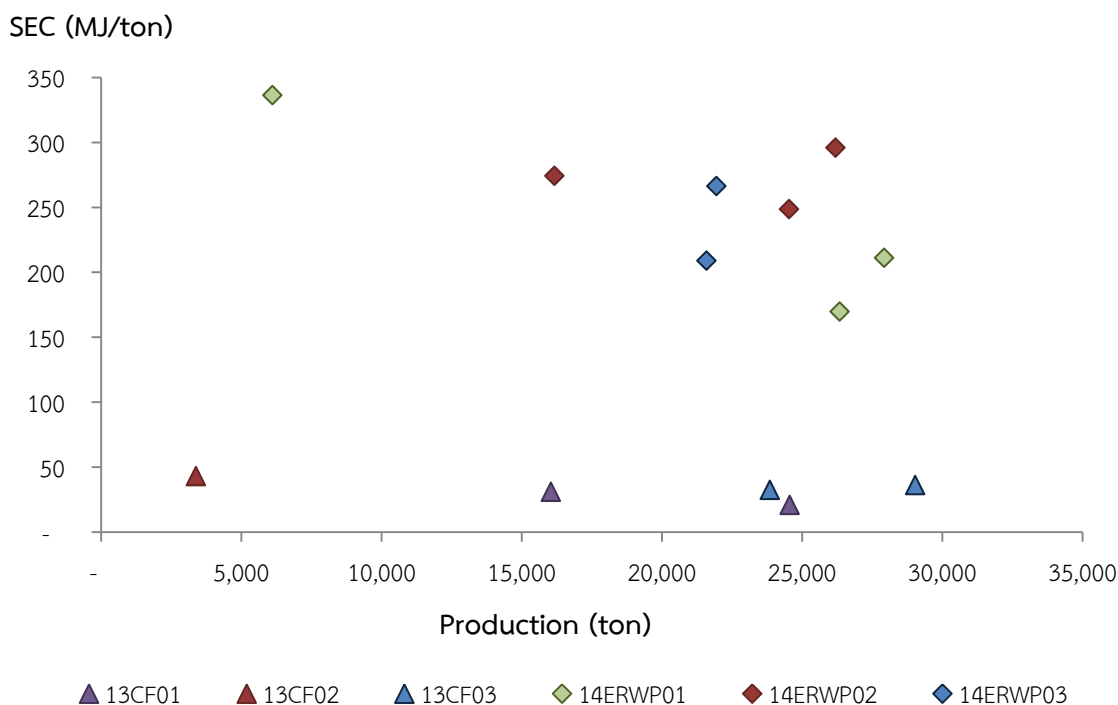
เมื่อพิจารณาปริมาณของผลผลิตโดยเฉลี่ย พบว่า การผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็นมีมากถึง 1.6 ล้านตันต่อปี ในขณะที่เหล็กโครงสร้างรูปพรรณมีการผลิตเพียง 5 หมื่นตันต่อปี เหตุผลสำคัญที่ทำให้ปริมาณการผลิตแตกต่างกันมากขนาดนี้ ก็เพราะเหล็กโครงสร้างรูปพรรณของกระบวนการผลิตที่ 13 นับเป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายของการผลิตแล้ว เหล็กโครงสร้างรูปพรรณจะถูกนำไปใช้งานตามความต้องการได้เลย ซึ่งต่างจากเหล็กแผ่นรีดเย็นของกระบวนการที่ 9 ซึ่งนับว่าเป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นกลาง เพราะเหล็กแผ่นรีดเย็นนอกจากจะเอาไปใช้งานได้เลยแล้ว บางส่วนจะกลายเป็นวัตถุดิบตั้งต้นของกระบวนการผลิตในขั้นต่อไป เช่น กระบวนการเคลือบผิว ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.46 ปริมาณการใช้พลังงานและปริมาณผลิตภัณฑ์ของกระบวนการขึ้นรูปเย็น



รูปที่ 4.47 ค่า SEC ของกระบวนการรีดเย็น



รูปที่ 4.48 ค่า SEC ของกระบวนการขึ้นรูปเย็นและกระบวนการผลิตท่อ ERW

4.2.5 กระบวนการเคลือบผิว (Coating)

กระบวนการเคลือบผิว (Coating) เป็นกระบวนการทอหุ้มผิวเหล็กด้วยสารเคลือบต่างๆ ที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การเคลือบโดยใช้สังกะสี นอกจากนั้นแล้ว อาจเคลือบด้วยสี หรือไม่ก็เป็น ดีบุกและโครเมียม

กรรมวิธีที่ใช้เคลือบก็มีอยู่หลายลักษณะ อย่างที่เคยกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ไม่ว่าจะเป็นการเคลือบด้วยวิธีใด ก็จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มของกระบวนการเคลือบผิว ในอุตสาหกรรมเหล็ก จะใช้การเคลือบสองวิธีหลัก คือการเคลือบด้วยวิธีจุ่มร้อนและการเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า กระบวนการที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของกระบวนการเคลือบผิวประกอบด้วย 4 กระบวนการผลิต ได้แก่ กระบวนการผลิตที่ 10 ผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแบบจุ่มร้อน กระบวนการผลิตที่ 11 ผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีแบบเคลือบด้วยไฟฟ้า กระบวนการผลิตที่ 12 ผลิตเหล็กแผ่นเคลือบดีบุกและโครเมียม และกระบวนการผลิตที่ 15 ผลิตท่อเหล็กชุบสังกะสี โดยทั้ง 4 กระบวนการผลิต มีวัตถุดิบตั้งต้นหรือต้นทางชนิดเดียวกัน คือ เหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วน แต่สำหรับกระบวนการผลิตที่ 10 – 12 จะใช้เหล็กแผ่นรีดเย็นซึ่งได้จากการแปรรูปเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนมาเป็นวัตถุดิบจริงๆ อีกต่อหนึ่ง ในขณะที่กระบวนการผลิตที่ 15 จะใช้ท่อเหล็กที่ได้จากการแปรรูปเหล็กแผ่นรีดร้อนชนิดม้วนมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต

ลักษณะการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตในกลุ่มนี้ จะเห็นได้ว่าการใช้พลังงาน 2 ชนิดด้วยกัน คือ พลังงานจากไฟฟ้า และพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง ซึ่งปริมาณการใช้พลังงานทั้ง 2 ชนิดนี้ มีมากน้อยแตกต่างกันตามวิธีการผลิต โดยกระบวนการผลิตที่ 10 และ 15 จะใช้พลังงานความร้อนมากกว่า โดยพลังงานความร้อนนี้ถูกใช้ไปกับการหลอมเหลวสังกะสีและการให้ความร้อนต่อเนื่องเพื่อหลอมสังกะสีให้เหลวอยู่ตลอดระหว่างรอการผลิต ในขณะที่กระบวนการผลิตที่ 11 และ 12 จะใช้พลังงานจากไฟฟ้ามากกว่า เพราะกระบวนการผลิตทั้ง 2 ชนิดนี้ใช้การเคลือบด้วยวิธีปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี และจากรูปที่ 4.52 ก็เห็นถึงสัดส่วนการใช้พลังงานของทั้ง 4 กระบวนการผลิตได้อย่างชัดเจน

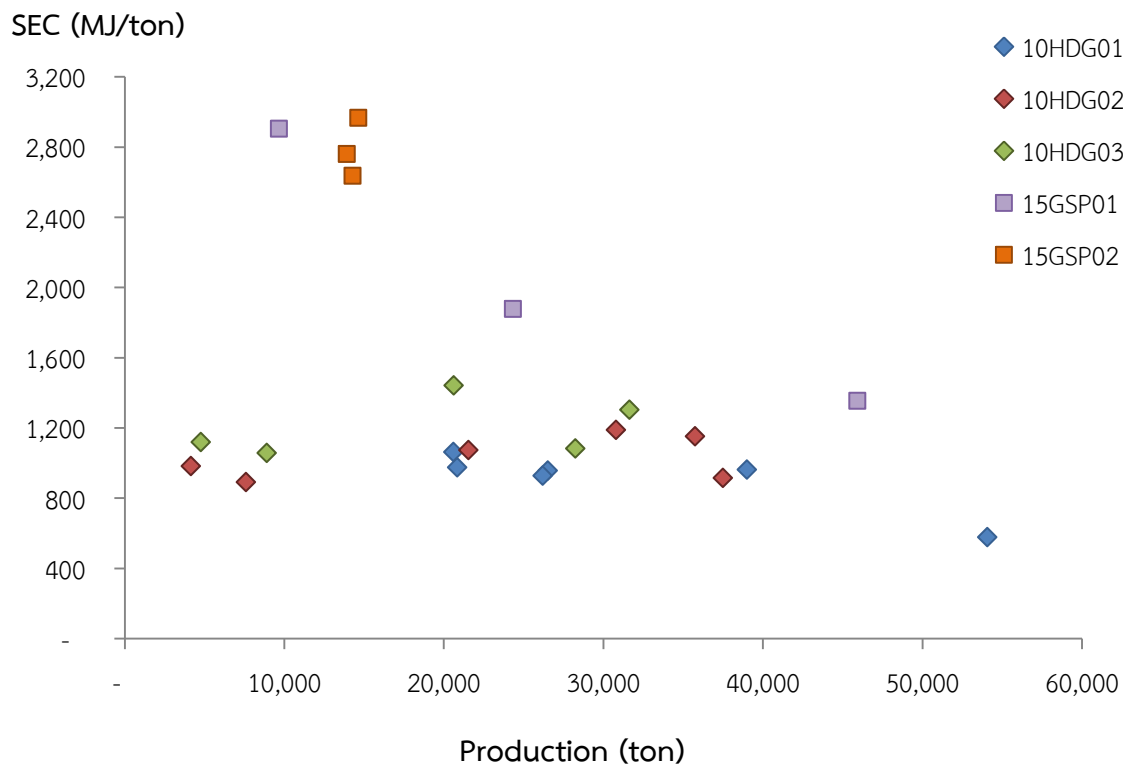
สำหรับกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน ประกอบด้วยกระบวนการผลิตที่ 10 (HDG) และ 15 (GSP) ข้อมูลและรายละเอียดที่ได้รับกลับมาจากแบบสอบถาม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 จำนวนแบบสอบถามของกระบวนการผลิตที่ 10 HDG และ กระบวนการผลิตที่ 15 GSP มีจำนวน 3 และ 2 รายตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 รายละเอียดของแบบสอบถามของกระบวนการเคลือบผิวเหล็กแบบจุ่มร้อน

| ประเภท ที่ | จำนวน แบบสอบถาม ที่ได้กลับคืน | กำลังการผลิต รวม จาก แบบสอบถาม (ตัน) | ร้อยละ ของ กำลัง การผลิต | โรงงาน | ปริมาณ สังกะสี อินกอต ที่ใช้ เฉลี่ย (ตัน) | ปริมาณ ผลิตภัณฑ์ เฉลี่ย (ตัน) |
|---------------|-------------------------------------|---|-----------------------------------|--------|--|-------------------------------------|
| 10 {HDG} | 3 | 248,000 | 47 | HDG01 | 1,879 | 22,895 |
| | | | | HDG02 | 1,343 | 18,840 |
| | | | | HDG03 | 1,920 | 31,208 |
| 15 {GSP} | 2 | 61,000 | 81 | GSP01 | 1,647 | 14,285 |
| | | | | GSP02 | 1,313 | 26,641 |

ค่า SEC ของกระบวนการผลิตหลัก (กระบวนการหลอมสังกะสีและเคลือบผิวเหล็ก) ไม่ขึ้นกับปริมาณการผลิต แต่จะขึ้นกับอุณหภูมิของเหล็กและสังกะสีที่เปลี่ยนไปขณะเคลือบผิวดังนั้น ค่า SEC ของกระบวนการผลิตนี้เป็นผลรวมของ SEC_{st} ซึ่งก็คือค่าการใช้พลังงานต่อมวลเหล็กเพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C ไปจนถึง 455°C และ SEC_{zn} ซึ่งก็คือค่าพลังงานต่อมวลสังกะสีที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจาก 25°C ไปจนถึง 455°C และ ในการหลอมเหลว การประมาณค่า SEC ของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน ได้ผลดังรูปที่ 4.49

จากภาพจะเห็นว่า SEC ของกระบวนการเคลือบผิวเหล็กแผ่น (HDG) ผู้ประกอบการในประเภทนี้ทั้ง 3 ราย มีค่า SEC ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 900 MJ/ton ถึง $1,500 \text{ MJ/ton}$ และจะเห็นว่าปริมาณการผลิตไม่มีผลต่อค่า SEC ดังที่ได้กล่าวมา



รูปที่ 4.49 ค่า SEC ของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน

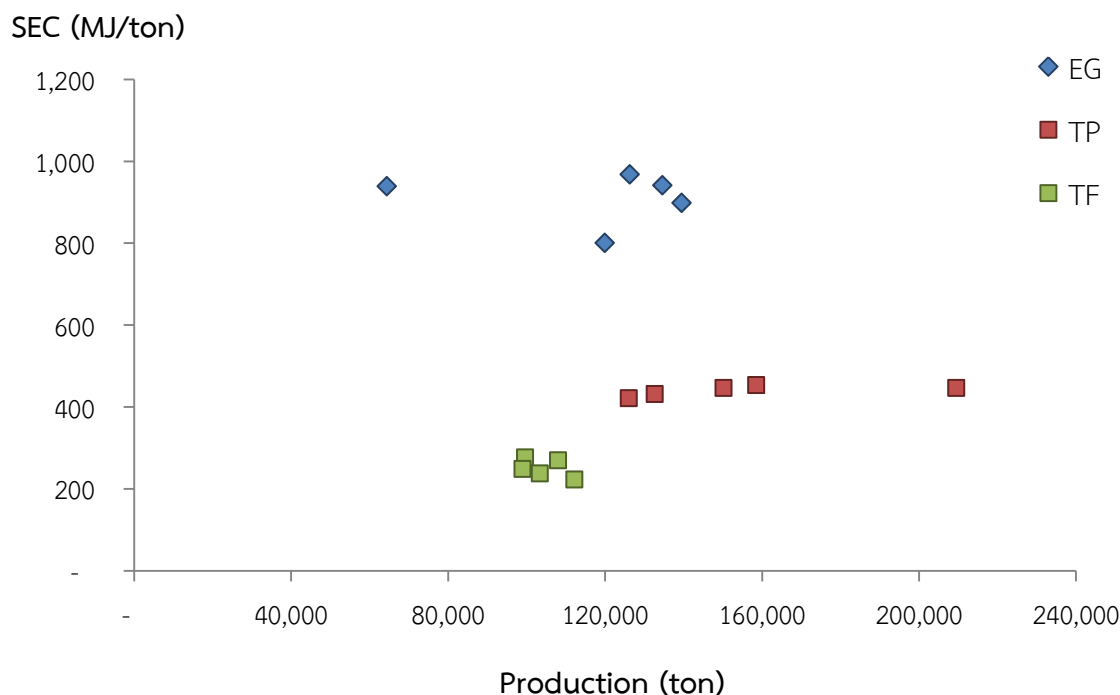
สำหรับค่า *SEC* ของกระบวนการเคลือบผิวท่อเหล็ก (GSP) ผู้ประกอบการในประเภทนี้ทั้ง 2 รายมีการใช้พลังงานต่อผลผลิตค่อนข้างมาก โดยผู้ประกอบการ 15GSP01 ซึ่งมีข้อมูลเพียง 3 ปี มีลักษณะการใช้พลังงานค่อนข้างเปลี่ยนแปลง กล่าวคือเมื่อปริมาณการผลิตมีค่าน้อย พลังงานต่อผลผลิตจะมีค่ามาก ในทางกลับกันเมื่อกำลังการผลิตมีค่ามากจะมีค่าพลังงานต่อผลผลิตน้อย ซึ่งตรงข้ามกับทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า ค่า *SEC* ของกระบวนการเคลือบผิว ไม่ขึ้นกับปริมาณการผลิต โดยปัจจัยที่ทำให้ค่า *SEC* เปลี่ยนแปลงตามปริมาณการผลิตนี้ ส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากความต่อเนื่องในการผลิต เพราะในช่วงที่มีปริมาณการผลิตน้อย แต่ผู้ประกอบการหรือโรงงานยังคงเปิดเตาเพื่อหลอมสังกะสีให้ร้อนและเหลวอยู่ตลอดเวลาเพื่อรอการผลิตที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปนี้ไม่ก่อให้เกิดพลังงาน ตรงข้ามกับช่วงที่การผลิตมีความต่อเนื่องสูง พลังงานความร้อนที่หลอมและอุ่นสังกะสี ก่อให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ค่า *SEC* มีค่าต่ำนั่นเอง ลักษณะเช่นนี้ในทางเศรษฐศาสตร์อาจเรียกได้ว่าเป็น ต้นทุนคงที่ (fixed cost) เพราะแม้ไม่มีการผลิต แต่ก็ยังต้องใช้พลังงานไปอยู่ดี

สำหรับผู้ประกอบการ 15GSP02 มีข้อมูลเพียง 3 ปี ปริมาณการผลิตใกล้เคียงกัน และค่าพลังงานต่อผลผลิตที่ใช้ก็ใกล้เคียงกันด้วย แสดงว่า ในการผลิตของผู้ประกอบการรายนี้ค่อนข้างมีความต่อเนื่องในการผลิต

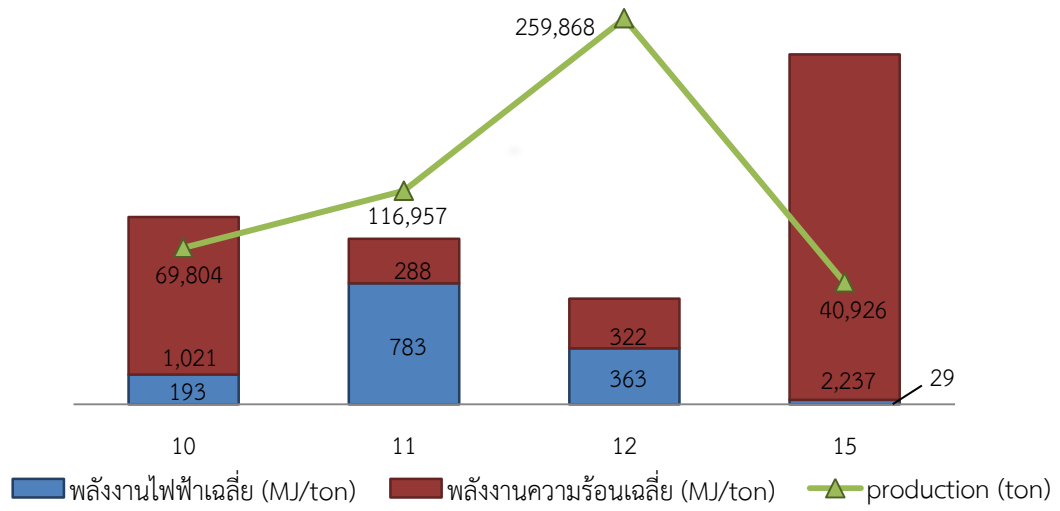
สำหรับกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า ประกอบด้วยกระบวนการผลิตที่ 11 (EG) และ 12 (TPTF) แบบสอบถามที่ได้กลับมาจากผู้ประกอบการ มีเพียงกระบวนการผลิตละ 1 แบบสอบถาม เมื่อประมาณค่า *SEC* ด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม ได้ผลดังรูปที่ 4.50 โดยกระบวนการผลิตที่ 11 (EG) มีข้อมูลของค่า *SEC* 5 ปี และถูกแสดงในภาพด้วยจุดสีน้ำเงิน 5 จุด และสำหรับกระบวนการผลิตที่ 12 (TPTF) มีข้อมูล 5 ปีเช่นเดียวกัน แต่กระบวนการนี้ถูกแยกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือกระบวนการเคลือบดีบุก (TP) แสดงด้วยจุดสีแดง และกระบวนการเคลือบโครเมียม (TF) ถูกแสดงด้วยจุดสีเขียว

เมื่อพิจารณาลักษณะของการใช้พลังงานต่อผลผลิตในรูปที่ 4.50 พบว่า ค่า *SEC* ค่อนข้างคงที่ไม่ว่าปริมาณผลิตภัณฑ์จะมากหรือน้อย โดยการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้าบนผิวเหล็กด้วยสังกะสีให้ค่า *SEC* มากกว่าการเคลือบด้วยดีบุกและโครเมียมและมีค่าอยู่ในช่วง 800-1,000 MJ/ton ขณะที่การเคลือบด้วยดีบุกมีค่าประมาณ 420-450 MJ/ton และ การเคลือบด้วยโครเมียมมีค่าประมาณ 220-280 MJ/ton ค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตในกระบวนการเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้าเหล่านี้จะไม่ขึ้นกับปริมาณการผลิต

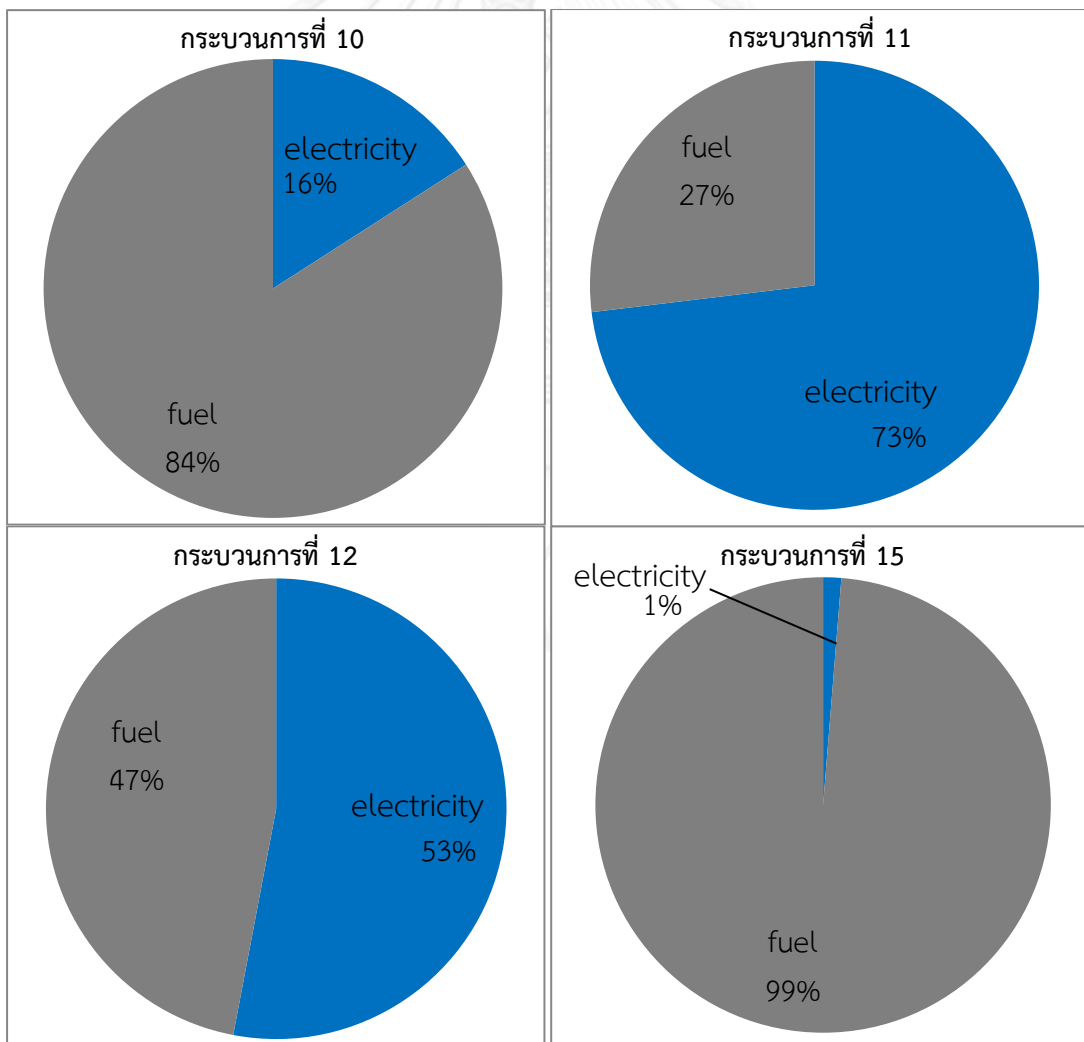
สำหรับรูปที่ 4.51 แสดงค่าเฉลี่ยของปริมาณการผลิต ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าและพลังงานความร้อนต่อผลผลิต ของทั้ง 4 กระบวนการ อย่างที่เคยกล่าวไว้ ว่าวิธีการผลิตของทั้ง 4 กระบวนการผลิตนี้ไม่เหมือนกัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบทั้ง 4 กระบวนการได้ และสำหรับสัดส่วนของการใช้พลังงานของแต่ละกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 4.52



รูปที่ 4.50 ค่า *SEC* ของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.51 ค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตและปริมาณผลิตภัณฑ์ของกระบวนการเคลือบผิว



รูปที่ 4.52 สัดส่วนการใช้พลังงานของกระบวนการเคลือบผิว

4.3 การเปรียบเทียบค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิต

ผลการประมาณด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามดังที่ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ไม่สามารถบอกได้ว่า ผลดังกล่าวถูกต้องหรือน่าเชื่อถือมากน้อยเพียงใด เพื่อยืนยันความถูกต้อง และความน่าเชื่อถือของผลดังกล่าว จึงอาศัยค่าที่สามารถอ้างอิงได้ ดังนั้น ในหัวข้อนี้ จะได้กล่าวถึง การเปรียบเทียบผลการประมาณที่ได้ด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม กับผลที่ได้จากการประมาณในทางทฤษฎี (Theoretical value)

จากที่กล่าวมาในบทที่ 2 ถึงค่าของ SEC ในทางทฤษฎีของกระบวนการต่างๆ ได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า กระบวนการอบร้อน (Reheating) กระบวนการรีด (Rolling) และกระบวนการเคลือบผิวเหล็ก (Coating) ซึ่งในการคำนวณค่าของ SEC จะต้องอาศัยสมมติฐานต่างๆ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณและค่าที่ได้มานั้น จะถูกเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบสอบถาม

ผลการประมาณค่าของ SEC จากแบบสอบถามของกระบวนการต่างๆ จะพบว่า ในแต่ละกระบวนการผลิต จะมีค่า SEC ค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดของกระบวนการนั้นๆ ค่าดังกล่าว จะถูกเรียกเป็น ค่าที่น้อยที่สุดในทางปฏิบัติ (Best practical value); $SEC_{Best\ practical}$ และค่านี้เปรียบเสมือนเป็นตัวแทนของกระบวนการนั้นๆ ในการเปรียบเทียบตลอดจนประเมินศักยภาพ หรือโอกาสที่จะลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต ซึ่งประโยชน์ที่จะได้รับจากการเปรียบเทียบ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลของผู้ประกอบการรายอื่นๆ ที่มีกระบวนการผลิตเหมือนกัน และจะทำให้เห็นว่าผู้ประกอบการที่ใช้เทคโนโลยีที่ดีกว่า ทันสมัยกว่า หรือมีเทคนิคการผลิตที่ดีกว่า ย่อมให้ค่า SEC ที่ดีและน้อยกว่า ดังนั้นแล้ว ผู้ประกอบการที่มีค่า SEC สูงกว่า ก็ต้องพัฒนากระบวนการผลิตของตัวเอง เพื่อให้มีประสิทธิภาพของการใช้พลังงานที่ดียิ่งขึ้น โดยการเปรียบเทียบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการหลอม

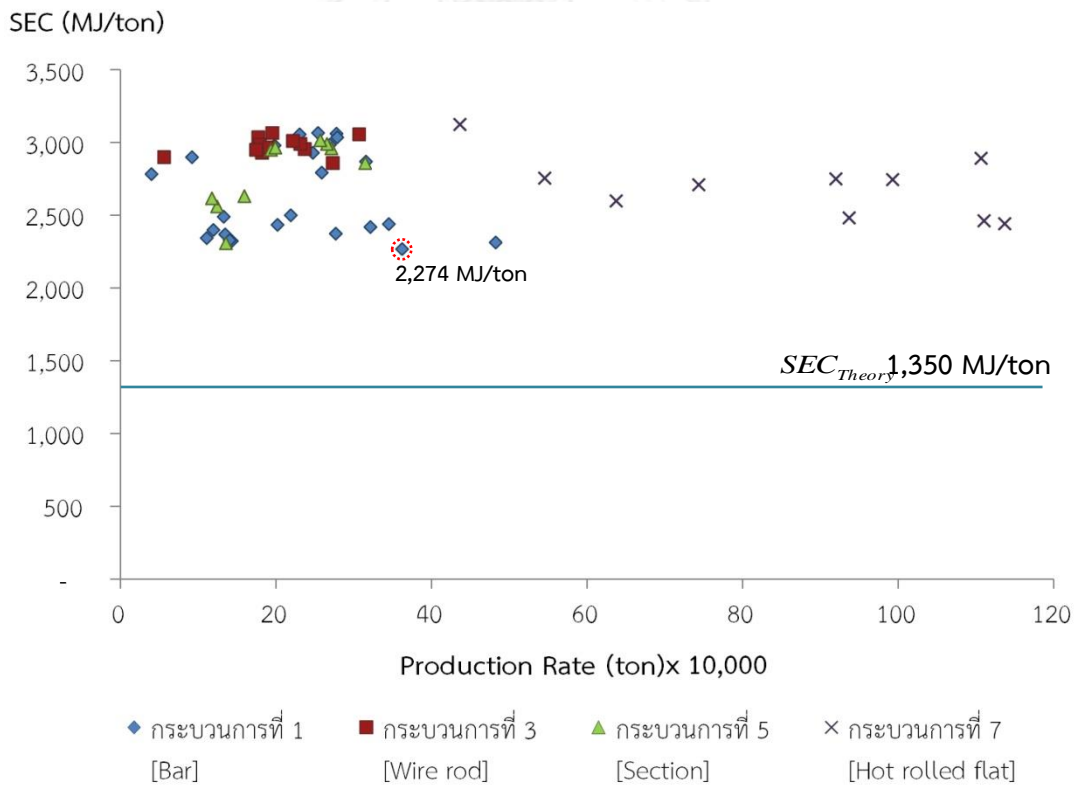
กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์หลัก คือ การหลอมเศษเหล็กให้กลายเป็นน้ำเหล็ก ดังนั้น เมื่อพิจารณาเฉพาะเหล็ก โดยสมมติฐานให้มีเพียง Fe เป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อใส่พลังงานให้กับระบบ พลังงานเหล่านั้นเป็นพลังงานที่เศษเหล็กได้รับและจะทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก $25^{\circ}C$ ไปจนถึงจุดหลอมเหลว พลังงานที่ทำให้เศษเหล็กเหลว และพลังงานที่ทำให้น้ำเหล็กมีอุณหภูมิถึงตามที่ต้องการ นั่นคือ $1,600^{\circ}C$ ซึ่งจากที่กล่าวมาอยู่ภายใต้สมมติฐานหลักที่ว่า พลังงานไม่มีการสูญเสียออกจากระบบ ไม่ว่าจะเป็พลังงานรูปแบบใดก็ตาม พลังงานที่ให้ระบบ เศษเหล็กได้รับทั้งหมด

เพราะฉะนั้น จากที่ได้กล่าวมา ทำให้การประมาณค่า SEC ในทางทฤษฎี สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2.15) และเขียนใหม่ได้เป็น

$$SEC = h_{1,600^{\circ}C} - h_{25^{\circ}C} \quad (4.1)$$

$$h_{1,600^{\circ}C} - h_{25^{\circ}C} = \Delta h_s + L_f + \Delta h_l \quad (4.2)$$

จากสมการที่ (4.1) การเปรียบเทียบผลจากแบบสอบถามและจากการประมาณในทางทฤษฎี สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.53 จะเห็นว่ากระบวนการผลิตที่มีค่า SEC น้อยที่สุด คือ การผลิตเหล็กเส้น (Bar) โดยมีค่า SEC ประมาณ 2,274 MJ/ton และเมื่อเทียบกับค่าในทางทฤษฎีซึ่งเปรียบเสมือนเป็นค่าในอุดมคติและค่า SEC จะไม่สามารถน้อยกว่าค่านี้ได้แล้ว ซึ่งเมื่อประมาณค่าโดยใช้สมการที่ (4.2) จะได้ ค่าเอนทัลปีของเหล็กเป็น 75.4 kJ/mol หรือคิดเป็น 1,350 MJ ต่อการผลิตเหล็ก 1 ตัน



รูปที่ 4.53 เปรียบเทียบผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถามและจากทางทฤษฎีของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

4.3.2 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการอบร้อน

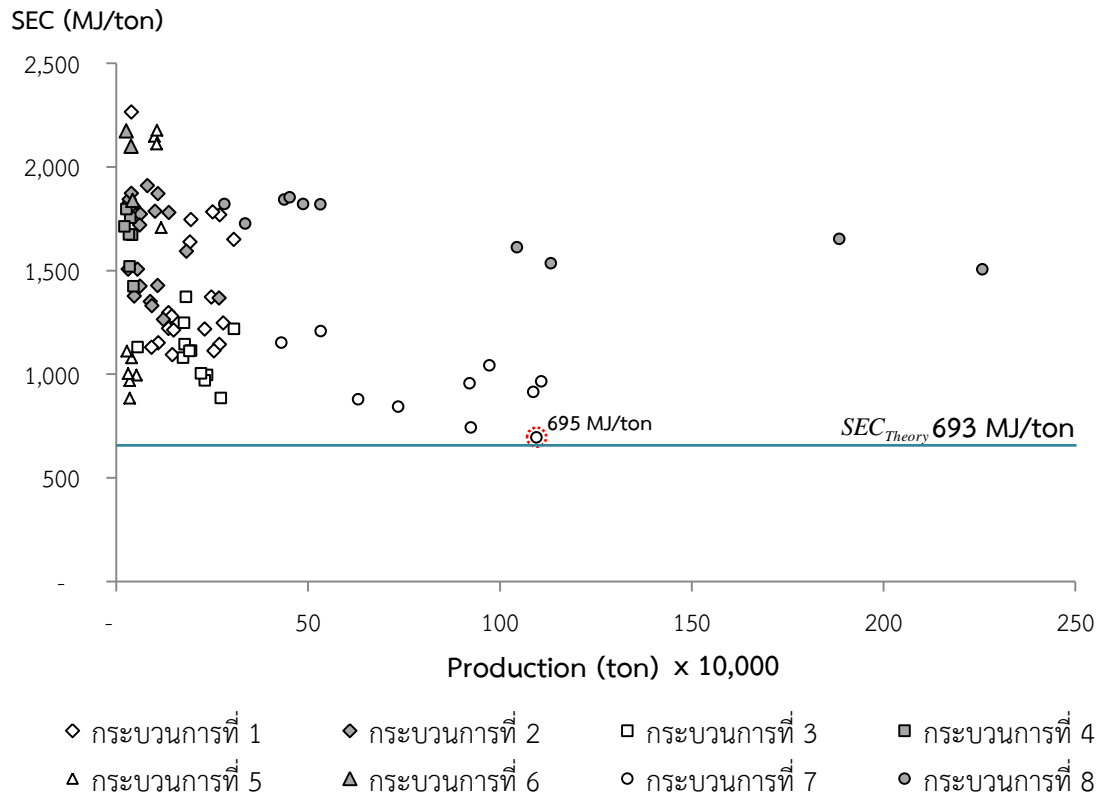
กระบวนการอบร้อนหรือที่เรียกกันว่า กระบวนการอบร้อนเหล็ก ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา จากอดีตเป็นอย่างมาก ทำให้ประสิทธิภาพของการใช้พลังงานมีค่าสูงมากขึ้น จากการประมาณ ค่าการใช้พลังงานในทางทฤษฎีโดยใช้กฎข้อที่ 1 ทางเทอร์โมไดนามิกส์ร่วมกับสมมติฐานหลัก ที่ว่า ไม่มีพลังงานที่สูญเสียออกจากระบบ พลังงานทั้งหมดที่ใส่ให้กับระบบ ทำให้เหล็กมี อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 25°C เป็น $1,250^{\circ}\text{C}$ นั้นหมายความว่า เตาเผาเหล็กมีประสิทธิภาพ 100% ซึ่งจากสมการที่ (2.21) การพิจารณาหาค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตที่ได้จะเป็นค่าที่น้อย ที่สุดในทางทฤษฎี เป็นค่าในอุดมคติซึ่งในกระบวนการผลิตจริง ไม่สามารถทำได้ดีกว่าค่านี้

$$SEC = \frac{E_{in}}{m_{steel}} = \int c_{p,steel} dT = h_{1250^{\circ}\text{C}} - h_{25^{\circ}\text{C}} \quad (2.21)$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณาเฉพาะค่าเอนทัลปีของเหล็ก (Fe) ที่อุณหภูมิ $1,250^{\circ}\text{C}$ ค่าผลต่างของเอนทัลปีเมื่อเทียบกับค่าเอนทัลปีมาตรฐาน ($h_{1250^{\circ}\text{C}} - h_{25^{\circ}\text{C}}$) มีค่าเท่ากับ 38.698 kJ/mol เพราะฉะนั้น เมื่อคิดต่อเหล็ก 1 ตัน (17.91 kmol) ทำให้ได้ว่า ค่าดัชนีการใช้ พลังงานต่อผลผลิตในทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 693 MJ/ton

การเปรียบเทียบค่า SEC ที่ได้จากทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากแบบสอบถามของ กระบวนการอบร้อน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.54 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าทั้ง 8 กระบวนการผลิต ที่มีกระบวนการอบร้อนเป็นส่วนหนึ่งของการผลิต มีลักษณะของการใช้พลังงานที่แตกต่างกันไป และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าในทางทฤษฎี ซึ่งถูกแทนด้วยเส้นสีฟ้าและมีค่าเท่ากับ 693 MJ/ton พบว่า กระบวนการผลิตที่ 7 หรือกระบวนการอบร้อนของการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อนแบบมี เตาหลอม ให้ค่า SEC ใกล้เคียงกับค่าในทางทฤษฎีมากที่สุด โดยค่า SEC ที่ต่ำที่สุดของ กระบวนการนี้ มีค่า 695 MJ/ton ซึ่งมากกว่าค่าในทางทฤษฎีอยู่เพียง 2 MJ/ton

เมื่อพิจารณาถึงสาเหตุที่ทำให้กระบวนการผลิตที่ 7 ให้ค่า SEC ใกล้เคียงกับค่าใน ทางทฤษฎี อาจเป็นเพราะลักษณะของกระบวนการผลิตเป็นสำคัญ เพราะโดยทั่วไปแล้ว กระบวนการอบร้อนถือเป็นกระบวนการส่วนหนึ่ง ของกระบวนการทั้งหมดที่ใช้ผลิตเหล็ก ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยเป็นกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ทั้งสำเร็จรูป (Billet, slab, Bloom) ให้ถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแปรรูปก่อนส่งต่อไปยังกระบวนการรีด หรือกระบวนการแปรรูปต่อไป ซึ่งโดยทั่วไป เส้นทางของผลิตภัณฑ์เหล็กทั้งสำเร็จรูปก่อนเข้าสู่ กระบวนการอบร้อนมี 2 เส้นทางคือ



รูปที่ 4.54 เปรียบเทียบผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถามและจากทางทฤษฎีของกระบวนการอบร้อน

- 1) ผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปที่เริ่มผลิตจากการหลอมเศษเหล็กและการหล่อ
- 2) ผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปที่ได้จากการสั่งซื้อจากผู้ประกอบการอีกต่อหนึ่ง

หรืออาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็น ผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปที่ถูกนำมาอบร้อนมาจากการผลิตเองหรือจากการสั่งซื้อ โดยผู้ประกอบการที่มีโรงงานหลอมเหล็ก ก็จะเริ่มผลิตจากการหลอมเศษเหล็กและการหล่อ ในขณะที่ ผู้ประกอบการที่ไม่มีเตาหลอมเหล็ก และมีเฉพาะเตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) ก็จะสั่งซื้อผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูปมาจากผู้ประกอบการที่มีเตาอุ่นอีกต่อหนึ่ง ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้ว ผู้ประกอบการที่มีเตาหลอมเหล็ก ก็จะมีเตาเผาเหล็กอยู่ในโรงงานด้วย และเหล็กที่ผลิตได้จากการหลอมส่วนหนึ่งก็จะส่งไปแปรรูปเอง และอีกส่วนหนึ่งจะขายให้กับผู้ประกอบการที่ไม่มีเตาหลอมเหล็กนั่นเอง ซึ่งจากทั้งหมดที่ได้กล่าวมานั้น ก็คือ ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานในกระบวนการอบร้อน นั่นคือ ความต่อเนื่องในการผลิต

