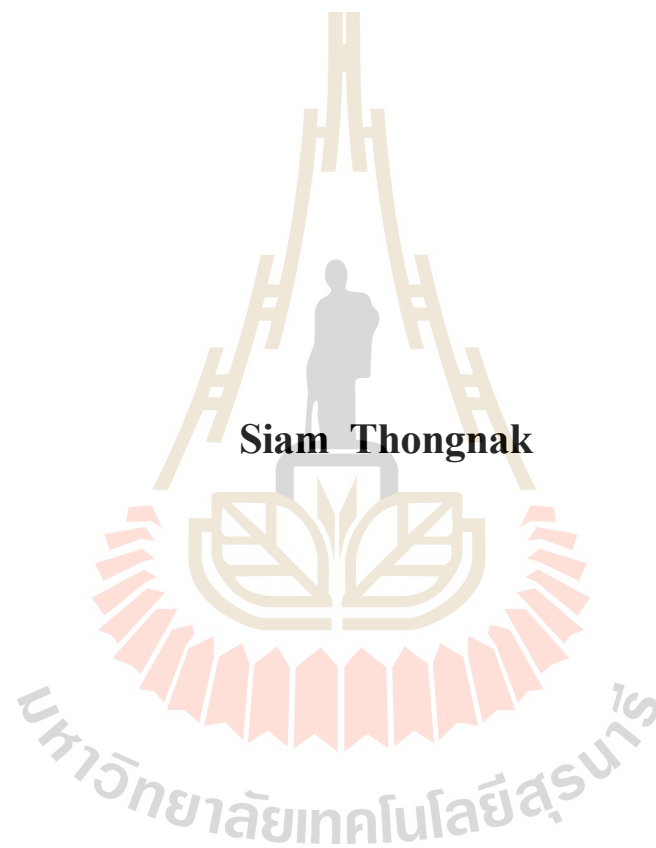


การศึกษาวิธีการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค
โดยการวิเคราะห์สัญญาณแรงดัน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**A STUDY ON MEASURING METHOD FOR SLAG
FOAMING IN ELECTRIC ARC FURNACE BY USING
VOLTAGE SIGNAL ANALYSIS**



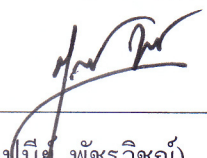
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2017

การศึกษาวิธีการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก
โดยการวิเคราะห์สัญญาณแรงดัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร. จิตาปณีต พิชัยวิชัย)

ประธานกรรมการ


(อ. ดร. สงบ คำค้อ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. ชนคชัย กุลวรรานิชพงษ์)



(รศ. ดร. พรวิสา วงศ์ปัญญา)



(อ. ดร. ปัญญา บัวสมบุรา)



(ศ. ดร. สันติ แม่นศิริ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร. กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สยาม ทองนาค : การศึกษาวิธีการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คโดยการวิเคราะห์สัญญาณแรงดัน (A STUDY ON MEASURING METHOD FOR SLAG FOAMING IN ELECTRIC ARC FURNACE BY USING VOLTAGE SIGNAL ANALYSIS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.สงบ คำค้อ, 124 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในระหว่างการหลอมเหล็กในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คในสถานะที่สแลกมีส่วนผสมทางเคมีต่าง ๆ ซึ่งได้ศึกษาโดยการตรวจวัดสัญญาณแรงดันทางไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาหลอมในระหว่างการอาร์ค สัญญาณที่ตรวจวัดในแต่ละช่วงของการผลิตโดยเฉพาะในระหว่างการทำให้เกิดฟองสแลกจะถูกนำมาวิเคราะห์เป็นดัชนีการเกิดฟองสแลกด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยดัชนีการเกิดฟองสแลกเป็นผลมาจากการแปลงค่าของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแรงดัน การตรวจวัดการเกิดฟองสแลกได้ดำเนินการในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คในขณะที่ทำการผลิตจริงในภาคอุตสาหกรรม โดยได้เก็บข้อมูลจากการหลอมเหล็กทั้งสิ้น 27 เตาหลอม พร้อมกับเก็บตัวอย่างสแลกทั้งสิ้น 22 ตัวอย่าง จากการศึกษาพบว่าในช่วงที่ทำให้เกิดฟองสแลกมีค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกที่ร้อยละ 84.35 และช่วงที่หยุดทำฟองสแลกมีค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกที่ร้อยละ 75.17 นอกจากนี้ยังพบว่าค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความสัมพันธ์กับปริมาณเหล็กออกไซด์ของสแลกในทางลบ (ปริมาณเหล็กออกไซด์เพิ่มขึ้นแต่ดัชนีการเกิดฟองสแลกลดลง) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งหมายถึงความสัมพันธ์ของดัชนีการเกิดฟองสแลกกับปริมาณของเหล็กออกไซด์ในสแลกมีความน่าเชื่อถือถึงร้อยละ 95 จากการวิเคราะห์ดัชนีการเกิดฟองสแลกกับสถานะของสแลกในเตาหลอมโดยใช้ Isothermal Solubility Diagram (ISD) ของระบบออกไซด์ของสแลกที่เบสิกซิตี 1.5 และอุณหภูมิ 1,600°C ของตัวอย่างสแลกจาก 22 เตาพบว่าสแลกอยู่ในบริเวณสแลกของเหลวทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกอยู่ 84.25 ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้ยังจำเป็นต้องมีการทดลองเพิ่มเติมเพื่อเป็นการเปรียบเทียบค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกกับสถานะของสแลกบริเวณอื่นใน ISD ต่อไป ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษานี้คือ สามารถบ่งบอกถึงลักษณะและสถานะการเกิดฟองสแลก โดยจะเป็นแนวทางในการพัฒนาและออกแบบระบบควบคุมการฟั่นแก้ออกซิเจนโดยอัตโนมัติของการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าโดยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค

สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา สยาม ทองนาค

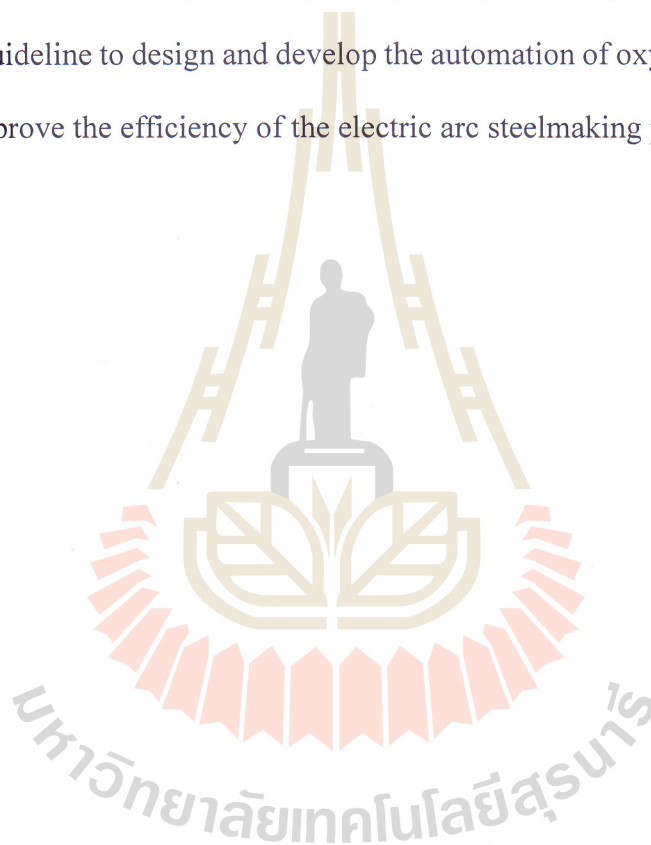
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สงบ คำค้อ

SIAM THONGNAK : A STUDY ON MEASURING METHOD FOR
SLAG FOAMING IN ELECTRIC ARC FURNACE BY USING VOLTAGE
SIGNAL ANALYSIS. THESIS ADVISOR : SAKHOB KHUMKOA,
Dr.-Ing., 124 PP.

STEEL MAKING/ ELECTRIC ARC FURNACE/ ARC VOLTAGE/ SLAG
FOAMING INDEX

This study dealt with the slag foaming detection in electric arc furnace. The purpose of this study is to develop the measuring method for slag foaming during the production of steel with various chemical compositions of slag. In this study, the voltage signals of electric arc furnace during the steel processing were detected. The detected signals of each processing stage especially during foaming of the slag were subsequently analyzed by using a LabVIEW software and reported as an slag foaming index. This index resulted from the transformation of harmonic of voltage. This work was carried out under normal practice in industrial furnace. The voltage signal of 27 heats were analyzed by using the LabVIEW software. The slag samples of 22 heats were selected and its chemical compositions were analyzed by using XRF. The results showed that the average slag foaming index in the slag foaming period is 84.35% while that in the non slag foaming period is 75.17%. It was found that there is a negative correlation, which is significant at 0.05 level, between slag foaming index and oxide content of the slag. It means that this correlation provides a confidential level of 95%. Moreover, the slag foaming index can be applied to indicate the status of slag on an isothermal solubility diagram. In this study the status of the represented slag of 22 heats

with basicity of 1.5 at 1600°C is located in the liquid area according to the isothermal solubility diagram. The average slag foaming index of those slag is 84.25. Nevertheless, analysis of voltage signals and slag samples from industrial production is required in order to clarify the correlation between slag foaming index and status of slags on isothermal solubility diagram. The advantages of this study are to indicate and characterize the status of slag foaming during steel processing. Furthermore, it can be applied as a guideline to design and develop the automation of oxygen injection system in order to improve the efficiency of the electric arc steelmaking process.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature Siam T.

Advisor's Signature S. W. A.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากหน่วยงานและบุคคลต่าง ๆ ในโอกาสที่ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงาน และบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

อ. ดร.สงบ คำค้อ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความรู้ทาง วิชาการในด้านต่าง ๆ ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษาที่มีประโยชน์อย่าง ยิ่งตลอดการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

เจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาคารเครื่องมือ 10 ซึ่งให้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ตลอดการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

คุณรุ่งโรจน์ เลิศอารมย์ คุณฉวีธรรมา หล้าสมบัติ รวมทั้งผู้ปฏิบัติงานที่ช่วยเหลือ อำนวย ความสะดวกทุกท่าน และบริษัท เหล็กสยาม (2001) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการให้สถานที่ เพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลในการดำเนินการทดลอง

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้ทุนวิทยานิพนธ์บัณฑิตศึกษา เพื่อเป็น งบประมาณสนับสนุนในการทำวิจัยและผู้เกี่ยวข้องอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวถึงข้างต้น ผู้วิจัยขอกราบ ขอบคุณเป็นอย่างสูง

สำหรับความงุนงงความสับสนที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ตลอดจนญาติพี่น้องอันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งบุคคลเหล่านี้เป็นผู้ให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด อันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งที่ทำให้การทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สยาม ทองนาค

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การผลิตเหล็กและเหล็กกล้า	4
2.1.1 การผลิตเหล็กขั้นต้น	5
2.1.2 การผลิตเหล็กขั้นกลาง	5
2.1.3 การผลิตเหล็กขั้นปลาย	6
2.2 การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค	6
2.2.1 หลักการของการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้า	6
2.2.2 สมดุลวัตถุดิบและสมดุลพลังงาน	9
2.3 การเกิดฟองสแลกในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค	10
2.3.1 ปฏิกริยาทางเคมีของการเกิดฟองสแลก	10
2.3.2 การคงตัวของฟองสแลก	12
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำฟองสแลก	15
2.5 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจวัดฟองสแลก	18

สารบัญ (ต่อ)

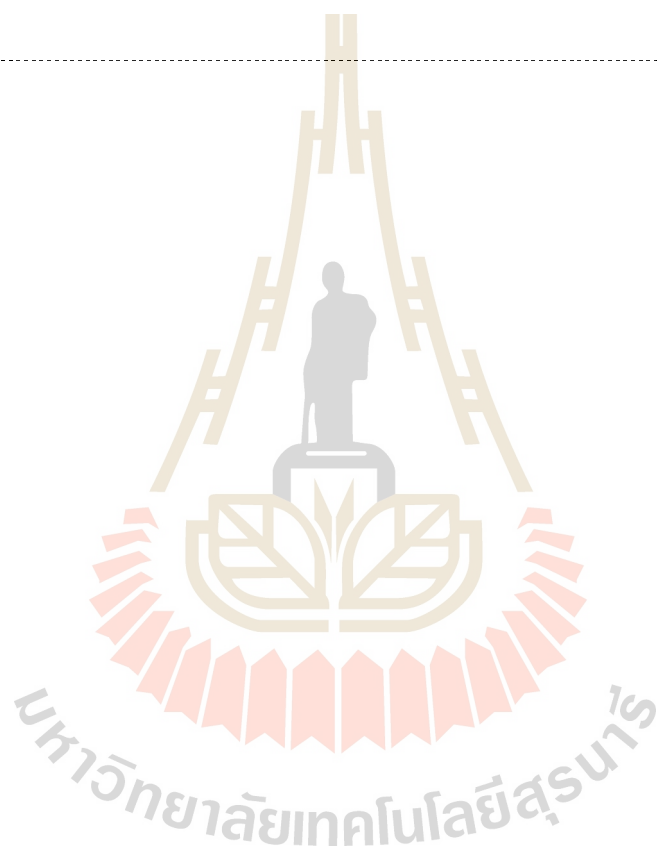
หน้า

2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	22
3.1.1	อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการตรวจวัดการเกิดฟองสแลก.....	22
3.1.2	อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี.....	25
3.2	ขั้นตอนการศึกษาวิจัย.....	28
3.2.1	ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.2.2	ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์.....	29
3.3	การแปรผลสัญญาณดิจิทัล.....	34
3.3.1	แนะนำซอฟต์แวร์ LabVIEW.....	34
3.3.2	หลักการทำงานของซอฟต์แวร์ของระบบตรวจการเกิดฟองสแลก.....	35
3.3.3	การกำหนดเริ่มต้นฮาร์ดแวร์.....	37
3.3.4	การกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูล.....	39
3.3.5	การรับข้อมูลจากส่วนคั้งสัญญาณ.....	41
3.3.6	การหยุดการทำงานระบบ.....	42
3.3.7	การตรวจสอบสถานะคำสั่งปุ่มควบคุม.....	43
3.3.8	การประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล.....	43
3.4	การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสแลก.....	44
4	ผลการทดลองและการอภิปรายผล.....	45
4.1	สเปกตรัมเชิงความถี่ในช่วงกระบวนการหลอม.....	47
4.2	ทดสอบดัชนีการเกิดฟองสแลก.....	49
4.3	เปรียบเทียบผลของดัชนีการเกิดฟองสแลกกับส่วนผสมทางเคมีของสแลก.....	61
4.3.1	ความสัมพันธ์ของดัชนีการเกิดฟองสแลกและปริมาณเหล็กออกไซด์.....	63
4.3.2	สภาวะของฟองสแลกที่เกิดขึ้นและดัชนีการเกิดฟองสแลก.....	64
4.4	ข้อเสนอแนะและแนวทางการประยุกต์ใช้งานผลการวิจัย.....	65
5	สรุปผลการทดลอง.....	66
	รายการอ้างอิง.....	67

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค XRF.....	69
ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการตรวจวัดการเกิดฟองสแตก.....	92
ภาคผนวก ค บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	124



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมมูลพลังงานของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค.....	10
2.2	อิทธิพลของออกไซด์ต่อสมมูลสแลก.....	13
4.1	การเปลี่ยนแปลงดัชนีการเกิดฟองสแลกเมื่อหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน.....	60
4.2	ผลการวิเคราะห์สารประกอบในสแลกและค่าดัชนีการเกิดฟองสแลก.....	62
4.3	ค่าเฉลี่ยผลวิเคราะห์สารประกอบในสแลกและค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก.....	64





สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสแลกและประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากถ่านอาร์กสู่น้ำเหล็ก	2
2.1 ภาพรวมของการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า	4
2.2 กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค	7
2.3 อุปกรณ์ของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค	8
2.4 สมดุลวัตถุดิบของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค	9
2.5 ภาพจำลองการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค	11
2.6 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ของสแลกที่มีค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.0	13
2.7 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ของสแลกที่มีค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.5	14
2.8 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ของสแลกที่มีค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 3.0	14
2.9 แบบจำลองการวัดของดัชนีการเกิดฟองสแลก	16
2.10 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน-กระแสอาร์คในช่วงเวลาต่าง ๆ	18
2.11 วงจรสมมูลของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค	19
3.1 อุปกรณ์ดิงสัญญาณแรงดัน NI 9225	23
3.2 แผนภาพบล็อกการทำงานของ NI 9225	23
3.3 อุปกรณ์ปรับวัดและส่งสัญญาณ cDAQ-9174	24
3.4 แผนภาพบล็อกการทำงานของ cDAQ-9174	24
3.5 หน้าจอในส่วนของการแสดงผลของระบบตรวจวัดการเกิดฟองสแลก	25
3.6 เครื่องบดละเอียดแบบบอลมิล (ball mill)	26
3.7 เครื่องมือ X-Ray Fluorescence Spectrometer	27
3.8 ขั้นตอนการศึกษา	28
3.9 แผนภาพของระบบตรวจจับฟองสแลก	29
3.10 วงจรสมมูลของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค	30
3.11 แผนภาพตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์และการดิงสัญญาณ	31
3.12 ตัวอย่างการทำงานในส่วนของการแสดงผล	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 โปรแกรมต้นฉบับที่ใช้ในการตรวจวัดการเกิดฟองสแลก.....	34
3.14 เครื่องหมายการค้าของซอฟต์แวร์ LabVIEW.....	35
3.15 ฟังงาน โปรแกรมระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	36
3.16 ฟังงานกำหนดเริ่มต้นส่วนการดึงข้อมูล.....	38
3.17 ฟังงานกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูล.....	40
3.18 ฟังงานรับข้อมูลอินพุตจากส่วนดึงสัญญาณ.....	41
3.19 ฟังงานหยุดการทำงานระบบ.....	42
3.20 ฟังงานตรวจสอบสถานะปุ่มควบคุม.....	43
3.21 ฟังงานการประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล.....	44
4.1 ขั้นตอนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค.....	45
4.2 สเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดันอาร์ค ณ จุดวัด V_{ag} , V_{bg} และ V_{cg} ขณะที่สแลกไม่เป็นฟอง.....	47
4.3 สเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดันอาร์ค ณ จุดวัด V_{ag} , V_{bg} และ V_{cg} ขณะที่สแลกเป็นฟอง.....	48
4.4 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171664.....	50
4.5 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171665.....	50
4.6 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171666.....	51
4.7 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171667.....	51
4.8 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171668.....	52
4.9 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171669.....	52
4.10 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171671.....	53
4.11 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171688.....	53
4.12 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171689.....	54
4.13 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171690.....	54
4.14 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171664.....	55
4.15 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171665.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171666.....	56
4.17 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171667.....	57
4.18 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171668.....	57
4.19 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171669.....	58
4.20 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171671.....	58
4.21 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171688.....	59
4.22 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171689.....	59
4.23 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171690.....	60
4.24 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกและปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก.....	63
4.25 ส่วนผสมทางเคมีของสแลกบน Isothermal Solubility Diagram สำหรับเบสิกซิตี 1.5 ที่อุณหภูมิ 1,600 °C.....	64

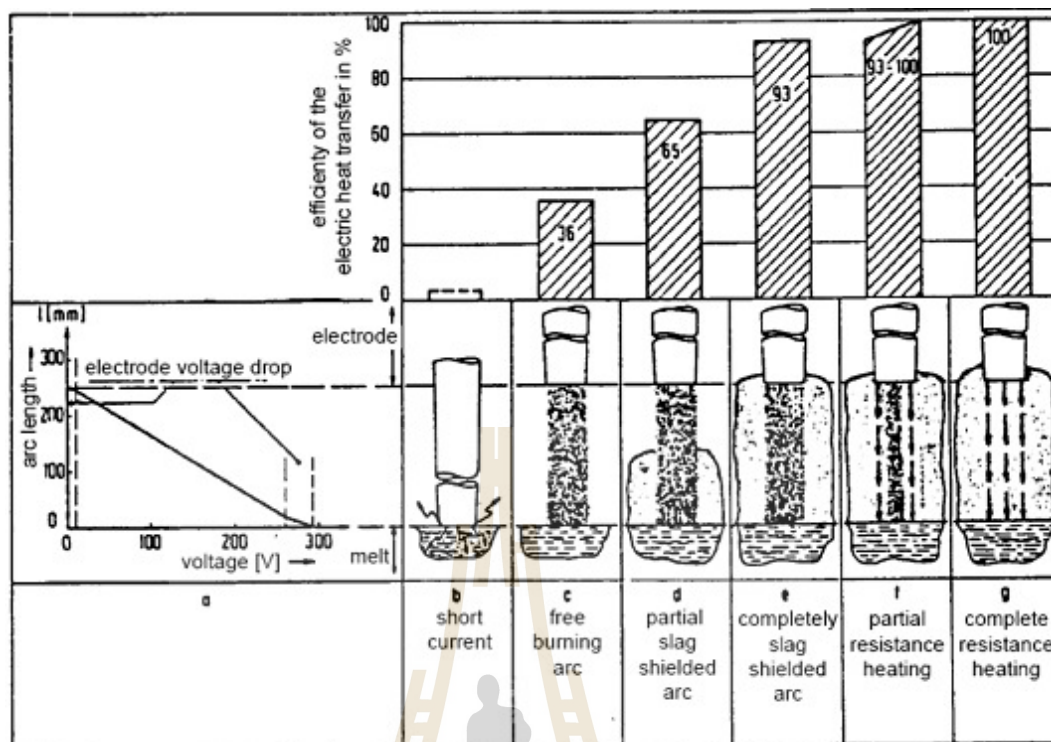
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค (electric arc furnace หรือ EAF) เป็นการผลิตเหล็กกล้าที่ใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก โดยเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนจากการอาร์คที่ปลายอิเล็กโทรดซึ่งทำมาจากกราไฟต์ ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คจะทำให้เหล็กกล้าและวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ในเตาหลอมละลาย หลังจากนั้นจึงทำน้ำเหล็กให้บริสุทธิ์ด้วยการทำฟองสแลกและเมื่อจบกระบวนการจึงเทน้ำเหล็กเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตเหล็กกล้าขึ้นปลาย และกระบวนการอื่นต่อไป การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คมีจุดเด่นในการที่สามารถควบคุมอุณหภูมิในการผลิตได้แม่นยำเพราะใช้ไฟฟ้าในการควบคุม อีกทั้งยังทำให้เหล็กกล้าที่ได้มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค อาจพิจารณาถึงการเพิ่มคุณภาพในขั้นตอนของกระบวนการต่าง ๆ เช่น การเลือกวัตถุดิบ การติดตั้งอุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยในการทำฟองสแลก ปัจจัยเหล่านี้จะสะท้อนถึงผลผลิตจากกระบวนการผลิตได้เช่นกัน

การศึกษานี้เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเหล็กกล้าโดยใช้เตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค โดยศึกษาในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่าฟองสแลกที่เกิดขึ้นในระหว่างการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คนั้นมีประโยชน์อยู่หลายอย่าง เช่น การดึงสิ่งเจือปนออกจากราน้ำเหล็ก การลดปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเหล็ก การลดความสึกหรอของอิฐทนไฟที่บุอยู่ที่ผนังเตาอันเนื่องมาจากความร้อน และการลดระดับของการเกิดฮาร์โมนิกทางไฟฟ้าในระบบของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค เป็นต้น โดยรูปที่ 1.1 แสดงสถานะความหนาของชั้นสแลกที่ปกคลุมลำอาร์ค ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากอิเล็กโทรดไปยังน้ำเหล็ก เห็นได้ว่า ยิ่งฟองสแลกที่ปกคลุมลำอาร์คมีความสมบูรณ์มากเท่าไร ประสิทธิภาพในการส่งความร้อนจากแท่งอิเล็กโทรดไปสู่ น้ำเหล็กจะยิ่งสูงขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสแลกและประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากล่ออาร์กตู้ไฟฟ้าเหล็ก (Ávila T.A. และคณะ, 2009)

จากประโยชน์ในข้างต้น หากเราสามารถบอกถึงสถานะของการเกิดชั้นฟองสแลกในระหว่างกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าได้ ก็จะยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตและสะท้อนถึงคุณภาพผลผลิตที่จะได้รับตามไปด้วย ซึ่งการตรวจสอบการเกิดฟองสแลกโดยทั่วไปในโรงงานจะอาศัยการประเมินระดับความหนาของฟองสแลกด้วยสายตาหรือการฟังเสียงการอาร์กของเตาจากผู้ปฏิบัติงาน คุณภาพและประสิทธิภาพโดยรวมของการควบคุมจึงขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความเอาใจใส่ของผู้ปฏิบัติงาน

การศึกษาวิจัยนี้สนใจที่จะนำเสนอวิธีการในการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกภายในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คด้วยการตรวจวัดสัญญาณแรงดัน และบอกถึงสถานะของฟองสแลกด้วยค่าดัชนีการเกิดฟองสแลก ซึ่งจะช่วยให้การตรวจจับฟองสแลกมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการในสถานประกอบการของภาคอุตสาหกรรม โดยผลการศึกษาคาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คในประเทศ เพื่อเป็นประโยชน์ในการลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและออกแบบการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกระหว่างการหลอมเหล็กในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค โดยใช้หลักการในการตรวจวัดสัญญาณแรงดันอาร์คในสถานะที่สแลกมีส่วนผสมทางเคมีต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อหาตัวชี้วัดที่เหมาะสมในการระบุสถานะของฟองสแลกระหว่างการหลอมเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค
- 1.3.2 ออกแบบ พัฒนาและติดตั้งเครื่องมือในสถานประกอบการ เพื่อศึกษาการเกิดฟองสแลก
- 1.3.3 ติดตามผลที่ได้จากเครื่องมือที่ติดตั้ง วิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องมือ รวมทั้งวิเคราะห์โดยกระบวนการทางโลหวิทยา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการหลอมเหล็ก จากการออกแบบและพัฒนา ระบบที่สามารถแสดงสถานะการเกิดของฟองสแลกภายในเตาหลอมได้
- 1.4.2 เป็นแนวทางในการกำหนดขั้นตอน เวลา และการวางแผนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คได้

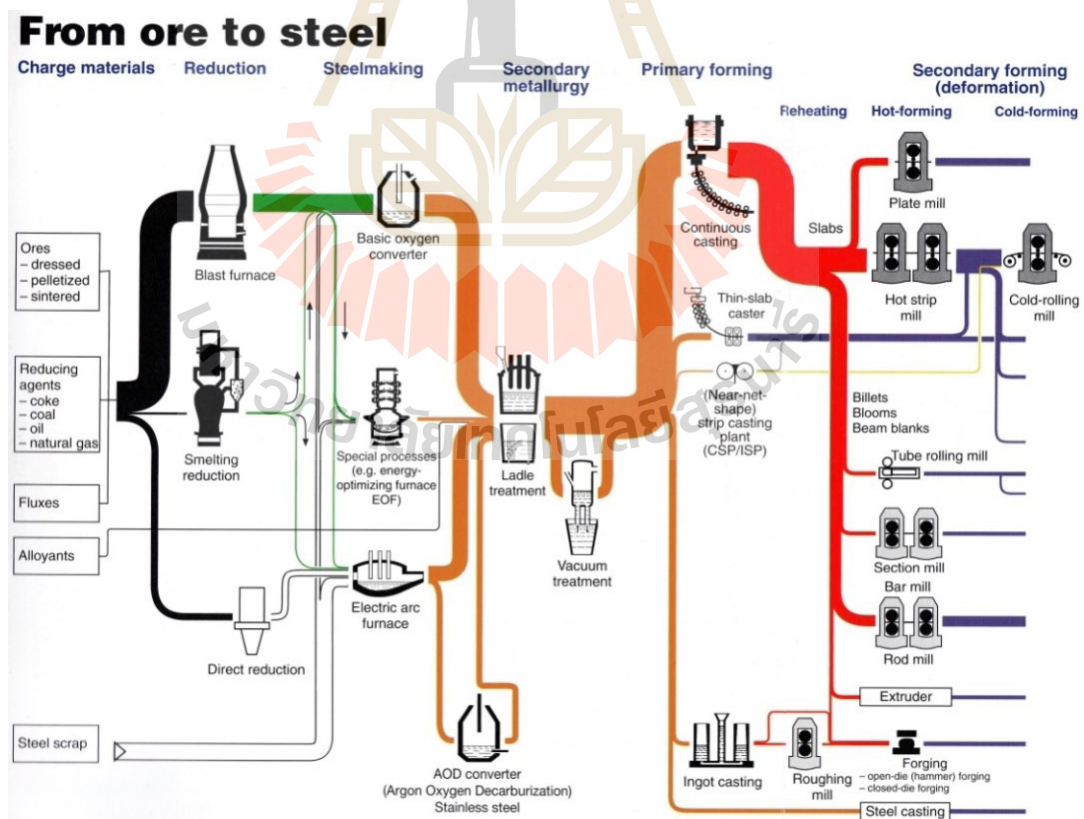
บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค โดยประกอบด้วยขั้นตอนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค ขั้นตอนในการทำพองสแลก ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของพองสแลก รวมถึงงานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 การผลิตเหล็กและเหล็กกล้า

โดยทั่วไปแบ่งการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก คือ การผลิตเหล็กขั้นต้น การผลิตเหล็กขั้นกลาง และการผลิตเหล็กขั้นปลาย (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2559) โดยได้แสดงแผนภาพรวมกระบวนการไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพรวมของการผลิตเหล็กและเหล็กกล้า (Steel Manual, 2008)

2.1.1 การผลิตเหล็กขั้นต้น

เป็นขั้นตอนที่นำสินแร่เหล็กมาถลุง เพื่อแยกธาตุเหล็กออกจากสินแร่ที่อยู่ในรูปเหล็กออกไซด์โดยใช้วัตถุรีดิวซ์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการถลุงแร่ เช่น ถ่านหิน ถ่านโค้ก และแก๊สธรรมชาติเป็นตัวลดออกซิเจนในแร่และเป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการถลุง จะใช้หินปูนในการฟอสเฟตเพื่อจับสิ่งสกปรกหรือสารมลทิน ผลผลิตที่ได้จะอยู่ในรูปของเหลวที่เรียกว่า น้ำเหล็กถลุง (molten iron) หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่า เหล็กพิก (pig iron) เหล็กพิกนั้นประกอบไปด้วยคาร์บอนประมาณ 4.5% และเจือด้วยสารมลทินต่าง ๆ ซึ่งทำให้เหล็กมีความเปราะ ไม่สามารถนำไปใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องมีการปรุงส่วนผสมต่าง ๆ ในขั้นตอนการผลิตเหล็กขั้นกลาง เพื่อให้ได้เหล็กที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมตามที่ต้องการ ในการผลิตเหล็กขั้นต้นนั้นต้องใช้การลงทุนสูง เพราะต้องใช้พลังงานในการถลุงเหล็กมาก ตลอดจนต้องมีระบบสาธารณูปโภคและระบบ

โครงสร้างพื้นฐานที่เอื้ออำนวยต่อการผลิต เช่น ท่าเรือน้ำลึก ระบบถนน เป็นต้น ปัจจุบันในประเทศไทยไม่มีกระบวนการผลิตเหล็กขั้นต้น นั่นคือ การผลิตผลิตภัณฑ์เหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทยจะเริ่มจากการผลิตเหล็กขั้นกลาง ได้แก่ การหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าโดยใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบส่วนใหญ่ และผสมด้วยเหล็กพิกเพื่อควบคุมให้ได้ส่วนผสมทางเคมีตามที่ต้องการ

2.1.2 การผลิตเหล็กขั้นกลาง

เป็นขั้นตอนของการปรุงน้ำเหล็กกล้าเพื่อปรับสมบัติต่าง ๆ เช่น ส่วนผสมทางเคมี อุณหภูมิและความสะอาดให้ได้ตามข้อกำหนดของเกรดเหล็กที่จะผลิต การผลิตเหล็กกล้า แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก คือการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาออกซิเจนหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าบีไอเอฟ เป็นการนำน้ำเหล็กหลอมเหลวมาหลอมร่วมกับเศษเหล็กเพื่อลดปริมาณคาร์บอนให้เหลือในระดับที่เป็นส่วนผสมของเหล็กกล้า โดยการพ่นออกซิเจนเข้าไปในน้ำเหล็กที่บรรจุอยู่ในเตา และอีกวิธีหนึ่งคือการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า โดยเศษเหล็กที่ถูกหมุนเวียนมาใช้ใหม่จะถูกหลอมและเปลี่ยนไปเป็นน้ำเหล็กหลอมเหลวโดยการอาร์คไฟฟ้ากำลังสูง เหล็กกล้าหลอมเหลวที่ได้จะถูกนำไปปรุงน้ำเหล็กขั้นที่ 2 (secondary metallurgy) เพื่อปรับสภาพน้ำเหล็กใหม่ ส่วนผสมทางเคมีให้เป็นไปตามข้อกำหนดตามแต่ละชนิดของเหล็กกล้าที่ต้องการผลิต มีขั้นตอนที่สำคัญ เช่น การลดซัลเฟอร์ การลดสารฟอสฟอรัส การลดแก๊ส เป็นต้น น้ำเหล็กที่ผลิตได้จะนำไปเปลี่ยนสภาพให้เป็นแท่งเหล็กกล้าโดยการหล่อต่อเนื่อง ซึ่งจะได้เป็นผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าสำเร็จรูป มีอยู่ด้วยกัน 4 ประเภท คือ เหล็กแท่งเล็ก (billet) เหล็กแท่งแบน (slab) เหล็กแท่งใหญ่ (bloom) หรือเหล็กรูปภัณฑ์ (section) ต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม หากนำน้ำเหล็กไปหล่อในแบบหล่อที่อยู่กับที่ ก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า อินกอต (ingot) โดยในการหล่อแบบนี้มีการใช้ในการผลิตน้อย

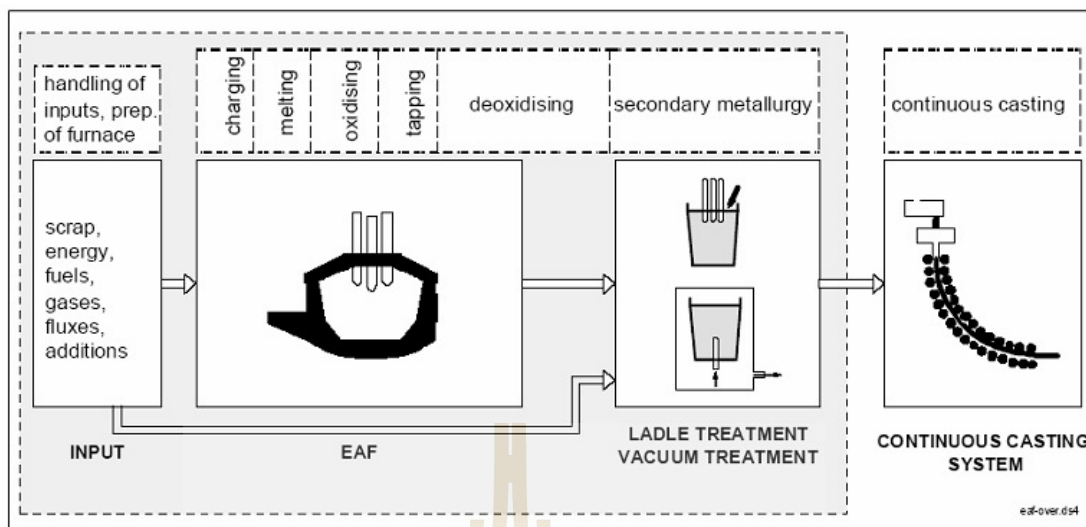
2.1.3 การผลิตเหล็กขึ้นปลาย

เป็นการนำผลิตภัณฑ์เหล็กกล้าที่สำเร็จรูปไปผ่านกระบวนการแปรรูป ซึ่งมีหลายกระบวนการ ทั้งการขึ้นรูปร้อน (hot forming) การขึ้นรูปเย็น (cold forming) การทุบขึ้นรูปร้อน (hot forging) การทุบขึ้นรูปเย็น (cold forging) การกลึงไสตัดเจาะ (machining) การเคลือบผิว (coating) การเชื่อม (welding) การผลิตท่อเหล็ก รวมถึงการหล่อเหล็ก โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ (1) เหล็กทรงยาว ได้แก่ เหล็กเส้น เหล็กหลอดและเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน (2) เหล็กทรงแบน ได้แก่ เหล็กแผ่นรีดร้อน เหล็กแผ่นรีดเย็น และเหล็กขึ้นรูปเย็น เป็นต้น

