

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development of a Computer Program for Energy Balance Analysis in an Electric Arc
Furnace



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

Department of Mechanical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า
โดย	นายณัฐภัทร ปรีชากุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญากรณ์)	

ณัฐภัทร ปรีชากุล : การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า. (Development of a Computer Program for Energy Balance Analysis in an Electric Arc Furnace) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.จิตติน แดงเที่ยง

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เพื่อทราบรายละเอียดการใช้พลังงานในเตาหลอมของโรงงาน และนำผลที่ได้ไปวางแผนและพัฒนาระบบประหยัดพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโรงงานในลำดับต่อไป โดยการพัฒนาโปรแกรมจะอาศัยข้อมูลจากโรงงานตัวอย่าง จำนวน 4 โรงงาน โดยใช้ข้อมูลของสารตั้งต้น ได้แก่ ปริมาณของ Scrap, ชนิดและปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้, แก๊สออกซิเจนขาเข้า และสารตั้งต้นอื่น ๆ รวมถึงพลังงานไฟฟ้า สารผลิตภัณฑ์ ได้แก่ น้ำเหล็ก, ไอเสีย, Slag และองค์ประกอบของ Slag พบว่า ไอเสีย สารปรับคุณภาพของเหล็ก และปริมาณอากาศที่ไหลซึมเข้าสู่เตาหลอมระหว่างกระบวนการหลอม เป็นตัวแปรไม่ทราบที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ โปรแกรมคำนวณนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนวิเคราะห์สมดุลมวลโดยจะทำการคำนวณย้อนกลับจากสารผลิตภัณฑ์เพื่อวิเคราะห์ตัวแปรไม่ทราบค่า และส่วนที่สอง คือ ส่วนวิเคราะห์สมดุลพลังงาน ซึ่งจะนำผลการวิเคราะห์สมดุลมวลที่ได้จากส่วนแรกมาวิเคราะห์การใช้พลังงานภายในเตาหลอม

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงาน พบว่ามีร้อยละของการใช้พลังงานใกล้เคียงกันโดยมีรายละเอียดดังนี้ พลังงานขาเข้า ได้แก่ เอนทัลปีของสารขาเข้า 4-6 % พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 40-55% พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 8-15 % พลังงานจากปฏิกิริยา Oxidation ในการเกิด Slag 30-45 % พลังงานขาออก ได้แก่ เอนทัลปีขาออกของเหล็ก 35-50% เอนทัลปีของ slag 3-7 % เอนทัลปีขาออกของไอเสีย 15-25 % การสูญเสียความร้อนจากน้ำระเหยความร้อน 10-20% การสูญเสียพลังงานอื่น ๆ 10-25 % ผลการวิเคราะห์นี้ สามารถนำไปเป็นค่าอ้างอิงเพื่อคำนวณและประมาณการใช้พลังงานของโรงงานที่ใช้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าอื่น ๆ ในประเทศไทยที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าได้

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6070185621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: Energy Balance, Electric Arc Furnace, Off-gas

Nattapat Preechakul : Development of a Computer Program for Energy Balance Analysis in an Electric Arc Furnace. Advisor: Assoc. Prof. Chittin Tangthieng, Ph.D.

The purpose of this research is to develop a computer program for analyzing energy balance in an EAF, in order to make a plan for increasing the performance of the industrial plant. To develop the program, measuring data from 4 sampling factories are obtained. Reactant data, such as scrap charge, fuel consumption, oxygen injection and electrical energy consumption, are gathered for the analysis. Product data, such as liquid steel, off-gas, slag, and its composition, are available as well. The off-gas, iron stabilizer, and infiltrated air are unknown parameters. The program is divided into 2 parts: first, the mass balance used to analyze and determine the unknown parameters and secondly the energy balance used to analyze the energy consumption of an EAF by using the result from first part.

The results from the EAF energy balance show that the input energy distribution consists of 4-6% of scrap enthalpy, 40-55% of electrical energy consumption, 8-15% of thermal combustion from burner, and 30-45% of oxidation by slag formation. On the other hand, the output energy distribution consists of 35-50% of iron enthalpy, 3-7% of slag enthalpy, 15-25% of off-gas enthalpy, 10-20% of cooling water loss, and 10-25% of other losses. This result can be used as a reference for estimating the unknown parameters when the EAF energy balance analysis is performed by other factories in Thailand.

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ถ่ายทอดองค์ความรู้ ประสบการณ์ และคำแนะนำต่าง ๆ ทั้งในทางทฤษฎีและการปฏิบัติเป็นอย่างดีตลอดการศึกษานี้ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สร้อย ศาลากิจ และ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญาณกรณ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ รวมถึงมอบองค์ความรู้และคำแนะนำต่าง ๆ ที่อันเป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จนประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณหน่วยงาน สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่มอบโอกาสและอำนวยความสะดวกข้าพเจ้าในการตรวจวัดและเก็บข้อมูลจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

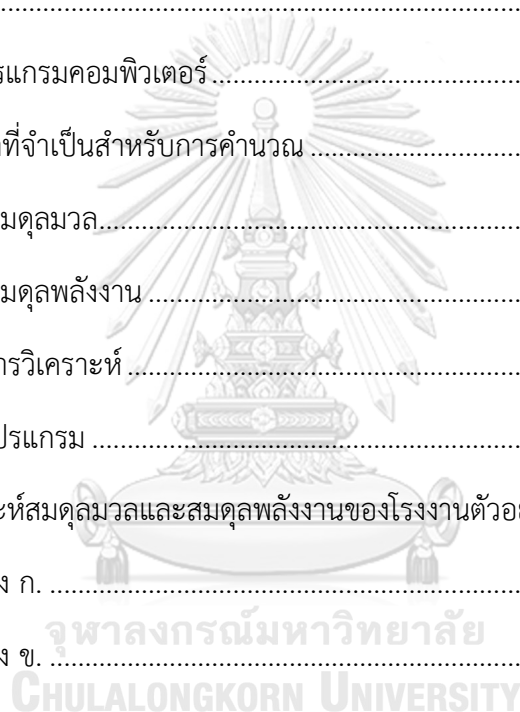
สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ รวมถึงมอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้รับทุนและเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาต่าง ๆ ระหว่างการศึกษานี้

ณัฐภัทร ปรีชากุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	3
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	3
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การพัฒนา model สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	5
2.2 การประมาณตัวแปรไม่ทราบค่า.....	10
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
3.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace).....	11
3.2 สมดุลมวลในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	12
3.3 สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	15
บทที่ 4 ผลการเก็บข้อมูลจากโรงงานตัวอย่าง.....	19

4.1 โรงงานตัวอย่าง ก.	20
4.2 โรงงานตัวอย่าง ข.	21
4.3 โรงงานตัวอย่าง ค.	22
4.3 โรงงานตัวอย่าง ง.	23
บทที่ 5 การวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง	25
5.1 สมดุลมวล	25
5.2 สมดุลพลังงาน.....	26
บทที่ 6 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	29
6.1 การป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ	29
6.2 การวิเคราะห์สมดุลมวล.....	31
6.3 การวิเคราะห์สมดุลพลังงาน	33
6.4 การแสดงผลการวิเคราะห์	36
6.5 ข้อจำกัดของโปรแกรม	40
บทที่ 7 ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง	41
7.1 โรงงานตัวอย่าง ก.	41
7.2 โรงงานตัวอย่าง ข.	42
7.3 โรงงานตัวอย่าง ค.	43
7.4 โรงงานตัวอย่าง ง.	44
บทที่ 8 อภิปรายผลการวิเคราะห์	46
8.1 โรงงานตัวอย่าง ก.	47
8.2 โรงงานตัวอย่าง ข.	48
8.3 โรงงานตัวอย่าง ค.	48
8.4 โรงงานตัวอย่าง ง.	49
บทที่ 9 สรุปผลการวิจัย.....	51



9.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
9.2 ข้อเสนอแนะ	51
ภาคผนวก.....	52
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการวิเคราะห์สมมูลมวลของโรงงานตัวอย่าง	53
ภาคผนวก ข. บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 34	58
บรรณานุกรม.....	68
ประวัติผู้เขียน.....	70



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ราคาจากการประมาณตามสมการจุดประสงค์[2]	8
ตารางที่ 2 พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาสันดาปของสารต่าง ๆ ในเตาหลอม [1]	18
ตารางที่ 3 แบบฟอร์มการเก็บข้อมูลทั่วไปของโรงงาน	19
ตารางที่ 4 แบบฟอร์มการเก็บข้อมูล slag ของโรงงาน	20
ตารางที่ 5 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง ก.	20
ตารางที่ 6 ข้อมูล slag ของโรงงานตัวอย่าง ก.	21
ตารางที่ 7 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง ข.	21
ตารางที่ 8 ข้อมูล slag ของโรงงานตัวอย่าง ข.	22
ตารางที่ 9 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง ค.	22
ตารางที่ 10 ข้อมูล slag ของโรงงานตัวอย่าง ค.	23
ตารางที่ 11 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง ง.	23
ตารางที่ 12 ข้อมูล slag ของโรงงานตัวอย่าง ง.	24
ตารางที่ 13 ข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณสมมูลมวล	25
ตารางที่ 14 ข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณสมมูลพลังงาน	27
ตารางที่ 15 ผลการคำนวณสมมูลมวลของโรงงานตัวอย่าง ก.	41
ตารางที่ 16 ผลการคำนวณสมมูลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง ก.	42
ตารางที่ 17 ผลการคำนวณสมมูลมวลของโรงงานตัวอย่าง ข.	42
ตารางที่ 18 ผลการคำนวณสมมูลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง ข.	43
ตารางที่ 19 ผลการคำนวณสมมูลมวลของโรงงานตัวอย่าง ค.	43
ตารางที่ 20 ผลการคำนวณสมมูลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง ค.	44
ตารางที่ 21 ผลการคำนวณสมมูลมวลของโรงงานตัวอย่าง ง.	44

ตารางที่ 22 ผลการคำนวณสมมูลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง ง	45
ตารางที่ 23 การเปรียบเทียบร้อยละของมวลของโรงงานตัวอย่าง	46
ตารางที่ 24 การเปรียบเทียบร้อยละของพลังงานโรงงานตัวอย่าง	47
ตารางที่ 25 ร้อยละของมวลในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่างทั้งสี่โรงงาน	50
ตารางที่ 26 ร้อยละการใช้พลังงานเฉลี่ยในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่างทั้งสี่โรงงาน	50
ตารางที่ 27 ข้อมูลทั้งหมดของโรงงานตัวอย่าง ก.....	54



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ชนิดและปริมาณพลังงานที่เข้าและออกในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า[1]	5
รูปที่ 2 อัตราการใช้พลังงานและความต้องการออกซิเจน[1].....	7
รูปที่ 3 ระบบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเตาเผา Laddle Furnace[2]	8
รูปที่ 4 Sakney Diagram แสดงการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า[4].....	9
รูปที่ 5 แบบจำลองสมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า [5].....	10
รูปที่ 6 Schematic Diagram ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	11
รูปที่ 7 Flow Chart การรับค่าข้อมูลสำหรับคำนวณ.....	30
รูปที่ 8 หน้าต่างแสดงการรับค่าข้อมูลทั่วไปของโรงงาน.....	30
รูปที่ 9 หน้าต่างแสดงการรับค่าองค์ประกอบของ Slag.....	31
รูปที่ 10 หน้าต่างคำนวณสมดุลมวล.....	31
รูปที่ 11 หน้าต่างแสดงปริมาณออกซิเจนสุทธิ.....	32
รูปที่ 12 Flow Chart การวิเคราะห์สมดุลมวล.....	32
รูปที่ 13 หน้าต่างคำนวณสมดุลพลังงานเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นบวก.....	33
รูปที่ 14 หน้าต่างแสดงผลการใช้พลังงานเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นบวก.....	33
รูปที่ 15 Flow Chart การวิเคราะห์สมดุลพลังงานเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นบวก.....	34
รูปที่ 16 หน้าต่างคำนวณสมดุลพลังงานเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นลบ.....	35
รูปที่ 17 หน้าต่างแสดงผลการใช้พลังงานเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นลบ.....	35
รูปที่ 18 Flow Chart การวิเคราะห์สมดุลพลังงานเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นลบ.....	36
รูปที่ 19 หน้าต่างแสดงผลมวลรวมเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นบวก.....	37
รูปที่ 20 หน้าต่างแสดงร้อยละการใช้พลังงานเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นบวก.....	37
รูปที่ 21 Flow Chart การแสดงผลเมื่อ O ₂ สุทธิเป็นบวก.....	38

รูปที่ 22 หน้าต่างแสดงผลมวลรวมเมื่อ O₂ สุทธิเป็นลบ..... 39

รูปที่ 23 หน้าต่างแสดงร้อยละการใช้พลังงานเมื่อ O₂ สุทธิเป็นลบ 39

รูปที่ 24 Flow Chart การแสดงผลเมื่อ O₂ สุทธิเป็นลบ..... 40



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
n_{Bucket}	จำนวนครั้งในการเทน้ำเหล็กลงเข้าหลอม	ครั้ง
V_{Bucket}	ปริมาตรของเข้าหลอม	m^3
\dot{V}_{fuel}	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิง	m^3/s
$\dot{V}_{off-gas}$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรไอเสีย	m^3/s
\dot{V}_{oxygen}	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของออกซิเจน	m^3/s
\dot{V}_{water}	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำระบายความร้อน	m^3/s
\dot{V}_{water}	อัตราการไหลเชิงปริมาตรระบายความร้อน ของน้ำ	m^3/s
$\sum H_e$	เอนทัลปีรวมของสารที่ออกจากปริมาตรควบคุม	KJ
$\sum H_i$	เอนทัลปีรวมของสารที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	KJ
$\sum Q$	พลังงานความร้อนรวมที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	KJ
Q_{rad}	พลังงานความร้อนรวมจากการแผ่รังสี	KJ
Q_{water}	พลังงานความร้อนจากน้ำระบายความร้อน	KJ
T_{EAF}	อุณหภูมิของเตาหลอม	K
$T_{ambient}$	อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม	K
$T_{water,i}$	อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนที่เข้าสู่เตาหลอม	K
$T_{water,o}$	อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนที่ออกจากเตาหลอม	K
$\sum W$	งานรวมที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	KJ
W_{elec}	งานทางไฟฟ้า	KJ
$C_{p,water}$	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำระบายความร้อน	KJ/kg.K
Δm_{CV}	มวลที่เปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม	kg
$\sum m_{inlet}$	มวลรวมที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	kg
$\sum m_{outlet}$	มวลรวมที่ออกจากปริมาตรควบคุม	kg

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
$m_{add,i}$	มวลสารปรงที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	kg
$m_{coal,i}$	มวลถ่านหินที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	kg
$m_{dust,o}$	มวลของฝุ่นที่ออกจากปริมาตรควบคุม	kg
$m_{elect,i}$	มวลของแท่ง Electrode ที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	kg
$m_{infiltrate}$	มวลอากาศที่ไหลซึมเข้าสู่ปริมาตรควบคุม	kg
$m_{iron,o}$	มวลน้ำเหล็กที่ออกจากปริมาตรควบคุม	kg
$m_{off-gas,o}$	มวลไอเสียที่ออกจากปริมาตรควบคุม	kg
$m_{oxygen,i}$	มวลออกซิเจนที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	kg
$m_{scrap,i}$	มวล scrap ที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม	kg
$m_{slag,o}$	มวล slag ที่ออกจากปริมาตรควบคุม	kg
$m_{water,o}$	มวลน้ำระบายความร้อนออกจากปริมาตรควบคุม	kg
t	เวลา tap to tap	s
t_{fuel}	เวลาในการฉีดเชื้อเพลิง	s
$t_{off-gas}$	เวลาในการปล่อยไอเสีย	s
t_{oxygen}	เวลาในการฉีดออกซิเจน	s
t_{water}	เวลาในการจ่ายน้ำระบายความร้อน	s
ρ_{fuel}	ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง	kg/m ³
ρ_{iron}	ความหนาแน่นของน้ำเหล็ก	kg/m ³
$\rho_{off-gas}$	ความหนาแน่นของไอเสีย	kg/m ³
ρ_{oxygen}	ความหนาแน่นของออกซิเจน	kg/m ³
ρ_{water}	ความหนาแน่นของน้ำระบายความร้อน	kg/m ³
ΔE_{CV}	พลังงานที่เปลี่ยนไปภายในปริมาตรควบคุม	kJ
A	พื้นที่ผิวของเตาหลอม	m ²
P	กำลังไฟฟ้า	W
σ	ค่าคงที่ของ สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8}	W/m ² K ⁴

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ประเทศไทยมีการทำอุตสาหกรรมเหล็กตั้งแต่ปีพุทธศักราช 2485 โดยผลิตเพื่อใช้ใน งานก่อสร้างต่าง ๆ และมีการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กเรื่อยมา ปัจจุบันมีโรงงานผลิตเหล็กหลายประเภท อาทิ โรงรีดร้อน โรงหลอมเหล็ก เป็นต้น โดยโรงงานผลิตเหล็กแต่ละประเภทต้องดำเนินการภายใต้ อุณหภูมิสูง จึงมีความต้องการพลังงานมาก ดังนั้นการศึกษาเรื่องพลังงานในอุตสาหกรรมเหล็กจึงมี ความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย

เนื่องจากสถาบันเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยได้มีโครงการร่วมกับกระทรวงพลังงานในหัวข้อ การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้กระบวนการ Hot Charge สำหรับโรงงานที่มีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า Electric Arc Furnace (EAF) และมีโรงรีดร้อนเพื่อผลิตเหล็กทรงยาว เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุง โรงงานเพื่อการใช้พลังงานในโรงหลอมเหล็กให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในระหว่างการดำเนินโครงการได้ ศึกษาการใช้พลังงานในแต่ละกระบวนการ แต่ไม่ได้ศึกษาการใช้พลังงานภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

วิทยานิพนธ์นี้จึงทำขึ้นเพื่อศึกษาสมดุลพลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และพัฒนา โปรแกรมอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์และจำแนกประเภทการใช้พลังงานของเตาหลอม เพื่อนำผลไปศึกษาและวิเคราะห์ด้านการใช้พลังงานและสามารถวางแผนการประหยัดพลังงานเพื่อให้เกิด ประสิทธิภาพสูงสุดต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาสมดุลพลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า
2. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณและวิเคราะห์ผลการใช้พลังงานภายในเตาหลอม อาร์คไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาการกระบวนการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าผ่านการลงพื้นที่ร่วมกับสถาบัน เหล็กกล้าแห่งประเทศไทยและกระทรวงพลังงาน
2. ศึกษาสมดุลพลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากโรงงานตัวอย่าง 4 โรงงาน เป็นอย่างน้อย
3. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถแจกแจงการใช้พลังงานภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เพื่ออำนวยความสะดวกให้แก่โรงงานในการคำนวณสมดุลพลังงาน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ลงพื้นที่ร่วมกับสถาบันหลักกล้าแห่งประเทศไทยและกระทรวงพลังงาน เพื่อศึกษาเก็บข้อมูลของโรงงานตัวอย่างสำหรับใช้วิเคราะห์ผล
2. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่างที่ได้รับคัดเลือก
3. สร้างโปรแกรมอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ ในอุตสาหกรรมหลักที่ใช้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ผลของสมดุลพลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจากโรงงานตัวอย่าง สามารถนำมาปรับใช้เป็นค่ากลางสำหรับการเปรียบเทียบจากโรงงานแห่งอื่น ๆ
2. โปรแกรมอำนวยความสะดวกในการคำนวณและวิเคราะห์สมดุลพลังงาน ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

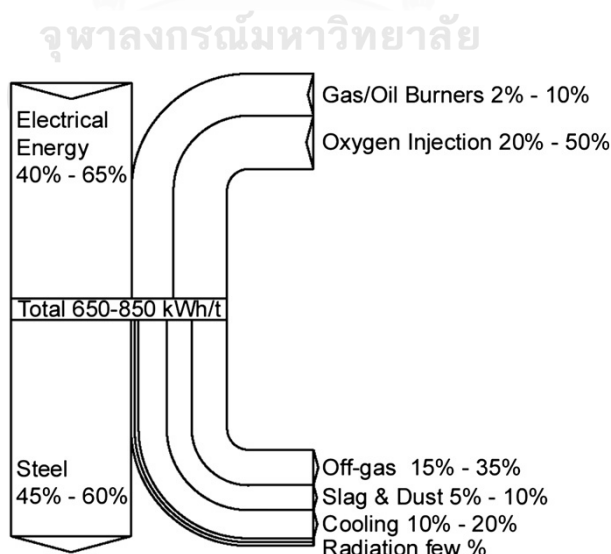
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การพัฒนา model สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