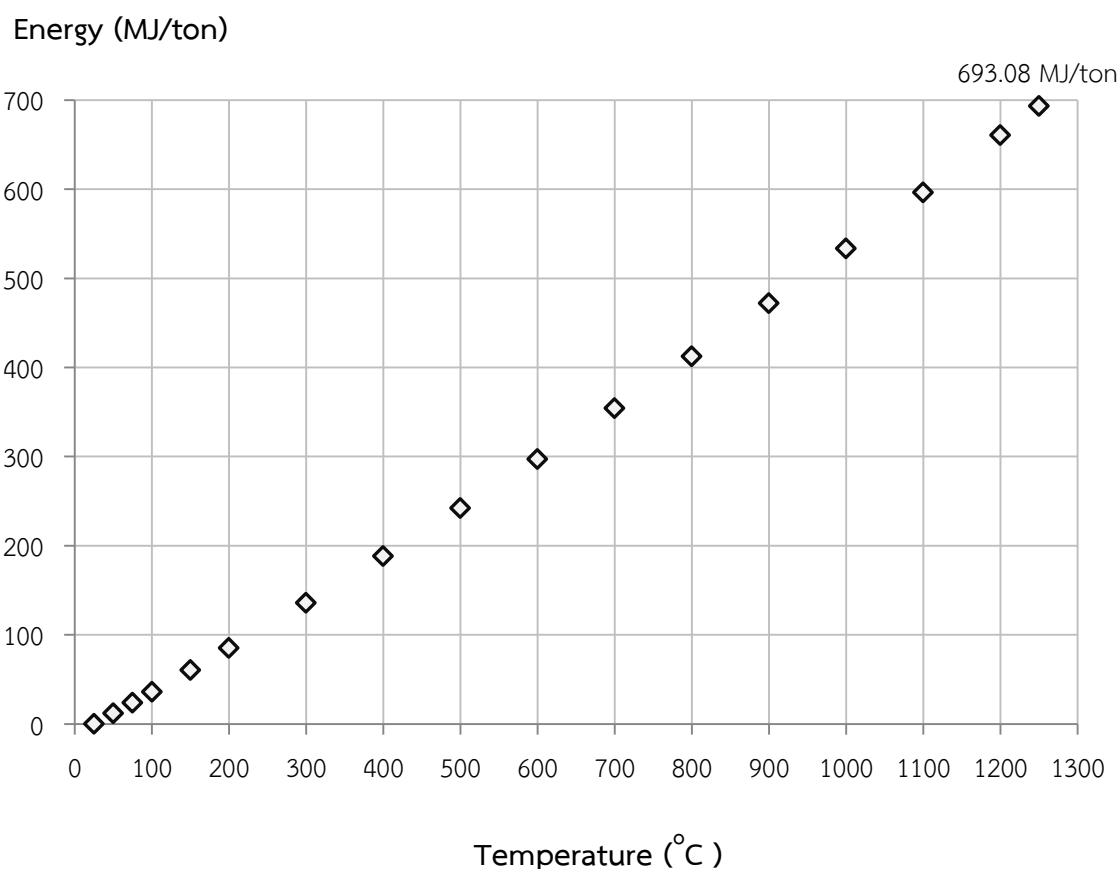
กระบวนการผลิตที่มีความต่อเนื่อง คือ กระบวนการที่ส่งต่อผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ไปยังขั้นตอนต่อไปโดยทันทีและไม่มีการพักของผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการ ซึ่งผู้ประกอบการที่มีเตาหลอมเหล็ก เมื่อหลอมและหล่อออกมาได้เป็นผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป จะส่งต่อไปยังกระบวนการอบร้อนในทันที กล่าวได้ว่า การผลิตของผู้ประกอบการรายนี้มีความต่อเนื่อง ซึ่งทำให้อุณหภูมิของเหล็กก่อนเข้าเตาอบร้อนยังมีค่าสูงอยู่ วิธีการที่ส่งต่อเหล็กขณะที่ยังมีอุณหภูมิสูงเข้าเตาอบร้อนนี้ถูกเรียกว่า “Hot charge” และหากกระบวนการผลิตขาดความต่อเนื่อง เหล็กหลอมเหลวที่ถูกหล่อออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป จะถูกส่งไปเก็บ ซึ่งทำให้อุณหภูมิของเหล็กค่อยๆ เย็นลง และเมื่อต้องการนำเหล็กมาอุ่น บางครั้งเหล็กเหล่านี้มีอุณหภูมิเกือบเท่าหรือเท่ากับอุณหภูมิห้อง ($25^{\circ}C$) วิธีการที่ผ่านเหล็กที่มีอุณหภูมิต่ำเข้าเตาอุ่นร้อนนี้ถูกเรียกว่า “Cold charge” ข้อมูลจากแบบสอบถามที่แสดงถึงอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปก่อนเข้าเตาอุ่นเหล็ก (T_{inlet}) ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปก่อนเข้าเตาอบร้อน

| กระบวนการผลิต | | $T_{inlet} (^{\circ}C)$ | Hot/Cold charge |
|-------------------------------------|---------|-------------------------|-----------------|
| {1} Bar with EAF | 01Bar01 | 30-35 | Cold charge |
| | 01Bar02 | 30 | |
| | 01Bar03 | 30/600 | Hot/Cold charge |
| {2} Bar without EAF | 02Bar01 | 25 | Cold charge |
| | 02Bar02 | 34 | |
| | 02Bar03 | 35 | |
| {3} Wire rod with EAF | 03WR01 | 30/600 | Hot/Cold charge |
| | 03WR02 | 30/700 | |
| {4} Wire rod without EAF | 04WR01 | - | Cold charge |
| | 04WR02 | 30 Ambient temp. | |
| {5} Section with EAF | 05ST01 | 30 | Cold charge |
| | 05ST02 | 36 | |
| {6} Section without EAF | 06ST01 | 38 | Cold charge |
| {7} Hot rolled sheet with EAF | 07HR01 | 980 | Hot charge |
| | 07HR02 | 900 | |
| {8} Hot rolled sheet without EAF | 08HR01 | 25 | Cold charge |
| | 08HR02 | 32 | |

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลและตารางดังที่กล่าวมา จึงทำให้ทราบสาเหตุที่ทำให้ค่า SEC ของกระบวนการที่ 7 มีค่าใกล้เคียงกับค่าในทางทฤษฎี เพราะกระบวนการผลิตที่ 7 เริ่มอุ่นเหล็กจากที่อุณหภูมิ 980°C และ 900°C ซึ่งการคำนวณในทางทฤษฎีใช้การอุ่นเหล็กจาก 25°C ทำให้การเปรียบเทียบการอุ่นของกระบวนการที่ 7 กับค่าในทางทฤษฎี อาจไม่ถูกต้องมากนัก เพราะเป็นการเปรียบเทียบกันคนละเงื่อนไข แต่จากผลดังกล่าว ก็ทำให้ทราบว่า อุณหภูมิของเหล็กก่อนเข้าเตาเผา มีผลสำคัญต่อการใช้พลังงานในการอุ่น ซึ่งสามารถพิจารณาได้โดยตรงจากรูปที่ 4.54

เมื่อเหล็กเข้าสู่เตาเผาเหล็กที่ 25°C เหล็กจะมีค่าเอนทัลปีเป็นศูนย์ แต่เมื่อเหล็กมีอุณหภูมิมากกว่า 25°C เหล็กที่เข้าสู่เตาเผา ก็จะมีค่าเอนทัลปีเพิ่มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.55 เพราะฉะนั้น การอบร้อนที่เป็นแบบ hot charge เหล็กจะมีค่าเอนทัลปีที่ไม่เป็นศูนย์ก่อนเข้าสู่เตาเผา และเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้ค่า SEC ที่ได้ใกล้เคียงกับค่าในทางทฤษฎี



รูปที่ 4.55 ค่าเอนทัลปีของเหล็ก (Fe) ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3.3 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการรีด

ในกระบวนการรีด เป็นที่ทราบกันดีว่าแบ่งออกเป็น กระบวนการรีดร้อน และ กระบวนการรีดเย็น โดยใช้อุณหภูมิขณะรีดเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง และอุณหภูมิยังมีผลต่อ คุณสมบัติหลายๆ ประการของเหล็ก รวมถึงคุณสมบัติต่อการเปลี่ยนรูปทรงด้วย โดยค่าความเค้น (Stress) เป็นคุณสมบัติหนึ่งของเหล็กซึ่งเปลี่ยนแปลงหรือเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2

สมการหลักที่ใช้สำหรับประมาณค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกระบวนการรีด คือ สมการที่ (2.32) ซึ่งจากสมการจะเห็นว่า มีตัวแปรที่ต้องพิจารณาอยู่ 2 ตัวแปรด้วยกัน คือ ค่าความเค้น (σ) และค่าความเครียด (ϵ) ในแกนต่างๆ ซึ่งโดยทั่วไป เมื่อเป็นการรีดเหล็กแท่ง ความเค้นและความเครียดจะเกิดขึ้นทั้ง 3 แกน ในขณะที่เมื่อเป็นการรีดเหล็กแผ่น การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเพียง 2 แกนเท่านั้น โดยแกนความกว้างจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

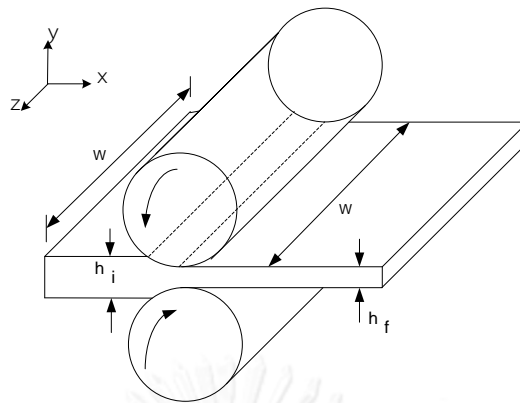
ก. กระบวนการรีดร้อน

สำหรับกระบวนการรีดร้อนเหล็กแผ่น ความเค้นและความเครียดจะเกิดเพียง 2 แกน ดังนั้น สามารถเขียนสมการ (2.32) ใหม่ ได้ดังสมการที่ (4.3) และ (4.4) โดย σ_x , ϵ_x คือ ค่าความเค้นและค่าความเครียดในแนวแกน x และ σ_y , ϵ_y คือ ค่าความเค้นและค่าความเครียดในแนวแกน y ดังรูปที่ 4.56

$$SEC = \frac{Q_{in}}{m_{steel}} = \frac{1}{\rho_{steel}} \int_0^{\epsilon_f} (\sigma_x d\epsilon_x + \sigma_y d\epsilon_y) \quad (4.3)$$

$$SEC = \frac{Q_{in}}{m_{steel}} = \frac{1}{\rho_{steel}} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y) \quad (4.4)$$

$$\sigma = 59.06 \epsilon^{0.1698} \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.56 การกำหนดทิศทางของการรีด

พิจารณาแกน x ซึ่งเป็นแกนที่ทำให้วัสดุมีความยาวเพิ่มมากขึ้น จะได้ว่า ค่าความเครียดของเหล็กในแนวแกนนี้ จะเป็นไปตามสมการ (2.22) และสำหรับค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแกนนี้ยังมีค่าไม่ถึงค่า Yield stress ซึ่งค่าความเค้นจะเป็นไปตามกฎกำลัง (Power law) โดยสมการหรือความสัมพันธ์ของค่าความเค้นของเหล็กแผ่นในแนวแกนนี้มีได้หลายค่าหลายความสัมพันธ์ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและองค์ประกอบของเหล็ก และจากการสืบค้นงานวิจัยที่เคยศึกษาในอดีต พบว่าความสัมพันธ์ของค่าความเค้นและความเครียดสำหรับกระบวนการรีดร้อนที่อุณหภูมิ $1,200^{\circ}\text{C}$ ของเหล็กแผ่นที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 0.14% [33, 34] (ASTM A283) ซึ่งเป็นเหล็กมาตรฐานเดียวกับที่ผู้ประกอบการในกลุ่มนี้ผลิตได้ดังสมการที่ (4.5)

เมื่อแทนค่าฟังก์ชันของความเค้นจากสมการ (4.5) ลงในสมการ (4.3) แล้วอินทิเกรตจากค่าความเครียดตั้งแต่ 0 ถึง 4.61 ซึ่งเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นมากที่สุดของผู้ประกอบการ 07HR02 ($h_i = 100 \text{ mm.}$, $h_f = 1 \text{ mm.}$) ดังนั้นเมื่อแทนค่าความเครียด (ϵ_1) ที่เกิดขึ้นในการรีดจากข้อมูลในตารางที่ 4.4 ของผู้ประกอบการ 07HR02 ซึ่งรีดลดขนาดลงมาจนมีความหนาอย่างน้อยที่สุดคือ 1 mm. จะให้ค่าความเครียดเท่ากับ 4.61 จะได้ค่าพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ใช้เปลี่ยนรูปทรงเหล็กแผ่นในแนวแกนความยาวหรือแนวแกน x ที่สภาวะนั้นมีค่าเป็น 301.7 MJ/m^3

เมื่อพิจารณาแกน y ซึ่งเป็นแกนที่ทำให้วัสดุมีความหนาของชิ้นงานลดน้อยลง ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแกนนี้ เป็นค่าความเค้นที่มากจนถึงค่า Yield stress (σ_y) โดยจากมาตรฐานเหล็ก ASTM A283 ที่มีองค์ประกอบในเนื้อเหล็กดังแสดงในตารางที่ 4.5 จะให้ค่า Yield stress มีค่าประมาณ 80 MPa และสำหรับค่าความเครียดจะเป็นไปตามสมการ (2.23) และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในแนวแกนนี้มีขนาดเท่ากับความเครียดในแนวแกน x (ความเครียดในแนวแกน x เท่ากับในแนวแกน y) และมีค่าเท่ากับ 4.61 ดังนั้น จะได้ค่าพลังงานต่อปริมาตรที่ใช้เปลี่ยนรูปทรงเหล็กแผ่นในแนวแกน y ที่สภาวะนั้นมีค่าเป็น 368.8 MJ/m^3

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลขนาดของผลิตภัณฑ์เหล็กก่อนและหลังรีดร้อน

| Plant | Input Material | Input Size Thickness, h_i | Output Size Thickness, h_f | $\varepsilon = \ln \frac{h_i}{h_f}$ | %C |
|-----------|----------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 01Bar01 | Billet | N/A | 9-40 mm. | N/A | N/A |
| 01Bar03 | Billet | N/A | 6-40 mm. | N/A | N/A |
| 03WR01,02 | Billet | N/A | 5.5-17 mm. | N/A | N/A |
| 04WR02 | Billet | N/A | 5.5-19 mm | N/A | N/A |
| 05ST01 | Bloom | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 06ST01 | Bloom | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 07HR01 | Slab | 50-60 mm. | 1-25 mm. | 4.09 | 0.001% |
| 07HR02 | Slab | 100 mm. | 1-13 mm. | 4.61 | 0.14% ASTM A283 |
| 08HR01 | Slab | 160-250 mm. | 1-19 mm. | 5.52 | N/A |

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของเหล็กแผ่นคาร์บอนต่ำตามมาตรฐาน ASTM A283-03

| Element | | | | | |
|---------|------|------|---------|---------|-------------|
| C | Mn | Si | P (max) | S (max) | Yield Point |
| 0.14 | 0.90 | 0.40 | 0.035 | 0.04 | 165 MPa |

เมื่อเปรียบเทียบค่า SEC ของกระบวนการรีดร้อนที่ได้จากการประมาณด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามกับการประมาณในทางทฤษฎี ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.57 และรูปที่ 4.58 จากภาพจะเห็นว่า ค่า SEC ที่น้อยที่สุด ซึ่งถือเป็นค่าที่ดีที่สุดในทางปฏิบัติ ($SEC_{Best\ practical}$) เป็นของการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน (Hot rolled sheet) โดยมีค่าเท่ากับ 139 MJ/ton

สำหรับการประเมินศักยภาพในการลดการใช้พลังงาน โดยการเปรียบเทียบค่า $SEC_{Best\ practical}$ กับค่า SEC_{Theory} ซึ่งมีค่าต่างกันอยู่ 49.6 MJ/ton หรือคิดเป็น 55.5% ของค่า SEC ในทางทฤษฎี ซึ่งช่วงความต่างของทั้งสองค่านี้อาจเกิดขึ้นจากพลังงานที่สูญเสียในรูปแบบต่างๆ เช่น แรงเสียดทานในการเคลื่อนย้ายชิ้นงานหรือแรงเสียดทานในลูกรีด เป็นต้น

ข. กระบวนการรีดเย็น

สำหรับการพิจารณาการใช้พลังงานในกระบวนการรีดเย็น จะใช้สมการเดียวกับกระบวนการรีดร้อน นั่นคือ สมการที่ (2.32) และการประมาณค่า SEC จะทำในลักษณะเช่นเดียวกับการรีดร้อน กล่าวคือ จะเริ่มพิจารณาค่าพลังงานต่อปริมาตรที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปทรงของชิ้นงานจาก 2 ทิศทาง (ทิศทางตามความกว้างของชิ้นงานไม่มีการเปลี่ยนรูปทรง) โดยเป็นค่าที่ขึ้นกับทั้งค่าความเค้นและค่าความเครียด ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้จะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับสถานะของการรีด และถือเป็นตัวแปรสำคัญที่ต้องพิจารณา

ความเค้นที่เกิดขึ้นในแนวแกนความยาว (σ_x) จะเป็นไปตามกฎยกกำลัง (Power law) โดยค่าความเค้นตามสมการที่ (2.34) และจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [35] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาคุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ตามมาตรฐาน JIS G3141 SPCC โดยเป็นเหล็กมาตรฐานเดียวกันกับที่ผู้ประกอบการในกลุ่มนี้ผลิตได้ ผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้พบว่า ค่า K (Strength coefficient) และค่า n (Strain hardening exponent) มีค่าเท่ากับ 613.95 และ 0.1763 ตามลำดับ และเมื่อแทนค่าทั้งสองลงในสมการ (2.34) จะได้ว่า

$$\sigma_x = 613.95 \varepsilon^{0.1763} \quad (4.6)$$

$$\int_0^{\varepsilon_f=3.5} \sigma_x d\varepsilon_x = \int_0^{\varepsilon_f=3.5} 613.95 \varepsilon^{0.1763} d\varepsilon \quad (4.7)$$

เมื่อแทนค่าฟังก์ชันของความเค้นจากสมการ (4.6) ลงในสมการ (4.3) จะได้ตั้งสมการ (4.7) และเมื่ออินทิเกรตจากค่าความเครียดตั้งแต่ 0 ถึง 3.5 ซึ่งถือเป็นค่าความเครียดที่เกิดขึ้นมากที่สุด ($h_i = 4 \text{ mm.}$, $h_f = 0.14 \text{ mm.}$) ของผู้ประกอบการ 09CR01 จะได้ค่าพลังงานต่อปริมาตรที่ใช้เปลี่ยนรูปทรงของเหล็กในแนวแกนตามความยาวมีค่าประมาณ $2,278 \text{ MJ/m}^3$

เมื่อแทนค่าความเค้นตามแนวแกนความหนาของชิ้นงาน (σ_y) ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า Yield stress โดยตามมาตรฐานไม่ได้ระบุค่า Yield stress ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4.7 ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า Yield stress ซึ่งมีค่าเท่ากับ 280 MPa [36] และเมื่ออินทิเกรตค่าสมการที่ (4.3) และแทนค่าตัวแปรต่างๆ จะได้ ค่าพลังงานต่อปริมาตรที่ใช้เปลี่ยนรูปทรงของเหล็กในแนวแกนความหนามีค่าเป็น 980 MJ/m^3

เมื่อแทนค่าพลังงานต่อปริมาตรของแกนความยาวที่ได้เท่ากับ $2,278 \text{ MJ/m}^3$ และแกนความหนาซึ่งมีค่าเท่ากับ 980 MJ/m^3 และแทนค่าความหนาแน่นของเหล็ก (ρ_s) ที่ 20°C เป็น $7,870 \text{ kg/m}^3$ [37] ลงในสมการ (4.3) จะได้ ค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกระบวนการรีดเย็นมีค่าเท่ากับ 414 MJ/ton

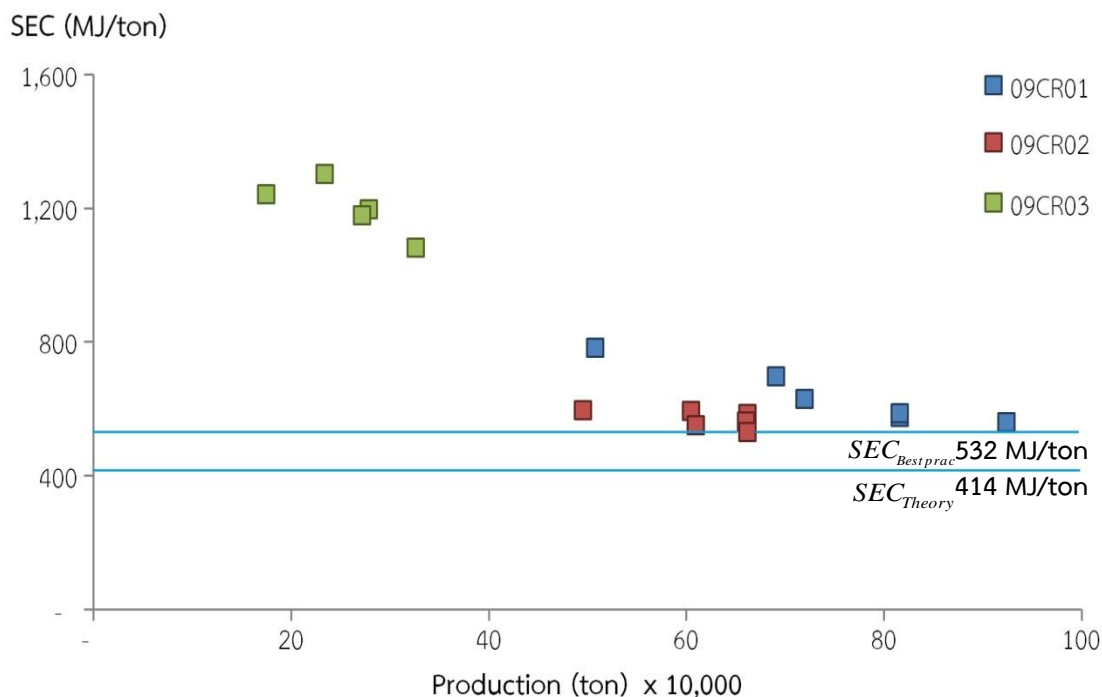
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลขนาดของผลิตภัณฑ์เหล็กก่อนและหลังรีดเย็น

| Plant | Input Material | Input Size Thickness, h_i | Output Size Thickness, h_f | $\varepsilon = \ln \frac{h_i}{h_f}$ |
|--------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 09CR01 | HRC | 2 – 4 mm. | 0.14 – 2 mm. | 3.5 |
| 09CR02 | HRC | N/A | 0.12-3.30 mm. | N/A |

ตารางที่ 4.7 องค์ประกอบของเหล็กแผ่นรีดเย็น

| Plant | Specification | C (max) | Mn (max) | Si (max) | P (max) | S (max) | Yield Point |
|--------|---------------------------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|----------------|
| 09CR01 | ASTM A1008 CS [37] | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 280 MPa |
| 09CR02 | JIS G3141 (1996) (SPCC) [38] | 0.12 | 0.50 | - | 0.040 | 0.045 | N/A |
| | JIS G3141 (2005) (SPCC) [39] | 0.12 | 0.60 | - | 0.100 | 0.050 | N/A |

เมื่อเปรียบเทียบค่า SEC ของกระบวนการรีดเย็นที่ได้จากการประมาณด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามกับการประมาณในทางทฤษฎี โดยค่า SEC จากแบบสอบถามที่นำมาใช้นี้ เป็นค่าจากพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว เพื่อให้เปรียบกับกับค่าในทางทฤษฎีได้อย่างถูกต้อง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.59 ซึ่งจากภาพจะเห็นว่า ผู้ประกอบการ 09CR02 ให้ค่า SEC ที่น้อยที่สุดซึ่งถือเป็นค่าที่ดีที่สุด ในทางปฏิบัติ ($SEC_{\text{Best practical}}$) มีค่าเท่ากับ 532 MJ/ton และเมื่อพิจารณาศักยภาพในการลดการใช้พลังงาน โดยการเปรียบเทียบค่า $SEC_{\text{Best practical}}$ กับค่า SEC_{Theory} พบว่าค่าทั้งสองต่างกันอยู่ 118 MJ/ton หรือคิดเป็น 28.5% ของค่า SEC ในทางทฤษฎี



รูปที่ 4.59 เปรียบเทียบผลการประมาณค่า SEC ของพลังงานไฟฟ้าจากแบบสอบถามและจากทางทฤษฎีของกระบวนการรีดเย็น

4.3.4 การเปรียบเทียบการใช้พลังงานในกระบวนการเคลือบผิว

การเปรียบเทียบการใช้พลังงานของกระบวนการเคลือบผิวทั้งสองประเภท คือ การเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อนและการเคลือบผิวด้วยวิธีการทางไฟฟ้า ด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามกับค่าที่ได้จากการประมาณในทางทฤษฎี อาศัยสมการและสมมติฐานต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาจากบทที่ 2 โดยรายละเอียดในการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้

4.3.4.1 กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน

พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้สำหรับการผลิตด้วยวิธีนี้ จะพิจารณาเฉพาะ พลังงานความร้อนเพื่อทำให้สังกะสีและเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Sensible heat ; Q_s) พลังงานความร้อนเพื่อทำให้สังกะสีหลอมเหลว (Latent heat ; Q_L) และพลังงานความร้อนที่ใช้อุ่นสังกะสีให้ร้อนและหลอมเหลวอยู่ตลอดเวลา เพียงเท่านั้น

$$SEC = \int \frac{m_{zn}}{m_{total}} c_{p,zn} dT + \frac{m_{zn}}{m_{total}} L_{f,zn} + \int \frac{m_{steel}}{m_{total}} c_{ps} dT \quad (2.39)$$

ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน นิยามได้ดังสมการที่ (2.39) โดย m_{total} ที่เห็นในสมการ คือ ผลรวมทั้งหมดระหว่างมวลของเหล็กและมวลของสังกะสีที่มาเคลือบอยู่บนผิว

ดังนั้น เมื่ออินทิเกรตฟังก์ชันค่าความจุความร้อนจำเพาะของสังกะสี ($c_{p,zn}$) [25] ที่แสดงในตารางที่ 2.2 เทียบกับอุณหภูมิ ตามสมการที่ (2.39) ตั้งแต่อุณหภูมิ 298 K ถึงจุดหลอมเหลวคือ 692.5 K และตั้งแต่อุณหภูมิจุดหลอมเหลว 692.5 K ถึง 728 K ผลที่ได้คือค่าพลังงานความร้อนต่อมวลของสังกะสีที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสังกะสี (Specific sensible heat) ในสถานะของแข็งเป็น 165.7 MJ/ton_{Zn} และในสถานะของเหลวเป็น 17.1 MJ/ton_{Zn} รวมเป็นความร้อนสัมผัสต่อมวลของสังกะสีมีค่าเท่ากับ 182.8 MJ/ton_{Zn} ในขณะที่ค่าความร้อนแฝงต่อมวลของสังกะสีหรือค่าพลังงานความร้อนต่อมวลที่ใช้หลอมสังกะสี (Specific latent heat) มีค่าเป็น 111.8 MJ/ton_{Zn} เพราะฉะนั้น จากที่กล่าวมา จะได้ค่าของ

$$\int_{298K}^{692.5K} c_{p,zn} dT + L_{f,zn} + \int_{692.5K}^{728K} c_{p,zn} dT \text{ มีค่าประมาณ } 294.6 \text{ MJ/ton}_{Zn}$$

ในการผลิตเหล็กเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน เหล็กที่ถูกนำมาจุ่มในสังกะสีหลอมเหลวจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นด้วย เพราะฉะนั้น อาจกล่าวได้ว่า พลังงานความร้อนส่วนหนึ่งถูกใช้ไปกับการเพิ่มอุณหภูมิของเหล็ก เมื่อเหล็กเริ่มจุ่มจากอุณหภูมิ 25 °C และเป็นไปตามขั้นตอนการผลิต อุณหภูมิของเหล็กจะสมดุลกับอุณหภูมิของสังกะสีหลอมเหลวที่ 455 °C และเมื่อพิจารณาค่าเอนทัลปีของเหล็กที่อุณหภูมิ 455 °C จะมีค่าเป็น 12.151 kJ/mol หรือ 217.6 MJ/ton_{steel}

ซึ่งเป็นค่าของ

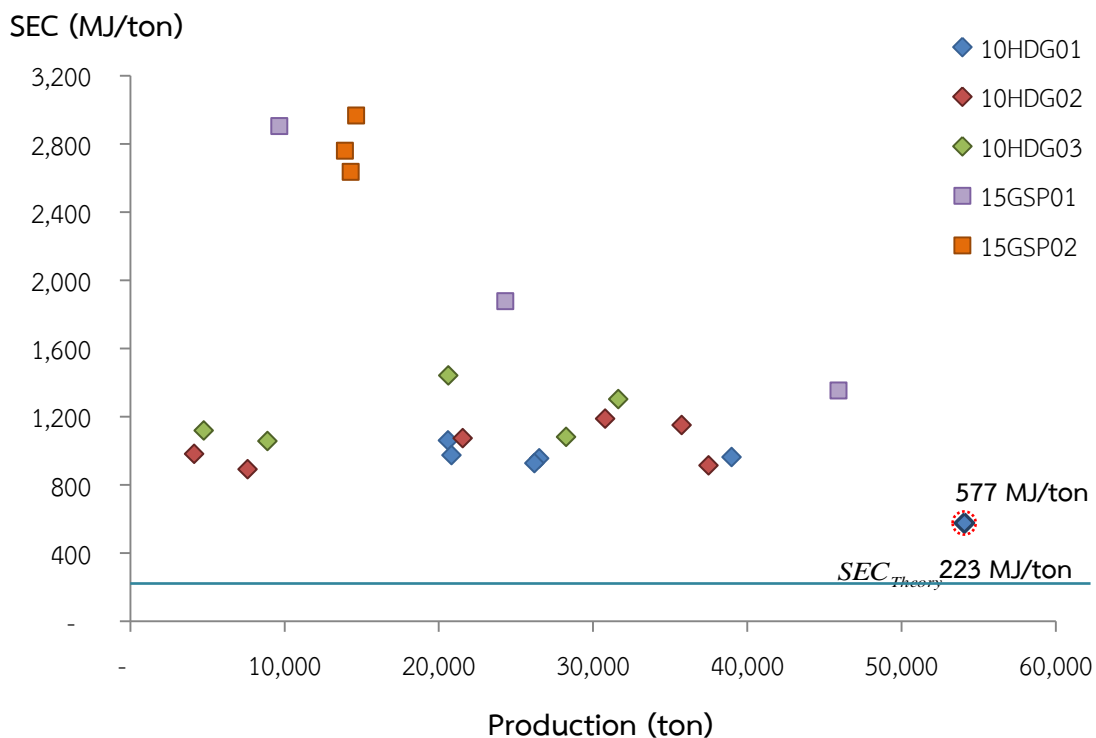
$$\int_{25^{\circ}C}^{455^{\circ}C} c_{ps} dT$$

ในการประมาณหาค่า SEC ในทางทฤษฎี โดยนิยามจากสมการ (2.39) จำเป็นต้องคูณสัดส่วนของมวลสังกะสีและมวลเหล็กต่อมวลรวมทั้งหมดเข้าไป ซึ่งในทางทฤษฎี ค่าดังกล่าวเป็นตัวแปรที่ไม่อาจทราบค่าได้ ดังนั้น การพิจารณาค่า SEC ในทางทฤษฎี จะอาศัยสัดส่วนมวลดังกล่าวจากข้อมูลในแบบสอบถาม ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 มวลของสังกะสีและมวลของผลิตภัณฑ์เหล็กเคลือบสังกะสี

| ประเภทที่ | โรงงาน | m_{zn} (ton) | m_{total} (ton) | m_{steel} (ton) |
|-----------|--------|-------------------|----------------------|----------------------|
| 10 {HDG} | HDG01 | 1,879 | 22,895 | 21,016 |
| | HDG02 | 1,343 | 18,840 | 17,497 |
| | HDG03 | 1,920 | 31,208 | 29,288 |
| 15 {GSP} | GSP01 | 1,647 | 14,285 | 12,638 |
| | GSP02 | 1,313 | 26,641 | 25,328 |
| ค่าเฉลี่ย | | 1,620 | 22,774 | 21,153 |

เมื่อประมาณ SEC จากสมการที่ (2.39) โดยพิจารณาร่วมกับสัดส่วนของมวลที่ได้จากตารางที่ 4.8 จะได้สัดส่วนมวลของสังกะสีเฉลี่ยต่อมวลรวมเฉลี่ยเป็น 0.071 และมวลของเหล็กเฉลี่ยต่อมวลรวมเฉลี่ยเป็น 0.929 ซึ่งทำให้ได้ค่าของ SEC ในทางทฤษฎีของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อนมีค่าเป็น 223 MJ/ton



รูปที่ 4.60 เปรียบเทียบผลการประมาณจากแบบสอบถามกับผลจากทางทฤษฎีของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีจุ่มร้อน

เมื่อนำค่า SEC ที่ได้จากการประมาณในทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบสอบถามของทั้งการผลิต HDG และ GSP จะได้ผลดังรูปที่ 4.60 ซึ่งผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถามที่ปรากฏในรูปนี้ เป็นค่า SEC อันเนื่องมาจากพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง ซึ่งถือว่าเป็นพลังงานหลักในการผลิตเพียงอย่างเดียว โดยไม่คำนึงถึงพลังงานจากไฟฟ้า และเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกับค่าในทางทฤษฎีที่คิดเฉพาะพลังงานความร้อนได้ถูกต้อง

จาก รูปที่ 4.60 ซึ่งแสดงค่า SEC ของกระบวนการเคลือบผิวแบบจุ่มร้อนที่แต่ละปริมาณการผลิต พบว่า ในการประมาณด้วยข้อมูลจากแบบสอบถาม จะมีค่า SEC ค่าหนึ่งที่มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเป็นของการผลิต HDG และถือเป็นค่า SEC ในทางปฏิบัติที่ดีที่สุด ($SEC_{Best\ practical}$) และมีค่าเป็น 577 MJ/ton โดยมีค่ามากกว่าค่า SEC ในทางทฤษฎี (SEC_{Theory}) อยู่ 354 MJ/ton

ค่าความแตกต่างหรือช่องว่างระหว่าง 2 ค่านี้ อาจเกิดมาจากพลังงานที่สูญเสียออกไปในระหว่างกระบวนการผลิต เช่น ความร้อนที่สูญเสียออกจากปากของบ่อสังกะสีหลอมเหลวในรูปของการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เป็นต้น ซึ่งค่าความแตกต่างหรือพลังงานที่สูญเสียนี้สามารถลดลงได้ด้วยเทคโนโลยีที่ได้จากการวิจัยและการพัฒนา เช่น เมื่อทราบค่า SEC ขึ้นกับอุณหภูมิของเหล็กและสังกะสีที่ใช้เคลือบผิว หากสามารถเพิ่มอุณหภูมิของทั้งสองให้สูงขึ้นก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตโดยการนำความร้อนเหลือใช้มาเพิ่มอุณหภูมิของเหล็กก่อนเข้าสู่กระบวนการเคลือบผิวหรือของสังกะสีก่อนนำไปหลอม จะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิลดลง และทำให้ค่าการใช้พลังงานลดน้อยลงได้ นอกจากนี้ อาจหาวิธีลดการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ซึ่งจะช่วยให้ลดการสูญเสียพลังงานได้อย่างมีนัยสำคัญ

4.3.4.2 กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า

กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่ไม่ค่อยพบเห็นในอุตสาหกรรมเหล็กของประเทศไทย ซึ่งวิธีการในการผลิต นอกจากมีความซับซ้อนแล้วยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ประเภทของการเคลือบหลักๆ ที่พบเห็น ได้แก่ การเคลือบผิวด้วยสังกะสี ดีบุก และโครเมียม

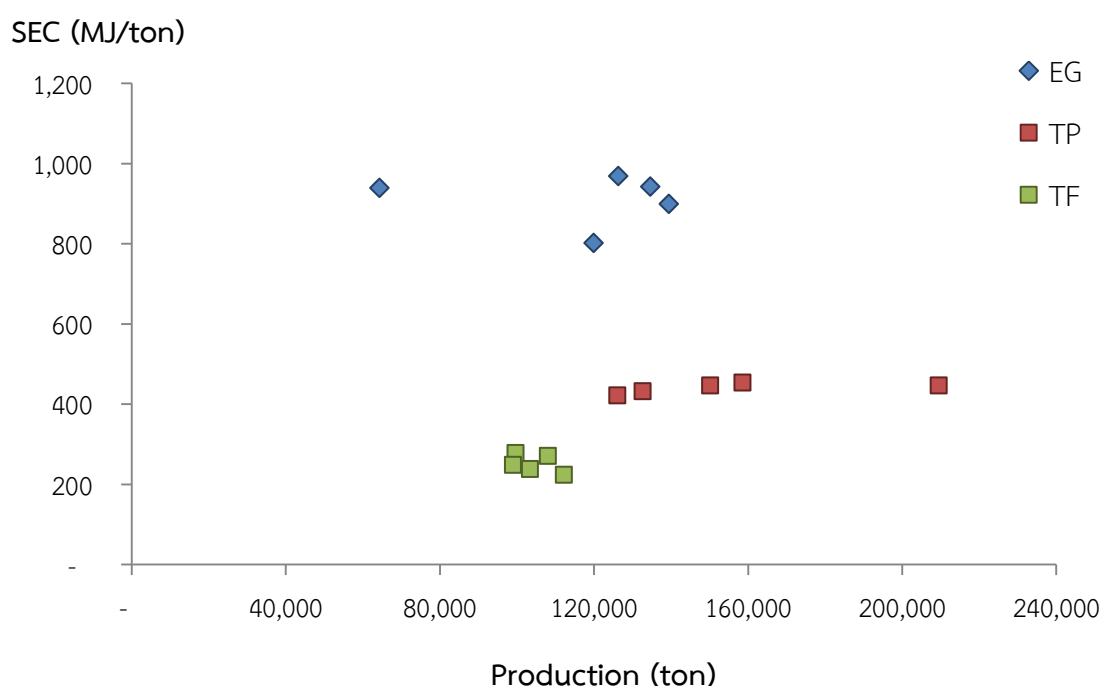
สำหรับการประมาณค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตในทางทฤษฎีจะอาศัยสมการที่ (2.56) ในการประมาณ และเมื่อพิจารณาจากสมการ จะพบว่า มีตัวแปร และค่าคงตัวที่ต้องแทนค่า ได้แก่ ค่าน้ำหนักอะตอม (AW.) จำนวนอิเล็กตรอน (n_e^-) ค่าศักย์ไฟฟ้า (V) และค่าคงที่ของฟาราเดย์ (K_F) ซึ่งสำหรับการเคลือบผิวด้วยสังกะสี ดีบุก หรือโครเมียม ตัวแปรที่จะต้องแทนค่าลงในสมการจะแตกต่างกัน ตัวแปรของการเคลือบแต่ละประเภทดังแสดงในตารางที่ 4.9

จากตัวแปรทั้งหมดที่กล่าวมา ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นตัวแปรหนึ่งที่ถูกพิจารณาเป็นพิเศษ สำหรับค่าศักย์ไฟฟ้าจากตารางจะเป็นค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นได้เองโดยธรรมชาติ ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกที่เป็นบวกมาช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ซึ่งในความเป็นจริง ค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการเคลือบสำหรับภาคอุตสาหกรรม จะเป็นความต่างศักย์ที่สูงกว่าค่าที่ระบุไว้ในตาราง แต่จะใช้ค่าความต่างศักย์เป็นเท่าใด ก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในด้านต่างๆ เพราะถ้าใช้ความต่างศักย์ยิ่งมาก เวลาที่ใช้เคลือบก็จะลดน้อยลง ในขณะที่ค่าใช้จ่ายของกระบวนการก็จะเพิ่มมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.9 มวลอะตอมและจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทต่อโมลของสังกะสี ดีบุกและโครเมียม

| ธาตุ | ตัวย่อ | น้ำหนักอะตอม AW.(g/mol) | จำนวน e^- | ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน | |
|----------|--------|----------------------------|-------------|--|---------|
| สังกะสี | Zn | 65.39 | 2 | $Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$ | -0.76 V |
| ดีบุก | Sn | 118.7 | 2 | $Sn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Sn(s)$ | -0.14 V |
| โครเมียม | Cr | 52.00 | 3 | $Cr^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Cr(s)$ | -0.74 V |

เนื่องจากกระบวนการเคลือบผิว ใช้พลังงานจากไฟฟ้าเป็นกลไกหลักในขั้นตอนการผลิต ใช้ไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดการเคลือบที่บริเวณผิวของเหล็ก แต่ในความเป็นจริง พลังงานจากไฟฟ้าบางส่วนรวมถึงพลังงานความร้อนได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตด้วย แต่เป็นการนำมาใช้ในขั้นตอนเสริม เช่น การเคลื่อนย้ายชิ้นงาน การเชื่อม การทำความสะอาดผิว เป็นต้น เพราะฉะนั้น ผลการประมาณค่า SEC ด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามดังแสดงในรูปที่ 4.61 จะเป็นผลที่พิจารณาเฉพาะพลังงานจากไฟฟ้าเท่านั้น



รูปที่ 4.61 เปรียบเทียบผลการประมาณจากแบบสอบถามกับผลจากทางทฤษฎีของกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า

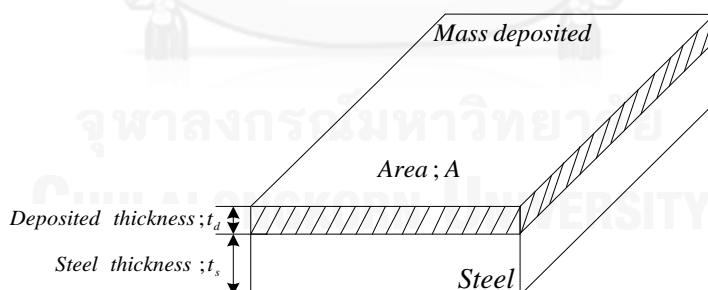
ตารางที่ 4.10 ตัวแปรที่ใช้แทนค่าและพลังงานที่คำนวณได้สำหรับการเคลือบแต่ละประเภท

| กระบวนการเคลือบ | AW. (g/mol) | n_{e^-} | V | พลังงานในการเคลือบ |
|-------------------|-------------|-----------|---------|--------------------|
| สังกะสี (Zn); EG | 65.39 | 2 | -0.76 V | 2,243 MJ/ton |
| ดีบุก (Sn); TP | 118.7 | 2 | -0.14 V | 228 MJ/ton |
| โครเมียม (Cr); TF | 52.00 | 3 | -0.74 V | 4,120 MJ/ton |

ผลการประมาณค่า SEC ในทางทฤษฎีของการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้าของสังกะสี ดิบุก และโครเมียมเป็นดังตารางที่ 4.10 ซึ่งค่า SEC ที่ได้นี้ เป็นค่าที่คิดเทียบกับมวลของสังกะสี ดิบุก หรือโครเมียมที่มาเคลือบอยู่ที่ผิว (Mass deposited; m_d) เพียงเท่านั้น ในขณะที่ผลการ ประมาณค่า SEC จากรูปที่ 4.61 เป็นการประมาณที่คิดเทียบกับมวลของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (มวลของเหล็กรวมกับโลหะที่ถูกเคลือบ) ดังนั้น การเปรียบเทียบค่าในทางทฤษฎีและค่าจาก แบบสอบถามเพื่อประเมินโอกาสในการลดการใช้พลังงานของกระบวนการนี้ ยังไม่สามารถ เปรียบเทียบได้ในทันที การเปรียบเทียบจะเป็นต้องเปลี่ยนตัวหารนั้นคือมวล ให้เป็นมวลชนิด เดียวกันก่อน โดยอาจเปลี่ยนเป็นมวลของโลหะที่นำมาเคลือบ (m_d) หรือมวลของเหล็ก (m_{steel})

การเปลี่ยนมวลของตัวหารให้เป็นมวลอย่างเดียวกันนั้น หากแบบสอบถามได้สอบถาม หรือระบุมวลของเหล็กหรือมวลของโลหะที่นำมาเคลือบอย่างชัดเจน จะทำให้การเปลี่ยนทำได้ ง่ายและรวดเร็ว แต่ข้อมูลที่ได้กลับมาจากแบบสอบถามมีความคลุมเครือ ทำให้การเปลี่ยน ตัวหารให้เป็นมวลอย่างเดียวกัน ไม่สามารถทำได้ด้วยข้อมูลจากแบบสอบถามเพียงอย่างเดียว

แนวคิดหรือวิธีการวิเคราะห์ เพื่อเปลี่ยนมวลของตัวหารให้เป็นมวลชนิดเดียวกัน อาศัยข้อมูลของผู้ประกอบการจากทางสื่อออนไลน์ของทางโรงงานหรือผู้ประกอบการ ซึ่งบอก มวลของโลหะที่นำมาเคลือบในลักษณะของ มวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (g/m^2) และเมื่อนำมาใช้ ร่วมกับหลักการที่ว่า การเคลือบผิวจะมีพื้นที่ของเหล็ก (A_{steel}) ที่ถูกเคลือบและพื้นที่ของโลหะ (A_d) ที่นำมาเคลือบเท่ากัน ดังรูปที่ 4.62 ดังนั้น พื้นที่สัมผัสของเหล็กสามารถเขียนแทนด้วย สมการที่ (4.9)