2.2 การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค

2.2.1 หลักการของการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้า

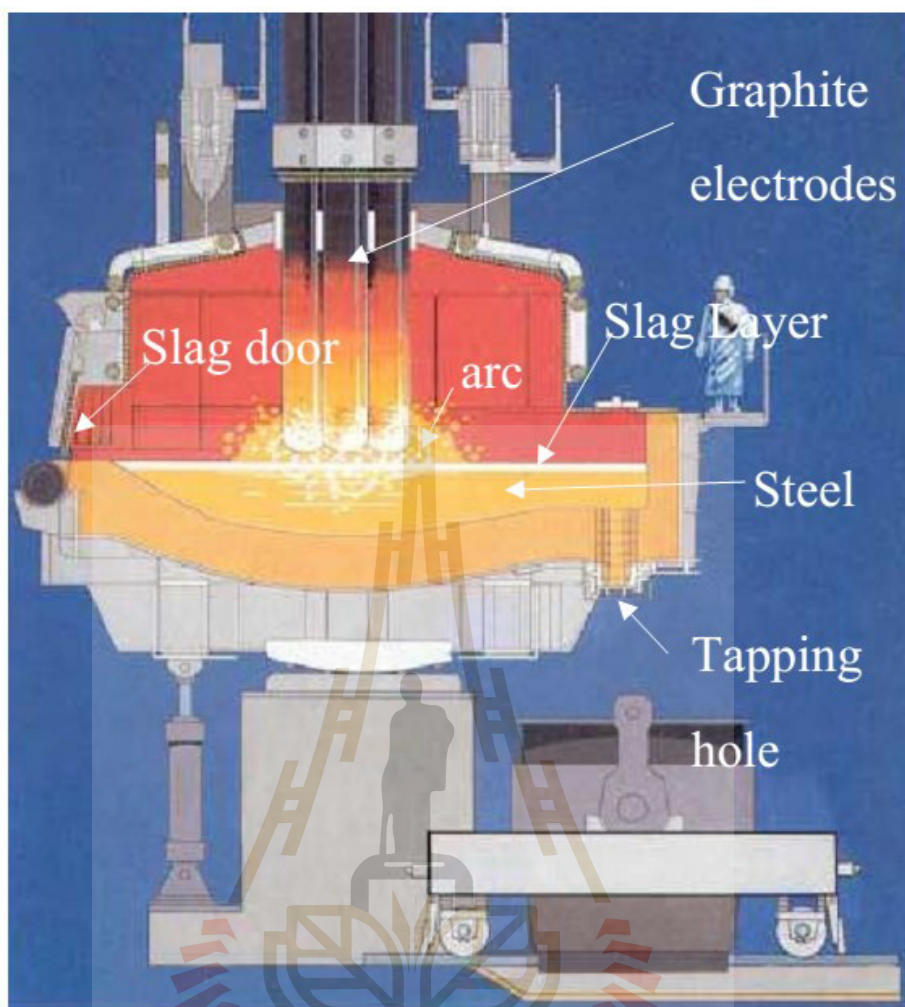
ในประเทศไทยการผลิตเหล็กจะใช้เทคนิคการผลิตที่มีลักษณะเป็นการรีไซเคิล คือ จะเป็นการนำเศษเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาหลอมปรับส่วนผสมนำกลับมาใช้ใหม่ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คจะทำหน้าที่ในการหลอมเศษเหล็กให้กลายเป็นของเหลว จะทำหน้าที่ในการหลอมเศษเหล็กให้กลายเป็นของเหลวและกำจัดสิ่งสกปรกออก จากนั้นจึงนำน้ำเหล็กไปปรับส่วนผสมในถังปรุงน้ำเหล็ก (ladle) เพื่อให้ส่วนผสมทาง เคมีสอดคล้องกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแล้วจึงนำน้ำเหล็กไปหล่อให้แข็งตัวด้วยการหล่อแบบต่อเนื่อง (continuous casting) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปที่มีลักษณะเป็นแผ่นหนา (slab) หรือลักษณะเป็นท่อน (billet) สุดท้ายผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จรูปจะถูกนำไปรีดร้อนและ/หรือรีดเย็นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่มีลักษณะเป็นเหล็กแผ่นหรือเหล็กเส้นเพื่อนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค (The Making, Shaping and Treating of Steel, Steelmaking and Refining Volume, 1998)

การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คนั้น พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนโดยการอาร์คที่ปลายอิเล็กโทรดซึ่งทำมาจากกราไฟต์ ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คจะทำให้เหล็กกล้าและวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ในเตาหลอมละลาย ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าจะระบุเป็นหน่วยกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันน้ำเหล็ก โดยปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จะขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการหลอมเหล็ก โดยเฉพาะเหล็กจะถูกป้อนลงสู่เตาและผ่านกระบวนการหลอมดังที่กล่าวมาข้างต้น จนกระทั่งน้ำเหล็กในเตามีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการ จึงเข้าสู่ขั้นตอนกำจัดสิ่งเจือปนออกจากน้ำเหล็ก โดยมีตัวอย่างภาพประกอบเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คดังแสดงในรูปที่

2.3



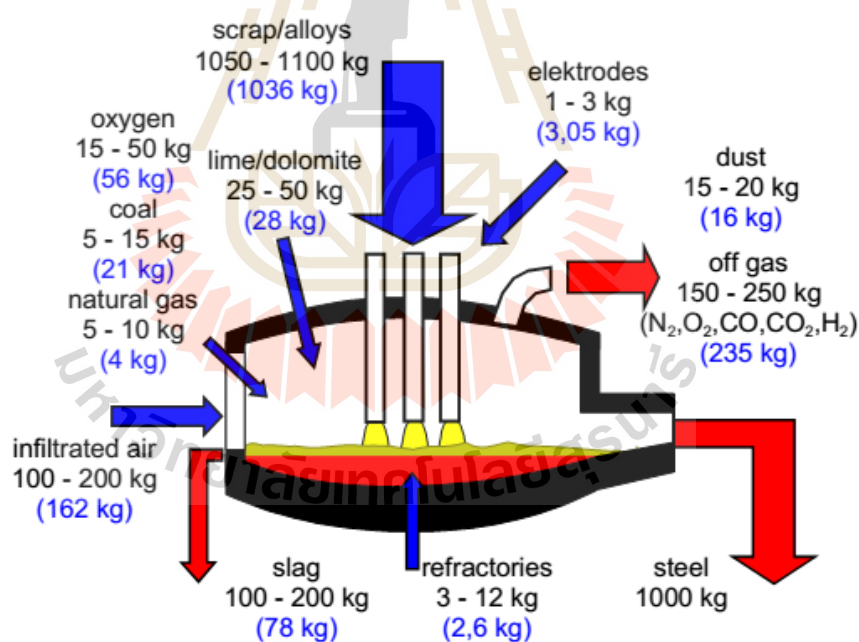
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์ของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก (Electric Arc Furnace หรือ EAF)
(Steel Manual, 2008)

ขั้นตอนการกำจัดสิ่งเจือปนออกจากน้ำเหล็กมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกสิ่งสกปรกที่ปะปนกับเศษเหล็กออกจากน้ำเหล็ก และปรับปรุงปริมาณธาตุต่าง ๆ ในน้ำเหล็กให้มีความเหมาะสม ขั้นตอนนี้ทำหลังจากที่เศษเหล็กหลอมละลายเป็นน้ำเหล็กทั้งหมด โดยฟลักคาร์บอนและแก๊สออกซิเจนผ่านท่อพุ่งลงไปในน้ำเหล็ก แก๊สออกซิเจนที่ถูกพุ่งลงไปในนั้นทำปฏิกิริยากับธาตุอะลูมิเนียม ซิลิคอน และแมงกานีส เกิดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิคอนไดออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ลอยตัวขึ้นมาและรวมตัวกันเป็นชั้นของเหลวปกคลุมผิวหน้าที่เรียกว่า สแลก หลังจากนั้นน้ำเหล็กมีส่วนผสมตามที่ต้องการแล้ว เตาหลอมไฟฟ้าจะถูกเอียงมาด้านหน้าประมาณ 15-20 องศา เพื่อรินสแลกออกทางประตูด้านหน้าของเตาที่

เรียกว่า ประตูละลอก โดยจะรินสแลกออกให้เหลือปริมาณเล็กน้อยที่เพียงพอต่อการปกคลุมผิวหน้าของน้ำเหล็กเพื่อป้องกันผิวน้ำเหล็กสัมผัสกับอากาศ จากนั้นทำการอาร์กไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องเพื่อให้อุณหภูมิน้ำเหล็กมีความเหมาะสมที่ประมาณ $1,600^{\circ}\text{C}$ ก่อนเทน้ำเหล็กออกจากเตาลงในบารับน้ำเหล็กเพื่อไปสู่กระบวนการถัดไป

2.2.2 สมดุลวัตถุดิบและสมดุลพลังงาน

ในการเตรียมวัตถุดิบที่จะใช้ในแต่ละเตา หากต้องการเหล็กกล้าที่ 1,000 กิโลกรัม จะมีสัดส่วนวัตถุดิบดังรายละเอียดในรูปที่ 2.4 โดยประกอบไปด้วยเศษเหล็กเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเหล็กกล้า ฟลักซ์และสารเติมแต่งเพื่อทำการสร้างสแลก รวมถึงการทำสแลกให้เป็นฟอง และส่วนประกอบอื่น ๆ คือ แก่งอเล็กโทรด์ ผงนึ่งเตา เป็นต้น รวมถึงแก๊สที่ได้จากปฏิกิริยาภายในเตา มีแก๊สออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น และมีสมดุลพลังงานดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.4 สมดุลวัตถุดิบของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก (H. Pfeifer และคณะ, 2002)

ตารางที่ 2.1 สมดุลพลังงานของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค (EAF Fundamental, 2010)

		เตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค แบบเก่า (%)	เตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค แบบใหม่ (%)
อินพุท	พลังงานไฟฟ้า	82	65
	เบิร์นเนอร์	0	5
	ปฏิกิริยาทางเคมี	18	30
เอาต์พุท	เหล็กกล้า	57	57
	สแลก	11	10
	น้ำหล่อเย็น	6	10
	แก๊ส	7	20
	อื่น ๆ	16	3

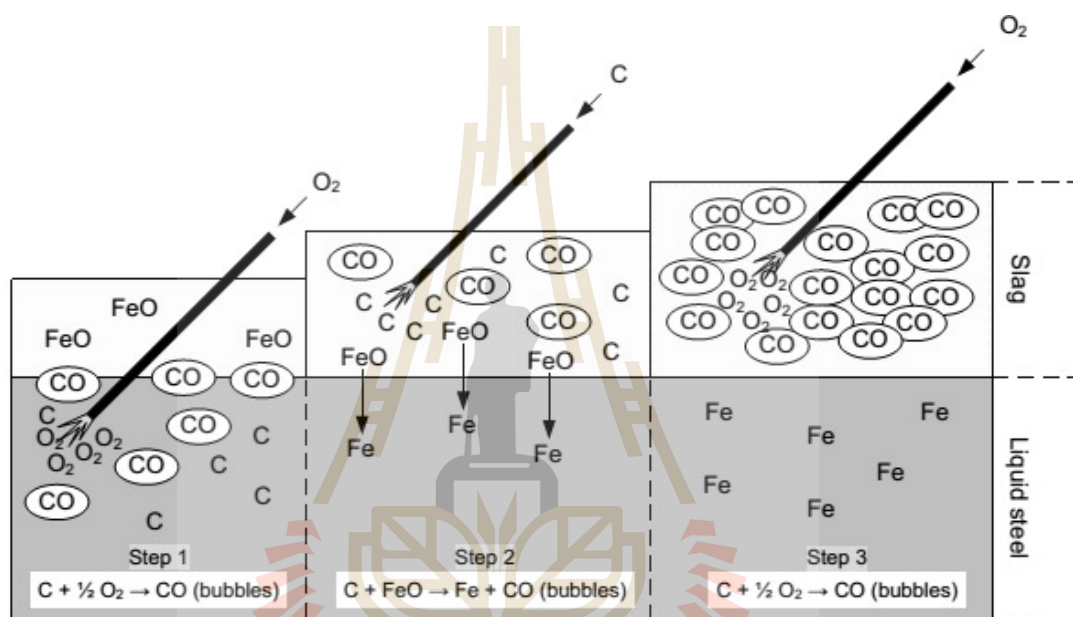
2.3 การเกิดฟองสแลกในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค

ฟองสแลกจัดเป็นสิ่งตกค้างจากกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตาม ฟองสแลกมีบทบาทสำคัญในการดึงสิ่งเจือปนออกจากน้ำเหล็ก อีกทั้งยังช่วยในการลดการสูญเสียพลังงาน เพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจากอิเล็กโทรดไปยังน้ำเหล็ก และปกป้องเหล็กจากการออกซิเดชันซ้ำ (reoxidation) ส่วนผสมทางเคมีของสแลกโดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย CaO - MgO - SiO_2 - FeO - Al_2O_3 โดยสารประกอบออกไซด์เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อฟองสแลกในด้านต่าง ๆ เช่น ความหนืด การนำความร้อน ความหนาแน่น และคุณสมบัติอื่น ๆ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนออกจากโลหะหลอมเหลว โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดฟองสแลกสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ การเกิดปฏิกิริยาเคมี และการคงตัวของสแลก

2.3.1 ปฏิกิริยาทางเคมีของการเกิดฟองสแลก

ปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กกระจายไปทั่วเนื้อน้ำเหล็ก เมื่อมีการพ่นแก๊สต่าง ๆ (ออกซิเจน อาร์กอน และอื่น ๆ) เข้าไปในเนื้อน้ำเหล็กจะทำให้ฟองแก๊สมีขนาดใหญ่ขึ้น

ฟองสแลกเกิดขึ้นได้โดยการพ่นออกซิเจน และคาร์บอน ลงไปในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค ดังรูปที่ 2.5 โดยจะเกิด FeO ขึ้นในน้ำเหล็กหลอมเหลว ดังแสดงในสมการที่ (2.1) ทั้งนี้ FeO มีความสำคัญต่อการเกิดฟองสแลก โดยจะต้องให้มีปริมาณมากกว่า 20% โดยมวล



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค

(A.P. Luz และคณะ, 2011)

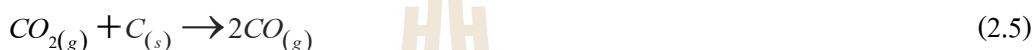
จากนั้นจะมีการพ่นคาร์บอนเข้าไปในน้ำเหล็ก โดยจะเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ (2.2) คาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดขึ้นของฟองสแลกในน้ำเหล็ก



แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนและออกซิเจน ด้วย ดังสมการที่ (2.3)



แก๊สในปฏิกิริยาที่ (2.2) จะเกิดขึ้นในชั้นของสแลกที่ลอยอยู่เหนือน้ำเหล็ก แต่กรณีปฏิกิริยาที่ (2.1) และ (2.3) จะเกิดขึ้นในน้ำเหล็ก อย่างไรก็ตามได้มีการศึกษาและพบว่าผิวสัมผัสระหว่างน้ำเหล็กและสแลกจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังปฏิกิริยาเคมีที่ (2.4) และ (2.5)



การเกิดฟองสแลกจะขึ้นอยู่กับลักษณะการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (2.2) ถึง (2.5) ซึ่งจะเห็นว่าขึ้นกับปริมาณ FeO ที่เกิดขึ้น และยังขึ้นอยู่กับออกซิเจนและคาร์บอนที่ทำการพ่นเข้าไปในเตาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีอีกด้วย

นอกจากนี้การเกิดฟองสแลกยังขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของสแลกเอง เช่น ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ วัสดุที่ใช้ในการก่อตัวของสแลก เป็นต้น

2.3.2 การคงตัวของฟองสแลก

การคงตัวของฟองสแลก ค่าความหนืดเป็นค่าที่มีความสำคัญต่อดัชนีการเกิดฟองสแลก โดยการทำให้อัตราความหนืดอยู่ในค่าที่เหมาะสมนั้น นิยมใช้ค่าเบสิกซิตี ดังสมการที่ (2.6)

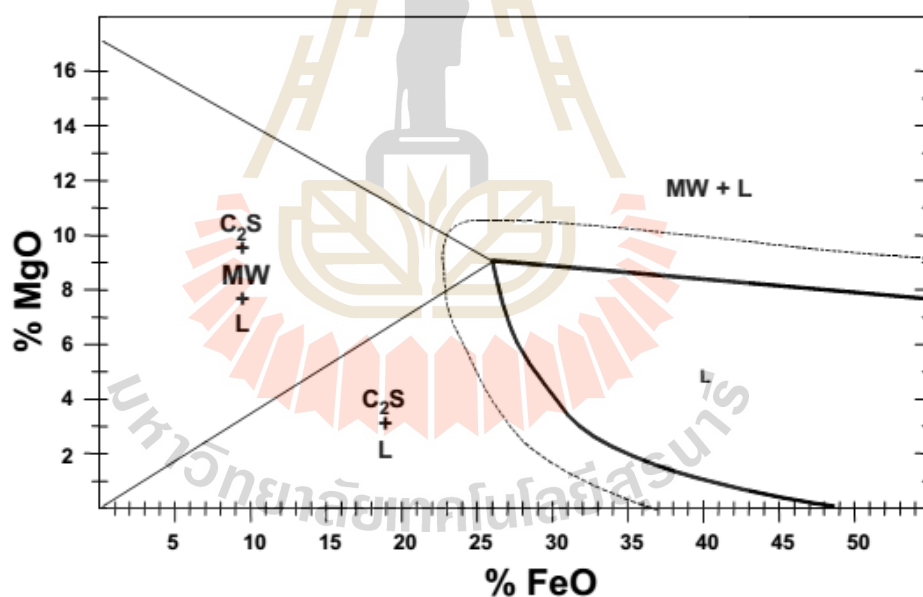
$$B_3 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (2.6)$$

ผลกระทบของสารต่าง ๆ ที่มีต่อค่าเบสิกซิตีและสมบัติของสแลก ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 โดยรีแฟกทอรีออกไซด์ (refractory oxides) ประกอบด้วย CaO และ MgO ฟลักซ์ออกไซด์ (fluxing oxide) ประกอบด้วย SiO₂, Al₂O₃, CaF₂ และ FeO

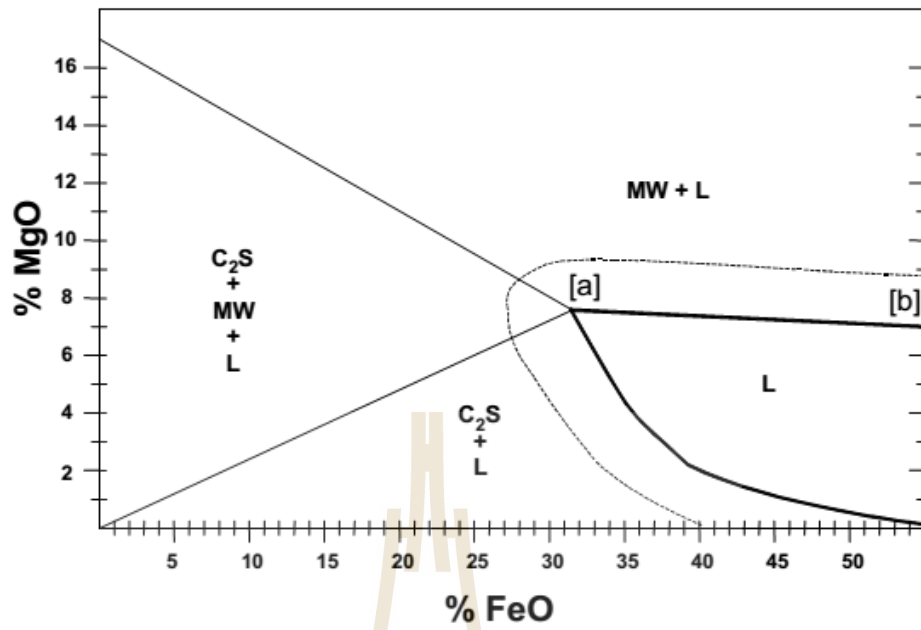
ตารางที่ 2.2 อิทธิพลของออกไซด์ต่อสมดุลสแลก (Eugene P. และคณะ, 1998)

เปรียบเทียบตัวแปร	ผลกระทบ
Refractory Oxides = Fluxing Oxide	สแลกมีความสมดุล
Refractory Oxides >> Fluxing Oxide	สแลกแข็งมากเกินไป
Refractory Oxides << Fluxing Oxide	สแลกเหลวมากเกินไป

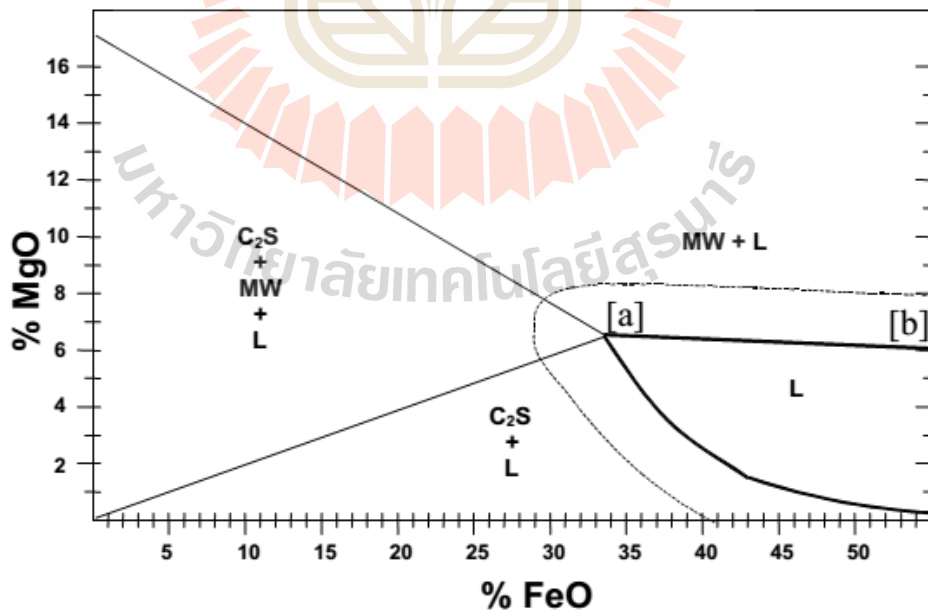
จากตารางที่ 2.2 หากกำหนดให้ปริมาณของออกไซด์ที่เป็นฟลักซ์ออกไซด์ (fluxing oxide) อยู่ในสภาวะที่สมดุลกับรีแฟคทอรีออกไซด์ (refractory oxide) จะทำให้สภาพของสแลกเป็นคริมที่เหมาะสมจะแสดงได้ในรูปที่ 2.6-2.8 หากเรามี CaO และ MgO มากเกินไปจะทำให้สแลกมีความแข็งแรงมากหรือทำให้สแลกมีความหนืดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากเรามี CaO และ MgO น้อยเกินไปสแลกจะมีลักษณะเหลวหรือทำให้สแลกมีความหนืดน้อย



รูปที่ 2.6 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ของสแลกที่มีค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.0 (Eugene P. และคณะ, 1998)



รูปที่ 2.7 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ของสแลกที่มีค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.5 (Eugene P. และคณะ, 1998)



รูปที่ 2.8 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ของสแลกที่มีค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 3.0 (Eugene P. และคณะ, 1998)

ลักษณะที่สำคัญของ ISD คือ

- 1) การหดตัวของพื้นที่ของเหลว (liquid) เมื่อค่าเบสิกซิตีของสแลกสูงขึ้น
- 2) ปริมาณ FeO ในระดับที่สูงขึ้นตามมาเพื่อจะให้ถึงเส้นลิกวิดัส (liquidus boundary)

ที่ต้องการ

- 3) การลดลงของ MgO เมื่อค่าเบสิกซิตีของสแลกสูงขึ้น
- 4) ผลกระทบที่ลดลงของ FeO ต่อเส้นการอิมตัวของ MgO เมื่อค่าเบสิกซิตีของสแลก

สูงขึ้น

- 5) ผลกระทบของปริมาณ MgO ต่อเส้นการอิมตัวของ CaO

ทั้งนี้ในการปฏิบัติงานจริงสามารถปรับส่วนผสมของสแลกให้มีค่าเบสิกซิตี และ ปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยการเติมปูนขาวและโดโลไมต์ ส่วนปริมาณของเหล็กออกไซด์ สามารถควบคุมโดยอัตราการพ่นคาร์บอนและออกซิเจน ดังนี้

เพิ่มปริมาณของเหล็กออกไซด์โดยการพ่นออกซิเจน



ลดปริมาณของเหล็กออกไซด์โดยการพ่นคาร์บอน

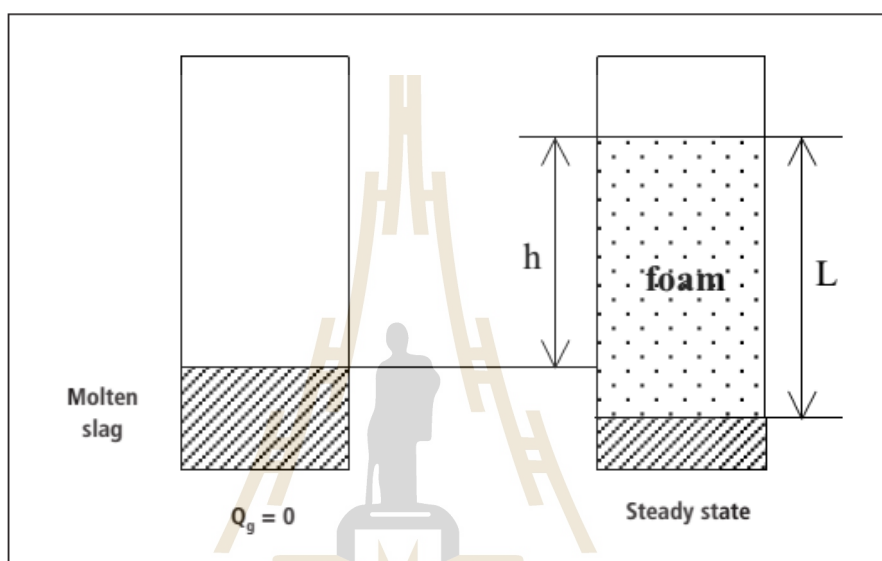


2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการทำฟองสแลก

สมบัติในการกักเก็บของฟองสแลกขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของสแลกและสมบัติทางกายภาพของสแลก ซึ่งจะใช้ดัชนีการเกิดฟองสแลกมาพิจารณา โดยที่ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกเป็นค่าซึ่งหมายถึงระยะเวลาที่ฟองแก๊สใช้ในการลอยผ่านชั้นสแลก หากสแลกใดมีค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกสูง ระยะเวลาที่ฟองแก๊สลอยผ่านชั้นสแลกนั้นจะนาน หรือกล่าวได้ว่าสแลกมีความสามารถในการคงสภาพอยู่มาก ระยะเวลาดังกล่าวแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.9) และในรูปที่ 2.9

$$\Sigma = \frac{\Delta h}{\Delta V_g^s} = \frac{\Delta h}{\Delta(Q_g / A)} \quad (2.9)$$

เมื่อ	Σ	คือ ระยะเวลาที่ฟองแก๊สลอยผ่านชั้นสแลก
	Δh	คือ ความหนาของสแลกที่เปลี่ยนแปลง
	ΔV_g^s	คือ ความเร็วแก๊ส
	Q_g	คือ อัตราการพ่นแก๊ส
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของผิวสแลก



รูปที่ 2.9 แบบจำลองการวัดของดัชนีการเกิดฟองสแลก (Ito K. และคณะ, 1989)

แม้ว่าการตรวจสอบต่าง ๆ จะอาศัยการวิเคราะห์ค่า Σ แต่การใช้พารามิเตอร์นี้ยังคงเป็นที่ถกเถียงกันว่าเป็นปรากฏการณ์การเกิดฟองที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ไม่ได้พิจารณาเพียงแต่ในสมการที่ (2.9) มีรายงานว่าดัชนีนี้อธิบายการเกิดฟองได้ไม่ถูกต้องนัก (ในลักษณะเชิงปริมาณ) เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าระหว่างน้ำเหล็กและชั้นของสแลก อีกประการหนึ่งที่สำคัญคือความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง L และ V_g เกิดขึ้นในอุณหภูมิที่สูง (มากกว่า $1,500^\circ\text{C}$)

งานวิจัยต่าง ๆ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่า Σ โดยพิจารณาถึงตัวแปรทางด้านกายภาพของสแลก เช่น ความหนาแน่น ความหนืด แรงตึงผิว และขนาดฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในของเหลวอื่น ๆ

K. Ito และคณะ (1989) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของค่า Σ และความหนืด รวมถึงตัวแปรอื่น ๆ พบว่าสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2.10)

$$\Sigma = 5.7 \times 10^2 \frac{\mu}{\sqrt{\gamma \rho}} \quad (2.10)$$

เมื่อ	μ	คือ ความหนืด
	γ	คือ แรงตึงผิว
	ρ	คือ ความหนาแน่นของของเหลว
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊ส

จากสมการที่แสดง พบว่าความหนืดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญที่สุดในการหาค่า Σ

Jiang และคณะ (1991) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่า Σ และ ρ นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสแลกดังแสดงในสมการที่ (2.11) และ (2.12)

$$\Sigma = 115 \frac{\mu}{\sqrt{\gamma \rho}} \quad (\text{สำหรับสแลกที่เป็นเบส}) \quad (2.11)$$

$$\Sigma = 0.93 \frac{\mu}{\gamma \rho^{2/3}} \quad (\text{สำหรับสแลกที่เป็นกรด}) \quad (2.12)$$

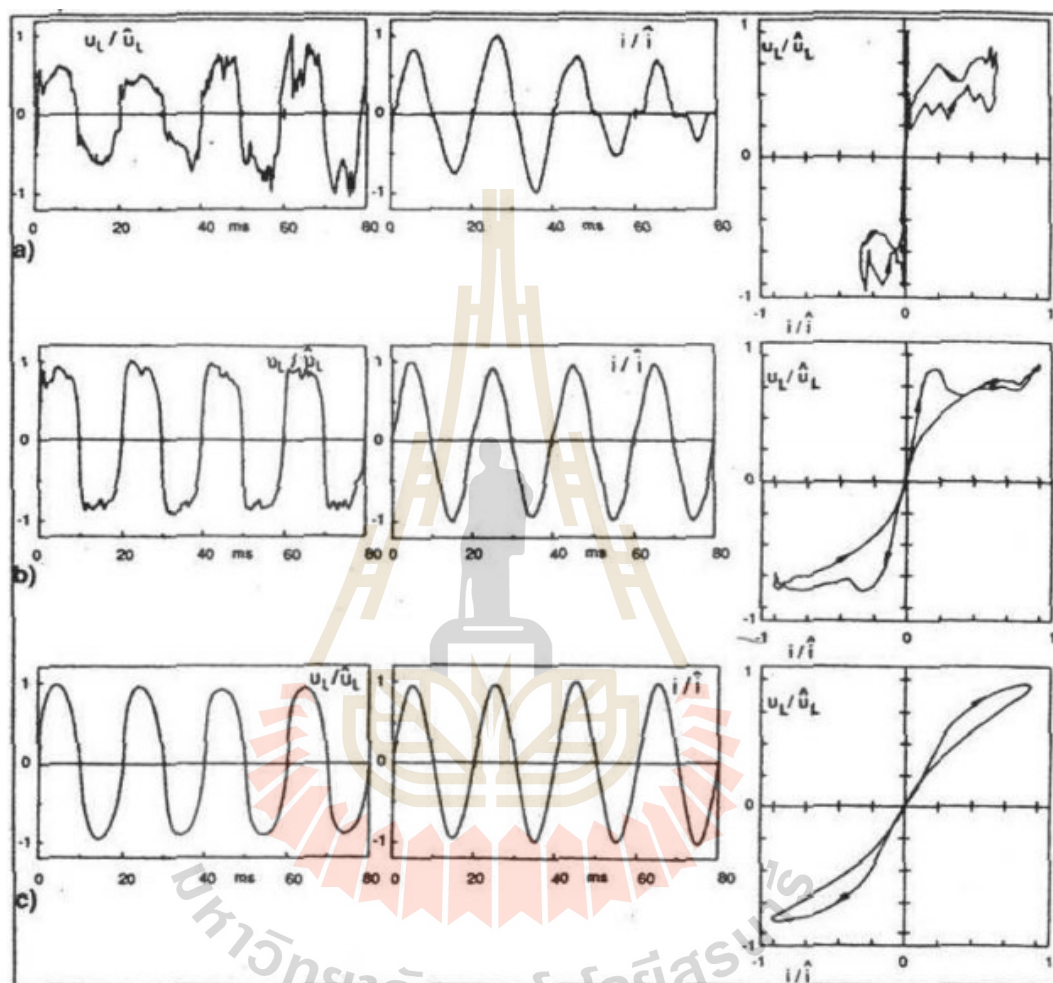
Zhang และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาโดยพิจารณาถึงขนาดฟองแก๊สที่มีผลต่อค่า Σ โดยมีความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ (2.13) และ (2.14)

$$\Sigma = 115 \frac{\mu^{1.2}}{\gamma^{0.2} \rho^{0.9} D_b} \quad (\text{สำหรับสแลกที่เป็นเบส}) \quad (2.13)$$

$$\Sigma = 10.3 \times 10^4 \frac{\gamma^{12}}{\mu^{0.4} \rho^{11.7} D_b^{23}} \quad (\text{สำหรับสแลกที่เป็นกรด}) \quad (2.14)$$

2.5 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจวัดฟองสแลก

จากการทดลองเพื่อศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน-กระแสอาร์ก ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของการหลอม จะได้กราฟดังรูปที่ 10



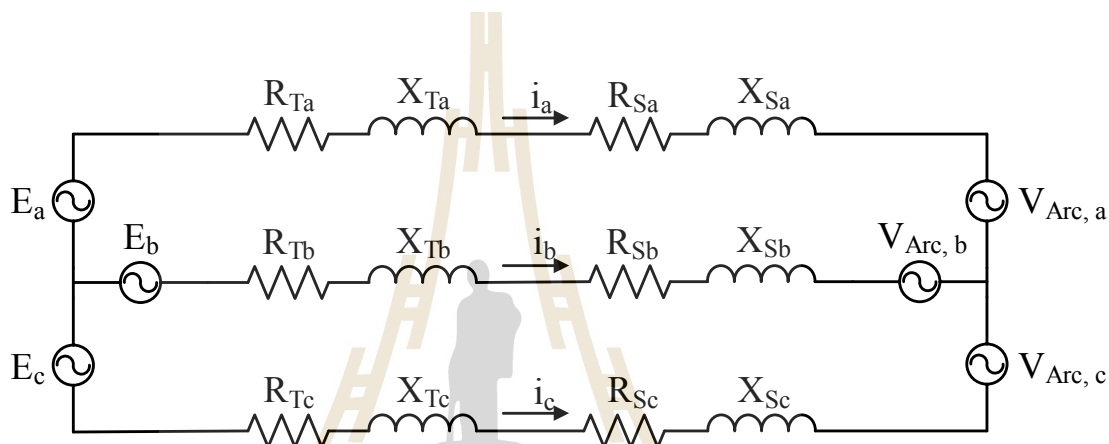
รูปที่ 2.10 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน-กระแสอาร์กในช่วงเวลาต่าง ๆ

(Carlos J. และคณะ, 2004)

จากรูปที่ 2.10(ก) ในช่วงเริ่มต้นของการหลอม เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของอาร์กบนเศษเหล็กที่เย็น กราฟแรงดัน-กระแสอาร์ก จึงแสดงถึงความไม่เสถียร ทำให้เกิดฮาร์มอนิกทั้งในแรงดันและกระแสอาร์กอย่างมาก กราฟจึงมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์มาก รูปที่ 2.10(ข) แสดงกราฟ 7 นาทีหลังจากเริ่มทำการหลอม เศษเหล็กเริ่มเกิดการหลอมเหลวการเคลื่อนที่ของอาร์กจึงเสถียรมากขึ้นตามลำดับ กราฟแรงดัน-กระแสอาร์ก มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ฮาร์มอนิก

ในแรงดันและกระแสอาร์กมีค่าลดลง กราฟมีลักษณะเข้าใกล้สัญญาณไซน์มากขึ้น รูปที่ 2.10(ค) แสดงกราฟ 27 นาทีหลังจากทำการลอม การเคลื่อนที่ของอาร์กมีความเสถียร กราฟแรงดัน-กระแสอาร์ก มีความเสถียรฮาร์มอนิกในแรงดันและกระแสอาร์กมีค่าลดลงมาก กราฟมีลักษณะเป็นสัญญาณ ไซน์

จะเห็นได้ว่า ณ เวลาต่าง ๆ แรงดันและกระแสอาร์กมีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งสามารถสะท้อนพฤติกรรมของการอาร์กได้ ยิ่งมีความเสถียรมากขึ้น ก็จะทำให้ฮาร์มอนิกลดลง โดยสามารถเขียนวงจรสมมูลของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์กได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก

เมื่อ	E_n	คือ แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม
	$R_{Tn} + jX_{Tn}$	คือ อิมพีแดนซ์หม้อแปลงเตาหลอม
	$R_{Sn} + jX_{Sn}$	คือ อิมพีแดนซ์อุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม
	$V_{Arc,n}$	คือ แรงดันอาร์ก
	i_n	คือ กระแสเฟส
	n	คือ a, b, c

ในการสร้างให้เกิดการอาร์กนั้น โหลดที่ได้จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นกระแสในระบบจึงมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นจากความไม่เสถียรนั้น โดยกระแสจะไหลผ่านทั้งอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเตาหลอม และอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิของอุปกรณ์ เกิดเป็นแรงดันตกคร่อมในลักษณะที่มีฮาร์มอนิกร่วมอยู่ด้วย ดังนั้นแรงดันที่ได้จึงมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณ ไซน์

พารามิเตอร์ที่นำมาใช้แสดงสภาวะฟองสแตกภายในเตาหลอม คือค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิก และสัญญาณรบกวนรวมของแรงดันอาร์ค โดยกำหนดเป็นดัชนีการเกิดฟองสแตกสำหรับแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแตกดังสมการที่ (2.15) ดัชนีการเกิดฟองสแตกดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยยิ่งฟองสแตกหนายิ่งมีค่ามาก ในทางตรงกันข้ามหากฟองสแตกบางค่าดัชนีการเกิดฟองสแตกก็จะน้อยลงเช่นกัน

$$\text{slag foaming index} = 1 - (THD + N)_{\text{arc voltage}} \quad (2.15)$$

ค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกและสัญญาณรบกวนรวม (total harmonic distortion plus noise, THD+N) คือค่ารากที่สองของอัตราส่วนระหว่างผลบวกกำลังสอง (root sum square, RSS) ของรากกำลังสองเฉลี่ย (root mean square, RMS) ของส่วนประกอบฮาร์โมนิกทั้งหมด (total harmonic component) และส่วนประกอบสัญญาณรบกวน (noise component) กับค่ากำลังสองของรากกำลังสองเฉลี่ยของส่วนประกอบความถี่หลักมูล (fundamental component) ดังสมการ (2.16)

$$(THD + N)_{\text{voltage}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 + V_{\text{noise}}^2}{V_1^2}} \quad (2.16)$$