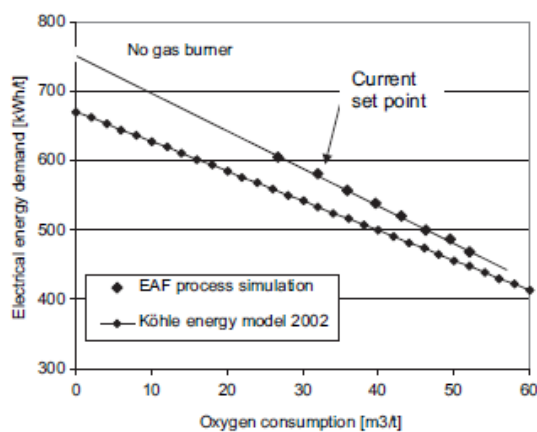
สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นสมการที่ใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมการหลอมโลหะได้ พบว่าสมการมีความซับซ้อนสูงเนื่องจากการใช้พลังงานจากหลายแหล่ง คือ พลังงานทางเทอร์โมไดนามิกส์ พลังงานจากปฏิกิริยาเคมีและพลังงานทางไฟฟ้า ทำให้มีตัวแปรในสมการมาก และเนื่องจากการดำเนินการภายในเตาหลอมเป็นการดำเนินการที่อุณหภูมิสูง ทำให้ไม่สามารถวัดค่าสำหรับบางตัวแปรได้ อีกทั้งยังมีพลังงานที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาภายในเตาหลอมอันเนื่องมาจากการใส่สารเพื่อปรับคุณภาพของโลหะที่แตกต่างกันออกไป จึงต้องทำการศึกษาและประมาณค่าตัวแปรดังกล่าวจากงานวิจัยดังต่อไปนี้

Marcus Kirschen, et al.[1] ได้ศึกษาอิทธิพลของ Direct Reduced Iron (DRI) ที่มีต่อสมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยศึกษากระบวนการที่ใช้ 100% scrap จนถึง 100% DRI ในการสร้างสมการสมดุลพลังงานในระบบปิด โดยมีลักษณะการใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 1 เมื่อวิเคราะห์สมการสมดุลพลังงานแล้วพบว่า เป็นการยากที่จะทำการคำนวณสมการสมดุลพลังงานโดยตรง เนื่องจากในระหว่างกระบวนการหลอมสารมีการเปลี่ยนแปลงทำให้การคำนวณการถ่ายโอนความร้อนนั้นมีความซับซ้อน จึงต้องมีการประมาณค่าการใช้พลังงานโดยการใช้ตัวปรับแก้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน

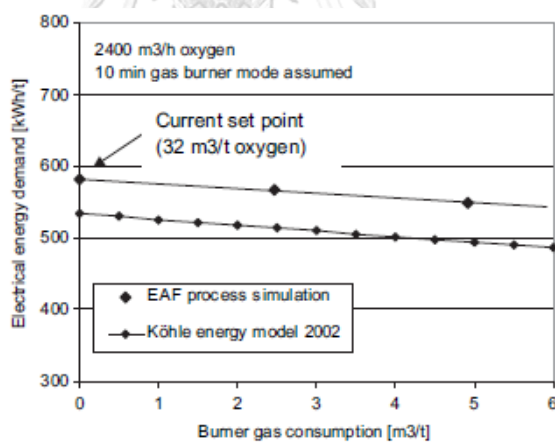


รูปที่ 1 ชนิดและปริมาณพลังงานที่เข้าและออกในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า[1]

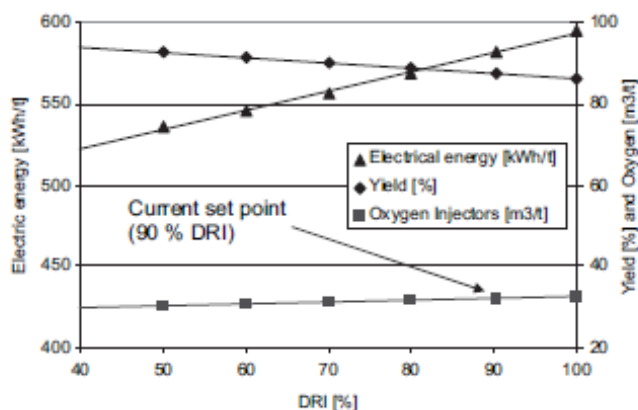
ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของ DRI ต่อ scrap จะทำให้พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีน้อยลง ส่งผลให้ความต้องการใช้ oxygen ลดน้อยลง และแสดงให้เห็นว่า ความต้องการพลังงานไฟฟ้าในเตาหลอมเหล็กจะแปรผกผันกับความต้องการใช้ oxygen ในการทำปฏิกิริยาเคมีดังแสดงในรูปที่ 2a และ 2b จึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่ม %DRI จะส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าในเตาหลอมสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2c



(a) ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณ oxygen



(b) ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าและปริมาณแก๊สที่ใช้ใน burner

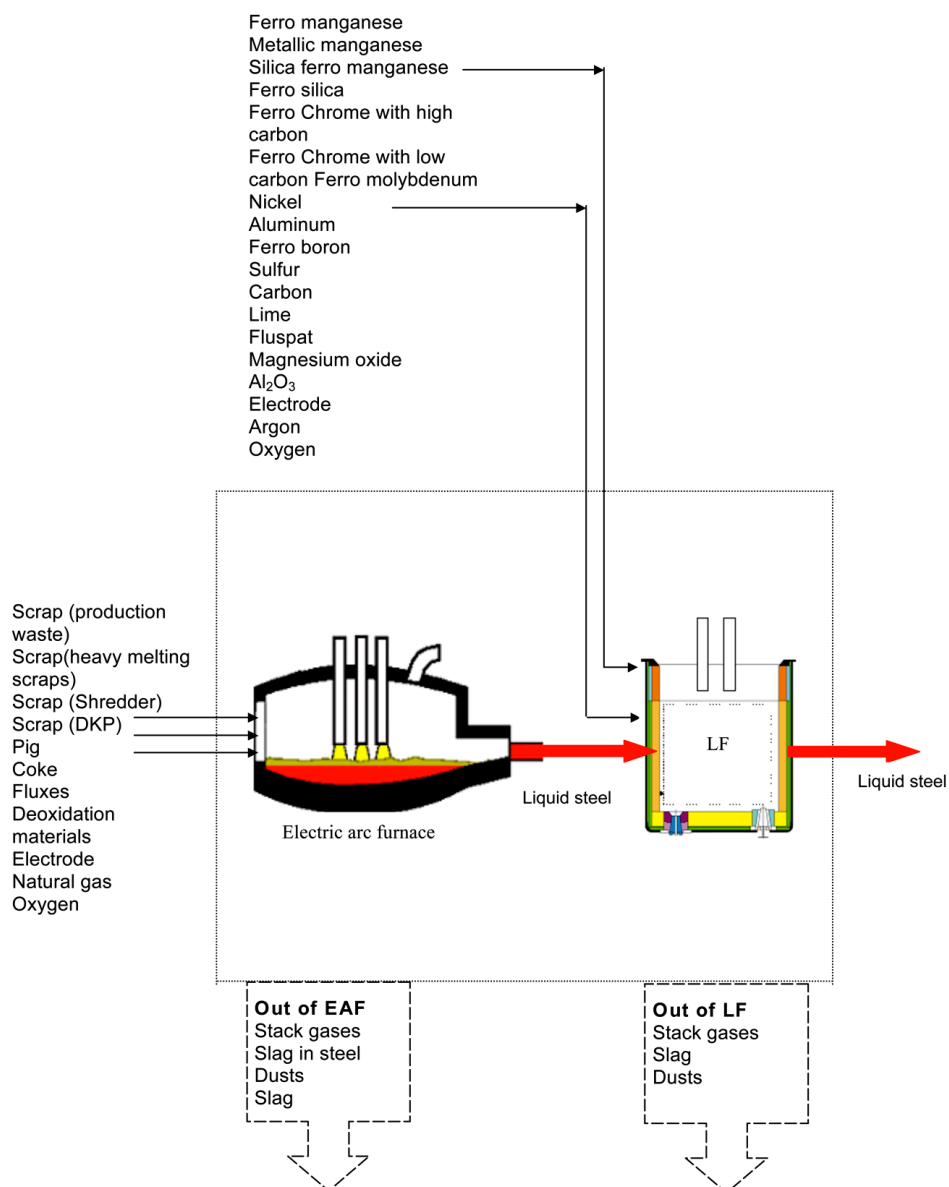


(c) ความสัมพันธ์ระหว่างความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าและ %DRI

รูปที่ 2 อัตราการใช้พลังงานและความต้องการออกซิเจน[1]

นอกจากนั้นยังพบว่า การเปลี่ยนปริมาณสารที่ใส่เข้าไปในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ก็ส่งผลให้การใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าลดลง ได้แก่ การใช้ปูนขาวในการผลิต stainless steel เพื่อสร้างโลหะประเภท High-alloyed นอกจากนี้จะมีประโยชน์ในการสร้าง slag เพื่อป้องกัน CO และ CO₂ ที่เกิดจากปฏิกิริยาใน CaCO₃ แล้ว ผลการทดลองยังพบว่า การใช้ปูนขาวจะทำให้ลดการใช้พลังงานไฟฟ้าในเตาหลอมเหล็กได้ อีกทั้งการเพิ่มมวลการเทของน้ำโลหะ ก็จะทำให้การใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าลดลงด้วยเช่นกัน

Çamdali, et al.[2] ได้ศึกษาฟังก์ชันการประมาณราคาอย่างเหมาะสมสำหรับระบบที่ประกอบด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเตาเผา Ladle furnace โดยการใช้สมการจุดประสงค์ที่มาจากสมการสมดุลพลังงานเป็นหลัก โดยศึกษาข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในฟังก์ชันการประมาณราคาจากระบบที่ประกอบด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเตาเผา Ladle furnace ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าการใช้พลังงานสามารถแบ่งสัดส่วนได้ คือ มีการใช้พลังงานไฟฟ้าร้อยละ 60 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด การใช้พลังงานจากปฏิกิริยาเคมีร้อยละ 30 ของพลังงานทั้งหมด และอีกร้อยละ 10 เป็นพลังงานที่ใช้ใน Laddle Furnace ซึ่งพลังงานจากปฏิกิริยาเคมีสามารถวิเคราะห์ได้จากการศึกษา Chemical analysis ของระบบดังกล่าว โดยอ้างอิงจากเอกสารงานวิจัยเรื่องสมดุลมวลภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของ Ekmekci, et al.[3] ผลการศึกษา ทำให้ทราบข้อมูลการใช้พลังงานภายในระบบ และสามารถนำไปวิเคราะห์การประมาณราคาอย่างเหมาะสมได้ โดยผลการศึกษาแสดงในตารางที่ 1

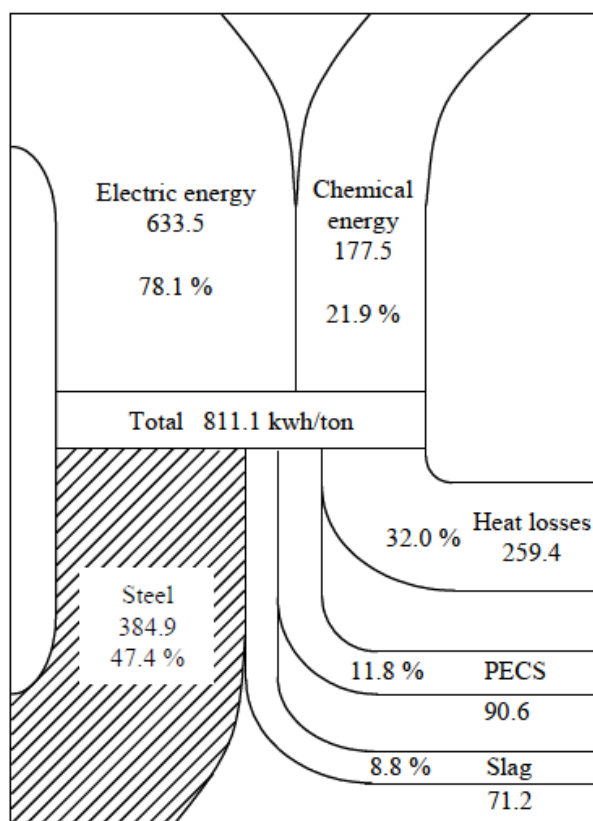


รูปที่ 3 ระบบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเตาเผา Laddle Furnace[2]

ตารางที่ 1 ราคาจากการประมาณตามสมการจุดประสงค์[2]

Steel types	Optimum cost, \$	Optimum cost, \$/ton
4140	10,525	204
4340	10,371	199
5140	10,418	201
C22 1.0402	10,220	196
Ck22 1.1151	10,071	194
25CrMo4 1.7218	10,412	198
38Cr2 1.7003	10,132	196

Cárdenas, et al.[4] ได้ศึกษาปริมาณการใช้พลังงานอย่างเหมาะสมที่ใช้ในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าแบบ 100% DRI โดยอาศัยสมการทั้งหมด 13 สมการ คือ สมดุลมวลของสารที่ทำปฏิกิริยาในเตาหลอม 5 สมการ, สมการข้อจำกัด 7 สมการ และสมการสมดุลพลังงานอีก 1 สมการ จากนั้นคำนวณกลุ่มสมการดังกล่าวผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LINDO API โดยใช้ฐานข้อมูลการใช้พลังงานจากโปรแกรม FactSage ผลการศึกษาจากกลุ่มของสมการดังกล่าว พบว่า สามารถทำนายปริมาณการใช้พลังงานเข้าได้และสามารถเขียน Sankey diagram ได้ดังแสดงในรูปที่ 4



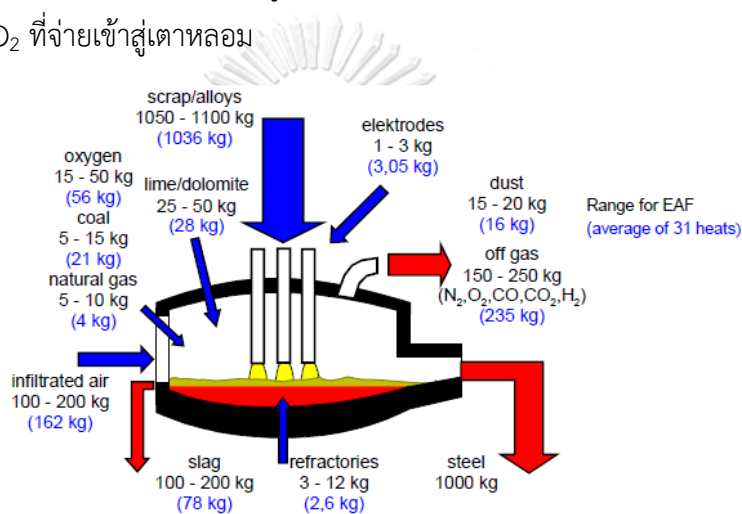
รูปที่ 4 Sankey Diagram แสดงการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า[4]

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยต่าง ๆ ข้างต้น พบว่า มีหลากหลายวิธีการเพื่อให้ได้มาซึ่งตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการสมดุลพลังงานที่มีความซับซ้อนสูงซึ่งขึ้นกับข้อจำกัดทางข้อมูลดังนี้ Marcus Kirschen, et al. ประมาณตัวแปรในสมการสมดุลพลังงานโดยใช้ตัวปรับแก้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าโดยตรงได้ Çamdali, et al. ประมาณตัวแปรในสมการสมดุลพลังงานโดยการศึกษา Chemical analysis ของกระบวนการหลอมเหล็กเพื่อวิเคราะห์พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีภายในกระบวนการ แล้วนำผล

การศึกษาไปคำนวณการใช้พลังงานจากส่วนอื่นได้ Cárdenas, et al. วิเคราะห์สมดุลพลังงานโดยอ้างอิงข้อมูลการใช้พลังงานภายในเตาหลอมจากฐานข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ FactSage

2.2 การประมาณตัวแปรไม่ทราบค่า

H.Pfeifer, et al. [5] ได้ศึกษาเปรียบเทียบผลการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนทางเธอโมไดนามิกส์กับแบบจำลองทางสถิติในการใช้พลังงานของ Köhler [6] ในการศึกษาดังกล่าวใช้แบบจำลองสมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยมีรายละเอียดมวลขาเขาและขาออกจากเตาหลอมดังแสดงในรูปที่ 5 และพบว่า ไนโอเสียประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ คือ N_2 , O_2 , CO , CO_2 และ H_2 และมีปริมาณอากาศที่ไหลซึมเข้าสู่เตาระหว่างกระบวนการหลอมในอัตราส่วนประมาณ 2.89 เท่าของปริมาณ O_2 ที่จ่ายเข้าสู่เตาหลอม

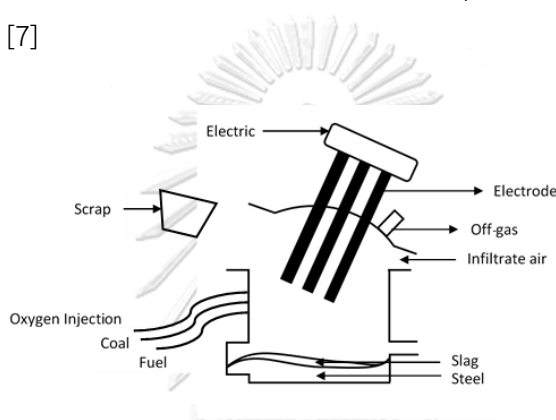


รูปที่ 5 แบบจำลองสมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า [5]

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace)

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลอมเศษเหล็ก (Scrap) และเหล็กดิบ (DRI หรือ Pig Iron) เพื่อขึ้นรูปเป็นแท่งเหล็ก (Billet) แล้วนำไปรีดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป โดยมีอุณหภูมิภายในเตาสูงถึงประมาณ 3,000 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้พลังงานของเตาหลอมมาจากพลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก โดยการให้กระแสไฟฟ้าผ่านแท่ง Electrode แล้วจุดอาร์คเพื่อเกิดให้ความร้อนในเตาหลอม ดังแสดงในรูปที่ 6 [7]



รูปที่ 6 Schematic Diagram ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ลักษณะการทำงานของเตาหลอมจะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.1.1 การเทเศษเหล็กและเหล็กดิบ (Charging) ในขั้นตอนนี้จะนำเศษเหล็กและเหล็กดิบใส่ใน Bucket เพื่อทำการเทลงสู่เตาหลอม โดยในขั้นนี้อาจทำทั้งหมด 2-3 ครั้ง ขึ้นอยู่กับความจุของเตา

3.1.2 การจุดอาร์ค (Melting) หลังจากการเท Bucket ครั้งแรก ฝาเตาหลอมที่อยู่ด้านบนจะปิดแล้วทำการเลื่อนแท่ง electrode ลงมาเพื่อทำการจุดอาร์คทำให้เศษเหล็กและเหล็กดิบหลอมรวมกัน โดยในระหว่างการจุดอาร์คจะมีการจ่ายออกซิเจน หลังจากนั้นแท่ง electrode จะยกขึ้นพร้อมเปิดฝาด้านบนเพื่อทำการกระบวนการที่ 3.1.1 และ 3.1.2 ซ้ำตามลำดับ จนได้ปริมาณน้ำเหล็กตามความจุของเตา

3.1.3 การเติมสารปรับคุณภาพ (Additions) หลังจากได้ปริมาณน้ำเหล็กถึงความจุภายในเตาแล้ว จะทำการเติมปูนขาว รวมไปถึงสารอื่น ๆ ที่ใช้ในการปรับคุณภาพของเหล็กเข้าสู่เตาหลอม