รูปที่ 4.62 ลักษณะกายภาพของชั้นเคลือบแบบด้านเดียว

$$A_d = A_s \quad (4.8)$$

$$A_s = \frac{m_s}{\rho_s \times t_s} \quad (4.9)$$

จากข้อมูลของผู้ผลิตเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้ารายหนึ่ง ซึ่งมีการผลิตเหล็กเคลือบผิวตามมาตรฐาน JIS G3313 โดยมีข้อมูลมวลของสังกะสี ($m_{d,zn}$) ที่นำมาเคลือบมากที่สุดเป็น 30 g/m^2 และใช้เหล็กซึ่งหนาที่สุด (t_s) ซึ่งหนา 2.5 mm. มาทำการเคลือบ [40] จะคำนวณพื้นที่ของแผ่นเหล็กในการเคลือบจากสมการ (4.9) ได้เท่ากับ $0.053m_s$ ตารางเมตร

ดังนั้น เมื่อมวลของสังกะสีที่นำมาเคลือบเป็น 30 กรัมต่อพื้นที่หนึ่งตารางเมตร และหากพื้นที่เป็น $0.053m_s$ ตารางเมตร เพราะฉะนั้น มวลของสังกะสี (m_d) มีค่าเท่ากับ $0.0016m_s$ กิโลกรัม หรือเขียนได้ดังสมการที่ (4.10)

$$m_d = 0.0016m_s \quad (4.10)$$

ความสัมพันธ์ที่ได้ในสมการที่ (4.10) เป็นความสัมพันธ์ที่อาศัยความหนาของเหล็กที่ถูกเคลือบและสัดส่วนของสังกะสีที่ใช้เคลือบต่อหน่วยพื้นที่ โดยค่าทั้งสองเป็นค่าจำเพาะ คือ หนา 2.5 มิลลิเมตรและสังกะสีที่ใช้เคลือบเป็น 30 กรัมต่อตารางเมตร หากข้อมูลทั้งสองเปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ของมวลทั้งสองตามสมการที่ (4.10) ก็จะเปลี่ยนไปด้วย และสำหรับการเคลือบด้วยดีบุกก็จะใช้วิธีการประมาณมวลของดีบุกที่ใช้เคลือบเช่นเดียวกับการเคลือบสังกะสี

เมื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปคำนวณย้อนกลับเพื่อหาค่า SEC_{Theory} ปรากฏว่ามีค่าเพียง 3.6 MJ/ton ในขณะที่ ค่าจากรูปที่ 4.62 มีค่า SEC จากแบบสอบถามประมาณ 900-1,000 MJ/ton โดยเมื่อพิจารณาค่า SEC จากแบบสอบถาม ค่าดังกล่าวเป็นค่าจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ ซึ่งไม่ได้มีเฉพาะส่วนของการเคลือบผิวเพียงอย่างเดียว แต่รวมไปถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนหรือส่งชิ้นงาน พลังงานไฟฟ้าในระบบหล่อเย็นหล่อระบบเป่าแห้งชิ้นงาน รวมถึงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อุ่นกรดเพื่อใช้ทำความสะอาดผิว เป็นต้น และอีกประการหนึ่ง ค่า SEC ในทางทฤษฎี อาศัยค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ ซึ่งในความเป็นจริง โรงงานจะใช้ค่าเป็นเท่าไรก็ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม ทำให้ การเปรียบเทียบค่าทั้งสองอาจไม่ถูกต้อง และไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำมาใช้งาน

ถึงแม้ว่าขั้นตอนของการเคลือบผิวจะเป็นกระบวนการหลัก ในการผลิตเหล็กแผ่นเคลือบผิว แต่การใช้พลังงานสำหรับกระบวนการหลัก อาจมีค่าน้อยกว่ากระบวนการย่อยอื่นๆ ก็เป็นไปได้ ซึ่งการยืนยันถึงสัดส่วนของการใช้พลังงานแต่ละขั้นตอนของการผลิตไม่สามารถทราบได้จากแบบสอบถามที่ส่งไป การเข้าโรงงานเพื่อตรวจวัดจริงจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

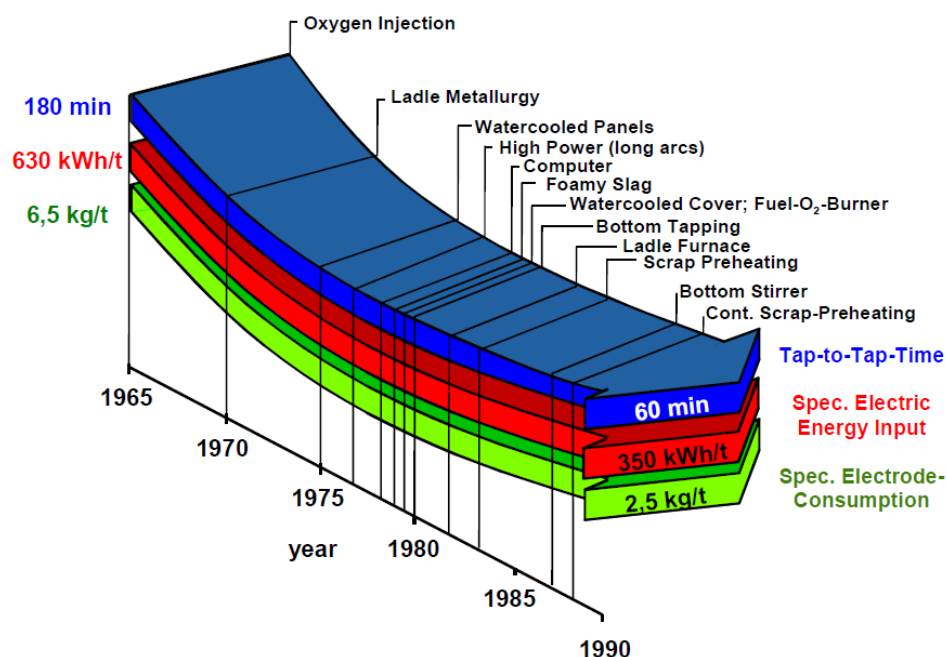
บทที่ 5

การกำหนดแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นอกจากจะนำเสนอผลการประมาณค่า SEC ของกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็ก และเปรียบเทียบกับผลของ SEC ในทางทฤษฎี ซึ่งได้แก่ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า กระบวนการอบร้อน กระบวนการรีด และกระบวนการเคลือบผิว ดังที่ได้กล่าวมาในบทก่อนหน้า และยังได้ประเมินศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตหลัก ซึ่งจะเห็นว่ากระบวนการต่างๆ มีศักยภาพหรือโอกาสในการลดการใช้พลังงานเป็นเท่าใด โดยในบทนี้จะได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน โดยมุ่งเน้นเฉพาะการปรับปรุงพลังงานความร้อน (Thermal energy) เป็นหลัก ซึ่งกระบวนการที่ได้แสดงแนวทางเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน ความร้อนจะมี 2 กระบวนการหลักคือ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า และกระบวนการอบร้อน ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

5.1 กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

การหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า เป็นที่รู้ดีว่าจะใช้พลังงานจากไฟฟ้า เป็นแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งพลังงานไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนจากการอาร์คเพื่อใช้หลอมเศษเหล็ก (Scrap) ให้หลอมละลาย การปรับปรุงและพัฒนาหรือการเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน จะมุ่งเน้นถึงการลดการใช้พลังงานจากไฟฟ้า การลดระยะเวลาในการผลิต และลดปริมาณการบริโภคแก๊สเชื้อเพลิงได้ [41] ซึ่งวิธีการหรือแนวทางในการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าได้มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ปีค.ศ.1965 โดยการฉีดออกซิเจนเข้าไปในเตาหลอม เพื่อให้ออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับธาตุต่างๆ และคายความร้อนออกมา และได้มีวิธีการต่างๆ เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักร่วมกันคือการปรับปรุงและลดการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นเอง จนเมื่อประมาณปีค.ศ.1983 วิธีการอุ่นเศษเหล็ก (Scrap preheating) ได้ถูกนำเสนอขึ้น และพัฒนาต่อเนื่องจนมาถึงวิธีการอุ่นเศษเหล็กแบบต่อเนื่อง (Cont. Scrap preheating) วิธีการต่างๆ ที่ได้ถูกคิดค้นขึ้น ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้า รวมถึงลดระยะเวลาในการผลิตลงได้ น้อยหรือมากขึ้นอยู่กับแนวทางหรือวิธีการ ตัวอย่างของวิธีการดังได้แสดงในรูปที่ 5.1 [8]



รูปที่ 5.1 พัฒนาการของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

วิธีการอุ่นเศษเหล็ก และวิธีการอุ่นเศษเหล็กแบบต่อเนื่อง ได้มีผู้คิดค้นและทดลองนำมาประยุกต์กับการหลอมเหล็ก จะเลือกใช้วิธีการใดก็ขึ้นกับความพร้อมและความเหมาะสมในด้านต่างๆ การอุ่นแต่ละแบบก็มีขั้นตอน รายละเอียด รวมถึงผลที่ได้รับจากการอุ่นที่แตกต่างกัน ดังนั้น วิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ศึกษา ออกแบบและสร้างแบบจำลอง รวมถึงพัฒนาการใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยวิธีการอุ่นเศษเหล็ก (Scrap preheating) ซึ่งมีขั้นตอนและรายละเอียดดังจะกล่าวต่อไป

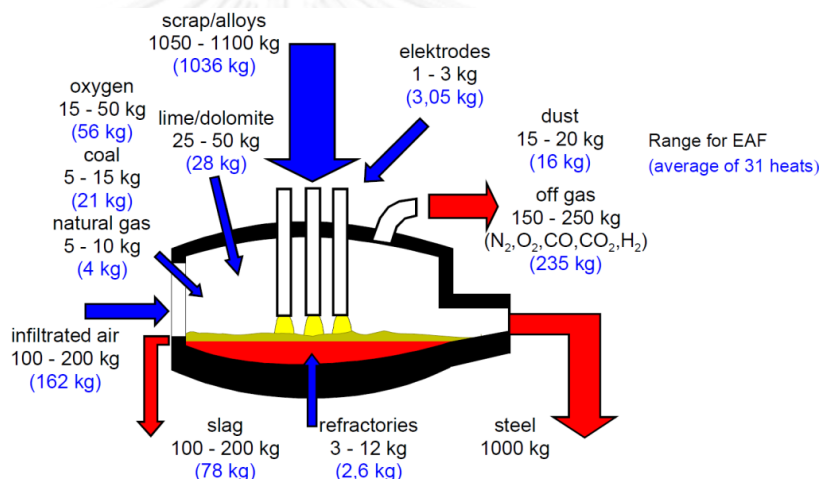
5.1.1 แนวทางในการปรับปรุงและพัฒนา

แนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาเพื่อลดการใช้พลังงานในเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า มีหลายวิธีดังที่เคยกล่าวมาแล้ว ซึ่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะเลือกวิธีนำความร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งไปกับไอเสียกลับมาใช้ใหม่โดยการนำอุ่นเศษเหล็กก่อนเข้าเตาหลอม เป็นแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนา ไอเสียซึ่งถูกปล่อยออกจากเตาหลอม จะยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่มาก สามารถนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ก่อนปล่อยออกสู่ภายนอกได้

ขั้นตอนของการวิเคราะห์ ลำดับแรกจะต้องหาปริมาณของไอเสีย (Mass flow rate) ที่ถูกปล่อยออกจากเตาหลอม โดยใช้สมมูลมวลที่ไหลเข้าและออกจากไอเสีย รวมถึงวิเคราะห์หาพลังงานที่ไหลเข้าออกจากระบบด้วยสมมูลพลังงาน จากนั้นจะเป็นขั้นตอนของการวิเคราะห์การนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่โดยการอุ่น ซึ่งอาศัยหลักการของการถ่ายเทความร้อน สุดท้ายเป็นขั้นตอนของการเปรียบเทียบผลที่ได้ ตลอดจนผลของการประหยัดพลังงาน

5.1.2 สมดุลมวล

การพิจารณาสมดุลมวล หรือมวลของสารที่ไหลเข้าและออกจากระบบของเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า โดยทั่วไปมักเป็นสิ่งที่ไม่มีตัวเลขหรือค่าของปริมาณของมวลสารแต่ละชนิดที่แน่นอน โรงงานแต่ละโรงก็จะมีวิธีการหลอมรวมถึงชนิดและปริมาณของสารที่ใช้แตกต่างกันไป ทำให้ผลิตภัณฑ์จากการหลอมที่ได้แตกต่างกันด้วย ซึ่งการวิเคราะห์หาปริมาณของมวลสารนั้นทำได้ยาก ดังนั้น ในการประมาณมวลสารที่ไหลเข้าและออกในการหลอมเหล็กจำนวน 1 ตัน จะอาศัยข้อมูลเบื้องต้นจากบทความของ H. Pfeifer และ M. Kirschen [8] ที่ได้กำหนดปริมาณมวลของสารแต่ละชนิดในการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมขนาด 100 ตัน ซึ่งปริมาณดังกล่าวได้จากการเฉลี่ยข้อมูลทั้งหมด 31 รอบการผลิต และมีรายละเอียดดังรูปที่ 5.2 [8]



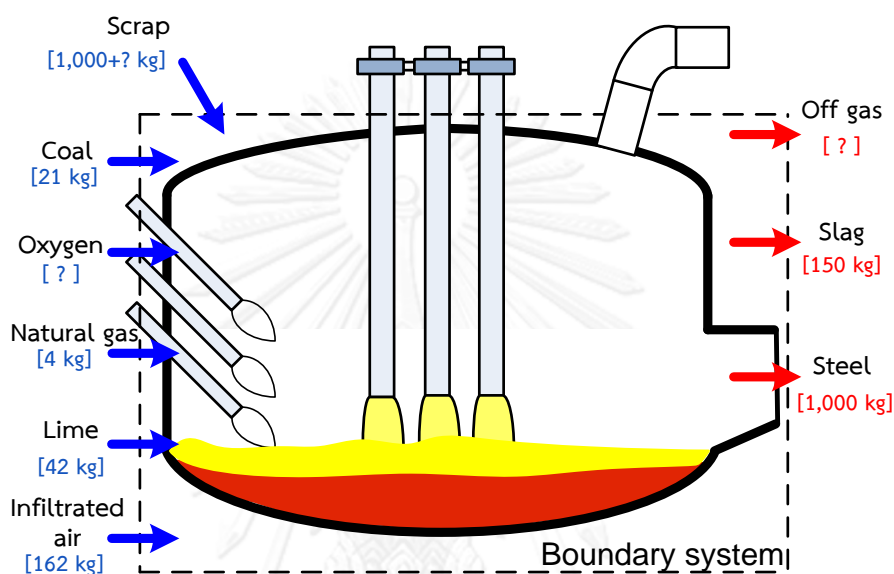
รูปที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยของมวลสารทั้ง 31 รอบการผลิตของเตาหลอมขนาด 100 ตัน

ดังจะเห็นได้จากบทความของ H. Pfeifer และ M. Kirschen ว่ามวลสารที่ไหลเข้าและออกจากเตาหลอมมีอะไรและปริมาณเท่าใด ซึ่งสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้ข้อมูลของ H. Pfeifer และ M. Kirschen เป็นแนวทางในการประมาณสมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในการหลอมเศษเหล็กจำนวน 1 ตัน โดยลูกศรสีน้ำเงินด้านซ้ายมือของรูปที่ 5.3 แสดงมวลที่ไหลเข้าสู่เตาหลอม ในขณะที่ลูกศรสีแดงด้านขวามือของรูปเดียวกัน แสดงมวลที่ไหลออกจากเตาหลอม

ในการวิเคราะห์สมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า มวลของสารจะถูกแบ่งออกเป็น

- (1) ชนิดและปริมาณของมวลสารที่ต้องกำหนดขึ้น
- (2) ชนิดและปริมาณของมวลสารที่ต้องคำนวณหา

ชนิดและปริมาณของมวลสารที่ต้องกำหนดขึ้นก่อน ได้แก่ มวลของเศษเหล็ก (Scrap) มวลของผงถ่าน (Coal) มวลของก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) มวลของปูนขาว (Lime) และ มวลของอากาศ (Infiltration air) จะถูกระบุไว้ในรูปที่ 5.3 ในขณะที่ มวลสารที่ต้องคำนวณหา ได้แก่ มวลของออกซิเจน (Extra oxygen) ซึ่งเป็นออกซิเจนคนละส่วนกับออกซิเจนในอากาศ และปริมาณมวลของไอเสีย (Off gas) ที่ไหลออกจากเตาหลอมด้วย



รูปที่ 5.3 ชนิดและปริมาณมวลสารที่ไหลเข้าและออกจากเตาหลอมสำหรับวิทยานิพนธ์นี้

สมมติฐานที่จำเป็นในการคำนวณสมดุลมวล

1. ระบบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Boundary system) เป็นดังรูปที่ 5.3
2. การหลอมเป็นแบบต่อเนื่อง
3. เศษเหล็ก ประกอบด้วยธาตุ Fe เพียงอย่างเดียว โดยละเว้นมลทินและธาตุอื่นๆ
4. เศษเหล็ก 1,000 kg ถูกหลอมกลายเป็นเหล็ก 1,000 kg และสแลก 150 kg
5. ก๊าซธรรมชาติที่ใช้มีองค์ประกอบทางเคมี คือ มีเทน (CH_4) 100%
6. อากาศที่ใช้เผาไหม้ประกอบด้วยก๊าซออกซิเจน 21% และก๊าซไนโตรเจน 79%
7. การเผาไหม้ที่เกิดขึ้น เป็นการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ เพราะฉะนั้น จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นองค์ประกอบหนึ่งของไอเสีย
8. ไม่มีการรั่วไหลของเตาหลอม ดังนั้น ไม่มีมวลสารอื่นใด นอกเหนือจากที่กล่าวมา ไหลเข้าหรือไหลออกจากระบบ

ตารางที่ 5.1 มวลและจำนวนโมลของสารที่ใส่เข้าระบบโดยประมาณ

| Input | mass [kg] | MW [kg/kmol] | mole [kmol] |
|---------|-------------------------|-----------------|------------------|
| Scrap | Fe 1000+? | 55.845 | n_{Fe} 17.91 |
| Scrap | Fe 84 | 55.845 | n_{Fe} 1.50 |
| Oxygen | O_2 ? | 31.999 | n_{O_2} ? |
| Lime | CaO 42 | 56.077 | n_{CaO} 0.75 |
| Methane | CH_4 4 | 16.043 | n_{CH_4} 0.25 |
| Coal | C 21 | 12.011 | n_C 1.75 |
| Oxygen | $extra\ O_2$? | 31.999 | n_{extraO_2} ? |
| Air | $0.21O_2 + 0.79N_2$ 162 | 28.97 | n_{Air} 5.59 |

จากรูปที่ 5.3 และ ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณของมวลสารบางส่วนที่ต้องกำหนดขึ้น เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณหามวลของสารในส่วนที่เหลือ ซึ่งจะเห็นว่า มวลของไอเสีย และมวลของออกซิเจน (Extra oxygen) เป็นมวลของสารที่ต้องคำนวณ

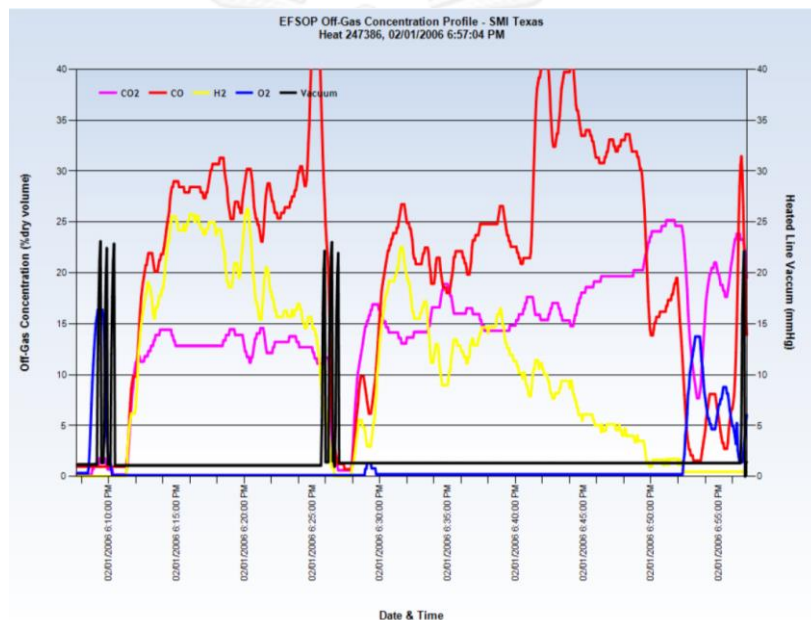
การพิจารณามวลของไอเสีย (Off gas) จำเป็นต้องทราบสมการการเผาไหม้ของระบบ การพิจารณาสมการการเผาไหม้ของระบบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.3 การพิจารณาสมการการเผาไหม้

ในการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า นอกจากไฟฟ้าจะเป็นพลังงานหลักในการหลอมแล้ว พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ก็เป็นพลังงานหนึ่งซึ่งช่วยให้การหลอมเกิดได้รวดเร็ว ซึ่งสำหรับการเผาไหม้ จากสมมติฐานที่กล่าวมา เชื้อเพลิงหลักที่ใช้ คือ ก๊าซธรรมชาติ และมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยมีเทน (CH_4) 100%

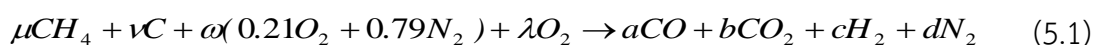
งานวิจัยต่างๆ ส่วนใหญ่จะวิเคราะห์กระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้เป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้จึงไม่มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้น แต่ในความเป็นจริง การเผาไหม้ที่เกิดในเตาหลอมมักจะเป็นการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์และมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในไอเสียที่ถูกปล่อยออกจากเตาหลอม โดยปริมาณ CO ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีมากหรือน้อยแตกต่างกันไปตามปริมาณของก๊าซออกซิเจนในแต่ละสถานะของการหลอม กล่าวคือ ก๊าซออกซิเจนที่ใช้ในการเผาไหม้ นอกจากจะใช้ก๊าซออกซิเจนในอากาศแล้ว กระบวนการเผาไหม้โดยส่วนใหญ่จะมี

การพ่นก๊าซออกซิเจนเพิ่มเติมเข้าไปในเตาหลอม (Oxygen lance) และนอกจากก๊าซออกซิเจน จะถูกใช้ในกระบวนการเผาไหม้แล้ว ก๊าซออกซิเจนยังถูกใช้ในอีกหลายกระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาหลอม ซึ่งพบว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยาภายในเตาหลอมมีหลายปฏิกิริยาและมีความซับซ้อน ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้จึงตั้งสมมติฐานให้การเผาไหม้ในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ และมีปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นเป็น 2 เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตามเอกสารอ้างอิง [42] ที่ได้นำเสนอผลการตรวจวัดของปริมาณก๊าซต่างๆ ในไอเสียที่สภาวะต่างๆ และพบว่า มีสภาวะหนึ่งที่ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดขึ้นเป็น 2 เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ

สำหรับสมการการเผาไหม้ เป็นสมการเคมีซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาการรวมตัวกันของสารตั้งต้น คือ เชื้อเพลิงกับอากาศ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่สำหรับการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของออกซิเจนในสารตั้งต้นไม่เพียงพอต่อการรวมตัวกับเชื้อเพลิง จะเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ ดังนั้น สมการการเผาไหม้ของการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ในกระบวนการหลอมนี้ถูกเขียนแทนด้วยสมการที่ (5.1)



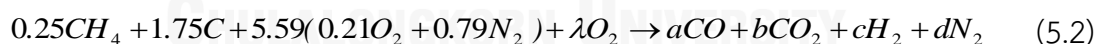
ฝั่งขวาและฝั่งซ้ายของสมการที่ (5.1) คือ สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ตามลำดับ ตัวแปรต่างๆ ที่อยู่หน้าสารแต่ละตัวคือ จำนวนโมลของสารนั้นๆ สารตั้งต้นของกระบวนการเผาไหม้หลักๆ ประกอบด้วย เชื้อเพลิง (มีเทน) อากาศ รวมถึง ผงคาร์บอน (C) ที่ฉีดยังหรือพ่นเข้าไปในเตาหลอม (Carbon lance) การพ่นผงคาร์บอน มีวัตถุประสงค์เพื่อให้คาร์บอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นโพลอยอยู่เหนือน้ำเหล็ก ทำให้ลดการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กสู่อากาศด้านบนได้ และผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไฮโดรเจน

ขั้นตอนแรกในการหาสมการการเผาไหม้ คือ การพิจารณาหาจำนวนโมลของทั้งสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ โดยจำนวนโมลของสารตั้งต้น หาได้จากปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้จริงในปฏิกิริยา ดังได้แสดงในตารางที่ 5.1 เพราะฉะนั้น จำนวนโมลของสารตั้งต้นทั้ง 3 ตัวแรกสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 จำนวนโมลของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาการเผาไหม้

| สารตั้งต้น | ตัวแปร | ปริมาณ [kg] | จำนวนโมล [kmol] |
|---------------------|----------|-------------|-----------------|
| CH_4 | μ | 4 | 0.25 |
| C | ν | 21 | 1.75 |
| $0.21O_2 + 0.79N_2$ | ω | 162 | 5.59 |

แทนค่า จำนวนโมลของสารตั้งต้นทั้งสามตัวจากตารางที่ 5.2 ลงในสมการที่ (5.1) จะได้ว่า



จากสมการ (5.2) จะสามารถคำนวณหาค่าของตัวแปร a , b , c และ d ได้โดยการแก้สมการ และเมื่อจำนวนโมลของ H_2 และ N_2 จากฝั่งซ้ายต้องเท่ากับฝั่งขวาของสมการ

$$\text{Hydrogen; } 0.25 \times 4 = 2c \Rightarrow c = 0.5$$

$$\text{Nitrogen; } 5.59 \times 0.79 \times 2 = 2d \Rightarrow d = 4.42$$

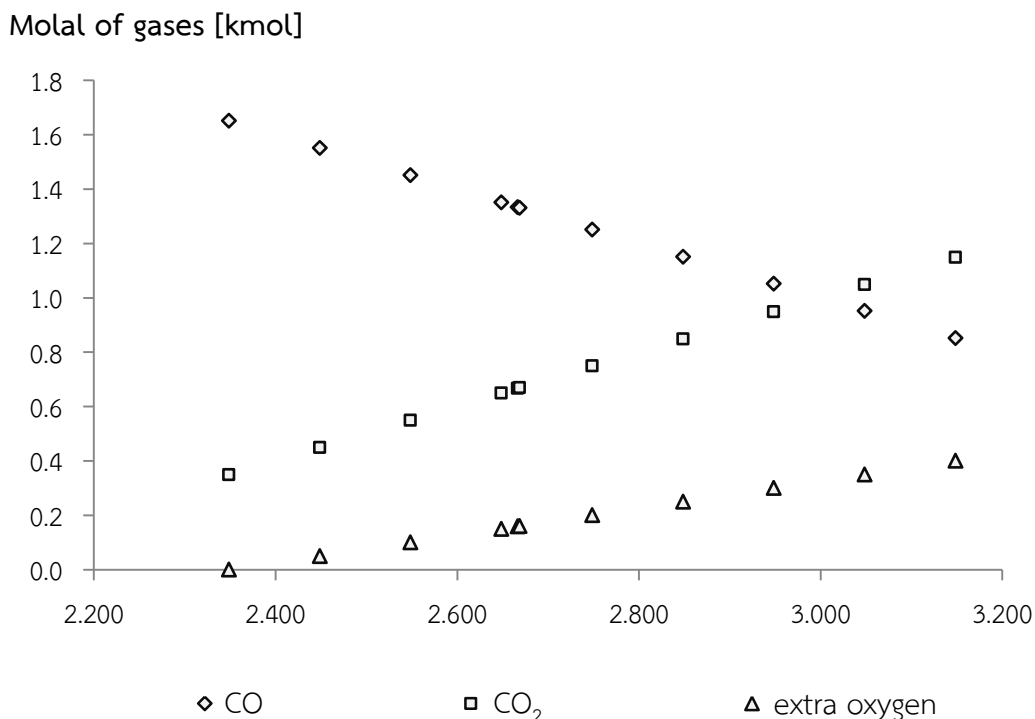
$$\text{Carbon; } 0.25 + 1.75 = a + b \quad (5.3)$$

$$\text{Oxygen; } 5.59 \times 0.21 \times 2 + \lambda \times 2 = a + 2b \quad (5.4)$$

จากสมการที่ (5.3) และ (5.4) จะพบว่า มี 3 ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า แต่มีเพียง 2 สมการ ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ค่าของตัวแปร λ ที่ปรากฏในสมการที่ (5.4) ส่งผลต่อค่าของ a และ b ดังนั้น จะใช้วิธีแทนค่าเพื่อให้ได้ปริมาณสัดส่วนของ CO ต่อ CO_2 เป็น 2 เท่า ผลของการแทนค่าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.5

ตารางที่ 5.3 ปริมาณ *extra* O_2 (λ), CO และ CO_2

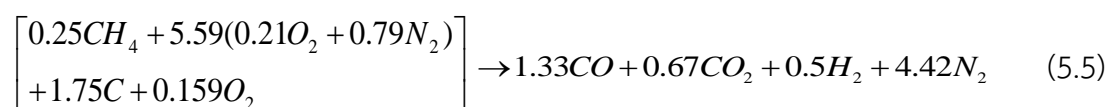
| extra O_2 (λ) [kmol] | [O_2] in Air [kmol] | Total O_2 content [kmol] | [CO] a | [CO_2] b | [a/b] |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------|-------------------|--------------|
| 0.000 | 2.349 | 2.349 | 1.651 | 0.349 | 4.737 |
| 0.050 | 2.349 | 2.449 | 1.551 | 0.449 | 3.458 |
| 0.100 | 2.349 | 2.549 | 1.451 | 0.549 | 2.645 |
| 0.150 | 2.349 | 2.649 | 1.351 | 0.649 | 2.083 |
| 0.159 | 2.349 | 2.667 | 1.333 | 0.667 | 2.000 |
| 0.160 | 2.349 | 2.669 | 1.331 | 0.669 | 1.991 |
| 0.200 | 2.349 | 2.749 | 1.251 | 0.749 | 1.672 |
| 0.250 | 2.349 | 2.849 | 1.151 | 0.849 | 1.357 |
| 0.300 | 2.349 | 2.949 | 1.051 | 0.949 | 1.108 |
| 0.350 | 2.349 | 3.049 | 0.951 | 1.049 | 0.907 |
| 0.400 | 2.349 | 3.149 | 0.851 | 1.149 | 0.741 |



รูปที่ 5.5 อิทธิพลของปริมาณ extra Oxygen (λ) ที่มีผลต่อปริมาณ CO และ CO_2

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นถึงแนวโน้มของปริมาณ extra Oxygen ที่มีผลต่อปริมาณของ CO และ CO_2 กล่าวคือ เมื่อออกซิเจนที่ใส่เข้าไปในระบบ เมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ย่อมทำให้การเผาไหม้เข้าใกล้การเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งดูได้จากปริมาณ CO ที่ลดลง

และจากที่ได้กล่าวมา ในการพิจารณาหาค่าของตัวแปรทั้ง 3 ตัว จะใช้เงื่อนไขที่ว่า ปริมาณของ CO เกิดขึ้นเป็น 2 เท่าของปริมาณ CO_2 ดังนั้น จากตารางที่ 5.3 จะได้ว่าค่าของ $a = 1.33$, $b = 0.67$ และ $\lambda = 0.159$ เพราะฉะนั้น สมการการเผาไหม้สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5.5)

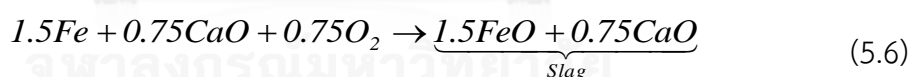


จากสมการที่ (5.5) จะสามารถคำนวณหามวลสารที่ใส่เข้าและไหลออกจากระบบ ซึ่งเกิดขึ้นจากการเผาไหม้เท่านั้น แต่ในความเป็นจริง กระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า ยังมีอีกกระบวนการหนึ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน นั่นก็คือ กระบวนการเกิดสแลก (Slag formation)

กระบวนการเกิดสแลก เป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของเหล็กและออกซิเจน เป็นโลหะออกไซด์ชนิดหนึ่ง ในความเป็นจริง ตัวของสแลกจะมีทั้งประโยชน์และไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ สารสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสแลกในที่นี้มี 3 ตัวด้วยกัน คือ เหล็ก (*Fe*) ออกซิเจน (*O₂*) และหินปูน (*CaO*)

ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (*CaO*) ซึ่งได้มาจากหินปูนที่ใส่เข้าไป มีปริมาณทั้งสิ้น 42 กิโลกรัม คิดเป็น 0.75 กิโลโมล ปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่ใส่เข้าไปให้ระบบเท่าใด จะถือว่าออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เท่านั้น สำหรับเหล็กเมื่อทำปฏิกิริยากับกาซออกซิเจนจะเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ (*FeO*) ซึ่งสารประกอบของเหล็กออกไซด์และแคลเซียมออกไซด์ ก็คือ สแลก ในอีกลักษณะหนึ่ง

ปริมาณของสแลกที่เกิดขึ้นจากการหลอมเหล็ก จะกำหนดให้สอดคล้องกับงานวิจัยของ H. Pfeifer และ M. Kirschen โดยมีสมมติฐานอยู่ว่า ปริมาณสแลกที่เกิดขึ้นมีจำนวน 150 กิโลกรัม และเมื่อมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นอยู่แล้วจำนวน 42 กิโลกรัม ดังนั้น ปริมาณของเหล็กออกไซด์จึงเกิดขึ้นเท่ากับ 108 กิโลกรัม หรือคิดเป็น 1.50 กิโลโมล ดังนั้น สมการของการเกิดสแลกสามารถเขียนเป็นปฏิกิริยาในการรวมตัวได้ดังสมการที่ (5.6)

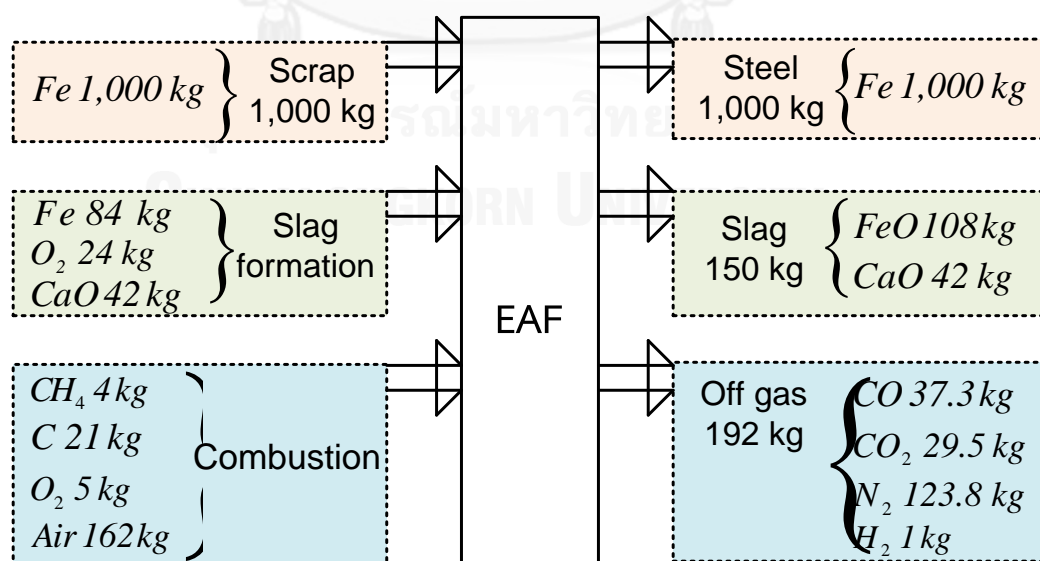


จากสมการที่ (5.6) จะพบว่าในการรวมตัวเกิดเป็นสแลกนั้น ต้องดึงเอาออกซิเจนเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาจำนวน 0.75 กิโลโมล หรือคิดเป็น 24 กิโลกรัม

ดังนั้น เมื่อพิจารณามวลสารที่ไหลเข้าและไหลออกจากระบบทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.4 และ รูปที่ 5.6

ตารางที่ 5.4 สมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของการหลอมเหล็ก 1 ตัน

| Mass Input | | | Mass Output | | |
|------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------|
| mass [kg] | MW [kg / kmol] | mole [kmol] | mass [kg] | MW [kg / kmol] | mole [kmol] |
| Fe 1000 | 55.845 | n_{Fe} 17.91 | Fe 1000 | 55.845 | n_{Fe} 17.91 |
| Fe 84 | 55.845 | n_{Fe} 1.50 | FeO 108 | 71.844 | n_{FeO} 1.50 |
| O ₂ 24 | 31.999 | n_{O_2} 0.75 | CaO 42 | 56.077 | n_{CaO} 0.75 |
| CaO 42 | 56.077 | n_{CaO} 0.75 | CO 37.25 | 28.01 | n_{CO} 1.33 |
| CH ₄ 4 | 16.043 | n_{CH_4} 0.25 | CO ₂ 29.49 | 44.01 | n_{CO_2} 0.67 |
| C 21 | 12.011 | n_C 1.75 | N ₂ 123.82 | 28.013 | n_{N_2} 4.42 |
| extra O ₂ 5.09 | 31.999 | n_{O_2} 0.159 | H ₂ 1.01 | 2.016 | n_{H_2} 0.5 |
| Air 162 | 28.97 | n_{Air} 5.59 | | | |
| Total 1,342 | | | Total 1,342 | | |



รูปที่ 5.6 สมดุลมวลของการหลอมเหล็กจำนวน 1 ตัน

5.1.4 สมดุลพลังงาน

ในกระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า อาจกล่าวได้ว่า พลังงานหลักที่ถูกใช้เพื่อหลอมเศษเหล็กคือ พลังงานไฟฟ้า แต่เตาหลอมสมัยใหม่ มีการใช้พลังงานทางเลือก เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเตาหลอมให้สูงมากขึ้น ตัวอย่างของพลังงานทางเลือกดังกล่าว ได้แก่ พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ รวมถึงพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาเคมี เป็นต้น ในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานหรือสมดุลความร้อน วัตถุประสงค์หลักคือ ต้องการทราบปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องการ โดยอาศัยการคำนวณจากหลักการที่ว่า พลังงานที่ใส่เข้าต้องเท่ากับพลังงานที่ได้ออกมาจากระบบ

อย่างที่ได้อธิบายมาแล้วว่า พลังงานที่เกิดขึ้นในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามีความซับซ้อนสูงมาก และเกิดปฏิกิริยาต่างๆ มากมายภายในเตาหลอม ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จะเลือกเฉพาะกระบวนการหรือปฏิกิริยาหลักๆ มาใช้ในการคำนวณ

ในเตาหลอมสมัยใหม่ จะใส่เชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ภายในและปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมา เพราะฉะนั้น พลังงานในส่วนนี้คือ พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ (Combustion) หรือค่าเอนทัลปีของการเผาไหม้ (Enthalpy of combustion)

เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่ง และค่าเอนทัลปีของปฏิกิริยาก็เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับสถานะของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ โดยหลักการแล้วจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าสถานะมาตรฐาน (Standard state) ของระบบขึ้น ซึ่งก็คือสถานะที่ ความดัน 1 บรรยากาศ และที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งค่าเอนทัลปีมาตรฐานของปฏิกิริยา คือ การเปลี่ยนแปลงค่าเอนทัลปีของระบบเมื่อสารตั้งต้นที่สถานะมาตรฐานเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์อย่างสมบูรณ์ที่สถานะมาตรฐาน แต่ในความเป็นจริง ค่าเอนทัลปีสมบูรณ์ เป็นค่าที่ไม่สามารถทราบได้ จึงอาศัยหลักการที่ว่า สารตั้งต้นแตกตัวไปเป็นธาตุก่อน และผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการรวมตัวกันของธาตุนั้นอีกต่อหนึ่ง ถูกเรียกได้ว่าเป็น ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของการเกิด (Standard enthalpy of formation, $h_{\text{Reaction}}^{\circ}$) [7] หรือก็คือ ค่าผลต่างของเอนทัลปีมาตรฐานต่อโมลของผลิตภัณฑ์ และ สารตั้งต้น เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$h_{\text{Reaction}}^{\circ} = \sum n h_{f, \text{Products}}^{\circ} - \sum n h_{f, \text{Reactants}}^{\circ} \quad (5.7)$$

ค่าเอนทัลปีมาตรฐานของธาตุบริสุทธิ์มีค่าเป็นศูนย์ เพราะจะใช้ธาตุเป็นค่าอ้างอิง ซึ่งสารประกอบที่มีค่าเอนทัลปีมาตรฐานเป็นลบ แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ในขณะที่สารประกอบที่มีค่าเอนทัลปีมาตรฐานเป็นบวก แสดงว่าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction)

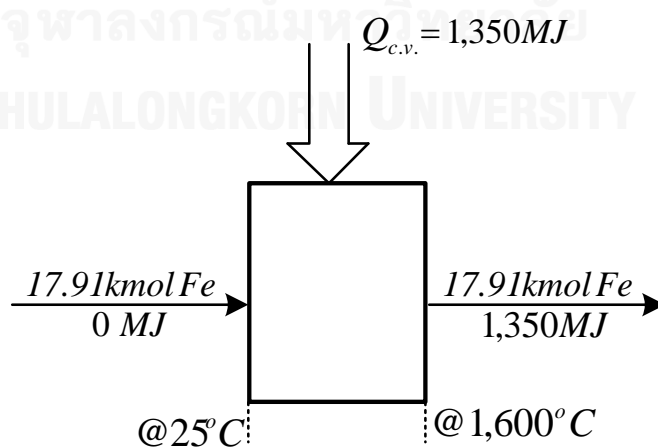
ในกระบวนการเผาไหม้ แม้เชื้อเพลิงและอากาศจะเข้าทำปฏิกิริยากันที่สภาวะมาตรฐาน แต่ในกระบวนการก็จะมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง เพราะฉะนั้น ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ จึงไม่ได้อยู่ที่สภาวะมาตรฐาน โดยค่าเอนทัลปีของการเกิดที่อุณหภูมิและความดันใดๆ (h_f) สามารถหาได้จากสมการที่ (5.8)

$$h_f = h_f^\circ + \Delta h \quad (5.8)$$

เมื่อ h_f° คือ ค่าเอนทัลปีที่สภาวะมาตรฐาน

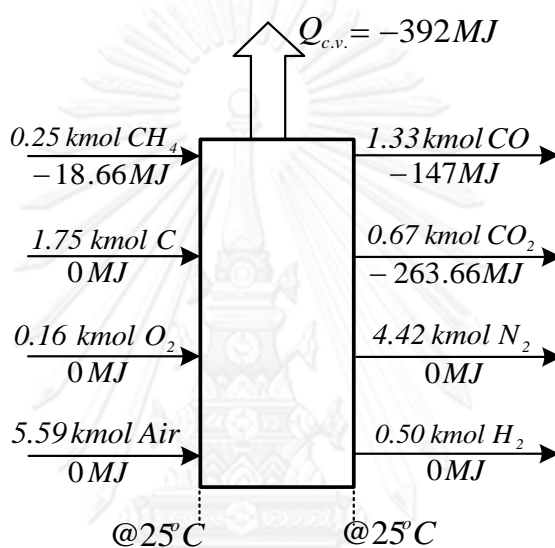
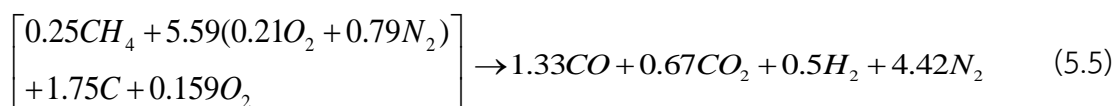
Δh คือ ค่าผลต่างของเอนทัลปีที่อุณหภูมิและความดันใดๆ กับสภาวะมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาเอนทัลปีของการหลอมเหล็ก เหล็กจะถูกให้ความร้อนจนทำให้มีอุณหภูมิสูงจนถึงจุดหลอมเหลว จากนั้นให้ความร้อนต่อจนเหล็กเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และให้ความร้อนต่อจนถึงจุดที่ต้องการ นั่นคือ ที่อุณหภูมิ $1,600^\circ\text{C}$ เขียนเป็นแผนภาพพลังงานได้ดังรูปที่ 5.7