เมื่อ	V_1	คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันที่ความถี่หลักมูล
	V_n	คือ ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่ n
	V_{noise}	คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณรบกวน
	n	คือ ลำดับฮาร์โมนิก

จากสมการที่ (2.15) ในการประเมินสภาวะของฟองสแตกนั้น หากค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิก และสัญญาณรบกวนรวมมีค่ามาก จะทำให้ดัชนีการเกิดฟองสแตกมีค่าน้อยลง ซึ่งแสดงว่าความหนาของฟองสแตกที่ปกคลุมน้ำเหล็กนั้นบาง (อาจหมายถึงไม่เกิดฟองสแตกได้เช่นกัน) หากค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกและสัญญาณรบกวนรวมมีค่าน้อย จะทำให้ดัชนีการเกิดฟองสแตกมีค่ามากขึ้น ซึ่งแสดงว่าความหนาของฟองสแตกที่ปกคลุมน้ำเหล็กนั้นหนา (บอกถึงสัญญาณในการเกิดฟองสแตก)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการตรวจวัดฟองสแตกที่เกิดขึ้นในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์กนั้นมีด้วยกันหลายแบบ โดยจะกล่าวถึงพอสังเขปดังนี้

Sergey V. Komarov และคณะ (2000) ได้ศึกษาผลกระทบของคลื่นเสียงต่อการยับยั้งฟองสแตก โดยได้ทำการศึกษากับสแตกที่มีสมบัติทางกายภาพแตกต่างกัน และได้ทำการปล่อยคลื่นที่มีความถี่คลื่นในช่วงต่าง ๆ ให้ตกกระทบกับฟองสแตกที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าคลื่นเสียงที่มีช่วงความถี่ต่ำกว่า 1,000 Hz จะทำให้อัตราการเกิดฟองสแตกโดยเฉลี่ยมีค่าลดลง แม้ว่าสแตกจะมีสมบัติทางกายภาพต่างกัน

วิธีการตรวจวัดฟองสแตกที่เกิดขึ้นภายในเตาที่ใช้สัญญาณอื่น (Carlos J. และคณะ, 2004 และ Malmberg D. และคณะ, 2007) เป็นวิธีการแปลค่าจากการตรวจวัดสัญญาณในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งสภาวะแวดล้อมบริเวณเตาหลอม เช่น อุณหภูมิที่สูง แรงสั่นสะเทือนจากสิ่งอื่น ๆ หรือฝุ่นละออง อาจส่งผลกระทบต่อตรวจวัดได้ นอกจากนี้ที่กล่าวมานี้ ยังมีการตรวจวัดสถานะของสแตกโดยการแปลค่าจากแรงดันอาร์กที่จ่ายให้แก่เตาหลอม (ปวีณ, 1998) พบว่าสามารถบอกถึงสภาพของฟองสแตกว่ามีการปกคลุมค่าอาร์กหรือไม่ปกคลุมได้

การตรวจวัดฟองสแตกโดยใช้สัญญาณทางไฟฟ้ามีความน่าสนใจมาก (ปวีณ, 1998) เนื่องจากความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์ และมีความน่าเชื่อถือ แต่ยังต้องทำการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอื่น ๆ ในเชิงโลหการ เช่น การเปลี่ยนชนิดวัสดุดิบ, เกรดเหล็กที่ผลิต, หรือตัวแปรที่สำคัญอื่น ๆ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การต่อยอดการออกแบบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่สามารถวัดการเกิดฟองสแตกได้ในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์กในสภาวะการหลอมที่แตกต่างกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการออกแบบระบบตรวจจับฟองสแลกโดยใช้สัญญาณแรงดันในการวิเคราะห์ ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในการดำเนินการวิจัยโดยแบ่งเป็นหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

- 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์
- 3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย
- 3.3 การแปรผลสัญญาณดิจิทัลเพื่ออธิบายการเกิดฟองสแลก
- 3.4 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสแลก

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

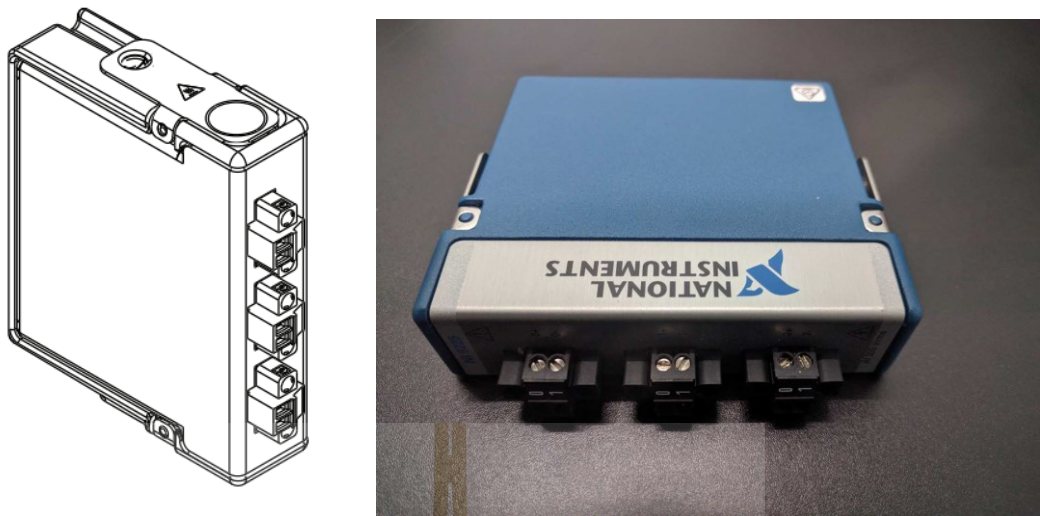
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย จะแบ่งได้เป็น 3 ส่วนประกอบกันคือ อุปกรณ์ดึงสัญญาณแรงดัน อุปกรณ์ปรับวัดและส่งสัญญาณ อุปกรณ์การประมวลผลและแสดงสัญญาณ โดยรายละเอียดอุปกรณ์มีดังนี้

3.1.1 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการตรวจวัดการเกิดฟองสแลก

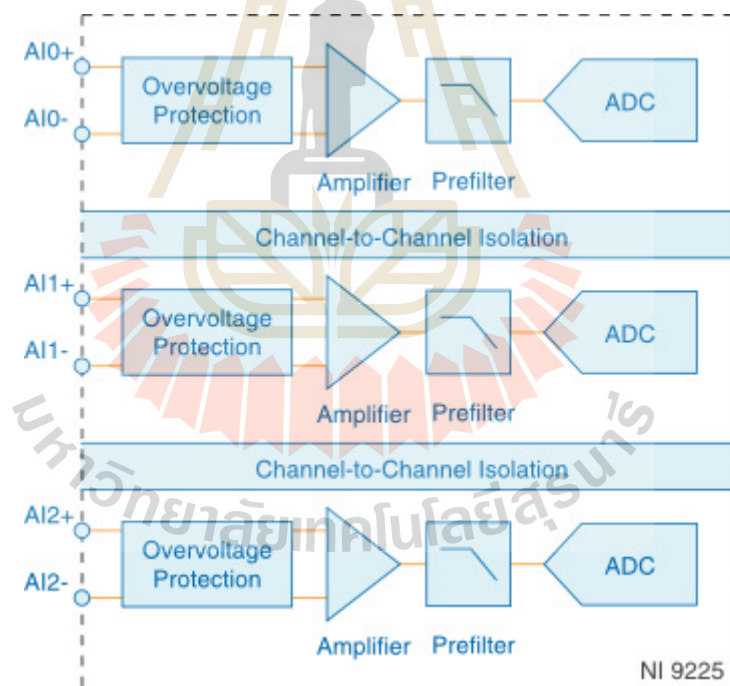
ก) อุปกรณ์ดึงสัญญาณแรงดัน

อุปกรณ์ในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดันอาร์คเป็นสัญญาณอินพุท โดยเลือกใช้ อุปกรณ์ NI 9225 ซึ่งจะทำงานร่วมกับ cDAQ-9174 ในการดึงสัญญาณแรงดัน และปรับวัดสัญญาณตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดนี้มาจากบริษัท National Instruments

NI 9225 จะทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณแรงดันอาร์คทั้ง 3 เฟสที่ต่อเข้ากับอุปกรณ์แรงดันที่รับเข้ามาเป็นแรงดันกระแสสลับ โดยรับแรงดันสูงสุดได้ไม่เกิน 300 โวลต์อาร์เอ็มเอส หรือแรงดันขาเข้ากระแสสูงสุด ± 300 โวลต์ และมีฟังก์ชันตัวกรองในตัวอุปกรณ์ด้วย



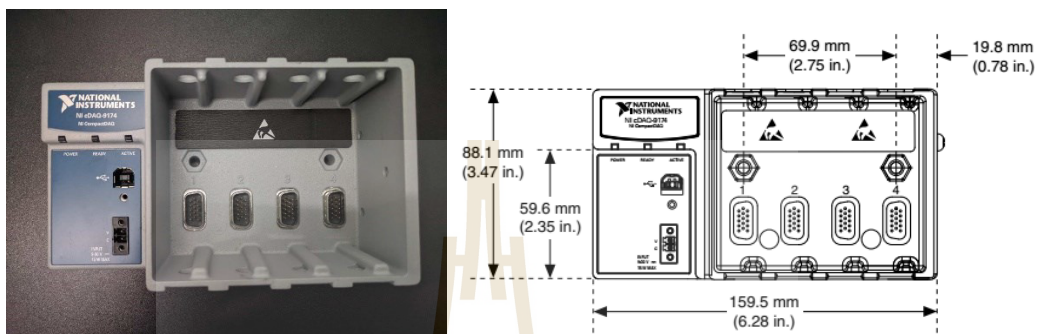
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ดึงสัญญาณแรงดัน NI 9225



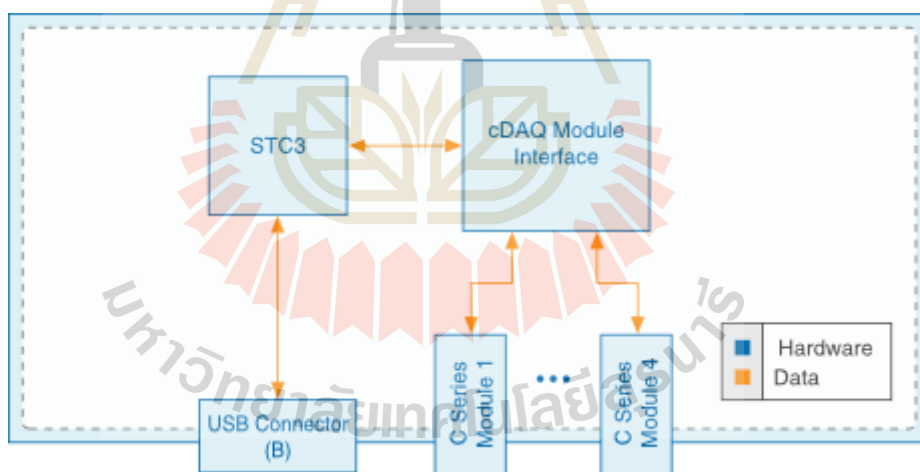
รูปที่ 3.2 แผนภาพบล็อกการทำงานของ NI 9225

ข) อุปกรณ์ปรับวัดและส่งสัญญาณ

จากที่กล่าวในข้างต้น ส่วนของการปรับวัดและส่งสัญญาณจะใช้อุปกรณ์ cDAQ-9174 สามารถรองรับมอดูลได้ 4 มอดูล ทำหน้าที่รับสัญญาณจากอินพุต และส่งเข้าไปสู่การประมวลผลของคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ปรับวัดและส่งสัญญาณ cDAQ-9174

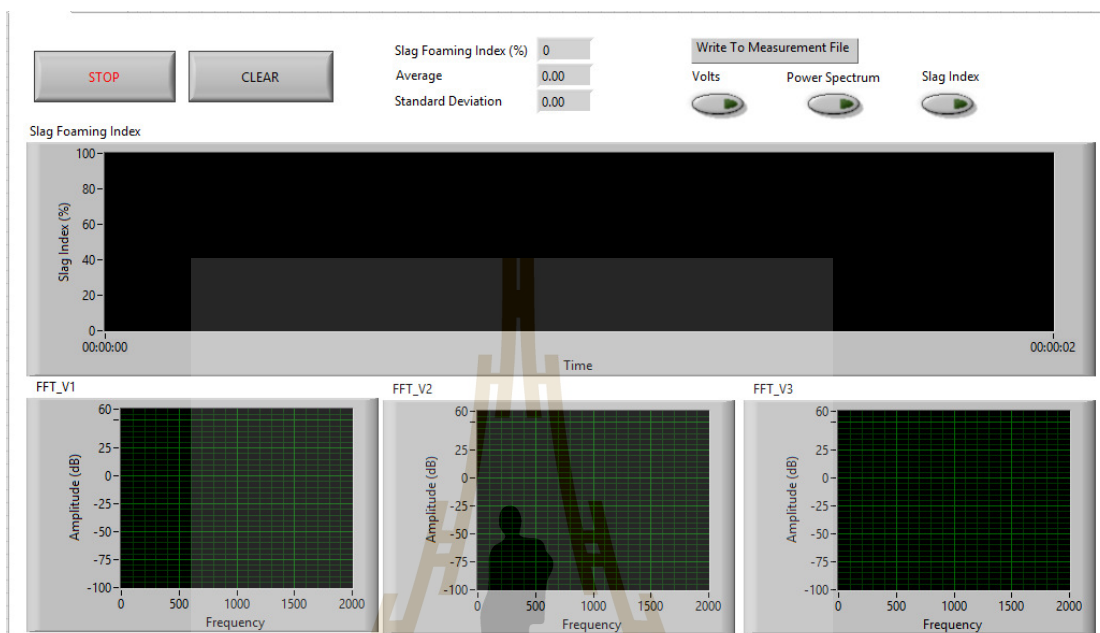


รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกการทำงานของ cDAQ-9174

ค) อุปกรณ์การประมวลผลและแสดงสัญญาณ

ในส่วนของการประมวลผล และติดต่อผู้ใช้งานเพื่อแสดงข้อมูลต่าง ๆ อุปกรณ์การประมวลผลและแสดงสัญญาณคือ เป็นคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป โดยติดตั้งระบบปฏิบัติการวินโดวส์ แพลด ใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานและประมวลผลข้อมูลดิจิทัล โดย

แสดงข้อมูลต่าง ๆ ของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก ได้แก่ สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันอาร์ค คณิตการณ์การเกิดฟองสแลก รวมถึงปุ่มควบคุมอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 หน้าจอในส่วนของการแสดงผลของระบบตรวจวัดการเกิดฟองสแลก

3.1.2 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี

ก) เครื่องบด

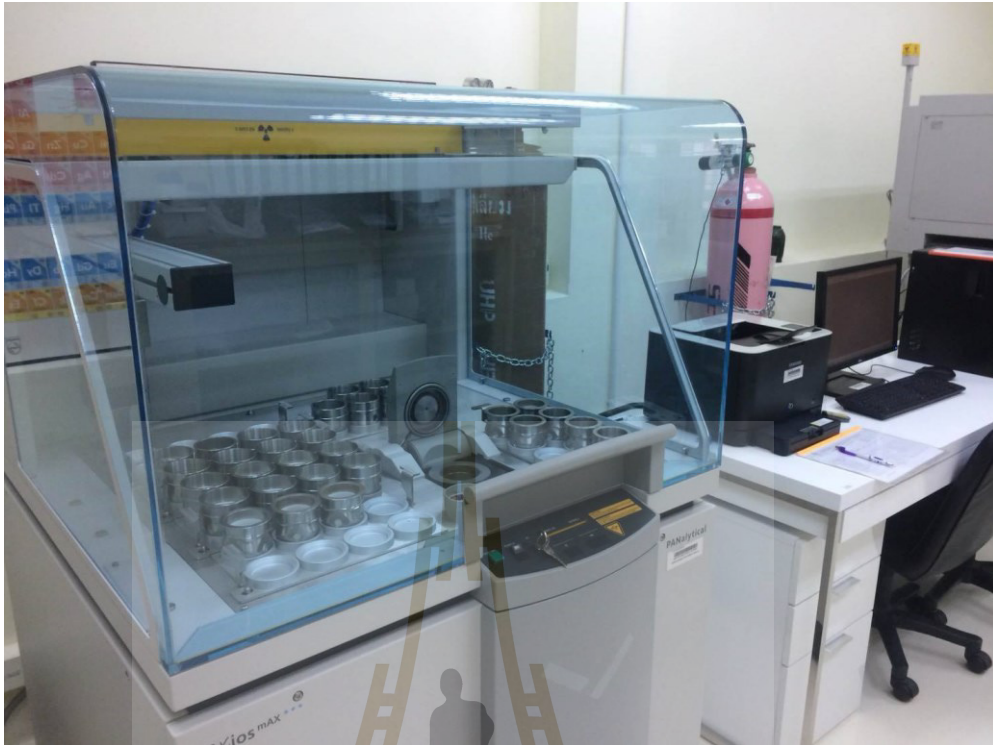
เครื่องบดถูกใช้เพื่อบดสแลกที่ได้จากการเก็บตัวอย่างของสแลกจากสถานประกอบการ โดยทำการบดเพื่อให้เป็นผงเพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์สารเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)



รูปที่ 3.6 เครื่องบดละเอียดแบบบอลมิล (ball mill)

ข) X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

ในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสแลกที่ได้จากการเก็บตัวอย่างจากโรงงาน จะใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้แพร่หลายในการวิเคราะห์ธาตุทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ไม่ว่าจะเป็นงานด้านสิ่งแวดล้อม ด้านธรณีวิทยา เช่น การวิเคราะห์แร่ดินและหินโดยไม่ทำลายตัวอย่าง มีการเตรียมตัวอย่างเพียงเล็กน้อย และให้ผลการวิเคราะห์ที่รวดเร็ว ด้านชีววิทยา ด้านการแพทย์ และด้านอุตสาหกรรม โดยทั่วไปแล้ว เครื่อง X-Ray Spectrometer จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดรังสี (X-Ray Tube) และเครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์จะเกิดขึ้นเมื่อแหล่งกำเนิดรังสีเร่งอิเล็กตรอนให้มีศักย์สูงพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะแล้วให้รังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มสูงออกมา ทั้งนี้การเลือกชนิดของเป้าขึ้นกับตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ ทั้งสแตนโรเดียม โมลิบดีนัมหรือโครเมียม ส่วนไอโซโทปกัมมันตรังสีที่นิยมใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ได้แก่ Fe-55, Co-57, Cd-109 และ Am-241 เครื่องตรวจวัดแบบสถานะของแข็งเหมาะสำหรับการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ที่ปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวอย่าง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็น Si(Li) และ HPGe ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิในโตรเจนเหลว



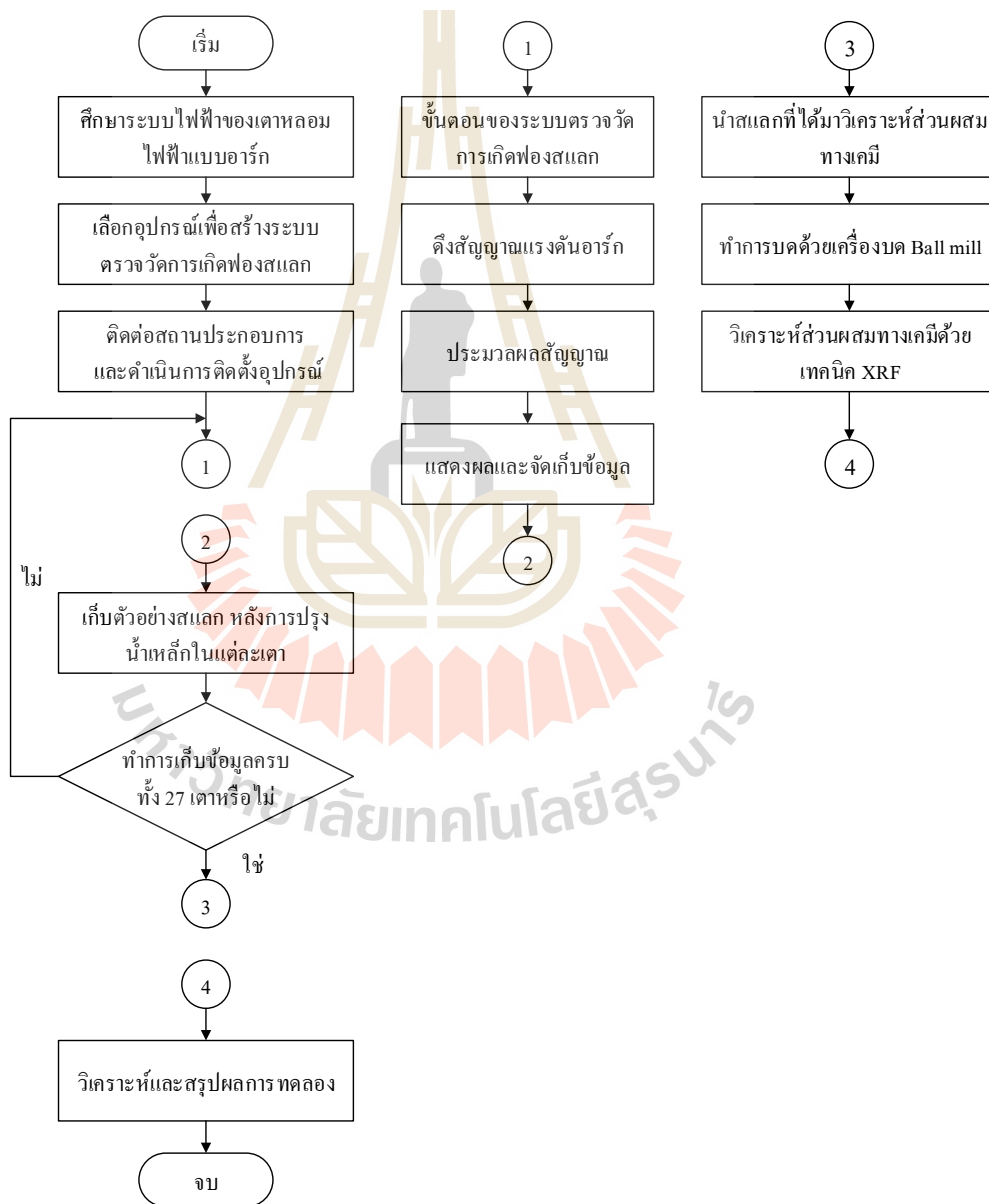
รูปที่ 3.7 เครื่องมือ X-Ray Fluorescence Spectrometer (PANalytical AXIOS^{mAX}
XRF Spectrometer)



3.2 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

3.2.1 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย จะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ เพื่อเก็บข้อมูลในโรงงานจริง กับส่วนวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสแลก ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในวิธีดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยจะอธิบายโดยใช้ผังงานการทำวิจัยทั้งหมด ดังรูปที่ 3.8 โดยอธิบายอย่างละเอียดในขั้นตอนต่าง ๆ ของการวิจัย ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษา

จากรูปที่ 3.8 สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังนี้

1. ศึกษาถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าของระบบเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าแบบอาร์ค เพื่อกำหนดแนวทางในการเลือกใช้เครื่องมือเพื่อนำมาใช้ในการตรวจวัดการเกิดฟองสแลก จากนั้นติดต่อสถานประกอบการรวมถึงทดลองทำการติดตั้งเครื่องมือ

2. ทำการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกโดยใช้สัญญาณแรงดัน ซึ่งประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือการดึงสัญญาณแรงดัน การแปลงสัญญาณและประมวลผล การแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล

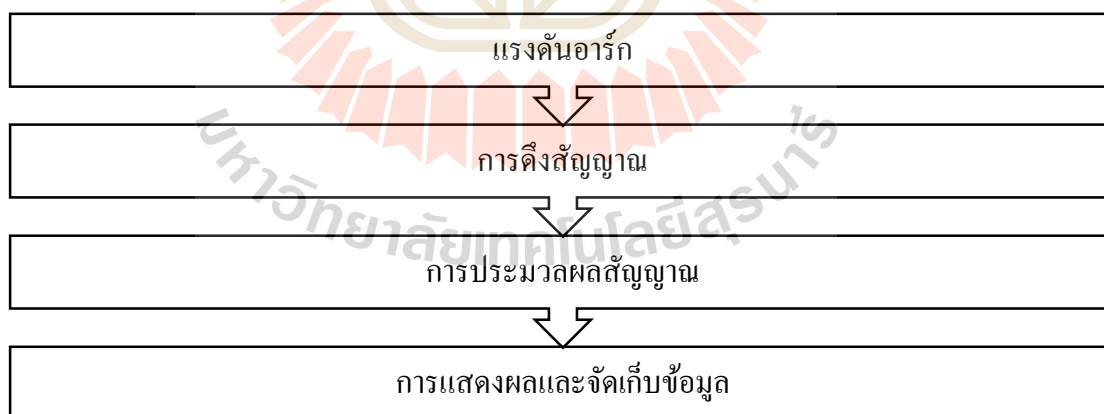
3. ดำเนินการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 27 เตาหลอม ซึ่งในช่วงเวลาหลังการทำน้ำเหล็กให้บริสุทธิ์เสร็จสิ้น จะทำการเก็บตัวอย่างสแลกในแต่ละเตาโดยได้เก็บตัวอย่างสแลกเป็นจำนวนทั้งสิ้น 22 ตัวอย่าง

4. นำตัวอย่างสแลกไปตรวจวิเคราะห์หาส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer

5. ทำการวิเคราะห์ผล และสรุปผลการทดลอง เป็นอันเสร็จสิ้นขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.2 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์

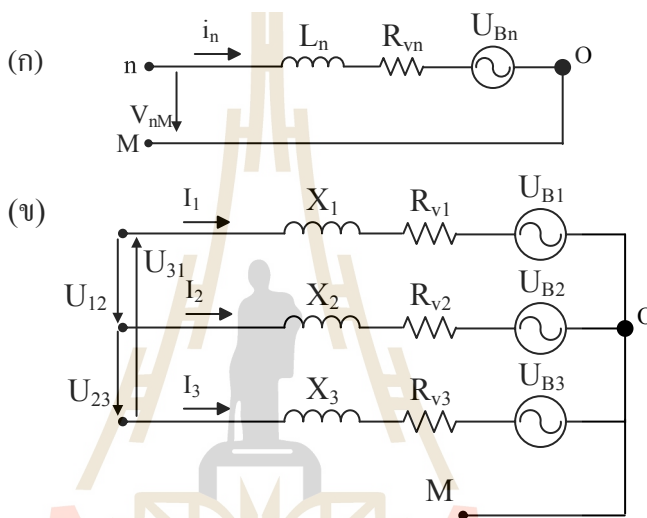
ในกระบวนการดำเนินการวิจัย กระบวนการในการดึงสัญญาณออกมานั้นประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 3.9 โดยรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้



รูปที่ 3.9 แผนภาพของระบบตรวจจับฟองสแลก

3.2.2.1 แรงดันอาร์ก

ในรูปที่ 3.10 เนื่องจากแรงดันอาร์ก U_{Bn} เป็นแรงดันระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับน้ำเหล็กซึ่งมีแรงดันฮาร์โมนิกปนอยู่และกระแส i_n ที่ไหลประกอบด้วยกระแสฮาร์โมนิกเนื่องจากอาร์กไฟฟ้าเป็นโหนดไม่เชิงเส้นดังนั้นแรงดันเฟสด้านทุติยภูมิ V_{1M} , V_{2M} และ V_{3M} จึงประกอบด้วยแรงดันที่ความถี่หลักมูลและแรงดันฮาร์โมนิกที่สะท้อนเสถียรภาพของอาร์กไฟฟ้าได้เช่นกัน

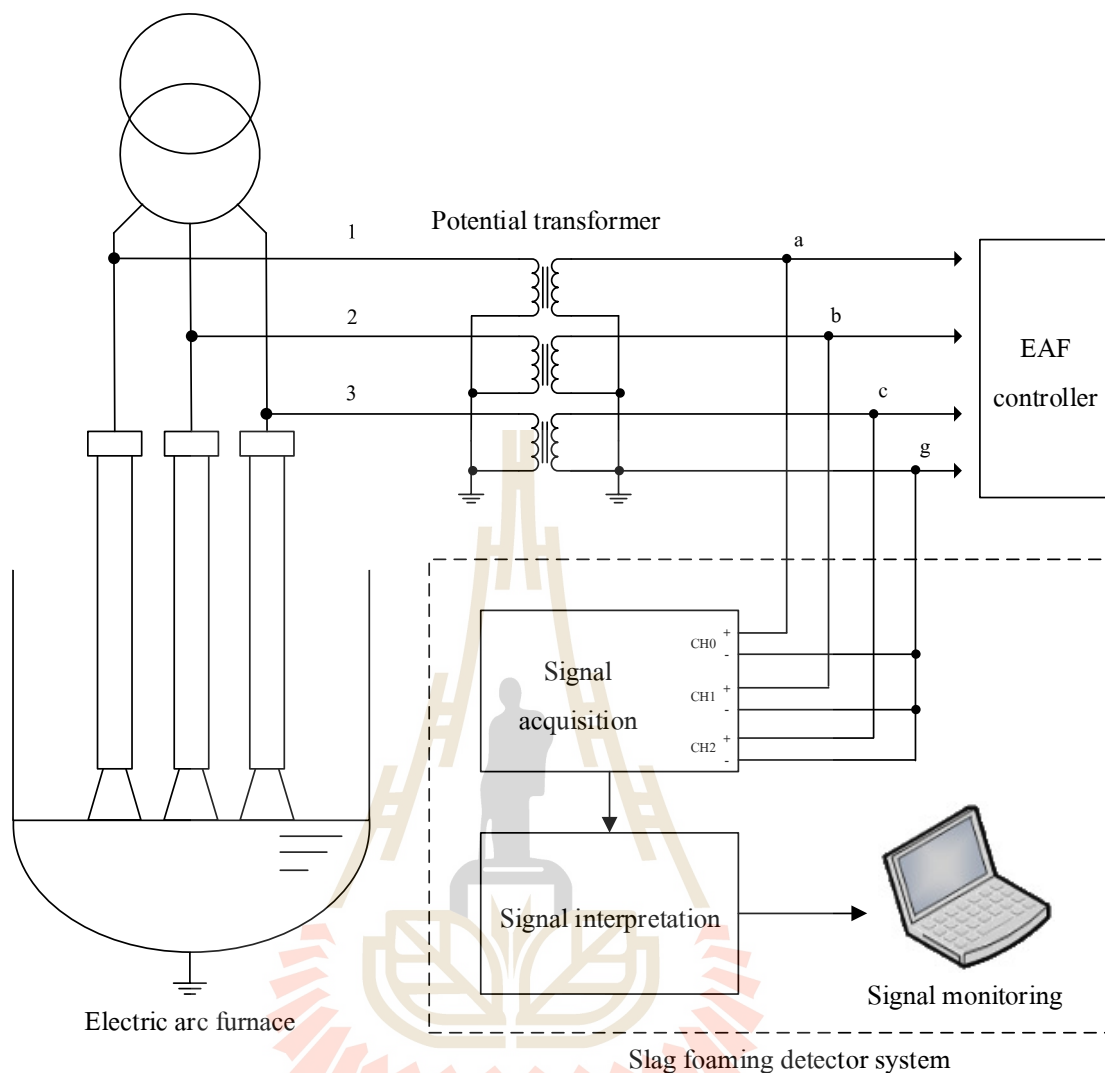


(ก) วงจรอาร์กแยกแต่ละเฟส, (ข) วงจรอาร์ก 3 เฟส

รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ก

3.2.2.2 การดึงสัญญาณ

ระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์กไฟฟ้า เริ่มจากแนวคิดที่ว่าแรงดันอาร์กของเตาหลอมสามารถแสดงสถานะของฟองสแลกภายในเตาได้เนื่องจากฟองสแลกที่ปกคลุมถ่ออาร์กส่งผลต่อเสถียรภาพของอาร์กไฟฟ้า หลักการทำงานคือนำสัญญาณแรงดันเฟสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอมทั้งสามเฟสดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงความถี่ และคำนวณค่าพารามิเตอร์เป็นดัชนีการเกิดฟองสแลก เพื่อนำไปแสดงสถานะของฟองสแลกในเตาหลอม



รูปที่ 3.11 แผนภาพตำแหน่งในการติดตั้งอุปกรณ์และการดึงสัญญาณ

3.2.2.3 การประมวลผลสัญญาณ

ในการสร้างให้เกิดการอาร์กนั้น โหลดที่ได้จะมีลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นกระแสในระบบจึงมีฮาร์มอนิกเกิดขึ้นจากความไม่เสถียรนั้น โดยกระแสจะไหลผ่านทั้งอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเตาหลอม และอิมพีแดนซ์ทางด้านทุติยภูมิของอุปกรณ์ เกิดเป็นแรงดันตกคร่อมในลักษณะที่มีฮาร์มอนิกรวมอยู่ด้วย ดังนั้นแรงดันที่ได้จึงมีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณไซน์ พารามิเตอร์ที่นำมาใช้แสดงสภาวะฟองสแลกภายในเตาหลอม คือค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกและสัญญาณรบกวนรวมของแรงดันอาร์ก โดยกำหนดเป็นดัชนีการเกิดฟองสแลกสำหรับแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแลก ดัชนีการเกิดฟองสแลกดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ดังนั้นในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าดัชนีการเกิดฟองสแลก สัญญาณแรงดันที่ดึงมาจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสเปกตรัมเชิงความถี่เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกและสัญญาณรบกวนรวมของแรงดันอาร์ก (total harmonic distortion plus noise, THD+N) ดังสมการที่ (3.1)

$$(THD+N)_{\text{voltage}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 + V_{\text{noise}}^2}{V_1^2}} \quad (3.1)$$

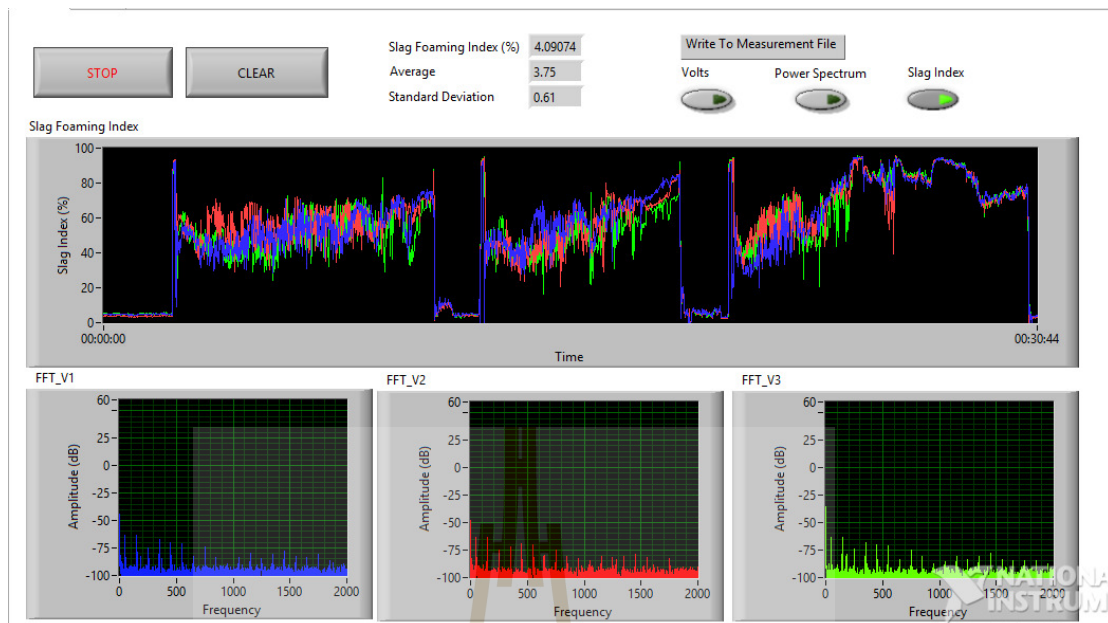
จากสมการที่ (3.1), จะได้ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกดังสมการที่ (3.2)

$$\text{slag foaming index} = 1 - (THD+N)_{\text{voltage}} \quad (3.2)$$

ดังที่แสดงในสมการที่ (3.2) ยิ่งค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกและสัญญาณรบกวนรวมของแรงดันอาร์กมีค่ามาก ดัชนีการเกิดฟองสแลกยิ่งมีค่าน้อย อาจกล่าวได้ว่าความหนาของสแลกมีค่าน้อยหรือไม่มีสแลก เช่นเดียวกันเมื่อดัชนีการเกิดสแลกมีค่ามากอาจกล่าวได้ว่าเป็นสัญญาณของการเกิดสแลก

3.2.2.4 การแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล

ในของการส่วนประมวลผล ใช้ซอฟต์แวร์ LabVIEW ควบคุมการทำงาน และประมวลผลข้อมูลดิจิทัลจากอุปกรณ์ โดยรวมถึงการติดต่อของผู้ใช้งานซึ่งแสดงข้อมูลต่าง ๆ ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก ได้แก่ สเปกตรัมของสัญญาณแรงดันอาร์ก ดัชนีการเกิดฟองสแลกที่สามารถแสดงผลได้ทั้งรูปแบบตัวเลขและรูปแบบกราฟ รวมถึงแผงปุ่มควบคุมอื่น ๆ ดังรูปที่ 3.12