3.1.4 การกำจัด Slag (Slagging) หลังจากการเติมสารปรับคุณภาพของเหล็กแล้ว จะทำการกำจัด Slag ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการจุดอาร์คก่อนทำการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมเข้าสู่บ่้าหลอม

3.1.5 การเทน้ำเหล็ก (Tapping) หลังจากกำจัด slag ที่เกิดจากกระบวนการจุดอาร์คภายในเตาแล้ว จะเทน้ำเหล็กเข้าสู่เบ้าหลอม เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแท่งเหล็กในลำดับต่อไป

3.2 สมดุลมวลในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

การดำเนินการของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการเทน้ำเหล็กออกจากเตาหลอมแล้ว เมื่อนิยามเตาหลอมเหล็กเป็นปริมาตรควบคุม สามารถเขียนสมการกฏอนุรักษ์มวล [8] ได้ดังนี้

$$\Delta m_{CV} = \sum m_{inlet} - \sum m_{outlet} \quad (3.1)$$

เมื่อ Δm_{CV} คือ มวลที่คงเหลือในปริมาตรควบคุม (kg)

$\sum m_{inlet}$ คือ ผลรวมของมวลสารที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม (kg)

$\sum m_{outlet}$ คือ ผลรวมของมวลสารที่ออกจากปริมาตรควบคุม (kg)

เมื่อพิจารณาตัวแปรแต่ละตัว สามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

มวลที่เปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุม (Δm_{CV})

คือมวลของน้ำเหล็กที่เหลือค้างอยู่ในเตาหลอมหลังจากการเทน้ำเหล็ก เมื่อพิจารณาการทำงานของเตาหลอมในแต่ละรอบการทำงาน พบว่าจะมีน้ำเหล็กที่ตกค้างจากรอบการทำงานก่อนหน้าในปริมาณคงที่ จึงกล่าวได้ว่า การทำงานในแต่ละรอบวิเคราะห์เสมือนไม่มีน้ำเหล็กตกค้างอยู่ในเตา จึงสามารถสรุปสมการที่ 3.1 ได้เป็นสมการที่ 3.2

$$\sum m_{inlet} = \sum m_{outlet} \quad (3.2)$$

มวลที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม ($\sum m_{inlet}$) ประกอบด้วย

- มวลของเศษเหล็กที่หลงสู่เตาหลอม ($m_{scrap,i}$) สามารถวัดได้จากการชั่งน้ำหนักเศษเหล็กก่อนทำการเทลงสู่เตาหลอม
- มวลของสารที่ใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพของเหล็ก ($m_{add,i}$) สามารถวัดได้จากการชั่งน้ำหนักสารปรับปรุงประสิทธิภาพก่อนทำการเทลงสู่เตาหลอม
- มวลของแท่ง electrode ที่ใช้ในการจุดอาร์ค ($m_{elect,i}$) สามารถวัดได้จากปริมาณแท่ง electrode ที่ใช้ไปในกระบวนการหลอม
- มวลของถ่านหินที่ใส่เข้าไปในกระบวนการหลอม ($m_{coal,i}$) เพื่อทำให้เกิด slag ปกคลุมในระหว่างกระบวนการหลอม โดยสามารถวัดค่าได้จากการชั่งน้ำหนักถ่านหินก่อนใส่เข้าไปในกระบวนการหลอม

- มวลของออกซิเจนที่เติมเข้าไปเพื่อช่วยในการเผาไหม้ ($m_{oxygen,i}$) สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของออกซิเจน ความหนาแน่นของออกซิเจน และเวลาในการฉีดออกซิเจน ซึ่งสามารถวัดค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$m_{oxygen,i} = \rho_{oxygen} \dot{V}_{oxygen} t_{oxygen} \quad (3.3)$$

เมื่อ ρ_{oxygen} คือ ความหนาแน่นของออกซิเจน (kg/m^3)

\dot{V}_{oxygen} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของออกซิเจน (m^3/s)

t_{oxygen} คือ เวลาในการฉีดออกซิเจน (s)

- มวลของเชื้อเพลิงที่เติมเข้าไปเพื่อช่วยในการเผาไหม้ ($m_{fuel,i}$) สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของออกซิเจน ความหนาแน่นของออกซิเจน และเวลาในการฉีดออกซิเจน ซึ่งสามารถวัดค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$m_{fuel,i} = \rho_{fuel} \dot{V}_{fuel} t_{fuel} \quad (3.4)$$

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

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

t_{fuel} คือ เวลาในการฉีดเชื้อเพลิง (s)

- มวลของน้ำระบายความร้อนที่เข้าสู่เตาหลอม ($m_{water,i}$) สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำระบายความร้อน ความหนาแน่นของน้ำระบายความร้อน และเวลาในการจ่ายน้ำระบายความร้อน ซึ่งสามารถวัดค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 3.5

$$m_{water,i} = \rho_{water} \dot{V}_{water} t_{water} \quad (3.5)$$

เมื่อ ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำระบายความร้อน (kg/m^3)

\dot{V}_{water} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำระบายความร้อน (m^3/s)

t_{water} คือ เวลาในการจ่ายน้ำระบายความร้อน (s)

- มวลของอากาศที่เข้าสู่เตาหลอมในระหว่างการผลิต ($m_{infiltrate}$) ค่านี้ไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่สามารถประมาณได้โดยมีอัตราส่วนของ มวลของอากาศที่เข้าสู่เตาหลอมต่อมวลของออกซิเจนที่เติมเข้าไปเพื่อช่วยการเผาไหม้เป็น 2.89 ตามงานวิจัยของ H. Pfeifer et al. [5]

มวลที่ออกจากปริมาตรควบคุม ($\sum m_{outlet}$) ประกอบด้วย

- มวลของน้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม ($m_{iron,o}$) สามารถคำนวณได้จากผลคูณระหว่างปริมาตรของเบ้าหลอมกับความหนาแน่นของน้ำเหล็ก ดังสมการที่ 3.6

$$m_{iron,o} = \rho_{iron} V_{Bucket} n_{Bucket} \quad (3.6)$$

เมื่อ ρ_{iron} คือ ความหนาแน่นของน้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม (kg/m^3)

V_{Bucket} คือ ปริมาตรของเบ้าหลอม (m^3)

n_{Bucket} คือ จำนวนครั้งในการเทลงเบ้าหลอม

- มวลของ slag ที่เอาออกจากเตาหลอม $m_{slag,o}$ สามารถวัดได้จากการชั่งน้ำหนักของ slag ที่ทำการกำจัดออกจากเตาหลอมก่อนการเทน้ำเหล็ก และสามารถทราบส่วนประกอบของ slag ได้จากการทดสอบ slag composition
- มวลฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหลอม $m_{dusk,o}$ สามารถวัดได้จากการชั่งน้ำหนักของฝุ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหลอม
- มวลของไอเสียที่ออกจากเตาหลอม $m_{off-gas,o}$ สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของไอเสียที่ออกจากเตาหลอม ความหนาแน่นไอเสีย และเวลาในการปล่อยไอเสีย ซึ่งสามารถวัดค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 3.7

$$m_{off-gas,o} = \rho_{off-gas} \dot{V}_{off-gas} t_{off-gas} \quad (3.7)$$

เมื่อ $\rho_{off-gas}$ คือ ความหนาแน่นของไอเสีย (kg/m^3)

$\dot{V}_{off-gas}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรไอเสีย (m^3/s)

$t_{off-gas}$ คือ เวลาในการปล่อยไอเสีย (s)

- มวลของน้ำระเหยความร้อนที่ออกจากเตาหลอม $m_{water,o}$ สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำระเหยความร้อน ความหนาแน่นของน้ำ

ระบายความร้อน และเวลาในการจ่ายน้ำระบายความร้อน ซึ่งสามารถวัดค่าได้ดังแสดงในสมการที่ 3.8

$$m_{water,o} = \rho_{water} \dot{V}_{water} t_{water} \quad (3.8)$$

เมื่อ ρ_{water} คือ ความหนาแน่นของน้ำระบายความร้อน (kg/m^3)

\dot{V}_{water} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำระบายความร้อน (m^3/s)

t_{water} คือ เวลาในการจ่ายน้ำระบายความร้อน (s)

3.3 สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยนิยามเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นปริมาตรควบคุม สามารถแสดงดังสมการที่ 3.9

$$\Delta E_{CV} = \sum Q - \sum W + \sum H_i - \sum H_e \quad (3.9)$$

เมื่อ ΔE_{CV} คือ พลังงานที่เหลือในปริมาตรควบคุม (kJ)

$\sum Q$ คือ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุม (kJ)

$\sum W$ คือ งานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม (kJ)

$\sum H_i$ คือ เอนทัลปีที่เกิดจากการไหลของมวลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม (kJ)

$\sum H_e$ คือ เอนทัลปีที่เกิดจากการไหลของมวลออกจากปริมาตรควบคุม (kJ)

3.3.1 พลังงานที่เหลืออยู่ในปริมาตรควบคุม (ΔE_{CV}) คือ พลังงานที่เกิดจากปริมาณน้ำเหล็กที่เหลือค้างอยู่ในเตาหลอมหลังเสร็จสิ้นการเทน้ำเหล็กออกตากเตาหลอม แต่หากพิจารณาการทำงานของเตา พบว่าในแต่ละรอบการทำงานจะมีน้ำเหล็กหลงเหลือในเตาหลอมปริมาณคงที่ และอุณหภูมิขณะเทของเตาหลอมก็คงที่ จึงสามารถวิเคราะห์เสมือนว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในปริมาตรควบคุม $\Delta E_{CV} = 0$

3.3.2 พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทของปริมาตรควบคุม (ΣQ)

3.3.2.1 พลังงานความร้อนจากน้ำระบายความร้อน เนื่องจากขณะดำเนินการหลอม จะมีการจ่ายน้ำเพื่อระบายความร้อนออกจากเตาหลอม โดยสามารถคำนวณพลังงานความร้อนได้ดังสมการที่ 3.10

$$Q_{water} = m_{water} C_{p,water} (T_{water,o} - T_{water,i}) \quad (3.10)$$

เมื่อ $C_{p,water}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำระบายความร้อน (kJ/kg.K)

$T_{water,o}$ คือ อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนที่ออกจากเตาหลอม (K)

$T_{water,i}$ คือ อุณหภูมิของน้ำระบายความร้อนที่เข้าสู่เตาหลอม (K)

3.3.2.2 พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากเตาหลอม ดำเนินการที่อุณหภูมิสูง จึงมีผลของการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีสู่สิ่งแวดล้อม โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11

$$Q_{rad} = A\sigma(T_{EAF}^4 - T_{ambient}^4) \quad (3.11)$$

เมื่อ Q_{rad} คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสียจากการแผ่รังสี

A คือ พื้นที่ผิวของเตาหลอม

σ คือ ค่าคงที่ของ สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ 5.67×10^{-8} (W/m²K⁴)

T_{EAF} คือ อุณหภูมิของเตาหลอม

$T_{ambient}$ คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

3.3.3 งานที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม (ΣW)

เนื่องจากเตาหลอมหลักเป็นวัตถุแข็งเกร็ง มีการขยายตัวน้อยมากจึงสามารถอนุมานได้ว่าไม่เกิดงานเนื่องจากการขยายตัวของปริมาตรควบคุม จึงมีเพียงแรงแงานไฟฟ้าที่ป้อนสู่แท่ง Electrode เพียงอย่างเดียว โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.12

$$W_{elec} = Pt \quad (3.12)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (W)

t คือ เวลา tap to tap time (s)

3.3.4 เอนทัลปีที่เข้าสู่ปริมาตรควบคุม (ΣH_i)

3.3.4.1 Enthalpy ของเศษเหล็กและเหล็กดิบที่ทำการเทเข้าสู่เตาหลอม สามารถหาค่าได้เมื่อทราบอุณหภูมิของเศษเหล็กที่เทเข้าเตาหลอม โดยใช้ตารางเฮอร์โมไดนามิกส์ [8]

3.3.4.2 Enthalpy ของออกซิเจนที่ฉีดเข้าสู่เตาหลอม สามารถหาค่าได้เมื่อทราบอุณหภูมิและความดันของออกซิเจนขณะเข้าสู่เตาหลอม โดยใช้ตารางเฮอร์โมไดนามิกส์ [8]

3.3.4.3 Enthalpy ของสารปรับคุณภาพที่เติมลงไปในเตาหลอม สามารถหาค่าได้เมื่อทราบชนิดของสาร อุณหภูมิของสารปรับคุณภาพที่เทเข้าเตาหลอม โดยใช้ตารางเฮอร์โมไดนามิกส์ [8]

3.3.4.4 พลังงานจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ เนื่องจากในกระบวนการหลอม มีการเผาไหม้เกิดขึ้น คือ การเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง การเผาไหม้สมบูรณ์ของแท่ง electrode และการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน

3.3.4.5 พลังงานจากปฏิกิริยา Slag forming เนื่องจากในกระบวนการหลอมมีการสร้าง slag เกิดขึ้น จึงมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการสร้าง slag นี้ โดยสามารถคำนวณได้จาก ตารางอ้างอิงข้อมูลจากเอกสารงานวิจัยของ Marcus Kirschen, et al. ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาสันดาปของสารต่าง ๆ ในเตาหลอม [1]

	Energy released	
Reactions in melt		
$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	8.94 kWh/kg _{Si}	11.2 kWh/m ³ _{O₂}
$\text{Mn} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{MnO}$	1.93 kWh/kg _{Mn}	9.48 kWh/m ³ _{O₂}
$2\text{Cr} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_3$	3.05 kWh/kg _{Cr}	9.42 kWh/m ³ _{O₂}
$2\text{Fe} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$	2.05 kWh/kg _{Fe}	6.80 kWh/m ³ _{O₂}
$\text{Fe} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{FeO}$	1.32 kWh/kg _{Fe}	6.58 kWh/m ³ _{O₂}
$\text{C} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	2.55 kWh/kg _C	2.73 kWh/m ³ _{O₂}
$2\text{Al} + 1.5\text{O}_2 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$	5.29 kWh/kg _{Al}	13.84 kWh/m ³ _{O₂}
$\text{Mo} + \text{O}_2 \rightarrow \text{MoO}_2$	1.70 kWh/kg _{Mo}	7.29 kWh/m ³ _{O₂}
$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$	2.75 kWh/kg _S	3.94 kWh/m ³ _{O₂}
$2\text{P} + 2.5\text{O}_2 \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5$	5.54 kWh/kg _P	8.58 kWh/m ³ _{O₂}
Reactions in gas phase		
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	9.10 kWh/kg _C	4.88 kWh/m ³ _{O₂}
$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$		7.01 kWh/m ³ _{O₂}
$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$		5.99 kWh/m ³ _{O₂}

3.3.5 เอนทัลปีที่ออกจากปริมาตรควบคุม ($\sum H_e$)

3.3.5.1 Enthalpy ของ slag ที่เอาออกจากเตาหลอมก่อนทำการเทน้ำเหล็ก สามารถหาค่าได้เมื่อทราบองค์ประกอบและอุณหภูมิของ slag โดยใช้ตารางเฮอร์โมไดนามิกส์ [8]

3.3.5.2 Enthalpy ของน้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม สามารถหาค่าได้เมื่อทราบอุณหภูมิของเศษเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม โดยใช้ตารางเฮอร์โมไดนามิกส์ [8]

3.3.5.3 Enthalpy ของฝุ่น (Dusk) ที่ออกจากเตาหลอม สามารถหาค่าได้เมื่อทราบองค์ประกอบและอุณหภูมิของฝุ่น โดยใช้ตารางเฮอร์โมไดนามิกส์ [8]

3.3.5.4 Enthalpy ของไอเสีย (Off-gas) สามารถคำนวณได้ เมื่อทราบสารที่เป็นองค์ประกอบของไอเสีย

บทที่ 4

ผลการเก็บข้อมูลจากโรงงานตัวอย่าง

ในการเก็บข้อมูลจากโรงงานตัวอย่าง จะเริ่มเก็บข้อมูลตลอดการทำงาน 1 Batch โดยอาศัยการบันทึกผลจากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งมาพร้อมเครื่องจักรของโรงงานตัวอย่างนั้น ๆ โดยข้อมูลดิบที่ทำการเก็บจะแบ่งเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ คือ ข้อมูลการทำงานของแต่ละหลอม และองค์ประกอบของ slag โดยตารางที่ใช้สำหรับการเก็บข้อมูลจะแสดงในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 แบบฟอร์มการเก็บข้อมูลทั่วไปของโรงงาน

โรงงานตัวอย่าง								
ข้อมูลการทำงาน			พลังงานขาเข้า			อื่น ๆ		
Tap to tap		นาที	ไฟฟ้า		kWh	ไอเสีย		m ³
Scrap charge		ตัน	เชื้อเพลิง		Nm ³	น้ำระบาย ความร้อน		m ³
Scrap charge temp		°C	ออกซิเจน (lance)		Nm ³	อุณหภูมิ น้ำระบาย ความร้อน ขาเข้า		°C
Liquid steel		ตัน	ออกซิเจน (Burner)		Nm ³	อุณหภูมิ น้ำระบาย ความร้อน ขาออก		°C
slag		ตัน	ออกซิเจน (Total)		Nm ³			
pouring Temp		°C	ถ่านหิน		kg			
			อิเล็กทรอนิกส์		kg			

ตารางที่ 4 แบบฟอร์มการเก็บข้อมูล slag ของโรงงาน

องค์ประกอบของ slag	
ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
SiO ₂	
Al ₂ O ₃	
MnO	
CaO	
MgO	
FeO	

4.1 โรงงานตัวอย่าง ก.

ตารางที่ 5 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง ก.

โรงงานตัวอย่าง ก.								
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ		
Tap to tap time	55	นาที	ไฟฟ้า	31,720	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³
Scrap charge	82	ตัน	เชื้อเพลิง	565 (Natural Gas)	Nm ³	น้ำระบายความร้อน	1,110	m ³
Scrap charge temp	33	°C	ออกซิเจน (lance)	1,176	Nm ³	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาเข้า	30	°C
Liquid steel	74	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	1,128	Nm ³	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาออก	37	°C
slag	5.92	ตัน	ออกซิเจน (Total)	2,304	Nm ³			
Pouring Temp	1,600	°C	ถ่านหิน	637	kg			
			Electrode	93	kg			

ตารางที่ 6 ข้อมูล slag ของโรงงานตัวอย่าง ก.

องค์ประกอบของ slag	
ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
SiO ₂	18.18
Al ₂ O ₃	9.95
MnO	5.07
CaO	34.18
MgO	6.65
FeO	15.67

4.2 โรงงานตัวอย่าง ข.

ตารางที่ 7 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง ข.

โรงงานตัวอย่าง ข.								
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ		
Tap to tap time	55.28	นาที	ไฟฟ้า	21,190	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³
Scrap charge	50.68	ตัน	เชื้อเพลิง	109 (LPG)	Nm ³	น้ำระบายความร้อน	400	m ³
Scrap charge temp	40	°C	ออกซิเจน (lance)	1197	Nm ³	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาเข้า	38	°C
Liquid steel	46	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	660	Nm ³	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาออก	50	°C
slag	4.68	ตัน	ออกซิเจน (Total)	1857	Nm ³			
Pouring Temp	1,620	°C	ถ่านหิน	688	kg			
			อิเล็กทรอนิกส์	56	kg			

ตารางที่ 8 ข้อมูล slag ของโรงงานตัวอย่าง ข.

องค์ประกอบของ slag	
ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
SiO ₂	12.72
Al ₂ O ₃	7.75
MnO	5.53
CaO	33.05
MgO	5.71
FeO	31.39

4.3 โรงงานตัวอย่าง ค.

ตารางที่ 9 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง ค.

โรงงานตัวอย่าง ค.								
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ		
Tap to tap time	60	นาที	ไฟฟ้า	32,000	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³
Scrap charge	85	ตัน	เชื้อเพลิง	600 (Natural Gas)	Nm ³	น้ำระบายความร้อน	1190	m ³
Scrap charge temp	33	°C	ออกซิเจน (lance)	1548	Nm ³	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาเข้า	36	°C
Liquid steel	75	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	1152	Nm ³	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาออก	46	°C
slag	5.4	ตัน	ออกซิเจน (Total)	2700	Nm ³			
Pouring Temp	1,620	°C	ถ่านหิน	2000	kg			
			อิเล็กทรอนิกส์	142.5	kg			

ตารางที่ 10 ข้อมูล slag ของโรงงานตัวอย่าง ค.