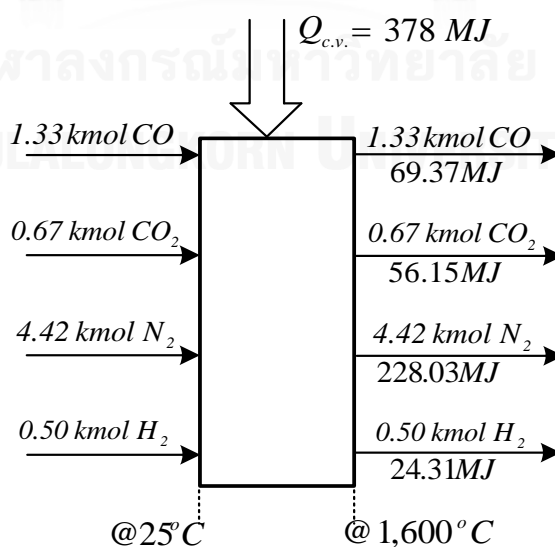


รูปที่ 5.7 พลังงานที่ถูกถ่ายเทให้กับเหล็กเพื่อทำให้เหล็กมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง $1,600^\circ\text{C}$

สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะยกเอาสมการที่ (5.5) มาพิจารณา พบว่า ค่าเอนทัลปีของการเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ จะได้ผลดังตารางที่ 5.5 และผลจากตาราง สามารถเขียนสรุปเป็นแผนภาพพลังงานได้ดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 พลังงานที่คายออกมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้



รูปที่ 5.9 พลังงานที่ระบบถ่ายเทให้กับไอเสียที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้

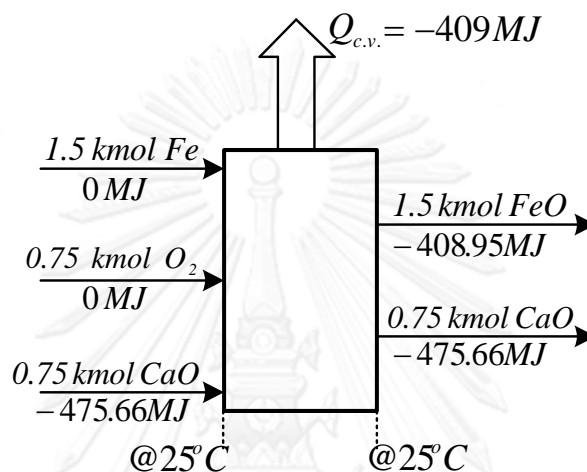
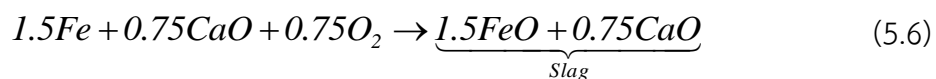
ตารางที่ 5.5 สมดุลพลังงานของกระบวนการเผาไหม้

| Input | | n [kmol] | $h_{f,R}^o$ [kJ/mol] | $nh_{f,R}^o$ [MJ] | | |
|--------|--|---------------|-------------------------|----------------------|---|--|
| | CH ₄ | 0.25 | -74.85 | -18.66 | | |
| | C | 1.75 | 0 | 0 | | |
| | extra O ₂ | 0.16 | 0 | 0 | | |
| | Air (0.21O ₂ +0.79N ₂) | 5.59 | 0 | 0 | | |
| Output | | n [kmol] | $h_{f,P}^o$ [kJ/mol] | $nh_{f,P}^o$ [MJ] | $\Delta h_{P@1,600^{\circ}C}$ [kJ/mol] | $n\Delta h_{P@1,600^{\circ}C}$ [MJ] |
| | CO | 1.33 | -110.53 | -147.00 | 52.16 | 69.37 |
| | CO ₂ | 0.67 | -393.52 | -263.66 | 83.81 | 56.15 |
| | N ₂ | 4.42 | 0 | 0 | 51.59 | 228.03 |
| | H ₂ | 0.50 | 0 | 0 | 48.62 | 24.31 |

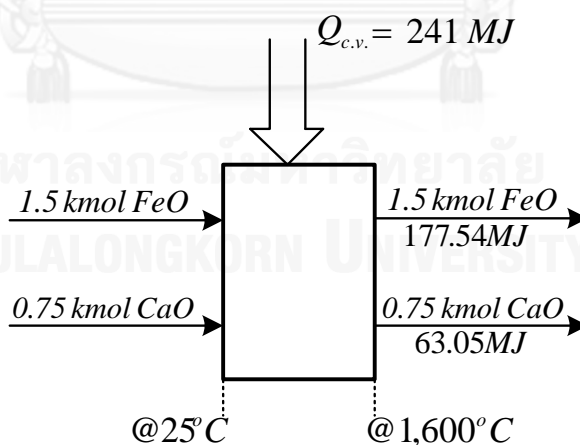
นอกจากนี้ สำหรับปฏิกิริยาการเกิดสแลกที่เกิดขึ้นในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อสมดุลมวล จะยกเอาสมการที่ (5.6) และเมื่อพิจารณาค่าเอนทัลปีของการเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสแลก จะได้ผลดังตารางที่ 5.6 และรูปที่ 5.10

ตารางที่ 5.6 สมดุลพลังงานของกระบวนการเกิดสแลก

| Input | | n [kmol] | $h_{f,R}^o$ [kJ/mol] | $nh_{f,R}^o$ [MJ] | | |
|--------|----------------|---------------|-------------------------|----------------------|---|--|
| | Fe | 1.50 | 0 | 0 | | |
| | O ₂ | 0.75 | 0 | 0 | | |
| | CaO | 0.75 | -635.09 | -475.66 | | |
| Output | | n [kmol] | $h_{f,P}^o$ [kJ/mol] | $nh_{f,P}^o$ [MJ] | $\Delta h_{P@1,600^{\circ}C}$ [kJ/mol] | $n\Delta h_{P@1,600^{\circ}C}$ [MJ] |
| | FeO | 1.50 | -272.04 | -408.95 | 118.357 | 177.54 |
| | CaO | 0.75 | -635.09 | -475.66 | 84.075 | 63.05 |



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.10 (ก) พลังงานที่ถ่ายเทให้กับระบบจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของการเกิดสแลก และ (ข) พลังงานที่ระบบถ่ายเทให้กับสแลกเพื่อทำให้สแลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ตารางที่ 5.7 พลังงานที่ใส่ให้กับระบบที่อุณหภูมิ 25°C

| Input | n [kmol] | h_f^o [kJ/mol] | nh_f^o [MJ] | Δh_s | L | Δh_l | $\sum \Delta h^{**}$ | $n\Delta h$ [MJ] | Energy [MJ] |
|----------------------|---------------|---------------------|------------------|--------------|-----|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | | | | [kJ/mol] | | | | | |
| Fe | 17.91 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 ^a |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| O ₂ | 0.75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| CaO | 0.75 | -635.09 | -475.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -475.7 ^b |
| CH ₄ | 0.25 | -74.85 | -18.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -18.7 ^c |
| C | 1.75 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| extra O ₂ | 0.16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Air | 5.59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

total -494.4

$$** \sum \Delta h = \Delta h_s + L + \Delta h_l$$

Categories

| | |
|-----------------|------------|
| XX ^a | Steel |
| XX ^b | Oxidation |
| XX ^c | Combustion |

ตารางที่ 5.8 พลังงานที่ออกจากระบบที่ 1,600 °C

| Output | n [kmol] | h_f° [kJ/mol] | nh_f° [MJ] | | Δh_s | L | Δh_l | $\sum \Delta h^{**}$ | $n\Delta h$ [MJ] | Energy [MJ] |
|-----------------|---------------|-------------------------|----------------------|--------------|--------------|------|--------------|----------------------|---------------------|----------------|
| | | | | | [kJ/mol] | | | | | |
| Fe | 17.91 | 0 | 0.0 | 0 | 49.5 | 12.0 | 13.5 | 75.4 | 1350.3 | 1350.3 |
| FeO | 1.50 | -272.0 | -409.0 | ^b | 79.1 | 22.5 | 16.8 | 118.4 | 177.5 | -231.0 |
| CaO | 0.75 | -635.1 | -475.7 | -884.6 | 84.1 | - | - | 84.1 | 63.1 | -412.7 |
| CO | 1.33 | -110.5 | -147.0 | ^c | - | - | 52.2 | 52.2 | 69.4 | -77.6 |
| CO ₂ | 0.67 | -393.5 | -263.7 | | - | - | 83.8 | 83.8 | 56.2 | -207.5 |
| N ₂ | 4.42 | 0 | 0.0 | | - | - | 51.6 | 51.6 | 228.0 | 228.0 |
| H ₂ | 0.50 | 0 | 0.0 | | - | - | 48.6 | 48.6 | 24.3 | 24.3 |
| | | | | | | | | | total | 673.8 |

$$** \sum \Delta h = \Delta h_s + L + \Delta h_l$$

Categories

| | |
|-----------------|------------|
| XX ^a | Steel |
| XX ^b | Oxidation |
| XX ^d | Slag |
| XX ^c | Combustion |
| XX ^e | Off gas |

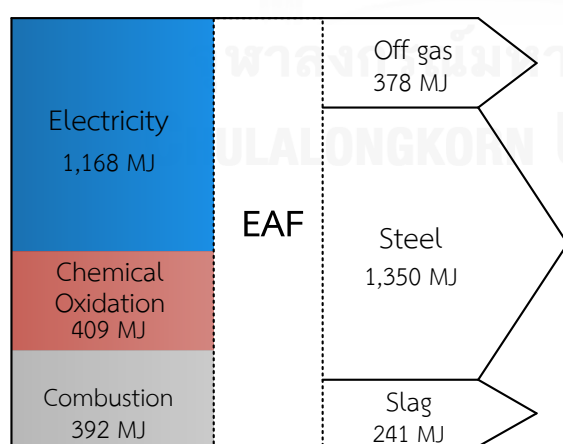
จากตารางที่ 5.7 และตารางที่ 5.8 เมื่อประยุกต์กฎข้อที่ 1 ทางอุณหพลศาสตร์โดยไม่มีกระแสความร้อนอื่นใดให้กับระบบ เพื่อหาปริมาณงานจากกระแสไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าที่ต้องให้กับระบบ จากสมการ (5.10)

$$Q - W = \sum n h_{f, Products}^o - \sum n h_{f, Reactants}^o \quad (5.9)$$

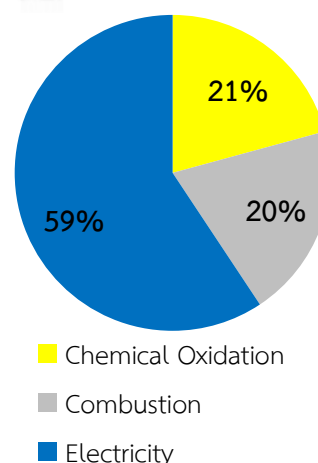
$$-W = \sum n_e (h_f^o + \Delta h)_e - \sum n_i (h_f^o + \Delta h)_i \quad (5.10)$$

แทนค่าพลังงานขาออก (Output energy) และพลังงานขาเข้า (Input Energy) ลงในสมการที่ (5.10) จะได้ว่า $-W = 673.81 - (-494.33) = 1,168 \text{ MJ}$ ดังนั้น ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ระบบต้องการ มีค่าเท่ากับ $1,168 \text{ MJ}$

พลังงานทั้งหมดที่พิจารณาจากสมดุลพลังงาน ไม่ว่าจะเป็ น พลังงานจากกระแสไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาจากสมดุลพลังงานหรือสมการที่ (5.10) พลังงานที่ได้จากปฏิกิริยาเคมี (ปฏิกิริยาออกซิเดชัน) และพลังงานที่เสียให้กับสแลก พิจารณาจากแผนภาพพลังงานในรูปที่ 5.10 (ก) และ (ข) ในขณะที่พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ และพลังงานที่สูญเสียไปกับไอเสียพิจารณาจากแผนภาพพลังงานในรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 เมื่อสรุปและเขียนเป็นแผนภาพพลังงาน หรือ Sankey diagram จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 (ก) เมื่อคิดเป็นสัดส่วนของพลังงานชนิดต่างๆ จะแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.11 (ก) Sankey diagram ของการผลิตเหล็ก 1 ตัน และ (ข) สัดส่วนการใช้พลังงาน

5.1.5 การนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่

การนำความร้อนจากไอเสียกลับมาใช้ใหม่จะอาศัยการถ่ายเทหรือการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นกลไกสำคัญ เพื่อดึงเอาความร้อนที่ติดมากับไอเสียและมักถูกปล่อยทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ นำกลับมาอุ่นเศษเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ก่อนส่งเข้าสู่เตาหลอม ซึ่งแทนที่เศษเหล็กจะเข้าสู่เตาหลอมที่อุณหภูมิ 25°C เศษเหล็กกลับมีอุณหภูมิที่สูงกว่า ผลที่ตามมาคือ การลดลงของพลังงานในการหลอมเศษเหล็กให้กลายเป็นน้ำเหล็กเหลว

การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียและเศษเหล็ก ใช้วิธีให้ไอเสียไหลผ่านหรือแทรกซึมไปตามช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างเศษเหล็กที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะอุ่น กลุ่มของเศษเหล็กถูกเรียกว่าเป็น แพคเบด (Pack bed) และไอเสียจะไหลผ่านแพคเบด

เป้าหมายสุดท้ายของการอุ่นเศษเหล็ก คือ ทำให้เศษเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพราะฉะนั้นผลลัพธ์ที่ต้องการจากการประมาณคือ อุณหภูมิของเศษเหล็กหลังเสร็จสิ้นการอุ่น และโดยธรรมชาติ อุณหภูมิของเศษเหล็กแต่ละจุดในภาชนะอุ่นย่อมไม่เท่ากัน ทำให้เป้าหมายที่ต้องการ ทำได้ที่สุดแล้ว คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็กทั้งหมดที่อยู่ในภาชนะอุ่น

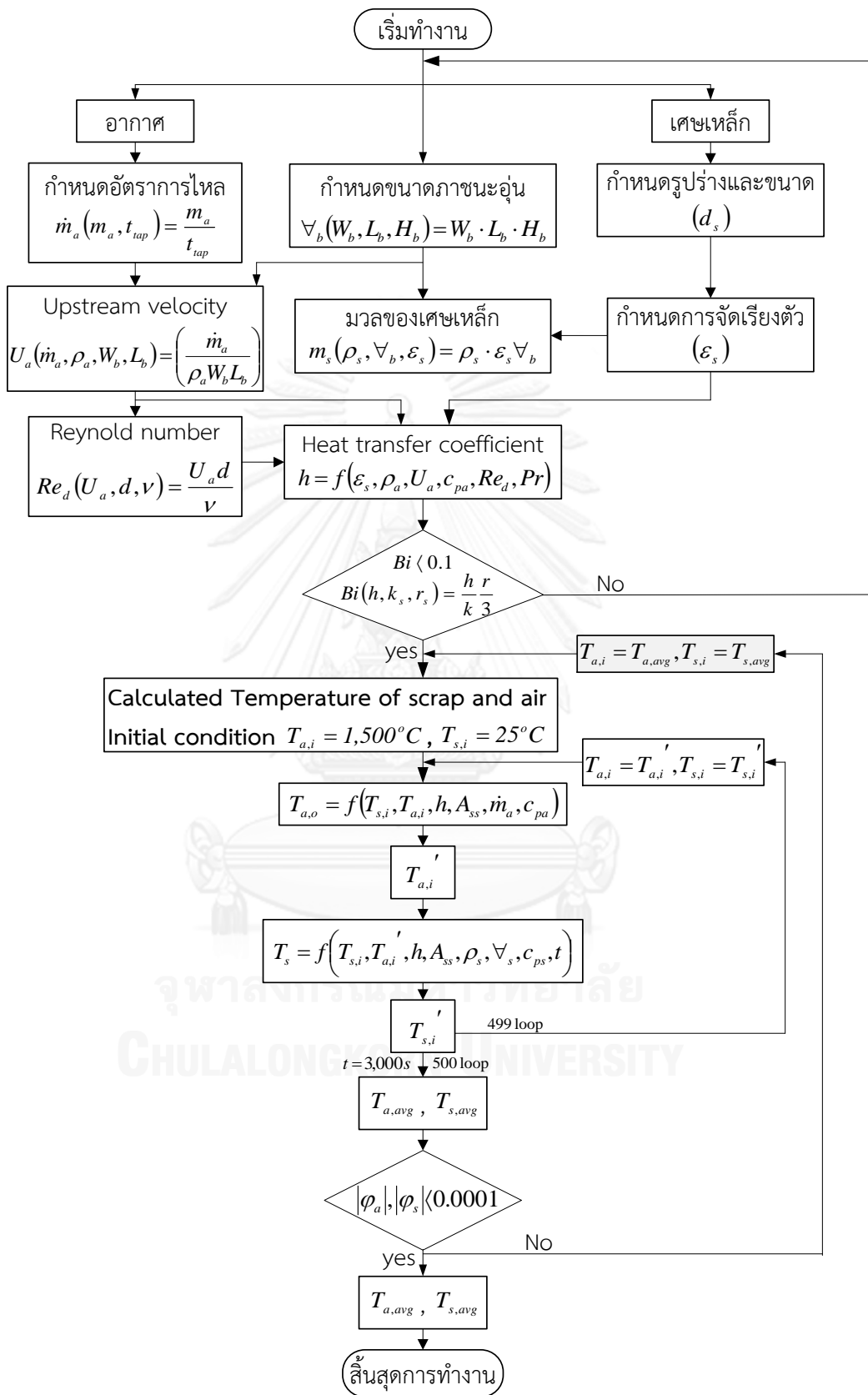
ขั้นตอนของการทำงาน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเป้าหมายที่ต้องการ ได้ถูกเขียนออกมาเป็นแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานของกระบวนการประมาณการอุ่นเศษเหล็กด้วยไอเสีย ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งได้แสดงขั้นตอนต่างๆ การรับข้อมูล การกำหนดข้อมูล รวมถึงตัวแปรที่ต้องการในแต่ละขั้นตอน การทำงานซ้ำ การตรวจสอบเงื่อนไขของการทำงาน เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ดังจะกล่าวต่อไปนี้

ก. เศษเหล็ก

เนื่องจากเศษเหล็กโดยทั่วไปมีรูปร่างและขนาดที่หลากหลาย รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีของเศษเหล็กก็แตกต่างกัน การประมาณและการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนระหว่างไอเสียร้อนและเศษเหล็กจึงอาจมีความยุ่งยาก และเพื่อลดความยุ่งยากที่อาจเกิดขึ้น จึงตั้งสมมติฐานและเงื่อนไขต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมมติฐานของเศษเหล็ก

1. ให้อุณหภูมิของเศษเหล็กก่อนถูกอุ่นด้วยไอเสียมีค่า 25°C
2. องค์ประกอบทางเคมีภายในเศษเหล็ก มีเพียง Fe เป็นองค์ประกอบหลัก โดยไม่สนใจมลทินหรือองค์ประกอบเคมีอื่นๆ ดังนั้น ในการพิจารณาถึงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (c_p) จะใช้คุณสมบัติของ Fe ในการคำนวณ



รูปที่ 5.12 แผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานในการประมาณการอุณหภูมเศษเหล็กด้วยไอเสีย

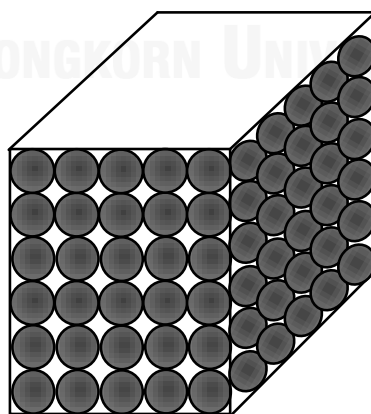
3. สมมติให้เศษเหล็ก คือ เหล็ก (Steel, Carbon steel) ดังนั้น คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ เช่น สภาพการนำความร้อน (k) ค่าความหนาแน่น (ρ) จะใช้ค่าของเหล็ก (Steel, Carbon steel) ดังแสดงในตารางที่ 5.9 [31]

ตารางที่ 5.9 คุณสมบัติทางกายภาพบางอย่างของเหล็ก (Carbon steel) ที่ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

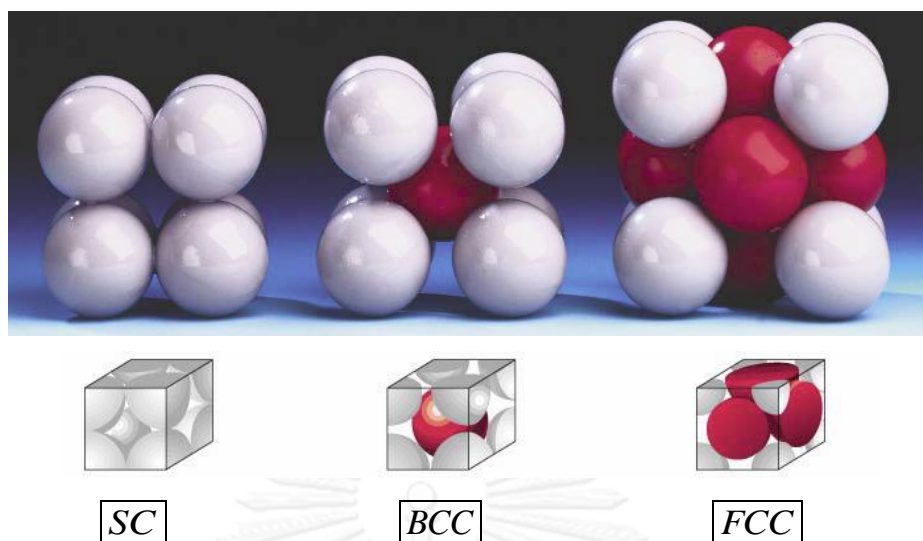
| | | | |
|-------------------------|-----------|--------|-----------------------------------|
| ความหนาแน่น | ρ_s | 7,854 | kg/m^3 |
| สภาพการนำความร้อน | k_s | 60.5 | $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ |
| ค่าความจุความร้อนจำเพาะ | $c_{p,s}$ | 700.37 | $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ |

4. ให้รูปร่างของเศษเหล็กทั้งหมดเป็นทรงกลม และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.05 เมตร ($d_s = 0.05\text{ m}$)
5. การพิจารณาการจัดเรียงตัวของเศษเหล็ก ให้ยึดการจัดเรียงตัวที่ทำให้เกิดช่องว่างจากการจัดเรียงตัวมากที่สุด ซึ่งคล้ายกับสภาวะจริง ที่ช่องว่างระหว่างเศษเหล็กมีค่ามาก โดยการพิจารณาช่องว่างจากการเรียงตัว มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เมื่อเศษเหล็กทรงกลมหลายๆ ลูกถูกบรรจุลงในภาชนะอุ่น ดังรูปที่ 5.13 พบว่า ในการบรรจุย่อมเกิดช่องว่างระหว่างทรงกลม (Void; ε) ซึ่งโดยปกติแล้ว การจัดเรียงตัวของทรงกลมอาจเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะด้วยกัน ได้แก่ Simple Cubic (SC) Body Centered Cubic (BCC) และ Face Centered Cubic (FCC)

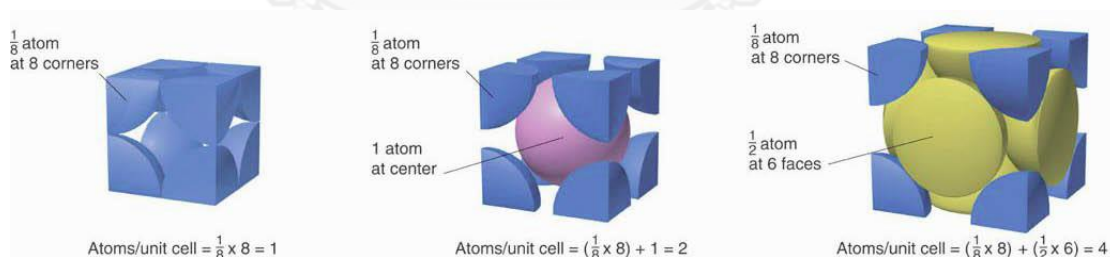


รูปที่ 5.13 ทรงกลมที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะ



รูปที่ 5.14 การจัดเรียงตัวของเศษเหล็กใน 1 หน่วยความยาว

เมื่อพิจารณาการจัดเรียงตัวของเศษเหล็กทรงกลม ในภาชนะอุ้งขนาด 1 หน่วย ดังแสดงในรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 พบว่า ในการจัดเรียงตัวแบบต่างๆ จะให้จำนวนของทรงกลมทั้งหมด (n) แตกต่างกันไป โดยการจัดเรียงแบบ SC มีจำนวนทรงกลมรวมเท่ากับ 1 ลูก แบบ BCC มีจำนวนรวมกันเท่ากับ 2 ลูก และ แบบ FCC มีจำนวนทรงกลมรวมกันเท่ากับ 4 ลูก การนับจำนวนของทรงกลมสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5.15



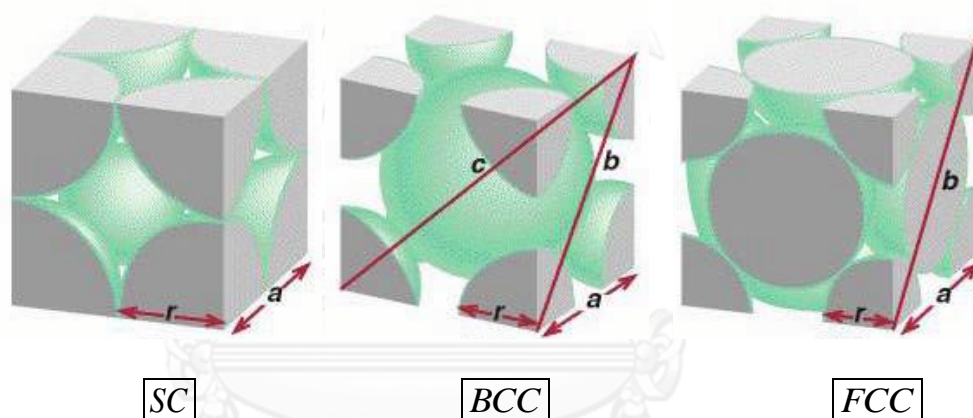
รูปที่ 5.15 จำนวนของทรงกลมใน 1 หน่วยความยาวของการเรียงตัวแบบต่างๆ

การจัดเรียงตัวแบบใด ก่อให้เกิดช่องว่างตามต้องการมากที่สุด พิจารณาได้จากความสามารถในการจัดเรียงตัวของทรงกลม ตัวแปรที่กล่าวมาก็คือ ประสิทธิภาพในการเรียงตัว (Packing efficiency; Pe) และเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง (Percentage of Void; $\% \epsilon$) ซึ่งถูกนิยามได้ดังสมการที่ (5.11) และ (5.12) ตามลำดับ

$$Pe = \frac{nV_o}{V} \times 100 = \frac{n \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{a^3} \times 100 \quad (5.11)$$

$$\% \varepsilon = 100 - Pe \quad (5.12)$$

รายละเอียดของการคำนวณประสิทธิภาพในการเรียงตัว (Packing efficiency; Pe) และเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง (Percentage of Void; $\% \varepsilon$) โดยใช้ สมการที่ (5.11) และ (5.12) พบว่า การจัดเรียงตัวแบบ SC BCC และ FCC ให้เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง เท่ากับ 47.6% 32% และ 26% ตามลำดับ ดังนั้น จึงเลือกการเรียงตัวแบบ SC ซึ่งให้ช่องว่างระหว่างทรงกลมมากที่สุด เป็นการเรียงตัวของเศษเหล็กทรงกลมในแบบจำลอง



SC

BCC

FCC

$$b^2 = a^2 + a^2$$

$$b = 4r$$

$$c^2 = a^2 + b^2 = 3a^2$$

$$b^2 = a^2 + a^2$$

$$c = \sqrt{3}a = 4r$$

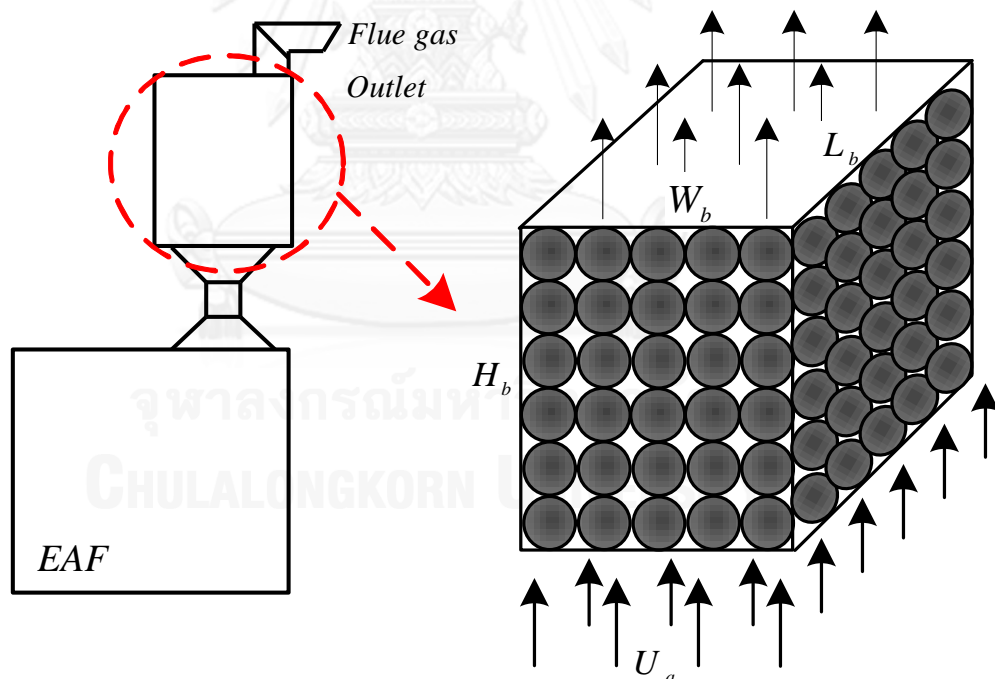
$$16r^2 = 2a^2$$

| | | | |
|---|----------|---------------------------|-----------------|
| <i>unit length</i> | $a = 2r$ | $a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$ | $a = \sqrt{8}r$ |
| $\frac{\text{atoms}}{\text{unit cell}}$ | $n = 1$ | $n = 2$ | $n = 4$ |
| $\% Pe$ | 52.4% | 68% | 74% |
| $\% \varepsilon$ | 47.6% | 32% | 26% |

ข. การออกแบบขนาดของภาชนะอุ่นเศษเหล็ก

ภาชนะที่ใช้บรรจุเศษเหล็กจะออกแบบให้มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยม และตำแหน่งที่ติดตั้งภาชนะนี้จะอยู่ทางด้านบนของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าดังรูปที่ 5.16 ไอเสียที่ไหลออกมาจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าซึ่งส่วนใหญ่จะไหลออกทางด้านบน จึงไหลเข้าสู่ภาชนะอุ่นที่ตำแหน่งด้านล่างและไหลออกทางด้านบนของภาชนะ

ในกระบวนการผลิตเหล็ก 1 รอบ จะให้การหลอมเศษเหล็กจำนวน 100 ตัน และใช้เวลาในการหลอมประมาณ 50 นาที ซึ่งถือว่าเวลาดังกล่าวเป็นเวลาที่เหมาะสมกับการอุ่นเศษเหล็ก และเศษเหล็กที่ถูกนำมาอุ่น ได้ถูกออกแบบให้มีปริมาณเท่ากับ 100 ตัน เช่นเดียวกัน เพราะฉะนั้น ภาชนะอุ่นจะมีขนาดกว้าง (W_b) ยาว (L_b) และสูง (H_b) เป็นเท่าไร เพื่อให้เศษเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร ที่บรรจุอยู่ภายใน มีมวลรวมกันเท่ากับ 100 ตัน เป็นสิ่งที่ต้องออกแบบในลำดับต่อไป

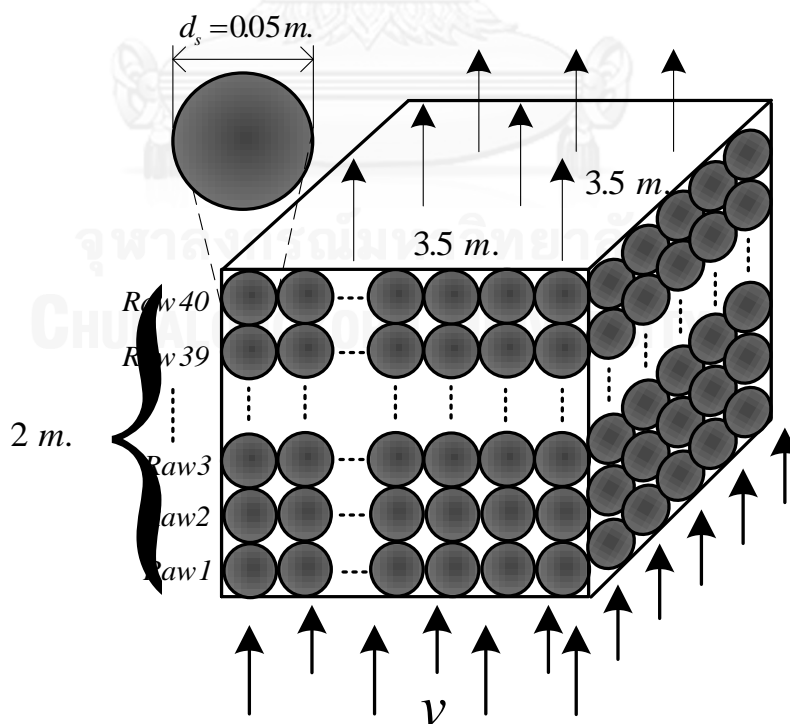


รูปที่ 5.16 ลักษณะของภาชนะอุ่นเศษเหล็ก

การพิจารณาขนาดของภาชนะอุ่น ทำได้หลายแนวทาง ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดพื้นที่ว่างภายในโรงงาน ขนาดของเศษเหล็ก ขนาดของเตาหลอม เป็นต้น ซึ่งสำหรับวิทยานิพนธ์นี้ ได้ออกแบบขนาดของภาชนะอุ่นเศษเหล็กโดยยึดมวลรวมกับขนาดของเศษเหล็กเป็นเงื่อนไขหลักในการออกแบบ เงื่อนไขการออกแบบเพิ่มเติม ได้แก่

1. ขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงของภาชนะจะเลือกให้พอดีกับการบรรจุเศษเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร
2. เปอร์เซ็นต์ช่องว่าง เมื่อบรรจุเศษเหล็กทรงกลมเข้าไปในภาชนะอุ่นมีค่าเป็น 47.6% ดังนั้น เมื่อคุณปริมาตรของภาชนะอุ่น (V_b) ด้วยเปอร์เซ็นต์ช่องว่าง จะได้ ปริมาตรจริงของเศษเหล็กที่บรรจุอยู่ (V_s) และเมื่อคุณปริมาตรจริงด้วยความหนาแน่นของเศษเหล็ก (ρ_s) ที่ 25°C ซึ่งมีค่าเท่ากับ $7,854 \text{ kg/m}^3$ ผลที่ได้คือ ค่ามวลทั้งหมดของเศษเหล็กที่บรรจุในภาชนะ

เมื่อทดลองหาขนาดที่เหมาะสม พบว่า ภาชนะบรรจุเศษเหล็ก มีขนาดความกว้าง ความยาว และความสูงเป็น กว้าง 3.5 เมตร ยาว 3.5 เมตร และสูง 2 เมตร มีมวลของเศษเหล็กที่บรรจุอยู่ภายในรวมกันสูงสุดประมาณ 100.8 ตัน โดยมีจำนวนแถวของทรงกลมในด้าน ความสูงเป็น 40 แถว จำนวนแถวในด้านกว้างและด้านยาวมีจำนวนเท่ากันคือ 70 แถว ดังแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 ขนาดของภาชนะและลักษณะการจัดเรียงตัวของเศษเหล็ก

ค. ไอเสีย

อย่างที่ทราบกันว่า ไอเสีย ที่ออกมาจากเตาหลอมประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด และมีอุณหภูมิสูง ซึ่งตัวแปรหลายตัวที่ค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เพราะฉะนั้น จึงจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานของไอเสีย เพื่อให้การวิเคราะห์ทำได้ง่ายขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมมติฐานของไอเสีย

1. ให้อุณหภูมิของไอเสียก่อนนำไปอุ่นเศษเหล็กมีค่าคงที่ที่ $1,500^{\circ}\text{C}$
2. ปริมาณของไอเสียที่ออกมาจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เมื่อประมาณโดยใช้สมมูลมวลจากตารางที่ 5.4 พบว่ามีค่าประมาณ 191.5 กิโลกรัมต่อการผลิตเหล็ก 1 ตัน และหากเทียบกับการผลิตเหล็ก 100 ตัน จะได้มวลของไอเสียมีค่าประมาณ 19,150 กิโลกรัม
3. อัตราการถ่ายเทมวล (Mass flow rate) ของไอเสียจากเตาหลอมขนาด 100 ตัน ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เวลาในการหลอมประมาณ 50 นาที ดังนั้น จะมีค่าการถ่ายเทมวลเท่ากับ $19,150 / (50 \times 60) = 6.4 \text{ kg/s}$ และให้มีค่าคงที่ตลอดการประมาณ
4. คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของไอเสียที่อุณหภูมิ $1,500^{\circ}\text{C}$ เช่น ค่าความหนืด ค่าความหนาแน่น ให้ใช้ค่าคุณสมบัติของอากาศ (Air) ที่อุณหภูมิ $1,500^{\circ}\text{C}$ แทน ตัวอย่างของค่าดังกล่าวได้แสดงอยู่ในตารางที่ 5.10 [43] และนอกจากนี้ คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถดูได้จากภาคผนวก ค.