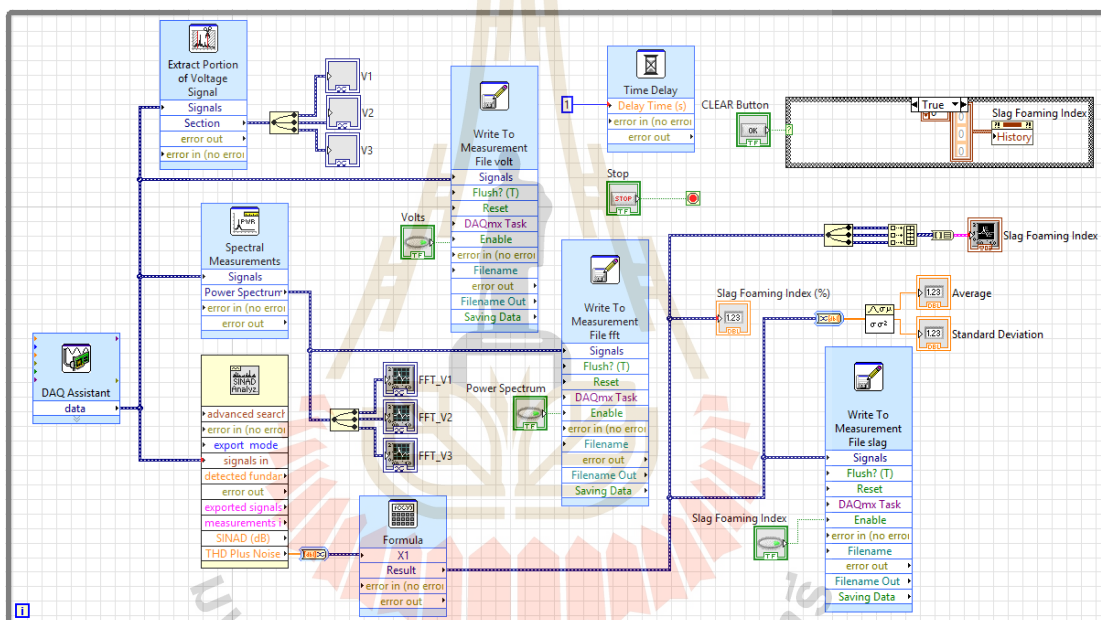


รูปที่ 3.12 ตัวอย่างการทำงานในส่วนของการแสดงผล



3.3 การแปรผลสัญญาณดิจิทัล

องค์ประกอบต่าง ๆ ในการควบคุมการทำงานของซอฟต์แวร์ระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า ได้แก่ ส่วนการตั้งค่าและเริ่มต้นทำงานของฮาร์ดแวร์ ส่วนการประมวลผลข้อมูลเพื่อหาดัชนีการเกิดฟองสแลก ส่วนการแสดงผล และส่วนการบันทึกข้อมูล ซึ่งโปรแกรมทั้งหมดจะถูกเขียนโดยโปรแกรม LabVIEW เนื่องด้วยความสะดวกในการเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อกับฮาร์ดแวร์ อีกทั้งฟังก์ชันในการสนับสนุนเพื่อประมวลผลข้อมูลสัญญาณแรงดัน รวมถึงการแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล โดยได้แสดงการเขียนโปรแกรมดังรูปที่ 3.13 (ดูเพิ่มเติมในภาคผนวก ข)



รูปที่ 3.13 โปรแกรมต้นฉบับที่ใช้ในการตรวจวัดการเกิดฟองสแลก

3.3.1 แนะนำซอฟต์แวร์ LabVIEW

ซอฟต์แวร์ LabVIEW เป็นซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท National Instrument ชื่อเต็มของซอฟต์แวร์คือ Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench วัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนงานด้านการวัด และระบบเครื่องมือวัดทางวิศวกรรม ซอฟต์แวร์ LabVIEW มีลักษณะเป็นส่วนประสานกราฟิกกับผู้ใช้ หรือ GUI (graphic user interface) นั่นคือฟังก์ชันย่อยต่าง ๆ จะมีลักษณะเป็นกราฟิกที่ถูกแสดงด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถลากและวาง

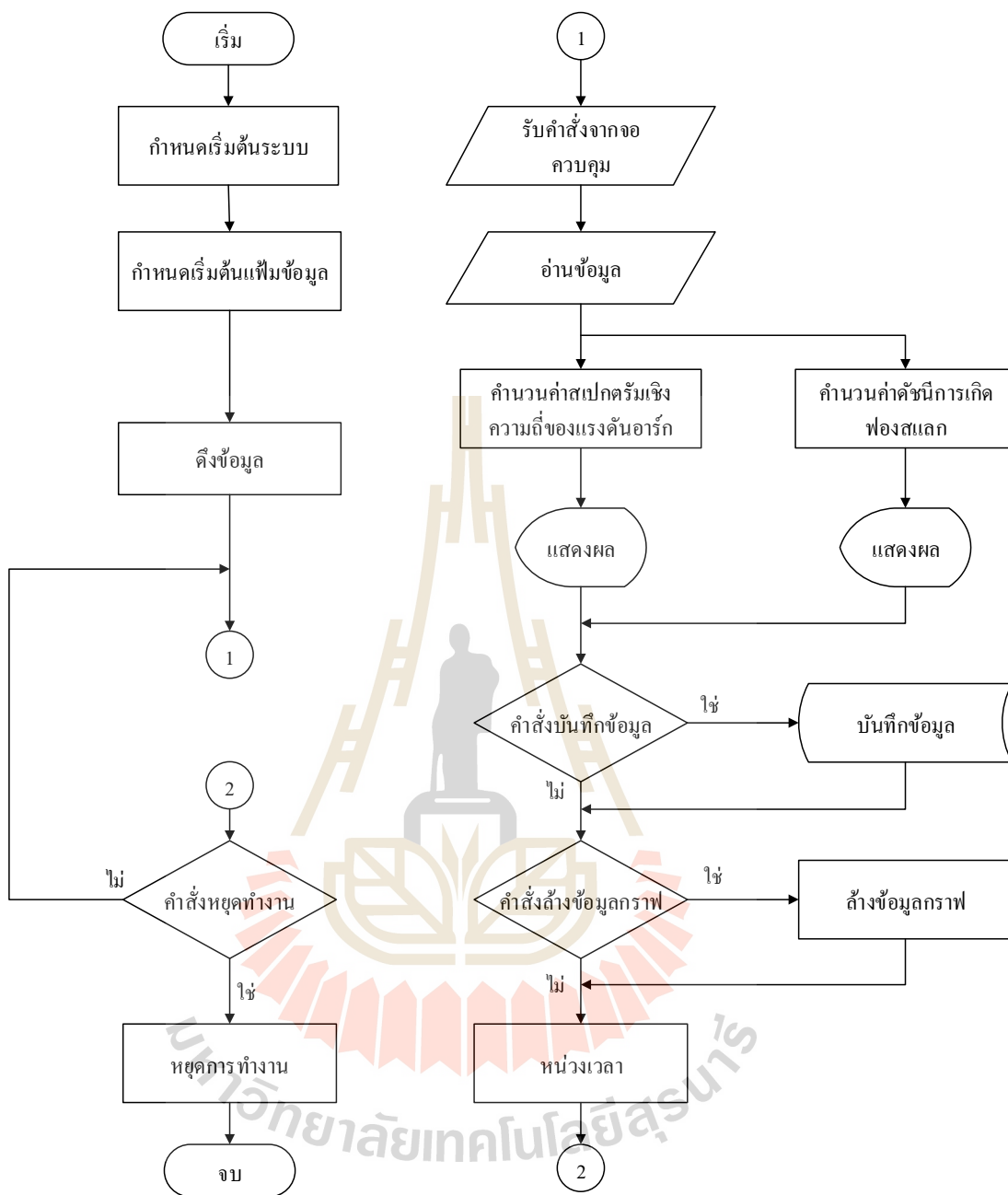
รูปภาพหรือสัญลักษณ์เพื่อนำมาเขียนโปรแกรมได้โดยไม่ต้องเขียนคำสั่งเหมือนโปรแกรมอื่น ๆ เช่น โปรแกรมภาษา C, ภาษา C++ หรือภาษา JAVA ฯลฯ จึงง่ายต่อการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้งานร่วมกับเครื่องมือวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.14 เครื่องหมายการค้าของซอฟต์แวร์ LabVIEW

3.3.2 หลักการทำงานของซอฟต์แวร์ของระบบตรวจการเกิดฟองสแลก

ซอฟต์แวร์ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก ประกอบด้วยส่วนของการตั้งค่าและเริ่มต้นทำงานของฮาร์ดแวร์ ส่วนประมวลผลข้อมูลเพื่อหาดัชนีการเกิดฟองสแลก ส่วนแสดงผลและส่วนบันทึกข้อมูล เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงแบ่งโปรแกรมออกเป็นสองส่วนตามลักษณะงาน คือ ส่วนของโปรแกรมที่ทำงานเพียงครั้งเดียว และส่วนของโปรแกรมที่ทำงานแบบวนรอบ โดยผังงานโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



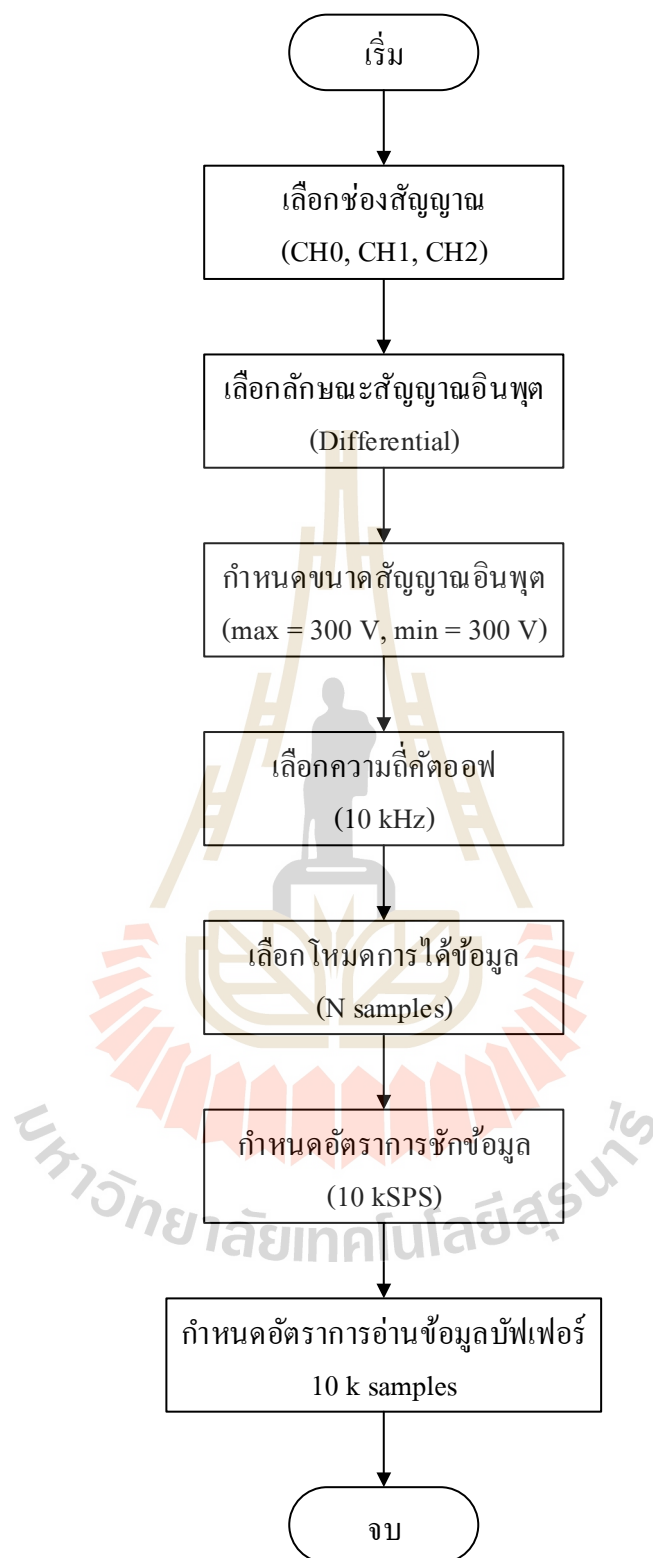
รูปที่ 3.15 ฟังงานโปรแกรมระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแตก

3.3.3 การกำหนดเริ่มต้นฮาร์ดแวร์

การกำหนดฮาร์ดแวร์เป็นการกำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของฮาร์ดแวร์ในระบบก่อนเริ่มการทำงาน โดยการกำหนดเริ่มต้นส่วนการดึงข้อมูล (NI 9225) ซึ่งมีคุณสมบัติตัวกรองภายในดังนี้

- เลือกช่องสัญญาณที่ใช้งาน เลือกใช้ CH0, CH1 และ CH2
- เลือกลักษณะสัญญาณอินพุตแบบ Differential
- กำหนดขนาดสัญญาณอินพุตสูงสุดและต่ำสุดที่ ± 300 โวลต์
- เลือกความถี่คัตออฟของตัวกรองต่ำผ่านที่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์
- เลือกโหมดการได้ข้อมูล เป็น โหมด N Samples
- กำหนดอัตราการชักข้อมูลที่ 10,000 ตัวอย่างต่อวินาที
- กำหนดอัตราการอ่านข้อมูลบัพเฟอร์ทุก ๆ 10,000 ตัวอย่าง





รูปที่ 3.16 ฟังงานกำหนดเริ่มต้นส่วนการดึงข้อมูล

3.3.4 การกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูล

การกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูลเป็นการกำหนดคุณสมบัติสำหรับเปิดเพิ่มข้อมูลเพื่อบันทึกข้อมูลดัชนีการเกิดฟองสแลก โดยกำหนดในโปรแกรมสำเร็จรูป ดังนี้

- กำหนดชื่อเพิ่มข้อมูล และปลายทางในการจัดเก็บเพิ่มข้อมูล
- เลือกเงื่อนไขในการบันทึกเพิ่มข้อมูลแบบไฟล์เดียว
- เลือกเงื่อนไขอยู่ในกรณีชื่อไฟล์ที่จะบันทึกซ้ำเป็นเปลี่ยนชื่อไฟล์ที่มี
- เลือกประเภทเพิ่มข้อมูลเป็นประเภท *.xlsx
- เลือกรูปแบบการบันทึกข้อมูลส่วนหัวแบบต่อส่วน
- เลือกรูปแบบการบันทึกข้อมูลแกนเวลาแนวตั้งแบบเดี่ยว
- เลือกการค้นข้อมูลแบบเลื่อนแคร์

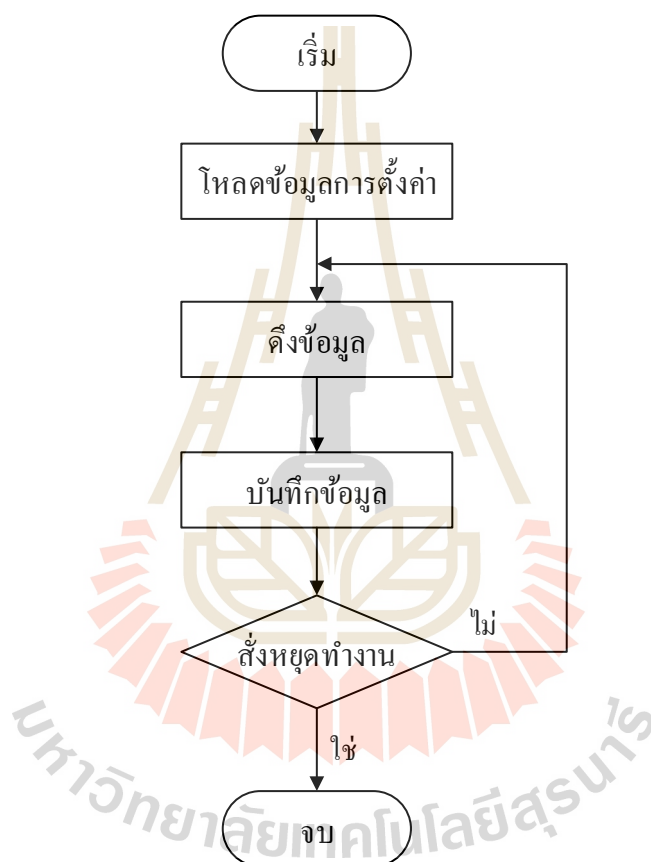




รูปที่ 3.17 ผังงานกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูล

3.3.5 การรับข้อมูลจากส่วนดึงสัญญาณ

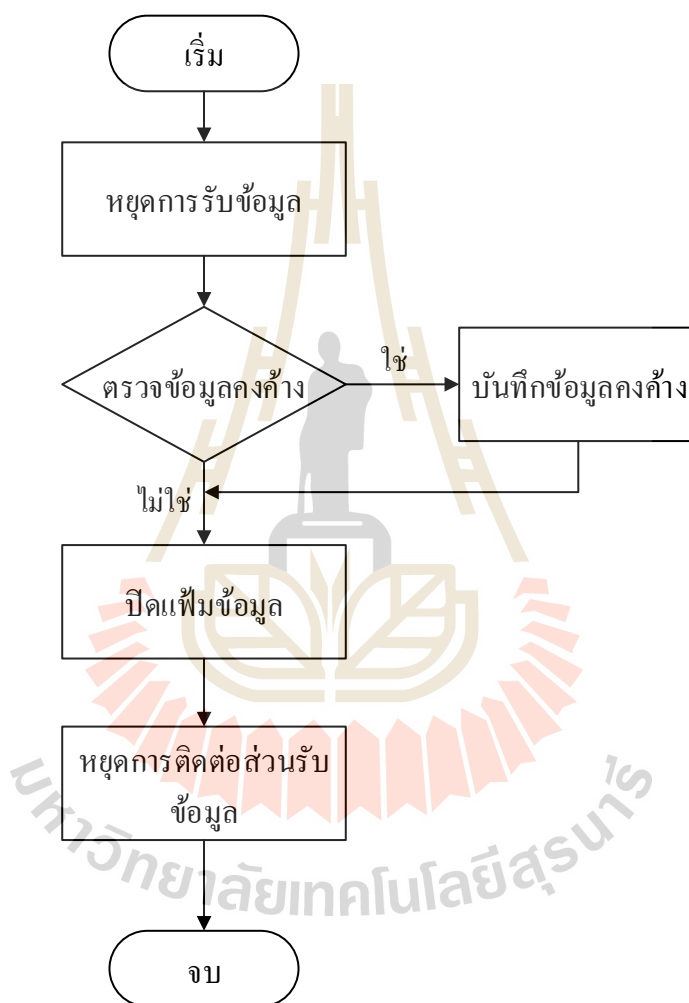
โปรแกรมในส่วนนี้เป็นการสั่งให้ส่วนดึงสัญญาณเริ่มต้นทำงาน เริ่มจากโหลดข้อมูลการตั้งค่า ได้แก่ช่องสัญญาณอินพุตที่ใช้ ลักษณะสัญญาณอินพุต ย่านวัด อัตราการชักข้อมูล อัตราการอ่านข้อมูลบัพเฟอร์ ตามหัวข้อ 3.3.3 เพื่อให้อุปกรณ์ทำงานตามที่กำหนด จากนั้นจึงเริ่มดึงข้อมูลและจึงถ่ายโอนข้อมูลจากบัพเฟอร์ออกมายังหน่วยความจำ ถ้าไม่มีการสั่งหยุดทำงาน โปรแกรมจะวนรอบไปยังขั้นตอนเลือกช่องสัญญาณอินพุตถัดไป และเริ่มดึงข้อมูลอีกครั้ง



รูปที่ 3.18 ผังงานรับข้อมูลอินพุตจากส่วนดึงสัญญาณ

3.3.6 การหยุดการทำงานระบบ

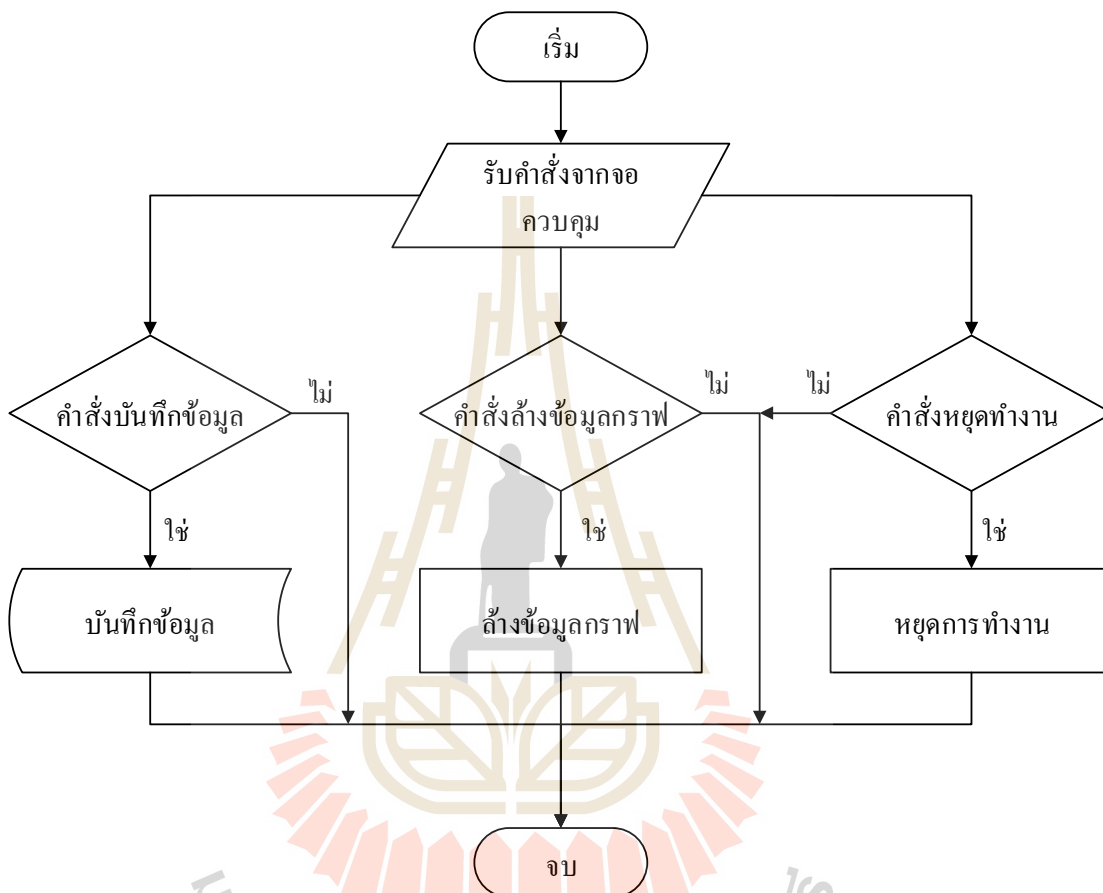
โปรแกรมในส่วนนี้เป็นขั้นตอนในการสั่งให้ระบบหยุดทำงาน โดยเมื่อได้รับสัญญาณขัดจังหวะให้หยุดทำงานจากปุ่มควบคุมหรือส่วนตรวจสอบสถานะ ส่วนรับข้อมูลจะหยุดดึงข้อมูล และตรวจสอบถ้ามีข้อมูลค้างอยู่ในบัฟเฟอร์ให้ถ่ายโอนข้อมูลก่อน จากนั้นจึงปิดแฟ้มข้อมูล และเลิกติดต่อกับส่วนรับข้อมูล ดังนี้



รูปที่ 3.19 ผังงานหยุดการทำงานระบบ

3.3.7 การตรวจสอบสถานะคำสั่งปั๊มควบคุม

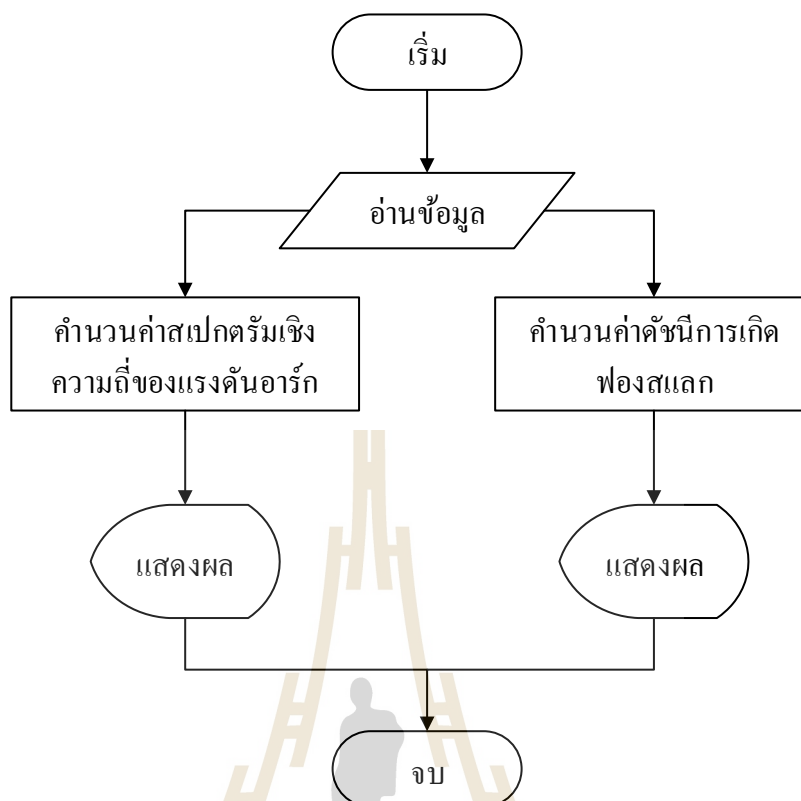
โดยรับข้อมูลสถานะคำสั่งปั๊มควบคุมต่าง ๆ ได้แก่ ปั๊มหยุดการทำงาน ปั๊มล้างข้อมูลกราฟ ปั๊มบันทึกข้อมูลดัชนีการเกิดฟองสแลก และตรวจสอบว่ามีการสั่งหยุดการทำงานหรือไม่



รูปที่ 3.20 ฟังงานตรวจสอบสถานะปั๊มควบคุม

3.3.8 การประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล

โปรแกรมส่วนการประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัลนี้ ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแรงดันอาร์กเป็นสเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดันด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Power Spectrum โดยวิธี FFT (Fast Fourier Transform) และคำนวณข้อมูลแรงดันอาร์กเป็นดัชนีการเกิดฟองสแลกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SINAD Analysis โดยข้อมูลที่ประมวลผลได้ถูกแสดงผลในรูปแบบกราฟบนหน้าจอ



รูปที่ 3.21 ผังงานการประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล

3.4 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสแลก

ในการเก็บตัวอย่างสแลกเพื่อนำมาวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี ได้ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงหลังเสร็จสิ้นกระบวนการทำน้ำเหล็กให้บริสุทธิ์ โดยดำเนินการเก็บตัวอย่างได้ทั้งสิ้น 22 ตัวอย่าง ขณะนั้นทางโรงงานอยู่ในช่วงของการผลิตเหล็กเกรด SS400B จากนั้นใช้เครื่องมือ X-Ray Fluorescence Spectrometer ในการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีของสแลก และทำการวิเคราะห์ค่าเบสิกซีดีจากส่วนผสมทางเคมีที่ได้ ในระบบสแลก $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_x\text{O}$ มีสมการดังสมการที่ (3.3)

$$B_3 = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (3.3)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองการตรวจวัดฟองสแลกจากเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า ในขณะที่ทำการผลิตจริงในภาคอุตสาหกรรม เตาหลอมของบริษัทที่ได้ไปทำการทดลองนั้น เป็นเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส ขนาด 40 ตัน ได้ทำการผลิตเหล็กเกรด SS400B มีท่อพ่นออกซิเจนจำนวน 4 ท่อ และท่อพ่นคาร์บอนจำนวน 2 ท่อ โดยกระบวนการหลอมเป็นกระบวนการที่ไม่ต่อเนื่องคือ เมื่อทำการหลอมหนึ่งเตาจะมีการใส่เศษเหล็กลงในเตาแบ่งเป็น 3 ถัง โดยในแต่ละถังนั้นเมื่อใส่เศษเหล็กก็จะทำการอาร์คให้พลังงานความร้อนเพื่อหลอมละลายเศษเหล็ก และมีการเติมฟลักซ์เพื่อปรับสภาพสแลก หลังจากครบทั้ง 3 ถัง จึงเริ่มเข้าสู่ขั้นตอนการทำสแลกให้เป็นฟอง และกระบวนการปรับส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็กให้มีความเหมาะสม จากนั้นจึงตรวจวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมี วัดอุณหภูมิ และเก็บตัวอย่างสแลก แล้วจึงทดสอบสแลกทิ้ง จากนั้นเทน้ำเหล็กลงในถังรับน้ำเหล็กจึงเสร็จสิ้นกระบวนการ โดยได้ดำเนินการเก็บผลระหว่างการหลอมเหล็กเป็นจำนวนทั้งสิ้น 27 เตา ตั้งแต่เตาหลอมที่ 171664 ถึง 171690 ขั้นตอนการหลอมเหล็กดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค

เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและการทดสอบดัชนีการเกิดฟองสแลกในกระบวนการผลิตจากเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า ได้อธิบายผลการศึกษาเป็นลำดับดังนี้

- 1) สเปกตรัมเชิงความถี่ในช่วงกระบวนการหลอม
- 2) ทดสอบดัชนีการเกิดฟองสแลก
- 3) เปรียบเทียบผลของดัชนีการเกิดฟองสแลกกับส่วนผสมทางเคมีของสแลก
- 4) ข้อเสนอแนะและแนวทางการประยุกต์ใช้งานผลการวิจัย

ในการทดลองระบบตรวจวัดฟองสแลกสามารถทำได้เฉพาะช่วงที่มีการผลิตจริง ดังนั้นจึงมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาของกระบวนการผลิตดังนี้

1. การควบคุมการทำฟองสแลกให้ฟู สามารถทำได้จากการปรับอัตราการพ่นแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนเท่านั้น โดยผู้ปฏิบัติงานจะเป็นคนดำเนินกระบวนการในการพ่นแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนเอง ซึ่งเป็นการยากที่จะควบคุมให้สแลกมีความฟูคงที่ตลอดการหลอม

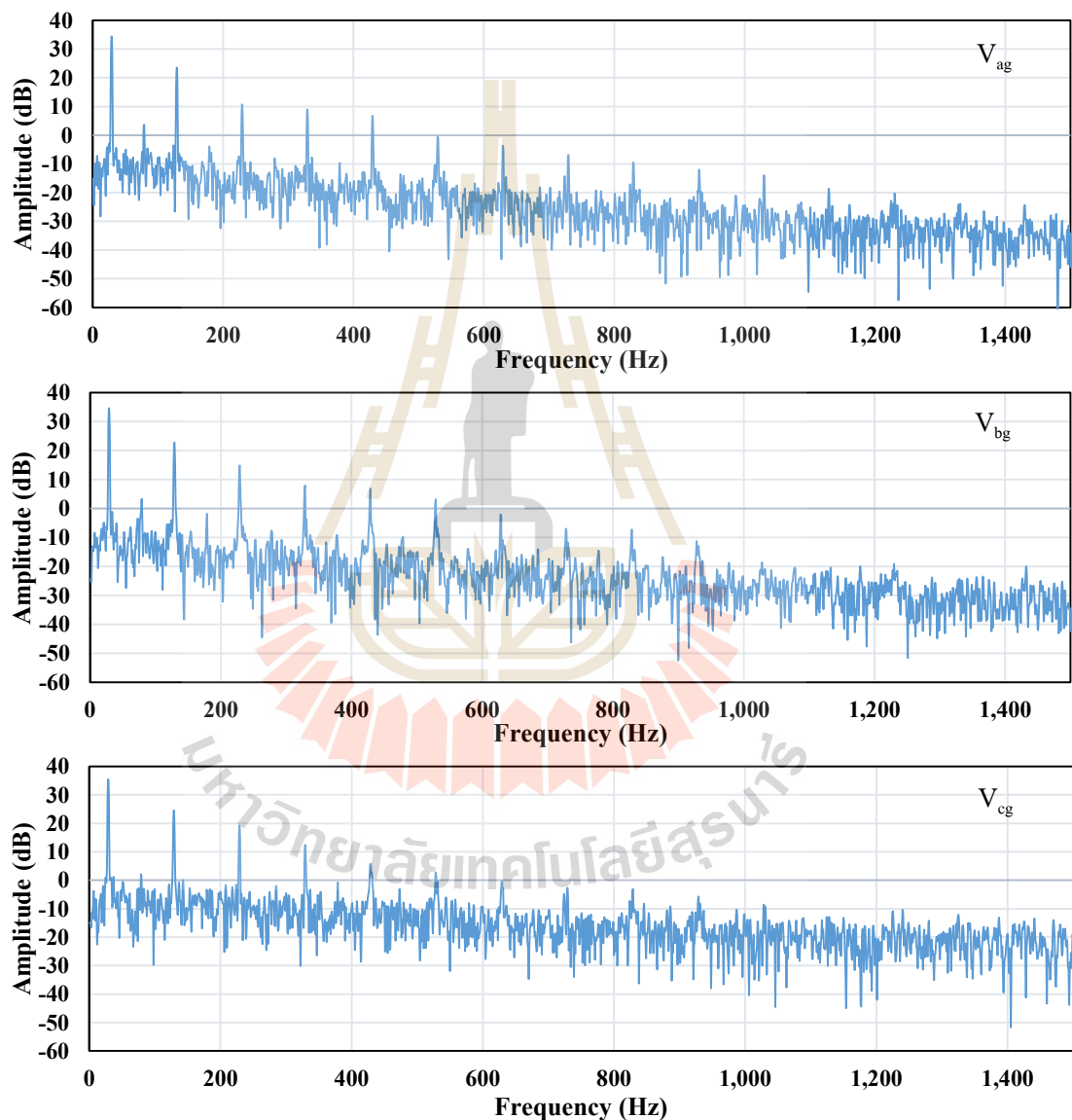
2. การควบคุมส่วนผสมทางเคมีเพื่อให้สแลกมีสถานะเหมาะสมต่อการฟูเป็นสิ่งที่ไม่สามารถทำได้ จึงไม่สามารถควบคุมให้สแลกมีสถานะที่เหมาะสมตลอดช่วงการหลอมได้

3. แรงดันอาร์คของเตามีค่าที่ไม่คงที่ ซึ่งแปรตามความต้องการในการให้ความร้อนของแต่ละช่วงของการหลอม

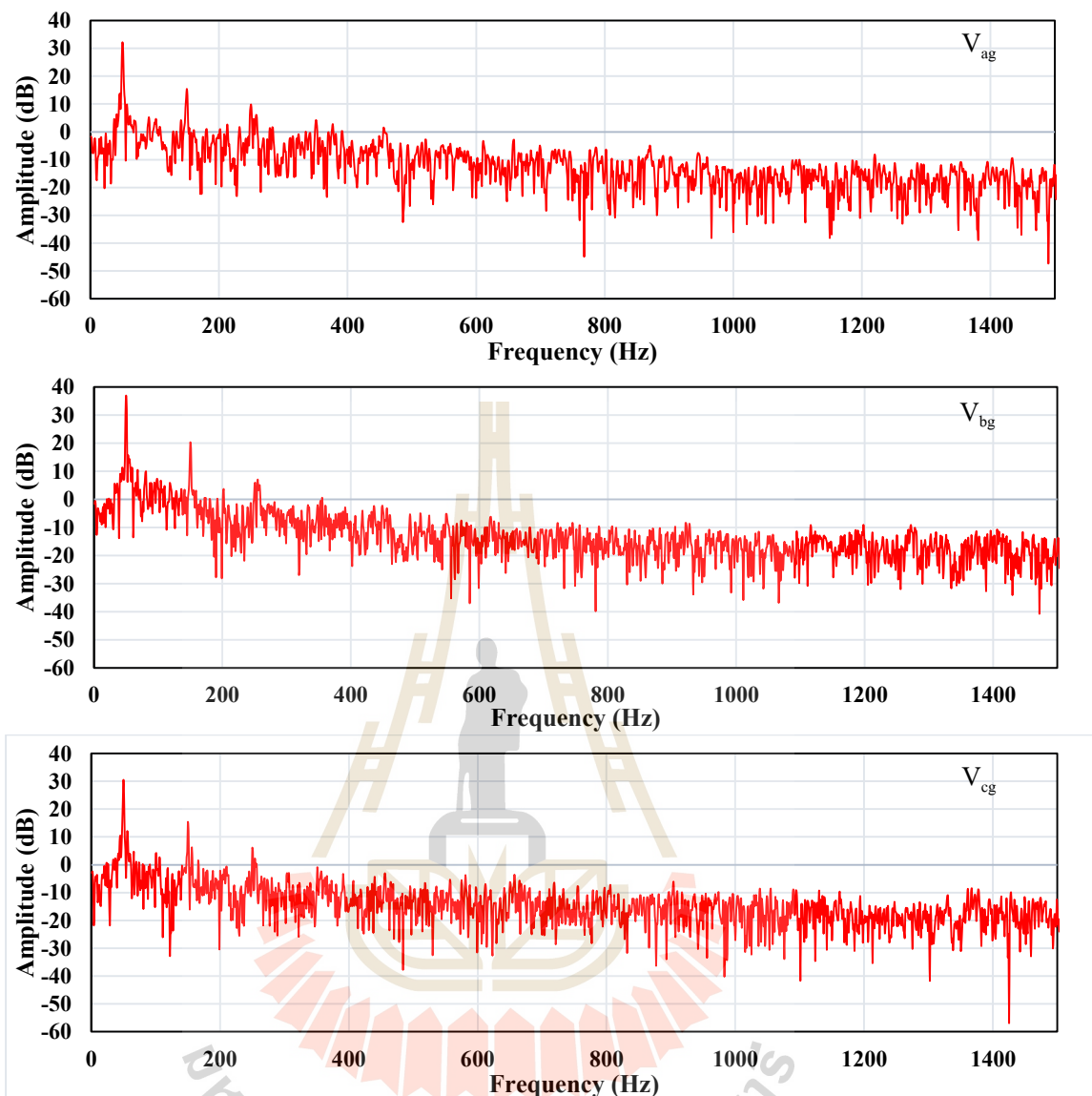
ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งระบบตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในบริเวณห้องควบคุมเตาเพื่อความสะดวกในการวัด โดยขนานสัญญาณแรงดันอิเล็กโทรคจากขั้วต่อด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแรงดันเป็นสัญญาณอินพุตของระบบจากรูปที่ 3.11