องค์ประกอบของ slag	
ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
SiO ₂	10
Al ₂ O ₃	10
MnO	10
CaO	25
MgO	5
FeO	40

4.3 โรงงานตัวอย่าง ง.

ตารางที่ 11 ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง ง.

โรงงานตัวอย่าง ง.								
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ		
Tap to tap time	60	นาที	ไฟฟ้า	13300	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³
Scrap charge	27	ตัน	เชื้อเพลิง	94 (Diesel)	dm ³	น้ำระบายความร้อน	500	m ³
Scrap charge temp	33	°C	ออกซิเจน (lance)	526	Nm ³	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาเข้า	36	°C
Liquid steel	23	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	274	Nm ³	อุณหภูมิน้ำระบายความร้อนขาออก	40	°C
slag	1.5	ตัน	ออกซิเจน (Total)	800	Nm ³			
Pouring Temp	1,620	°C	ถ่านหิน	600	kg			
			อิเล็กทรอนิกส์	85	kg			

ตารางที่ 12 ข้อมูล slag ของโรงงานตัวอย่าง ง.

องค์ประกอบของ slag	
ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
SiO ₂	15
Al ₂ O ₃	10
MnO	10
CaO	30
MgO	5
FeO	30

จากข้อมูลตัวอย่างของทั้ง 4 โรงงาน จะเห็นว่า มีตัวแปรที่ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้เหมือนกัน ทั้ง 2 โรงงาน คือ ข้อมูลองค์ประกอบของไอเสีย จึงต้องมีการวิเคราะห์สมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อหาองค์ประกอบของไอเสีย และนำไปวิเคราะห์สมดุลพลังงานในลำดับต่อไป

บทที่ 5

การวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกคือการวิเคราะห์สมดุลมวลเพื่อให้ทราบองค์ประกอบของสารที่เข้าสู่เตาหลอม เมื่อได้ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลแล้ว จึงนำไปวิเคราะห์สมดุลพลังงานเป็นขั้นตอนที่สอง

5.1 สมดุลมวล

จากทฤษฎีเรื่องสมดุลมวลของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.2 เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.1 โดยกำหนดให้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นปริมาตรควบคุม โดยสามารถแจกแจงมวลของสารขาเข้าและขาออกให้เป็นกลุ่ม ๆ และแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบตารางได้ดังตารางที่ 13 พบว่าไม่ทราบองค์ประกอบของไอเสีย จึงมีการคำนวณเพื่อวิเคราะห์ผลดังนี้

ตารางที่ 13 ข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณสมดุลมวล

มวลที่เข้าสู่เตาหลอม			มวลที่ออกจากเตาหลอม			
Scrap	เหล็ก	kg	ไอเสีย	เหล็ก	kg	kg
	สารเจือปน	kg		Slag	kg	kg
	สารปรับคุณภาพ	kg		CO ₂	kg	kg
O ₂	Lance	kg	ไอเสีย	H ₂ O	kg	kg
	Burner	kg		O ₂	kg	kg
	Infiltrate	kg		N ₂	kg	kg
Other	N ₂ Infiltrate	kg	ไอเสีย	CO	kg	kg
	C	kg				
	เชื้อเพลิง	kg				

5.1.1 มวลของ Scrap ที่เข้าสู่เตาหลอม

เมื่อพิจารณาข้อมูล Scrap จากโรงงาน พบว่าเป็นค่าที่วัดรวมกันระหว่าง เศษเหล็ก สารเจือปนอื่น ๆ และสารปรับคุณภาพของเหล็ก ซึ่งไม่ทราบปริมาณของแต่ละประเภท จึงต้องทำการคำนวณย้อนกลับโดยใช้ข้อมูลองค์ประกอบของ Slag ของแต่ละโรงงานดังแสดงในตารางที่ 6 8 10 และ 12 เมื่อใช้ข้อมูลดังกล่าว จะทำให้ทราบชนิดและองค์ประกอบของสารเจือปนอื่น ๆ ที่มาพร้อมเศษเหล็ก และปริมาณของสารปรับคุณภาพที่ต้องสอดคล้องกับข้อมูลดังกล่าว โดยสารปรับคุณภาพจะประกอบด้วย CaCO₃ และ MgCO₃

5.1.2 มวลของ O_2 ที่เข้าสู่เตาหลอม

ออกซิเจนที่เข้าสู่เตาหลอมจะมาจาก 3 ส่วน คือ ส่วนที่ฉีดเข้าไปเพื่อทำปฏิกิริยา Oxidation ในการเกิด Slag (Lance) ส่วนที่ฉีดเข้าไปเพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิง (Burner) ซึ่งเป็นตั้งแปรที่ทราบค่าจากการตรวจวัด และส่วนที่ไหลซึมเข้ามาพร้อมอากาศระหว่างกระบวนการหลอม (Infiltrate) ซึ่งเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า และสามารถประมาณได้โดยใช้อัตราส่วน infiltrated air : Oxygen Injected = 2.89 [5]

5.1.3 มวลของสารขาเข้าอื่น ๆ

มวลของสารขาเข้าอื่น ๆ จะแบ่งได้เป็น 3 องค์ประกอบ คือ มวลของ N_2 ที่ไหลซึมเข้ามาพร้อมอากาศระหว่างกระบวนการหลอม (Infiltrate) ซึ่งเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า และสามารถประมาณได้จากอัตราส่วน infiltrated air : Oxygen Injected = 2.89 [5] มวลของคาร์บอนที่มาจากแท่งอิเล็กโทรดและถ่านหิน และมวลของเชื้อเพลิงที่ใส่เข้าไปเพื่อกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ทราบค่าจากการตรวจวัด

5.1.4 มวลของไอเสียออก

ไอเสีย จะประกอบไปด้วย CO_2 ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและแท่งอิเล็กโทรด CO เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน O_2 เกิดจาก 2 ส่วน คือ ออกซิเจนในอากาศที่รั่วซึมเข้าสู่เตาในระหว่างกระบวนการหลอม และออกซิเจนที่เหลือจากการปฏิกิริยาการเผาไหม้และปฏิกิริยา Oxidation ในการเกิด Slag N_2 เกิดจากอากาศที่รั่วซึมเข้าสู่เตาระหว่างกระบวนการหลอม

5.2 สมดุลพลังงาน

จากทฤษฎีเรื่องสมดุลพลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3 เมื่อพิจารณาสมการที่ 3.9 ร่วมกับผลการวิเคราะห์สมดุลมวลที่คำนวณได้ในหัวข้อที่ 3.1 โดยกำหนดให้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นปริมาตรควบคุม พบว่า สามารถแจกแจงให้อยู่ในรูปแบบตารางดังแสดงในตารางที่ 10 เมื่อพิจารณาพลังงานที่เข้าสู่เตาหลอมจะประกอบด้วย เอนทัลปีของ Scrap รวมถึงสารเจือปนและสารปรับคุณภาพ (Scrap Enthalpy) พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่เตาหลอม (Electrical Energy) พลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Fuel Combustion) และพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา Oxidation ของการเกิด slag (Chemical Oxidation) พิจารณาพลังงานที่ออกจากเตาหลอมประกอบด้วย เอนทัลปีของน้ำเหล็กที่ออกจากเตาหลอม (Steel Enthalpy) เอนทัลปีของไอเสียที่ออกจากเตาหลอม (Off-gas Enthalpy) เอนทัลปีของ slag (Slag Enthalpy) พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทโดยน้ำหล่อเย็น (Cooling Water) และการสูญเสียพลังงานอื่น ๆ (Other loss) ได้แก่ Heat loss, Dust เป็นต้น

ตารางที่ 14 ข้อมูลตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณสมดุลพลังงาน

Input			Generate			Output		
Scrap	เหล็ก	MJ	Combustion	MJ		เหล็ก	MJ	
	สารเจือปน	MJ	Oxidation	MJ		SLAG	MJ	
	สารปรับคุณภาพ	MJ				น้ำระบาย ความร้อน	MJ	
O ₂	Lance	MJ			off-gas	CO ₂	MJ	
	Burner	MJ				H ₂ O	MJ	
	Infiltrate	MJ				O ₂	MJ	
Other	N ₂ Infiltrate	MJ				N ₂	MJ	
	C	MJ			CO	MJ		
	เชื้อเพลิง	MJ			Other	MJ		
	ไฟฟ้า	MJ						
	Total	MJ	Total	MJ		Total	MJ	

5.2.1 พลังงานของ Scrap ขาเข้า

เมื่อทราบชนิดและองค์ประกอบของสารต่าง ๆ ที่เจือปนใน Scrap จากการวิเคราะห์สมดุลมวลดังแสดงในหัวข้อ 5.1.1 จะสามารถคำนวณพลังงานขาเข้าของสารต่าง ๆ เหล่านั้นได้จากการวิเคราะห์เอนทัลปีได้ดังหัวข้อ 3.3.4.1 และ 3.3.4.3

5.2.2 พลังงานของ O₂ ขาเข้า

จากข้อมูลทั่วไปของโรงงานและการวิเคราะห์ O₂ ที่ไหลซึมเข้ามาระหว่างกระบวนการหลอมเนื่องจากอากาศภายนอกดังหัวข้อ 5.1.3 ทำให้ทราบปริมาณของ O₂ ทั้งหมดที่เข้าสู่เตาหลอม และสามารถคำนวณพลังงานขาเข้าได้จากการวิเคราะห์เอนทัลปีดังหัวข้อ 3.3.4.2

5.2.3 พลังงานของสารประกอบอื่น ๆ ขาเข้า

เมื่อทราบปริมาณของ C และ เชื้อเพลิงขาเข้า รวมถึง N₂ ที่ไหลซึมเข้ามาระหว่างกระบวนการหลอมเนื่องจากอากาศภายนอกดังหัวข้อ 5.1.3 ทำให้สามารถคำนวณพลังงานได้จากเอนทัลปีของสารดังกล่าวดังแสดงในสมการที่ 3.3.4.2 และสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่เตาหลอมได้ดังหัวข้อ 3.3.3

5.2.4 พลังงานของการเผาไหม้เชื้อเพลิง ถ่านหิน และแท่ง Electrode

พลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง จะขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อเพลิงที่แต่ละโรงงานเลือกใช้ สามารถคำนวณได้ดังหัวข้อที่ 3.3.4.4 โดยสมมุติให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงและแท่ง Electrode เป็นการเผาไหม้สมบูรณ์ การเผาไหม้ถ่านหินเป็นการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์

5.2.5 พลังงานของปฏิกิริยา Oxidation ในการเกิด Slag

เป็นพลังงานที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวระหว่าง O_2 และ โลหะเจือปนอื่น ๆ ใน Scrap ให้อยู่ในรูปออกไซด์ของโลหะ สามารถวิเคราะห์ได้ดังแสดงในหัวข้อ 3.3.4.5

5.2.6 พลังงานของน้ำเหล็กและ Slag ที่ออกจากเตาหลอม

จากการวิเคราะห์สมดุลมวล เมื่อทราบปริมาณของน้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม รวมถึงองค์ประกอบและปริมาณของ Slag จะสามารถคำนวณพลังงานของสารขาออกได้จากการวิเคราะห์เอนทัลปี ดังสมการที่ 3.3.5.1

5.2.7 พลังงานของไอเสียที่ออกจากเตาหลอม

จากการวิเคราะห์สมดุลมวล จะทำให้ทราบชนิดและองค์ประกอบของไอเสีย จะสามารถคำนวณพลังงานของไอเสียขาออกได้จากการวิเคราะห์เอนทัลปี ดังสมการที่ 3.3.5.4

5.2.8 พลังงานของน้ำระบายความร้อน

จากข้อมูลทั่วไปของโรงงาน จะทราบปริมาณน้ำระบายความร้อนที่ใช้ โดยสามารถคำนวณพลังงานของน้ำระบายความร้อนได้ดังหัวข้อ 3.3.2

5.2.9 พลังงานที่สูญเสียอื่น ๆ

พลังงานที่สูญเสียอื่น ๆ เป็นพลังงานที่สูญเสียอันเนื่องจากการแผ่รังสีความร้อน การสูญเสียเนื่องจากฝุ่นที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหลอม และอื่น ๆ โดยจะสามารถคำนวณจากผลต่างระหว่างพลังงานรวมขาเข้าและขาออก

บทที่ 6

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เมื่อทราบวิธีการและสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละส่วนดัง จะนำมาเขียนลงบนโปรแกรม Microsoft Excel โดยใช้ชื่อโปรแกรมว่า Energy_Balance_EAF.xlst โดยประกอบด้วย sheet ทั้งหมด 13 sheet ได้แก่ ค่าคงที่และข้อมูลทั่วไป, Slag, Mass Calculation, Mass_Balance1, Mass Balance2, Energy Calculation1, Energy Calculation2, Energy Summary1, Energy Summary2, Mass Summary1, Mass Summary2, Summary1 และ Summary2 โดยมีรายละเอียดและการใช้งานดังต่อไปนี้

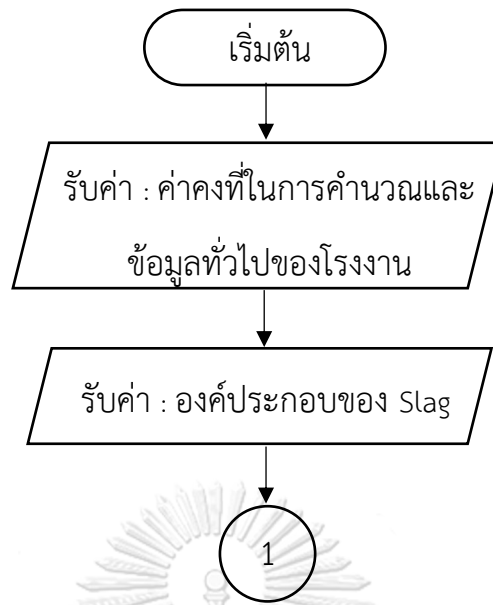
6.1 การป้อนข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการคำนวณ

เมื่อพิจารณาข้อมูลขาเข้า จะแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ค่าคงที่ที่ใช้คำนวณและข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่างแสดง Flow chart ดังรูปที่ 7 โดยจะป้อนค่าในหน้า ค่าคงที่และข้อมูลทั่วไป และข้อมูลองค์ประกอบของ Slag จะอยู่ในหน้า Slag ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 โดยจะต้องป้อนข้อมูลที่จำเป็นต่อการคำนวณในช่องสีเหลือง

6.1.1 ค่าคงที่ที่ใช้คำนวณ ประกอบด้วย ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กขาเข้า (kJ/kg.K), ความหนาแน่นของออกซิเจน (kg/m^3), ค่าความจุความร้อนจำเพาะของออกซิเจน (kJ/kg.K), ค่าความจุความร้อนจำเพาะของถ่านหิน (kJ/kg.K), ค่าความจุความร้อนจำเพาะของคาร์บอน (kJ/kg.K), ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (kJ/kg.K) และความหนาแน่นของเชื้อเพลิง (kg/m^3)

6.1.2 ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน ประกอบด้วย ชื่อโรงงาน, Tap to tap time, ปริมาณและอุณหภูมิของ Scrap Charge, ปริมาณออกซิเจนที่ฉีดเข้าเตาหลอม, ปริมาณถ่านหินที่ใส่เข้าเตาหลอม, ปริมาณของแท่งอิเหล็กโทรด, ปริมาณเชื้อเพลิง, ปริมาณของน้ำระบายความร้อน, พลังงานไฟฟ้า, ปริมาณน้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม, ปริมาณ Slag, อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของน้ำระบายความร้อน

6.1.3 ข้อมูลองค์ประกอบของ Slag โดยมีหน่วยเป็นร้อยละโดยมวล ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , CaO , MgO และ FeO



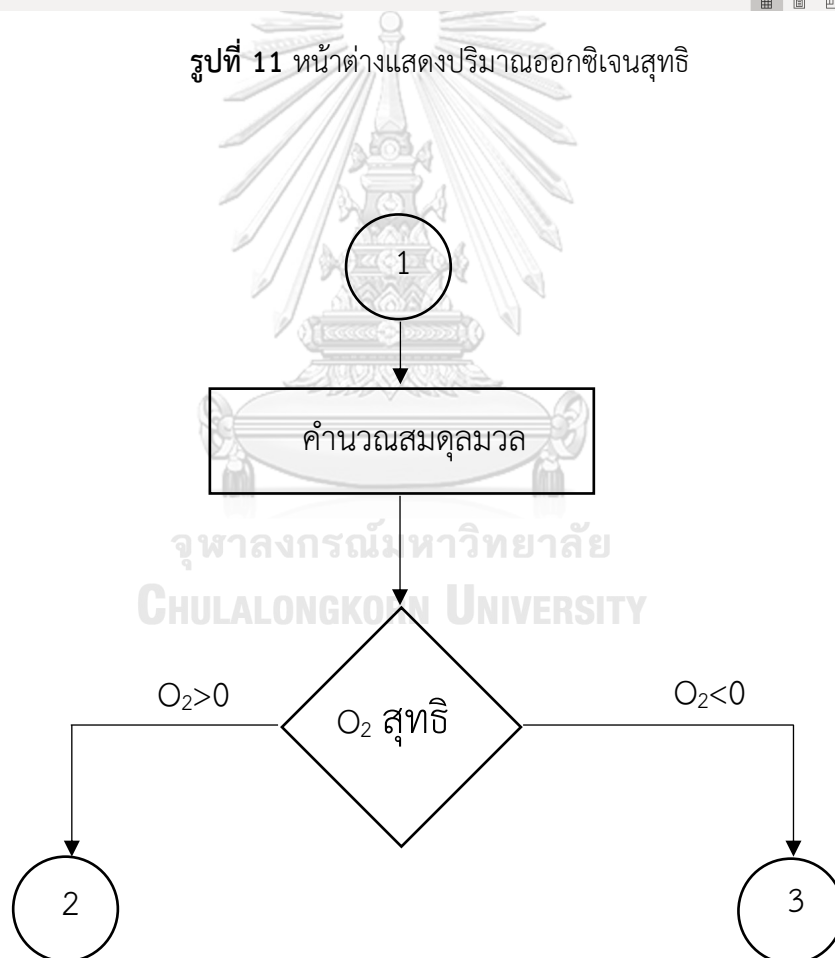
รูปที่ 7 Flow Chart การรับค่าข้อมูลสำหรับคำนวณ

ค่าคงที่ในการคำนวณ			ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน			
Cp steel		kJ/kg.K	ชื่อโรงงาน			
Density Oxygen		kg/m ³	Tap to tap time			
CpOxygen		kJ/kg.K	input		Output	
CpCoal		kJ/kg.K	SCRAP Charge	Ton	Liquid Steel	Ton
Cp carbon		kJ/kg.K	SCRAP TEMP.	oC	SLAG	Ton
Cp CH4		kJ/kg.K	Oxygen (lance)	Nm3	off gas	
Density Diesel		kg/m ³	Oxygen (Burner)	Nm3	Cooling Water	
			Coal	kg	Cooling Water Temp in	oC
			Fuel	l	Cooling Water Temp out	oC
			Electrode	kg		
			Cooling Water	m3		
			Electric	kWh		

รูปที่ 8 หน้าต่างแสดงการรับค่าข้อมูลทั่วไปของโรงงาน

Input		Output	
Scrap		Fe	0 kg
Fe	0 kg	SLAG	0 kg
other	0 kg	off-gas	
ปรง	0 kg	CO2	0 kg
O2		H2O	0 kg
lance	0 kg	CO	0 kg
Burner	0 kg	O2	
infill	0 kg	Total	0 kg
Other			
C	0 kg		
CH4	0 kg		
N2 infill	0 kg		

รูปที่ 11 หน้าต่างแสดงปริมาณออกซิเจนสุทธิ



รูปที่ 12 Flow Chart การวิเคราะห์สมดุลมวล

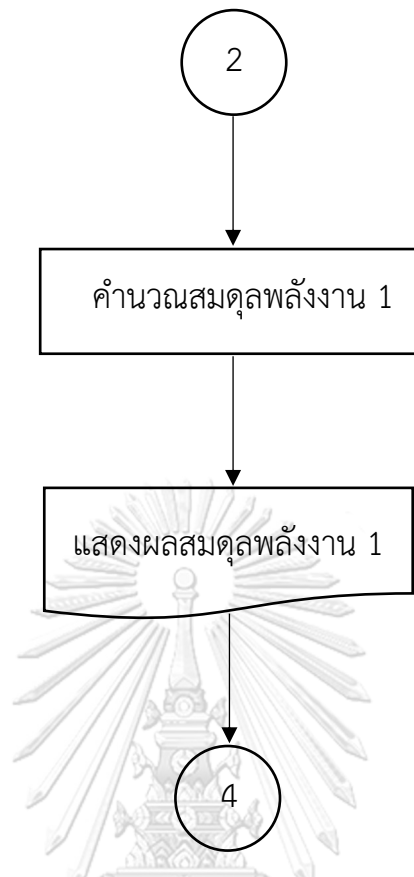
6.3 การวิเคราะห์สมดุลพลังงาน

6.3.1 การคำนวณสมดุลพลังงานกรณี มวลของ O₂ สุทธิเป็นบวก

เมื่อได้ผลลัพธ์จากการคำนวณสมดุลมวลในหน้า Mass_Balance1 แล้ว จะทำการคำนวณสมดุลพลังงานในหน้า Energy Calculation1 ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยการคำนวณจะอาศัยทฤษฎีที่กล่าวในหัวข้อ 5.2 และจะแสดงผลการใช้พลังงานเป็นค่าพลังงานในหน้า Energy Summary1 ดังแสดงในรูปที่ 14 และมี Flow Chart ดังแสดงในรูปที่ 15

รูปที่ 13 หน้าต่างคำนวณสมดุลพลังงานเมื่อ O₂ สุทธิเป็นบวก

รูปที่ 14 หน้าต่างแสดงผลการใช้พลังงานเมื่อ O₂ สุทธิเป็นบวก



รูปที่ 15 Flow Chart การวิเคราะห์สมดุลพลังงานเมื่อ O_2 สุทธิเป็นบวก

6.3.2 การคำนวณสมดุลพลังงานกรณี มวลของ O_2 สุทธิเป็นลบ

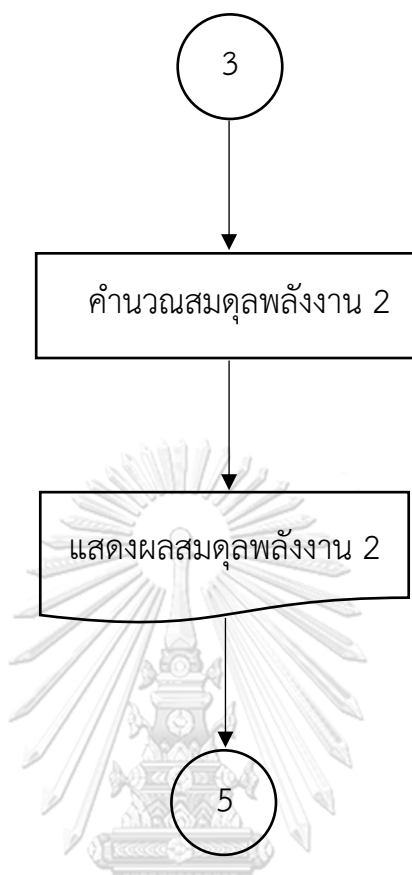
เมื่อได้ผลลัพธ์จากการคำนวณสมดุลมวลในหน้า Mass_Balance2 แล้ว จะทำการคำนวณสมดุลพลังงานในหน้า Energy Calculation2 ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยการคำนวณจะอาศัยทฤษฎีที่กล่าวในหัวข้อ 5.2 และจะแสดงผลการใช้พลังงานในหน้า Energy Summary2 ดังแสดงในรูปที่ 17 และมี Flow Chart ดังแสดงในรูปที่ 18

Input				Generated				Output				
		kg	Energy									
Fe	0	kg	0.47565	0	Combustion	0	kJ	Liquid Steel	0	kg	0.76227	
Oxygen	0	kg		0	Oxidation	0	kJ	off-gas			0	
lance	0	kg						Slag	5920	kg	0	
burner	0	kg						Water			0	
Coal C	0	kg	1.26	0							0	
CH4	0	kg		0							0	
Electrode	0	kg	1.735	0							0	
					SLAG FORMATION							
SiO2	0	kg	0.76249	0	Si	0	kJ	8.94	SiO2	0	kg	1.28143
Al	0	kg	0.91	0	Al	0	kJ	5.29	Al2O3	0	kg	1.34718
Mn	0	kg	0.48	0	Mn	0	kJ	1.93	MnO	0	kg	0.8395
MgCO3	0	kg	0.92594	0	Mg	0	kJ	6.87	MgO	0	kg	1.34343
P	0	kg	0.76839	0	P	0	kJ	5.54	P2O5	0	kg	0
Ti	0	kg	0.54	0	Ti	0	kJ		TiO2	0	kg	0
Cr	0	kg	0.46	0	Cr	0	kJ	3.05	Cr2O3	0	kg	0.87933
CaCO3	0	kg	0.85439	0	Fe	0	kJ	1.32	CaO	0	kg	1.01214
SUM		kg			Combustion				CO2	0	kg	0.94927
Electric	0				CO2 (electrode)	0	kJ		FeO	0	kg	1.73667
					CO (Coal)	0	kJ		C	0	kg	0
					CH4 (sumner)	0	kJ		SUM	0	kg	0
					Oxidation				off-gas			
					CO+O2-CO2	0	kJ		CO2	0	kg	1.33917
									CO	0	kg	1.2675
									H2O	0	kg	2.662
									O2 infill	0	kg	1.151
									N2 infill	0	kg	1.254

รูปที่ 16 หน้าต่างคำนวณสมดุลพลังงานเมื่อ O₂ สุทธิเป็นลบ

Input				Generate				Output			
Fe	0	kg	kJ	Combustion	0	kJ	Fe	0	kg	kJ	
other	0	kg	kJ	Oxidation	0	kJ	SLAG	0	kg	kJ	
ปรัง	0	kg	kJ				Cooling Water	0	kg	kJ	
lance	N/A	kg	kJ				CO2	0	kg	kJ	
Burner	N/A	kg	kJ				CO	0	kg	kJ	
Infill	N/A	kg	kJ				H2O	0	kg	kJ	
C	N/A	kg	kJ				O2 infill	0	kg	kJ	
CH4	N/A	kg	kJ				N2 infill	0	kg	kJ	
N2 infill	N/A	kg	kJ				other	0	kg	kJ	
ELECTRIC	0	kg	kJ								
TOTAL	0	kg	kJ	TOTAL	0	kJ	Total	0	kg	kJ	

รูปที่ 17 หน้าต่างแสดงผลการใช้พลังงานเมื่อ O₂ สุทธิเป็นลบ



รูปที่ 18 Flow Chart การวิเคราะห์สมดุลพลังงานเมื่อ O₂ สุกติเป็นลบ

6.4 การแสดงผลการวิเคราะห์

6.4.1 การแสดงผลการวิเคราะห์กรณี มวลของ O₂ สุกติเป็นบวก

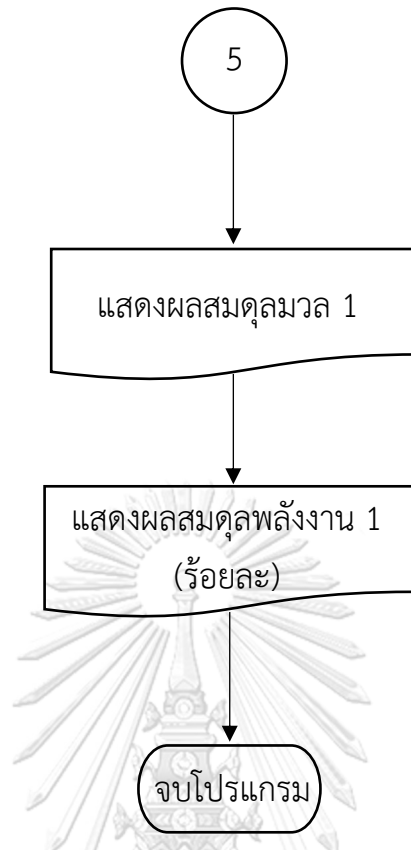
เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์สมดุลพลังงานในหัวข้อ 6.3.1 เสร็จแล้วจะเข้าสู่หน้าแสดงผลการวิเคราะห์สมดุลมวล โดยจะแสดงผลเป็นมวลรวมในหน้า Mass Summary 1 และจะแสดงผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานเป็นร้อยละของพลังงานขาเข้าในหน้า Summary 1 ดังแสดงในรูปที่ 19 และ 20 โดยมี Flow Chart การแสดงผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 21

มวลที่เข้าสู่เตาหลอม			มวลที่ออกจากเตาหลอม		
Scrap	เหล็ก	kg	ไอเสีย	เหล็ก	kg
	สารเชื่อม	kg		Slag	kg
	สารปรับคุณภาพ	kg		CO2	kg
O ₂	Lance	kg	H2O	O ₂	kg
	Burner	kg		N ₂	kg
	Infiltrate	kg		CO	kg
Other	N ₂ Infiltrate	kg			
	C	kg			
	Fuel	kg			

รูปที่ 19 หน้าต่างแสดงผลมวลรวมเมื่อ O₂ สุทธิเป็นบวก

พลังงานขาเข้า	kJ	ร้อยละ	พลังงานขาออก	kJ	ร้อยละ
Input Energy	0	0	STEEL	0	0
ELECTRICAL ENERGY	0	0	OFF-GAS	0	0
GAS/OIL BURNER	0	0	SLAG	0	0
OXYGEN INJECTION	0	0	COOLING WATER	0	0
			Other loss	0	0

รูปที่ 20 หน้าต่างแสดงร้อยละการใช้พลังงานเมื่อ O₂ สุทธิเป็นบวก



รูปที่ 21 Flow Chart การแสดงผลเมื่อ O₂ สุทธิเป็นบวก

6.4.1 การแสดงผลการวิเคราะห์กรณี มวลของ O₂ สุทธิเป็นลบ

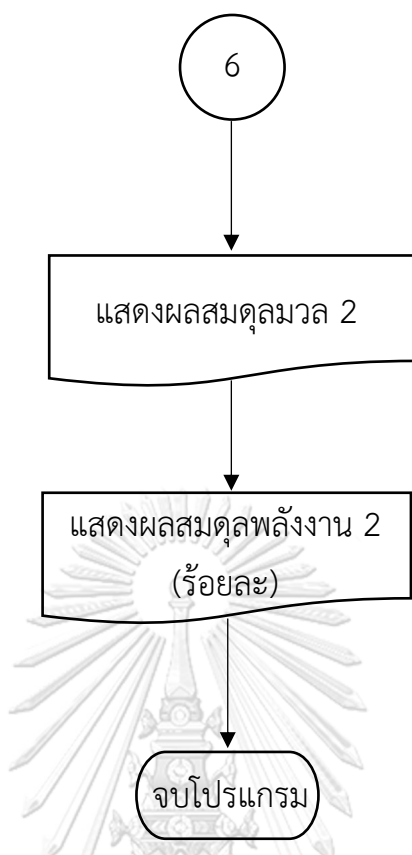
เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์สมมูลพลังงานในหัวข้อ 6.3.2 เสร็จแล้วจะเข้าสู่หน้าแสดงผลการวิเคราะห์สมมูลมวล โดยจะแสดงผลเป็นมวลรวมในหน้า Mass Summary 2 และจะแสดงผลการวิเคราะห์สมมูลพลังงานเป็นร้อยละของพลังงานขาเข้าในหน้า Summary 2 ดังแสดงในรูปที่ 22 และ 23 โดยมี Flow Chart การแสดงผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 24

มวลที่เข้าสู่เตาหลอม			มวลที่ออกจากเตาหลอม		
Scrap	เหล็ก	kg	ไอเสีย	เหล็ก	kg
	สารเชื่อม	kg		Slag	kg
	สารปรับคุณภาพ	kg		CO2	kg
O ₂	Lance	kg	H2O	kg	
	Burner	kg	O2	kg	
	Infiltrate	kg	N2	kg	
Other	N2 Infiltrate	kg	CO	kg	
	C	kg			
	Fuel	kg			

รูปที่ 22 หน้าต่างแสดงผลมวลรวมเมื่อ O₂ สุทธิเป็นลบ

พลังงานขาเข้า	kJ	ร้อยละ	พลังงานขาออก	kJ	ร้อยละ
Input Energy	0	0	STEEL	0	0
ELECTRICAL ENERGY	0	0	OFF-GAS	0	0
GAS/OIL BURNER	0	0	SLAG	0	0
OXYGEN INJECTION	0	0	COOLING WATER	0	0
			Other loss	0	0

รูปที่ 23 หน้าต่างแสดงร้อยละการใช้พลังงานเมื่อ O₂ สุทธิเป็นลบ



รูปที่ 24 Flow Chart การแสดงผลเมื่อ O₂ สุทธิเป็นลบ

6.5 ข้อจำกัดของโปรแกรม

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมห้ดังกล่าว พบข้อจำกัดของการใช้โปรแกรมห้ดังนี้ เนื่องจากโรงงานในแต่ละโรงมีการใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน ส่งผลให้มีปริมาณการใช้ออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้แตกต่างกันด้วย จึงต้องมีการปรับแต่งโปรแกรมโดยการเปลี่ยนค่าคงที่ของเชื้อเพลิงใน Formula sheet ก่อนทำการคำนวณทุกครั้ง และโปรแกรมห้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลจากโรงงานตัวอย่างในประเทศไทย ทำให้ได้ร้อยละของการใช้พลังงานแต่ละประเภทโดยเฉลี่ย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในการวิเคราะห์โรงงานอื่น ๆ ที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าในประเทศได้ เนื่องจากมีลักษณะการดำเนินการของโรงงานที่ใกล้เคียงกัน

บทที่ 7

ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่างทั้งสามโรงงานจากข้อมูลที่แสดงในหัวข้อที่ 4.1 - 4.3 สามารถนำมาวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานได้ โดยสมดุลมวลจะแสดงผลเป็นปริมาณองค์ประกอบของสารต่าง ๆ ที่เข้าและออกจากเตาหลอม สมดุลพลังงานจะแสดงผลเป็นร้อยละของการใช้พลังงาน โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ของแต่ละโรงงานตัวอย่างดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

7.1 โรงงานตัวอย่าง ก.

ในการวิเคราะห์โรงงานตัวอย่าง ก. เมื่อตรวจสอบผลการคำนวณสมดุลมวลโดยอาศัยสมมุติฐานที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 ไม่พบส่วนขาดแย้งใด ๆ ในขั้นตอนนี้ และพบว่าไอเสียจากปฏิกิริยา ไม่มีส่วนประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลการคำนวณสมดุลมวลของโรงงานตัวอย่าง ก.

Input				Output			
Scrap	เหล็ก	75821.39	kg	Off-Gas	เหล็ก	74000.00	kg
	สารเจือปน	2566.94	kg		Slag	5505.48	kg
	สารปรับคุณภาพ	3611.67	kg		CO ₂	7928.68	kg
O ₂	Lance	1679.33	kg	Off-Gas	CO	0.00	kg
	Burner	1610.78	kg		H ₂ O	734.97	kg
	Infiltrate	1996.77	kg		O ₂	792.19	kg
Other	N ₂ Infiltrate	7416.57	kg	Off-Gas	N ₂	7416.57	kg
	C	730.00	kg				
	CH ₄	326.65	kg				

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์สมดุลมวลแล้ว ได้ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน และไม่พบส่วนขาดแย้งใด ๆ โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลการคำนวณสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง ก.

Input	Energy [GJ]	ร้อยละ	Output	Energy [GJ]	ร้อยละ
Scrap Enthalpy	12.36	6.6	Steel Enthalpy	90.25	48.1
Electrical Energy	104.68	55.8	Off-gas Enthalpy	37.60	19.4
Fuel Combustion	25.23	13.4	Slag Enthalpy	9.57	5.1
Oxidation	45.43	24.2	Cooling Water	32.57	17.4
			Other loss	17.70	10.0

7.2 โรงงานตัวอย่าง ข.

ในการวิเคราะห์โรงงานตัวอย่าง ข. เมื่อตรวจสอบผลการคำนวณสมดุลมวลโดยอาศัยสมมุติฐานที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 ไม่พบส่วนขัดแย้งใด ๆ ในขั้นตอนนี้ และพบว่าไอเสียจากปฏิกิริยา มีส่วนประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งแตกต่างจากโรงงานตัวอย่าง ก. โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการคำนวณสมดุลมวลของโรงงานตัวอย่าง ข.

Input				Output			
Scrap	เหล็ก	50680.00	kg	Off-Gas	เหล็ก	46000.00	kg
	สารเจือปน	2074.15	kg		Slag	6126.97	kg
	สารปรับคุณภาพ	3492.06	kg		CO ₂	7533.36	kg
O ₂	Lance	1708.86	kg	Off-Gas	H ₂ O	333.18	kg
	Burner	942.94	kg		O ₂	1319.09	kg
	Infiltrate	1609.37	kg		N ₂	5977.68	kg
Other	N ₂ Infiltrate	744.00	kg	Off-Gas	CO	0.00	kg
	C	206.88	kg				
	LPG	5977.68	kg				

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์สมดุลมวลแล้ว ได้ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน และไม่พบส่วนขัดแย้งใด ๆ โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ผลการคำนวณสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง ข.

Input	Energy [GJ]	ร้อยละ	Output	Energy [GJ]	ร้อยละ
Scrap Enthalpy	8.46	6.4	Steel Enthalpy	65.68	49.8
Electrical Energy	69.93	53.0	Off-gas Enthalpy	29.55	22.4
Fuel Combustion	13.18	10.0	Slag Enthalpy	10.18	7.7
Oxidation	40.30	30.6	Cooling Water	16.67	12.6
			Other loss	9.77	7.4

7.3 โรงงานตัวอย่าง ค.

ในการวิเคราะห์โรงงานตัวอย่าง ค. เมื่อตรวจสอบผลการคำนวณสมดุลมวลโดยอาศัยสมมุติฐานที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 ไม่พบส่วนขัดแย้งใด ๆ ในขั้นตอนนี้ และพบว่าไอเสียจากปฏิกิริยา มีส่วนประกอบของแก๊สออกซิเจนเช่นเดียวกับโรงงานตัวอย่าง ก. โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการคำนวณสมดุลมวลของโรงงานตัวอย่าง ค.

Input				Output			
Scrap	เหล็ก	80375.49	kg	เหล็ก	75000.00	kg	
	สารเจือปน	1983.01	kg	Slag	4606.06	kg	
	สารปรับคุณภาพ	2641.50	kg	CO ₂	10307.15	kg	
O ₂	Lance	2210.54	kg	Off-Gas	H ₂ O	780.50	kg
	Burner	1645.06	kg		CO	2961.60	kg
	Infiltrate	2339.96	kg		N ₂ infill	8691.29	kg
Other	N ₂ Infiltrate	8691.29	kg	O ₂	0.00	kg	
	C	2142.50	kg				
	CH ₄	346.89	kg				

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์สมดุลมวลแล้ว ได้ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน และไม่พบส่วนขัดแย้งใด ๆ โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการคำนวณสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง ค.

Input	Energy [GJ]	ร้อยละ	Output	Energy [GJ]	ร้อยละ
Scrap Enthalpy	12.60	8.46	Steel Enthalpy	91.47	46.3
Electrical Energy	105.60	69.93	Off-gas Enthalpy	48.85	24.7
Fuel Combustion	40.37	13.18	Slag Enthalpy	7.73	3.9
Oxidation	38.92	40.30	Cooling Water	34.71	17.6
			Other loss	14.73	7.5

7.4 โรงงานตัวอย่าง ง.

ในการวิเคราะห์โรงงานตัวอย่าง ง. เมื่อตรวจสอบผลการคำนวณสมดุลมวลโดยอาศัยสมมุติฐานที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 ไม่พบส่วนขัดแย้งใด ๆ ในขั้นตอนนี้ และพบว่าไอเสียจากปฏิกิริยา มีส่วนประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เช่นเดียวกับโรงงานตัวอย่าง ข.

ตารางที่ 21 ผลการคำนวณสมดุลมวลของโรงงานตัวอย่าง ง.

Input				Output			
Scrap	เหล็ก	25619.39	kg	เหล็ก	23000.00	kg	
	สารเจือปน	577.45	kg	Slag	2015.77	kg	
	สารปรับคุณภาพ	803.16	kg	CO ₂	3031.89	kg	
O ₂	Lance	751.13	kg	Off-Gas	H ₂ O	96.94	kg
	Burner	391.27	kg		CO	994.05	kg
	Infiltrate	693.32	kg		N ₂	2575.20	kg
Other	N ₂ Infiltrate	2575.20	kg	O ₂	0.00	kg	
	C	685.00	kg				
	Diessel	78.21	kg				

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์สมดุลมวลแล้ว ได้ตรวจสอบผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน และไม่พบส่วนขัดแย้งใด ๆ โดยมีผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 22 ผลการคำนวณสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง ง.

Input	Energy [GJ]	ร้อยละ	Output	Energy [GJ]	ร้อยละ
Scrap Enthalpy	3.93	5.6	Steel Enthalpy	32.84	47.0
Electrical Energy	43.89	62.8	Off-gas Enthalpy	14.09	20.2
Fuel Combustion	11.85	17.0	Slag Enthalpy	3.97	5.7
Oxidation	10.24	14.6	Cooling Water	8.33	11.9
			Other loss	10.67	15.3



บทที่ 8

อภิปรายผลการวิเคราะห์

จากการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงาน สามารถแบ่งโรงงานออกเป็น 2 ประเภท โดยอาศัยปริมาณของ O_2 ในการเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงเป็นเกณฑ์ ประเภทแรก คือ จ่ายออกซิเจนเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงทำให้ไม่เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสีย ได้แก่ โรงงานตัวอย่าง ก. และ ค. ประเภทที่สอง คือ จ่ายออกซิเจนในปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาในจึงต้องอาศัยออกซิเจนในอากาศ และเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสีย ได้แก่ โรงงานตัวอย่าง ข. และ ง. สามารถนำผลการวิเคราะห์สมดุลมวลและสมดุลพลังงาน มาเปรียบเทียบเป็นตารางได้ดังแสดงในตารางที่ 23 และ 24 พบว่ามีร้อยละของมวลที่ใช้และการใช้พลังงานใกล้เคียงกันทั้ง 4 โรงงาน และพบข้อสังเกตดังนี้

ตารางที่ 23 การเปรียบเทียบร้อยละของมวลของโรงงานตัวอย่าง

		Input				Output					
		ก.	ข.	ค.	ง.		ก.	ข.	ค.	ง.	
Scrap	เหล็ก	79.2	78.5	75.2	79.6		เหล็ก	76.8	73.3	68.4	72.5
	สารเจือปน	2.7	1.9	3.1	1.8		Slag	5.7	4.5	9.1	6.4
	สารปรับคุณภาพ	3.8	2.6	5.2	2.5	Off-Gas	CO ₂	8.2	10.1	11.2	9.6
O ₂	Lance	1.8	2.2	2.5	2.3		H ₂ O	0.8	0.8	0.5	0.3
	Burner	1.7	1.6	1.4	1.2		O ₂	0.8	0.0	2.0	0.0
	Infiltrate	2.1	2.3	2.4	2.2		N ₂	7.7	8.5	8.9	8.1
Other	N ₂ Infiltrate	7.7	8.5	8.9	8.0		CO	0.0	2.9	0.0	3.1
	C	0.8	2.1	0.3	2.1						
	Fuel	0.3	0.3	1.1	0.2						

ตารางที่ 24 การเปรียบเทียบร้อยละของพลังงานโรงงานตัวอย่าง

โรงงานตัวอย่าง	ก.	ข.	ค.	ง.
พลังงานขาเข้า				
Scrap Enthalpy	6.3	4.4	5.4	4.2
Electrical Energy	52.1	39.2	48.6	49.6
Fuel Combustion	12.5	14.3	8.0	12.3
Oxidation	29.1	42.1	37.9	34.0
พลังงานขาออก				
Steel Enthalpy	44.9	45.9	36.8	37.7
Off-gas Enthalpy	14.7	23.1	15.4	13.6
Slag Enthalpy	4.8	6.4	3.6	2.9
Cooling Water	16.2	13.9	20.4	21.7
Other loss	19.5	10.1	23.8	24.2

เมื่อพิจารณาสมดุลมวลดังตารางที่ 23 จะสังเกตว่า มีร้อยละของมวลสารที่ใส่เข้าเตาหลอมในอัตราใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาร้อยละของมวลสารขาออกจะพบว่ามีค่าต่างกันเล็กน้อย โดยเฉพาะไอเสีย ซึ่งมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานดังตารางที่ 24 จะพบว่ามีอัตราการใช้พลังงานในแต่ละประเภทแตกต่างกัน โดยมีข้อสังเกตดังต่อไปนี้

8.1 โรงงานตัวอย่าง ก.

พิจารณาโรงงานตัวอย่าง ก. หากคำนึงปริมาณออกซิเจนที่เข้าเตาหลอมเฉพาะส่วน Lance กับ เผาไหม้ จะพบว่า ปริมาณออกซิเจนที่ใช้เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์กับเชื้อเพลิงแล้วและมีปริมาณออกซิเจนเหลือ เมื่อรวมกับปริมาณออกซิเจนที่ไหลซึมเข้าสู่เตาหลอม แล้วทำปฏิกิริยา Oxidation กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของถ่านหินเป็นแก๊สออกซิเจนได้หมดพอดี ทำให้ไม่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์หลงเหลือในไอเสียแต่มีแก๊สออกซิเจนหลงเหลือในไอเสียร้อยละ 0.8

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของโรงงานตัวอย่าง ก. ดังตารางที่ 24 พบว่ามีอัตราการใช้พลังงานจาก Chemical Oxidation น้อยกว่าโรงงานตัวอย่าง ข. ค. และ ง. ร้อยละ 13 8.8 และ 4.9 ตามลำดับ เนื่องจากใน Slag ของโรงงานตัวอย่าง ก. มีสัดส่วนปริมาณ FeO อยู่ร้อยละ 15.67 โดยน้อยกว่าโรงงานตัวอย่างอื่น ๆ กว่าร้อยละ 15 ทำให้ได้พลังงานจากปฏิกิริยา Oxidation น้อยกว่า จึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น

8.2 โรงงานตัวอย่าง ข.

พิจารณาโรงงานตัวอย่าง ข. หากคำนึงปริมาณออกซิเจนที่เข้าเตาหลอมเฉพาะส่วน Lance กับส่วนเผาไหม้ จะพบว่า ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์กับเชื้อเพลิง จึงต้องอาศัยปริมาณออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยาร่วมด้วย ส่งผลให้เหลือปริมาณออกซิเจนน้อยจึงทำปฏิกิริยา Oxidation กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ไม่หมด ส่งผลให้ไอเสียมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนประกอบอยู่ร้อยละ 2.9

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานของโรงงานตัวอย่าง ข. ดังแสดงในตารางที่ 24 พบว่ามีการใช้อัตราพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าโรงงานตัวอย่าง ก. ข. และ ง. ร้อยละ 12.9 9.4 และ 10.4 ตามลำดับ เนื่องจากใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงซึ่งพลังงานจากเชื้อเพลิงมากซึ่งมีการใช้ O_2 ในการเผาไหม้มากส่งผลให้ไม่มีออกซิเจนเพียงพอในการเกิดปฏิกิริยา Oxidation กับคาร์บอนมอนอกไซด์จนเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อเทียบกับโรงงานตัวอย่าง ก. ในอัตราการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงใกล้เคียงกันจะเห็นว่า มีการเกิด FeO ใน slag ร้อยละ 31.39 ซึ่งมากกว่าโรงงานตัวอย่าง ก. อยู่ร้อยละ 15.72 จึงทำให้ไม่มีออกซิเจนเหลือเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสียจึงได้พลังงานจากปฏิกิริยา Oxidation มากกว่า และส่งผลให้มีร้อยละของปริมาณน้ำเหล็กน้อยกว่าโรงงานตัวอย่าง ก. อยู่ร้อยละ 0.7

พิจารณาร้อยละของพลังงานไอเสียขาออก พบว่ามีค่าสูงกว่าโรงงานตัวอย่างอื่น ๆ เนื่องจากในไอเสียของโรงงานตัวอย่าง ข. ประกอบด้วย CO_2 CO และ N_2 ในปริมาณมาก จึงส่งผลให้มีพลังงานที่ออกจากไอเสียมากกว่าโรงงานอื่น ๆ กว่าร้อยละ 8-10 และทำให้การสูญเสียพลังงานอื่น ๆ ซึ่งประกอบด้วย การสูญเสียความร้อนผ่านช่องเปิด การนำความร้อนผ่านผนังและการสูญเสียความร้อนผ่านฝุ่น มีค่าน้อยกว่าโรงงานตัวอย่างอื่น ๆ อยู่ร้อยละ 10

8.3 โรงงานตัวอย่าง ค.

พิจารณาโรงงานตัวอย่าง ค. หากคำนึงปริมาณออกซิเจนที่เข้าเตาหลอมเฉพาะส่วน Lance กับ เผาไหม้ จะพบว่า ปริมาณออกซิเจนที่ใช้เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์กับเชื้อเพลิงแล้วและมีปริมาณออกซิเจนเหลือ เมื่อรวมกับปริมาณออกซิเจนที่ไหลซึมเข้าสู่เตาหลอม แล้วทำปฏิกิริยา Oxidation กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของถ่านหินเป็นแก๊สออกซิเจนได้หมดพอดี ทำให้ไม่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์หลงเหลือในไอเสียแต่มีแก๊สออกซิเจนหลงเหลือในไอเสียร้อยละ 2

เมื่อพิจารณาการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของโรงงานตัวอย่าง ค. พบว่ามีการใช้พลังงานในส่วนนี้ ร้อยละ 8 ซึ่งน้อยที่สุดจึงส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงถึงร้อยละ 48.6 แต่ไม่มากนักเนื่องจากมีการได้รับพลังงานจาก Chemical Oxidation ที่สูงถึงร้อยละ 37.9 เนื่องจากมีการเกิด FeO ในปริมาณมากถึงร้อยละ 40 และพบว่า โรงงานตัวอย่าง ค. มีปริมาณน้ำเหล็กซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร้อยละ 68.4 ซึ่งน้อยกว่าโรงงานตัวอย่างอื่น ๆ เนื่องจากเกิด FeO ใน Slag ในสัดส่วนที่มากกว่า

พิจารณาการสูญเสียพลังงานอื่น ๆ และการถ่ายเทความร้อนจากน้ำระบายความร้อนของโรงงานตัวอย่าง ค. พบว่ามีค่าสูงถึงร้อยละ 20.4 เนื่องจากน้ำเหล็กผลิตภัณฑ์มีร้อยละของปริมาณพลังงานน้อยส่งผลให้ร้อยละของพลังงานขาออกของน้ำเหล็กน้อยกว่าโรงงานตัวอย่างอื่น ๆ

8.4 โรงงานตัวอย่าง ง.

พิจารณาโรงงานตัวอย่าง ง. หากคำนึงปริมาณออกซิเจนที่เข้าเตาหลอมเฉพาะส่วน Lance กับ เผาไหม้ จะพบว่า ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาเผาไหม้สมบูรณ์กับเชื้อเพลิง จึงต้องอาศัยปริมาณออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยาร่วมด้วย ส่งผลให้เหลือปริมาณออกซิเจนน้อยจึงทำปฏิกิริยา Oxidation กับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ไม่หมด ส่งผลให้ไอเสียมีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนประกอบร้อยละ 3.1

พิจารณาการสูญเสียพลังงานอื่น ๆ และการถ่ายเทความร้อนจากน้ำระบายความร้อนของโรงงานตัวอย่าง ง. พบว่ามีค่าสูงเช่นเดียวกับโรงงานตัวอย่าง ค. มีร้อยละของพลังงานขาออกของน้ำเหล็กผลิตภัณฑ์น้อยแต่มีร้อยละโดยมวลของน้ำเหล็กผลิตภัณฑ์มาก และมีการใช้พลังงานไฟฟ้าในอัตราที่สูงขึ้น ดังนั้นหากปรับแก้โรงงานตัวอย่าง ง. โดยการเพิ่มปริมาณออกซิเจนเข้าไปในส่วนเผาไหม้ จะทำให้ได้รับพลังงานจาก Chemical Oxidation เพิ่มขึ้นจากการ Oxidize CO ให้เกิดเป็น CO₂ ส่งผลให้มีร้อยละการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลง และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของไอเสียใหม่จะพบว่า มี CO₂ เป็นองค์ประกอบมากขึ้นและมี N₂ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนดังแสดงในหัวข้อ 5.1.3 ทำให้พลังงานขาออกของไอเสียมากขึ้น การสูญเสียพลังงานจะมีค่าลดลง

ผลการวิเคราะห์สมดุลมวลและการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจากโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงาน พบว่ามี Other loss ที่สูงถึงร้อยละ 20 เนื่องจากเตาหลอมดำเนินการเป็น Batch และในแต่ละ Batch จะมีการเปิดเตาบ่อยครั้ง ส่งผลให้มีการสูญเสียความร้อนในส่วนนี้มาก และจะเห็นว่าในแต่ละโรงงานมีลักษณะการใช้พลังงานที่แตกต่างกันไป โดยโรงงานตัวอย่าง ก. จะใช้พลังงานจากไฟฟ้ามากแต่มี Chemical Oxidation น้อย โรงงานตัวอย่าง ข. จะใช้พลังงานจาก Chemical Oxidation เป็นหลักใช้พลังงานไฟฟ้าน้อย โรงงานตัวอย่าง ค. จะใช้พลังงานเชื้อเพลิงน้อยแต่ใช้พลังงานไฟฟ้ามาก โรงงานตัวอย่าง ง. จะใช้พลังงานใกล้เคียงกับโรงงานตัวอย่าง ก. โดยผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถนำมาสรุปเป็นร้อยละโดยประมาณได้ดังตารางที่ 25 และ 26 โดยตารางนี้สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งอ้างอิงค่าเฉลี่ยองค์ประกอบต่าง ๆ ของสมดุลพลังงานเพื่อใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในสถานประกอบการอื่น ๆ ที่อาจมีตัวแปรไม่ทราบค่าได้

ตารางที่ 25 ร้อยละของมวลในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่างทั้งสี่โรงงาน

Input				Output			
Scrap	เหล็ก	75-80	%	Off-Gas	เหล็ก	65-80	%
	สารเจือปน	1.5-3.5	%		Slag	4-10	%
	สารปรับคุณภาพ	3-5	%		CO ₂	8-12	%
O ₂	Lance	1.5-3	%	Off-Gas	H ₂ O	0.3-1	%
	Burner	1-2	%		CO	0-3	%
	Infiltrate	2-3	%		N ₂	7-10	%
Other	N ₂ Infiltrate	1-10	%	Off-Gas	O ₂	0-2	%
	C	7-9	%				
	Fuel	0.5-2	%				

ตารางที่ 26 ร้อยละการใช้พลังงานเฉลี่ยในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่างทั้งสี่โรงงาน

พลังงานขาเข้า	ร้อยละ	พลังงานขาออก	ร้อยละ
Scrap Enthalpy	4-6	Steel Enthalpy	35-50
Electrical Energy	40-55	Off-gas Enthalpy	15-25
Fuel Combustion	8-15	Slag Enthalpy	3-7
Oxidation	34-45	Cooling Water	10-20
		Other loss	10-25

บทที่ 9

สรุปผลการวิจัย

9.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยศึกษาและเก็บข้อมูลผ่านการตรวจวัดโรงงานตัวอย่าง 4 โรงงานโดยอาศัยเครื่องมือวัดที่ติดอยู่กับเครื่องจักรของแต่ละโรงงาน และพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยแบ่งโปรแกรมออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนวิเคราะห์มวลสำหรับวิเคราะห์ตัวแปรไม่ทราบค่า ได้แก่ ปริมาณและองค์ประกอบของไอเสียและสารเจือปนต่าง ๆ ส่วนที่สองคือส่วนวิเคราะห์สมดุลพลังงานเพื่อวิเคราะห์ลักษณะและสัดส่วนการใช้พลังงานในแต่ละโรง

จากผลการคำนวณสมดุลพลังงานในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่างทั้งสี่โรงงาน พบว่ามีความใกล้เคียงกันและเป็นไปตามสมมติฐาน โดยมีผลการวิเคราะห์ดังนี้ พลังงานขาเข้าได้แก่ เอนทัลปีของสารขาเข้า 4-6 % พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 40-55% พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 8-15 % พลังงานจากปฏิกิริยา Oxidation ในการเกิด Slag 30-45 % พลังงานขาออกได้แก่ เอนทัลปีขาออกของเหล็ก 35-50% เอนทัลปีของ slag 3-7 % เอนทัลปีขาออกของไอเสีย 15-25 % การสูญเสียความร้อนจากน้ำระบายความร้อน 10-20% การสูญเสียพลังงานอื่น ๆ 10-25 % อีกทั้งสามารถประมาณองค์ประกอบของไอเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้อีกด้วย จึงสรุปได้ว่าโปรแกรมมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานเพื่อนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการจัดการพลังงานต่อไปได้ นอกจากนี้ยังได้อัตราส่วนซึ่งคิดเป็นร้อยละโดยเฉลี่ยของสมดุลมวลและการใช้พลังงานในเตาหลอม ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถนำไปใช้เป็นค่าเฉลี่ยองค์ประกอบต่าง ๆ ของสมดุลมวลและสมดุลพลังงานเพื่อใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในสถานประกอบการอื่น ๆ ได้

9.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญ คือ ไม่ทราบปริมาณและองค์ประกอบที่แท้จริงของไอเสีย จึงต้องตั้งสมมติฐานเพื่อวิเคราะห์ปริมาณดังกล่าวซึ่งอาจมีความคลาดเคลื่อนดังนั้นหากมีการศึกษาหลักการเกิดไอเสียและมีการวัดองค์ประกอบของไอเสียได้จากโรงงานตัวอย่างโดยตรง จะทำให้การพัฒนาโปรแกรมมีความแม่นยำขึ้น และจากผลการวิจัยจะเห็นว่าในโรงงานแต่ละโรงมีลักษณะการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจมาจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น ราคาทุนของวัตถุดิบ ราคาทุนของพลังงาน เป็นต้น ดังนั้นจึงอาจใช้โปรแกรมนี้ศึกษาควบคู่กับการทำ Optimization ต่อไปในอนาคตได้



ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการวิเคราะห์สมมูลมวลของโรงงานตัวอย่าง



ก.1 ตัวอย่างการคำนวณสมดุลมวลของโรงงานตัวอย่าง ก.

จากผลการเก็บข้อมูลของโรงงานตัวอย่าง ก. ได้แก่ ข้อมูลทั่วไปของโรงงานและองค์ประกอบของ Slag สามารถรวมเป็นตารางได้ดังแสดงในตารางที่ 27 โดยการคำนวณสมดุลมวลจะแสดงดังต่อไปนี้

ตารางที่ 27 ข้อมูลทั้งหมดของโรงงานตัวอย่าง ก.

โรงงานตัวอย่าง ก.										
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ			องค์ประกอบของ slag	
Tap to tap time	55	นาที	ไฟฟ้า	31,720	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³	ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
Scrap charge	82	ตัน	เชื้อเพลิง	565 (Natural Gas)	Nm ³	Cooling Water	1,110	m ³	SiO ₂	18.18
									Al ₂ O ₃	9.95
Scrap charge temp	33	°C	ออกซิเจน (lance)	1,176	Nm ³	Cooling Water temp. in	30	°C	MnO	5.07
									CaO	34.18
Liquid steel	74	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	1,128	Nm ³	Cooling Water temp. out	37	°C	MgO	6.65
									FeO	15.67
slag	5.92	ตัน	ออกซิเจน (Total)	2,304	Nm ³					
Puring Temp	1,600	°C	ถ่านหิน	637	kg					
			Electrode	93	kg					

1. พิจารณามวลของ Slag

จากตารางที่ 27 จะเห็นว่า ใน Slag จะประกอบด้วยสารทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ SiO_2 , Al_2O_3 , MnO , CaO , MgO และ FeO ซึ่ง SiO_2 คือทรายที่เจือปนมากับ Scrap, CaO และ MgO มาจากสารปรับคุณภาพที่ใส่เข้าไปในกระบวนการหลอม และ Al_2O_3 , FeO เกิดจากโลหะที่เจือปนอยู่ใน Scrap โดยมีร้อยละโดยมวลแสดงในตารางดังกล่าว สามารถคำนวณมวลของแต่ละองค์ประกอบได้ดังนี้

$$m_{slag,comp} = m_{slag} \times \left(\frac{\%by\ mass}{100} \right)$$

$$m_{SiO} = (5.92 \times 1000\ kg) \times \left(\frac{18.18}{100} \right) = 300.144\ kg$$

$$m_{Al_2O_3} = (5.92 \times 1000\ kg) \times \left(\frac{9.95}{100} \right) = 589.04\ kg$$

$$m_{MnO} = (5.92 \times 1000\ kg) \times \left(\frac{5.07}{100} \right) = 300.144\ kg$$

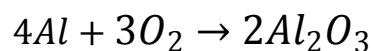
$$m_{CaO} = (5.92 \times 1000\ kg) \times \left(\frac{34.18}{100} \right) = 2023.456\ kg$$

$$m_{MgO} = (5.92 \times 1000\ kg) \times \left(\frac{6.65}{100} \right) = 393.68\ kg$$

$$m_{FeO} = (5.92 \times 1000\ kg) \times \left(\frac{15.67}{100} \right) = 927.664\ kg$$

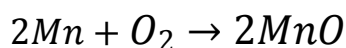
2. พิจารณามวลของสารเจือปน

สารเจือปนที่ปะปนมากับ scrap จะอยู่ในรูปของโลหะ ได้แก่ Al, Mn และ Fe โดยจะสามารถคำนวณย้อนกลับโดยอาศัยมวลของ slag และปฏิกิริยาเคมีในการเกิด slag และจากสมการดังกล่าว จะสามารถคำนวณมวลของออกซิเจนที่ใช้ไปได้ดังนี้



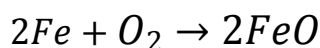
$$m_{Al} = \frac{(4 \times m.w_{Al}) \times m_{Al_2O_3}}{2 \times m.w_{Al_2O_3}} = 311.67\ kg$$

$$m_{O_2} = m_{Al} - m_{Al_2O_3} = 277.22\ kg$$



$$m_{Mn} = \frac{(2 \times m.w.Mn) \times m_{MnO}}{2 \times m.w.MnO} = 232.34 \text{ kg}$$

$$m_{O_2} = m_{Mn} - m_{MnO} = 67.66 \text{ kg}$$



$$m_{Fe} = \frac{(2 \times m.w.Fe) \times m_{FeO}}{2 \times m.w.FeO} = 721.29 \text{ kg}$$

$$m_{O_2} = m_{Fe} - m_{FeO} = 206.64 \text{ kg}$$

3. พิจารณามวลของสารปรับคุณภาพ

สารปรับคุณภาพที่ใส่เข้าไปในระหว่างกระบวนการหลอม จะประกอบด้วย $CaCO_3$ และ $MgCO_3$ โดยจะสามารถคำนวณย้อนกลับโดยอาศัยมวลของ slag และปฏิกิริยาเคมีในการเกิด slag ได้ดังนี้



$$m_{CaCO_3} = \frac{(m.w.CaCO_3) \times m_{CaO}}{m.w.CaO} = 3611.67 \text{ kg}$$

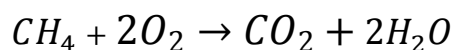


$$m_{MgCO_3} = \frac{(m.w.MgCO_3) \times m_{MgO}}{m.w.MgO} = 823.87 \text{ kg}$$

4. พิจารณาการเกิด CO_2

ในการเกิด CO_2 จะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ดังนี้

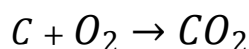
4.1 การเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นไปตามสมการเคมีดังนี้



$$m_{CO_2} = \frac{(m.w.CO_2) \times m_{CH_4}}{m.w.CH_4} = 898.3 \text{ kg}$$

$$m_{O_2} = \frac{2(m.w.O_2) \times m_{CH_4}}{m.w.CH_4} = 1306.62 \text{ kg}$$

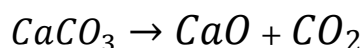
4.2 การเผาไหม้สมบูรณ์ของ Electrode ซึ่งเป็นไปตามสมการเคมีดังนี้



$$m_{CO_2} = \frac{(m.w._{CO_2}) \times m_C}{m.w._C} = 341 \text{ kg}$$

$$m_{O_2} = m_C - m_{CO_2} = 248 \text{ kg}$$

4.3 การเกิด slag เนื่องจากสารปรับคุณภาพดังแสดงในสมการเคมีหัวข้อที่ 3 จะได้ว่า



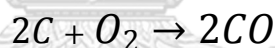
$$m_{CO_2} = m_{CaCO_3} - m_{CaO} = 1588.09 \text{ kg}$$



$$m_{CO_2} = m_{MgCO_3} - m_{MgO} = 430.04 \text{ kg}$$

4. พิจารณาการเกิด CO

ในการเกิด CO จะเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน เพื่อเกิด CO สำหรับใช้ในกระบวนการเกิด slag โดยมีสมการดังนี้

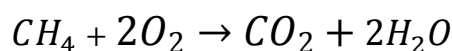


$$m_{CO} = \frac{(m.w._{CO}) \times m_C}{m.w._C} = 1486.33 \text{ kg}$$

$$m_{O_2} = m_C - m_{CO} = 849.33 \text{ kg}$$

5. พิจารณาการเกิดไอน้ำ

ในการเกิดไอน้ำ จะเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงดีสมการในหัวข้อที่ 4.1



$$m_{H_2O} = \frac{2(m.w._{H_2O}) \times m_{CH_4}}{m.w._{CH_4}} = 734.97 \text{ kg}$$

6. พิจารณาการใช้ O₂

O₂ จะถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่ การเกิด slag การเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาไหม้ของถ่านหินและแท่ง Electrode ดังแสดงในหัวข้อที่ 2-5

ภาคผนวก ข. บทความตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 34





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

TSF-016



การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า Development of a Computer Program for Energy Balance Analysis in an Electric Arc Furnace

ณัฐภัทร ปรีชากุล และ จิตติน แดงเที่ยง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
ติดต่อ: Nattapat.pree@gmail.com

บทคัดย่อ

การดำเนินการของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นการดำเนินการภายใต้อุณหภูมิสูงจึงมีการใช้ปริมาณพลังงานมากและมีความซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เพื่อทราบรายละเอียดการใช้พลังงานในเตาหลอมของโรงงาน และนำผลที่ได้ไปวางแผนและพัฒนาการประหยัดพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโรงงานในลำดับต่อไป

การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะอาศัยข้อมูลจากโรงงานตัวอย่าง จำนวน 4 โรงงาน โดยใช้ข้อมูลของสารตั้งต้น ได้แก่ ปริมาณของ Scrap, ชนิดและปริมาณของเชื้อเพลิงที่ใช้, แก๊สออกซิเจนขาเข้า และสารตั้งต้นอื่น ๆ รวมถึงพลังงานไฟฟ้า สารผลิตภัณฑ์ ได้แก่ น้ำเหล็ก, ไอเสีย, Slag และองค์ประกอบของ Slag พบว่า ไอเสีย สารปรับคุณภาพของเหล็กซึ่งปะปนอยู่ใน Scrap และปริมาณอากาศที่ไหลซึมเข้าสู่เตาหลอมระหว่างกระบวนการหลอม เป็นตัวแปรไม่ทราบซึ่งไม่สามารถตรวจวัดได้จึงต้องวิเคราะห์ตัวแปรดังกล่าว

โปรแกรมคำนวณนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนวิเคราะห์สมดุลมวลโดยจะใช้การคำนวณย้อนกลับจากสารผลิตภัณฑ์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของไอเสียและสารปรับคุณภาพของเหล็ก การประมาณค่าปริมาณอากาศที่ไหลซึมเข้าสู่เตาหลอมระหว่างกระบวนการหลอมจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยจะต้องเป็นไปตามกฎทรงมวล และส่วนที่สอง คือ ส่วนวิเคราะห์สมดุลพลังงาน ซึ่งจะนำผลการวิเคราะห์สมดุลมวลที่ได้จากส่วนแรกมาวิเคราะห์การใช้พลังงานภายในเตาหลอม

ผลการวิเคราะห์สมดุลพลังงานของโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงาน พบว่ามีร้อยละของการใช้พลังงานใกล้เคียงกันโดยมีรายละเอียดดังนี้ พลังงานขาเข้าได้แก่ เอนทัลปีของสารขาเข้า 4-6 % พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ 40-55% พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง 8-15 % พลังงานจากปฏิกิริยา Oxidation ในการเกิด Slag 30-45 % พลังงานขาออกได้แก่ เอนทัลปีขาออกของเหล็ก 35-50% เอนทัลปีของ slag 3-7 % เอนทัลปีขาออกของไอเสีย 15-25 % การสูญเสียความร้อนจากน้ำระเหยความร้อน 10-20% การสูญเสียพลังงานอื่น ๆ 10-25 % ผลการวิเคราะห์นี้ สามารถนำไปเป็นค่าอ้างอิงเพื่อคำนวณและประมาณการใช้พลังงานของโรงงานที่ใช้เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าอื่น ๆ ในประเทศไทยที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าได้

คำหลัก: สมดุลพลังงาน, เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า, ไอเสีย

Abstract

The operation of an Electric arc furnace (EAF) operates on a high temperature, high energy consumption and complexity. The purpose of this research is to develop a computer program for analyzing energy balance in an EAF that can take the result to plan and increase performance of the industry.

Development of the program for energy balance in EAF is analyzed by using data from 4 sample factories. Reactant data; Scrap charge, Fuel consumption, Oxygen Injection and other reactants including Electrical energy consumption. Product; Liquid steel, off-gas, Slag and Composition. The data shows that off-gas, iron stabilizer mixing in scrap and infiltrate air is unknown parameter that need to calculate.



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

TSF-016



The program is divided into 2 parts. First, mass balance is for analyze compositions of off-gas and iron stabilizer by using reverse calculation method and analyze the amount of infiltrate air by estimate from related research. Second part is energy balance. This part is for analyze energy consumption in an EAF by using the result from first part.

The results show the energy consumption, Inlet energy: inlet enthalpy 4-6% , electrical energy consumption 40-55%, Gas-oil Burner 8-15%, Oxidation by slag forming 30-45%, Output energy: iron enthalpy 35-50%, slag enthalpy 3-7%, off-gas enthalpy 15-25%, cooling water loss 10-20%, other loss 10-25%. This result can be used as the reference for unknown parameter in analyzing energy balance of others factory in Thailand.

Keywords: Energy balance, Electric arc furnace, off-gas

1 บทนำ

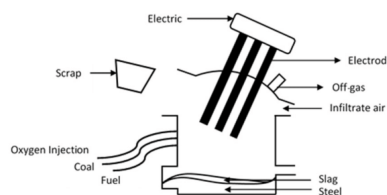
ประเทศไทยมีการทำอุตสาหกรรมเหล็กตั้งแต่ปี พุทธศักราช 2485 โดยผลิตเพื่อใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ และมีการพัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กเรื่อยมา ปัจจุบันมี โรงงานผลิตเหล็กหลายประเภท อาทิ โรงเหล็กรีดร้อน โรงเหล็กรีดเย็น โรงหลอมเหล็ก เป็นต้น โดยโรงงานผลิตเหล็ก แต่ละประเภทต้องดำเนินการภายใต้อุณหภูมิสูง จึงมีความ ต้องการพลังงานมาก ดังนั้นการศึกษาเรื่องพลังงานใน อุตสาหกรรมเหล็กจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการ พัฒนาอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทย

โรงหลอมเหล็กในประเทศไทยมีการใช้เตาหลอมหลาย ชนิด ชนิดหนึ่งคือเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF) ซึ่งเป็น อุปกรณ์ที่ใช้หลอมเศษเหล็ก (Scrap) และเหล็กดิบ (DRI หรือ Pig Iron) เพื่อขึ้นรูปเป็นแท่งเหล็ก (Billet) แล้วนำไป รีดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป โดยมีอุณหภูมิภายใน เตาสูงถึงประมาณ 3,000 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้พลังงาน ของเตาหลอมมาจากพลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก โดยการให้ กระแสไฟฟ้าผ่านแท่ง Electrode แล้วจุดอาร์คเพื่อให้เกิด ให้ความร้อนในเตาหลอม นอกจากนั้นยังมีพลังงานจาก ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหลอม คือ การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและปฏิกิริยา Oxidation ของการ เกิด Slag ซึ่งมีความซับซ้อน

งานวิจัยนี้จึงทำขึ้นเพื่อศึกษาสมดุลพลังงานของเตา หลอมอาร์คไฟฟ้า และพัฒนาโปรแกรมอำนวยความสะดวก ในการวิเคราะห์และจำแนกประเภทการใช้พลังงานของเตา หลอม เพื่อนำผลไปศึกษาและวิเคราะห์ด้านการใช้พลังงาน และสามารถวางแผนการประหยัดพลังงานเพื่อให้เกิด ประสิทธิภาพสูงสุดต่อไปได้

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลอมเศษเหล็ก (Scrap) เพื่อขึ้นรูปเป็นแท่งเหล็กแล้วนำไปรีดเพื่อใช้ใน อุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป โดยมีอุณหภูมิภายในเตาสูงถึง ประมาณ 3,000 องศาเซลเซียส ซึ่งการใช้พลังงานของเตา หลอมมาจากพลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก โดยการให้ กระแสไฟฟ้าผ่านแท่ง Electrode แล้วจุดอาร์คเพื่อให้เกิด ให้ความร้อนในเตาหลอมโดยมีเชื้อเพลิงและสารที่ใช้เร่ง ปฏิกิริยาดังแสดงใน Schematic Diagram ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 Schematic Diagram ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นสมการที่ ใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานภายในเตาหลอมเหล็กด้วยไฟฟ้า มีความซับซ้อนสูงเนื่องจากมีการใช้พลังงานจากหลาย แหล่ง คือ พลังงานทางเอนโดนามิกส์ พลังงานจาก ปฏิกิริยาเคมีและพลังงานทางไฟฟ้า นอกจากนี้การ ดำเนินการภายในเตาหลอมเป็นการดำเนินการที่อุณหภูมิ สูง ทำให้ไม่สามารถวัดค่าสำหรับบางตัวแปรได้ อีกทั้งยังมี พลังงานที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาภายในเตาหลอมอัน เนื่องมาจากการใส่สารเพื่อปรับคุณภาพของโลหะที่ แตกต่างกันไป ในการศึกษาคำนี้จึงต้องทำการศึกษา และประมาณค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยอ้างอิงข้อมูลพลังงาน การเผาไหม้และปฏิกิริยา Oxidation จากงานวิจัยของ



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

TSF-016



Krichen และคณะ [1] สัดส่วนองค์ประกอบของไอเสียจากงานวิจัยของ Krichen และคณะ [2] การประมาณปริมาณอากาศที่ไหลซึมเข้าสู่กระบวนการหลอมจากงานวิจัยของ Pfeifer และคณะ [3]

3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งสมมูลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะมีรายละเอียดของวิธีการดำเนินงานวิจัยเป็นดังนี้

3.1 ลงพื้นที่เก็บข้อมูลร่วมกับสถาบันเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยและกระทรวงพลังงาน

เพื่อศึกษาเก็บข้อมูลของโรงงานตัวอย่าง 4 โรงงาน สำหรับใช้วิเคราะห์ผลโดยเก็บข้อมูล 2 ส่วน คือ ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน และองค์ประกอบของ slag โดยมีผลการเก็บข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 1 2 3 และ 4

3.2 สร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมมูลพลังงาน

โดยเป็นไปตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ภายในตัวโปรแกรมจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนวิเคราะห์สมมูลมวล เพื่อทราบองค์ประกอบต่าง ๆ ของสารที่เข้าและออกจากเตาหลอม และนำผลการคำนวณนี้ไปคำนวณสมมูลพลังงานต่อในส่วนที่ 2

3.3 วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลสมมูลมวลและสมมูลพลังงานของโรงงานตัวอย่าง

โดยวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น โดยนำผลการคำนวณของโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงาน มาเปรียบเทียบกับและวิเคราะห์ผล

4 การสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในการวิเคราะห์สมมูลพลังงานในเตาหลอม จะต้องเป็นไปตามกฎอนุรักษ์มวลและกฎอนุรักษ์พลังงาน และ

พบว่าจากข้อมูลทั่วไปของโรงงานพบว่า ไอเสียที่ออกจากเตาหลอมเป็นตัวแปรไม่ทราบค่า ซึ่งทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์สมมูลพลังงานได้ในทันที จึงออกแบบการทำงานของโปรแกรมออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการวิเคราะห์สมมูลมวล เพื่อใช้วิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของไอเสีย และส่วนที่สองคือการวิเคราะห์พลังงานเพื่อคำนวณสมมูลพลังงาน

ในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์สมมูลพลังงานนี้ จะทำโดยการสร้าง Formula Sheet บนโปรแกรม Microsoft Excel โดยจะรับข้อมูลตัวอย่างของโรงงานดังตารางที่ 1 2 3 และ 4 แล้วนำมาคำนวณสมมูลมวลและสมมูลพลังงาน โดยมีรายละเอียดการคำนวณดังแสดงในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 จากนั้นโปรแกรมจะนำเสนอผลการวิเคราะห์ออกมาโดยอยู่ในรูปของร้อยละการใช้พลังงานแต่ละประเภท

4.1 สมมูลมวล

จากสมการสมมูลมวลของเตาหลอม สามารถเขียนกฎอนุรักษ์มวล โดยอ้างอิงจากหนังสือ Fundamental of Thermodynamics 8th Edition (SI Version) [4] ได้ตั้งสมการที่ 1 เมื่อพิจารณาเตาหลอมเป็นปริมาตรควบคุม สามารถสรุปสมการได้ดังแสดงในสมการที่ 2 โดยสามารถแจกแจงมวลสารที่เข้าและออกจากเตาหลอมออกเป็นกลุ่มเมื่อพิจารณาในแต่ละกลุ่มสามารถแบ่งออกเป็นองค์ประกอบย่อย ๆ ได้ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า มีตัวแปรไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้นอีก 2 ตัว คือ สารเจือปน สารปรุใน Scrap และ O_2 , N_2 ที่เกิดจาก Infiltrate air

$$\Delta m_{CV} = \sum m_{inlet} - \sum m_{outlet} \quad (1)$$

$$\sum m_{inlet} = \sum m_{outlet} \quad (2)$$



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

TSF-016



ตารางที่ 1 ข้อมูลโรงงานตัวอย่าง ก.

โรงงานตัวอย่าง ก.										
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ			องค์ประกอบของ slag	
Tap to tap time	55	นาที	ไฟฟ้า	31,720	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³	ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
Scrap charge	82	ตัน	เชื้อเพลิง	565 (Natural Gas)	Nm ³	Cooling Water	1,110	m ³	SiO ₂	18.18
									Al ₂ O ₃	9.95
Scrap charge temp	33	°C	ออกซิเจน (lance)	1,176	Nm ³	Cooling Water temp. in	30	°C	MnO	5.07
									CaO	34.18
Liquid steel	74	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	1,128	Nm ³	Cooling Water temp. out	37	°C	MgO	6.65
									FeO	15.67
slag	5.92	ตัน	ออกซิเจน (Total)	2,304	Nm ³					
Puring Temp	1,600	°C	ถ่านหิน	637	kg					
			Electrode	93	kg					

ตารางที่ 2 ข้อมูลโรงงานตัวอย่าง ข.

โรงงานตัวอย่าง ข.										
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ			องค์ประกอบของ slag	
Tap to tap time	55.28	นาที	ไฟฟ้า	21,190	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³	ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
Scrap charge	50.68	ตัน	เชื้อเพลิง	109 (LPG)	Nm ³	Cooling Water	1,110	m ³	SiO ₂	12.72
									Al ₂ O ₃	7.75
Scrap charge temp	40	°C	ออกซิเจน (lance)	1197	Nm ³	Cooling Water temp. in	30	°C	MnO	5.53
									CaO	33.05
Liquid steel	46	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	660	Nm ³	Cooling Water temp. out	37	°C	MgO	5.71
									FeO	31.39
slag	4.68	ตัน	ออกซิเจน (Total)	1857	Nm ³					
Puring Temp	1,620	°C	ถ่านหิน	688	kg					
			Electrode	56	kg					



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

TSF-016



ตารางที่ 3 ข้อมูลโรงงานตัวอย่าง ค.