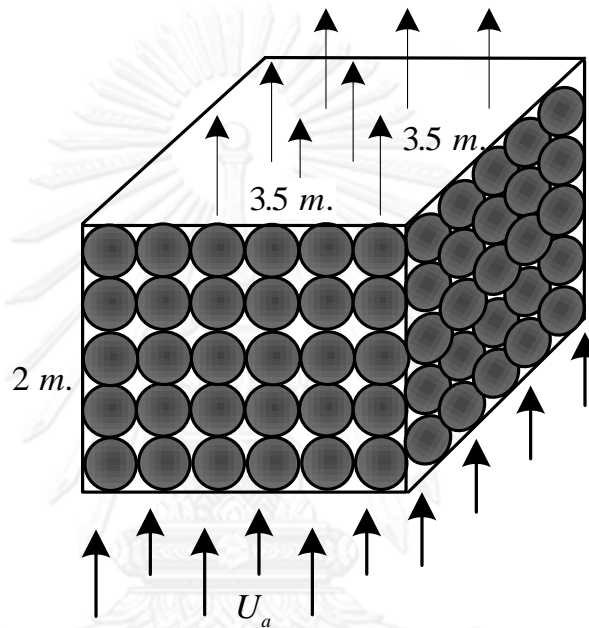
ตารางที่ 5.10 คุณสมบัติต่างๆ ของอากาศ ที่อุณหภูมิ $1,500^{\circ}\text{C}$

| T [K] | ρ_a [kg/m ³] | c_{pa} [kJ/kg·K] | μ_a [N·s/m ²] | V_a [m ² /s] | Pr |
|------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------|-------|
| 1700 | 0.2049 | 1.267 | 6.11E-05 | 2.98E-04 | 0.685 |
| 1773 | 0.1966 | 1.281 | 6.30E-05 | 3.21E-04 | 0.684 |
| 1800 | 0.1935 | 1.286 | 6.37E-05 | 3.29E-04 | 0.683 |

5. ไอเสียที่ไหลออกจากเตาหลอมและไหลเข้าภาชนะอุ่นมีการกระจายตัวของความเร็ว (Velocity distribution) (U_a) คงที่ตลอดทั้งพื้นที่หน้าตัด

ง. พื้นที่ผิวสัมผัส

ในการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอเสียและเศษเหล็กทรงกลม พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของเศษเหล็ก (Total surface area; A_{ss}) ก็เป็นอีกตัวแปรที่สำคัญต่อการถ่ายเทความร้อน เมื่อเศษเหล็กถูกจัดเรียงอยู่ในภาชนะอุณหดังรูปที่ 5.18 ทำให้เกิดช่องว่างซึ่งไอเสียสามารถเคลื่อนที่ไหลผ่านไปตามช่องว่างนั้น และระหว่างที่มีการไหลผ่านก็เกิดการถ่ายเทแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นเช่นกัน ช่องว่างนี้ เรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ช่องว่างของการไหล (ε)



รูปที่ 5.18 การไหลเข้าและออกของไอเสียจากภาชนะอุณหเศษเหล็ก

พื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_s) ที่บรรจุอยู่ภายในภาชนะขนาด $3.5 \times 3.5 \times 2 \text{ m}^3$ สามารถหาได้จากสมการที่ (5.13)

$$A_{ss} = V_s \left(\frac{4\pi \frac{d_s^2}{4}}{\frac{4}{3}\pi \frac{d_s^3}{8}} \right) \quad (5.13)$$

เมื่อ V_s คือ ปริมาตรทั้งหมดของเศษเหล็ก (m^3) ซึ่งสามารถหาได้จากปริมาตรของภาชนะ (V_b) ลบด้วยปริมาตรของช่องว่างของการไหล $(1 - \varepsilon)A_c H_b$

เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวสัมผัสทั้งหมดของทรงกลมจากสมการที่ (5.13) โดยพิจารณาร่วมกับช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการบรรจุ จะเขียนเป็นสมการได้ใหม่ดังแสดงในสมการที่ (5.14)

$$A_{s,s} = \forall_s \left(\frac{4\pi \frac{d_s^2}{4}}{\frac{4}{3}\pi \frac{d_s^3}{8}} \right) = \frac{6(1-\varepsilon)A_c H_b}{d_s} \quad (5.14)$$

เมื่อ A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของภาชนะ ($W_b \times L_b$) (m^2)

H_b คือ ความสูงของภาชนะ (m)

ดังนั้น เมื่อแทนค่าช่องว่างของการไหล (ε) เส้นผ่านศูนย์กลางของเศษเหล็กทรงกลม (d_s) พื้นที่หน้าตัด (A_c) และความสูง (H_b) ของภาชนะลงในสมการที่ (5.14) จะได้พื้นที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ($A_{s,s}$) มีค่าประมาณ 1,065.6 ตารางเมตร

จ.สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่ขาดไม่ได้ในการประมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากไอเสียสู่เศษเหล็ก นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) จากสมการที่ (2.75) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นกับคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของไอเสีย ซึ่งใช้อากาศในการประมาณ และขึ้นกับตัวแปรไร้มิติ ได้แก่ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number) และตัวเลขเพลนเดิล

เมื่อแทนค่าอัตราการไหลของมวล (Mass flow rate) ที่ค่าต่างๆ กัน ผลที่ได้คือ ค่าความเร็วของอากาศก่อนเข้าภาชนะอุ่น (U_a) และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของเศษเหล็กทรงกลม (Re_{d_s}) และเมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งเป็นตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ของอากาศ ลงในสมการที่ (2.75) ผลที่ได้คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) ที่อัตราการไหลต่างๆ ของอากาศ ดังแสดงในตารางที่ 5.11 และรูปที่ 5.19

$$h = \frac{2.06}{\varepsilon} \rho_a U_a c_{p,a} Re_{d_s}^{-0.575} Pr^{-2/3} \quad (2.75)$$

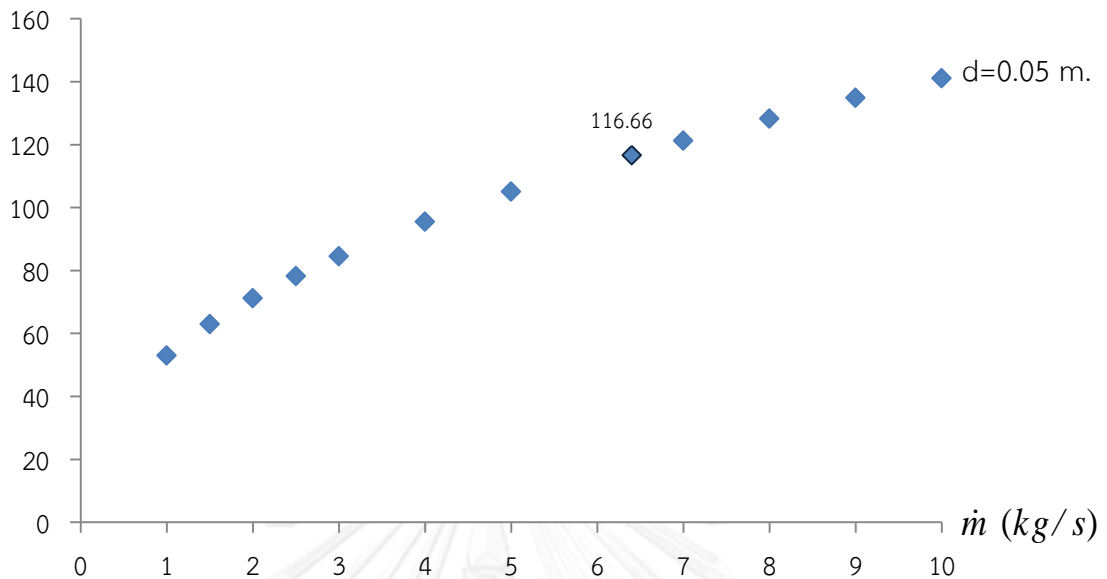
ตารางที่ 5.11 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและค่าตัวเลขเรย์โนลด์ที่อัตราการไหลต่างๆ

| \dot{m} [kg/s] | U_a [m/s] | Re_d | h [W/m ² ·K] |
|---------------------|----------------|--------------|------------------------------|
| 1 | 0.415 | 64.8 | 53.00 |
| 1.5 | 0.623 | 97.1 | 62.97 |
| 2 | 0.831 | 129.5 | 71.16 |
| 2.5 | 1.038 | 161.9 | 78.24 |
| 3 | 1.246 | 194.3 | 84.54 |
| 4 | 1.661 | 259.0 | 95.54 |
| 5 | 2.076 | 323.8 | 105.04 |
| 6.4 | 2.658 | 414.5 | 116.66 |
| 7 | 2.907 | 453.3 | 121.19 |
| 8 | 3.322 | 518.1 | 128.26 |
| 9 | 3.737 | 582.8 | 134.85 |
| 10 | 4.153 | 647.6 | 141.02 |

จากรูปที่ 5.19 จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ถูกเลือก คือ ค่าที่มีอัตราการไหลของมวลเป็น 6.4 kg/s ที่เป็นเช่นนี้ เพราะ เมื่อพิจารณาจากสมดุลมวลของไอเสียที่ได้จากการผลิตเหล็ก 1 ตัน ซึ่งมีค่าประมาณ 191.5 กิโลกรัม โดยในความเป็นจริง การผลิตเหล็กขนาด 1 ตัน เป็นการผลิตที่น้อยเกินไป ใน 1 รอบการผลิต โรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะผลิตเหล็กหรือหลอมเศษเหล็ก ประมาณ 100 ตัน ดังนั้น เมื่อเทียบไอเสียจากการผลิตเหล็ก 100 ตัน จึงมีค่าประมาณ 19,150 กิโลกรัม และใน 1 รอบการผลิต เวลาที่ใช้จะอยู่ที่ 50 นาที ดังนั้น อัตราการไหลของไอเสีย ใน 1 รอบการผลิตมีค่าประมาณ 6.4 กิโลกรัมต่อวินาที

ดังนั้น จากค่าอัตราการไหลของมวล 6.4 kg/s ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากรูปที่ 5.19 พบว่า h มีค่าเท่ากับ 116.66 W/m²·K เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ จากแผนผังการทำงานในรูปที่ 5.12 พบว่า ขั้นตอนต่อไปคือ การตรวจสอบตัวเลขไบออต ให้เป็นไปตามเงื่อนไข ก่อนที่จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอเสียและแพคเกจโดยวิธี Lumped Capacitance Method ในลำดับต่อไป ซึ่งเงื่อนไขของการตรวจสอบมีอยู่ว่า $Bi < 0.1$

Heat transfer coefficient; h (W/m^2K)



รูปที่ 5.19 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมและอัตราการไหลต่างๆ

ตรวจสอบเงื่อนไข $Bi < 0.1$ โดยใช้สมการที่ (2.60) เมื่อทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.05 เมตร สภาพการนำความร้อนสำหรับเหล็ก (k_s) จากตารางที่ 5.9 ดังนั้น เมื่อแทนค่า $r_s = 0.025$ m $k_s = 60.5$ W/m·K และ $h = 166.67$ W/m²·K ลงในสมการที่ (2.60) จะได้ค่า $Bi = 0.016$ ซึ่งน้อยกว่า 0.1 และเป็นไปตามเงื่อนไข

เมื่อเงื่อนไขของตัวเลขไบออตผ่าน ขั้นตอนต่อไปของแบบจำลอง คือ การประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็ก (Scrap) และ ไอเสียหรืออากาศ ซึ่งการวิเคราะห์หาอุณหภูมิจะใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอเสียจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและแพคเกจ โดยใช้วิธี Lumped Capacitance Method การประมาณค่าอุณหภูมิของเศษเหล็กที่เพิ่มขึ้น และอุณหภูมิของไอเสีย พิจารณาได้โดยใช้สมการที่ (2.66) หาค่าอุณหภูมิของเศษเหล็กที่เพิ่มขึ้น และใช้สมการที่ (2.67) เพื่อหาค่าอุณหภูมิของอากาศขาออก (Outlet air temperature) ตามลำดับ

$$T_s(t) = T_{a,i} + (T_{s,i} - T_{a,i}) \exp\left(-\frac{hA_s}{\rho_s V_s c_{p,s}} \Delta t\right) \quad (2.66)$$

$$T_{a,o}(t) = T_s + (T_{a,i} - T_s) \exp\left(-\frac{hA_s}{\dot{m}_a c_{p,a}}\right) \quad (2.67)$$

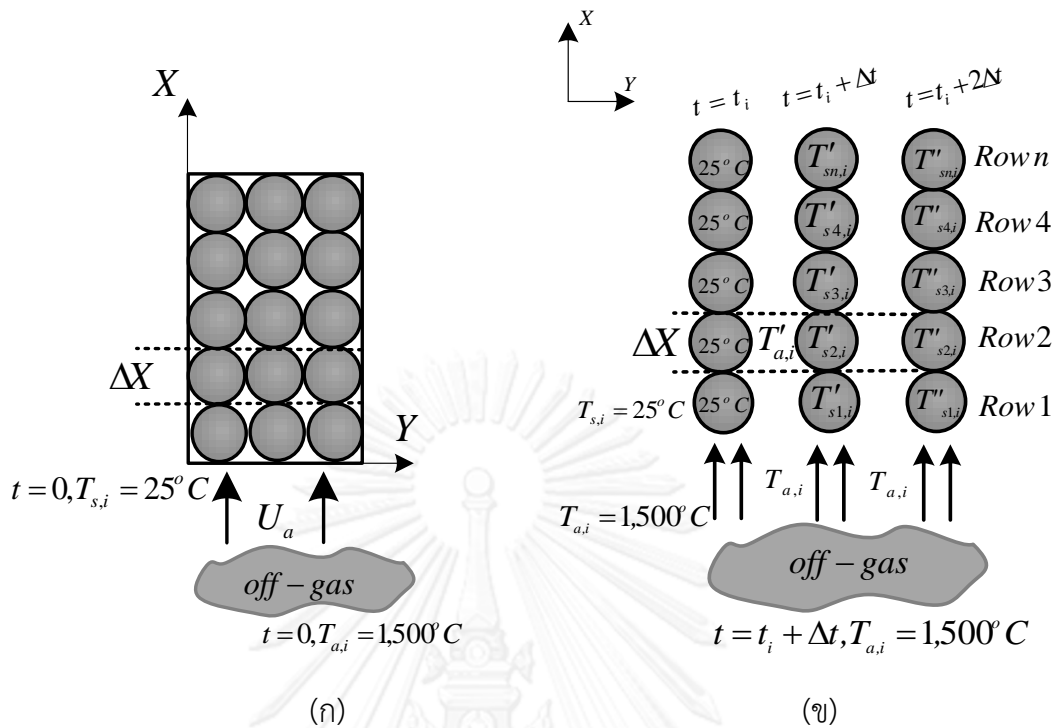
จากแผนผังขั้นตอนการทำงานในรูปที่ 5.12 จะเห็นว่า ในการประมาณค่าอุณหภูมิของ เศษเหล็ก และอากาศ จะมีขั้นตอนการทำงานเป็นรอบๆ ต่อเนื่อง และเป็นขั้นตอนสลับกันไป กล่าวคือ ขั้นตอนแรก จะเป็นการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของการทำงาน (Initial condition) เงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 เงื่อนไขเริ่มต้นและค่าคงที่ของตัวแปรต่างๆ

| เงื่อนไขเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$ | |
|---------------------------------|---|
| ไอเสีย | $T_{a,i} = 1,500 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | $h = 116.66$ |
| | $W / \dot{m}_a = 6.4 \text{ kg/s}$ |
| เศษเหล็ก | $T_{s,i} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| | $\rho_s = 7854 \text{ kg/m}^3$ |
| | $A_{ss} = 1065.6 \text{ m}^2$ |
| | $\nabla_s = 8.88 \text{ m}^3$ |

เมื่อไอเสียจากเตาหลอมเคลื่อนเข้าสู่ภาชนะอุ่น อุณหภูมิของไอเสียขาเข้า ($T_{a,i}$) ถูกตั้งค่าเริ่มต้นไว้ที่ $1,500^\circ\text{C}$ ไอเสียจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของเศษเหล็กทรงกลมทั้งหมด และออกไปยังทางออกดังรูปที่ 5.20 (ก) ไอเสียใหม่ก็จะเคลื่อนเข้ามาสู่ภาชนะอุ่นใหม่ และเป็นเช่นนี้เรื่อยๆ เศษเหล็กทรงกลมก็จะรับความร้อนจากไอเสียและมีอุณหภูมิสูงขึ้น ไอเสียถ่ายเทความร้อนให้กับเศษเหล็ก ไอเสียก็จะมีอุณหภูมิลดลงเช่นกัน โดยจะใช้สมการที่ (2.67) และ (2.66) คำนวณหาอุณหภูมิของไอเสียที่ลดลงและเศษเหล็กเมื่อเศษเหล็กถูกไอเสียเคลื่อนผ่านเป็นช่วงระยะเวลาหนึ่ง (Δt) ตามลำดับ

ประมาณอุณหภูมิของไอเสียหลังจากไหลผ่านแถวของเศษเหล็กในชั้นหนึ่ง ($T_{a,o}$) ที่ช่วงระยะเวลาใดๆ (Δt) ซึ่งอุณหภูมิไอเสียขาออกจากเศษเหล็กแถวก่อน จะกลายเป็นอุณหภูมิขาเข้าของเศษเหล็กในแถวถัดไป ($T'_{a,i}$) ดังรูปที่ 5.20 (ข) และต่อจากนั้น จะเป็นการประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็กที่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนจากไอเสียที่ไหลผ่านในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (Δt) เศษเหล็กจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจากค่าเริ่มต้น ($T_{s,i}$) ซึ่งก็คือ 25°C ไปเป็นค่าต่างๆ แตกต่างกันไปในแต่ละชั้น อุณหภูมิของเศษเหล็กค่าใหม่นี้จะกลายเป็นค่าตั้งต้นค่าใหม่ ($T'_{s,i}$) ของการประมาณในช่วงเวลาถัดไป และทำเช่นนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ ดังแผนผังในรูปที่ 5.21

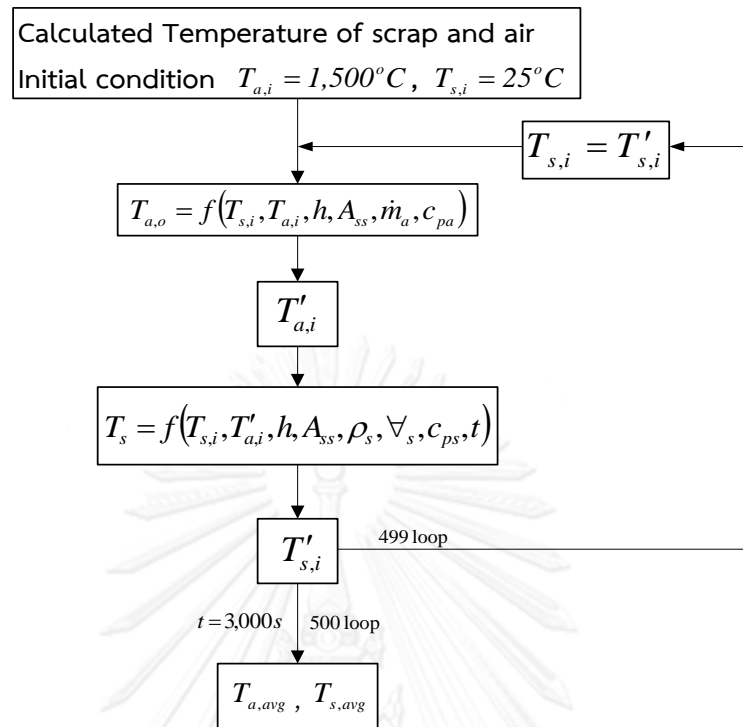


รูปที่ 5.20 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของไอเสียและเศษเหล็ก

อุณหภูมิของเศษเหล็กที่เวลา $t_i + \Delta t$ จะแตกต่างกันออกไปในแต่ละแถว ยิ่งแถวที่ 1 ซึ่งเป็นแถวแรกที่ได้รับความร้อนจากไอเสีย จะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมากที่สุด และลดลงไปในแต่ละแถว ในขณะที่ไอเสียที่เข้ามาก็ยังคงมีอุณหภูมิขาเข้าคงที่ และเมื่อผ่านแถวของเศษเหล็ก อัตราการลดลงของอุณหภูมิจะลดลงช้ากว่าที่เวลาก่อนหน้านั้น

จากสมการที่ (2.66) และแผนผังการทำงานในรูปที่ 5.12 พบว่า อุณหภูมิของเศษเหล็ก ($T_{s,i}$) เป็นฟังก์ชันของช่วงเวลา (Δt) ด้วย ซึ่งเวลาดังกล่าว คือ เวลาที่ใช้ในการอุ่นเศษเหล็ก ซึ่ง 1 รอบการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ใช้เวลาอุ่นทั้งสิ้น 3,000 วินาที และเท่ากับเวลาที่ใช้ในการหลอมเช่นกัน

การแทนค่าเวลาลง (Δt) ในสมการที่ (2.66) จะแทนค่าเป็นค่าใด ก็เป็นอีกประเด็นที่ต้องพิจารณา ซึ่งจะแทนค่าเป็นค่าใดต้องพิจารณาถึงความเหมาะสม เช่น ถ้าแทนค่าเวลาเท่ากับ 3,000 วินาที หมายความว่า การประมาณค่าอุณหภูมิ จะประมาณเพียงรอบเดียว หรือถ้าเลือกช่วงเวลาในการประมาณเป็น 1,500 วินาที หมายความว่า ใช้การประมาณเพียง 2 ครั้ง หรือหากเลือกช่วงเวลาในการประมาณเป็น 3 วินาที จะต้องประมาณค่าอุณหภูมิเศษเหล็กทั้งหมด 1,000 ครั้ง หรือ 1,000 รอบนั่นเอง

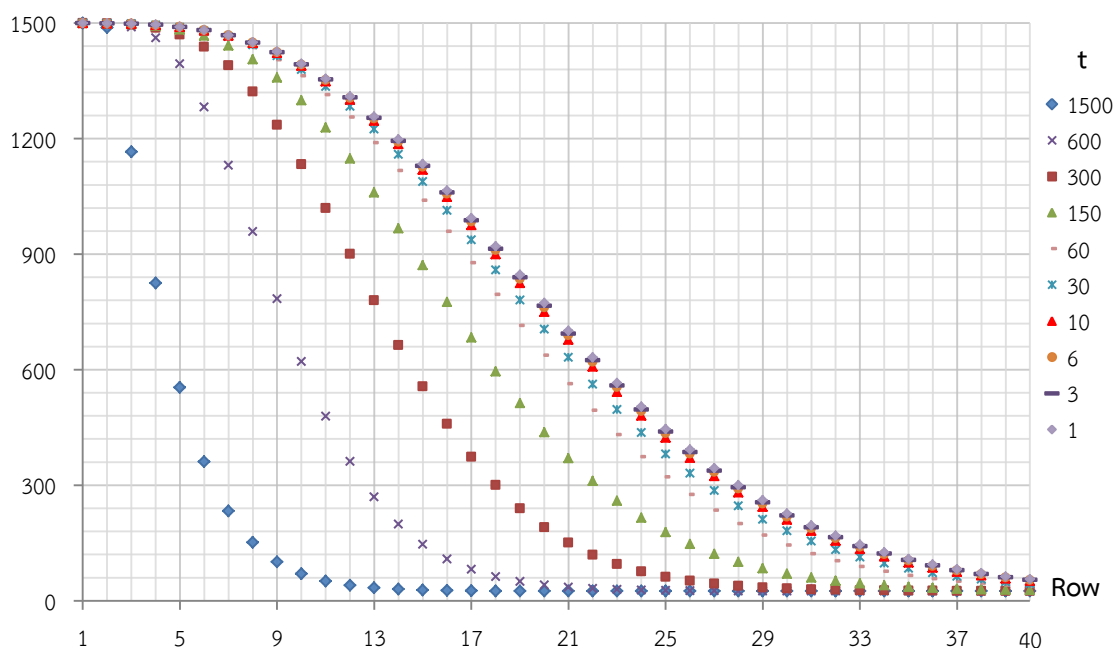


รูปที่ 5.21 ขั้นตอนการทำงานในการประมาณอุณหภูมิเศษเหล็กและไอเสีย

ความเหมาะสมของช่วงเวลาในการประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็ก มีผลดังแสดงในรูปที่ 5.22 จากรูป พบว่า ไม่ว่าจะใช้ช่วงเวลาเป็นเท่าใด อุณหภูมิของเศษเหล็กใน 2 แถวแรกมีค่าใกล้เคียงกัน และผลของช่วงเวลาจะทำให้อุณหภูมิเศษเหล็กแตกต่างกันมากขึ้นในแถวถัดไป จากนั้นอุณหภูมิของเศษเหล็กจะกลับมาใกล้เคียงกันอีกครั้งในแถวหลังๆ

นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่า เมื่อลดช่วงเวลาในการประมาณให้น้อยลง อุณหภูมิของเศษเหล็กในแต่ละแถวมีแนวโน้มที่จะลู่เข้าสู่ค่าๆหนึ่ง ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ในการประมาณในแต่ละครั้ง จะใช้อุณหภูมิของเศษเหล็กและไอเสียจากการประมาณครั้งก่อนหน้า มาเป็นอุณหภูมิตั้งต้นของเศษเหล็กและไอเสียในการประมาณครั้งใหม่ ซึ่งการเลือกช่วงเวลาน้อยลงนั้นหมายถึง จำนวนความถี่ในการประมาณจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้ข้อมูลต่างๆ ถูกปรับแก้เพื่อการประมาณในครั้งใหม่ที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น ค่าอุณหภูมิเศษเหล็กที่ได้จึงลู่เข้า เพราะฉะนั้นการเลือกช่วงเวลา มีผลต่อการประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็ก ยิ่งช่วงเวลาน้อยลง ผลการประมาณก็น่าจะลู่เข้าสู่ค่าๆหนึ่ง และน่าจะเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการและมีความเหมาะสมมากที่สุด

สรุปได้ว่า เวลา เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งต่อการประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็ก ยิ่งเวลาที่แทนค่า มีค่าน้อย ผลการประมาณจะยิ่งมีความเหมาะสม

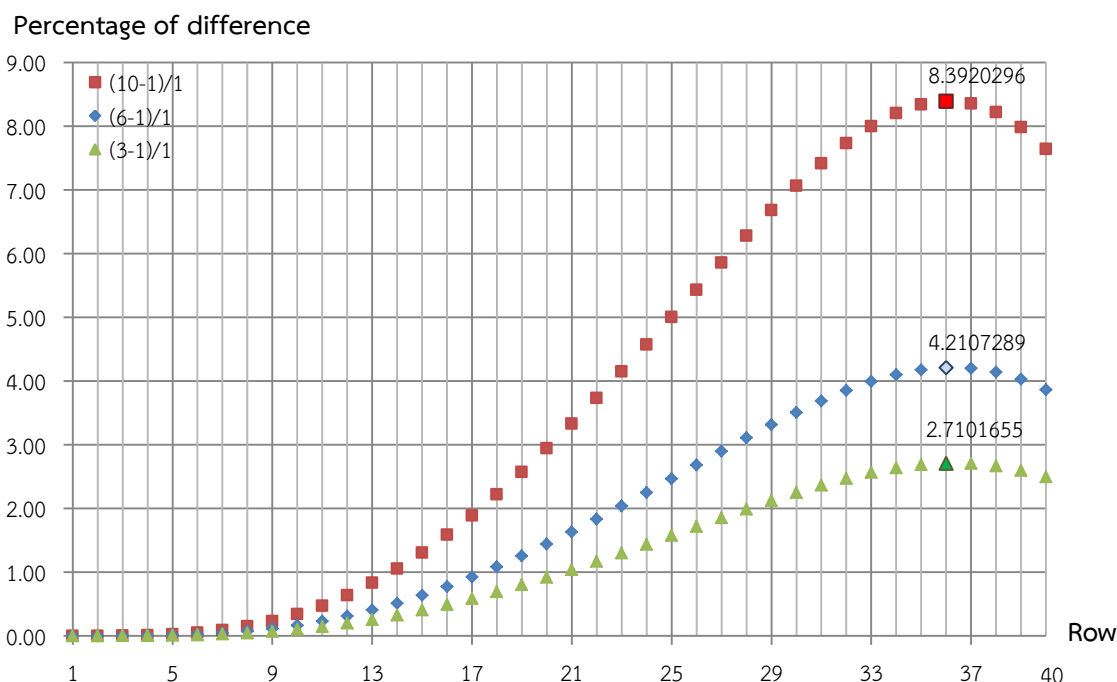
Temp. of scrap ($^{\circ}\text{C}$)

รูปที่ 5.22 ผลของช่วงเวลาต่อการประมาณค่าอุณหภูมิของเศษเหล็ก

เมื่อทราบแล้วว่า เวลา ส่งผลต่อการประมาณ ค่าตามต่อไป คือ จะเลือกใช้เวลาค่าใด สำหรับใช้ในการประมาณ จึงจะทำให้การประมาณมีความเหมาะสม จากรูปที่ 5.22 จะเห็นว่า เมื่อใช้ช่วงเวลาเป็น 1 3 6 และ 10 วินาที การประมาณของอุณหภูมิเศษเหล็กให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน แต่ช่วงเวลาใดจะเหมาะสมต่อการประมาณเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาต่อไป

อย่างที่ทราบว่า ยิ่งช่วงเวลาน้อย จะเป็นผลดีต่อผลการประมาณ ค่าที่ได้ก็จะยิ่งละเอียด แต่ส่งผลเสีย คือ จำนวนข้อมูลและจำนวนครั้งในการประมาณ รวมถึงเวลาที่ใช้ก็จะยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น จะเลือกให้ช่วงเวลาเท่ากับ 1 วินาที ซึ่งถือว่าให้ผลการประมาณที่ละเอียดเป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ และเปรียบเทียบกับช่วงเวลา 3 6 และ 10 วินาที

การเปรียบเทียบดังกล่าว เป็นการเปรียบเทียบช่วงเวลาในลักษณะร้อยละของผลต่าง โดยใช้ช่วงเวลา 1 วินาทีเป็นเกณฑ์ ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 5.23 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าร้อยละของผลต่างมีค่าใกล้เคียงกันในแถวแรกๆ และค่าจะค่อยๆเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดในตำแหน่งแถวที่ 36 จากนั้นค่าจะค่อยๆ ลดลงมา โดยการเปรียบเทียบจะพิจารณาในตำแหน่งที่ให้ร้อยละของผลต่างมีค่ามากที่สุดซึ่งอยู่ในตำแหน่งแถวที่ 36 ผลการเปรียบเทียบของช่วงเวลา 3 6 และ 10 วินาที ให้ร้อยละของผลต่างเป็น 2.71 4.21 และ 8.39 ตามลำดับ



รูปที่ 5.23 ร้อยละของผลต่างของการเปรียบเทียบช่วงเวลา 3 6 และ 10 วินาที กับ 1 วินาที

ช่วงเวลา 3 วินาที อาจเหมาะสมในการประมาณค่าของอุณหภูมิเศษเหล็ก เพราะให้ค่าที่มีความละเอียดสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลา 6 วินาทีแล้ว พบว่าค่าที่ได้แตกต่างกันมากที่สุดเพียงร้อยละ 1.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงจำนวนครั้งของการประมาณและจำนวนข้อมูลแล้ว ช่วงเวลา 6 วินาที ใช้จำนวนครั้งในการประมาณและจำนวนข้อมูลที่ได้น้อยกว่าถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับช่วงเวลา 3 วินาที ดังนั้น ช่วงเวลา 6 วินาที จึงเหมาะสมที่สุดต่อการใช้เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิของเศษเหล็กต่อไป

ดังนั้น ในการประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็กและไอเสีย เมื่อเลือกเวลาในการประมาณเป็น 6 วินาที จะต้องทำการประมาณซ้ำทั้งสิ้น 499 รอบ และเมื่อถึงรอบที่ 500 ซึ่งคิดเป็นเวลาทั้งหมด 3,000 วินาที จึงเป็นการสิ้นสุดการประมาณ ดังรูปที่ 5.21

นอกจากช่วงเวลาที่ได้พิจารณามาแล้วนั้น คุณสมบัติของทั้งเศษเหล็กและไอเสียก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อการประมาณ ดังจะเห็นได้จากสมการที่ (2.66) คุณสมบัติของเศษเหล็กซึ่งในที่นี้สมมติให้เป็นเหล็ก ได้แก่ ค่าความหนาแน่นและค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก ในขณะที่คุณสมบัติของไอเสียซึ่งในที่นี้สมมติให้เป็นอากาศ ได้แก่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ค่าความหนาแน่น และค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ล้วนแล้วแต่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิทั้งสิ้น

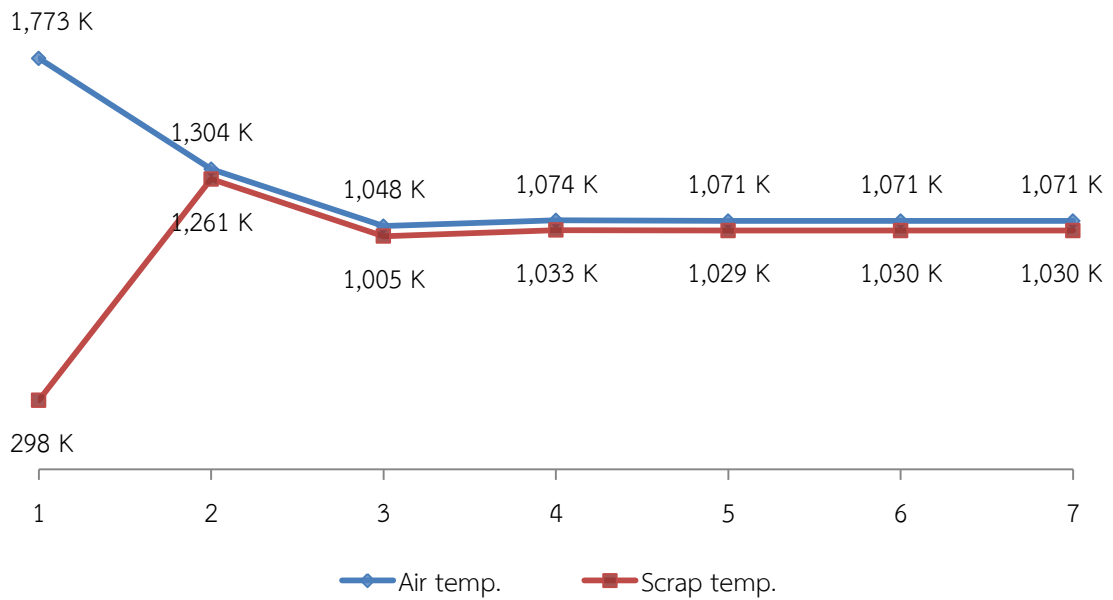
การประมาณในแต่ละรอบ จะได้อุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็กและไอเสีย เมื่อได้ อุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งเศษเหล็กและไอเสียแล้ว การทำงานยังไม่เป็นที่สิ้นสุด เพราะอย่างที่ ได้กล่าวมาว่าคุณสมบัติของตัวแปรหลายตัวขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งในการประมาณจากรูปที่ 5.12 จะใช้อุณหภูมิตั้งต้นในการประมาณแต่ละรอบ และโดยธรรมชาติ สำหรับการอุ่นเศษเหล็ก เหล็กที่ได้รับความร้อนก่อนเหล็กชิ้นอื่นๆ ก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อน ในขณะที่ ไอเสีย เมื่อ แลกเปลี่ยนความร้อนกับเศษเหล็กแล้ว ไอเสียก็จะมีอุณหภูมิตกลง จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิก็เป็น ฟังก์ชันกับเวลา เวลาเปลี่ยนอุณหภูมิก็เปลี่ยนแปลง ทำให้คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ก็ เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ส่งผลให้การทำนายอุณหภูมิของการอุ่นเศษเหล็กมีความซับซ้อน

เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากและซับซ้อนที่อาจจะเกิดขึ้นในการทำนายอุณหภูมิของการ อุ่นเศษเหล็ก จึงใช้วิธีแทนค่าอุณหภูมิตั้งต้นของเศษเหล็กด้วยอุณหภูมิ 25°C และอุณหภูมิของ ไอเสียซึ่งมีค่า $1,500^{\circ}\text{C}$ ลงในการประมาณครั้งแรก ดังนั้น คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของ เศษเหล็กและไอเสียจะใช้ค่าที่อุณหภูมิ 25°C และ $1,500^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และแทนค่าคุณสมบัติ ทางอุณหพลศาสตร์ลงในสมการที่ (2.66) โดยใช้ช่วงเวลาเป็น 6 วินาที ดังได้กล่าวมาแล้ว ข้างต้น จะได้ผลการประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็กในแต่ละแถว เมื่อเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนักโดย ใช้น้ำหนักของเศษเหล็กเป็นตัวถ่วงแล้ว ผลเฉลี่ยของอุณหภูมิเศษเหล็กและไอเสียมีค่าเป็น $1,261^{\circ}\text{C}$ และ $1,304^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ และก็จะใช้ค่าคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของอุณหภูมินี้ ในการประมาณครั้งต่อไป

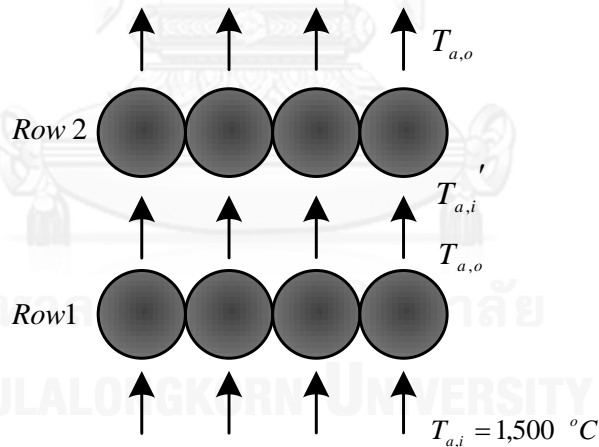
เมื่อทำในลักษณะเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จะพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งเศษเหล็กและไอเสียมี แนวโน้มที่จะคงที่ที่อุณหภูมิต่ำหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.24 แต่ต้องตรวจสอบเงื่อนไขตามสมการ ที่ (5.15) และ (5.16) พบว่า อุณหภูมิในการประมาณครั้งที่ 6 และ 7 เป็นไปตามเงื่อนไข ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของทั้งเศษเหล็กและไอเสีย ได้แก่ $1,030^{\circ}\text{C}$ และ $1,071^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ เพราะฉะนั้น จะใช้ค่าคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ของอุณหภูมิดังกล่าวในการประมาณ อุณหภูมิของการอุ่นเศษเหล็ก

$$|\varphi_a| = \left| \frac{T_{a,avg} - T_{a,i}}{T_{a,i}} \right| < 0.0001 \quad (5.15)$$

$$|\varphi_s| = \left| \frac{T_{s,avg} - T_{s,i}}{T_{s,i}} \right| < 0.0001 \quad (5.16)$$



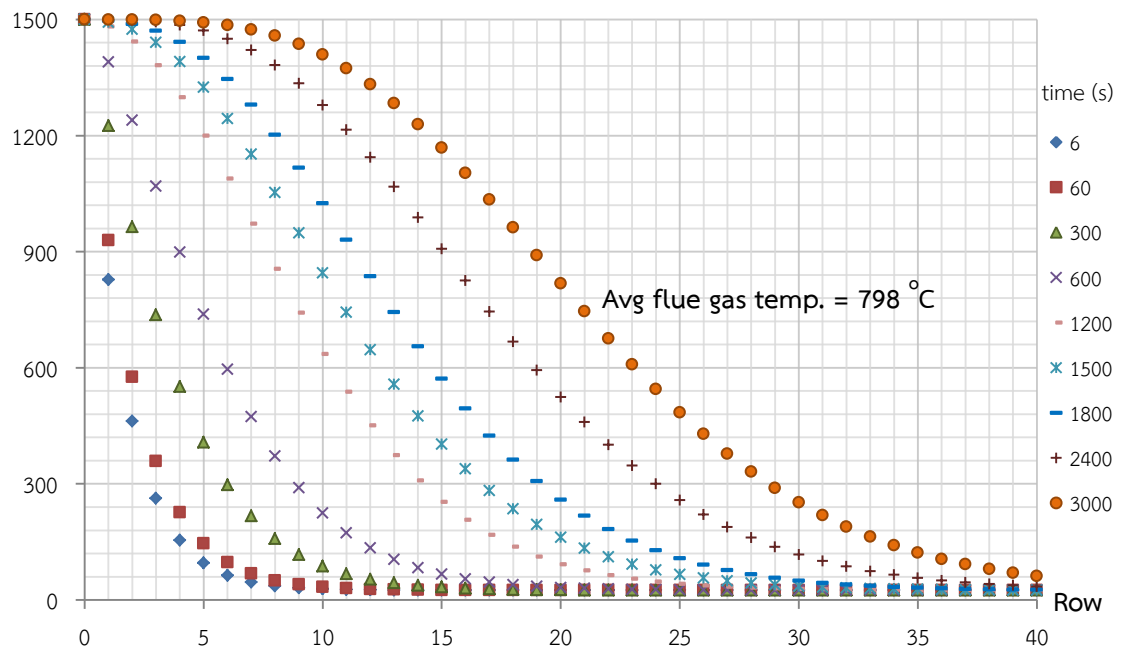
รูปที่ 5.24 อุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็กและไอเสียของการปรับแก้ในแต่ละครั้ง



รูปที่ 5.25 ลักษณะของไอเสียที่ไหลผ่านเศษเหล็ก

ไอเสียสำหรับใช้ในการอุ่นมีอุณหภูมิก่อนเข้าสู่ภาชนะอุ่นประมาณ $1,500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ จะสมมติให้มีค่าเท่าเดิมตลอด เมื่อไอเสียไหลผ่านเศษเหล็กทรงกลมแถวแรกดังรูปที่ 5.25 ความร้อนจากไอเสียจะถ่ายเทให้เศษเหล็ก อุณหภูมิของไอเสียจึงลดลง อุณหภูมิของเหล็กแถวแรกจะเพิ่มขึ้น เมื่อการอุ่นเริ่มต้นได้ไม่นาน อุณหภูมิของไอเสียจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะมีการถ่ายเทความร้อนให้กับเศษเหล็กมาก ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนใน 5 แถวแรก และเมื่อเวลา

Temp. of flue gas ($^{\circ}\text{C}$)

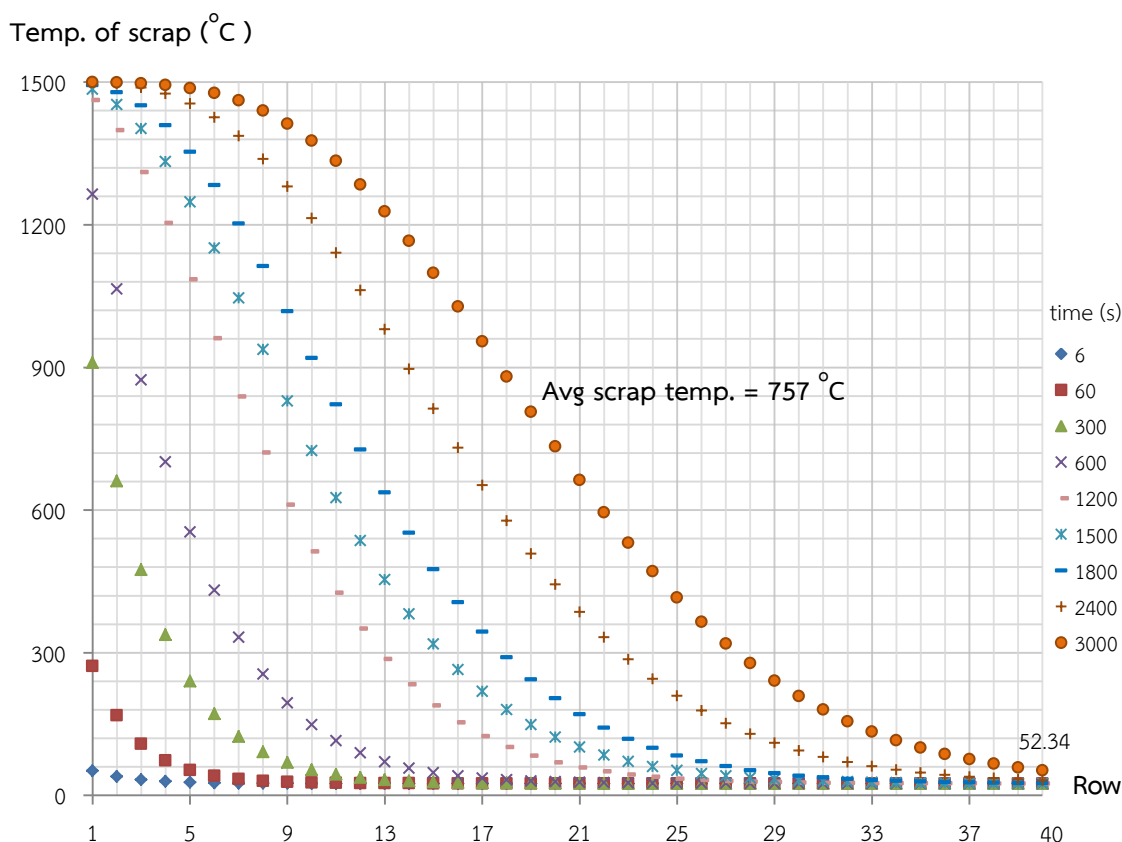


รูปที่ 5.26 ผลการประมาณอุณหภูมิของไอเสียที่ผ่านแถวต่างๆ และที่เวลาต่างๆ

ผ่านไป อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างไอเสียและเศษเหล็กจะค่อยๆ ลดลง ความชันของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากกราฟจึงมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.26

หลังเสร็จสิ้นการอุ่นที่เวลา 3,000 วินาที อุณหภูมิของเศษเหล็กในแถวต่างๆ มีค่าโดยประมาณเป็นดังกราฟเส้นบนสุดในรูปที่ 5.27 จากกราฟจะเห็นว่า เศษเหล็กในแถวแรกๆ ประมาณ 5 แถวแรก ได้รับความร้อนจากไอเสียอย่างเต็มที่ อุณหภูมิจึงเพิ่มสูงขึ้นมากและอุณหภูมิจะไม่สามารถสูงได้มากกว่านี้แล้ว หรืออาจกล่าวได้ว่า เศษเหล็กแถวแรกๆ อิ่มตัวด้วยความร้อน ในขณะที่ เศษเหล็กแถวหลังสุด มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเพียง 52°C ที่เป็นเช่นนี้เพราะไอเสียมีอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนกับเศษเหล็กในแถวแรกๆ ค่อนข้างมาก เนื่องมาจากผลต่างของอุณหภูมิไอเสียและเศษเหล็กมีมาก และถ่ายเทจนไอเสียมีอุณหภูมิลดต่ำลง ทำให้การถ่ายเทความร้อนสู่เศษเหล็กในแถวหลังๆ เกิดขึ้นได้น้อย