4.1 สเปกตรัมเชิงความถี่ในช่วงกระบวนการหลอม

เพื่อกำหนดดัชนีการเกิดฟองสแลกที่เหมาะสม เริ่มจากทดสอบวัดสเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดันอาร์ก ณ จุดวัด V_{ag} , V_{bg} และ V_{cg} ขณะที่สแลกไม่เป็นฟองและสแลกเป็นฟอง โดยได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 สเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดันอาร์ก ณ จุดวัด V_{ag} , V_{bg} และ V_{cg} ขณะที่สแลกไม่เป็นฟอง



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดันอาร์ค ณ จุดวัด V_{ag} , V_{bg} และ V_{cg} ขณะที่สแลกเป็นฟอง

จากผลการทดสอบพบว่าในช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 – 1,500 เฮิรตซ์ มีการเปลี่ยนแปลงระดับของฮาร์มอนิกและอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ชัดเจน โดยระดับของอินเตอร์ฮาร์มอนิกมีค่าระหว่าง -60 ถึง 40 เดซิเบลขณะสแลกไม่เป็นฟอง ในรูปที่ 4.2 สามารถสังเกตเห็นฮาร์มอนิกได้ชัดเจนในช่วงความถี่ 1,000 เฮิรตซ์ หรือลำดับฮาร์มอนิกที่ 20 ดังนั้นเพื่อให้ครอบคลุมการทำงาน ดัชนีการเกิดฟองสแลกจึงกำหนดให้พิจารณาถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ 30 ดังสมการที่ (4.1)

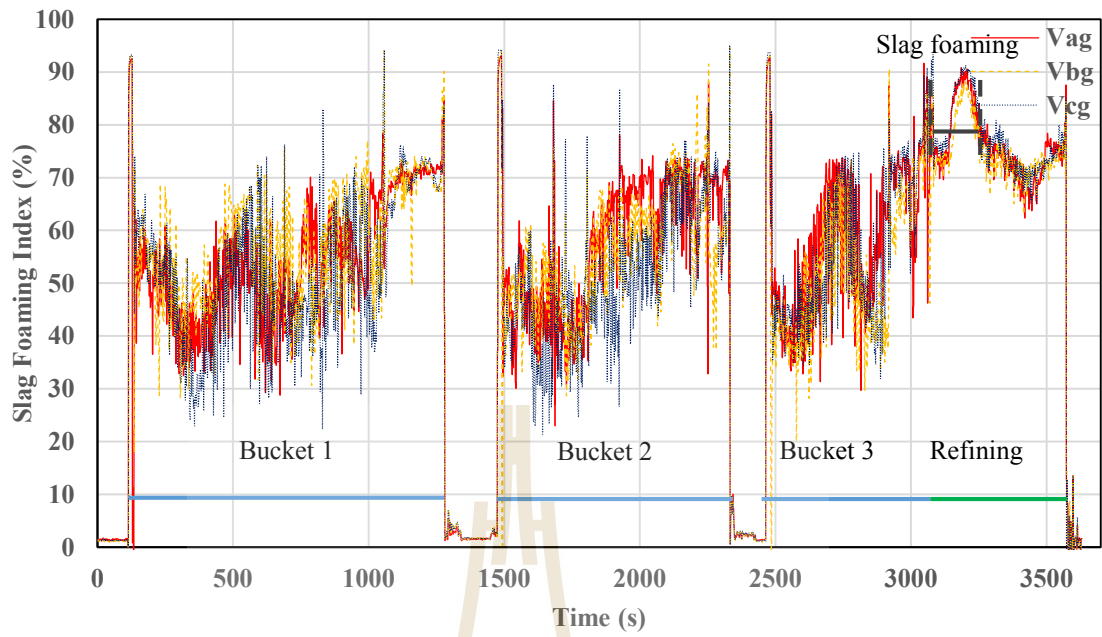
$$\text{slag foaming index} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{30} V_n^2 + V_{\text{noise}}^2}{V_1^2}} \quad (4.1)$$

4.2 ทดสอบดัชนีการเกิดฟองสแลก

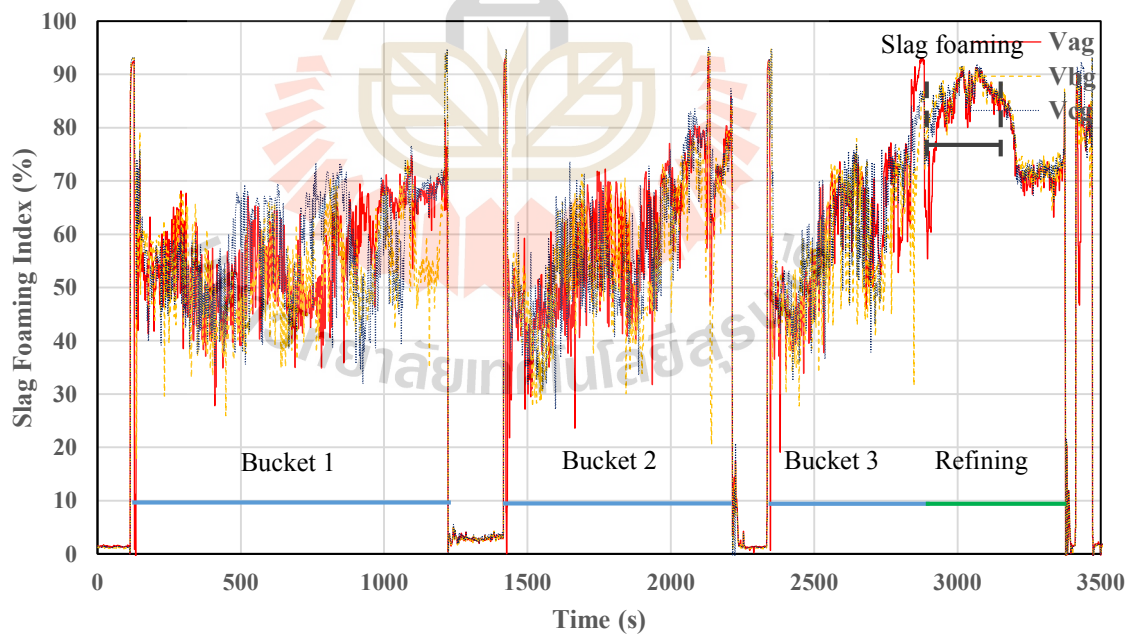
ผลการเก็บข้อมูลสัญญาณแรงดันจากเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าจำนวนทั้งสิ้น 27 เตา เมื่อแปลงสัญญาณแรงดันให้อยู่ในรูปของดัชนีการเกิดฟองสแลก จากผลการทดลองพบว่าดัชนีการเกิดฟองสแลกสามารถแสดงระดับการเปลี่ยนแปลงของสแลกในขั้นตอนของการหลอมเหล็กโดยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าได้ จากตัวอย่างของผลการทดลองดังรูปที่ 4.4-4.23

โดยรูปที่ 4.4-4.13 แสดงผลค่าของดัชนีการเกิดฟองสแลกตลอดระยะเวลาการหลอมใน 1 เตา ซึ่งใช้เวลาโดยประมาณ 45-60 นาที จากรูปสามารถอธิบายได้ว่า

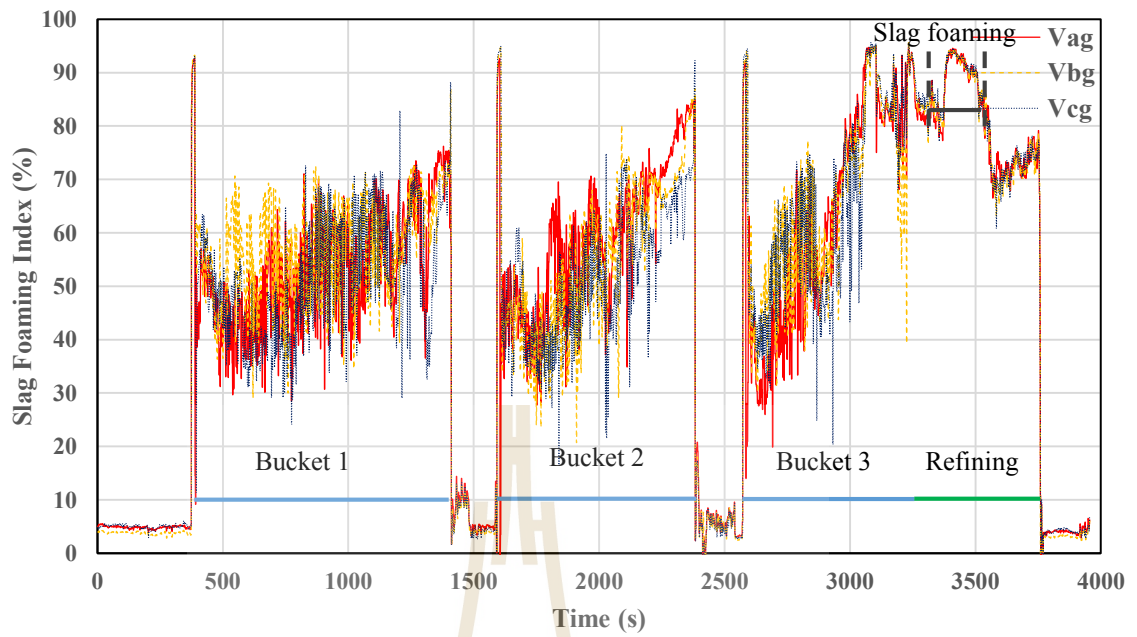
1. ตอนเริ่มต้นกระบวนการจะอยู่ในช่วงเตรียมเศษเหล็กซึ่งค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกจะยังคงเป็น 0 เมื่อเศษเหล็กถึงแรกและหลอมละลายเศษเหล็ก ค่าดัชนีฟองสแลกจะมีความผันผวนแต่ยังอยู่ในระดับที่ต่ำ เพราะยังไม่มีการทำฟองสแลก เช่นกันกับกระบวนการในส่วน of เศษเหล็กถึงที่ 2 และ 3 รูปกราฟจะมีรูปแบบที่คล้ายกัน
2. หลังจากหลอมละลายเศษเหล็กในถึงที่ 3 เข้าสู่ขั้นตอนการทำสแลกให้เป็นฟอง กราฟจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าสูงเกินร้อยละ 80 อยู่ช่วงเวลาหนึ่ง อธิบายได้ว่า ในขั้นตอนการทำให้เป็นฟองสแลกเมื่อทำการพ่นออกซิเจน เพื่อสร้างสแลกที่มีระดับความหนาที่เหมาะสม การเกิดฟองสแลกขึ้นนั้น ก็จะทำให้สัญญาณไฟฟ้ามีความเสถียรตามไปด้วย ดังนั้นค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน
3. หลังจากหยุดพ่นออกซิเจนเพื่อทำฟองสแลก ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกจึงลดลงมาคงที่อยู่ที่ในระดับที่ไม่ผันผวนมาก เพราะฟองสแลกปกคลุมผิวหน้าเหล็กเรียบร้อยแล้ว



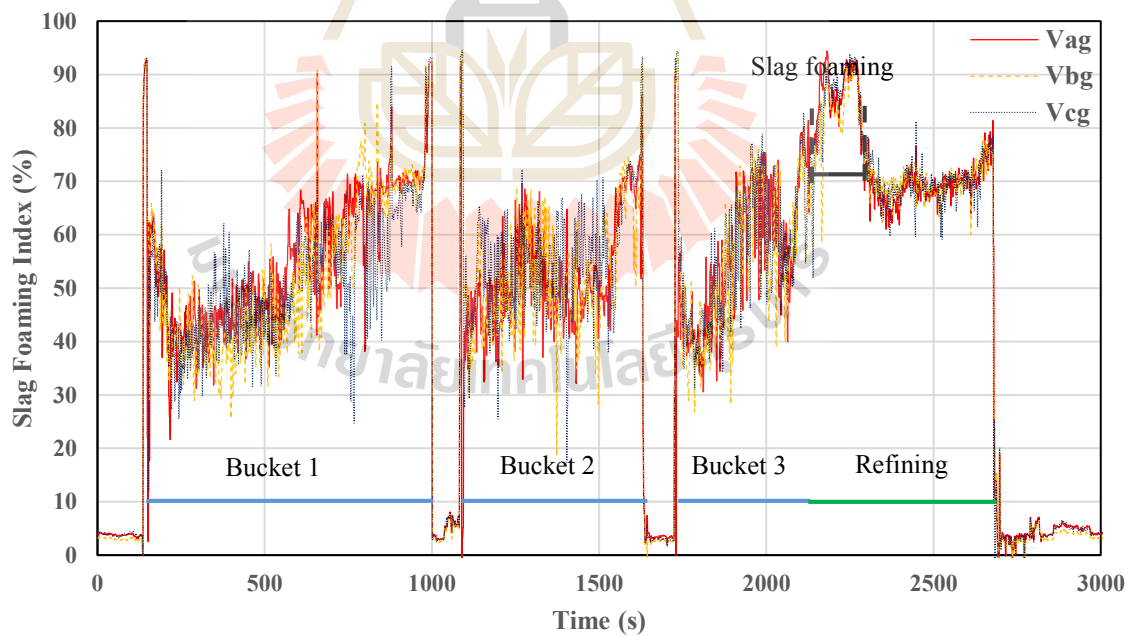
รูปที่ 4.4 คำนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171664



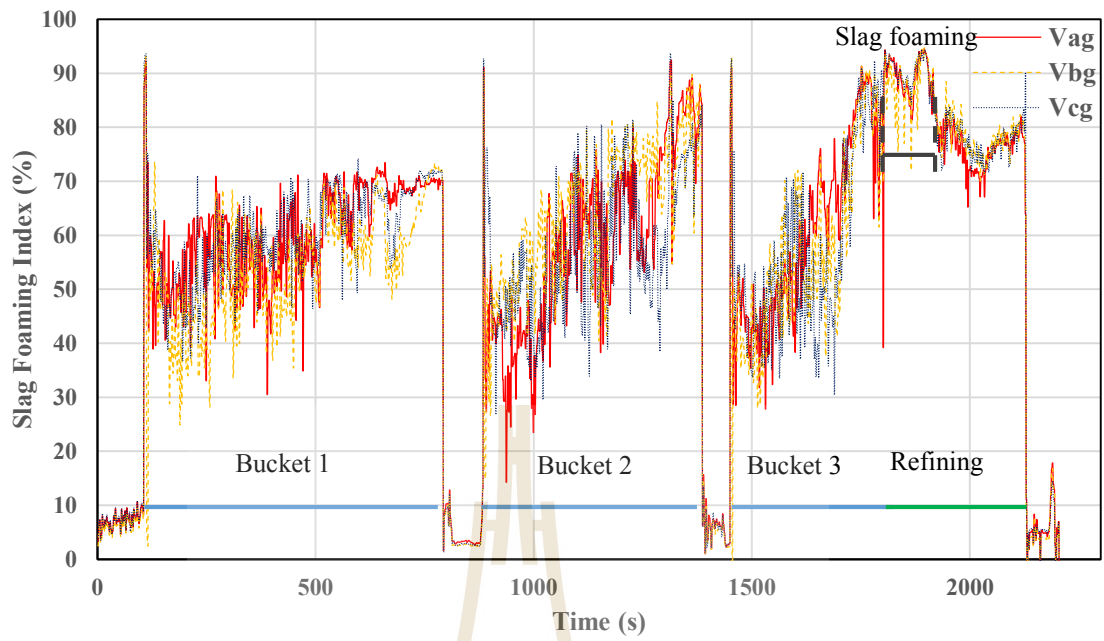
รูปที่ 4.5 คำนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171665



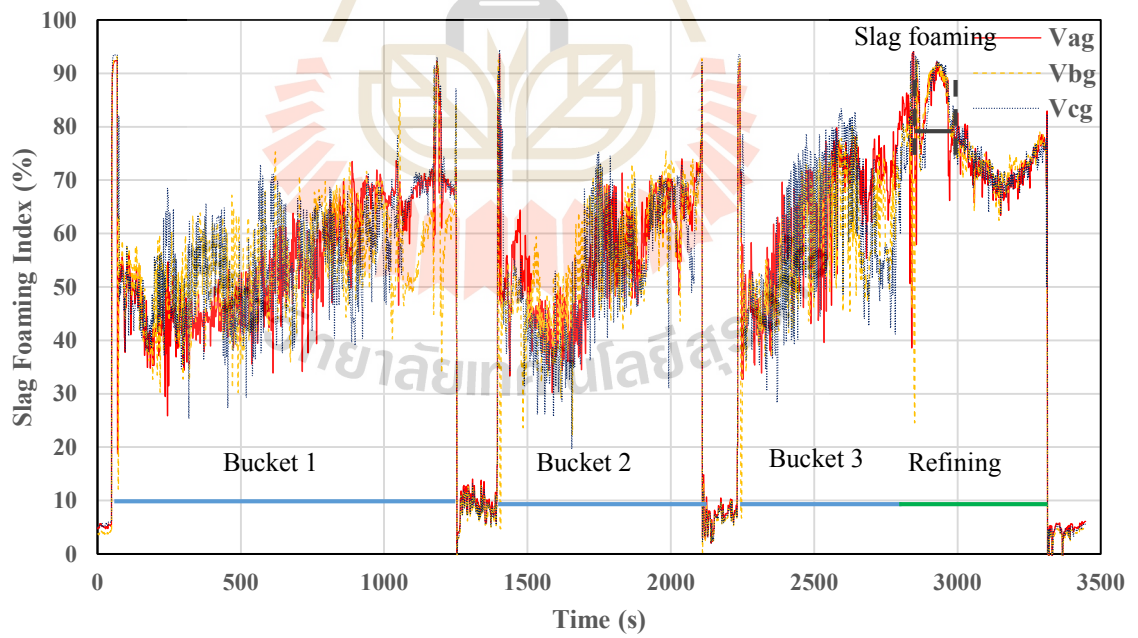
รูปที่ 4.6 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171666



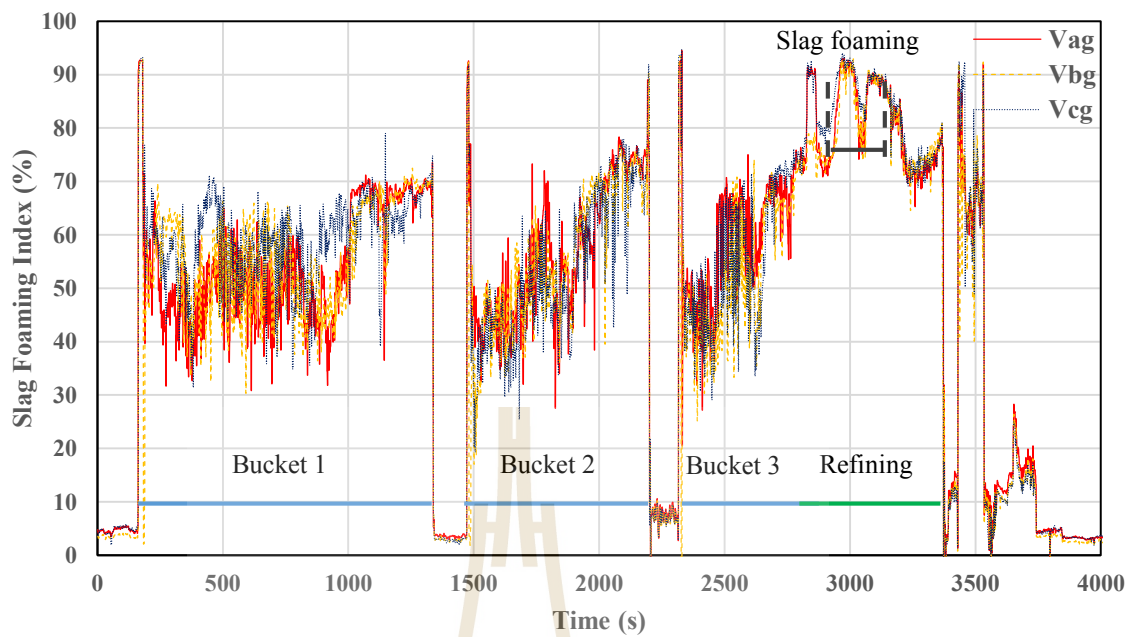
รูปที่ 4.7 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171667



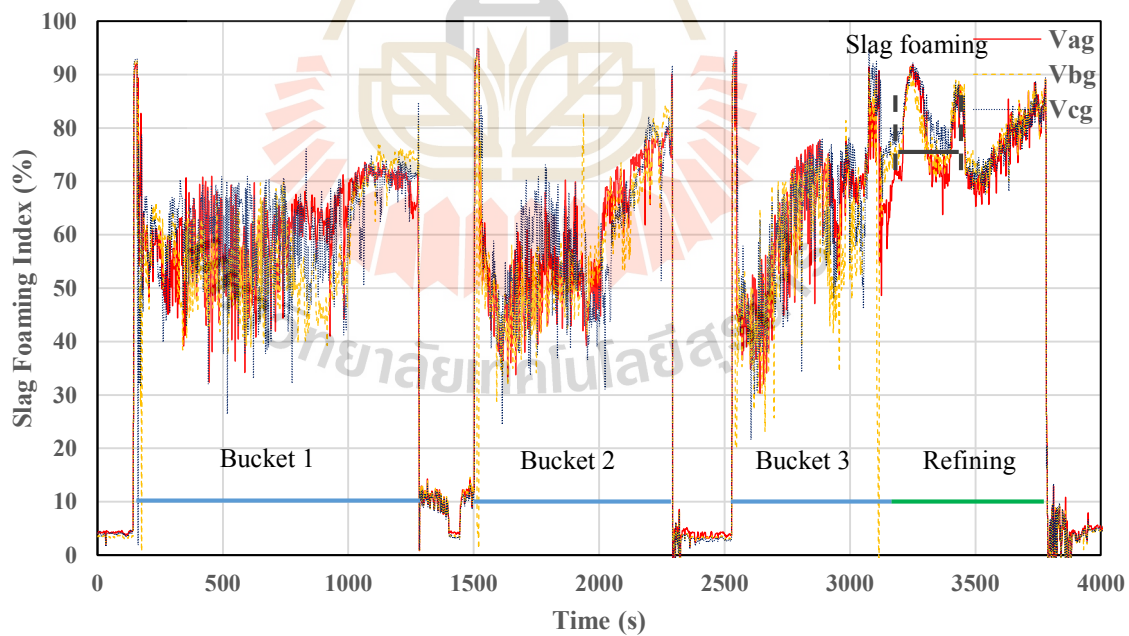
รูปที่ 4.8 คำนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171668



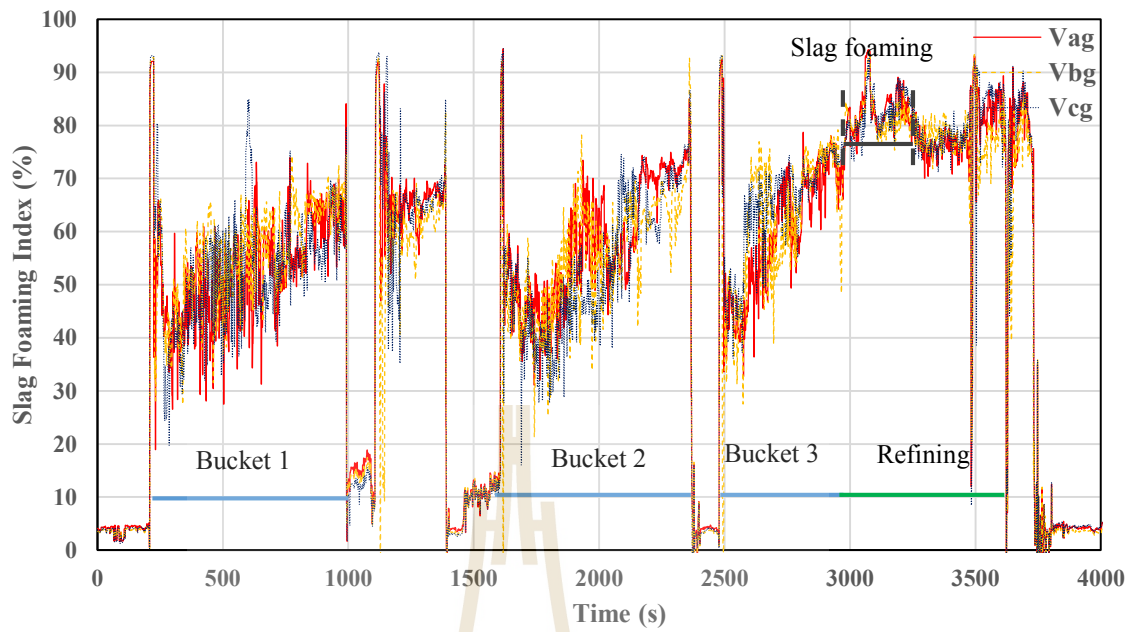
รูปที่ 4.9 คำนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171669



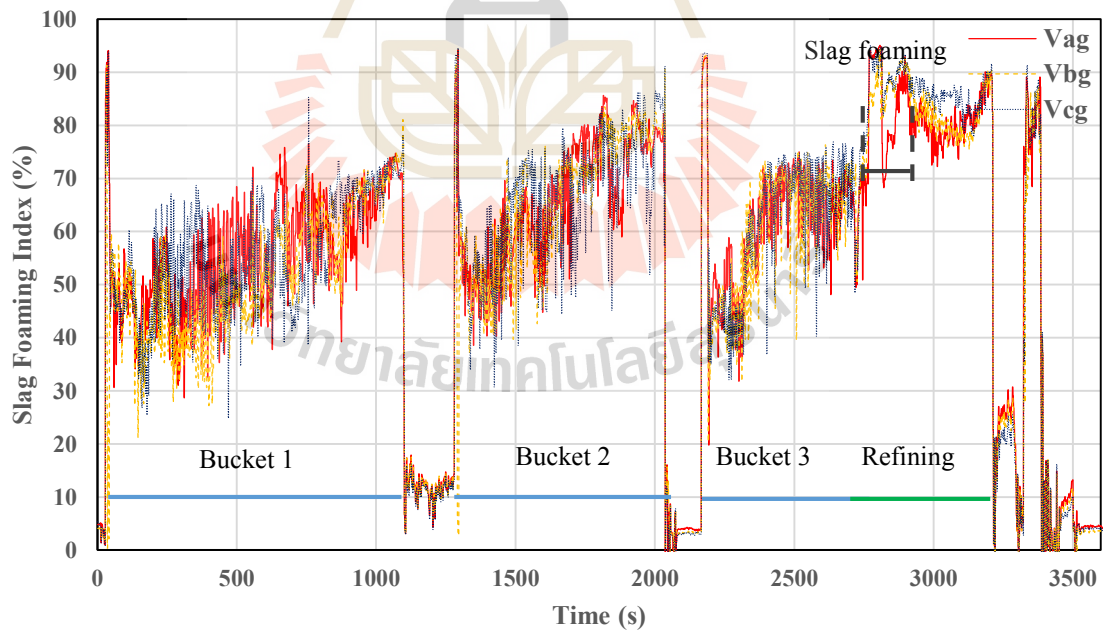
รูปที่ 4.10 คำนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171671



รูปที่ 4.11 คำนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171688



รูปที่ 4.12 คำนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171689



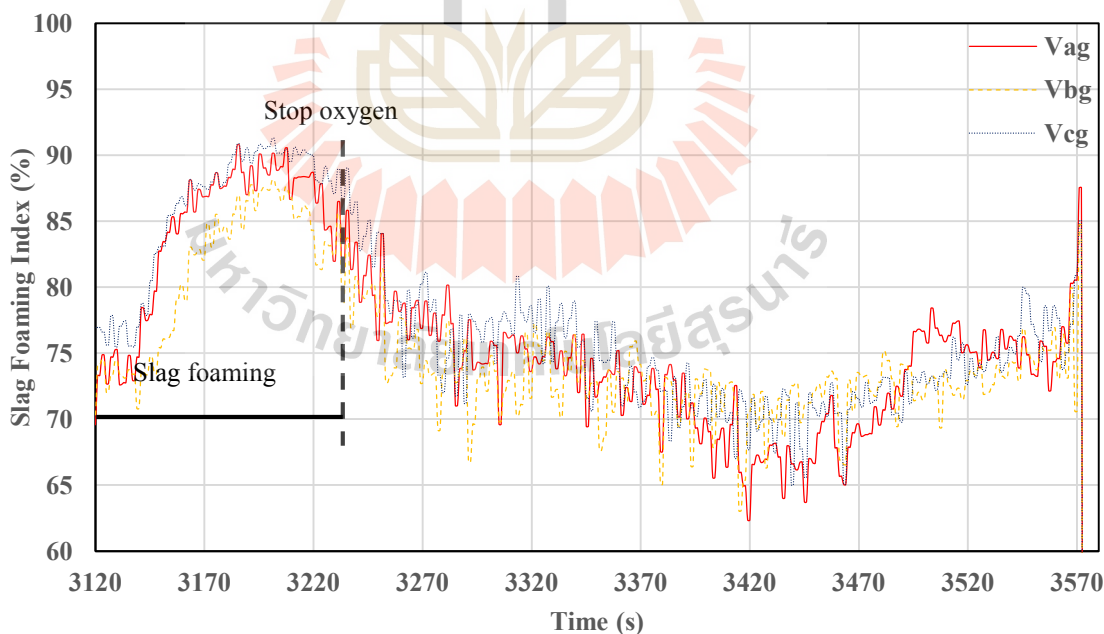
รูปที่ 4.13 คำนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171690

ในรูปที่ 4.14-4.23 แสดงให้เห็นถึงค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกในขั้นตอนของการทำสแลกให้เป็นฟอง สามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ซึ่งดัชนีการเกิดฟองสแลกมีลักษณะดังนี้

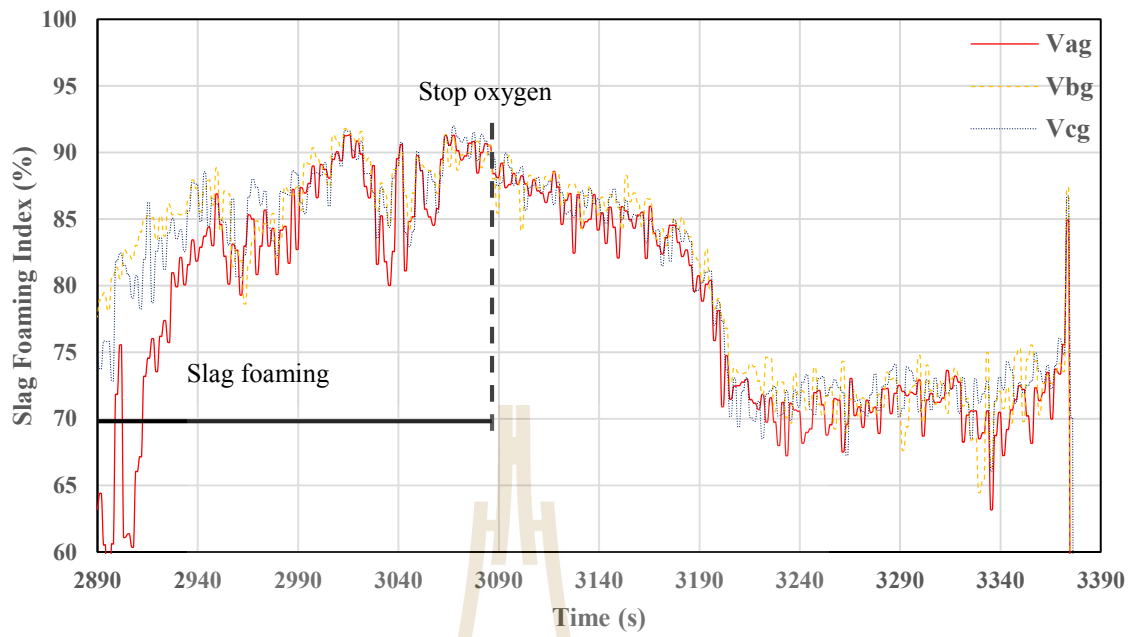
1. เมื่อหลอมละลายเศษเหล็กเสร็จสิ้นทั้ง 3 ถัง และเข้าสู่ขั้นตอนการปรับส่วนผสมทางเคมีของน้ำเหล็กกล้าโดยเริ่มกระบวนการด้วยการทำสแลกให้เป็นฟอง โดยในช่วงการทำสแลกให้เป็นฟองนี้ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและระดับร้อยละ 90 ซึ่งช่วงการทำสแลกให้เป็นฟองนี้จะใช้ระยะเวลาประมาณ 2-4 นาที

2. หลังจากหยุดฟ่นแก๊สออกซิเจนแล้วกราฟดัชนีการเกิดฟองสแลกจะค่อย ๆ ยุบตัวลงมาและคงอยู่ที่ระดับร้อยละ 65-80 แม้ในช่วงหลังหยุดฟ่นแก๊สออกซิเจนมีฟองสแลกปกคลุมอยู่แต่ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกก็จะมีค่าน้อยกว่าช่วงทำสแลกให้เป็นฟอง เนื่องจากช่วงทำสแลกให้เป็นฟองฟองสแลกจะมีความฟูมากกว่านั่นเอง

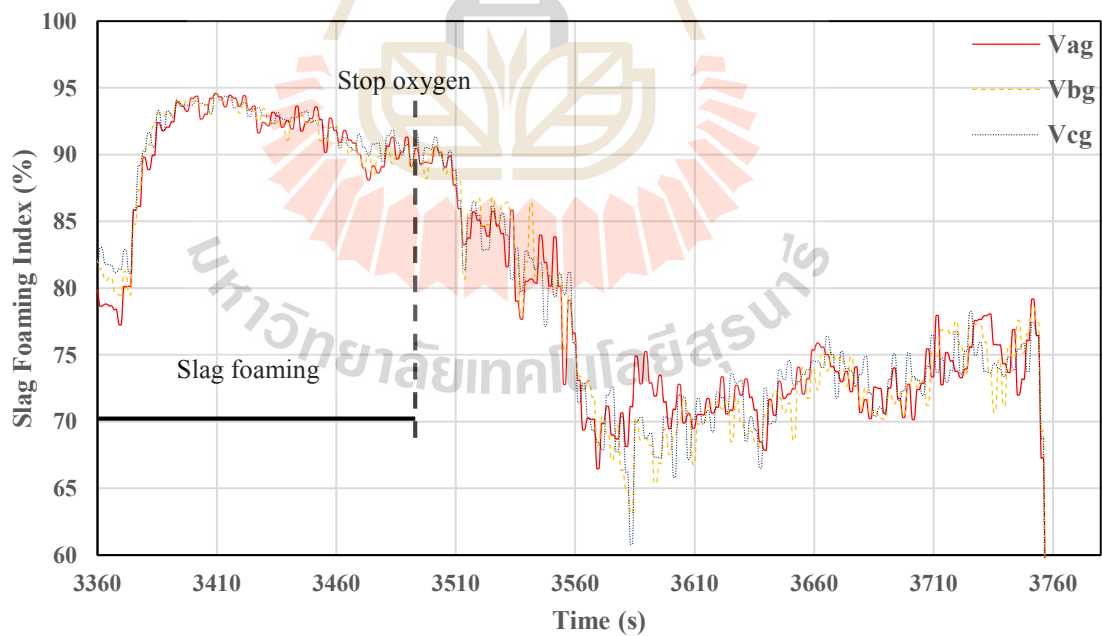
3. จากผลลัพธ์ข้างต้นจึงอาจสรุปได้ว่า ดัชนีการเกิดฟองสแลกสามารถระบุสถานะของฟองสแลกได้ อีกทั้งยังมีความสัมพันธ์สอดคล้องกับความฟูของฟองสแลกภายในเตาด้วย โดยได้ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของการเกิดดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำสแลกให้เป็นฟอง (ก่อนหยุดฟ่นแก๊สออกซิเจน) กับช่วงที่หยุดฟ่นแก๊สออกซิเจน ดังในตารางที่ 4.1



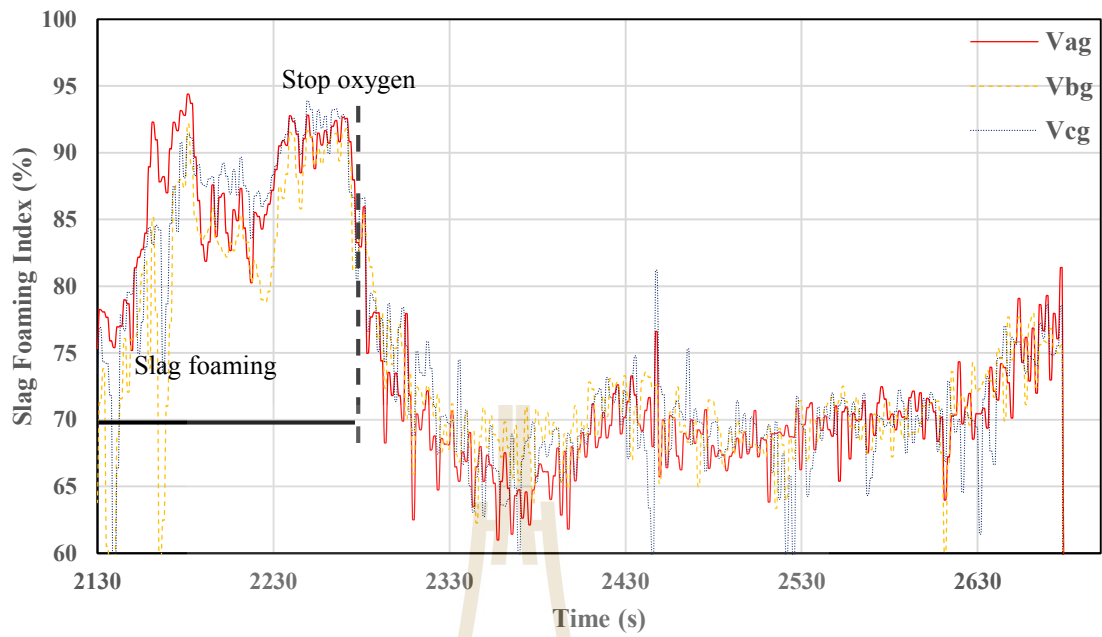
รูปที่ 4.14 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171664