โรงงานตัวอย่าง ค.										
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ			องค์ประกอบของ slag	
Tap to tap time	60	นาที	ไฟฟ้า	32,000	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³	ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
Scrap charge	85	ตัน	เชื้อเพลิง	600 (Natural Gas)	Nm ³	Cooling Water	1,190	m ³	SiO ₂	10
									Al ₂ O ₃	10
Scrap charge temp	33	°C	ออกซิเจน (lance)	1548	Nm ³	Cooling Water temp. in	36	°C	MnO	10
									CaO	25
Liquid steel	75	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	1152	Nm ³	Cooling Water temp. out	46	°C	MgO	5
									FeO	40
slag	5.4	ตัน	ออกซิเจน (Total)	2700	Nm ³					
Puring Temp	1,620	°C	ถ่านหิน	2000	kg					
			Electrode	142.5	kg					

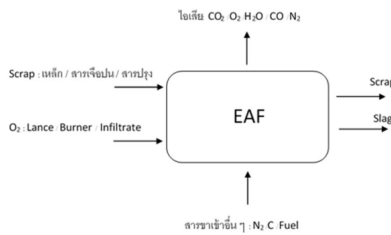
ตารางที่ 4 ข้อมูลโรงงานตัวอย่าง ง.

โรงงานตัวอย่าง ง.										
ข้อมูลการทำงาน			ขาเข้า			อื่น ๆ			องค์ประกอบของ slag	
Tap to tap time	60	นาที	ไฟฟ้า	13,300	kWh	ไอเสีย	N/A	m ³	ชนิดของสารประกอบ	ร้อยละโดยมวล (%)
Scrap charge	27	ตัน	เชื้อเพลิง	94 (Diesel)	Nm ³	Cooling Water	500	m ³	SiO ₂	15
									Al ₂ O ₃	10
Scrap charge temp	33	°C	ออกซิเจน (lance)	526	Nm ³	Cooling Water temp. in	30	°C	MnO	10
									CaO	30
Liquid steel	25.5	ตัน	ออกซิเจน (Burner)	274	Nm ³	Cooling Water temp. out	40	°C	MgO	0
									FeO	30
slag	1.5	ตัน	ออกซิเจน (Total)	800	Nm ³					
Puring Temp	1,600	°C	ถ่านหิน	600	kg					
			Electrode	85	kg					



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

TSF-016



รูปที่ 2 Mass Diagram ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

4.1.1 การวิเคราะห์สารเจือปนและสารปรับคุณภาพใน Scrap ทำโดยการคำนวณย้อนกลับจากข้อมูลองค์ประกอบของ Slag โดยสารปรับคุณภาพ คือ $MgCO_3$ และ $CaCO_3$ จะคำนวณมาจาก MgO และ CaO ใน Slag ตามลำดับ และสารเจือปนอื่น ๆ จะคำนวณย้อนกลับจากองค์ประกอบที่เหลือ

4.1.2 การวิเคราะห์ปริมาณ Infiltrated air ซึ่งไหลเข้าสู่เตาหลอมในระหว่างการผลิต โดยถือว่าอากาศที่ไหลเข้าสู่เตาหลอมจะประกอบด้วย O_2 และ N_2 และประมาณค่าโดยใช้อัตราส่วน infiltrated air : Oxygen Injected = 2.89 โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Pfeifer และคณะ [3]

4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของไอเสีย ในไอเสียจะประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ คือ CO_2 , CO , O_2 , N_2 และไอน้ำ ทำโดยการคำนวณปริมาณขององค์ประกอบดังกล่าว จากปฏิกิริยาเคมีภายในเตาหลอม คือ ปฏิกิริยา Oxidation ในการเกิด Slag, ปฏิกิริยาในการเผาไหม้เชื้อเพลิง ผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ถ่านหิน และแก๊สอิเล็กโทรด โดยมีสมมุติฐานว่า CO_2 จะเกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงและอิเล็กโทรด, CO เกิดจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน, O_2 และ N_2 เกิดจากการรั่วซึมของอากาศระหว่างกระบวนการหลอม และไอน้ำเกิดจากผลผลิตของปฏิกิริยาเผาไหม้

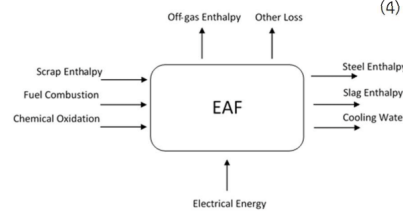
เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์สมดุลมวล โดยนำไปเขียนบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อรับค่าข้อมูลของสารตั้งต้นที่ทราบค่า และคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่าโดยอาศัยเงื่อนไขและสมการในหัวข้อที่ 4.1 จะทำให้ทราบองค์ประกอบของสารขาเข้าทั้งหมด รวมถึงปริมาณของไอเสีย ซึ่งจะนำผลนี้ไปวิเคราะห์สมดุลพลังงานในลำดับต่อไป

4.2 สมดุลพลังงาน

จากสมการสมดุลพลังงานของเตาหลอม สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3 โดยสามารถแจกแจงพลังงานขาเข้าและออกจากเตาหลอมออกเป็นกลุ่ม ๆ ซึ่งสอดคล้องกับสมดุลมวลในหัวข้อที่ 3.1 ดังแสดงในรูปที่ 3 และเขียนได้ดังสมการที่ 4 พิจารณาพลังงานที่เข้าสู่เตาหลอมจะประกอบด้วย เอนทัลปีของ Scrap รวมถึงสารเจือปนและสารปรับคุณภาพ (Scrap Enthalpy) พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่เตาหลอม (Electrical Energy) พลังงานที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (Fuel Combustion) และพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา Oxidation ของการเกิด slag (Chemical Oxidation) พิจารณาพลังงานที่ออกจากเตาหลอมประกอบด้วย เอนทัลปีของน้ำเหล็กที่ออกจากเตาหลอม (Steel Enthalpy) เอนทัลปีของไอเสียที่ออกจากเตาหลอม (Off-gas Enthalpy) เอนทัลปีของ slag (Slag Enthalpy) พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทโดยน้ำหล่อเย็น (Cooling Water) และการสูญเสียพลังงานอื่น ๆ (Other loss) ได้แก่ Dust, การสูญเสียความร้อนในการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องเปิด การนำความร้อนผ่านผนังและการแผ่รังสีความร้อน เป็นต้น

$$\Delta E_{CV} = \sum Q - \sum W + \sum H_i - \sum H_e \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & (E_{Fuel} + E_{Chem}) \\ & = -(Q_{Other} + Q_{water}) \\ & \quad - W_{Elec} \\ & \quad + (H_{Scrap}) \\ & \quad - (H_{Steel} + H_{Slag} + H_{Off-gas}) \end{aligned} \quad (4)$$



รูปที่ 3 Energy Diagram ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

4.2.1 Scrap Enthalpy คือ พลังงานขาเข้าของ Scrap สารเจือปน และสารปรุงในหัวข้อที่ 3.1.1 เมื่อทราบปริมาณของสารดังกล่าว สามารถคำนวณ Enthalpy ได้ดังสมการที่ 5

$$H_{Scrap} = \sum m_i h_i \quad (5)$$



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์



TSF-016

4.2.2 Fuel Combustion คือ พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยโรงงานแต่ละโรงอาจใช้เชื้อเพลิงแตกต่างกัน สามารถคำนวณพลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ดังสมการที่ 6

$$E_{Fuel} = m_{Fuel} * H.V. \quad (6)$$

4.2.3 Chemical Oxidation คือ พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Oxidation ในการเกิด Slag โดยพลังงานจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของสารที่เจือปนใน Scrap สามารถคำนวณพลังงานได้โดยอาศัยข้อมูลจากงานวิจัยของ Krichen และคณะ [1]

4.2.4 Electrical Energy เป็นพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่เตาหลอมเพื่อจุดอาร์ค โดยสามารถคำนวณพลังงานไฟฟ้าได้ดังสมการที่ 7

$$W_{elec} = U * 60 * t_{tap-to-tap} \quad (7)$$

4.2.5 Steel Enthalpy คือ พลังงานขาออกของน้ำเหล็กที่ออกจากเตาหลอม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 8

$$H_{Steel} = \sum m_i h_i \quad (8)$$

4.2.6 Slag Enthalpy คือ พลังงานรวมขาออกของ Slag ที่ได้จากการบวกรวมการหลอม และออกจากเตาหลอม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 9

$$H_{slag} = \sum m_i h_i \quad (9)$$

4.2.7 Off-gas Enthalpy คือ พลังงานรวมขาออกของไอเสียที่ได้จากการบวกรวมการหลอม และออกจากเตาหลอม สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 10

$$H_{off-gas} = \sum m_i h_i \quad (10)$$

4.2.8 Cooling water คือ พลังงานที่ออกจากเตาหลอมโดยอาศัยน้ำระบายความร้อน สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 11

$$Q_{water} = m_{water} * c_{p,water} * (T_{water,o} - T_{water,i}) \quad (11)$$

4.2.9 Other Loss คือ พลังงานขาออกในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการแผ่

รังสี การสูญเสียความร้อนจากช่องเปิด พลังงานของฝุ่นที่เกิดจากการบวกรวมการหลอมที่ออกจากเตา เป็นต้น

เมื่อนำข้อมูลในหัวข้อ 4.2 มาวิเคราะห์สมดุลพลังงานโดยอาศัยผลการคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่าที่ได้จากในหัวข้อ 4.1 จะทำให้ทราบรายละเอียดและสัดส่วนการใช้พลังงานภายในเตาหลอม โดยจะแสดงผลในรูปร้อยละการใช้พลังงานในแต่ละประเภท

4.3 รายละเอียดของโปรแกรม

เมื่อทราบสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละส่วนดังแสดงในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 จะนำมาเขียนลงบนโปรแกรม Microsoft Excel โดยรับค่าข้อมูลขาเข้าดังแสดงในตารางที่ 1-4 โดยป้อนข้อมูลลงในช่องสีเหลืองของตัวโปรแกรม ประกอบด้วยค่าคงที่ในการคำนวณ ข้อมูลทั่วไปของโรงงาน และองค์ประกอบของ Slag ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5

รูปที่ 4 หน้าต่างรับค่าคงที่ในการคำนวณและข้อมูลทั่วไป

รูปที่ 5 หน้าต่างรับค่าองค์ประกอบของ Slag

จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณตามสมการที่ระบุไว้ และจะแสดงผลในรูปร้อยละของการใช้พลังงานในแต่ละประเภทดังแสดงในรูปที่ 6



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

TSF-016



Input	Energy [GJ]	%	Output	Energy [GJ]	%
Scrap Enthalpy	78.92	5.4	Steel Enthalpy	66.38	45.9
Electrical Energy	70.28	48.6	Off-gas Enthalpy	33.35	23.1
Fuel Combustion	11.60	8.0	Slag Enthalpy	9.22	6.4
Chemical Oxidation	54.89	37.9	Cooling Water	20.12	13.9
			Other loss	14.61	10.1

รูปที่ 6 หน้าต่างแสดงผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานแต่ละประเภท

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมดังกล่าว พบข้อจำกัดของการใช้โปรแกรมดังนี้ เนื่องจากโรงงานในแต่ละโรงมีการใช้เชื้อเพลิงต่างชนิดกัน ส่งผลให้มีปริมาณการใช้ ออกซิเจนสำหรับการเผาไหม้แตกต่างกันด้วย จึงต้องมีการปรับแต่งโปรแกรมโดยการเปลี่ยนค่าคงที่ของเชื้อเพลิงใน Formula sheet ก่อนทำการคำนวณทุกครั้ง และโปรแกรมนี้นักพัฒนาขึ้นโดยอาศัยการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลจากโรงงานตัวอย่างในประเทศไทย ทำให้ได้ร้อยละของการใช้พลังงานแต่ละประเภทโดยเฉลี่ย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในการวิเคราะห์โรงงานอื่น ๆ ที่มีตัวแปรไม่ทราบค่าในประเทศได้ เนื่องจากมีลักษณะการดำเนินการของโรงงานที่ใกล้เคียงกัน

5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานของโรงงานตัวอย่างทั้งสี่โรงงานดังแสดงในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 สามารถนำมาวิเคราะห์เป็นร้อยละของการใช้พลังงานได้ดังแสดงในตารางที่ 5 6 7 และ 8

ตารางที่ 5 ร้อยละการใช้พลังงานในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่าง ก.

Input	Energy [GJ]	%	Output	Energy [GJ]	%
Scrap Enthalpy	12.65	6.3	Steel Enthalpy	90.25	44.9
Electrical Energy	104.68	52.1	Off-gas Enthalpy	29.46	14.7
Fuel Combustion	25.23	12.5	Slag Enthalpy	9.57	4.8
Chemical Oxidation	58.39	29.1	Cooling Water	32.57	16.2
			Other loss	39.09	19.45

ตารางที่ 6 ร้อยละการใช้พลังงานในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่าง ข.

Input	Energy [GJ]	%	Output	Energy [GJ]	%
Scrap Enthalpy	78.92	5.4	Steel Enthalpy	66.38	45.9
Electrical Energy	70.28	48.6	Off-gas Enthalpy	33.35	23.1
Fuel Combustion	11.60	8.0	Slag Enthalpy	9.22	6.4
Chemical Oxidation	54.89	37.9	Cooling Water	20.12	13.9
			Other loss	14.61	10.1

ตารางที่ 7 ร้อยละการใช้พลังงานในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่าง ค.

Input	Energy [GJ]	%	Output	Energy [GJ]	%
Scrap Enthalpy	12.84	4.4	Steel Enthalpy	108.22	36.8
Electrical Energy	115.20	39.2	Off-gas Enthalpy	45.11	15.4
Fuel Combustion	42.03	14.3	Slag Enthalpy	10.70	3.6
Chemical Oxidation	123.69	42.1	Cooling Water	59.86	20.4
			Other loss	69.87	23.8

ตารางที่ 8 ร้อยละการใช้พลังงานในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่าง ง.

Input	Energy [GJ]	%	Output	Energy [GJ]	%
Scrap Enthalpy	40.53	4.2	Steel Enthalpy	36.41	37.7
Electrical Energy	478.80	49.6	Off-gas Enthalpy	13.09	13.6
Fuel Combustion	118.51	12.3	Slag Enthalpy	2.81	2.9
Chemical Oxidation	328.11	34.0	Cooling Water	20.96	21.7
			Other loss	23.33	24.2

จากการวิเคราะห์โรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงานสามารถแบ่งโรงงานออกเป็น 2 ประเภท โดยอาศัยปริมาณของ O_2 ในการเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงเป็นเกณฑ์ประเภทแรก คือ จ่ายออกซิเจนเพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาทำให้ไม่เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในไอเสีย ได้แก่ โรงงานตัวอย่าง ก. ข. และ ง. ประเภทที่สอง คือ จ่าย



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34
วันที่ 15 - 17 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

TSF-016



ออกซิเจนในปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาในจึงต้องอาศัยออกซิเจนในอากาศ และเกิดแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ในไอเสีย ได้แก่โรงงานตัวอย่าง ก.

เมื่อพิจารณาโรงงานตัวอย่าง ก. พบว่ามีอัตราการใช้พลังงานจาก Chemical Oxidation น้อยกว่าโรงงานตัวอย่าง ข. ค. และ ง. เนื่องจากใน Slag ของโรงงานตัวอย่าง ก. มีสัดส่วนปริมาณ FeO น้อยกว่าทำให้ได้พลังงานจากปฏิกิริยา Oxidation น้อยกว่า จึงส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาโรงงานตัวอย่าง ข. พบว่ามีการใช้อัตราพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าโรงงานตัวอย่าง ก. ค. และ ง. เนื่องจากใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงซึ่งพลังงานจากเชื้อเพลิงมาก ส่งผลให้มีการใช้ O_2 ในการเผาไหม้มากขึ้น จึงเหลือ O_2 ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยา Oxidation กับ CO จนเกิดเป็น CO_2 ในไอเสีย และเมื่อเทียบกับโรงงานตัวอย่าง ก. ในอัตราการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงใกล้เคียงกัน จะเห็นว่า มีการใช้ O_2 ในการเกิด FeO น้อยกว่า จึงทำให้มี O_2 เหลือเพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับ CO ในไอเสียได้

ผลการวิเคราะห์การใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจากโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงาน สามารถนำมาสรุปเป็นร้อยละโดยประมาณได้ดังตารางที่ 9 โดยตารางนี้สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งอ้างอิงค่าเฉลี่ยองค์ประกอบต่าง ๆ ของสมดุลพลังงานเพื่อใช้วิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในสถานประกอบการอื่น ๆ ที่อาจมีตัวแปรไม่ทราบได้

ตารางที่ 9 ร้อยละการใช้พลังงานเฉลี่ยในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่างทั้ง 4 โรงงาน

พลังงาน ขาเข้า	ร้อยละ	พลังงาน ขาออก	ร้อยละ
Scrap Enthalpy	4-6	Steel Enthalpy	35-50
Electrical Energy	40-55	Off-gas Enthalpy	15-25
Fuel Combustion	8-15	Slag Enthalpy	3-7
Chemical Oxidation	30-45	Cooling Water	10-20
		Other loss	10-25

6 สรุปผลการวิจัย

จากผลการคำนวณสมดุลพลังงานในเตาหลอมของโรงงานตัวอย่างทั้งสี่โรงงาน พบว่ามีความใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อีกทั้งสามารถประมาณองค์ประกอบของไอเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการได้อีกด้วย จึงสรุปได้ว่าโปรแกรมมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานเพื่อนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการจัดการพลังงานต่อไปได้

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] Kirschen M, Badr K, Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. Energy 2011; 36:6146-55.
- [2] Kirschen, M., Pfeifer, H., Wahlers, F. J., & Mees, H. (2001). *Off-gas measurements for mass and energy balances of stainless steel EAF.*
- [3] Pfeifer, H., & Kirschen, M. (2002). *Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand.*
- [4] Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag (2013). *Fundamental of Thermodynamics 8th Edition (SI Version).*

บรรณานุกรม

1. 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.
2. Çamdali, Ü., Y. Yetişken, and İ. Ekmekçi, *Determination of the Optimum Cost Function for an Electric Arc Furnace and Ladle Furnace System by Using Energy Balance*. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2012. 7(2): p. 200-212.
3. İsmail Ekmekçi, y.y., Ünal Çamdali, *Mass Balance Modeling for Electric Arc Furnace and Ladle Furnace System in Steelmaking Facility in Turkey*. Journal of Iron and Steel Research International, 2007.
4. J.G.G. Cárdenas, A.N.C.a.G.G.G., *OPTIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION IN ELECTRIC ARC FURNACES OPERATED WITH 100% DRI*. Metal, 2007.
5. Pfeifer, H. and M. Kirschen. *Thermodynamic analysis of EAF electrical energy demand*. in *7th European Electric Steelmaking Conference*. 2002. Venice.
6. Köhle, S., *Effects on the electric energy and electrode consumption of arc furnaces*. Stahl und. Eisen, 1992. 112(11): p. 59-67.
7. N.Preechakul, C.T. *Development of a Computer Program for Energy Balance Analysis in an Electric Arc Furnace*. in *ME-NETT* 34. 2562. Prachuap Khiri Khan.
8. Claus Borgnakke, R.E.S., *Fundamental of Thermodynamics (SI Version)*. 8th ed. 2013.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัฐภัทร ปรีชากุล
วัน เดือน ปี เกิด	19 มิถุนายน 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2559 - เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี การศึกษา 2560
ที่อยู่ปัจจุบัน	499/301 ถนนหทัยราษฎร์ แขวงสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10510
ผลงานตีพิมพ์	การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 34 (ME- NETT 2020) วันที่ 15-17 กรกฎาคม 2020 ณ อำเภอหัวหิน จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์ ในหัวข้อ "การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับ วิเคราะห์สมดุลพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า"