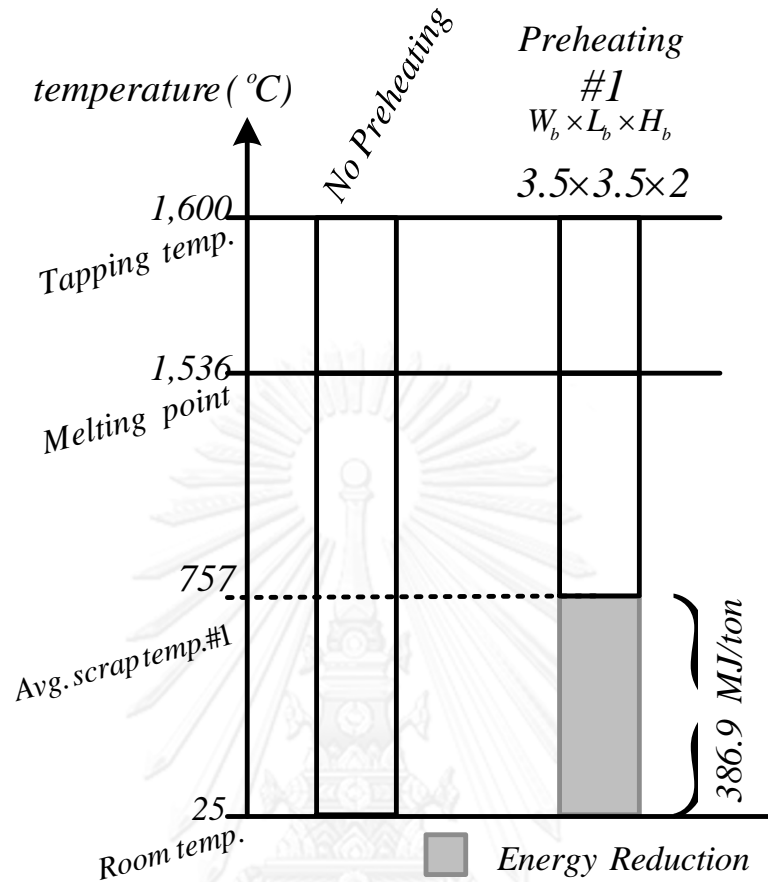
เมื่อเฉลี่ยอุณหภูมิของเศษเหล็กแบบถ่วงน้ำหนัก โดยใช้มวลของเศษเหล็กในแต่ละแถวเป็นน้ำหนักที่ใช้ถ่วง พบว่า ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของเศษเหล็กในทุกแถว ($T_{s,avg}$) มีค่าประมาณ 757°C หรือ $1,030\text{ K}$



รูปที่ 5.27 ผลการประมาณอุณหภูมิของเศษเหล็กที่แถวต่างๆ และที่เวลาต่างๆ

เมื่อพิจารณาศักยภาพในการลดลงของพลังงานในการหลอมเหล็กในรูปที่ 5.28 พบว่ากรณีที่ไม่มีการอุ่นเศษเหล็ก ซึ่งจุดหลอมเหลวของเหล็ก (Fe) เกิดที่อุณหภูมิ $1,809\text{ K}$ หรือ $1,536^{\circ}\text{C}$ และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานของเหล็กที่อุณหภูมิดังกล่าว เหล็กมีค่าเอนทัลปี ($h_{1,536^{\circ}\text{C}} - h_{25^{\circ}\text{C}}$) เท่ากับ 49.5 MJ/kmol ซึ่งเหล็กจำนวน 1 ตัน คิดเป็น 17.91 kmol เพราะฉะนั้น ถ้าจะทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นจาก 25°C ถึง $1,536^{\circ}\text{C}$ ต้องใช้พลังงานเท่ากับ 886.5 MJ/ton

กรณีที่มีการอุ่นเศษเหล็ก โดยใช้ไอเสียที่ออกมาจากเตาหลอม หลังจากการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็ก ($T_{s,avg}$) พบว่าเหล็กมีอุณหภูมิเฉลี่ยเมื่ออุ่นเป็นเวลา 50 นาที เท่ากับ 757°C ซึ่งที่อุณหภูมินี้ เหล็กมีค่าเอนทัลปี ($h_{757^{\circ}\text{C}} - h_{25^{\circ}\text{C}}$) เท่ากับ 21.6 MJ/kmol คิดเป็นพลังงานเท่ากับ 386.9 MJ/ton เพราะฉะนั้น พลังงานในส่วนนี้ คือ พลังงานในส่วนที่ทำให้เหล็กจากอุณหภูมิ 25°C เพิ่มเป็น 757°C หรือ คือ พลังงานที่ลดลงจากการอุ่นนั่นเอง



รูปที่ 5.28 ปริมาณการลดลงของพลังงานเมื่อมีการอุ่นเศษเหล็ก

บทสรุปถึงแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย โดยมุ่งเน้นเฉพาะการใช้พลังงานความร้อนจากการปรับปรุงและพัฒนา โดยการนำความร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งมากับไอเสียที่เกิดขึ้นจากการหลอมเศษเหล็กและนำกลับมาใช้ใหม่ และนำมาอุ่นเศษเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนนำเข้าสู่เตาหลอม พบว่า หลังจากการอุ่นเศษเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร ในภาชนะอุ่นขนาด กว้าง 3.5 เมตร ยาว 3.5 เมตร และสูง 2 เมตรด้วยไอเสียที่มีอุณหภูมิเข้าคงที่ที่ 1,500 °C ในระยะเวลา 50 นาที จะสามารถอุ่นเศษเหล็กให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นถึง 757 °C ส่งผลให้สามารถลดการใช้พลังงานในการหลอมลงได้ถึง 386.9 MJ/ton หรือคิดเป็นปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 107.5 kWh

สำหรับปัญหาที่พบ จากแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาดังกล่าวมาทั้งหมด ในข้างต้น พบว่า ในแบบจำลองแรก เหล็กที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะอุณหภูมิสูง 2 เมตร หน้าตัดกว้างและยาว เท่ากับ 3.5 เมตร เศษเหล็กทรงกลมมีทั้งหมด 40 แกวในด้านความสูง ผลการประมาณชี้ให้เห็นว่า จะมีเหล็กเพียงไม่กี่แกวที่ได้รับความร้อนจากไอเสียและมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเหล็กในแกวแรกๆ และสำหรับแกวที่อยู่ท้ายๆ ไอเสียที่ผ่านมา ถูกแกวแรกๆ ดึงเอาความร้อนไปเกือบหมด จึงเหลือความร้อนถ่ายเทให้แกวหลังๆ ได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เหล็กในแกวท้ายๆ จึงมีอุณหภูมิไม่สูง ดังได้นำเสนอมาแล้วในรูปที่ 5.27

เพราะฉะนั้น จึงได้มีการประยุกต์หรือปรับแก้แบบจำลองดังกล่าว ซึ่งอาจทำให้ อุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็กมีค่าสูงขึ้นได้ ต้องย้อนกลับไปยังแผนผังขั้นตอนการทำงานใน รูปที่ 5.12 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่า ตัวแปรที่สามารถปรับแก้ได้ง่าย สะดวกและอาจจะแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ คือ ขนาดของภาชนะอุณหภูมิสูง

ในการปรับแก้ขนาดของภาชนะอุณหภูมิสูง คำถามที่เกิดขึ้น คือ จะปรับแก้ขนาดเป็นอย่างไร ก็ต้องย้อนกลับไปดูที่ปัญหา อย่างที่ทราบกับ เมื่อภาชนะอุณหภูมิสูง 2 เมตร เศษเหล็กในแกวท้ายๆ แทบจะไม่ได้ได้รับความร้อนจากไอเสียเลย ดังนั้น อาจปรับลดขนาดความสูงของภาชนะอุณหภูมิสูง ซึ่ง อาจทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็กมีค่าสูงขึ้นได้ แต่การปรับลดความสูงของภาชนะ ก็ต้องไป เพิ่มส่วนของพื้นที่หน้าตัด เพื่อให้มวลของเศษเหล็กที่อยู่ภายในมีค่าประมาณ 1 ตันเท่าเดิม

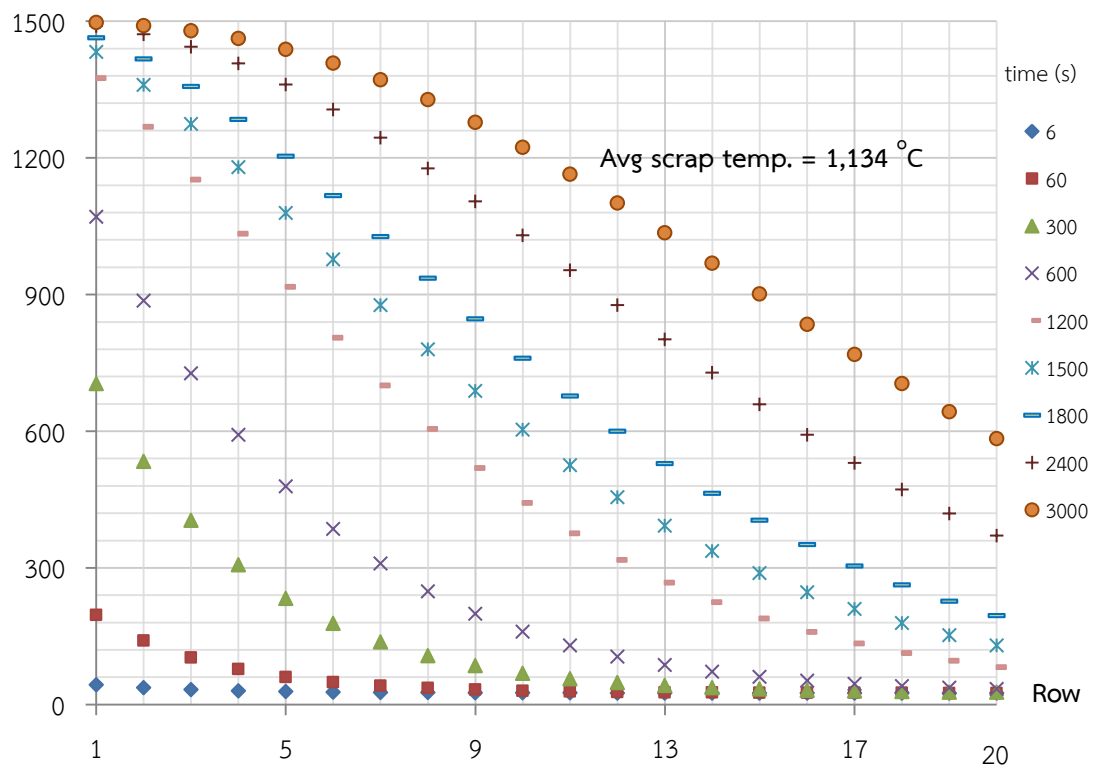
ขนาดของภาชนะอุณหภูมิสูงหลังการปรับแก้พบว่า ความกว้างและความยาวเท่ากับ 5 เมตร และความสูง 1 เมตร ลดลง 2 เท่าจากของเดิม โดยเมื่อบรรจุเศษเหล็กทรงกลมขนาดเท่าเดิมลง ไป พบว่า มีมวลเศษเหล็กรวมกันสูงสุดประมาณ 102.8 ตัน ภาชนะอุณหภูมิสูงสามารถบรรจุเศษเหล็ก ทรงกลมได้ 20 แกวในแนวความสูง

เมื่อพิจารณาแผนผังขั้นตอนการทำงานในรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่า ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง กับเศษเหล็กยังคงเหมือนเดิม ในขณะที่ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอากาศมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ในส่วนความเร็วของอากาศก่อนเข้าภาชนะอุณหภูมิสูง (Upstream velocity; U_a) โดยความเร็วนี้ เปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากพื้นที่หน้าตัดของภาชนะอุณหภูมิสูงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อัตราการไหลของมวลของ อากาศไม่เปลี่ยนแปลง เท่าเดิมที่ 6.4 kg/s ทำให้ความเร็วจึงลดลงจากของเดิม 2.658 m/s มาอยู่ที่ 1.302 m/s ส่งผลต่อตัวแปรตัวถัดมา นั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จากเดิมมีค่า $116.66 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ เปลี่ยนเป็น $86.15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

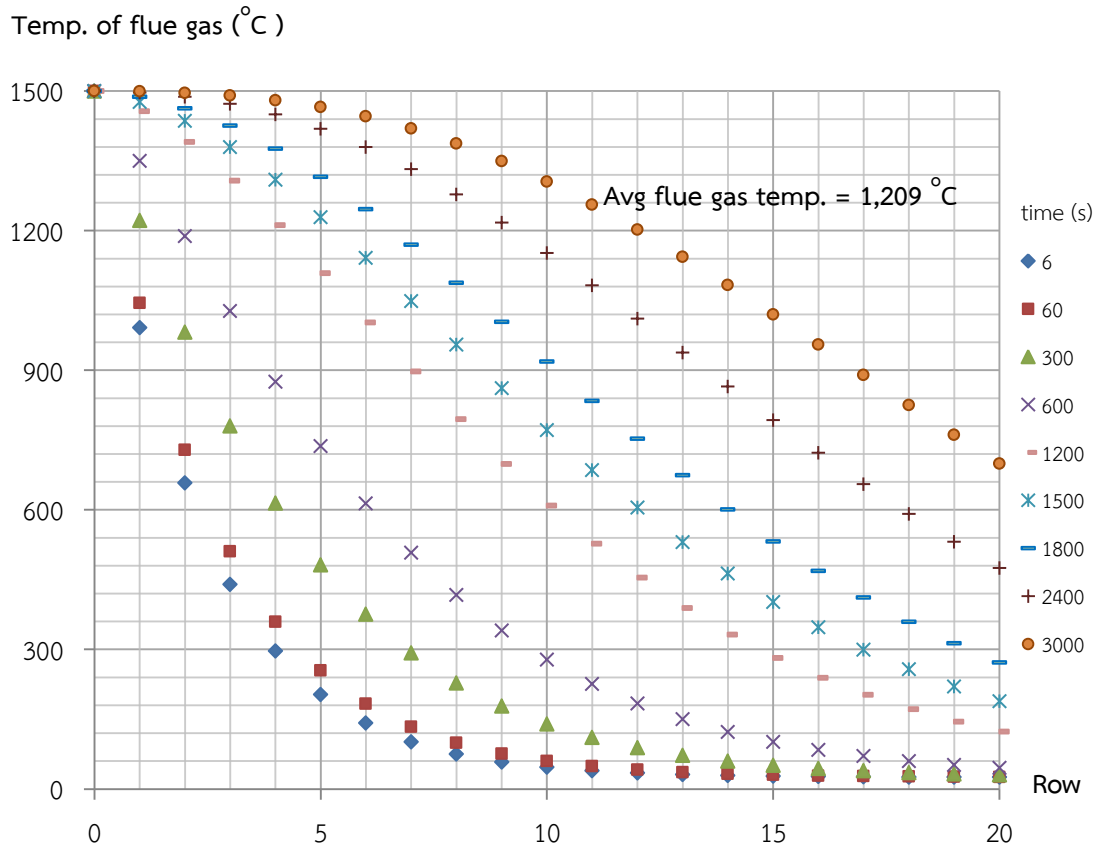
ตรวจสอบเงื่อนไขตัวเลขไบออตตามขั้นตอนเดิมสำหรับกรณีใหม่ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.012 ซึ่งน้อยกว่า 0.1 เงื่อนไขนี้จึงผ่าน และเข้าสู่ขั้นตอนของการประมาณอุณหภูมิเศษเหล็กและอากาศต่อไปได้

ด้วยวิธีการเดียวกับดังที่ได้กล่าวมาแล้วในรูปที่ 5.21 วิธีการต่างๆ เหมือนเดิมทุกประการ ต่างก็แค่เพียงเงื่อนไขเริ่มต้นบางตัว ได้แก่ ค่า h และ V_s ที่เปลี่ยน หลังจากการประมาณพบว่า ที่เวลาต่างๆ เศษเหล็กทรงกลมในแต่ละแถว มีอุณหภูมิดังรูปที่ 5.29 และไอเสียหรือที่สมมติฐานให้เป็นอากาศมีอุณหภูมิดังรูปที่ 5.30

Temp. of scrap ($^{\circ}\text{C}$)



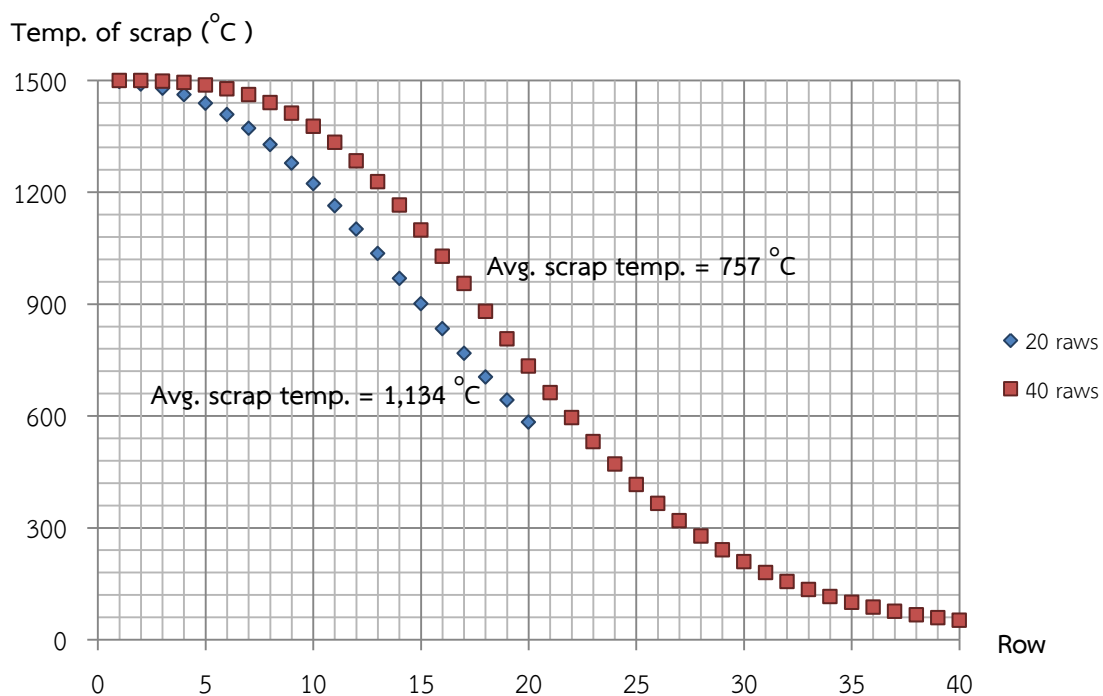
รูปที่ 5.29 อุณหภูมิของเศษเหล็ก



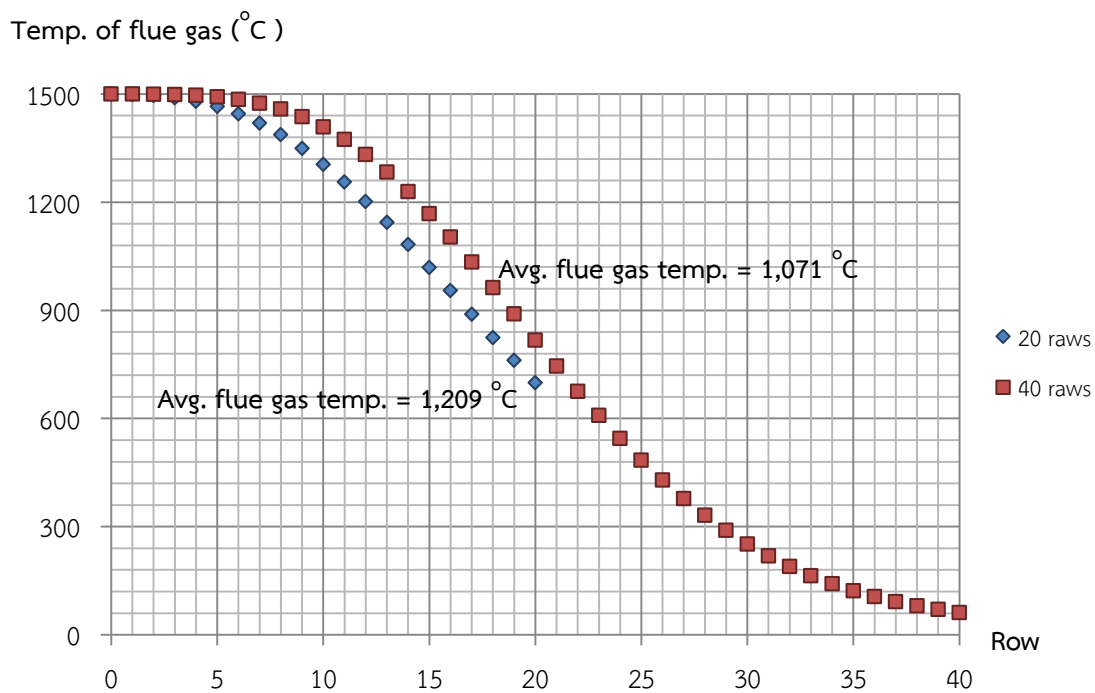
รูปที่ 5.30 อุณหภูมิของไอเสีย

เมื่อเสร็จสิ้นการอุ่นที่เวลา 3,000 วินาที จากการเปรียบเทียบทั้งสองกรณี จะเห็นว่า กรณีที่ภาชนะอุ่นสูง 1 เมตรและมีแถวในแนวความสูงของเศษเหล็กทรงกลมเท่ากับ 20 แถว มีอุณหภูมิของเศษเหล็กและอุณหภูมิของไอเสียเทียบกันแบบแถวต่อแถวกับกรณีที่ภาชนะอุ่นสูง 2 เมตรและมีแถวในแนวความสูงของเศษเหล็กทรงกลมเท่ากับ 40 แถว ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 5.31 และรูปที่ 5.32 เหตุผลที่เป็นเช่นนั้น เพราะ พื้นที่หน้าตัดของภาชนะอุ่นที่เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

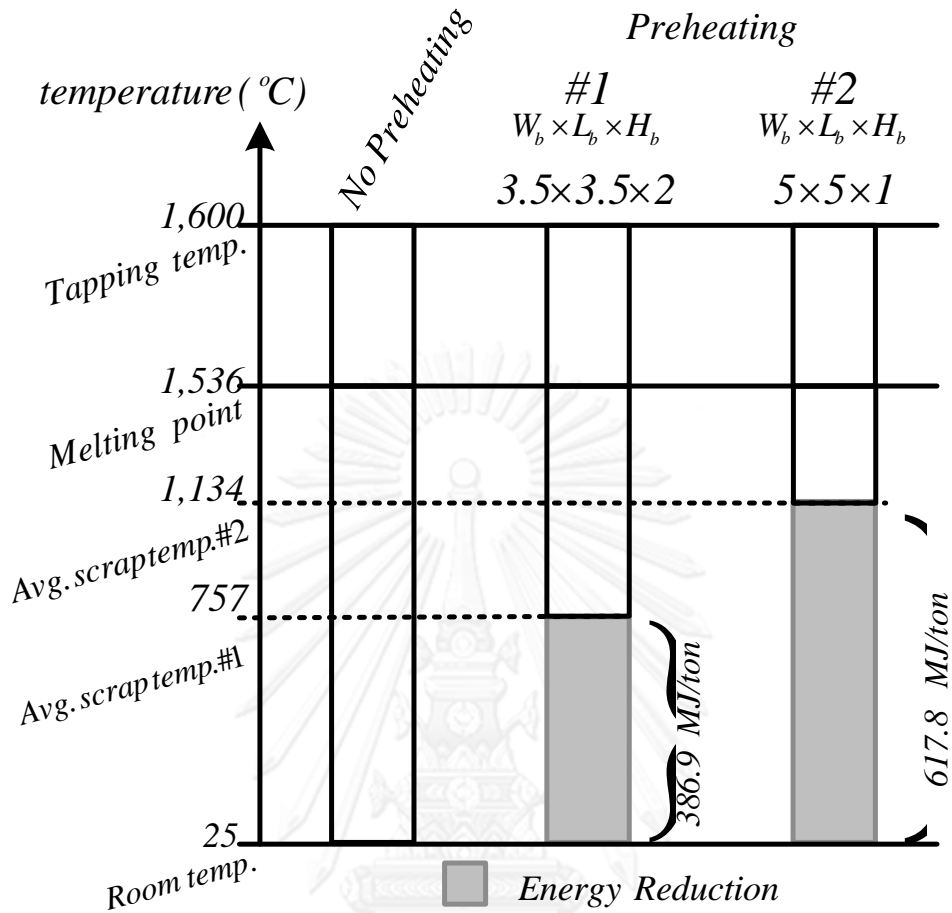
พื้นที่หน้าตัดที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้การบรรจุเศษเหล็กทรงกลมในแนวทั้งความกว้างและความยาวมีจำนวนเพิ่มขึ้น ไอเสียที่ไหลผ่านและถ่ายเทความร้อนให้กับเศษเหล็กในแถวแรก จึงต้องถ่ายเทความร้อนให้เศษเหล็กจำนวนมากกว่าเมื่อเทียบกับภาชนะอุ่นขนาดเก่า ไอเสียก็ถูกดึงความร้อนออกไปมาก ส่งผลให้ ไอเสีย ที่ผ่านออกมาจากแถวแรก มีอุณหภูมิต่ำลงกว่าการอุ่นในภาชนะขนาดเดิม ไอเสียนี้ก็ถ่ายเทความร้อนให้เศษเหล็กในแถวต่อไปได้น้อยกว่า เศษเหล็กจึงมีอุณหภูมิต่ำกว่า และเป็นเช่นนั้นไปจนครบทั้ง 20 แถว จึงให้ผลของการอุ่นเป็นดังรูปดังที่ได้กล่าวมานั่นเอง



รูปที่ 5.31 เปรียบเทียบอุณหภูมิของเศษเหล็กเมื่อเสร็จสิ้นการอุ่นของทั้ง 2 กรณี



รูปที่ 5.32 เปรียบเทียบอุณหภูมิของไอเสียเมื่อเสร็จสิ้นการอุ่นของทั้ง 2 กรณี



รูปที่ 5.33 เปรียบเทียบพลังงานที่ลดลงเมื่ออุ่นเศษเหล็กด้วยภาชนะทั้ง 2 ขนาด

เมื่อพิจารณาศักยภาพในการลดการใช้พลังงานสำหรับกรณีที่ 2 คือ การอุ่นเศษเหล็กในภาชนะขนาดกว้างและยาวเท่ากับ 5 เมตร สูง 1 เมตร พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยทั้งหมดของเศษเหล็กมีค่าเป็น $1,134^{\circ}\text{C}$ ซึ่งที่อุณหภูมินั้น เหล็กให้ค่าเอนทัลปี ($h_{1,134^{\circ}\text{C}} - h_{25^{\circ}\text{C}}$) เท่ากับ 34.5 MJ/kmol คิดเป็นพลังงานเท่ากับ 617.8 MJ/ton เพราะฉะนั้น พลังงานในส่วนนี้ คือ พลังงานในส่วนที่ทำให้เหล็กจากอุณหภูมิ 25°C เพิ่มขึ้นเป็น $1,134^{\circ}\text{C}$ หรือ คือ พลังงานที่ลดลงจากการอุ่น

เมื่อเปรียบเทียบการอุ่นเศษเหล็กจากทั้งสองกรณี ให้ผลการเปรียบเทียบดังรูปที่ 5.33 สำหรับกรณีที่ 2 ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยทั้งหมดของเศษเหล็กมากขึ้นกว่ากรณีแรก ทำให้ลดการใช้พลังงานลงได้ 231 MJ/ton หรือคิดเป็นปริมาณไฟฟ้าเท่ากับ 64 kWh

5.2 กระบวนการอบร้อน (Reheating)

ในขั้นตอนของการผลิตเหล็ก ก่อนที่เหล็กจะถูกแปรรูปโดยการรีดขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์รูปร่างต่างๆ เหล็กเหล่านั้นจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงประมาณ $1,250^{\circ}\text{C}$ โดยเตาอุ่นเหล็ก หรือ เตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) ซึ่งพลังงานความร้อนที่ใช้เพื่อทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น เกิดมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเตา หรือ ก๊าซธรรมชาติ

สำหรับแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาอุ่นเหล็ก ได้มีการปรับปรุงและพัฒนาเทคนิคต่างๆ มาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งหนึ่งในหลายๆ แนวทาง คือ การใช้ Recuperator เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียจากการเผาไหม้ ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกับ อากาศที่จะนำไปใช้เพื่อการเผาไหม้ ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงจึงลดน้อยลง

เพราะฉะนั้น แนวทางในการวิเคราะห์เพื่อหาศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของเตาอุ่นเหล็กสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะมุ่งเน้นไปที่ Recuperator ซึ่งโดยทั่วไป Recuperator ที่ใช้อยู่ในโรงงาน จากข้อมูลการตรวจวัดในอดีต พบว่าประสิทธิผล (Effectiveness) ของ Recuperator ที่ใช้อยู่มีค่าประมาณ 50-55% และหากโรงงานมีการปรับเปลี่ยน Recuperator ที่มีประสิทธิผลสูงขึ้น เช่น เพิ่มขึ้นเป็น 60% 65% และ 70% จะส่งผลต่อการบริโภคเชื้อเพลิงอย่างไร ตลอดจนพลังงานที่สามารถลดลงได้ มีค่าเท่าไร ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์จะอาศัยสมดุลมวลและสมดุลพลังงานเป็นหลักการสำคัญ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

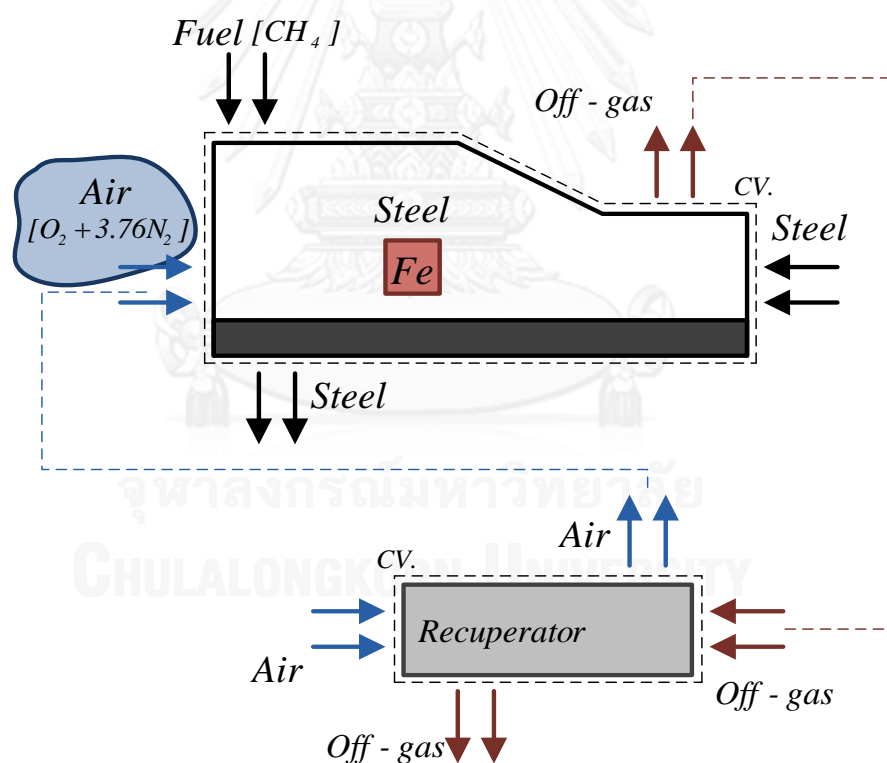
5.2.1 สมดุลมวล (Mass balance)

ปริมาณและวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการอุ่นเหล็กสำหรับโรงงานล้วนแล้วแตกต่างกันตามแต่ละเทคนิคหรือกระบวนการที่แต่ละโรงงานดำเนินการ สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะวิเคราะห์ปริมาณและชนิดของวัตถุดิบในกระบวนการอุ่นผ่านสมดุลมวลและสมดุลพลังงาน ซึ่งประกอบด้วยสมมติฐานต่างๆ เพื่อให้การวิเคราะห์ทำได้ง่ายและสะดวกมากยิ่งขึ้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

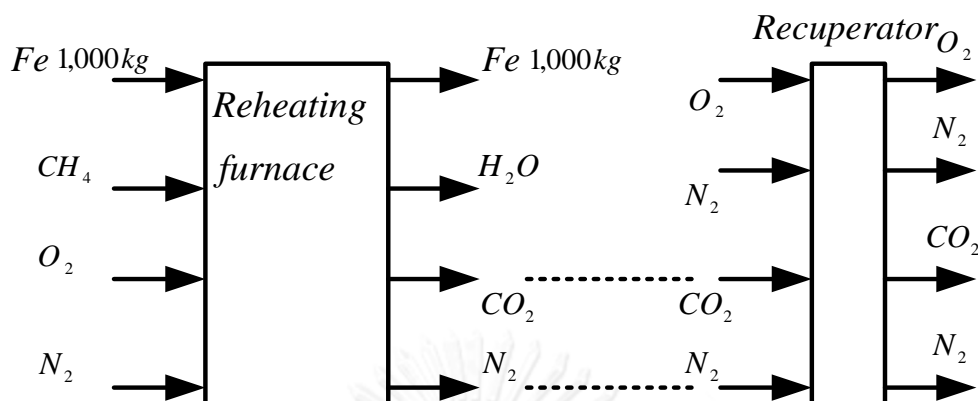
สมมติฐานของกระบวนการอุ่นเหล็ก

1. ระบบที่พิจารณา (System) หรือปริมาตรควบคุม (Control volume) ประกอบไปด้วยเตาอุ่นเหล็ก และ Recuperator ดังแสดงในรูปที่ 5.34
2. เหล็กที่ใช้อุ่น คือ Fe โดยมิได้คำนึงถึงมลทินหรือองค์ประกอบทางเคมีอื่นใดภายในเหล็ก
3. เหล็กไหลเข้าและไหลออกจากระบบหรือเตาอุ่นอย่างต่อเนื่อง

4. เชื้อเพลิงที่ใช้เผาไหม้คือก๊าซธรรมชาติและองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยมีเทน (CH_4) 100%
5. อากาศที่ใช้เผาไหม้ประกอบด้วยก๊าซออกซิเจน 21% และก๊าซไนโตรเจน 79%
6. มีการใส่ออกซิเจนส่วนเกินเข้าไป โดยมีอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติต่อทางทฤษฎี (λ) เป็น 1.15 และจะได้อธิบายรายละเอียดในส่วนต่อไป
7. การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นเป็นแบบสมบูรณ์ ดังนั้นไอเสียที่เกิดขึ้นจึงประกอบด้วย CO_2 , H_2O , O_2 และ N_2
8. ไม่มีการรั่วไหลของเตาอุณหเหล็ก นั้นหมายความว่า ไม่มีมวลสารอื่นใด นอกเหนือจากที่ได้กล่าวมา ไหลเข้าหรือไหลออกจากระบบ



รูปที่ 5.34 ปริมาตรควบคุมของเตา Reheating furnace และ Recuperator



รูปที่ 5.35 สมดุลมวล (Mass balance) ของเตาอุ่นเหล็กขนาด 1 ตัน

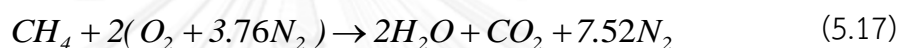
ในขั้นตอนการวิเคราะห์สมดุลมวลของกระบวนการอุ่นเหล็ก 1 ตัน ที่เป็นไปตามเงื่อนไขและสมมติฐานต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว จะยังไม่สามารถทราบได้ว่า การอุ่นเหล็กจากอุณหภูมิประมาณ 25°C ไปเป็น $1,250^{\circ}\text{C}$ จำนวน 1 ตัน ต้องอาศัยเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในปริมาณเท่าใด ดังนั้น สมดุลมวลจึงทราบได้เพียงแต่ชนิด แต่ยังไม่ทราบถึงปริมาณของสารยกเว้นแต่ปริมาณของเหล็ก ที่เข้าและออก มีปริมาณ 1 ตัน ดังรูปที่ 5.35

จากรูปข้างต้น ประกอบด้วยระบบของเตาอุ่น และ Recuperator เมื่อพิจารณาเตาอุ่น จะเห็นว่า สารที่เข้าเตาอุ่น ได้แก่ Fe และสารตั้งต้นของการเผาไหม้คือ CH₄, O₂ และ N₂ และสารที่ออกจากเตาอุ่น ได้แก่ Fe และผลผลิตจากการเผาไหม้ ได้แก่ H₂O, CO₂, N₂ และเมื่อพิจารณา Recuperator จะเห็นว่า มีสารที่ออกจากเตาอุ่น ซึ่งได้แก่ CO₂ และ N₂ จะถูกส่งเข้าสู่ Recuperator เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับ O₂ และ N₂ ที่ถูกส่งเข้ามาภายในเตาอุ่น

วิธีการที่จะทราบได้ถึงปริมาณของเชื้อเพลิงและอากาศที่ต้องใช้เพื่ออุ่นเหล็กให้เป็นไปตามที่ต้องการ ตลอดจนปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ต้องอาศัย สมการการเผาไหม้ รวมถึงการวิเคราะห์สมดุลพลังงานประกอบ ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์จะได้แสดงในหัวข้อต่อไป

5.2.2 การเผาไหม้ (Combustion)

อย่างที่ทราบกันดีว่าเตาอุณหภูมิลึก หรือ เตาเผาเหล็กที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ให้ความร้อนกับเหล็กโดยอาศัยการเผาไหม้จากเชื้อเพลิงหลายประเภท อาทิเช่น น้ำมันเตา หรือ ก๊าซธรรมชาติ และในแต่ละประเภทที่ใช้ ก็มีองค์ประกอบทางเคมีของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ จึงตั้งสมมติฐาน ให้เตาอุณหภูมิลึกใช้ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีเป็นมีเทน (CH_4) 100% เชื้อเพลิงหลัก เพราะฉะนั้น อาจกล่าวได้ว่า ความร้อนที่เกิดขึ้น ได้มาจากการเผาไหม้ของมีเทนกับอากาศ ซึ่งสมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของมีเทนถูกเขียนได้ดังสมการที่ (5.17)

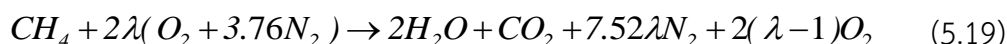


จากสมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ทางด้านบน พบว่า เมื่อใช้มีเทน 1 หน่วย จะต้องใช้อากาศ 2 หน่วย ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางทฤษฎี (AF_{stoic}) แต่ในความเป็นจริงแล้ว การเผาไหม้มีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น ระยะเวลาในการเผาไหม้ ทำให้ต้องเพิ่มปริมาณของอากาศส่วนเกินเข้าไป เพื่อให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และถูกนิยามเป็นอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติ (AF_{actual})

ตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ คือ สัดส่วนเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติต่อทางทฤษฎี (λ) ดังสมการที่ (5.18)

$$\lambda = \frac{AF_{actual}}{AF_{stoic}} \quad (5.18)$$

ดังนั้น สมการการเผาไหม้แบบสมบูรณ์ของมีเทน 1 หน่วย หรือสมการที่ (5.17) เมื่อเพิ่มเติมในส่วนของออกซิเจนส่วนเกินเข้าไป สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น



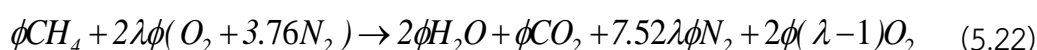
เมื่อใส่ปริมาณออกซิเจนเพิ่มเข้าไปในระบบ ก็จะมีปริมาณออกซิเจนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาเผาไหม้กับมีเทนกลับออกมา และถูกเรียกว่าเป็น ออกซิเจนส่วนเกินซึ่งถูกแทนด้วยพจน์ $2(\lambda - 1)$ ทางด้านขวามือของสมการที่ (5.19) และนอกจากนี้ ในทางปฏิบัติการหาปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่ออกมากับไอเสีย โดยทั่วไปจะใช้เครื่องมือวิเคราะห์หาองค์ประกอบของไอเสีย (flue gas analyzer) ซึ่งจะวัดปริมาณของออกซิเจนส่วนเกินในลักษณะของร้อยละโดยโมลแบบแห้ง (dry basis) กล่าวคือ ไอเสียที่ออกมาจากเตาอุณหภูมิจะถูกกำจัดไอน้ำและความชื้นออกก่อนวิเคราะห์หาองค์ประกอบ ดังนั้น จากสมการการเผาไหม้ในสมการที่ (5.19) สามารถคำนวณหาร้อยละของปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน ($\%O_2$) ได้ด้วยสมการที่ (5.20) นอกจากนี้ สมการที่ (5.20) สามารถจัดรูปใหม่เพื่อหาค่าสัดส่วนของอากาศต่อเชื้อเพลิงในทางปฏิบัติต่อทางทฤษฎี (λ) ได้ตั้งสมการที่ (5.21)

$$\%O_2 = \frac{2(\lambda - 1)}{1 + 7.52\lambda + 2(\lambda - 1)} \quad (5.20)$$

$$\lambda = \frac{2 - (\%O_2)}{2 - 9.52(\%O_2)} \quad (5.21)$$

โดยปกติ เมื่อใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง ค่าปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่เหมาะสมจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2% ถึง 3% [13] และเมื่อแทนค่าปริมาณออกซิเจนส่วนเกินที่เหมาะสมดังกล่าวลงในสมการที่ (5.20) หรือสมการที่ (5.21) จะได้ค่าของ λ มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.09 – 1.15 และจะเลือกค่า λ เท่ากับ 1.15 มาใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

เมื่อทราบปริมาณมีเทนที่ใช้จริงในกระบวนการเผาไหม้ (ϕ) สมการ (5.19) จึงถูกเขียนใหม่ได้เป็น



5.2.3 สมดุลพลังงาน (Energy balance)

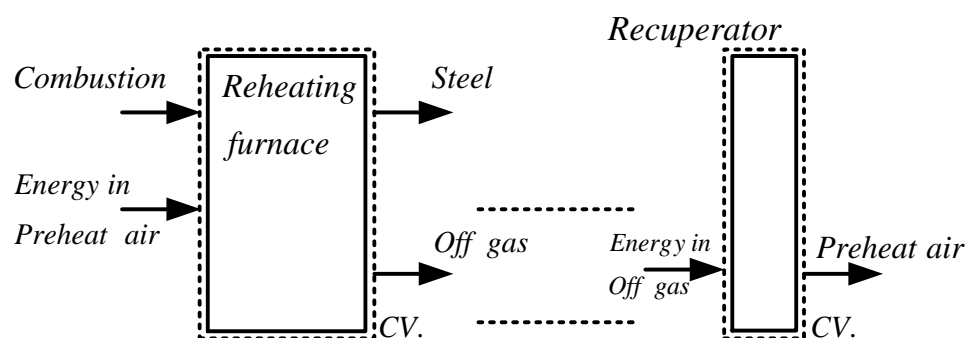
การพิจารณาสมดุลพลังงานของเตาอุ่นเหล็ก จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐานที่ว่า พลังงานความร้อนที่ใส่เข้าไปให้กับระบบ (E_{input}) จะกลายเป็นความร้อนที่ทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น (E_{st}) และความร้อนที่ถูกปล่อยออกมาไปกับไอเสีย (E_{output}) และโดยสมมติฐานอีกประการของสมดุลพลังงาน คือ ไม่มีความร้อนอื่นใดรั่วไหลออกจากระบบในลักษณะต่างๆ เพราะฉะนั้น สมดุลพลังงานดังกล่าว สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (5.23)

$$E_{input} = E_{st} + E_{output} \quad (5.23)$$

พลังงานความร้อนที่ใส่ให้กับระบบ เป็นพลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ ($E_{combustion}$) ระหว่างเชื้อเพลิง (มีเทน) กับอากาศที่อุณหภูมิ $25^{\circ}C$ ทำให้อุณหภูมิภายในเตา มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ $1,250^{\circ}C$ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการรีดขึ้นรูปในกระบวนการต่อไป โดยพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเตาจะถูกถ่ายเทไปสู่เหล็ก (E_{steel}) และความร้อนที่เหลือจะถูกปล่อยออกไปกับไอเสีย ($E_{flue\ gas}$)