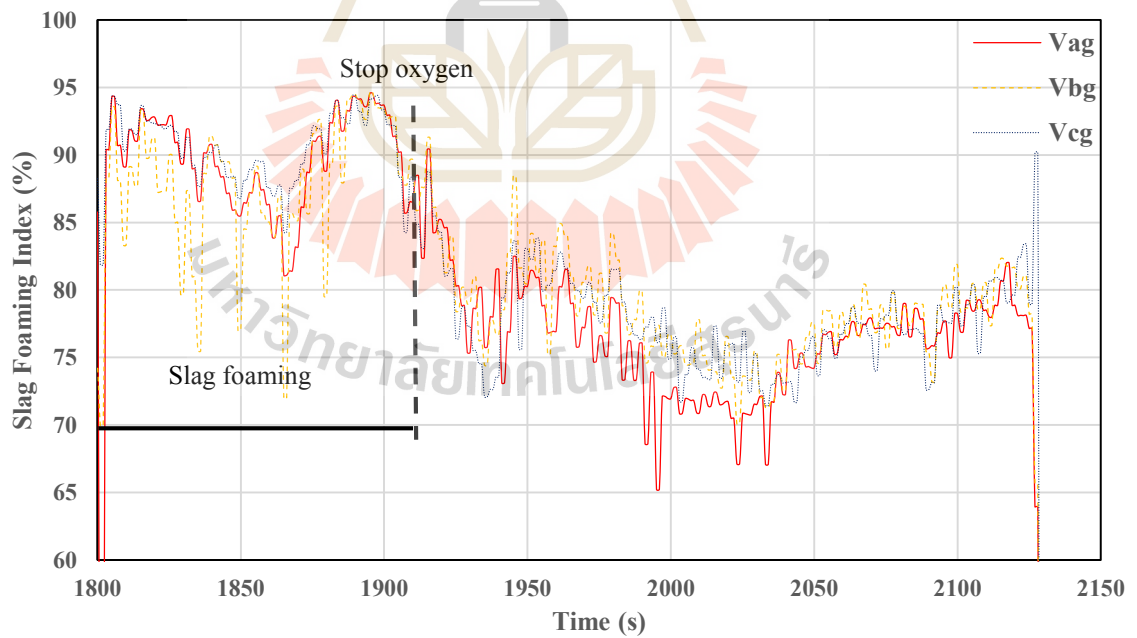
รูปที่ 4.15 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171665



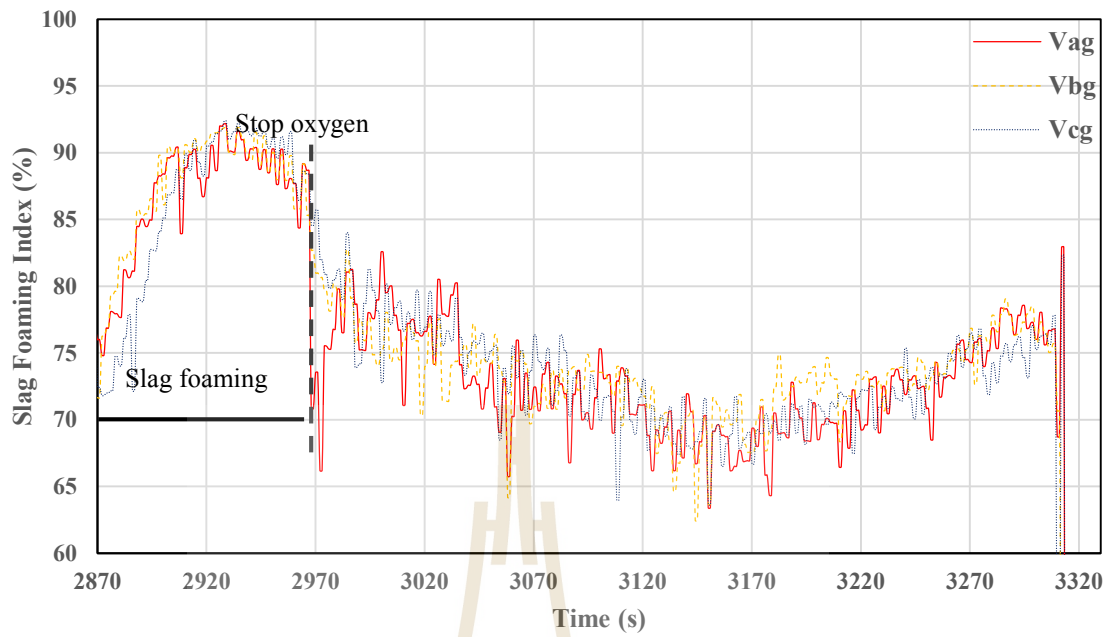
รูปที่ 4.16 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171666



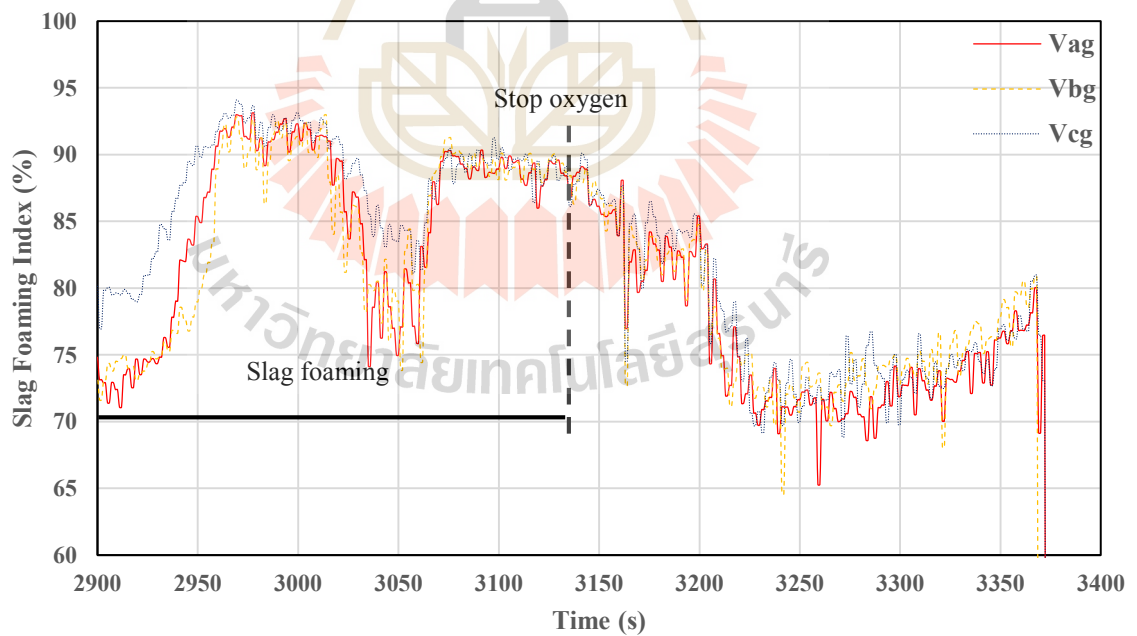
รูปที่ 4.17 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171667



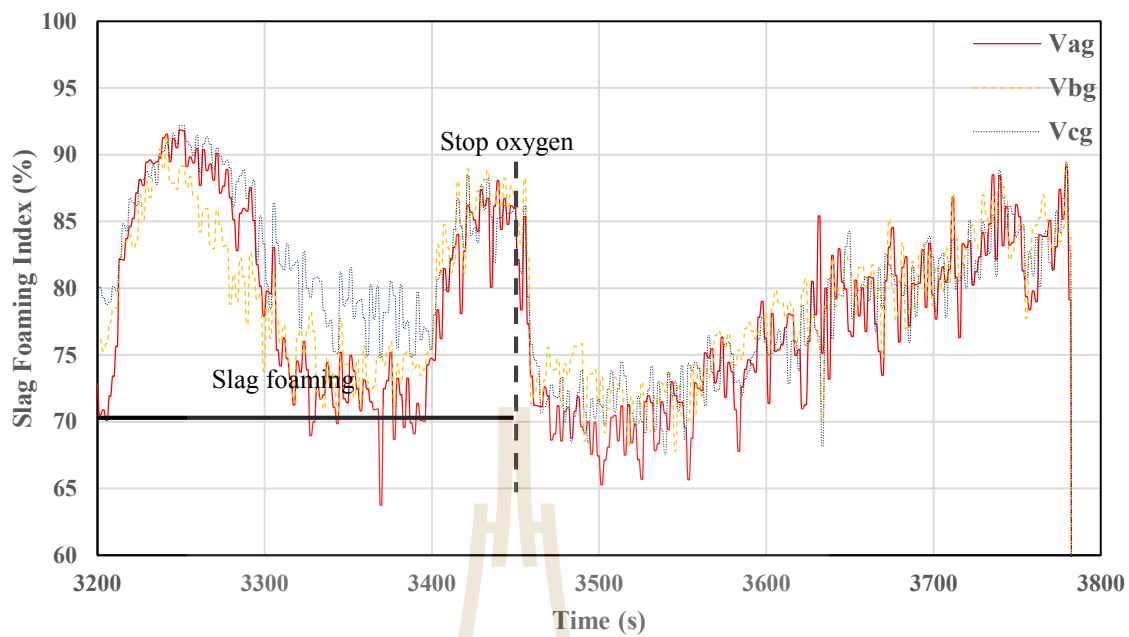
รูปที่ 4.18 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171668



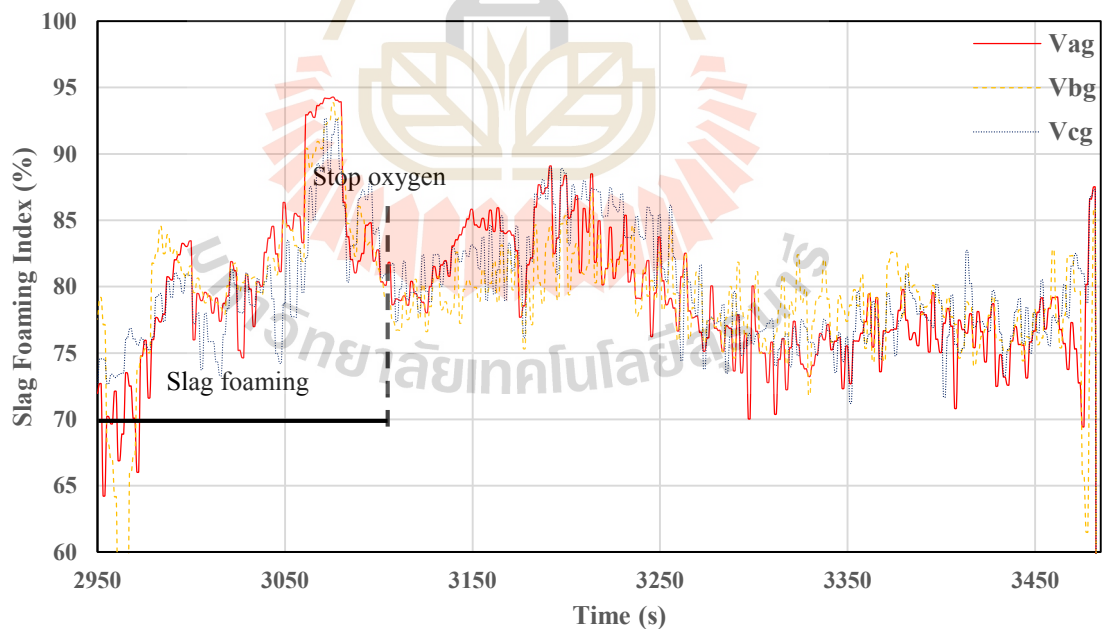
รูปที่ 4.19 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171669



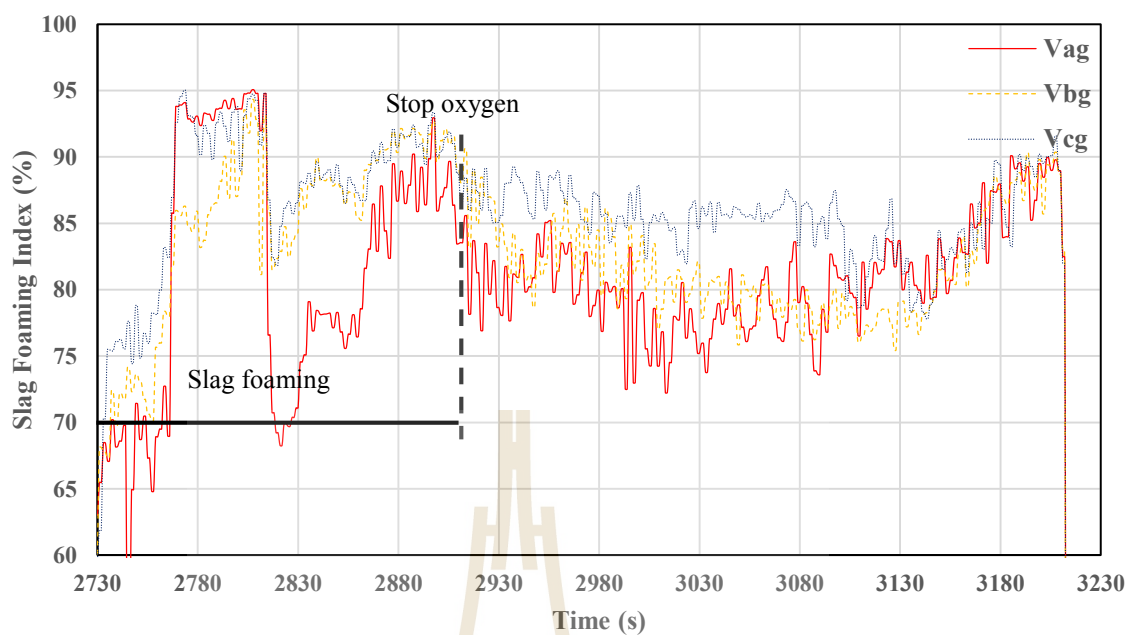
รูปที่ 4.20 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171671



รูปที่ 4.21 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171688



รูปที่ 4.22 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171689



รูปที่ 4.23 ดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 171690

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงดัชนีการเกิดฟองสแลกเมื่อหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน

เตาหลอมที่	ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลก (%)	
	ก่อนหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน	หลังหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน
171664	85.20	73.36
171665	85.48	74.76
171666	91.56	74.91
171667	86.01	70.18
171668	88.73	77.13
171669	86.58	73.11
171670	85.98	75.06
171671	85.81	74.88
171672	80.17	71.01
171673	82.43	76.41
171674	88.16	76.23
171675	81.08	74.94

ตารางที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงดัชนีการเกิดฟองสแลกเมื่อหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน (ต่อ)

เตาหลอมที่	ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลก (%)	
	ก่อนหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน	หลังหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน
171676	83.26	78.89
171677	82.06	75.06
171678	86.33	84.63
171679	82.86	74.54
171680	83.11	74.62
171681	76.97	71.86
171682	83.95	77.59
171683	84.58	78.92
171684	83.25	72.06
171685	79.98	73.60
171686	85.20	73.36
171687	85.48	74.76
171688	91.56	74.91
171689	86.01	70.18
171690	88.73	77.13
ค่าเฉลี่ยทั้งหมด	84.35	75.87

4.3 เปรียบเทียบผลของดัชนีการเกิดฟองสแลกกับส่วนผสมทางเคมีของสแลก

การเปรียบเทียบผลการวัดกับส่วนผสมทางเคมีของสแลก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลก กับสภาวะของสแลกภายในเตา เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนในการหลอมแต่ละเตา ได้ทำการเก็บตัวอย่างสแลกเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าร้อยละของเหล็กออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ด้วยเครื่องมือ XRF โดยค่าเบสิกซิตีของสแลกได้แสดงในตารางที่ 4.2 รวมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการเกิดฟองสแลกและปริมาณเหล็กออกไซด์ (FeO) ในสแลกดังรูปที่ 4.24 ซึ่งเริ่มทำการเก็บตัวอย่างสแลกตั้งแต่เตาหลอมที่ 171664-171685 เป็นจำนวนทั้งสิ้น 22 เตาหลอมจาก 27 เตาหลอม พิจารณาค่าเบสิกซิตีและดัชนีการเกิดฟองสแลกดังสมการที่ (2.6) และ (2.15) ตามลำดับ

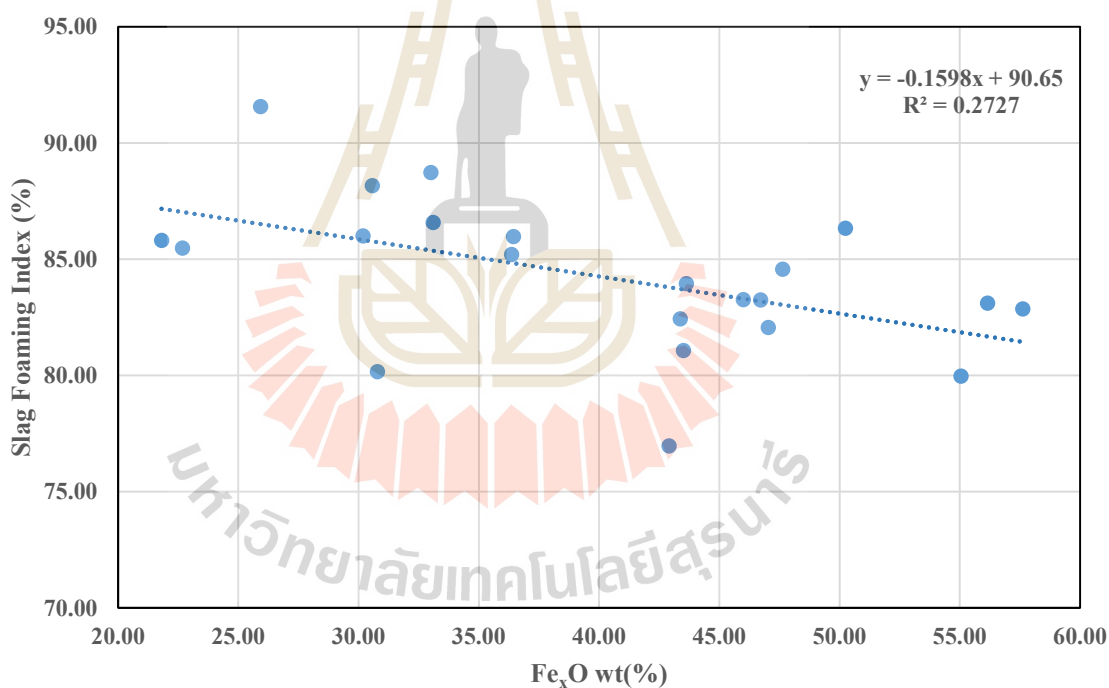
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สารประกอบในสแลกและค่าดัชนีการเกิดฟองสแลก

เตาหลอมที่	ร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบ					เบสิกซิตี	ดัชนีการเกิดฟองสแลก
	Fe _x O	MgO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
171664	36.37	4.62	27.56	14.99	6.14	1.3	85.20
171665	22.68	6.51	32.25	16.42	7.48	1.3	85.48
171666	25.92	5.30	33.21	13.90	6.25	1.6	91.56
171667	30.18	5.67	25.44	15.37	7.04	1.1	86.01
171668	33.01	4.30	30.88	13.52	6.20	1.6	88.73
171669	33.11	4.33	30.57	13.26	6.19	1.6	86.58
171670	36.44	5.64	28.56	13.66	5.89	1.5	85.98
171671	21.81	6.77	32.79	16.02	6.90	1.4	85.81
171672	30.79	5.97	29.40	14.38	6.29	1.4	80.17
171673	43.37	3.68	22.63	11.72	6.04	1.3	82.43
171674	30.57	5.00	31.54	14.29	6.03	1.6	88.16
171675	43.51	3.90	24.40	12.32	4.93	1.4	81.08
171676	45.99	3.02	18.67	15.89	5.87	0.9	83.26
171677	47.03	3.61	23.58	11.00	4.68	1.5	82.06
171678	50.24	2.82	22.87	10.26	4.19	1.6	86.33
171679	57.62	2.81	16.89	9.60	4.24	1.2	82.86
171680	56.15	2.91	17.93	9.77	4.26	1.3	83.11
171681	42.91	4.51	21.58	13.13	5.95	1.1	76.97
171682	43.63	3.61	23.33	12.84	5.86	1.2	83.95
171683	47.64	3.76	22.10	11.37	4.92	1.4	84.58
171684	46.72	4.03	20.37	11.63	5.18	1.2	83.25
171685	55.05	2.09	21.16	9.02	4.26	1.6	79.98

4.3.1 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกและปริมาณเหล็กออกไซด์

ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกและปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก ดังรูปที่ 4.24 โดยได้ตรวจสอบความสัมพันธ์ของข้อมูลว่าดัชนีการเกิดฟองสแลกและปริมาณเหล็กออกไซด์มีความเกี่ยวข้องกันในระดับนัยสำคัญที่ 0.05 คำนวนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน $r = -0.5224$ ($p \text{ value} = 0.0127$) ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองสามารถอธิบายได้ดังนี้

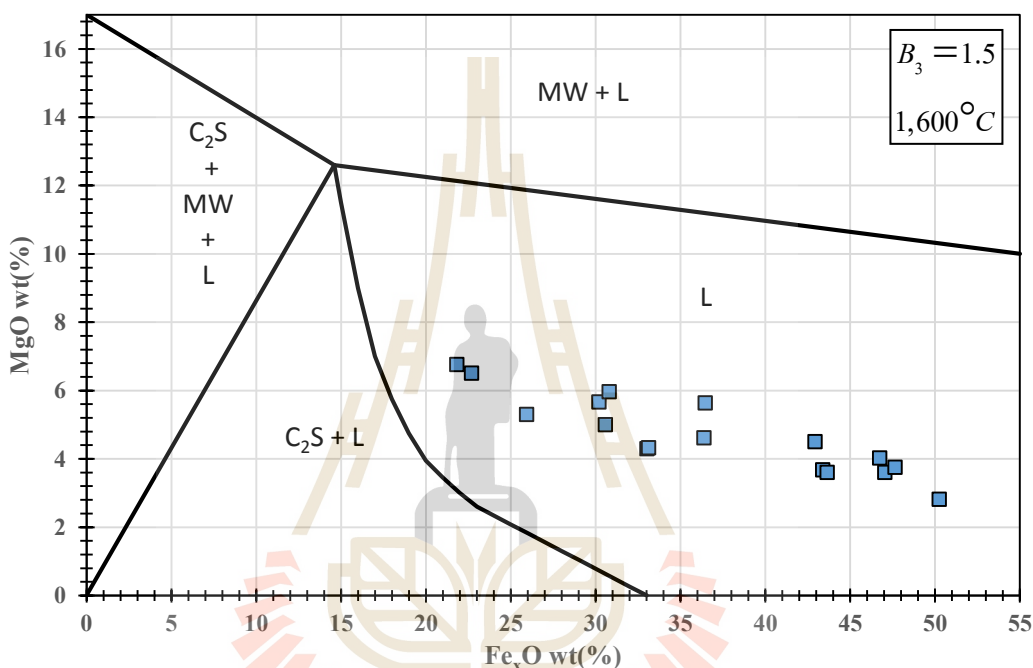
ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความสัมพันธ์ในแนวโน้มที่ลดลง กับปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก (ซึ่งเป็นฟลักซ์ออกไซด์) จากตารางที่ 2.2 กล่าวได้ว่าเมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกมีมากขึ้น ทำให้สแลกมีความหนืดลดลงและเป็นฟองได้ไม่ดี ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกจึงมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามหากปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกลดลง ทำให้สแลกมีความหนืดเพิ่มขึ้นและเป็นฟองได้ดี ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกจึงมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกและปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก

4.3.2 สถานะของฟองสแลกที่เกิดขึ้นและดัชนีการเกิดฟองสแลก

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 4.2 มาพล็อตลงใน Isothermal Solubility Diagram (ISD) เพื่อบอกสถานะของฟองสแลกที่เกิดขึ้นภายในเตา โดยได้ดัดแปลงภาพจากงานวิจัยของ Eugene B. Pretorius และคณะ (1998) ดังรูปที่ 4.25 จากรูป ฟองสแลกจากเตาหลอมที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างทั้ง 22 เตา อยู่ในบริเวณของเหลวทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกอยู่ที่ 84.25



รูปที่ 4.25 ส่วนผสมทางเคมีของสแลกบน Isothermal Solubility Diagram สำหรับเบสิกซิตี 1.5 ที่อุณหภูมิ $1,600^\circ\text{C}$ ($\text{C}_2\text{S} = \text{Ca}_2\text{SiO}_4$, MW = Magnesio-wustite, and L = Liquid)

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยผลวิเคราะห์สารประกอบในสแลกและค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก

บริเวณ	ค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบ					ค่าเฉลี่ยเบสิกซิตี	ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก
	Fe_xO	MgO	CaO	SiO_2	Al_2O_3		
Liquid	40.03	4.31	25.35	12.93	5.67	1.4	84.25

4.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางการประยุกต์ใช้งานผลการวิจัย

ข้อเสนอแนะของผลการทดลองของการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในวิทยานิพนธ์นี้ มีการดำเนินการและเก็บข้อมูลภายใต้สภาพการหลอมหนึ่งเท่านั้น เพื่อให้ดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความเหมาะสม หากนำแนวคิดของระบบตรวจวัดฟองสแลกนี้ไปใช้กับสภาพของเตาหลอมอื่น ๆ ที่เป็นไปได้ว่าอาจมีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านอื่นประกอบ รวมถึงทำการทดสอบปรับปรุงเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถนำผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ได้ดังนี้

1. การตรวจวัดการเกิดฟองสแลกด้วยดัชนีการเกิดฟองสแลกจากเตาหลอมเหล็กไฟฟ้าแบบอาร์คนี้ สามารถระบุถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างเตาได้
2. เป็นแนวทางในออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมการพ่นแก๊สออกซิเจนโดยอัตโนมัติของการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค
3. ยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนผลของดัชนีการเกิดฟองสแลกกับสภาวะสแลกที่เกิดขึ้น เพื่อเปรียบเทียบค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกกับสภาวะสแลกบริเวณอื่น ๆ ในกราฟ ISD

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาและออกแบบการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในระหว่างการผลิตเหล็กในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์ค โดยใช้หลักการในการตรวจวัดสัญญาณแรงดันอาร์คของเตาหลอมเหล็ก นำมาวิเคราะห์และแปลงข้อมูลสัญญาณให้เป็นดัชนีการเกิดฟองสแลกด้วยโปรแกรม LabVIEW ในสถานะที่สแลกมีส่วนผสมทางเคมีต่าง ๆ

จากผลการทดสอบกับตรวจวัดจริงในสถานประกอบการด้วยเครื่องมือในระบบตรวจวัดฟองสแลกประกอบด้วย NI 9225 และ cDAQ-9174 เป็นที่น่าสนใจว่าระบบตรวจวัดการเกิดฟองสแลกโดยแปลงใช้สัญญาณจากแรงดันให้เป็น ดัชนีการเกิดฟองสแลกสามารถที่จะสะท้อนถึงสถานะของฟองสแลกภายในเตาได้ โดยยิ่งฟองสแลกยิ่งหนา ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกยิ่งมาก ในทางตรงกันข้ามหากฟองสแลกเหลวหรือบางค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกก็จะน้อยลงเช่นกัน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้ดัชนีการเกิดฟองสแลกเป็นตัวชี้วัด สามารถระบุความแตกต่างในช่วงที่มีการทำฟองสแลก (ฟั่นแก้ออกซิเจน) และช่วงหยุดทำฟองสแลก (หยุดฟั่นแก้ออกซิเจน) ได้ โดยช่วงที่ทำฟองสแลกจะมีช่วงค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกอยู่ที่ร้อยละ 80-90 ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 84.35 และช่วงที่หยุดทำฟองสแลกจะมีช่วงค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกอยู่ที่ร้อยละ 60-80 ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 75.87

2. ความสัมพันธ์ของดัชนีการเกิดฟองสแลก และปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก มีความสัมพันธ์กันในระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความสัมพันธ์ทางลบกับปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกกล่าวได้ว่าเมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกมีมากขึ้น ทำให้สแลกมีความหนืดลดลงและเป็นฟองได้ไม่ดี ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกจึงมีค่าลดลง

3. ผลการใช้ค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกเพื่อบอกถึงสถานะสแลกภายในเตา โดยวิเคราะห์สถานะสแลกจาก Isothermal Solubility Diagram สำหรับเบสิกซีดี 1.5 ที่อุณหภูมิ 1,600 °C ฟองสแลกจากเตาหลอมที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างทั้ง 22 เตา อยู่ในบริเวณของเหลวทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกอยู่ที่ 84.25

รายการอ้างอิง

- Ávila, T.A., Freire, R.S., Silva, G.F.B.L., Borges, R.N., (2009). Design of slags compatible with refractory systems. **In: Proc. UNITECR**, Salvador.Brazil, 1–4
- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับ อุตสาหกรรม เหล็กและเหล็กกล้า. สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/IndustBasicKnowledge/Master_11.pdf)
- H. Pfeifer, M. Kirschen, (2002). Thermodynamic analysis of eaf energy efficiency and comparison with a statistical model of electric energy demand, **7th European Electric Steelmaking Conference**, At Venice
- Ameling, D., Petry, J., Sittard, M., Ullrich, W., and Wolf, J, (1986). Untersuchungen zur Schaumslaggenbildung im Elektrolichtbogenofen. **Stahl und Eisen** **3**, 45-50.
- A.P. Luz, T.A. Avila, P. Bonadia, V.C. Pandolfelli, (2011). Slag Foaming: Fundamentals, Experimental Evaluation and Application in the Steelmaking Industry. **refractories WORLDFORUM 3**
- Eugene Pretorius and Baker Refractories, (1998). Fundamentals of EAF and Ladle Slags and Ladle Refining Principles.
- Morales, R.D., Rubén Lule, G., Lopez, F., Camacho, J., Romero, J.A. (1995). The slag foaming practice in EAF and its influence on the steelmaking shop productivity. **ISIJ Inter.** **35** 1054–1062
- Ito, K., and Fruehan, R.J. (1989). Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: Part I. Foaming Parameters and Experimental Results. **Metallurgical and Materials** **20B**, 509-514.
- Ito, K., and Fruehan, R.J. (1989). Study on the Foaming of CaO-SiO₂-FeO Slags: Part II. Dimensional Analysis and Foaming in Iron and Steelmaking Processes. **Metallurgical and Materials** **20B**, 515-521.
- Stadler, S.A. C., Eksteen, J.J., Aldrich C., (2007). An experimental investigation of foaming in acidic, high FexO slags. **Minerals Engineering** **20**, 1121–1138

- Jiang, R.; Fruehan, R.J.: (1991) Slag foaming in bath smelting. **Metallurg. & Mat. Trans. B. 22**, 481–489
- Zhang, Y.; Fruehan, R.J. (1995): Effect of the bubble size and chemical reactions on slag foaming. **Metallurg. & Mat. Trans. B. 26**, 803-812
- Carlos, J., and Pérez, F., (2004). Monitoring of the energy consumption working points in the electric arc furnace. **Master’s Thesis, Faculty of Engineering. Pontificia Universidad Javeriana,**
- Sergey V. Komarov *, Mamoru Kuwabara, Masamichi Sano, (2000). Suppression of slag foaming by a sound wave , **Ultrasonics Sonochemistry 7**, 193-199
- Malmberg, D., Hahlin, P., and Nilsson, E., (2007). Microwave Technology in Steel and Metal Industry, **an Overview. ISIJ International 47**,: 533–538.
- ปวีณ มหาสุวีระชัย, (2541). ระบบตรวจสอบสังเกตสแลกที่เป็นฟองในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าแบบคอนสตีล, **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย**
- Eugene B. Pretorius and Robert C. Carlisle. (1998) Foamy Slag Fundamentals and their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking, **EAF Conference**



ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค XRF

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

17/5/2560 11:18:30

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171664

R.M.S.:	0.005
Result status:	
Sum before normalization:	45.9 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	1.100	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	4.622	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	6.137	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	14.989	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.271	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	27.557	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.729	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.083	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	6.096	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	36.366	%	Calculate	BgC;LoR;
Ni	Calibrated	NiO	0.051	%	Calculate	BgC;



รูปที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171664

25/5/2560 10:18:14

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171665

R.M.S.:	0.015
Result status:	
Sum before normalization:	41.8 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.635	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	6.505	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	7.478	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	16.418	%	Calculate	BgC;
Ca	Calibrated	CaO	32.251	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	1.020	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.930	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	10.085	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	22.678	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171665

25/5/2560 10:21:50

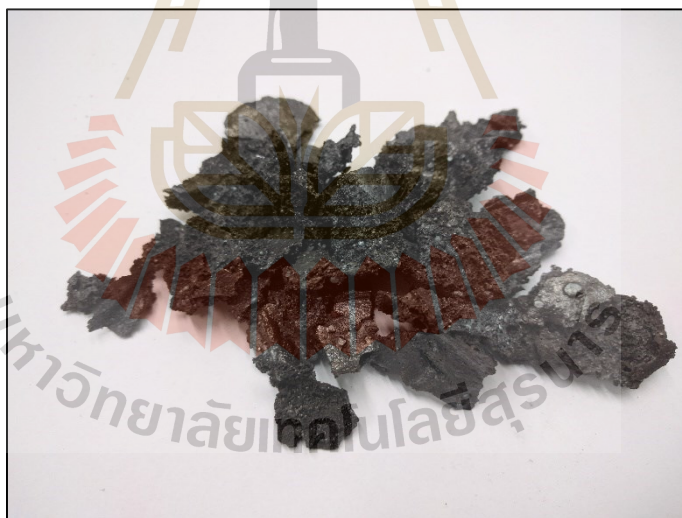
PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171666

R.M.S.:	0.009
Result status:	
Sum before normalization:	29.8 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na ₂ O	0.505	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	5.297	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al ₂ O ₃	6.253	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO ₂	13.901	%	Calculate	BgC;
Ca	Calibrated	CaO	33.211	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO ₂	1.220	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr ₂ O ₃	3.405	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	10.288	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe ₂ O ₃	25.920	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-3 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171666

25/5/2560 10:30:27

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171667

R.M.S.:	0.024
Result status:	
Sum before normalization:	32.5 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.370	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	5.670	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	7.040	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	15.373	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.338	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	25.442	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	1.246	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	3.709	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	10.631	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	30.182	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-4 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171667

25/5/2560 10:32:35

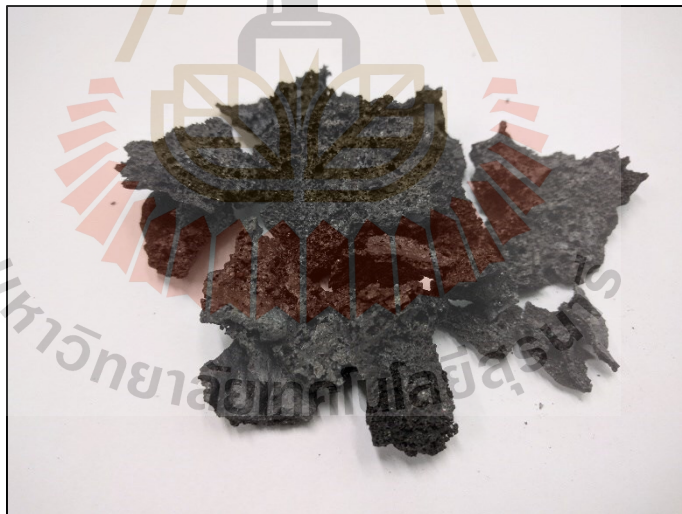
PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171668

R.M.S.:	0.004
Result status:	
Sum before normalization:	37.7 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.482	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	4.299	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	6.196	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	13.518	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.281	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	30.881	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	1.169	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.491	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	7.671	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	33.013	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-5 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171668

25/5/2560 10:36:11

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171669

R.M.S.:	0.004
Result status:	
Sum before normalization:	37.8 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.744	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	4.328	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	6.192	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	13.257	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.314	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	30.565	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.935	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.544	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	8.015	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	33.105	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-6 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171669

25/5/2560 10:38:14

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171670

R.M.S.:	0.019
Result status:	
Sum before normalization:	42.4 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na ₂ O	0.368	%	Calculate	BgC;
Mg	Calibrated	MgO	5.638	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al ₂ O ₃	5.893	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO ₂	13.656	%	Calculate	BgC;
Ca	Calibrated	CaO	28.555	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO ₂	0.755	%	Calculate	BgC;
Cr	Calibrated	Cr ₂ O ₃	2.064	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	6.629	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe ₂ O ₃	36.444	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-7 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171670

25/5/2560 10:40:12

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171671

R.M.S.:	0.014
Result status:	
Sum before normalization:	38.9 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na ₂ O	0.243	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	6.766	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al ₂ O ₃	6.901	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO ₂	16.023	%	Calculate	BgC;
Ca	Calibrated	CaO	32.793	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO ₂	1.159	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr ₂ O ₃	4.059	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	10.246	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe ₂ O ₃	21.811	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-8 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171671

25/5/2560 10:43:46

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171672

R.M.S.:	0.006
Result status:	
Sum before normalization:	40.2 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.232	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	5.967	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	6.286	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	14.380	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.347	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	29.395	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.957	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	3.316	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	8.331	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	30.788	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-9 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171672

25/5/2560 10:46:03

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171673

R.M.S.:	0.021
Result status:	
Sum before normalization:	42.1 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.289	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	3.680	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	6.035	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	11.717	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.273	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	22.626	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	1.003	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	3.134	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	7.873	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	43.370	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-10 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171673

25/5/2560 10:48:21

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171674

R.M.S.:	0.006
Result status:	
Sum before normalization:	40.0 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.316	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	4.999	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	6.027	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	14.293	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.384	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	31.544	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.950	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.811	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	8.101	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	30.574	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-11 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171674

25/5/2560 10:58:12

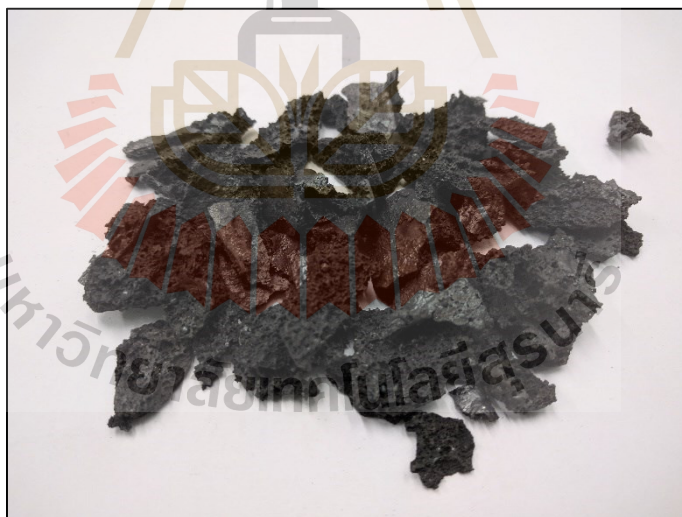
PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171675

R.M.S.:	0.026
Result status:	
Sum before normalization:	43.4 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.242	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	3.903	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	4.928	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	12.323	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.317	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	24.396	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.846	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.557	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	6.976	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	43.512	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-12 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171675

25/5/2560 11:06:01

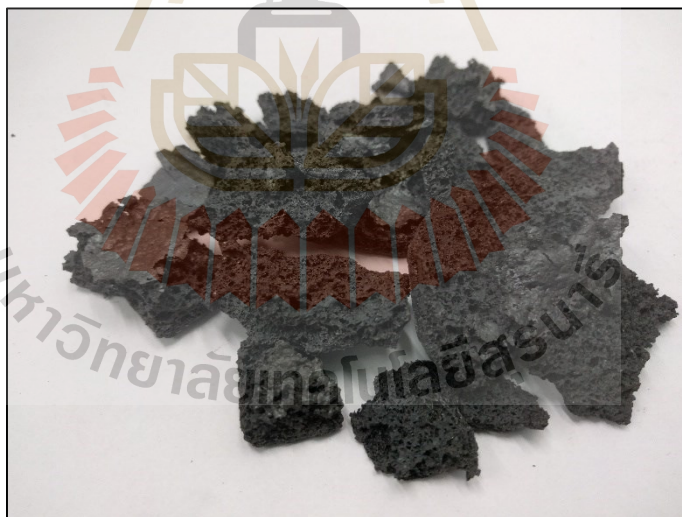
PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171676

R.M.S.:	0.034
Result status:	
Sum before normalization:	48.3 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	1.205	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	3.016	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	5.866	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	15.893	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.448	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	18.668	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.658	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.369	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	5.882	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	45.994	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-13 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171676

25/5/2560 11:08:23

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171677

R.M.S.:	0.016
Result status:	
Sum before normalization:	39.4 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.276	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	3.605	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	4.679	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	11.004	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.283	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	23.579	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.746	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.032	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	6.764	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	47.032	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-14 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171677

25/5/2560 11:10:54

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171678

R.M.S.:	0.016
Result status:	
Sum before normalization:	41.3 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.217	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	2.817	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	4.188	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	10.255	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.279	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	22.867	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.720	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.086	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	6.333	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	50.239	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-15 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171678

25/5/2560 11:13:06

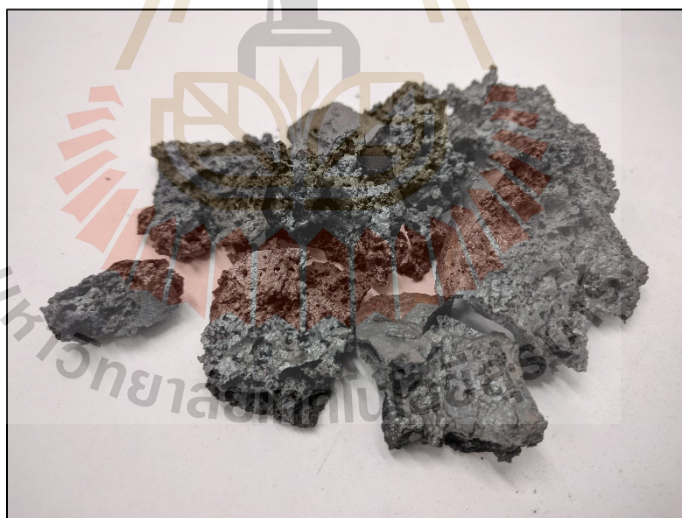
PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171679

R.M.S.:	0.018
Result status:	
Sum before normalization:	40.7 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.204	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	2.814	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	4.240	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	9.596	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.223	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	16.886	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.681	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	1.996	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	5.736	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	57.623	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-16 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171679

25/5/2560 11:16:16

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171680

R.M.S.:	0.016
Result status:	
Sum before normalization:	46.2 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.157	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	2.909	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	4.262	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	9.765	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.228	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	17.929	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.673	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.025	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	5.902	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	56.150	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-17 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171680

25/5/2560 11:18:10

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171681

R.M.S.:	0.004
Result status:	
Sum before normalization:	42.6 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.201	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	4.507	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	5.947	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	13.132	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.327	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	21.578	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.851	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.697	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	7.854	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	42.907	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-18 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171681

25/5/2560 13:50:12

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171682

R.M.S.:	0.018
Result status:	
Sum before normalization:	48.4 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.155	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	3.611	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	5.861	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	12.844	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.335	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	23.333	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.889	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.509	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	6.831	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	43.632	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-19 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171682

25/5/2560 13:53:28

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171683

R.M.S.:	0.012
Result status:	
Sum before normalization:	45.4 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.088	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	3.759	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	4.921	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	11.373	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.282	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	22.104	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.844	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	2.325	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	6.666	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	47.638	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-20 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171683

25/5/2560 13:55:41

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171684

R.M.S.:	0.011
Result status:	
Sum before normalization:	41.0 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.081	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	4.033	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	5.180	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	11.629	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.270	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	20.371	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.862	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	3.109	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	7.746	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	46.720	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ผนวก ก-21 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171684

25/5/2560 13:57:44

PANalytical

Page 1

Quantification of sample 171685

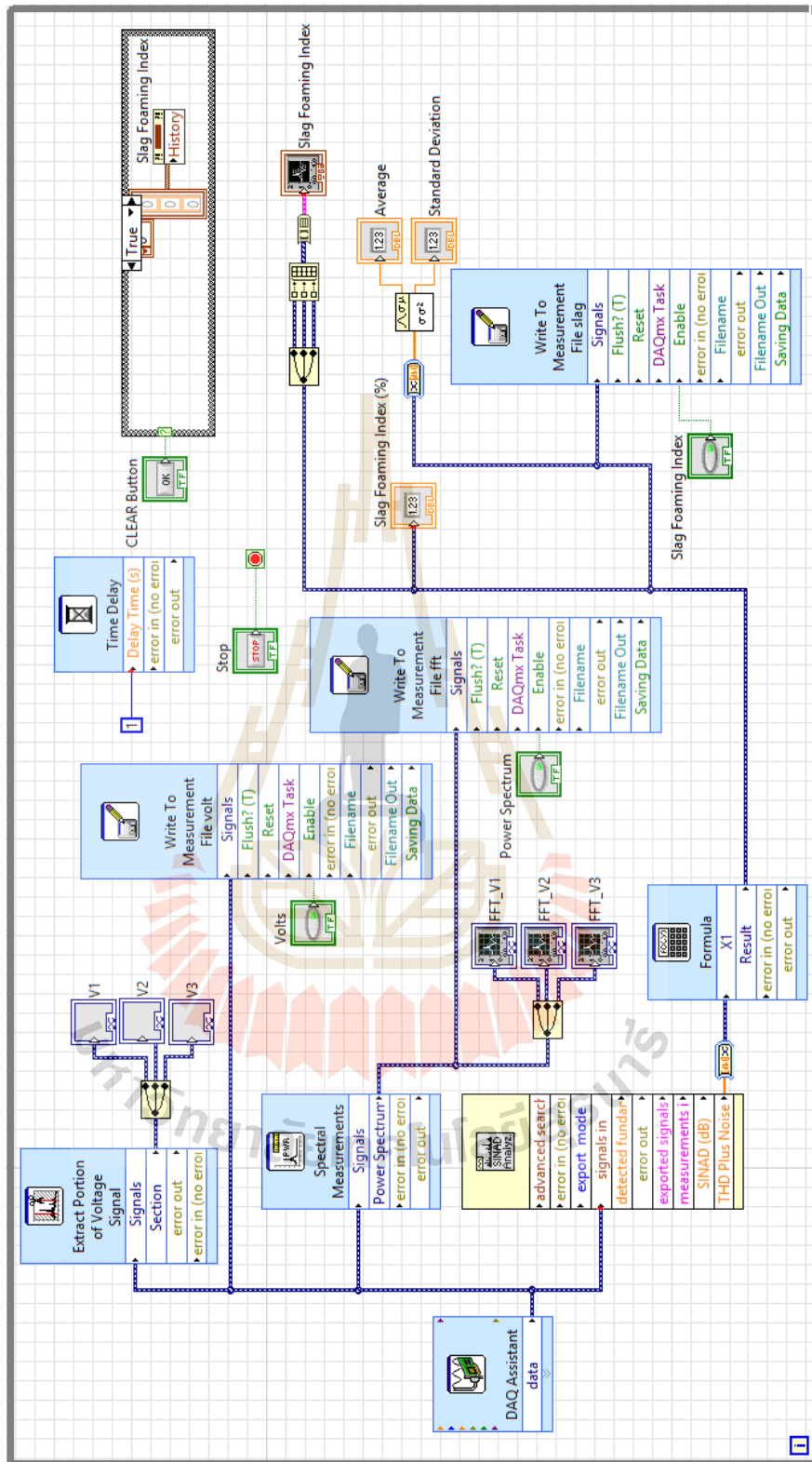
R.M.S.:	0.009
Result status:	
Sum before normalization:	44.5 %
Normalised to:	100.0 %
Sample type:	Pressed powder
Initial sample weight (g):	3.000
Weight after pressing (g):	10.000
Correction applied for medium:	No
Correction applied for film:	No
Used Compound list:	Oxides
Results database:	omnian he
Results database in:	c:\panalytical\superq\userdata

Analyte	Calibration status	Compound formula	Concentration	Unit	Calculation method	Status
Na	Calibrated	Na2O	0.135	%	Calculate	BgC;LoR;
Mg	Calibrated	MgO	2.090	%	Calculate	BgC;
Al	Calibrated	Al2O3	4.260	%	Calculate	BgC;
Si	Calibrated	SiO2	9.017	%	Calculate	BgC;
P	Calibrated	P2O5	0.264	%	Calculate	BgC;LoR;
Ca	Calibrated	CaO	21.157	%	Calculate	BgC;
Ti	Calibrated	TiO2	0.676	%	Calculate	BgC;LoR;
Cr	Calibrated	Cr2O3	1.956	%	Calculate	BgC;
Mn	Calibrated	MnO	4.941	%	Calculate	BgC;LoR;
Fe	Calibrated	Fe2O3	55.505	%	Calculate	BgC;LoR;



รูปที่ ก-22 ผลการวิเคราะห์จาก XRF ของสแลกที่เตาหลอม 171685





รูปที่ ข-2 โปรแกรมต้นฉบับที่ใช้ในการตรวจวัดการเกิดฟองสแลก



ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

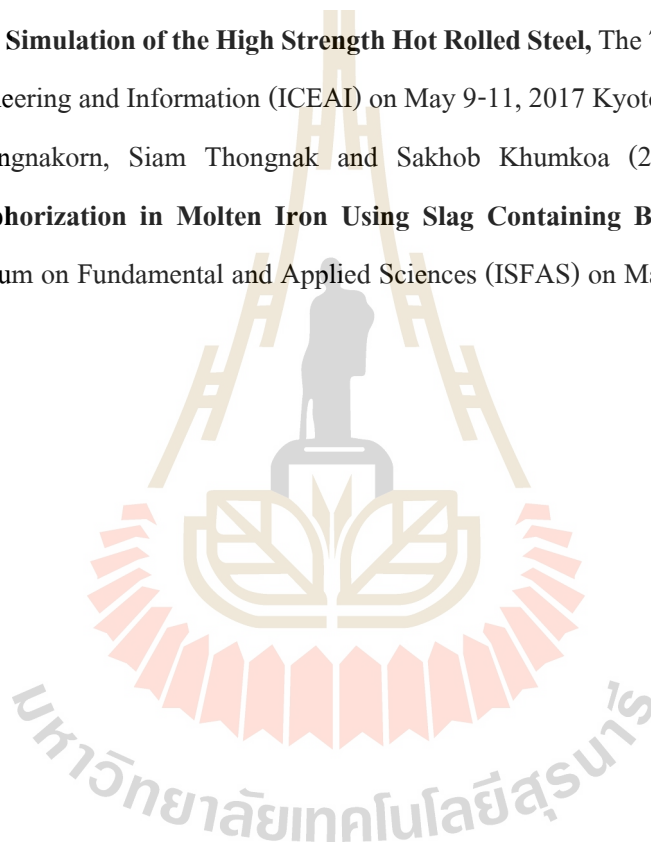
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Siam Thongnak, Sakhob Khumkoa, Tanongsak Yingnakorn and Loeslakhana Srikhang (2017). **A Study on Measuring Method for Slag Foamin in Electric Arc Furnace**, The 7th International Congress on Engineering and Information (ICEAI) on May 9-11, 2017 Kyoto, Japan.

Thanawit Jindangam, Sakhob Khumkoa, Vitoon Uthaisangsuk, and Siam Thongnak (2017). **Finite Element Simulation of the High Strength Hot Rolled Steel**, The 7th International Congress on Engineering and Information (ICEAI) on May 9-11, 2017 Kyoto, Japan.

Tanongsak Yingnakorn, Siam Thongnak and Sakhob Khumkoa (2016). **The Kinetics of Dephosphorization in Molten Iron Using Slag Containing BaO**, the 4th International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) on March 29-31, 2016, Kyoto, Japan.



ICEAI-0031**A Study on Measuring Method for Slag Foaming in Electric Arc Furnace****Siam Thongnak^a, Sakhob Khumkoa^b, Tanongsak Yingnakorn^c, Loeslakkhana Sriksang^d**School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of
Technology, ThailandE-mail: fireyen_siam@hotmail.com^a, sakhob@sut.ac.th^b, arm.tarzan@gmail.com^c,
aswerty22@hotmail.com^d**Abstract**

The reduction of energy consumption and production improvement of steelmaking in electric arc furnace can be achieved by efficient management and control of the furnace operation. One technique to improve the thermal efficiency and to reduce energy consumption of electric arc steelmaking is to control the slag foaming that covers the molten steel in the furnace. Generally, estimation of slag foaming is done by visual and acoustic observation by operators, or sound measurement during arc operation. The accuracy of the observation of those techniques depends on the individual experience of the operator. To avoid uncertainty of the slag foaming by the furnace operator, a new method for slag foaming detection is taken into consideration. This study presents a new method for slag foaming observation during the steelmaking process in electric arc furnace by giving consideration to arc voltage analysis. To gain electrical signals from the electric arc furnace, the specific device equipped with a data collector was installed and connected with the electrical system of the arc furnace. Electrical signals were collected during real industrial furnace operation of the steelmaking process. Then the signals were analyzed and the arc voltage in correlation with slag foaming index were interpreted by using LabVIEW software. It was found that there is a strong (negative) correlation between the slag foaming index and iron oxide content which is significant at the 0.05 level. Moreover, the developed detector can indicate slag foaming in molten slag. Based on this analysis, it may possible to apply this proposed method for slag foaming detection in the steelmaking arc furnace.

Keywords: Steel Making, Electric Arc Furnace, Arc Voltage, Slag Foaming Index

1. Background/Objectives and Goals

Slag foaming in electric arc furnace steelmaking has many benefits such as reduction of energy consumption and production improvement as shown in Fig. 1. As shown in Fig. 1(b) the efficiency of heat transfer from the arc jet to molten steel is less when the molten steel has no cover by foam slag. As indicated in Fig. 1(c)-1(g), the efficiency of heat transfer is improved with increasing the thickness of slag foaming.

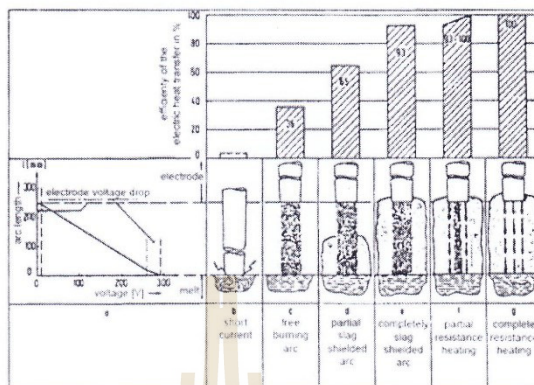


Fig. 1: Relation between the thickness of slag foaming and efficiency of the electric heat transfer from the arc to molten steel [1]

The basics of slag foaming in electric arc steelmaking are explained shortly. Slag foaming is initiated by injecting oxygen and carbon in molten steel to as electric arc furnace as shown in Fig. 2. FeO is formed by reaction (1).

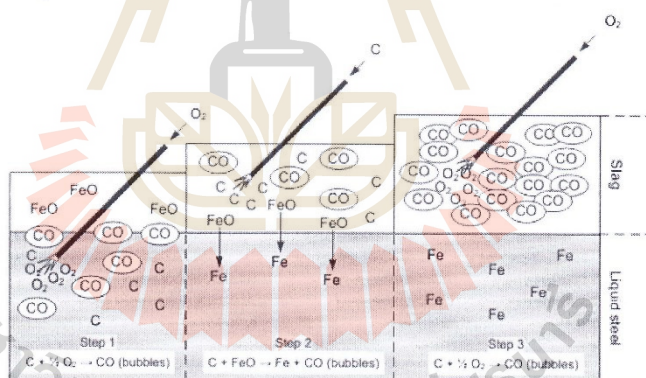


Fig. 2: Slag foaming model in EAF [2]

Carbon is consequently injected into molten steel and CO gas is formed as shown in reaction (2). CO gas is the key factor of slag foaming behavior and more intensively the amount of CO

gas become from the reaction (3)



In reaction (2), the gas is formed in a layer of slag foaming that float to the surface of molten steel but the reaction (1) and (3) takes place in molten steel. However, other interfacial reaction between molten steel and foam slag will be occur like the reaction (4) and (5)



Steelmaking factors which have an influence on slag foaming are amount of FeO prior to injection of carbon and oxygen, injection of oxygen and carbon, slag basicity, temperature of molten steel.

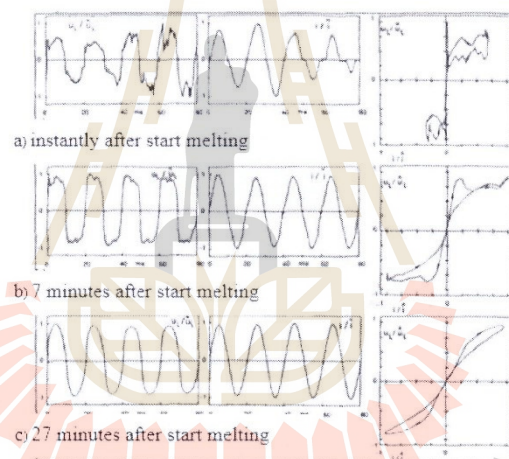


Fig. 3. Time records of arc voltage, current and arc characteristics [7]

Slag foaming behavior in electric arc furnace has been vigorously studied [3, 4]. Monitoring of slag foaming by installation of electronic devices in the roof of furnace is one of industrial practices. By this method, sound wave signals inside the furnace will be analyzed. However, the quality of signal can be interfered with by the furnace environment e.g. high temperature, vibration and fume dust. To avoid such an interference factor, a new technique has been

recently developed. This technique is indirect measurement of slag foaming by analysis of the furnace arc voltage [5-7]. The voltage of the furnace will be detected and further analyzed by using computer software, an example of the technique is shown in Fig. 3.

Based on this technique, the relationship between arc voltage and electric current during the different stages of melting will be analyzed. When the melting started, the rapid movement of the arc on the scrap occurred and the first signal of the melting process is shown in Fig. 3(a). It is observed that the configuration of arc voltage and current is unstable. This makes a lot of harmonics of both arc voltage and current. The graph is distorted from the sinusoidal wave. Most scrap is melted after 7 minutes of the commencement of melting, thus the movement of the arc is more stable. The configuration of the arc voltage and current is more stable, Fig. 3(b). As indicated in the figure, the harmonics of both arc voltage and current are reduced. After 27 minutes of the commencement of melting, the movement of the arc is stable. Thus the configuration of the arc voltage and current is stable and appeared as sinusoidal wave, Fig. 3(c). It can be observed that harmonics of both arc voltage and current are greatly reduced. This indirect measurement of slag foaming by analyzing the relationship of arc voltage and current is reliable. Thus this technique has been applied in electric arc furnace for the purpose of slag foaming monitoring. However, the signal configuration of arc voltage and current will be effected by metallurgical parameters of electric arc steelmaking e.g. quality and amount of raw material. Thus the parameters of steelmaking practice and signal of arc voltage and current will be interpreted together. So, this study is interested in the slag foaming detection by interpretation of the relationship between arc voltage-current signal and steelmaking practice by electric arc furnace.

2. Methods

This study deals with detection of slag foaming by signal analysis of arc voltage. The sequence of the signal analysis composes of 4 main steps as shown in Fig. 4. Description of these steps are as follows.

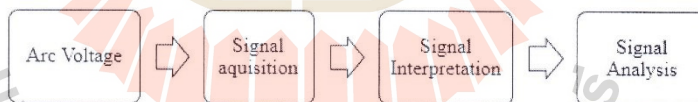
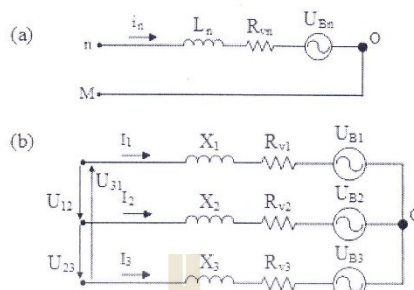


Fig. 4: A block diagram of slag foaming detector

2.1 Arc Voltage

Arc voltage and current has changed over time, which can reflect the behavior of the arc. The more stable the signal, the greater the harmonics are reduced. The equivalent circuit of the electric arc furnace is shown in Fig. 5.



(a) Simplified linearized equivalent circuit, (b) The three phase arc furnace

Fig. 5: Equivalent circuit of electric arc furnace

From Fig. 5 the explanation of each symbol are as follow.

U_{12}, U_{23}, U_{31} = Furnace transformer secondary voltage

$R_{vn} + jX_n$ = Furnace secondary circuit impedance

U_{Bn} = Arc voltage

I_n = Phase current

n = 1, 2, 3

The arc is non-linearity and the current of system has the harmonics due to instability of the arc. The current will flow through the furnace transformer impedance and furnace secondary circuit impedance. The voltage drop which occurs will be a harmonics included. The voltage is distorted from the sinusoidal wave.

2.2 Signal Acquisition

The layout of apparatus installation and signal acquisition is shown in Fig. 6. Three-phase voltage signal is detected at furnace transformer secondary voltage. The acquisition of signal is carried out by using a detection apparatus. The signal will be further interpreted by computer program.

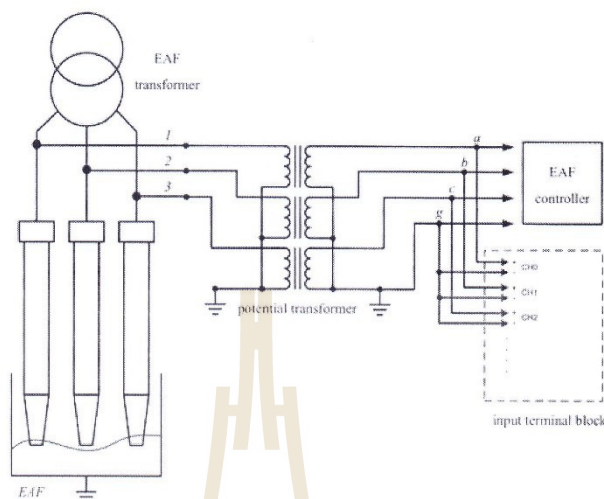


Fig. 6: Layout of apparatus' installation and signal acquisition

2.3 Signal Interpretation

The voltage signal will be interpreted as frequency spectrum by the computer program. The parameter that is used to indicate the slag foaming status in electric arc furnace is total harmonic distortion plus noise of the arc voltage. Total Harmonic Distortion plus Noise (THD+N) is a ratio of RMS amplitudes as shown in equation (6)

$$(THD+N)_{\text{voltage}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 + V_{\text{noise}}^2}{V_1^2}} \quad (6)$$

where V_1 = Fundamental component
 V_n = The root mean square (RMS) voltage of the n^{th} harmonics
 V_{noise} = The root mean square (RMS) voltage of noise
 n = Harmonics order

According to THD+N, the slag foaming index can be expressed as equation (7).

$$\text{Slag Foaming Index} = 1 - (THD+N)_{\text{voltage}} \quad (7)$$

As indicated in equation (7) higher value of THD+N means lower slag index foaming. This means the thin layer of slag foaming appear or refer to non-slag foaming. In opposite will be refer to signs of slag foaming.

2.4 Signal Analysis

All detected signals are analyzed by using LabVIEW software. The features of this software are controlling and analyzing of the signal data. User interface of the program is shown as example in Fig. 7.

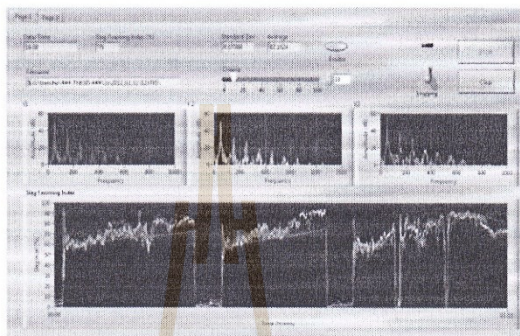


Fig. 7: User interface of LabVIEW software

3. Results

3.1 Slag Foaming Index

The detected signal will be displayed in the function of frequency spectrum of voltage at V1, V2 and V3 by using equation (6), Fig. 8. Fig. 9, it is found that the change of harmonics and interharmonics are clearly displayed. It is shown in Fig. 9(a) that at the frequency of 0-2,000 Hz, the harmonic is 0-20 dB when the arc is covered by foam slag. While in Fig. 9(b) showed that the harmonic is below 10 dB, when the arc is not covered by foam slag. Fig. 10 shows the slag foaming status which is transformed from THD+N.

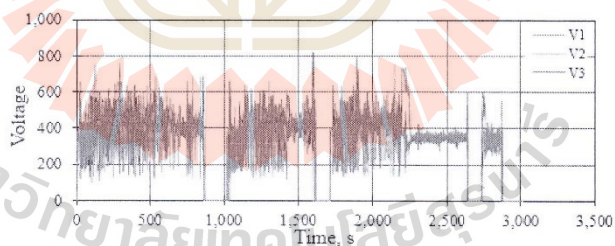
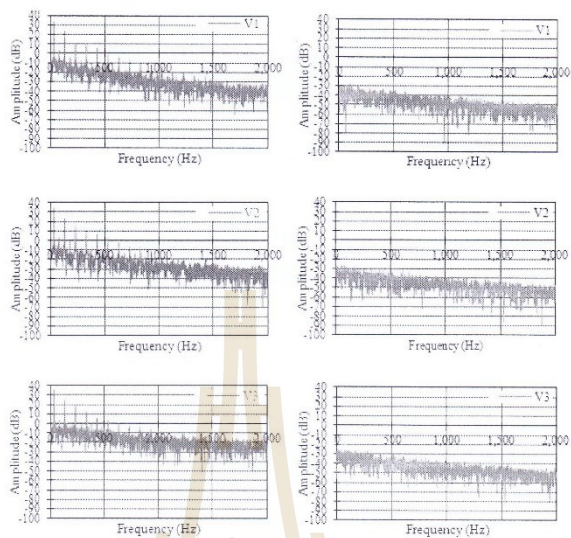


Fig. 8: The three-phase arc voltage of electric arc furnace



(a) The arc is not covered by slag foaming / (b) The arc is covered by slag foaming

Fig. 9: Frequency spectrum

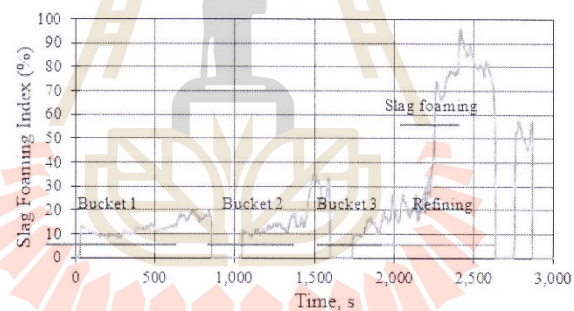


Fig.10: Slag foaming index from electric arc furnace

For this study, slag foaming index from equation (7) was only based on electrical parameter. Therefore, the additional experiment is carried out in order to investigate the correlation of other effects.

3.3 Comparison of Chemical Analysis

The relation between slag foaming index and slag foaming status is interested as well.

Slag foaming index with chemical composition such as FeO, MgO and basicity of slag foaming is also proposed. The relation between slag foaming index and FeO-content is shown as example in Fig. 11. As indicated in the figure, Pearson correlation coefficient (r) is -0.7043 (Sig. = 0.05, p value 0.0231). Average slag foaming index has a negative relation with FeO-content, in other words, FeO-content increase causes viscosity of slag foaming decrease then the average slag foaming index decrease.

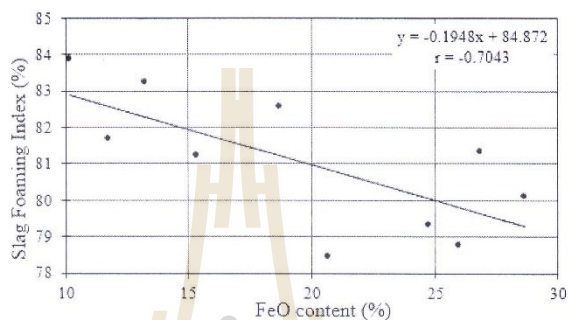


Fig. 11: Relation between slag foaming index and FeO-content

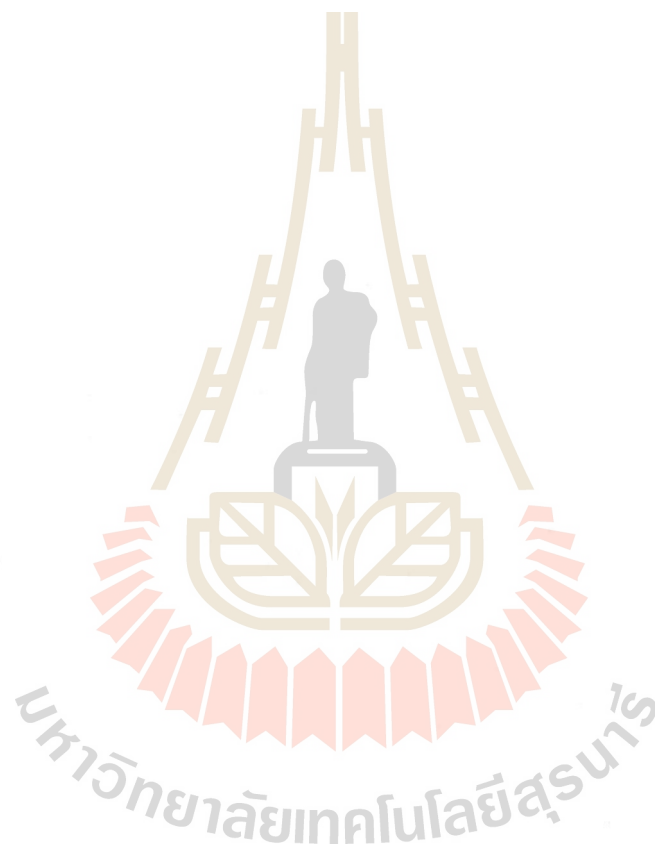
4. Conclusions

Based on the parameters of this study, it was found that there is a strong (negative) correlation between the slag foaming index and iron oxide content which is significant at the 0.05 level. Moreover, the developed technique by installation of signal detector from power spectrum and slag foaming index can indicate slag foaming in electric arc steelmaking process. It is expected that this technique of slag foaming detection can be applied in the electric arc steelmaking process.

5. References

- [1] Ávila, T.A.; Freire, R.S.; Silva, G.F.B.L., Borges, R.N. (2009), Design of slags compatible with refractory systems. In: Proc. UNITECR, Salvador, Brazil, pp.1-4
- [2] Ameling, D., Petry, J., Sittard, M. (1986), Ullrich, W., and Wolf, J. Untersuchungen zur Schaumslagbildung im Elektrolichtbogenofen. Stahl und Eisen 3: 45-50.
- [3] Sergey V. K., Kuwabara, M., Sano, M. (2000), Suppression of slag foaming by a sound wave, Ultrasonics Sonochemistry 7, 193-199
- [4] Malmberg, D., Hahlin, P., and Nilsson, E. (2007), Microwave Technology in Steel and Metal Industry, an Overview. ISIJ International 47, 4: 533-538
- [5] Mahasuwirachai, P. (1998), A detector for slag foaming in consteel electric arc furnace, Master's Thesis, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand

- [6] Sirimanuwat, K. (2012), Design and construction of a detector for slag foaming in electric arc furnace using arc voltage analysis, Master's Thesis, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand
- [7] Carlos, J., and Pérez, F. (2004), Monitoring of the energy consumption working points in the electric arc furnace. Master's Thesis, Faculty of Engineering, Pontificia Universidad Javeriana



ICEAI-0043

Finite Element Simulation of the High Strength Hot Rolled Steel

Thanawit Jindangam^a, Sakhob Khumkoa^b, Vitoon Uthaisangsuk^c, Siam Thongnak^d

^{a,b,d} School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

^c Mechanical Engineering Department, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

E-mail: mothanaputta19@gmail.com^a, sakhob@sut.ac.th^b, vitoon.uth@kmutt.ac.th^c, fireyen_siam@hotmail.com^d

Abstract

This study deals with the application of Finite Element Simulation to predict the evolution of the microstructure of high strength hot rolled steel produced by thermal treatment and the thermomechanical treatment process. This study is divided into 2 parts: first is rolling simulation of steel by Deformation Dilatometer, second is predicting the steel characteristics under rolling conditions using Finite Element Simulation software. Rolling simulation of steel grade Nb-V low carbon microalloyed steel with various rolling parameters such as deformation degree, coiling temperature, and holding time at a constant temperature subsequently deformed with the aid of Deformation Dilatometer. The test conditions similarly to Deformation Dilatometer were subsequently used as the input parameters in DEFORM 2D Finite Element Simulation commercial software. The results from Deformation Dilatometer testing and from the software were compared to each other. The testing results of Deformation Dilatometer will express as continuous cooling transformation (CCT) diagram as well as time temperature transformation (TTT) diagram of tested steel under rolling conditions. Based on testing conditions of this study, it was found that calculation of CCT diagram by the software showed the results similar to the diagram obtained from Deformation Dilatometer testing. However, an error of full rolling calculation by the software has occurred, it may due to incorrect input parameters and then further investigation is required. Effects of all rolling parameters will be inputted to the software in order to simulate the steel behavior under rolling conditions.

Keywords: Advanced High Strength Steel, Hot Rolling of Steel, Thermomechanical Treatment Process, Finite Element Simulation

1. Background/Objectives and Goals

The current demand of advanced high-strength steels (AHSS) in the automotive industry has increased. This type of steel is characterized by high tensile strength and remarkable ductility. This group of steels are not intrinsically lighter than other steels, but they are strong enough that thinner gages can be used to reduce vehicle weight [1]. Advanced high-strength steels

grades are produced by controlling the cooling rate from the austenite phase or the ferrite-austenite two-phase region to room temperature. In production, this heat treatment is done on the run-out table of the hot mill or in the cooling section of the continuous annealing furnace. This production is known as thermomechanical processing and intercritical annealing [2, 3]. In metallurgical point of view, continuous cooling transformation-CCT, and time and temperature transformation-TTT of microstructure development or phase change of steel are the basic tool to control the final microstructure of the steel produced. Then the final microstructure will determine the different mechanical properties and grades of steel. To study the parameters of microstructure change of steel under hot rolling process, the conventional experiment has been done by using hot tensile test aggregate. Later the experiment was performed by using Dilatometer Deformation equipment. By careful control of the experiments, their results can be used to explain the behavior of phase transformation of steel under hot rolling process. In the present, the finite element method is developed and is widely used in many engineering fields. In this study, the effects of hot rolling parameters such as deformation degree, coiling temperature, and holding time on microstructure development of steel will be investigated. The laboratory scale experiment will be carried out by using Dilatometer Deformation equipment to gain the information of testing with a real steel sample. Moreover, the testing parameters of laboratory scale experiment will be further simulated by using DEFORM 2D Finite Element Simulation software. The results of the two methods will be compared with each other. The goal of the study is to develop and tune the simulation method for predicting the microstructure of advance high strength steel under hot rolling conditions.

2. Methods

2.1 Testing Sample

As-cast slab of Nb-V microalloyed low carbon steel is used as master sample. The microstructure of the sample as shown in Fig. 1 consist of coarse grains of ferrite and pearlite. The chemical composition of the steel is shown in Table 1. The as-received specimen is soaked in the heating furnace of 1200°C for 2 hours in order to homogenise the microstructure. The specimen is subsequently cooled down in the furnace to room temperature. Later the specimen was machined to prepare the test sample suited for CCT diagram investigation and for hot rolling simulation with Deformation Dilatometer. The specimen for CCT diagram investigation is 4 mm in diameter and 10 mm long, while the specimen for hot rolling simulation is 5 mm in diameter and 10 mm long.

Table 1: Chemical composition of the test steel

Element	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V	Cu	Al	Nb	Ti
wt.%	0.08	1.48	0.28	0.001	0.017	0.28	0.02	0.05	0.02	0.04	0.06	0.02

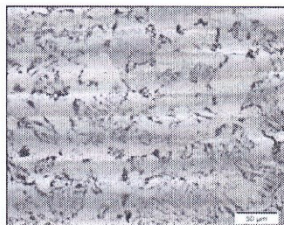


Fig. 1: Microstructure of specimen used in this research

2.2 CCT Diagram Development

(a) By Deformation Dilatometer

To develop the CCT diagram of the test steel, the test procedure with Deformation Dilatometer was carried out. The specimen was installed in the equipment and then was heated up with heating rate of 10°C/s to 950°C . The specimen was held at this temperature for 15 seconds and was subsequently cooled to room temperature with a different cooling rate of 1000, 200, 100, 40, 10, 8, 6, 4 and 0.8°C/s , as shown in Fig. 2. Fig. 3 shows an example of the cooling test and this type of graph is the so-called dilatation graph. It shows the relationship between the change in length of the specimen when its temperature changes. The changing point of the cooling graph indicated the change of phase or phase transformation has occurred. The changing point of phase transformation of all tests with different cooling rates was documented and the microstructure of all test specimens was further examined by optical microscope. Finally the CCT diagram will be created by a combination of phase transformation data of different cooling test. This diagram will determine the suitable temperature and time of ferrite transformation.

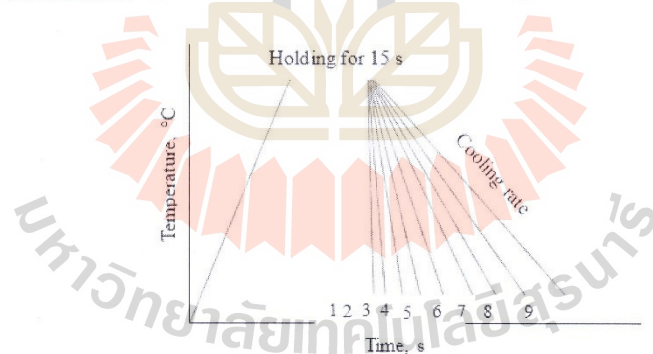


Fig. 2: Schematic diagram of continued cooling test to determine CCT diagram

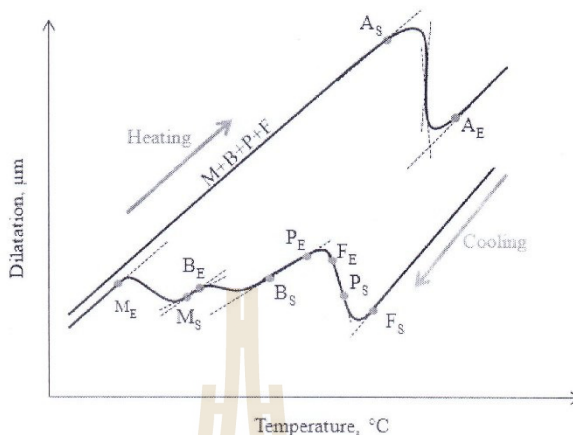


Fig. 3: Dilatation graphs of starting and ending phases of transformation

(b) By Finite Element Software

2D-Axisymmetric mode of DEFORM 2D software was applied to simulate the continuous cooling of test steel. All input parameters are the same as the testing with Deformation Dilatometer but additional cooling rates with 500, 2, 0, 0.1, 0.05, 0.03 and 0.01°C/s were added. To predict the development of microstructure or phase transformation, 3 models of finite element were employed. First, diffusion (simplified) model is applied to predict the phase transformation behavior of ferrite, bainite and martensite to austenite in heating process. Second, martensitic (function) model is applied to predict the phase transformation behavior of austenite to martensite during cooling. This model is a kind of diffusionless model [4, 5] and its explanation is shown in equation (1). Based on this study the simulation is considered in only the part of thermal treatment therefore the calculation model is reduced to equation (2). The term ψ_1 and ψ_4 will be calculated by using data from TTT diagram. However, the TTT diagram was created beforehand by using JMatPro software. Data of tested steel from elsewhere such as chemical composition of steel, grain size of austenite by 118 microns and transformation temperature of austenite by 867°C were inputted to the program in order to develop the diagram [6]. Based on the data of tested steel and simulation conditions of this study the calculated TTT diagram is shown in Fig. 4. It can be observed in the diagram that the temperature of martensite started to occur at 442.6°C. At temperature of martensite start the term of ξ_M will be set as 0. When the temperature is lower, the martensite will be more transformed for example, martensite is already transformed for 90% at 335.1°C. In later case the term ξ_M will be set as 0.9. The value of ξ_M is put into equation (2) and yield the term ψ_1 and ψ_4 of 0.0216 and -9.498, respectively. And third, diffusion (TTT curves) model is applied to predict the phase

transformation behavior of austenite to ferrite, pearlite and bainite during cooling. The volume fraction of new phase ξ_i (when i is ferrite, pearlite or bainite) will be calculated by follow the Avrami equation [7, 8]. The term of ξ_i is a function of time at constant temperature constant as shown in equation (3). This equation can be calculated by using the information from TTT diagram, term k and n are the calculated product from the diagram. Later, CCT diagram was develop by input the data of critical point from TTT diagram to the Deform 2D-Post mode software. Results of calculation by the software is shown as example in Fig. 5.

$$\xi_M = 1 - \exp[\psi_1 T + \psi_2 (C - C_0) + \psi_{31} \sigma_m + \psi_{32} \bar{\sigma} + \psi_4] \tag{1}$$

$$\xi_M = 1 - \exp[\psi_1 T + \psi_4] \tag{2}$$

$$\xi_{F,P,B} = 1 - \exp[-k t^n] \tag{3}$$

- where ξ_M is martensite volume fraction transformed
- σ_m is the mean stress
- $\bar{\sigma}$ is the effective stress
- $\psi_1, \psi_2, \psi_{31}, \psi_{32}$ and ψ_4 are constants
- C is the carbon content
- T is the average element temperature
- $\xi_{F,P,B}$ is ferrite, pearlite and bainite volume fraction transformed
- k and n are the constant
- t is time

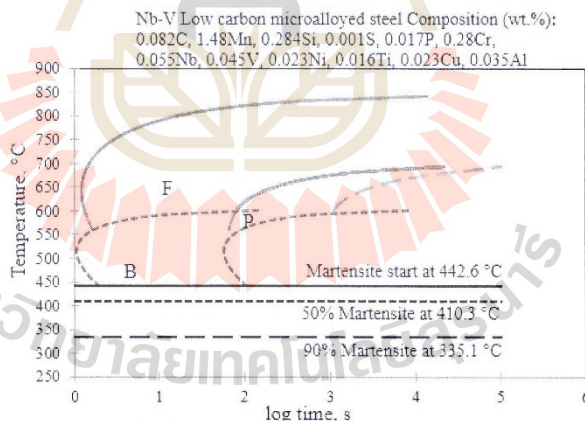


Fig. 4: TTT diagram of the tested specimen (JMatPro calculation)

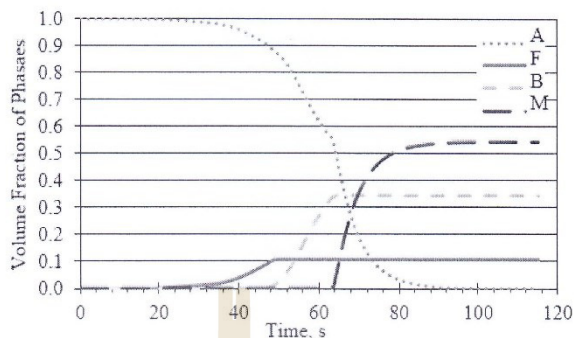


Fig. 5: Volume fraction of phase transformation at cooling rate of 8°C/s

2.3 Hot-Rolling Simulation

(a) Deformation Dilatometer

Process sequence of hot rolling could be simulated by using Deformation Dilatometer. Condition of testing sequence is shown in Fig. 6 and in Table 2. As shown in the figure, each testing condition from step 1 to step 10 was taken into consideration to the effect of the deformation degree. Deformation temperature and holding time on phase transformation behavior or on microstructure development. Results data of testing by Deformation dilatometer were documented and the test specimen was further investigated to determine the volume fraction and morphology of ferrite.

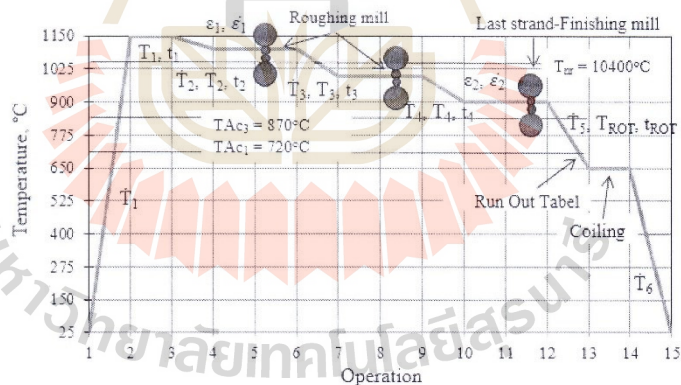


Fig. 6: Schematic diagram of heating cycle and test condition

Table 2: Parameters of hot-rolled simulation

Parameters	Value
\dot{T}_1, T_1, t_1	10°C/s, 1150°C, 900 s
$\dot{T}_2, T_2, t_2, \epsilon_1, \dot{\epsilon}_1$	5°C/s, 1100°C, 3 s, 0.3, 5 s ⁻¹
$\dot{T}_3, T_3, t_3, \epsilon_2, \dot{\epsilon}_2$	30°C/s, 1000°C, 3 s, 0.4, 10 s ⁻¹
$\dot{T}_4, T_4, t_4, \epsilon_3, \dot{\epsilon}_3$	50°C/s, 900°C, 3 s, 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 10 s ⁻¹
$\dot{T}_5, T_{ROT}, t_{ROT}, \dot{T}_6$	60°C/s, 650, 670, 690°C, 5, 10 s, 100°C/s

(b) Finite Element Software

Hot rolling process could be simulated by using DEFORM 2D software. Data of tested steel and simulated conditions that are inputted to the software are the same as input in Deformation Dilatometer. An example result of DEFORM 2D simulation software is shown in Fig. 7. This figure showed an example of the variation of volume fraction of ferrite with time when the simulation condition is performed with coiling temperature of 650°C, deformation strain of 0.3 and holding time of 10 s.

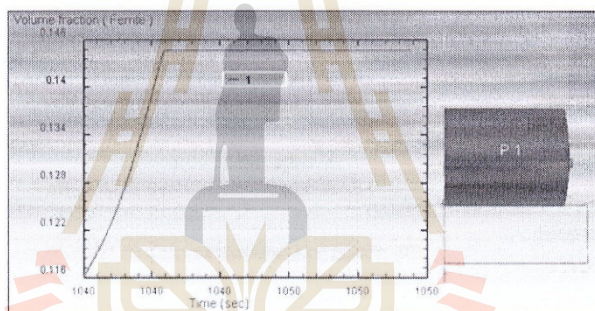


Fig. 7: Variation of volume fraction of austenite with time, simulation condition; deformation temperature of 650°C, deformation strain of 0.3 and holding time of 10 s

3. Results

3.1 Characteristic of CCT Diagram

The CCT diagram from two methods are compared and shown in Fig. 8. It was found that the characteristic CCT curve is quite similar. The CCT diagram from two methods are compared and shown in Fig. 9. It was found that the characteristic CCT curves are quite similar. Martensite start temperature is 450°C. Bainite nose is found at 1.3 s and 450°C. It was found that this temperature is the martensite start temperature when the cooling rate is 1,000°C/s. Nose of ferrite is observed at 6 s and 600°C with critical cooling rate of 100°C/s. Nose of

pearlite is observed at 1,650 s and 680°C with critical cooling rate of 0.25°C/s. From this information, the critical temperature of phase transformation from Deformation Dilatometer was around 5°C higher than that from DEFORM 2D simulation software. With higher cooling rate of 1,000°C/s, the austenite was transformed directly to martensite. When the cooling rate is lowered down to 500, 200 and 100°C/s, the austenite was transformed to bainite and martensite. With cooling rate of 40°C/s to 2°C/s, the austenite was transformed to ferrite, bainite and martensite. The austenite was transformed to ferrite and bainite when the cooling rate is reduced to 0.8 and 0.25°C/s. With cooling rate of 0.1, 0.05 and 0.03°C/s, the austenite was transformed to ferrite, pearlite and bainite. However with cooling rate close to equilibrium, 0.001°C/s, the austenite was transformed to ferrite and pearlite. At cooling rate of 20°C/s, the transformation temperature for the existing of ferrite is expected to be 660-700°C and estimated time of ferrite formation is less than 10 s.

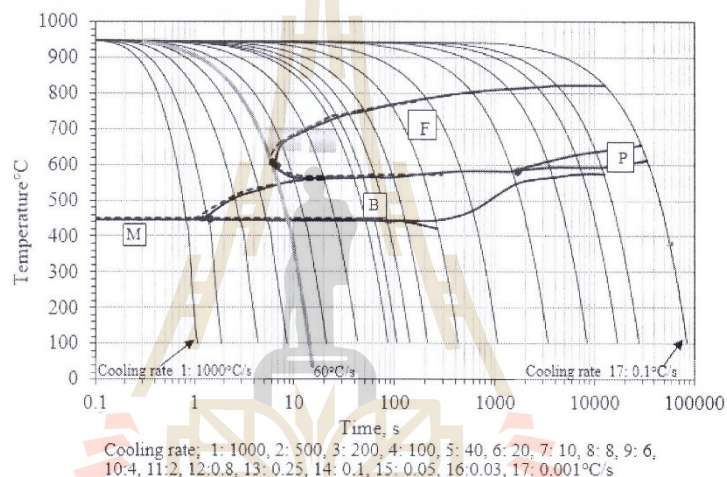


Fig. 8: CCT diagram of the tested steel (it was developed by using the information from Deformation Dilatometer and Finite Element Software)

3.2 Effects of Hot-Rolling Parameters on Volume Fraction of Ferrite

(a) Effect of Coiling Temperature and Holding Time

The results of hot-rolling simulation by Deformation Dilatometer and Finite Element simulation software are shown in Fig. 9 and Fig. 10. Those methods showed the same trend of the effect of coiling temperature and holding time on phase transformation when the test was carried out by using the same value of the testing parameter. Low coiling temperature lead to the large volume fraction of ferrite. The volume fraction of ferrite is decreased when the coiling temperature increased. Ferrite formation at high temperatures has a coarse grain and it will

effect on less volume fraction of ferrite. The long holding time lead to the large amount of volume fraction of ferrite. For this, it can be expressed as the effect, diffusion transformation of ferrite formation. During long holding times the large amount of ferrite formation appears.

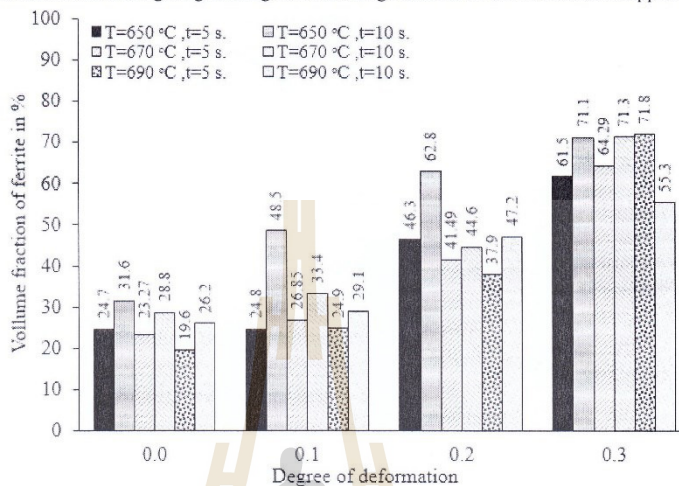


Fig. 9: Effects of hot-rolling parameters on volume fraction of ferrite (results of Deformation Dilatometer)

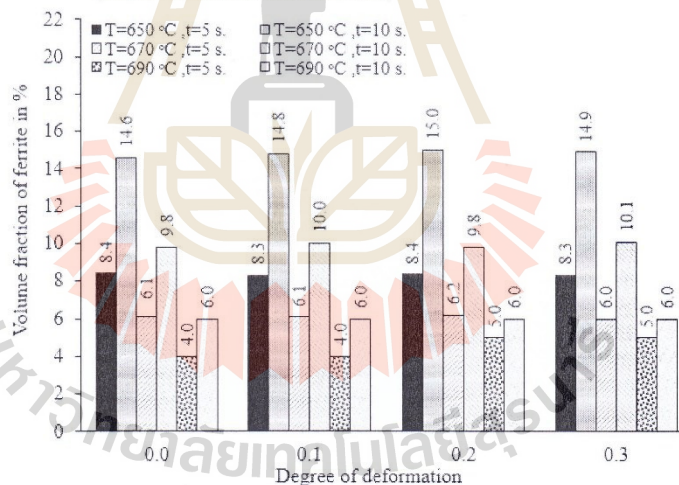


Fig. 10: Effects of hot-rolling parameters on volume fraction of ferrite (results of Finite Element Simulation)

(b) Effect of Deformation Degree

Deformation dilatometer showed that increasing deformation degree increases ferrite volume fraction in all tests. This is due to the deformation in non-recrystallization temperature increase the nucleation site of ferrite formation and increase the driving force for phase transformation of ferrite [9]. Finite Element software showed that deformation degree has not effected on ferrite volume fraction. Volume fraction of ferrite resulted from Finite Element Simulation software was very low. This is due to the cooling rate of Deformation Dilatometer has a more discrepancy in the range of 40-60°C/s, while the actual cooling rate can be reduced by around 30-50%. When the specimen was cooled to to 650°C with cooling rate of 60°C/s and holding time of 5-10s, it was found that the cooling cuve is indicated near the nose point of ferrite phase area.

4. Conclusions

In this study, Deformation Dilatometer and DEFORM 2D simulation software were carried out to investigate the microstructure development of Nb-V low carbon microalloyed steel under the condition similar to hot rolling process. CCT diagram that was created by using the methods were compared. The volume fraction of ferrite resulted from those methods were proposed. Based on this study the conclusions are as follows.

- (1) The CCT diagram resulted from those methods indicated that temperature range of ferrite formation are close together, in between 650-700°C, when the cooling rate is of 20°C/s.
- (2) Increasing deformation degree increased the volume fraction of ferrite. This is due to the deformation in non-recrystallization temperature increase the nucleation site of ferrite formation and increases the driving force for phase transformation of ferrite.
- (3) Similar characteristics of CCT diagram which is developed by Deformation Dilatometer and Finite Element Simulation software is observed.
- (4) Hot rolling simulation by using Deformation Dilatometer and Finite Element Simulation software showed the similar trends of effects of hot rolling parameters on evolution of volume fraction of ferrite, but those methods showed the different trend of the effect of deformation degree on evolution of volume fraction of ferrite.

5. References

- [1] World Auto Steel (2009), Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines
- [2] Suwanpinij, P. (2010), Multi-scale Modeling of Hot Rolled Dual-phase Steels for Process Design, Dr.-Ing. Dissertation, RWTH Aachen University
- [3] Suwanpinij, P., Togobytska, N., Prah, U., Weiss, W., Hömberg, D., and Bleck, W. (2010), Numerical Cooling Strategy Design for Hot Rolled Dual Phase Steel, Steel research international, 81(11), 1001-1009

- [4] Magee, C.L. (1970), Phase transformations. American Society for Material Eds., pp.115-156
- [5] Magee, C.L. (1971), The Kinetics of Martensite Formation in Small Particles, Metallurgical Transactions, 2(9), pp. 2419-2430
- [6] Ronachi jadudom (2013), Effects of Hot Rolling Parameters on Microstructure evolution of Dual Phase Steel, Master Thesis, Suranaree University of Technology
- [7] Avrami, M. (1939), Kinetics of Phase Change. I. General Theory, Journal of Chemical Physics, 7(12), pp. 1103-1112
- [8] Avrami, M. (1940), Kinetics of Phase Change. II. Transformation-Time Relations for Random Distribution of Nuclei, Journal of Chemical Physics, 8(2), pp. 212-224
- [9] Suwanpinij P., Rudnizki J., Prah U. and Bleck W. (2009), Investigation of the Effect of Deformation on γ - α Phase Transformation Kinetics in Hot-Rolled Dual Phase Steel by Phase Field Approach, Steel Res. Int. 80(9), pp. 616-622



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ISFAS-1479
The Kinetics of Dephosphorization of Molten Iron Using Slag Containing BaO

Tanongsak Yingnakorn^a, Siam Thongnak^a and Sakhob Khumkoa^a

School of Metallurgical Engineering, Institute of Engineering,

Suranaree University of Technology, Thailand

E-mail address: sakhob@sut.ac.th

Abstract

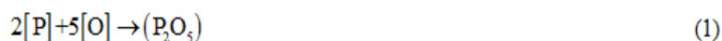
Phosphorus in steel causes hot shortness, temper embrittlement, reduction of ductility and reduction of toughness. It is one of the most sensitive elements for grain boundary segregation. With rising demand of higher quality steel and productivity, so dephosphorization of steel has become very important metallurgical techniques to produce high quality steel. Hot metal dephosphorization is performed to reduce steelmaking costs, reduce the quantity of steelmaking slag, and improve steel quality. The processing of hot metal dephosphorization involves a step about injection of flux into the bulk of hot metal in the ladle. In previous studies, Na₂O-based and CaO-based slags were used as fluxes for removal of phosphorus from molten iron and liquid steel. These techniques are widely used but a long refining time is needed and metal yield is decreased. However, there are few studies that mention the use of BaO as a flux to eliminate phosphorus in molten iron and liquid steel. Therefore, the purpose of this study is to clarify the effect of BaO on dephosphorization, especially the kinetics of dephosphorization reactions of molten iron to obtain low phosphorus steel and low operating time. In this work the molten iron and different slag composition of CaO-SiO₂-FeO were prepared by using laboratory induction furnace. Main variable of each test were basicity of slag, melting temperature and amount of BaO. The kinetics of dephosphorization in molten iron using slag system of CaO-SiO₂-FeO with and without BaO were investigated and compared. Slag compositions were analyzed by using X-ray fluorescence spectroscopy whereas chemical composition of steel were analyzed by using emission spectrometer. The goal of this study is to gain more information of reaction kinetics of dephosphorization when slag system contains BaO and the results could be applied to iron and steel manufacturing.

Keywords: dephosphorization, slag, refining of steel, barium oxide (BaO)

1. Introduction

In recent years, steelmakers are facing a very significant increase in raw material prices, coupled with high demand of very “clean” steel production [1, 2]. Moreover, the phosphorus content of molten pig iron has tended to increase due to changes in the raw materials used in blast furnaces.

It has become difficult to manage this problem through an electric arc furnace (EAF) and basic oxygen furnace (BOF) to produce low phosphorous steel [3]. Reducing practice of phosphorus in steel, the so-called “hot metal dephosphorization”, is done in a torpedo car or bucket during transported from the blast furnaces to the BOF. Sequence of dephosphorization in molten iron/steel, is shown in Fig. 1. The general equations for the reaction of phosphorus in molten iron are described as follows [4]:





Where, [] is solution in molten iron

() is component in slag

The equilibrium constant for Eq. 3 is:

$$\log K_p = \frac{61,110}{T_K} - 23.3 \quad (4)$$

Hot metal dephosphorization of steel have become very important metallurgical techniques in steelmaking process to produce high quality steel. The fundamentals of the process are widely discussed in various publications. Dephosphorization of hot metal is known to proceed more efficiently at a lower temperature, higher oxygen potential, higher basicity and low silicon level (<0.2%wt) [4, 5]. One important step of the process involves an injection of dephosphorization flux into the bulk of hot metal contained in the torpedo car or ladle. In previous studies, CaO-SiO₂-FeO based slags used fluxes for removal of phosphorus from hot metal and liquid steel. However, this technique was accompanied by the increase in operating time and the decrease of metal yield. However, only few studies are available about the use of BaO-flux to eliminate phosphorus in liquid steel. Therefore, the purpose of this study is to clarify the effect of BaO when used as flux for dephosphorization and also to study the kinetics of dephosphorization reactions of molten iron by using slag system containing BaO-flux to obtain extra low phosphorus steel and low operating times.



Fig. 1: Pretreatment route of molten iron

2. Experiment

2.1 Apparatus and Procedure

Experiments were carried out by melting of iron in an induction melting furnace. Pig iron of 10 kg and ferrophosphorus of 50 g were added in the crucible of 14 mm inner diameter to melt and provide the desired amount of phosphorus levels in the molten iron.

Schematic description of the equipment is shown in Fig. 2. The temperature of molten iron in the furnace was monitored by using a Pt/Pt13-Rh thermocouple and was controlled manually by adjusting the induction furnace controlling system. The melting temperature was measured approximately every 20 minutes and maintained at $1400 \pm 20^\circ\text{C}$ through induction heating. After the melt was kept at approximately 1400°C , 800g of the dephosphorization agent was added into the molten iron contained in the furnace. Molten and slag samples were taken every 5 minutes through the experimental period. Slag compositions were analyzed by using X-ray fluorescence spectroscopy whereas the chemical composition of the steel was analyzed by using an emission spectrometer.

2.2 Choice of Slag Compositions

The amount of CaO and SiO₂ were adjusted with respect to weight ratio of CaO and SiO₂, the so-called slag basicity B_2 , as shown in Eq. 5. An initial composition of hot metal and amounts of flux are shown in Table 1. By this experiment, CaO, SiO₂ and FeO were carefully added into the furnace in which the molten iron with a specific amount of phosphorus was already provided.

$$B_2 = \frac{(\%CaO)}{(\%SiO_2)}$$

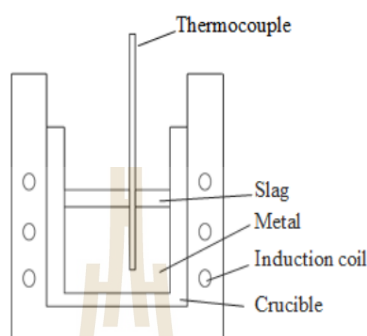


Fig. 2: Experimental apparatus

Table 1: An initial composition of hot metal and amounts of flux

Trial	Initial composition of hot metal (mass %)				Flux addition (g)			Basicity
	C	Si	P	S	CaO	SiO ₂	FeO	CaO/SiO ₂
1	3.40	0.035	0.218	<0.0002	320.0	320.0	160.0	1.0
2	3.38	0.035	0.220	<0.0002	384.0	256.0	160.0	1.5
3	3.39	0.034	0.220	<0.0002	426.67	213.33	160.0	2.0
4	3.36	0.036	0.218	<0.0002	457.14	182.9	160.0	2.5

2.3 Preparing of BaO

The flux additives, BaCO₃, SiO₂, CaO and FeO, are used to form the slag system in the furnace and were prepared by using laboratory scale grade. BaCO₃ is provided as raw materials to produce BaO by decomposition at 1400 °C. BaO is used instead of CaO in the slag system to study its effect on dephosphorization. The effect of CaO-based and BaO-based slag on dephosphorization were investigated and compared.

3. Results and Discussion

3.1 The Effect of Basicity

Phosphorus equilibrium was approached from slag to metal and metal to slag, and they agree well with each other. In previous work, most investigations mentioned varied widely on dephosphorization of liquid steel in the temperature range of 1680-1770 °C. It can be found that increasing of slag basicity to 4.0 will improve the phosphorus partition [5]. However, at very high basicity, the amount of CaO in slag, (%CaO), is too much to be dissolved by FeO in slag, (%FeO), and difficult to transform to liquid CaO. This result to increases the viscosity, reduces the reactivity of the slag significantly and high melting point. In this study, the tests were carried out at temperatures of 1400±20 °C. Phosphorus and silicon content of beginning molten iron were 0.20%wt and 0.60%wt, respectively. In Fig. 3 the [P] in molten iron after 50 minutes of forming of slag is plotted with different slag basicity. It indicated that phosphorus can greatly be reduced when the slag with higher basicity is used. But reduction of phosphorus has no significant since the basicity was 2. With increasing slag basicity the melting point of the slag is increased, this may lead to increase viscosity and effects on lower transfer of phosphorus from melt to slag.

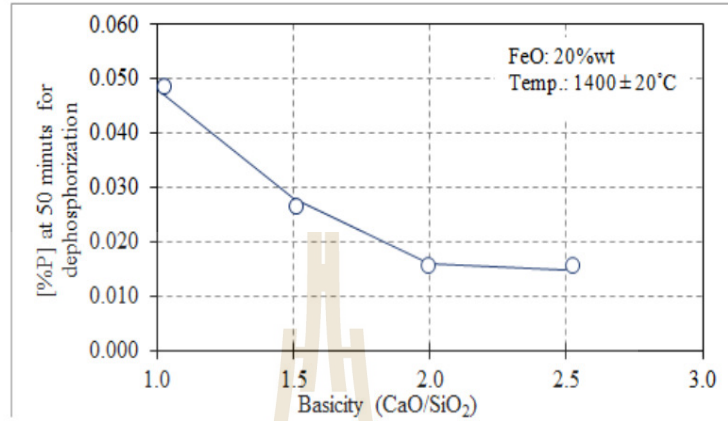


Fig. 3: Phosphorus in molten iron and Basicity (B_2)

3.2 The Effect of Temperature on Dephosphorization

Fig. 4 shows the change in the phosphorous content in molten iron at 1400 and 1550°C. We consider the mass transfer in the liquid metal as rate controlling, the rate of change of phosphorous concentration in the liquid metal is given by equation as follows [4]

$$\frac{d[\%P]}{dt} = \frac{k_s \rho_s A}{W_s} \left(\frac{[\%P]_o}{[\%P]_e} \right) ([\%P]_t - [\%P]_e) \quad (6)$$

Separating the variables and integrating gives

$$\ln \left[\frac{[\%P]_t - [\%P]_e}{[\%P]_o - [\%P]_e} \right] \left(\frac{[\%P]_e}{[\%P]_o} \right) \left(\frac{W_s}{\rho_s A} \right) = -k_s t \quad (7)$$

A similar treatment for the condition of mass transport in the metal yields

$$\ln \left[\frac{[\%P]_t - [\%P]_e}{[\%P]_o - [\%P]_e} \right] \left(\frac{[\%P]_o - [\%P]_e}{[\%P]_o} \right) \left(\frac{W_M}{\rho_M A} \right) = -k_M t \quad (8)$$

Where [%P] is the phosphorus content in melt; t is the time; and the subscripts t , o , and e denote bulk, initial, and equilibrium concentrations, respectively. W is the weight of phase, and the subscripts S and M are the slag and metal phase. It can be found that the experimental results of dephosphorization in this study seems to comply with results of thermodynamics calculation as described in Eq.4. By thermodynamics point of view, the dephosphorization reaction becomes more active as the temperature decreases. However, the molten iron temperature should not be too low to guarantee proper handling and attributed to acceleration of the iron oxide reaction at higher temperatures [7].

3.3 The Effect of BaO Content in Slag

The phosphorus content in molten iron decreases as the amount of BaO in slag increases, as shown in Fig. 5. In this experiment, the SiO₂ and FeO content in slag were fixed at 30 and 20%wt, respectively, the ratio of BaO to CaO was varied to compare the dephosphorization efficiency. As shown in Fig. 5, when CaO is replaced by BaO, the phosphorus content in molten iron dramatically decreases.

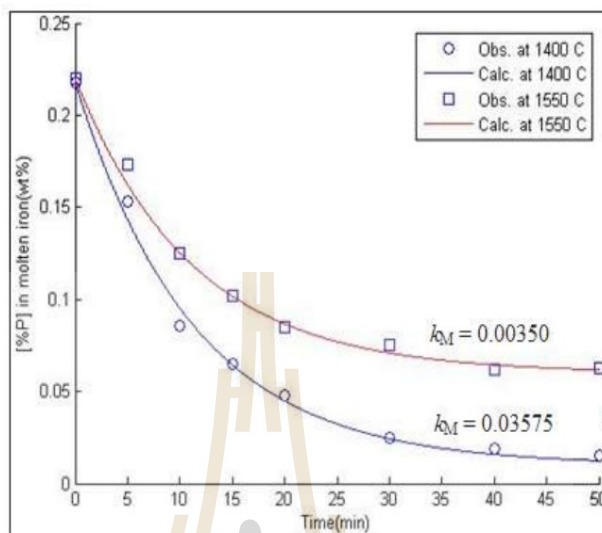


Fig. 4: Changes of phosphorous content in molten iron at 1400 and 1550°C.

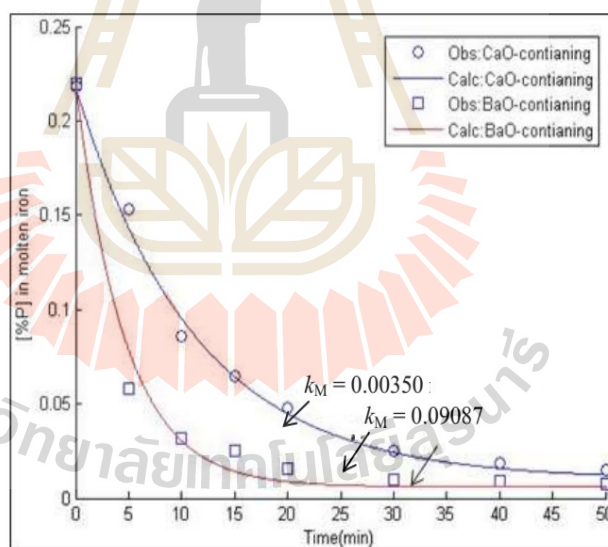


Fig. 5: Phosphorus content in molten iron treated with CaO-BaO-SiO₂-FeO slag, with constant %SiO₂ and constant FeO, basicity = 2 and at 1400°C

From this study, it is clearly shown that BaO has an effect on decreasing of phosphorus in molten iron than that of CaO-based slags. From the view point of thermodynamics, it can be explained by using Gibbs free energy term. The chemical reaction of dephosphorization corresponding to standard Gibbs free energy can be described as follows [6]:



$$\Delta G^\circ = -1,459.80 + 0.6164T (\text{kJ/mol}) \quad (6)$$



$$\Delta G^\circ = -1,613.50 + 0.6096T (\text{kJ/mol}) \quad (8)$$

It can be seen that the standard Gibbs free energy at 1400 °C of dephosphorization using CaO flux is fairly difficult to realize oxidative dephosphorization without oxidizing. However, this is feasible in the system of highly basic BaO based slag.

4. Conclusions

This investigation has been carried on the kinetics of dephosphorization of molten iron using slag containing BaO. Key findings of this study can be concluded as follows:

1. Phosphorus in molten iron is greatly reduced with increasing basicity in the range of 1-2, over slag basicity of 2 and at 1400 °C phosphorus in molten iron has no significant decrease.
2. Phosphorus is highly reduce at 1400 °C when compare with 1550 °C.
3. The amount of phosphorus in molten iron is decreased when the amount of BaO in slag increased. BaO has a higher effect on dephosphorization when compared with CaO.

References

- [1]. Mohammed A. T., Stephen S. and Seetharaman S. (2014). Phosphorus: The Noose of Sustainability and Renewability in Steelmaking. *Journal of Metals*, 66(9), 1565-1571.
- [2]. Rainer H., Robert F. and Jürgen C. (2011). Use of Hot Metal With High Phosphorous Content in Combined Blowing BOF Converters. *Iron & Steel Technology*, 2011(11), 46-58.
- [3]. Moriya, T. and Fujii, M. (1981). Dephosphorization and Desulfurization Pig Iron by Na_2CO_3 . *Transactions ISIJ*, 21, 732-741.
- [4]. Wolfgang U., Matthias W. and Jürgen C. (2015). Dephosphorization Strategies and Modeling in Oxygen Steelmaking. *Iron & Steel Technology*, 2015(3), 91-102.
- [5]. Monaghan, B. J., Pomfret, R. J. and Coley, K. S. (1998). The Kinetics of Dephosphorization of Carbon-Saturated Iron Using an Oxidizing Slag. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 29B, 111-118.
- [6]. Yong-li J., Zeng-wu Z., Jie-yu Z. and Wen-jie N. (2014). Thermodynamic Behaviors of Nb and P in Dephosphorization of Niobium-bearing Hot Metal with BaO-based Slag. *Journal of Iron and Steel Research International*, 21(1), 39-43.
- [7]. Yuta H., Naoki K., Seiji N. and Shuji T. (2005). Effect of Iron Oxide Feeding Rate and Hot Metal Temperature on Dephosphorization Rate in Torpedo Car, *ISIJ International*, 45(6), 827-834.

ประวัติผู้เขียน

นายสยาม ทองนาค เกิดเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พุทธศักราช 2534 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีพุทธศักราช 2552 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีพุทธศักราช 2556 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมโลหการในพุทธศักราช 2560 มีผลงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทในระดับดีมาก เรื่อง การศึกษาวิธีการตรวจวัดการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คโดยการวิเคราะห์สัญญาณแรงดัน

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มีดังนี้

- (1) Siam Thongnak, Sakhob Khumkoa, Tanongsak Yingnakorn and Loeslakhana Srikhang (2017). **A Study on Measuring Method for Slag Foamin in Electric Arc Furnace**, The 7th International Congress on Engineering and Information (ICEAI) on May 9-11, 2017 Kyoto, Japan.
- (2) Thanawit Jindangam, Sakhob Khumkoa, Vitoon Uthaisangsuk, and Siam Thongnak (2017). **Finite Element Simulation of the High Strength Hot Rolled Steel**, The 7th International Congress on Engineering and Information (ICEAI) on May 9-11, 2017 Kyoto, Japan.
- (3) Tanongsak Yingnakorn, Siam Thongnak and Sakhob Khumkoa (2016). **The Kinetics of Dephosphorization in Molten Iron Using Slag Containing BaO**, the 4th International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) on March 29-31, 2016, Kyoto, Japan.