เมื่อทราบถึงที่มาและที่ไปของพลังงานในกระบวนการอุ่นเหล็ก สมการที่ (5.23) จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (5.24)

$$E_{combustion} = E_{steel} + E_{flue\ gas} \quad (5.24)$$



รูปที่ 5.36 สมดุลพลังงาน (Energy balance) ของเตาอุ่นเหล็ก

เมื่อมีการปรับปรุงและพัฒนาการใช้พลังงานโดยเพิ่ม Recuperator เข้าไปในระบบ ซึ่ง Recuperator มีหน้าที่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างไอเสียกับอากาศ เป็นการดึงความร้อนที่ถูกปล่อยทิ้งและนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้อากาศที่จะใช้สำหรับเผาไหม้กับเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น ปริมาณการบริโภคน้ำมันเชื้อเพลิงก็จะลดน้อยลงได้ พลังงานทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับระบบถูกเขียนเป็นแผนภาพสมดุลพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 5.36

เมื่อมีการเพิ่ม Recuperator ส่งผลให้อากาศที่ใช้เพื่อเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น (preheat air) ทำให้พลังงานที่ใส่ให้กับระบบมีพลังงานอีกประเภทเพิ่มขึ้นมา คือ พลังงานจากอากาศร้อน ($E_{preheatair}$) ดังนั้น สมการสมดุลพลังงานจึงถูกปรับแก้ใหม่ได้เป็น

$$E_{combustion} + E_{preheatair} = E_{steel} + E_{flue\ gas} \quad (5.25)$$

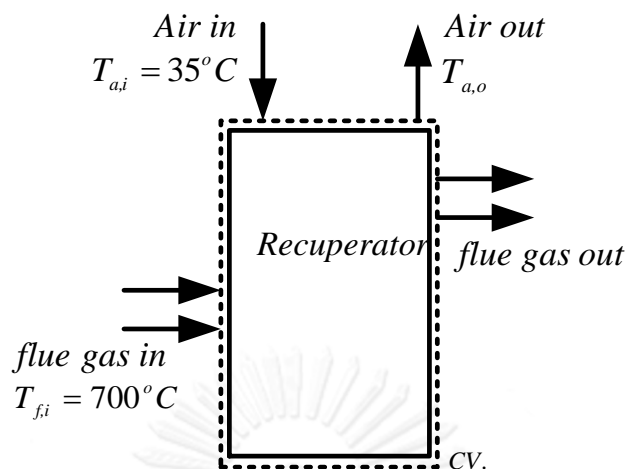
สำหรับ Recuperator หรือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในรูปที่ 5.37 ที่ถูกเพิ่มเข้ามาในกระบวนการอุ่นเหล็ก เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนภายใน Recuperator ระหว่างอากาศที่ไหลเข้า ($T_{a,i}$) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ $35^{\circ}C$ กับไอเสีย (Flue gas) ที่ไหลเข้า ($T_{f,i}$) ซึ่งจากข้อมูลการตรวจวัดจริงในอดีต พบว่า ไอเสียส่วนใหญ่มีอุณหภูมิประมาณ $700^{\circ}C$ ซึ่งถือว่าเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง และนอกจากนี้ จากข้อมูลของการตรวจวัดยังได้ระบุอุณหภูมิของอากาศขาออก ($T_{a,o}$) จากข้อมูลที่กล่าวมาทั้งหมดจะสามารถประมาณประสิทธิภาพ (Effectiveness) ของ Recuperator ได้

นอกจากนี้ เมื่อประมาณค่าอุณหภูมิอะเดียเบติก (Adiabatic flame temperature) หรืออุณหภูมิของเปลวไฟของการเผาไหม้ภายในเตาอบร้อนจากหัวเผา (Burner) ที่มีประสิทธิภาพของ Recuperator (ϵ_{recup}) เป็นร้อยละ 50 และร้อยละ 70 พบว่ามีค่าอุณหภูมิอะเดียเบติกประมาณ $2,090^{\circ}C$ และ $2,175^{\circ}C$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงมาก

ประสิทธิภาพของ Recuperator (ϵ_{recup}) นิยามได้ดังสมการที่ (5.26) และเมื่อจัดรูปสมการใหม่ เพื่อหาอุณหภูมิของอากาศขาออกจาก Recuperator ($T_{a,o}$) ได้ดังสมการที่ (5.27)

$$\epsilon_{recup} = \frac{T_{a,o} - T_{a,i}}{T_{f,i} - T_{a,i}} \quad (5.26)$$

$$T_{a,o} = \epsilon_r (T_{f,i} - T_{a,i}) + T_{a,i} \quad (5.27)$$



รูปที่ 5.37 การแลกเปลี่ยนความร้อนของอากาศกับไอเสียใน Recuperator

สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณการใช้เชื้อเพลิงที่เหมาะสม จะอาศัยสมการที่ (5.24) และ (5.25) ซึ่งเป็นสมการสมดุลพลังงาน กล่าวคือ ผลรวมของพลังงานในเทอมทางด้านซ้ายมือต้องเท่ากับเทอมทางด้านขวามือของสมการ ดังนั้น ปริมาณการใช้เชื้อเพลิง เมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว จะต้องให้พลังงานออกมา ($E_{combustion}$) กับระบบ เท่ากับพลังงานที่ต้องใช้เพื่อทำให้เหล็กมีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิที่กำหนด (E_{steel}) รวมกับพลังงานความร้อนที่ถูกปล่อยออกมากับไอเสีย ($E_{flue\ gas}$)

ในการวิเคราะห์ จะแบ่งออกเป็นกรณีต่างๆ คือ กรณีที่ยังไม่มีการใช้ Recuperator ดังนั้น อากาศที่ใช้สำหรับเผาไหม้ จะมีอุณหภูมิและความดันที่สภาวะมาตรฐาน กล่าวคือ มีความดัน 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 25°C และเมื่อใช้สมดุลพลังงานจากสมการที่ (5.24) พบว่า ต้องใช้เชื้อเพลิงหรือมีเทนปริมาณ 38.335 กิโลกรัม

กรณีต่อไป คือ กรณีที่มีการใช้ Recuperator และสำหรับ Recuperator ที่เลือกนำมาวิเคราะห์จะสนใจ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 50% ถึง 70% ดังนั้น เมื่อมีการใช้ Recuperator ส่งผลให้อากาศที่ใช้สำหรับเผาไหม้มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เช่น เมื่อใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพ 50% อุณหภูมิอากาศขาออกจะมีค่า 367.5°C ทำให้ พลังงานขาเข้าเตาอุ่นมีพลังงานจากอากาศร้อน ($E_{preheatair}$) เพิ่มเติมเข้ามา เมื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานโดยอาศัยสมการที่ (5.25) พบว่า เมื่อ $E_{preheatair}$ เพิ่มขึ้นทำให้ $E_{combustion}$ ลดน้อยลงได้ นอกจากนี้ เมื่อใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพอยู่ในช่วง 50% ถึง 70% จะใช้ปริมาณการบริโภคมีเทน (Methane consumption) อยู่ในช่วง 24.83 – 27.65 กิโลกรัม ซึ่งรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 5.13

ตารางที่ 5.13 แสดงประสิทธิภาพ Recuperator อุณหภูมิอากาศขาออก ปริมาณการใช้มีเทน และพลังงานจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง

| ϵ_{recup} | $T_{a,o}$ [$^{\circ}C$] | Methane consumption [kg] | Combustion Energy [MJ/ton] |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 0* | 25.00 | 38.335 | 1,922.3 |
| 0.50 | 367.50 | 27.648 | 1,386.4 |
| 0.55 | 400.75 | 26.890 | 1,348.4 |
| 0.60 | 434.00 | 26.170 | 1,312.3 |
| 0.65 | 467.25 | 25.482 | 1,227.8 |
| 0.70 | 500.50 | 24.828 | 1,245.0 |

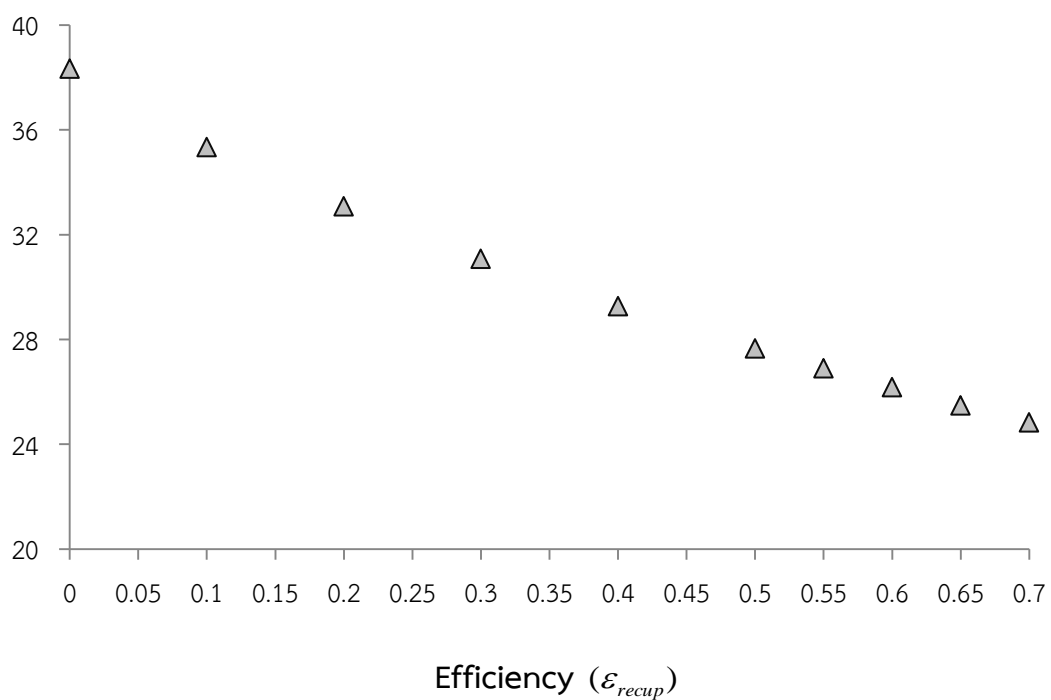
*ไม่มีการใช้ Recuperator

5.2.4 ผลการประมาณ

เมื่อวิเคราะห์สมดุลพลังงานดังที่ได้กล่าวมา พบว่า เพื่อให้พลังงานที่เข้าระบบสมดุลกับพลังงานที่ออกจากระบบ สำหรับ Recuperator ซึ่งมีประสิทธิภาพค่าต่างๆ จะต้องมีการปรับเปลี่ยนปริมาณการใช้เชื้อเพลิงให้เป็นไปตามประสิทธิภาพของ Recuperator นั้นๆ กล่าวคือ ยิ่ง Recuperator ที่ใช้มีประสิทธิภาพต่ำ ก็จะต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงมาก ในทางกลับกัน เมื่อ Recuperator ที่ใช้มีประสิทธิภาพสูง ปริมาณการบริโภคเชื้อเพลิงก็จะลดน้อยลง ผลของประสิทธิภาพ Recuperator ต่อการบริโภคเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 5.38

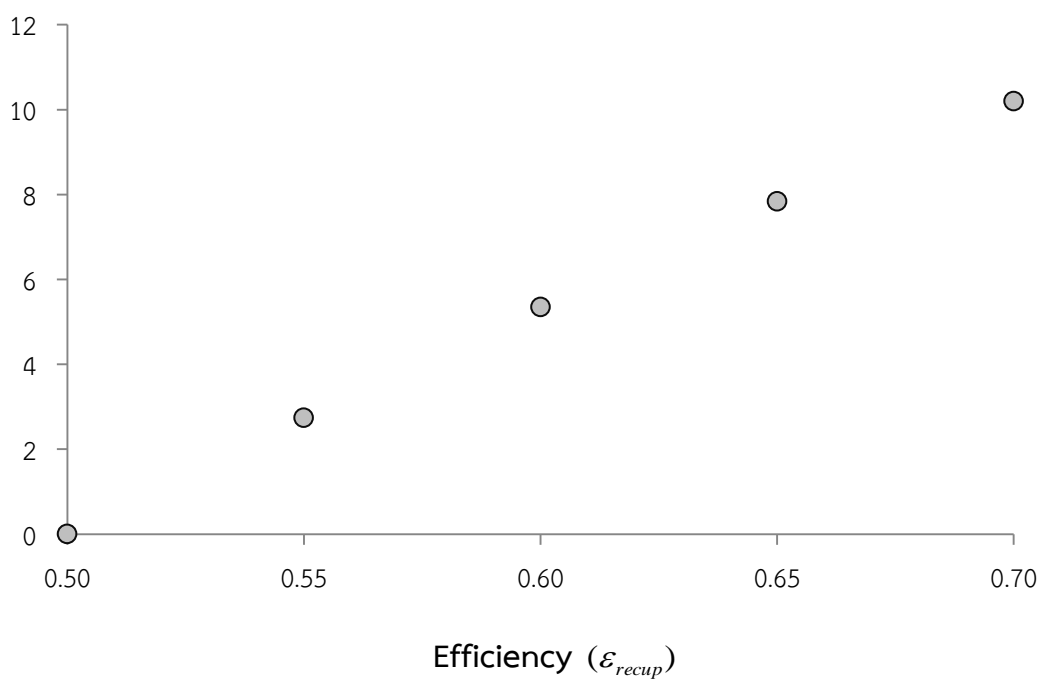
เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของ Recuperator ในช่วงที่พบเห็นได้ทั่วไปตามโรงงาน ซึ่งเป็น Recuperator ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 50% และเมื่อพิจารณารูปที่ 5.39 ซึ่งได้แสดงร้อยละของเชื้อเพลิงที่ลดลง จะเห็นว่า ยิ่ง Recuperator มีประสิทธิภาพสูงมากขึ้นเท่าใด ร้อยละของเชื้อเพลิงที่ลดลงก็จะยิ่งมากตามไปด้วย

Methane consumption (kg)



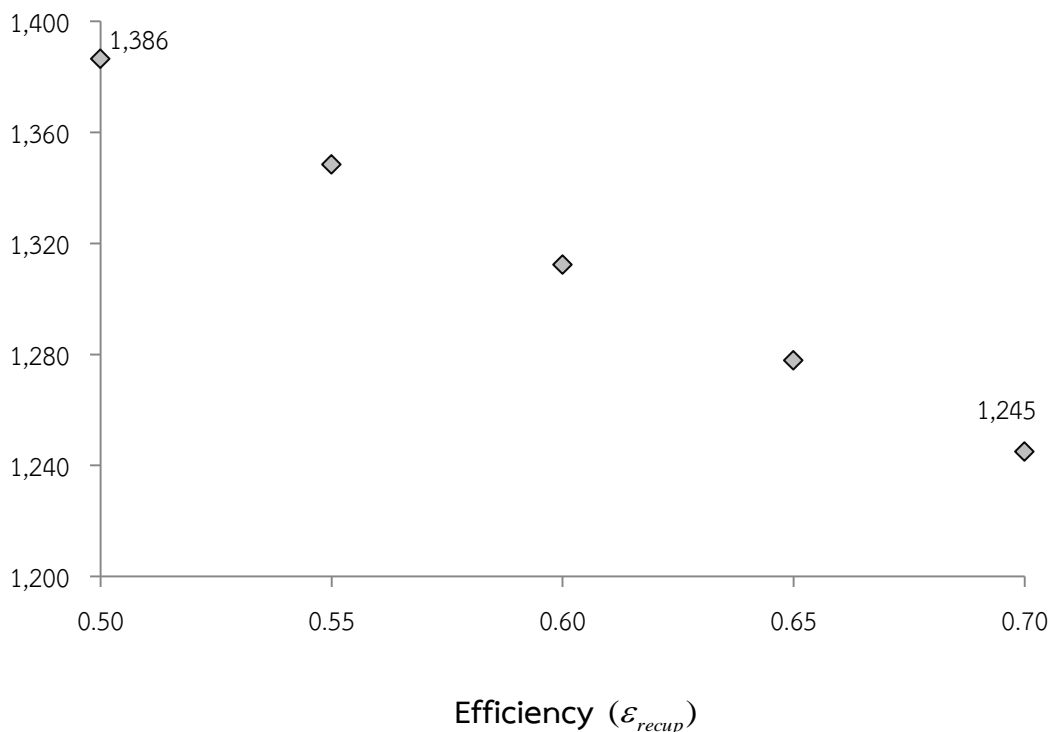
รูปที่ 5.38 ปริมาณการบริโภคเชื้อเพลิง (มีเทน) เมื่อ Recuperator มีประสิทธิภาพค่าต่างๆ กัน

Percentage of fuel reduction



รูปที่ 5.39 ร้อยละของเชื้อเพลิงที่ลดลง

Combustion Energy (MJ/ton)

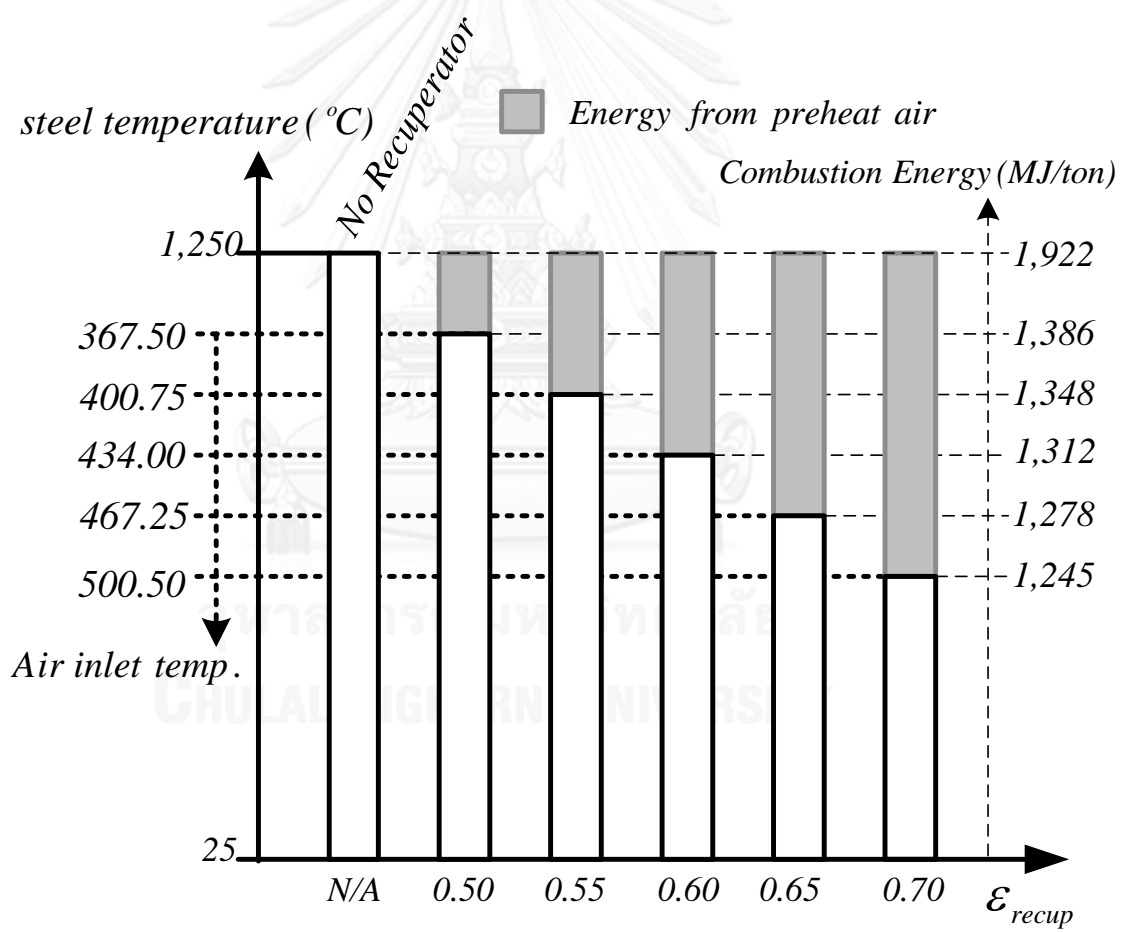


รูปที่ 5.40 ประสิทธิภาพของ Recuperator ต่อพลังงานที่ต้องการจากการเผาไหม้

จากผลการประมาณดังรูปที่ 5.40 พบว่า ถ้า Recuperator ที่ใช้อยู่มีประสิทธิภาพเพียง 50% การอุ่นเหล็กต้องอาศัยพลังงานจากการเผาไหม้ถึง 1,390 MJ/ton โดยประมาณ แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น ประสิทธิภาพ 70% พบว่า จะใช้พลังงานจากการเผาไหม้เพียง 1,245 MJ/ton นั้นหมายความว่า การเปลี่ยน Recuperator ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจาก 50% เป็น 70% สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ถึง 145 MJ/ton หรือเทียบเท่ากับมีเทนปริมาณ 3 กิโลกรัมโดยประมาณ ต่อการผลิตเหล็ก 1 ตัน

จากแนวทางในการลดการใช้พลังงานโดยการเพิ่มประสิทธิภาพของ Recuperator จากปกติที่ 50% - 55% เป็น 60% 65% และ 70% พบว่า ปริมาณการใช้พลังงานในการอุ่นเหล็กมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อประสิทธิภาพของ Recuperator มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.40 เพราะฉะนั้น กราฟนี้มีประโยชน์ต่อผู้ประกอบการที่สามารถประเมินศักยภาพการลดการใช้พลังงานเมื่อมีการเปลี่ยนไปใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้

รูปที่ 5.41 แสดงให้เห็นถึงพลังงานจากการเผาไหม้และพลังงานจากอากาศร้อนเมื่อใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพต่างกัน รวมถึงเมื่อไม่มีการใช้ Recuperator เมื่อพิจารณาทางด้านซ้ายของรูปที่ 5.41 ซึ่งได้นำเสนอช่วงของอุณหภูมิเหล็ก (Steel temperature) ที่ต้องอุ่นจาก 25 °C ไปเป็น 1,250 °C และ นอกจากนี้ ยังได้นำเสนอ ช่วงของอุณหภูมิอากาศขาเข้าเตาอุ่น (Air inlet temp.) หรืออากาศที่ใช้สำหรับเผาไหม้ เมื่อใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพค่าต่างๆ และในด้านขวามือของรูป ได้นำเสนอพลังงานจากการเผาไหม้ที่ต้องการ เมื่อใช้ Recuperator และ ไม่ใช้ Recuperator ซึ่งจะเห็นได้ว่า ยิ่ง Recuperator ที่ใช้ มีประสิทธิภาพสูงเท่าไร จะยิ่งได้พลังงานจากอากาศร้อนมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ สัดส่วนการใช้พลังงานจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก็จะยิ่งลดน้อยลง



รูปที่ 5.41 พลังงานจากการเผาไหม้และพลังงานจากอากาศร้อน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 การใช้พลังงานต่อผลผลิตในภาพรวม

ภาพรวมของค่าการใช้พลังงานและดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตในอุตสาหกรรมเหล็กตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2553 มีค่าใกล้เคียงกัน จะสลับเพิ่มมากขึ้นบ้างหรือลดน้อยลงบ้าง โดยค่าในปีแรกจะน้อยกว่าปีอื่นๆ สาเหตุประการหนึ่ง เนื่องจากข้อมูลในปีแรกๆค่อนข้างขาดหาย บางโรงงานไม่ได้ให้ข้อมูลมา ไม่ทราบด้วยเหตุผลประการใด ส่วนค่าในปีหลังๆ ข้อมูลมีความครบถ้วนค่อนข้างมาก ค่าที่ได้จึงค่อนข้างใกล้เคียงกัน และสำหรับปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กรวมตั้งแต่ปี พ.ศ.2548-2553 มีทั้งเพิ่มขึ้นและลดลง โดยมีค่าอยู่ระหว่างหกแสนถึงแปดแสนตัน ส่วนในปีแรกมีค่าน้อย ก็เพราะความไม่ครบถ้วนของข้อมูลเช่นเดียวกัน

ค่าดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของแต่ละกระบวนการพบว่า กระบวนการผลิตที่มีเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า คือ กระบวนการผลิตที่ 1 3 5 และ 7 ให้ค่า SEC ที่สูงมากกว่ากระบวนการอื่นๆ ในขณะที่กระบวนการผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็นให้ค่า SEC น้อยที่สุด และสำหรับค่า SEC เฉลี่ยตลอดทั้ง 6 ปีของแต่ละกระบวนการผลิตส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 6.1 โดยเฉพาะกระบวนการผลิตที่ 3 ซึ่งมีค่าลดลงถึง 26% และมีเพียง 6 กระบวนการผลิตที่มีค่า SEC เฉลี่ยมากกว่าค่าของช่วงปี พ.ศ.2542-2547 ได้แก่ กระบวนการผลิตที่ 7 8 9 13 14 และ 15

ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบค่า SEC ของอดีตและปัจจุบัน

| กระบวนการที่ | SEC ₂₅₄₂₋₂₅₄₇ | SEC ₂₅₄₈₋₂₅₅₃ | กระบวนการที่ | SEC ₂₅₄₂₋₂₅₄₇ | SEC ₂₅₄₈₋₂₅₅₃ | |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------------------|-------|
| 1 | ↓ | 5,095 | 2 | ↓ | 2,075 | 1,910 |
| 3 | ↓ | 6,442 | 4 | ↓ | 3,212 | 2,516 |
| 5 | ↓ | 6,051 | 6 | ↓ | 2,886 | 2,341 |
| 7 | ↑ | 4,710 | 8 | ↑ | 2,246 | 2,438 |
| 9 | ↑ | 1,787 | 10 | ↓ | 1,493 | 1,262 |
| 11 | ↓ | 1,300 | 12 | ↓ | 876 | 685 |
| 13 | ↑ | 21 | 14 | ↑ | 235 | 244 |
| 15 | ↑ | 1,670 | | | | |

6.2 การใช้พลังงานต่อผลผลิตในรายกระบวนการผลิต

ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า ให้ค่าที่ค่อนข้างคงที่ในทุกๆชนิดผลิตภัณฑ์ ไม่ว่าจะปริมาณการผลิตจะมากหรือน้อยก็ตาม ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี ที่ค่า SEC ขึ้นกับเฉพาะค่าผลต่างของอุณหภูมิของเหล็กในการหลอม และโดยส่วนใหญ่ผลต่างของอุณหภูมิก่อนข้างมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่า สัดส่วนการใช้พลังงานจากไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด 59% รองลงมาคือพลังงานจากก๊าซออกซิเจน 27%

การใช้พลังงานในการอบร้อนผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูปประเภทเหล็กทรงแบน (Flat products) มีการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตมากกว่าเหล็กทรงยาว (Long products) ค่า SEC ของกระบวนการอบร้อนมีค่าค่อนข้างแตกต่างกัน ขึ้นกับอุณหภูมิของเหล็กก่อนเข้าเตา ด้วยผลการประมาณจากแบบสอบถามพบว่า กระบวนการผลิตที่ 7 มีค่า SEC น้อยกว่ากระบวนการผลิตอื่น เป็นผลมาจากการผลิตมีความต่อเนื่อง อุณหภูมิของเหล็กก่อนเข้าเตาอุ่นมีค่าสูง ทำให้ใช้พลังงานในการอบต่อผลผลิตน้อยกว่า ซึ่งวิธีการถูกเรียกว่า “Hot charge” ในขณะที่เหล็กก่อนเข้าเตาอุ่นหากมีอุณหภูมิต่ำหรือเท่ากับอุณหภูมิห้องจะถูกเรียกว่าเป็น “Cold charge” ในกระบวนการอบร้อนใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง 100%

สำหรับกระบวนการรีดร้อน จะใช้พลังงานจากไฟฟ้าเพื่อรีดเป็นหลัก ผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถาม พบว่าการรีดจนได้เป็นเหล็กถวดจะให้ค่าพลังงานต่อผลผลิตมากที่สุด และมากกว่าเหล็กเส้นอย่างเห็นได้ชัด เหตุผลเพราะ การรีดเหล็กถวด จะต้องรีดเพื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางให้มีขนาดเล็กลงมากกว่าขนาดของเหล็กเส้น และสำหรับ การรีดเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ที่ปริมาณการผลิตเท่ากันกลับมีลักษณะของการใช้พลังงานที่ค่อนข้างแตกต่างกัน เพราะการใช้พลังงานนี้ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของชิ้นงานหรือเหล็กโครงสร้างที่ถูกรีด ชิ้นงานที่มีรูปร่างหรือโครงสร้างซับซ้อนก็จะใช้พลังงานต่อผลผลิตที่มากกว่า ส่วนการรีดเหล็กแผ่นรีดร้อนจะใช้พลังงานต่อผลผลิตค่อนข้างน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ

สำหรับกระบวนการรีดเย็น จะใช้พลังงานจากไฟฟ้าในการรีดเป็นพลังงานหลัก เช่นเดียวกับการรีดร้อน ผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถาม พบว่าค่าที่น้อยที่สุดเป็นของผู้ประกอบการ 09CR02 โดยมีค่าเท่ากับ 532 MJ/ton

สำหรับการใช้พลังงานต่อผลผลิตในการผลิตทั้ง HDG และ GSP พบว่า ค่า SEC จะขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องในการผลิต เพราะหากการผลิตขาดความต่อเนื่อง ผู้ประกอบการยังคงต้องเปิดเตา เพื่ออุ่นสังกะสีให้เหลวอยู่ตลอดเพื่อรอการผลิต ทำให้พลังงานส่วนนี้สูญเสียไปโดยไม่รู้ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ สำหรับสัดส่วนของการใช้พลังงานชนิดต่างๆ จะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือวิธีการในการผลิต ไม่ว่าจะ เป็น HDG หรือ GSP จะใช้พลังงานความร้อนมากกว่าพลังงานจากไฟฟ้า โดยคิดเป็นอัตราส่วน 84% : 16% และ 99% : 1% ตามลำดับ

สำหรับกระบวนการสุดท้าย คือกระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีทางไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการเคลือบด้วยสังกะสี (EG) หรือการเคลือบด้วยดีบุกและโครเมียม (TPTF) มีสัดส่วนของการใช้พลังงานจากไฟฟ้าเทียบกับพลังงานรวมทั้งหมดมากกว่าการใช้พลังงานความร้อน โดยผลการประมาณค่า SEC จากแบบสอบถามพบว่า การเคลือบด้วยโครเมียมใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตทั้งหมดน้อยที่สุด ในขณะที่การเคลือบด้วยสังกะสีมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อผลผลิตมากที่สุด

6.3 การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงาน

การปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้สนใจเฉพาะการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานความร้อนเป็นหลัก ซึ่งพบว่า ในการผลิต กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อนและมีการใช้พลังงานรวมมากเป็นอันดับต้นๆ คือ กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และกระบวนการอบร้อน

เมื่อพิจารณาสมดุลมวลและพลังงานจากแบบจำลองของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า พบว่า พลังงานที่ใส่ให้กับระบบทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1,969 MJ/ton และมีสัดส่วนการใช้พลังงานจากไฟฟ้า พลังงานจากการเผาไหม้ และพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (พลังงานจากก๊าซออกซิเจน) เป็น 59% 20% และ 21% ตามลำดับ โดยพลังงานที่เหล็กได้รับคิดเป็น 1,350 MJ/ton และที่ออกมากับไอเสียถึง 378 MJ/ton คิดเป็น 20% ของพลังงานทั้งหมด

การปรับปรุงและพัฒนากระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะใช้แนวทางของการอุ่นเศษเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงก่อนเข้าเตาหลอม โดยใช้ไอเสียที่ออกมาจากเตาหลอมซึ่งมีอัตราการไหลของไอเสียเท่ากับ 6.4 กิโลกรัมต่อวินาที และมีอุณหภูมิโดยประมาณ $1,500^{\circ}\text{C}$ และจากแบบจำลองของการอุ่นเศษเหล็ก ซึ่งให้เศษเหล็กมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร บรรจุในภาชนะอุ่นขนาดสูง 2 เมตร ความกว้างและความยาว 3.5 เมตร มีมวลรวมกันประมาณ 100 ตัน และสามารถอุ่นเศษเหล็กในเวลา 50 นาที ให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นเป็น 757°C สามารถลดการใช้พลังงานในการหลอมลงได้ถึง 386.9 MJ หรือคิดเป็นปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 107.5 kWh และเมื่อปรับปรุงหรือประยุกต์แบบจำลองอีกครั้ง โดยปรับเปลี่ยนขนาดของภาชนะอุ่นให้มีความสูงน้อยลงเป็น สูง 1 เมตร ความกว้างและความยาวเป็น 5 เมตร สามารถอุ่นเศษเหล็กในเวลาเท่ากันให้มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นถึง $1,134^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำให้ลดการใช้พลังงานลงได้ถึง 617.8 MJ หรือคิดเป็นปริมาณไฟฟ้าเท่ากับ 172 kWh ต่อการอุ่นเหล็กจำนวน 100 ตัน

ตารางที่ 6.2 สรุปการปรับปรุงและพัฒนาของกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า

| กระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า | |
|---|--|
| วิธีการ; การอุ่นเศษเหล็ก (Scrap preheating) | |
| รายละเอียด | ผลที่ได้ |
| <ul style="list-style-type: none"> - ใช้ไอเสียที่ออกมาจากเตาหลอม - อัตราการไหลและอุณหภูมิของไอเสียเท่ากับ 6.4 และ 1,500°C ตามลำดับ - เศษเหล็กทรงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง(ϕ) เท่ากับ 0.05 m. - อุ่นเศษเหล็กในเวลา 50 นาที - ภาชนะอุ่นขนาด สูง 2 m. ความกว้างและความยาว 3.5 m. มีมวลรวมกันประมาณ 100 ตัน | <ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็กหลังการอุ่นสูงขึ้นเป็น 757°C - สามารถลดการใช้พลังงานในการหลอมลงได้ถึง 386.9 MJ หรือคิดเป็นปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 107.5 kWh - รายละเอียดของพลังงานที่ลดลงพิจารณาเพิ่มเติมได้จากรูปที่ 5.28 |
| <ul style="list-style-type: none"> - ปรับขนาดของภาชนะอุ่นใหม่ โดยให้มีขนาด สูง 1 m. ความกว้างและความยาว 5 m. มีมวลรวมกันประมาณ 100 ตัน - ด้วยเงื่อนไขอื่นๆ เช่นเดียวกัน | <ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิเฉลี่ยของเศษเหล็กสูงขึ้นเป็น 1,134°C - สามารถลดการใช้พลังงานในการหลอมลงได้ถึง 617.8 MJ หรือคิดเป็นปริมาณการใช้ไฟฟ้าเท่ากับ 172 kWh - รายละเอียดของพลังงานที่ลดลงพิจารณาเพิ่มเติมได้จากรูปที่ 5.33 |

สำหรับแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาอุ่นเหล็ก หรือเตาเผาเหล็ก (Reheating furnace) โดยการเพิ่มประสิทธิภาพ (Effectiveness) ของ Recuperator หรือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากที่ใช้อยู่ทั่วไป ซึ่งประสิทธิภาพมีค่าประมาณ 50-55% เพิ่มเป็น 60% 65% และ 70% เพื่อดูว่าการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพส่งผลต่อการบริโภคเชื้อเพลิงอย่างไร ซึ่งพบว่า ถ้าใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพเพียง 50% จากสมมูลมวลและพลังงานทำให้ได้ว่าการอุ่นเหล็กต้องอาศัยพลังงานจากการเผาไหม้ถึง

1,390 MJ/ton จากเชื้อเพลิง (มีเทน) จำนวน 27.6 กิโลกรัมต่อตันเหล็ก แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น ประสิทธิภาพ 70% พบว่า จะใช้พลังงานจากการเผาไหม้เพียง 1,245 MJ/ton จากเชื้อเพลิง 24.8 กิโลกรัมต่อตันเหล็ก ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ถึง 145 MJ/ton หรือเทียบเท่ากับมีเทนปริมาณ 3 กิโลกรัมโดยประมาณ ต่อการผลิตเหล็ก 1 ตัน

ตารางที่ 6.3 สรุปการปรับปรุงและพัฒนาของกระบวนการอบร้อน

| กระบวนการอบร้อน | |
|---|---|
| วิธีการ; เปลี่ยนประสิทธิภาพของ Recuperator (Changing Efficiency of Recuperator) | |
| รายละเอียด | ผลที่ได้ |
| <ul style="list-style-type: none"> - เพิ่มประสิทธิผลของ Recuperator จากที่ใช้อยู่ทั่วไป ซึ่งประสิทธิผลมีค่าประมาณ 50-55% เพิ่มเป็น 60% 65% และ 70% เพื่อดูว่า ผลของการเพิ่มขึ้นของประสิทธิผลส่งผลต่อการบริโภคเชื้อเพลิงอย่างไร | <ul style="list-style-type: none"> - ถ้าไม่ใช้ Recuperator ต้องใช้พลังงานจากการเผาไหม้ถึง 1,922 MJ/ton - ถ้าใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพเพียง 50% อาศัยพลังงานจากการเผาไหม้ 1,390 MJ/ton จากเชื้อเพลิงจำนวน 27.6 <i>kg/ton</i> - ใช้ Recuperator ที่มีประสิทธิภาพ 70% จะใช้เชื้อเพลิง 24.8 กิโลกรัมต่อการผลิตเหล็ก 1 ตัน คิดเป็นพลังงานจากการเผาไหม้เท่ากับ 1,245 MJ/ton - สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ถึง 145 MJ/ton หรือเทียบเท่ากับมีเทนปริมาณ 3 กิโลกรัมโดยประมาณ ต่อการผลิตเหล็ก 1 ตัน |

6.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เครื่องมือที่ใช้เพื่อเก็บข้อมูลการใช้พลังงานและปริมาณการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็ก ตลอดทั้งงานวิจัยนี้คือ แบบสอบถาม โดยปัญหาที่พบเห็นเกี่ยวกับแบบสอบถามได้แก่

1. ปัญหาและข้อเสนอแนะในส่วนของแบบสอบถาม

- ปัญหา; ความชัดเจน ความครบถ้วน

เนื่องจากอุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมที่กว้าง มีการผลิตผลิตภัณฑ์หลายประเภท และแต่ละประเภทก็มีวิธีการที่จำเพาะแตกต่างกันออกไป ข้อมูลที่ต้องการจากผู้ประกอบการก็ต้องมีความแตกต่างที่จำเพาะลงไป โดยแบบสอบถามที่เห็นยังมีความจำเพาะของคำถามในแต่ละกระบวนการผลิตน้อย มีการถามข้อมูลในเชิงลึกของกระบวนการต่าง ๆ น้อย ซึ่งในบางครั้ง การคำนวณอาจต้องใช้ข้อมูลที่จำเพาะเหล่านั้น เพื่อให้การคำนวณทำได้สะดวกและละเอียดมากยิ่งขึ้น

- วิธีการแก้ไขปัญหา; ในการออกแบบสอบถาม อาจให้ผู้เชี่ยวชาญในด้านต่างๆ เช่น ด้านการผลิต หรือด้านการวิเคราะห์พลังงานมีส่วนร่วมในการออกแบบสอบถาม ซึ่งจะช่วยให้ประเด็นที่ต้องการสอบถามมีความชัดเจนและครบถ้วนมากยิ่งขึ้น

2. ปัญหาและข้อเสนอแนะในส่วนของข้อมูลที่ได้รับจากผู้ประกอบการ

- ปัญหา; ความชัดเจนของข้อมูล

แบบสอบถามที่ได้รับกลับมามีทั้งที่เป็นแบบเขียนด้วยมือและแบบพิมพ์ โดยแบบสอบถามที่ผู้ประกอบการเขียนตอบกลับมามักเกิดไม่ชัดเจน มีความคลาดเคลื่อนสูง ทำให้อาจเกิดความสับสนและความผิดพลาดของข้อมูลอันเนื่องมาจากลายมือ

- วิธีการแก้ไขปัญหา; ในการตอบแบบสอบถาม อาจต้องระบุหรือบังคับให้ผู้ประกอบการตอบแบบสอบถามโดยการพิมพ์ เพื่อความชัดเจนของข้อมูลต่างๆ

- ปัญหา; การเผยแพร่ข้อมูลสู่สาธารณะ

นับเป็นสิ่งสำคัญของการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยแบบสอบถาม เพราะถ้าข้อมูลต่างๆ สามารถเผยแพร่สู่สาธารณะได้มากเท่าใด การนำข้อมูลเหล่านั้นมาใช้วิเคราะห์ เพื่อการสรุปผล หรือหาวิธีการลดการใช้พลังงานจะทำได้ง่ายมากขึ้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้ว ข้อมูลต่างๆ ของ

อุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย ยังไม่ถูกเปิดเผยเท่าที่ควร อาจเป็นเพราะเหตุผลทางด้านการแข่งขัน

- วิธีการแก้ไขปัญหา; อาจใช้องค์กรกลางเป็นส่วนในการรวบรวมข้อมูล คัดเลือก และเผยแพร่ข้อมูล ผู้ประกอบการของอุตสาหกรรมเหล็กจำเป็นต้องส่งข้อมูลที่ครบถ้วนและถูกต้อง ซึ่งองค์กรกลางอาจสงวนชื่อผู้ประกอบการไว้ เพื่อประโยชน์ในด้านการแข่งขัน

- ปัญหา; ความถูกต้องของข้อมูล

จากการพิจารณาพบว่า ข้อมูลของแบบสอบถามบางฉบับมีความผิดพลาดเกี่ยวกับหน่วยของข้อมูลให้ผู้ประกอบการได้ให้มา โดยแบบสอบถามได้ระบุหน่วยของปริมาณต่างๆที่สอบถามไว้ให้แล้ว แต่ผู้ประกอบการกลับให้ข้อมูลในหน่วยอื่นมา เช่น แบบสอบถามถามข้อมูลในหน่วยตันต่อปี แต่ผู้ประกอบการให้ข้อมูลในหน่วยตันมา หรือ แบบสอบถามถามข้อมูลในหน่วยลิตรแต่ผู้ประกอบการได้ให้ข้อมูลในหน่วยลูกบาศก์เมตร เป็นต้น ทำให้ข้อมูลที่จะนำมาคำนวณ อาจให้ผลที่ผิดพลาดได้

- วิธีการแก้ไขปัญหา; แบบสอบถามที่ให้ผู้ประกอบการตอบนั้นมีการระบุหน่วยให้อาจเป็นเหตุทำให้ผู้ประกอบการไม่ได้สนใจตรงจุดนี้และให้ข้อมูลซึ่งมีหน่วยคนละหน่วยกับที่ระบุ เพื่อแก้ปัญหาคำถามความถูกต้องของหน่วย อาจให้ผู้ประกอบการระบุหน่วยเอง ว่าปริมาณต่างๆมีหน่วยเป็นอะไร แต่ก็อาจส่งผลกระทบต่อความยุ่งยากในการแปลงหน่วย

3. ปัญหาและข้อเสนอแนะในส่วนของการวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางในการปรับปรุงและพัฒนา

ในการวิเคราะห์เพื่อหาศักยภาพในการลดการใช้พลังงานของทั้งกระบวนการหลอมด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าและกระบวนการอบร้อน มีข้อมูลหรือตัวแปรทางด้านเทคนิคที่ยากแก่การประมาณค่า ทำให้ต้องอาศัยการตั้งสมมติฐานขึ้นมาเพื่อให้การประมาณทำได้สะดวกมากยิ่งขึ้น แต่สมมติฐานดังกล่าว อาจทำให้ผลที่ได้ห่างไกลจากความเป็นจริงได้ จึงต้องระวังในการตั้งสมมติฐาน ซึ่งต้องยึดหลักที่ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

รายการอ้างอิง

1. เบลูจมาศ ปุ้ยอ็อก and มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, การศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก (SEC), in การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3. 2550: โรงแรมใบหยกสกาย กรุงเทพฯ. p. 98.
2. Sakamoto, Y., Y. Tonooka, and Y. Yanagisawa, *Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry: a process analysis*. Energy Conversion and Management, 1999. **40**(11): p. 1129-1140.
3. สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทย 2553. 2553, กระทรวงพลังงาน. p. 298-299.
4. Ho, J.C. and T.T. Chandratilleke, *Thermodynamic analysis of an electric arc furnance*. Energy Conversion and Management, 1991. **31**(2): p. 179-186.
5. Kirschen, M., V. Risonarta, and H. Pfeifer, *Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry*. Energy, 2009. **34**(9): p. 1065-1072.
6. Kirschen, M., K. Badr, and H. Pfeifer, *Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry*. Energy, 2011. **36**(10): p. 6146-6155.
7. Toulouevski, Y. and I. Zinurov, *Energy (Heat) Balances of Furnace*, in *Innovation in Electric Arc Furnaces*. 2010, Springer Berlin Heidelberg. p. 65-80.
8. Pfeifer, H., M. Kirschen, and J.P. Simoes, *Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand*, in *EEC*. 9-11 May 2005: Birmingham.
9. Yu, J.J. and W.K. Sang, *An Estimation of a Billet Temperature during Reheating Furnace Operation*. International Journal of Control, Automation and Systems, February 2007. **5**(1): p. 43-50.
10. Chen, W.-H., M.-R. Lin, and T.-S. Leu, *OPTIMAL HEATING AND ENERGY MANAGEMENT FOR SLABS IN A REHEATING FURNACE*. Journal of Marine Science and Technology, 2010. **18**(1): p. 24-31.
11. Jiraphon, S., et al., *Estimation of the Mathematical Model of the Reheating Furnace Walking Hearth Type in Heating Curve Up Process*. International Journal of Mathematical models and methods in Applied Science, 2011. **5**(1): p. 167-174.

12. Daniel, R.K. and W. Andreas. *Implementation of Models for reheating processes in industrial furnaces*. in *Proceedings 8th Modelica Conference*. 2011. Dresden, Germany.
13. จิตติน แดงเที่ยง, การวิเคราะห์ไอเสียเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเผาเหล็ก (*Analysis of Flue Gas for Improving Energy Efficiency of a Reheating Furnace*), in *The 23rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*. 2009: Chiang Mai Thailand.
14. Kanit, M. and T. Mingsak, *A study of specific energy consumption in reheating furnace using regenerative burners combined with recuperator*. SILPAKORN UNIVERSITY SCIENCE AND TECHNOLOGY JOURNAL, 2010. 4(2): p. 7-13.
15. Lenard, J.G., *Chapter 1 - Introduction*, in *Primer on Flat Rolling*, J.G. Lenard, Editor. 2007, Elsevier Science Ltd: Oxford. p. 1-II.
16. Dieter, G.E., *Mechanical metallurgy*. 1 ed. 1988, Singapore: McGraw-Hill.
17. William, F.H. and M.C. Robert, *Metal forming Mechanics and metallurgy*. 1983, London: Prentice-Hall International.
18. Taylan, A., N. Gracious, and S. Gangshu, *Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications*. 1 ed. 2005, Ohio USA: ASM International.
19. Lenard, J.G., *Chapter 4 - Material Attributes*, in *Primer on Flat Rolling*, J.G. Lenard, Editor. 2007, Elsevier Science Ltd: Oxford. p. 99-129.
20. Lenard, J.G., *Chapter 3 - Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process*, in *Primer on Flat Rolling*, J.G. Lenard, Editor. 2007, Elsevier Science Ltd: Oxford. p. 36-98.
21. Raviraj, R.C., *Analysis of Energy Consumption in Continuous Galvanizing Lines*. 2006, West Virginia University: West Virginia.
22. *The Hot-Dip Galvanizing Process*. Available from: <http://www.galvanizeit.org/about-hot-dip-galvanizing/what-is-hot-dip-galvanizing/hdg-process>.
23. *Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection a specifier's guide*. Available from: http://www.galvanizeit.org/images/uploads/publicationPDFs/Galvanized_Steel_Specifiers_Guide.pdf?tracked=yes.
24. *Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection of Steel Product*. Available from: <http://www.gordtelecom.com/PDF-Files/Hot%20Dip%20Galvanizing,%20A%20guide%20to.pdf>.
25. *Thermo chemistry applications in metal extraction*. Available from: http://nptel.iitm.ac.in/courses/113104060/MHB_pdf/Lecture8.pdf.

26. Darwin, S. and B.H.H. Sulaiman, *Electroplating*. 1 ed. 2012, Rijeka, Croatia: InTech.
27. Fayomi, O.S., et al., *Influence of Plating Parameter and Surface Morphology on Mild Steel*. Journal of Materials and Environmental Science, 2011. **2**(3): p. 271-280.
28. Britannica, E., *Chromium processing*. 2013, Encyclopædia Britannica Inc. Available from: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/116008/chromium-processing>
29. Helen, H.L. and H. Yinlun, *Electroplating*, in *Encyclopedia of Chemical Processing*. 2006.
30. Nasser, K., *Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice*. 2004: Elsevier Ltd.
31. Incropera, F.P., et al., *Introduction to Heat transfer*. 5 ed. 2007, New York: John Wiley & Sons.
32. Hin, N., *Overview of Steel Industry in Thailand*. Noovember 2006, Iron and Steel Institute of Thailand. Available from: http://www.asiaeec-col.eccj.or.jp/cooperation/2-1-1/2006-2007/thailand-attach/1_1.pdf
33. Lenard, J.G., *Primer on Flat Rolling*. 1 ed. 2007, London: Elsevier Ltd.
34. Suzuki, H., et al., *Studies on the Flow Stress of Metals and Alloys*. 1968: Azabu Tokyo. p. 18.
35. ชนสาร อินทรกำธรชัย, et al., การหาคุณสมบัติช่วงพลาสติกของโลหะแผ่นเกรด SPCC ด้วยการทดสอบแบบเป่าโป่งด้วยน้ำ และอิทธิพลการเป่าโป่งในช่วง 6 ซิกม่า, in การประชุมวิชาการวิศวกรรมอุตสาหกรรมแห่งชาติ. 2010.
36. Rangachari, N., et al., *COLD FORMED STEEL SECTIONS-I*. INSTITUTE FOR STEEL DEVELOPMENT & GROWTH. Available from: <http://www.steel-insdag.org/TeachingMaterial/Chapter19.pdf>
37. *Cold rolled steels*. AK Steel. Available from: http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/carbon/AK-Cold-Rolled-Steel-201209.pdf
38. *JIS G3141 COLD REDUCED CARBON STEEL SHEETS AND STRIP*. 1996.
39. *JIS G 3141: 2005 Cold-reduced carbon steel sheets and strips*. Japanese Standards Association: Japan.
40. *Specifications; product grades*. Available from: <http://www.thaicoat.com/ProductSpec.php>.
41. Toulouevski, Y. and I. Zinurov, *Preheating of Scrap by Burners and Off-Gases*, in *Innovation in Electric Arc Furnaces*. 2010, Springer Berlin Heidelberg. p. 93-113.
42. Joseph, M., et al., *Developments towards an Intelligent Electric Arc Furnace at CMC Texas using Goodfellow EFSOP® Technology*.

43. Richard, E.S., B. Claus, and J.V.W. Gordon, *Fundamentals of Thermodynamics*. 6 ed. 2002, New York: John Wiley & Sons.
44. *IRON*. The National Institute of Standards and Technology (NIST). Available from: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7439896&Units=SI&Mask=2#> Thermo-Condensed
45. *IRON OXIDE*. The National Institute of Standards and Technology (NIST). Available from: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C1345251&Units=SI&Mask=2#> Thermo-Condensed
46. *CALCIUM OXIDE*. The National Institute of Standards and Technology (NIST). Available from: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C1305788&Units=SI&Mask=2#> Thermo-Condensed





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างแบบสอบถามการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก

ก.1 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5

ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - กำลังการผลิตสินค้าทั้งหมด | | | | | | |
| - บิลเล็ต | | | | | | |
| - เหล็กกลมและเหล็กข้ออ้อย | | | | | | |
| - เหล็กเพลลา | | | | | | |
| - เหล็กหลอด | | | | | | |
| - เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เศษเหล็ก | | | | | | |
| - เหล็กปิก (Pig iron) | | | | | | |
| - เหล็กฟรูน (Sponge iron, HBI) | | | | | | |
| - บิลเล็ต (กรณีนำเข้าเพิ่มเติม) | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ออกซิเจน (ลบ.ม.; Nm ³) | | | | | | |

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5

| | | | | | | | |
|---|--------|--|--|--|--|--|--|
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | | |
| 1. | หน่วย: | | | | | | |
| 2. | หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | | |

| | |
|---|--|
| ข้อมูลทั่วไปของการหลอมเหล็กกล้าและการหล่อ (EAF & LF & CCM) | |
| - อายุการใช้งานของ EAF (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของ LF (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของ CCM (ปี) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |
| - Tap to Tap Time (นาที) | |

| การหลอมเหล็กกล้าและการหล่อ | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|---|--------|------|------|------|------|------|
| ส่วนการใช้พลังงานเฉลี่ย (ต่อตัน) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน EAF (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน LF (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ใน EAF (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณแก๊สอินทรีย์ที่ใช้ใน EAF (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. | หน่วย: | | | | | |
| - Yield การหลอมและหล่อจากเศษเหล็ก (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำใน EAF (ต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิต (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 1 3 และ 5

| ส่วนวัตถุดิบเสริม (ต่อต้น) | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| - โลหะเติมแต่ง (Alloying Additive) (ตัน) | | | | | | |
| - Lime (ตัน) | | | | | | |
| - Dolomite (ตัน) | | | | | | |
| - อิฐทนไฟ (ตัน) | | | | | | |
| - ก๊าซเฉื่อย (ลบ.ม.) (เช่น Ar, He) | | | | | | |

| ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการอบร้อนและรีดเหล็กเส้น (Rolling Mill) | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของ Reheating Furnace (ปี) | |
| - อุณหภูมิของบิลเล็ตก่อนเข้า Reheating Furnace (°C) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |

| กระบวนการอบร้อนและรีดเหล็กเส้น | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| การใช้พลังงานใน Reheating Furnace (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| การใช้พลังงานใน Hot Rolling (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อต้น) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กกลม | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กกลม (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กข้ออ้อย | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กข้ออ้อย (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กเพลลา | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กเพลลา (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กหลอด | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กหลอด (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กรูปพรรณ | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กรูปพรรณ (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำใน Reheating Furnace | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำใน Hot Rolling | | | | | | |

ก.2 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 2 4 และ 6

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 2 4 และ 6

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - กำลังการผลิตสินค้าทั้งหมด | | | | | | |
| - เหล็กกลมและเหล็กข้ออ้อย | | | | | | |
| - เหล็กเพลลา | | | | | | |
| - เหล็กลวด | | | | | | |
| - เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - บิลเล็ต | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ออกซิเจน (ลบ.ม.; Nm ³) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 2 4 และ 6

| ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการอบร้อนและรีดเหล็กเส้น (Rolling Mill) | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของ Reheating Furnace (ปี) | |
| - อุณหภูมิของบิลเล็ตก่อนเข้า Reheating Furnace (°C) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |

| กระบวนการอบร้อนและรีดเหล็กเส้น | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| การใช้พลังงานใน Reheating Furnace (ต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| การใช้พลังงานใน Hot rolling (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กกลม | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กกลม (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กข้ออ้อย | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กข้ออ้อย (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กเพลลา | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กเพลลา (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กหลอด | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กหลอด (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดเหล็กรูปพรรณ | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กรูปพรรณ (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำใน Reheating Furnace | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำใน Hot Rolling | | | | | | |

ก.3 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 7

ตารางที่ ก.3 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 7

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - กำลังการผลิตสินค้าทั้งหมด | | | | | | |
| - สแลป | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดร้อน | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เศษเหล็ก | | | | | | |
| - เหล็กปิก (Pig iron) | | | | | | |
| - เหล็กพูน (Sponge iron, HBI) | | | | | | |
| - สแลป (กรณีนำเข้าเพิ่มเติม) | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ออกซิเจน (ลบ.ม.; Nm ³) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 7

| ข้อมูลทั่วไปของการหลอมเหล็กกล้าและการหล่อ (EAF & LF & CCM) | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของ EAF (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของ LF (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของ CCM (ปี) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |
| - Tap to Tap Time (นาที) | |

| การหลอมเหล็กกล้าและการหล่อ | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| ส่วนการใช้พลังงานเฉลี่ย (ต่อตัน) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน EAF (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ใน LF (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ใน EAF (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณแก๊สอินทรีย์ที่ใช้ใน EAF (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| - Yield การหลอมและหล่อจากเศษเหล็ก (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำใน EAF (ต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิต (ลบ.ม.) | | | | | | |
| ส่วนวัตถุดิบเสริม (ต่อตัน) | | | | | | |
| - โลหะเติมแต่ง (Alloying Additive) (ตัน) | | | | | | |
| - Lime (ตัน) | | | | | | |
| - Dolomite (ตัน) | | | | | | |
| - อิฐทนไฟ (ตัน) | | | | | | |
| - ก๊าซเฉื่อย (ลบ.ม.) (เช่น Ar, He) | | | | | | |

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 7

| ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการอบร้อนและรีดเหล็กเส้น (Rolling Mill) | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของ Reheating Furnace (ปี) | |
| - อุณหภูมิของบิลเล็ตก่อนเข้า Reheating Furnace (°C) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |

| กระบวนการอบร้อนและรีดเหล็กเส้น | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| การใช้พลังงานใน Reheating Furnace (ต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| การใช้พลังงานใน Hot Rolling (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดร้อน | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำใน Reheating Furnace | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำใน Hot Rolling | | | | | | |

ก.4 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 8

ตารางที่ ก.4 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 8

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - กำลังการผลิตสินค้าทั้งหมด | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดร้อน | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - สแลป | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบิตู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 8

| ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการอบร้อนและรีดเหล็กเส้น (Rolling Mill) | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของ Reheating Furnace (ปี) | |
| - อุณหภูมิของบิลเล็ตก่อนเข้า Reheating Furnace (°C) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |

| กระบวนการอบร้อนและรีดเหล็กเส้น | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|--------|------|------|------|------|------|
| การใช้พลังงานใน Reheating Furnace (ต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. | หน่วย: | | | | | |
| 2. | หน่วย: | | | | | |
| การใช้พลังงานใน Hot Rolling (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการรีดร้อน | | | | | | |
| - Yield การรีดร้อนเป็นเหล็กแผ่นรีดร้อน (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำใน Reheating Furnace | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำใน Hot Rolling | | | | | | |

ก.5 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 9

ตารางที่ ก.5 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 9

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดเย็น | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดร้อน | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านปีทิว) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ออกซิเจน (ลบ.ม.; Nm ³) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 9

| ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการรีดเหล็กแผ่นรีดเย็น (Rolling Mill) | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของกระบวนการ Pickling (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของกระบวนการรีดเย็น (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของกระบวนการ Electrolytic Cleaning (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของกระบวนการอบอ่อน (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของกระบวนการ Finishing (ปี) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |

| กระบวนการรีดเย็น | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| การขจัดสนิมและทำความสะอาดผิวเหล็กแผ่น (Pickling) (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณไอน้ำ (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - Yield การทำความสะอาดผิวเหล็ก (%) | | | | | | |
| การล้างน้ำมันหลังกระบวนการรีดเย็น (Electrolytic Cleaning) (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - Yield การล้างน้ำมันหลังการรีดเย็น (%) | | | | | | |
| การอบอ่อน (Annealing Furnace) (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - Yield การอบอ่อน (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำในการรีดเย็น | | | | | | |
| - Overall yield การผลิตเหล็กแผ่นรีดเย็น (%) | | | | | | |

ก.6 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 10

ตารางที่ ก.6 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 10

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นชุบสังกะสี | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดเย็น | | | | | | |
| - สังกะสีอินกอต | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.6(ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 10

| ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการรีดเหล็กแผ่นรีดเย็น (Rolling Mill) | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของกระบวนการชุบสังกะสี (ปี) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |
| - ปริมาณการผลิตรวม (ตัน/ปี) | |
| - อายุการใช้งานของกระบวนการ Finishing (ปี) | |

| กระบวนการชุบสังกะสี | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| การชุบสังกะสี (Zinc Pot) (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - Yield การทำความสะอาดผิวเหล็ก (%) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำในการชุบสังกะสี | | | | | | |

ก.7 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 11

ตารางที่ ก.7 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 11

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดเย็น | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบิที่ยู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.7 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 11

| ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการรีดเหล็กแผ่นรีดเย็น (Rolling Mill) | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของกระบวนการ Electrogalvanizing (ปี) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |

| การผลิตเหล็กแผ่นชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| การชุบสังกะสีด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้า (Electrogalvanizing) (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านปีทิว) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - Yield การชุบสังกะสีด้วยไฟฟ้า (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำในการชุบสังกะสี | | | | | | |

ก.8 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 12

ตารางที่ ก.8 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 12

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - กำลังการผลิตสินค้าทั้งหมด | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นเคลือบดีบุก | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นเคลือบโครเมียม | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดเย็น TMBP | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| 2. หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.8 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 12

| ข้อมูลทั่วไปของกระบวนการรีดเหล็กแผ่นเคลือบตีบุกและโครเมียม | |
|--|--|
| - อายุการใช้งานของกระบวนการเคลือบตีบุก (ปี) | |
| - อายุการใช้งานของกระบวนการเคลือบโครเมียม (ปี) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operating Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |

| การผลิตเหล็กแผ่นเคลือบตีบุกและโครเมียม | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|---|------|------|------|------|------|------|
| กระบวนการเคลือบตีบุก (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - Yield การทำความสะอาดผิวเหล็ก (%) | | | | | | |
| กระบวนการเคลือบโครเมียม (ต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - Yield การทำความสะอาดผิวเหล็ก (%) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อต้น) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำในเคลือบตีบุกและโครเมียม | | | | | | |

ก.9 แบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 13 14 และ 15

ตารางที่ ก.9 ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 13 14 และ 15

| ข้อมูลทั่วไป | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| ปริมาณการผลิตสินค้าในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - กำลังการผลิตสินค้าทั้งหมด | | | | | | |
| - เหล็กรูปพรรณขึ้นรูปเย็น | | | | | | |
| - ท่อเหล็กดำ | | | | | | |
| - ท่อเหล็กขาว | | | | | | |
| - ท่อเหล็กชุบสังกะสี | | | | | | |
| ปริมาณวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละปี (ตัน) | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดร้อน | | | | | | |
| - เหล็กแผ่นรีดเย็น | | | | | | |
| - สังกะสีอินกอต | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้พลังงานรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของกระบวนการผลิต (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [1] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของระบบ Utility (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [2] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของสำนักงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [3] | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้ารวมของทั้งโรงงาน (กิโลวัตต์-ชั่วโมง) [4] = [1]+[2]+[3] | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ก๊าซธรรมชาติ (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโลกรัม) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันก๊าด (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ออกซิเจน (ลบ.ม.; Nm ³) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้พลังงานทดแทน เช่น เศษยาง ผงถ่าน ฯลฯ | | | | | | |
| 1. หน่วย: | | | | | | |
| ข้อมูลการใช้น้ำรวมในแต่ละปี | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำประปา (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำผิวดิน (ลบ.ม.) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำบาดาล (ลบ.ม.) | | | | | | |

ตารางที่ ก.9 (ต่อ) ตัวอย่างแบบสอบถามของอุตสาหกรรมเหล็กกระบวนการผลิตที่ 13 14 และ 15

| ข้อมูลทั่วไปของการผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็นและท่อเหล็ก | |
|---|--|
| - อายุการใช้งานของแท่นรีด (ปี) | |
| - ระยะเวลาการผลิตรวม (Operation Time) (ชั่วโมง/ปี) | |
| - จำนวนพนักงานที่ใช้ในการปฏิบัติงานต่อ 1 กะ (คน) | |

| การผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็นและท่อเหล็ก | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 |
|--|------|------|------|------|------|------|
| การผลิตท่อเหล็กและเหล็กรูปพรรณ (Slitting Forming & Welding) (กิโวลต์-ชั่วโมงต่อตัน) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น | | | | | | |
| - Yield การผลิตเหล็กโครงสร้างรูปพรรณจากเหล็กแผ่นรีดร้อน (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตท่อเหล็กดำ | | | | | | |
| - Yield การผลิตท่อเหล็กดำจากเหล็กแผ่นรีดร้อน (%) | | | | | | |
| - พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตท่อเหล็กขาว | | | | | | |
| - Yield การผลิตท่อเหล็กขาวจากเหล็กแผ่นรีดเย็น (%) | | | | | | |
| การหลอมและชุบสังกะสี (Zinc Pot) (ต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้เฉลี่ย (กิโวลต์-ชั่วโมง) | | | | | | |
| - ปริมาณก๊าซธรรมชาติที่ใช้เฉลี่ย (ล้านบีทียู) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันเตา (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล (ลิตร) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้ LPG (กิโกลกรัม) | | | | | | |
| ส่วนการใช้น้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อตัน) | | | | | | |
| - ปริมาณการใช้น้ำในกระบวนการผลิต | | | | | | |

ภาคผนวก ข.

การประมาณค่าการใช้พลังงานต่อผลผลิตเฉลี่ยในแต่ละกระบวนการผลิต

ข.1 กระบวนการผลิตที่ 1 Bar with EAF

ตารางที่ ข.1 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 1

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| - Electricity consumption | 2,352 | 2,404 | 2,801 | 2,529 | 2,689 | 2,140 | 2,486 |
| - Fuel consumption | 2,123 | 1,969 | 1,876 | 1,839 | 1,745 | 1,522 | 1,846 |
| - Oxygen consumption | 760 | 698 | 713 | 693 | 689 | 575 | 688 |
| - SEC | 5,235 | 5,071 | 5,389 | 5,061 | 5,123 | 4,237 | 5,019 |
| - Ratio electricity (%) | 45% | 47% | 52% | 50% | 52% | 51% | 50% |
| - Ratio fuel (%) | 41% | 39% | 35% | 36% | 34% | 36% | 37% |
| - Ratio Oxygen (%) | 15% | 14% | 13% | 14% | 13% | 14% | 14% |
| - Production-BAR (ton) | 653,713 | 615,994 | 711,648 | 493,296 | 402,878 | 572,047 | 574,930 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 3 3 3 3 3 3

ข.2 กระบวนการผลิตที่ 2 Bar without EAF

ตารางที่ ข.2 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 2

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| - Electricity consumption | 359 | 427 | 416 | 381 | 367 | 407 | 393 |
| - Fuel consumption | 1,419 | 1,636 | 1,629 | 1,434 | 1,490 | 1,495 | 1,517 |
| - SEC | 1,778 | 2,063 | 2,045 | 1,815 | 1,856 | 1,903 | 1,910 |
| - Ratio electricity (%) | 20% | 21% | 20% | 21% | 20% | 21% | 21% |
| - Ratio fuel (%) | 80% | 79% | 80% | 79% | 80% | 79% | 79% |
| - Production-BAR (ton) | 301,770 | 228,592 | 157,118 | 229,068 | 199,061 | 163,263 | 213,145 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 2 2 3 3 3 3

ข.3 กระบวนการผลิตที่ 3 Wire rod with EAF

ตารางที่ ข.3 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 3

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| - Electricity consumption | 2,467 | 2,270 | 2,596 | 2,533 | 2,617 | 2,375 | 2,476 |
| - Fuel consumption | 1,957 | 1,665 | 1,525 | 1,314 | 1,505 | 1,529 | 1,583 |
| - Oxygen consumption | 710 | 690 | 710 | 771 | 791 | 721 | 732 |
| - SEC | 5,135 | 4,625 | 4,831 | 4,618 | 4,913 | 4,625 | 4,791 |
| - Ratio electricity (%) | 48% | 49% | 54% | 55% | 53% | 51% | 52% |
| - Ratio fuel (%) | 38% | 36% | 32% | 28% | 31% | 33% | 33% |
| - Ratio Oxygen (%) | 14% | 15% | 15% | 17% | 16% | 16% | 15% |
| - Production-Wire rod (ton) | 356,651 | 368,374 | 416,338 | 287,930 | 417,447 | 580,564 | 404,551 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 2 2 2 2 2 2

ข.4 กระบวนการผลิตที่ 4 Wire rod without EAF

ตารางที่ ข.4 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 4

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|-----------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| - Electricity consumption | - | 856 | 747 | 790 | 911 | 622 | 785 |
| - Fuel consumption | - | 1,781 | 1,798 | 1,689 | 1,732 | 1,654 | 1,731 |
| - SEC | - | 2,637 | 2,546 | 2,480 | 2,643 | 2,276 | 2,516 |
| - Ratio electricity (%) | - | 32% | 29% | 32% | 34% | 27% | 31% |
| - Ratio fuel (%) | - | 68% | 71% | 68% | 66% | 73% | 69% |
| - Production-Wire rod (ton) | - | 36,700 | 27,300 | 41,900 | 69,000 | 67,000 | 48,380 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; - 1 1 1 2 2

ข.5 กระบวนการผลิตที่ 5 Section with EAF

ตารางที่ ข.5 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 5

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|----------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| - Electricity consumption | 2,856 | 2,574 | 2,516 | 2,613 | 2,633 | 2,565 | 2,626 |
| - Fuel consumption | 1,896 | 1,524 | 1,871 | 1,593 | 1,915 | 1,911 | 1,785 |
| - Oxygen consumption | 729 | 721 | 748 | 752 | 743 | 705 | 733 |
| - SEC | 5,481 | 4,819 | 5,135 | 4,957 | 5,290 | 5,181 | 5,144 |
| - Ratio electricity (%) | 52% | 53% | 49% | 53% | 50% | 50% | 51% |
| - Ratio fuel (%) | 35% | 32% | 36% | 32% | 36% | 37% | 35% |
| - Ratio Oxygen (%) | 13% | 15% | 15% | 15% | 14% | 14% | 14% |
| - Production-SECTION (ton) | 40,639 | 28,069 | 153,251 | 152,501 | 136,125 | 141,379 | 108,661 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 1 1 2 2 2 2

ข.6 กระบวนการผลิตที่ 6 Section without EAF

ตารางที่ ข.6 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 6

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|----------------------------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|
| - Electricity consumption | - | - | - | 241 | 344 | 327 | 304 |
| - Fuel consumption | - | - | - | 1,838 | 2,173 | 2,099 | 2,037 |
| - SEC | - | - | - | 2,079 | 2,517 | 2,426 | 2,341 |
| - Ratio electricity (%) | - | - | - | 12% | 14% | 13% | 13% |
| - Ratio fuel (%) | - | - | - | 88% | 86% | 87% | 87% |
| - Production-SECTION (ton) | - | - | - | 43,193 | 26,413 | 38,325 | 35,977 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; - - - 1 1 1

ข.7 กระบวนการผลิตที่ 7 Hot rolled sheet with EAF

ตารางที่ ข.7 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 7

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| - Electricity consumption | 2,583 | 2,785 | 2,531 | 2,545 | 2,597 | 2,582 | 2,604 |
| - Fuel consumption | 1,326 | 1,481 | 1,124 | 1,157 | 1,346 | 1,380 | 1,302 |
| - Oxygen consumption | 957 | 911 | 826 | 854 | 1,235 | 924 | 951 |
| - SEC | 4,867 | 5,177 | 4,481 | 4,556 | 5,177 | 4,886 | 4,857 |
| - Ratio electricity (%) | 53% | 54% | 56% | 56% | 50% | 53% | 54% |
| - Ratio fuel (%) | 27% | 29% | 25% | 25% | 26% | 28% | 27% |
| - Ratio Oxygen (%) | 20% | 18% | 18% | 19% | 24% | 19% | 20% |
| - Production-HR sheet (ton) | 1,108,209 | 1,913,952 | 2,183,961 | 1,846,502 | 1,164,800 | 1,166,727 | 1,564,025 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 1 1 2 2 2 2

ข.8 กระบวนการผลิตที่ 8 Hot rolled sheet without EAF

ตารางที่ ข.8 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 8

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|-----------------------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| - Electricity consumption | 706 | 563 | 628 | 566 | 452 | 429 | 558 |
| - Fuel consumption | 2,179 | 2,176 | 1,786 | 1,818 | 1,730 | 1,596 | 1,881 |
| - SEC | 2,885 | 2,739 | 2,414 | 2,384 | 2,182 | 2,025 | 2,438 |
| - Ratio electricity (%) | 24% | 21% | 26% | 24% | 21% | 21% | 23% |
| - Ratio fuel (%) | 76% | 79% | 74% | 76% | 79% | 79% | 77% |
| - Production-HR sheet (ton) | 568,255 | 703,773 | 1,797,030 | 1,607,064 | 2,227,370 | 2,674,403 | 1,596,316 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 2 2 3 3 3 3

ข.9 กระบวนการผลิตที่ 9 Cold rolled sheet

ตารางที่ ข.9 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตที่ 9

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| - Electricity consumption | 582 | 692 | 652 | 695 | 774 | 719 | 686 |
| - Fuel consumption | 1,172 | 1,311 | 1,316 | 1,357 | 1,247 | 1,290 | 1,282 |
| - SEC | 1,755 | 2,003 | 1,967 | 2,052 | 2,021 | 2,009 | 1,968 |
| - Ratio electricity (%) | 33% | 35% | 33% | 34% | 38% | 36% | 35% |
| - Ratio fuel (%) | 67% | 65% | 67% | 66% | 62% | 64% | 65% |
| - Production-CR sheet (ton) | 1,475,861 | 1,696,085 | 1,907,168 | 1,597,956 | 1,174,920 | 1,583,613 | 1,572,600 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 2 3 3 3 3 3

ข.10 กระบวนการผลิตที่ 10 Hot dip galvanized

ตารางที่ ข.10 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตที่ 10

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|---------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| - Electricity consumption | 185 | 182 | 313 | 237 | 365 | 163 | 241 |
| - Fuel consumption | 924 | 1,052 | 1,133 | 1,065 | 1,017 | 934 | 1,021 |
| - SEC | 1,109 | 1,235 | 1,447 | 1,303 | 1,382 | 1,096 | 1,262 |
| - Ratio electricity (%) | 17% | 15% | 22% | 18% | 26% | 15% | 19% |
| - Ratio fuel (%) | 83% | 85% | 78% | 82% | 74% | 85% | 81% |
| - Production-HDG (ton) | 105,505 | 74,763 | 62,313 | 51,060 | 56,703 | 68,478 | 69,804 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 3 2 3 3 3 3

ข.11 กระบวนการผลิตที่ 11 Electro galvanized

ตารางที่ ข.11 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 11

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|---------------------------|------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
| - Electricity consumption | - | 899 | 942 | 968 | 939 | 801 | 910 |
| - Fuel consumption | - | 411 | 355 | 275 | 284 | 190 | 303 |
| - SEC | - | 1,310 | 1,297 | 1,243 | 1,223 | 991 | 1,213 |
| - Ratio electricity (%) | - | 69% | 73% | 78% | 77% | 81% | 75% |
| - Ratio fuel (%) | - | 31% | 27% | 22% | 23% | 19% | 25% |
| - Production-EG (ton) | - | 139,485 | 134,644 | 126,342 | 64,390 | 119,925 | 116,957 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 0 1 1 1 1 1 1

ข.12 กระบวนการผลิตที่ 12 Tin plate/tin free

ตารางที่ ข.12 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 12

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|---------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| - Electricity consumption | - | 386 | 386 | 368 | 347 | 328 | 363 |
| - Fuel consumption | - | 346 | 328 | 350 | 303 | 282 | 322 |
| - SEC | - | 733 | 713 | 718 | 650 | 610 | 685 |
| - Ratio electricity (%) | - | 53% | 54% | 51% | 53% | 54% | 53% |
| - Ratio fuel (%) | - | 47% | 46% | 49% | 47% | 46% | 47% |
| - Production-TPTF (ton) | - | 317,553 | 258,216 | 249,208 | 236,080 | 238,283 | 259,868 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 0 1 1 1 1 1 1

ข.13 กระบวนการผลิตที่ 13 Cold formed

ตารางที่ ข.13 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 13

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|--------------------------------|------|------|------|------|--------|--------|--------|
| - Electricity consumption | - | - | - | - | 31.74 | 29.85 | 30.80 |
| - Fuel consumption | - | - | - | - | - | - | - |
| - SEC | - | - | - | - | 31.74 | 29.85 | 30.80 |
| - Ratio electricity (%) | - | - | - | - | 100% | 100% | 100% |
| - Ratio fuel (%) | - | - | - | - | 0% | 0% | 0% |
| - Production-Cold formed (ton) | - | - | - | - | 39,899 | 56,982 | 48,440 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 0 0 0 0 2 3

ข.14 กระบวนการผลิตที่ 14 ERW pipe

ตารางที่ ข.14 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 14

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|-----------------------------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|
| - Electricity consumption | - | - | - | 234 | 208 | 288 | 244 |
| - Fuel consumption | - | - | - | - | - | - | - |
| - SEC | - | - | - | 234 | 208 | 288 | 244 |
| - Ratio electricity (%) | - | - | - | 100% | 100% | 100% | 100% |
| - Ratio fuel (%) | - | - | - | 0% | 0% | 0% | 0% |
| - Production-ERW Pipe (ton) | - | - | - | 44,105 | 72,475 | 54,246 | 56,942 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน; 0 0 0 2 3 3

ข.15 กระบวนการผลิตที่ 15 Galvanized steel pipe

ตารางที่ ข.15 ปริมาณผลิตภัณฑ์ ปริมาณการใช้พลังงานและสัดส่วนของการใช้พลังงาน
ในกระบวนการผลิตที่ 15

| Energy (MJ/ton) | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | เฉลี่ย |
|-----------------------------|------|------|------|--------|--------|--------|--------|
| - Electricity consumption | - | - | - | 22 | 29 | 36 | 29 |
| - Fuel consumption | - | - | - | 1,682 | 2,744 | 2,286 | 2,237 |
| - SEC | - | - | - | 1,703 | 2,773 | 2,322 | 2,266 |
| - Ratio electricity (%) | - | - | - | 1% | 1% | 2% | 1% |
| - Ratio fuel (%) | - | - | - | 99% | 99% | 98% | 99% |
| - Production-GSP Pipe (ton) | - | - | - | 59,859 | 23,956 | 38,963 | 40,926 |

จำนวนข้อมูลของโรงงาน;

0 0 0 2 2 2

ภาคผนวก ค.

ตัวแปรและค่าคงที่ที่สำคัญ

ค.1 เหล็ก (Iron) [44]

Formula: Fe

Molecular weight: 55.845 g/mol

-Condensed phase thermochemistry data

| Quantity | Value | Units | Reference |
|--------------------------|-------|---------------|---------------|
| $\Delta h_{f,s}^{\circ}$ | 0 | <i>kJ/mol</i> | |
| $\Delta h_{f,l}^{\circ}$ | 12.40 | <i>kJ/mol</i> | Chase, 1998** |
| L_f | 12.40 | <i>kJ/mol</i> | |

**Chase, M.W., Jr., NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9, 1998

$$C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + \frac{E}{T^2}$$

$$H^{\circ} - H_{298.15}^{\circ} = A \cdot T + B \cdot \frac{T^2}{2} + C \cdot \frac{T^3}{3} + D \cdot \frac{T^4}{4} - \frac{E}{T} + F - H$$

T temperature (K) / 1000.

C_p heat capacity (J/mol*K)

$\Delta h_{f,l}^{\circ}$ Enthalpy of formation of liquid at standard

$\Delta h_{f,s}^{\circ}$ Enthalpy of formation of solid at standard

| Temperature (K) | Solid Phase 298 - 1809 | Liquid Phase 1809 - 3133.35 |
|-----------------|------------------------|-----------------------------|
| A | 23.97449 | 46.024 |
| B | 8.36775 | -1.88×10^{-8} |
| C | 0.000277 | 6.09×10^{-9} |
| D | -0.000086 | -6.64×10^{-10} |
| E | -0.000005 | -8.25×10^{-9} |
| F | 0.268027 | -10.80543 |
| G | 62.06336 | 72.54094 |
| H | 7.788015 | 12.39502 |

ค.2 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) [45]

Formula: FeO

Molecular weight: 71.844 g/mol

-Condensed phase thermochemistry data

| Quantity | Value | Unit | Reference |
|--------------------|---------|---------------|---------------|
| $\Delta h_{f,s}^o$ | -272.04 | <i>kJ/mol</i> | Chase, 1998** |
| $\Delta h_{f,l}^o$ | -249.53 | <i>kJ/mol</i> | Chase, 1998** |
| L_{fusion} | 22.51 | <i>kJ/mol</i> | |

**Chase, M.W., Jr., NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9, 1998

$$C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + \frac{E}{T^2}$$

$$H^o - H_{29815}^o = A \cdot T + B \cdot \frac{T^2}{2} + C \cdot \frac{T^3}{3} + D \cdot \frac{T^4}{4} - \frac{E}{T} + F - H$$

T temperature (K) / 1000.

C_p heat capacity (J/mol*K)

$\Delta h_{f,l}^o$ Enthalpy of formation of liquid at standard

$\Delta h_{f,s}^o$ Enthalpy of formation of solid at standard

| Temperature (K) | 298 - 1650 | 1650 - 5000 |
|-----------------|------------|-------------|
| A | 45.7512 | 68.1992 |
| B | 18.78553 | -4.50E-10 |
| C | -5.952201 | 1.20E-10 |
| D | 0.852779 | -1.06E-11 |
| E | -0.081265 | -3.09E-10 |
| F | -286.7429 | -281.4326 |
| G | 110.312 | 137.8377 |
| H | -272.0441 | -249.5321 |

ค.3 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide) [46]

Formula: CaO

Molecular weight: 56.077 g/mol

-Condensed phase thermochemistry data

| Quantity | Value | Unit | Reference |
|--------------------------|---------|---------------|---------------------------|
| $\Delta h_{f,s}^{\circ}$ | -635.09 | <i>kJ/mol</i> | Chase, 1998 ^{**} |

^{**}Chase, M.W., Jr., NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, J. Phys. Chem. Ref. Data, Monograph 9, 1998

$$C_p = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 + \frac{E}{T^2}$$

$$H^{\circ} - H_{29815}^{\circ} = A \cdot T + B \cdot \frac{T^2}{2} + C \cdot \frac{T^3}{3} + D \cdot \frac{T^4}{4} - \frac{E}{T} + F - H$$

T temperature (K) / 1000.

C_p heat capacity (J/mol*K)

h° standard enthalpy (kJ/mol)

$\Delta h_{f,s}^{\circ}$ Enthalpy of formation of solid at standard

-Solid Phase Heat Capacity (Shomate Equation)

| Temperature (K) | 298 - 3200 |
|-----------------|------------|
| A | 49.95403 |
| B | 4.887916 |
| C | -0.352056 |
| D | 0.046187 |
| E | -0.825097 |
| F | -652.9718 |
| G | 92.56096 |
| H | -635.0894 |

ค.4 ค่าคงที่ของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ

| T [K] | ρ [kg/m ³] | c_{pa} [kJ/kg · K] | μ [N·s/m ²] | ν [m ² /s] | Pr |
|------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------|
| 850 | 0.4097 | 1.11 | 3.84E-05 | 9.38E-05 | 0.716 |
| 873 | 0.399 | 1.115 | 3.90E-05 | 9.80E-05 | 0.718 |
| 900 | 0.3868 | 1.121 | 3.98E-05 | 1.03E-04 | 0.72 |
| 1000 | 0.3482 | 1.141 | 4.24E-05 | 1.22E-04 | 0.726 |
| 1049 | 0.333 | 1.150 | 4.36E-05 | 1.32E-04 | 0.727 |
| 1071 | 0.326 | 1.154 | 4.42E-05 | 1.36E-04 | 0.727 |
| 1074 | 0.325 | 1.154 | 4.43E-05 | 1.37E-04 | 0.727 |
| 1100 | 0.3166 | 1.159 | 4.49E-05 | 1.42E-04 | 0.728 |
| 1200 | 0.2902 | 1.175 | 4.73E-05 | 1.63E-04 | 0.728 |
| 1295 | 0.269 | 1.188 | 4.95E-05 | 1.84E-04 | 0.719 |
| 1300 | 0.2679 | 1.189 | 4.96E-05 | 1.85E-04 | 0.719 |
| 1367 | 0.255 | 1.201 | 5.19E-05 | 2.04E-04 | 0.708 |
| 1400 | 0.2488 | 1.207 | 5.30E-05 | 2.13E-04 | 0.703 |
| 1481.1 | 0.235 | 1.226 | 5.52E-05 | 2.35E-04 | 0.688 |
| 1481.5 | 0.235 | 1.226 | 5.52E-05 | 2.35E-04 | 0.688 |
| 1481.6 | 0.235 | 1.226 | 5.52E-05 | 2.35E-04 | 0.688 |
| 1484.3 | 0.235 | 1.226 | 5.53E-05 | 2.36E-04 | 0.688 |
| 1500 | 0.2322 | 1.23 | 5.57E-05 | 2.40E-04 | 0.685 |
| 1700 | 0.2049 | 1.267 | 6.11E-05 | 2.98E-04 | 0.685 |
| 1773 | 0.1966 | 1.281 | 6.30E-05 | 3.21E-04 | 0.684 |
| 1800 | 0.1935 | 1.286 | 6.37E-05 | 3.29E-04 | 0.683 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายคมสัน ตันติชูเกียรติ เกิดเมื่อวันที่ 7 สิงหาคม พุทธศักราช 2530 ที่จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 มีผลงานตีพิมพ์ระดับชาติในการประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26 “การประมาณค่าการใช้พลังงานและค่าดัชนีการใช้ พลังงานต่อผลผลิตของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย ประจำปี พ.ศ. 2548 – 2553” และการ ประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9 “ดัชนีการใช้พลังงานต่อผลผลิตของ อุตสาหกรรมเหล็กเคลือบสังกะสีด้วยวิธีจุ่มร้อนในประเทศไทย” และผลงานตีพิมพ์ในวารสาร นานาชาติ “The calculation of mass and heat balance for Electric Arc Furnace in Steel Production”



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY