

การออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแตกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์กไฟฟ้า  
โดยใช้การวิเคราะห์แรงดันอาร์ก

นายกอบพล สิริมานุวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

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

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DETECTOR FOR SLAG FOAMING  
IN ELECTRIC ARC FURNACE USING ARC VOLTAGE ANALYSIS.

Mr. Kobpol Sirimanuwat

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแตก  
ในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าโดยใช้การวิเคราะห์  
แรงดันอาร์ค

โดย

นายกอบพล สิริมานุวัฒน์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.สมบุญ จงชัยกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.สมบุญ จงชัยกิจ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.สงวน คำคือ)

กอบพล สิริมานุวัฒน์ : การออกแบบและสร้างระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าโดยใช้การวิเคราะห์แรงดันอาร์ค. (DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DETECTOR FOR SLAG FOAMING IN ELECTRIC ARC FURNACE USING ARC VOLTAGE ANALYSIS) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.สมบุญจ้งชัยกิจ, 76 หน้า.

หนึ่งในเทคนิคที่นำมาใช้ปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า คือการควบคุมให้สแลกเป็นฟองปกคลุมผิวหน้าเหล็กตลอดกระบวนการหลอม ปัจจุบันโรงงานเหล็กส่วนใหญ่อาศัยการประเมินระดับความหนาของฟองสแลกด้วยสายตา และจากการฟังเสียงอาร์คโดยผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งคุณภาพและประสิทธิภาพของการควบคุมขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความเอาใจใส่ของผู้ปฏิบัติงาน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า โดยตรวจวัดแรงดันอาร์คของเตา เพื่อนำมาวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลเป็นดัชนีการเกิดฟองสแลกด้วยโปรแกรม LabVIEW จากการทดสอบใช้งานจริงโดยเปรียบเทียบระหว่างดัชนีการเกิดฟองสแลกที่ได้จากระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก กับอัตราการฟั่นแก๊สออกซิเจน พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความสัมพันธ์ (ทางบวก) กับค่าเฉลี่ยอัตราการฟั่นแก๊สออกซิเจนในระดับสูง และจากการเปรียบเทียบระหว่างดัชนีการเกิดฟองสแลกที่ได้จากระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก และปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ค่าเฉลี่ยดัชนีฟองสแลกมีความสัมพันธ์ (ทางลบ) กับปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกในระดับสูงเช่นกัน กล่าวคือระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกสามารถสะท้อนระดับฟองสแลกและสภาวะของฟองสแลกภายในเตาได้ จึงสามารถนำไปใช้ควบคุมการทำฟองสแลกได้ ตลอดจนนำไปประยุกต์เป็นระบบควบคุมการฟั่นแก๊สออกซิเจนสำหรับกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิติ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อ อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....



##5270655121: MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ELECTRIC ARC FURNACE / SLAG FOAM MONITORING SYSTEM / ARC VOLTAGE

KOBPOL SIRIMANUWAT: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DETECTOR FOR SLAG FOAMING IN ELECTRIC ARC FURNACE USING ARC VOLTAGE ANALYSIS. ADVISOR: SOMBOON CHONGCHAIKIT, D.ING, 76 pp.

One of the techniques to improve the thermal efficiency of the iron making process using electric arc furnace is to control the slag foaming which covers the molten iron. Generally, a steel mill with electric arc furnace estimates the slag foam thickness by observing the visual perception and sound of the arc. The quality and efficiency depend upon experience and perseverance of the operator. This article presents the design and construction of a detector for slag foaming in electric arc furnace using arc voltage analysis. In this development, the slag foaming detector analyzes arc voltage and interprets the signal for slag foaming index using LabVIEW software. The study found a strong (positive) correlation between the slag foaming index and gas flow rate which is significant at the 0.01 level. And the study found a strong (negative) correlation between the slag foaming index and iron oxide content which is significant at the 0.01 level. Moreover, the detector can indicate slag foaming in molten slag. Therefore, this proposed method can be used to control slag foaming. It can also be applied to the oxygen lance automatic control.

Department:.....Electrical Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study:.....Electrical Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year:.....2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ดีอย่างนี้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.สมบูรณ์ จงชัยกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำ แนวทางศึกษาวิจัย แนวคิดต่างๆ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพิชญ เจริญสมศักดิ์ คุณธเนศ ชูประยูร และพี่ๆ ผู้ปฏิบัติงาน และบริษัท สยามสติลซินดิเคต จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูล และดำเนินการทดลองต่างๆ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณอนันต์ จิตรานุกเคราะห์ คุณพลพร จาติเสถียร และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและให้คำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรัก ที่อบรมสั่งสอน เลี้ยงดู และให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า.....	5
2.2 เทคนิคการทำสแลกให้เป็นฟอง.....	6
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำสแลกให้เป็นฟอง.....	7
2.3.1 การทำให้สแลกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการกักฟองแก๊ส.....	7
2.3.2 การทำให้เกิดฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสแลก.....	11
2.3.2.1 ปฏิริยาที่คาร์บอนจับตัวกับออกซิเจนในน้ำเหล็ก.....	12
2.3.2.2 ปฏิริยาที่คาร์บอนจับตัวกับเหล็กออกไซด์ในสแลก.....	12
2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟองสแลก.....	12
2.5 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้สะท้อนสถานะของฟองสแลก.....	14

บทที่ 3	การออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	18
3.1	เตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า.....	18
3.2	หลักการการทำงานของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	20
3.3	ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	22
3.3.1	ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ.....	23
3.3.2	ส่วนตั้งสัญญาณ.....	26
3.3.3	ส่วนประมวลผลและติดต่อผู้ใช้งาน.....	27
3.4	การเลือกคุณสมบัติตัวกรองและอัตราซิกสัญญาณ.....	28
บทที่ 4	ซอฟต์แวร์ระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	30
4.1	โปรแกรม LabVIEW.....	30
4.2	หลักการการทำงานของซอฟต์แวร์ของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	30
4.3	ส่วนงานของโปรแกรมที่ทำงานเพียงครั้งเดียว.....	32
4.3.1	การกำหนดเริ่มต้นฮาร์ดแวร์.....	32
4.3.1.1	การกำหนดเริ่มต้นส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ.....	32
4.3.1.2	การกำหนดเริ่มต้นตัวกรองและส่วนตั้งสัญญาณ.....	33
4.3.2	การกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูล.....	34
4.3.3	ส่วนรับข้อมูลอินพุตจากส่วนตั้งสัญญาณ.....	35
4.3.4	ส่วนหยุดการทำงานระบบ.....	36
4.4	ส่วนของโปรแกรมที่ทำงานแบบวนรอบ.....	36
4.4.1	ส่วนตรวจสอบสถานะปุ่มควบคุม.....	37
4.4.2	ส่วนประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล.....	37
บทที่ 5	การทดสอบและผลการทดสอบ.....	40
5.1	เตาหลอมเหล็กและกระบวนการหลอมเหล็กที่ทำการทดสอบ.....	40
5.2	การติดตั้งใช้งานระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	41
5.3	การทดสอบระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	43

5.3.1 การทดสอบหาดัชนีการเกิดฟองสแลกที่เหมาะสม.....	43
5.3.2 การทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแลก.....	46
5.3.3 การเปรียบเทียบผลการวัดกับอัตราการฟ่นแก๊ส.....	49
5.3.4 การเปรียบเทียบผลการวัดกับส่วนผสมทางเคมีของสแลก.....	50
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	53
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	53
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
6.3 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	54
รายการอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	58
ภาคผนวก ข โปรแกรมของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	76

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของสแลก.....	9
ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกที่เปลี่ยนแปลง เมื่อหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน.....	48
ตารางที่ 5.2 ผลวิเคราะห์สารประกอบในสแลก และค่าดัชนีการเกิดฟองสแลก.....	50
ตารางที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยผลวิเคราะห์สารประกอบในสแลก และค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก.....	52

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสแลก และประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากถ่านอาร์กสู่น้ำเหล็ก.....	7
รูปที่ 2.2 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ที่ค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.0.....	9
รูปที่ 2.3 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ที่ค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.5.....	10
รูปที่ 2.4 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ที่ค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 3.0.....	10
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำให้เกิดฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสแลก.....	11
รูปที่ 2.6 การเรียงตัวของชั้นฟองสแลก สแลก และน้ำเหล็ก.....	13
รูปที่ 2.7 แบบจำลองของฟองสแลก.....	14
รูปที่ 2.8 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน-กระแสอาร์กในช่วงเวลาต่างๆ.....	15
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า.....	16
รูปที่ 3.1 วงจรไฟฟ้ากำลังของเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า.....	18
รูปที่ 3.2 จุดวัดแรงดันอาร์กในทางปฏิบัติ.....	19
รูปที่ 3.3 วงจรอาร์กแยกแต่ละเฟส.....	20
รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	20
รูปที่ 3.5 แผนภาพบล็อกของการติดตั้งระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	22
รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	23
รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อของแต่ละมอดูลในส่วนปรับเงื่อนไขสัญญาณ.....	23
รูปที่ 3.8 มอดูล SCXI-1313.....	24
รูปที่ 3.9 มอดูล SCXI-1125.....	25
รูปที่ 3.10 แผนภาพบล็อกของมอดูล SCXI-1125.....	25
รูปที่ 3.11 มอดูล SCXI-1000.....	26
รูปที่ 3.12 การ์ด PCI-6024E.....	26
รูปที่ 3.13 แผนภาพบล็อกของการ์ด PCI-6024E.....	27
รูปที่ 3.14 หน้าจอของส่วนติดต่อผู้ใช้งานของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	28

รูปที่ 4.1	ผังงานโปรแกรมระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	31
รูปที่ 4.2	ผังงานการกำหนดเริ่มต้นส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ.....	32
รูปที่ 4.3	ผังงานการกำหนดเริ่มต้นตัวกรองและส่วนตั้งสัญญาณ.....	33
รูปที่ 4.4	ผังงานการกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูล.....	34
รูปที่ 4.5	ผังงานส่วนรับข้อมูลอินพุตจากส่วนตั้งสัญญาณ.....	35
รูปที่ 4.6	ผังงานส่วนหยุดการทำงานระบบ.....	36
รูปที่ 4.7	ผังงานส่วนตรวจสอบสถานะปุ่มควบคุม.....	37
รูปที่ 4.8	ผังงานส่วนประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล.....	38
รูปที่ 4.9	แผนภาพบล็อกของโปรแกรมสำเร็จรูป Spectral Measurements Express VI.....	39
รูปที่ 4.10	แผนภาพบล็อกของโปรแกรมสำเร็จรูป SINAD Analyzer VI.....	39
รูปที่ 5.1	ขั้นตอนการหลอมเหล็กของบริษัท สยามสตีลซินดิเกท จำกัด (มหาชน).....	41
รูปที่ 5.2	การต่อวัดสัญญาณแรงดัน.....	42
รูปที่ 5.3	การติดตั้งระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก.....	42
รูปที่ 5.4	สเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดัน ณ จุดวัด $V_{ag}$ , $V_{bg}$ และ $V_{cg}$ ขณะสแลกไม่เป็นฟอง.....	44
รูปที่ 5.5	สเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดัน ณ จุดวัด $V_{ag}$ , $V_{bg}$ และ $V_{cg}$ ขณะสแลกเป็นฟอง.....	45
รูปที่ 5.6	ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123938.....	46
รูปที่ 5.7	ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123939.....	47
รูปที่ 5.8	ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123940.....	47
รูปที่ 5.9	ดัชนีการเกิดฟองสแลก ช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123938.....	47
รูปที่ 5.10	ดัชนีการเกิดฟองสแลก ช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123939.....	48
รูปที่ 5.11	ดัชนีการเกิดฟองสแลก ช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123940.....	48
รูปที่ 5.12	ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก และค่าเฉลี่ยอัตราการผันแก๊ส ออกซิเจน.....	49
รูปที่ 5.13	ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก และปริมาณเหล็กออกไซด์ ในสแลก.....	51



รูปที่ 5.14 ส่วนผสมทางเคมีของสแลกบน Isothermal Solubility Diagram.....	52
--	----

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตาเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากประสิทธิภาพดังกล่าวสะท้อนถึงผลผลิตจากกระบวนการผลิต การทำให้สแลกเป็นฟองปกคลุมผิวน้ำเหล็กเป็นวิธีการหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของเตา และลดความสึกหรอของอิฐทนไฟที่บุอยู่ที่ผนังเตา อันเนื่องมาจากความร้อน [1] ทั้งนี้เพื่อให้การประหยัดพลังงานไฟฟ้าในการหลอมเหล็กเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องทำให้สแลกเป็นฟองอย่างต่อเนื่องขณะหลอมเหล็ก แต่การควบคุมระดับฟองสแลกใน โรงงานส่วนใหญ่ต้องอาศัยทักษะของผู้ปฏิบัติงานในการสังเกตระดับฟองสแลกด้วยสายตาและจากการฟังเสียงอาร์ค คุณภาพและประสิทธิภาพของการควบคุมขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความเอาใจใส่ของผู้ปฏิบัติงาน วิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวความคิดที่พัฒนาเครื่องมือชี้วัดการเปลี่ยนแปลงระดับของฟองสแลกภายในเตาหลอม

งานวิจัยที่ผ่านมา [2]-[4] ได้นำเสนอวิธีการตรวจสอบสังเกตฟองสแลกโดยการแปลค่าจากสัญญาณวัดอื่นๆ ซึ่งสภาวะแวดล้อมบริเวณเตาหลอม เช่น อุณหภูมิที่สูง แรงสั่นสะเทือน หรือฝุ่นละอองอาจส่งผลกับการตรวจวัด ปวีณ [5] นำเสนอวิธีการตรวจสอบสังเกตฟองสแลกโดยการแปลค่าจากแรงดันอาร์คของเตา พบว่าสามารถแสดงเฉพาะสภาวะที่ฟองสแลกปกคลุมหรือไม่ปกคลุมลำอาร์ค วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า โดยอาศัยแรงดันอาร์คของเตาหลอมมาแปลค่าเป็นสัญญาณชี้วัดการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแลกผ่าน โปรแกรม LabVIEW เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแลกภายในเตาหลอม

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษากระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า และเทคนิคการทำสแลกให้เป็นฟอง
- 2) เพื่อออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบสังเกตฟองสแลก ซึ่งอาศัยการแปลค่าจากสัญญาณแรงดันอาร์คของเตาหลอมเป็นตัวชี้วัดสถานะของฟองสแลก

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาขั้นตอนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า เทคนิคการทำสแลกให้เป็นฟอง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) กำหนดตัวชี้วัดสถานะของฟองสแลกซึ่งอาศัยการแปลค่าจากสัญญาณแรงดันอาร์คของเตาหลอม
- 3) พัฒนาระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก
- 4) ทดสอบใช้งานระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลกที่พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันอาร์คของเตาหลอมผ่านตัวชี้วัด กับการเปลี่ยนแปลงระดับของฟองสแลกภายในเตา และคุณสมบัติทางเคมีของสแลก

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาปัญหา สาเหตุ และปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมการทำสแลกให้เป็นฟอง
- 2) ศึกษากระบวนการหลอมเหล็ก โดยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า รวมถึงหลักการในการเกิดฟองสแลก และวิธีการสังเกตสถานะฟองสแลก
- 3) ออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบสังเกตฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์และเก็บรวบรวมข้อมูลที่โรงงานที่ทำวิจัย
- 4) เขียนโปรแกรมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ทดสอบใช้งาน และปรับปรุงแก้ไข

- 5) ทดสอบระบบตรวจสังเกตฟองสแลกที่พัฒนาขึ้น โดยเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณแรงดันอาร์คของเตาหลอมผ่านตัวชี้วัด กับการเปลี่ยนแปลงระดับของฟองสแลกภายในเตา และคุณสมบัติทางเคมีของสแลก
- 6) วิเคราะห์ และสรุปผลการดำเนินงาน
- 7) เรียบเรียง พิมพ์ผลงานวิจัย และจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์เพื่อนำเสนอต่อกรรมการพิจารณาต่อไป

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ระบบตรวจวัดที่สามารถแสดงสถานะของฟองสแลกในเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการหลอมเหล็ก โดยช่วยอำนวยความสะดวกในการควบคุมการทำฟองสแลก
- 2) แนวทางสำหรับนำไปประยุกต์เป็นระบบควบคุมการพ่นแก๊สออกซิเจนสำหรับกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ

### 1.6 เนื้อหาวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอในที่นี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นแต่ละบทและเรียงลำดับตามความเหมาะสม ดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า หลักการทำสแลกให้เป็นฟอง ปัจจัยที่มีผลต่อการทำสแลกให้เป็นฟอง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟองสแลก และพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้สะท้อนสถานะของฟองสแลก

บทที่ 3 กล่าวถึงเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า หลักการทำงานของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก และการเลือกคุณสมบัติตัวกรองและอัตราชักสัญญาณ

บทที่ 4 กล่าวถึงซอฟต์แวร์ระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า หลักการทำงานของซอฟต์แวร์ และส่วนงานต่างๆ ของโปรแกรม

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแตก

บทที่ 6 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย รวมถึงข้อเสนอแนะต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและพัฒนาต่อไป

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า ขั้นตอนการหลอม เทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพการหลอมโดยการทำสแลกให้เป็นฟอง ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของฟองสแลก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟองสแลก และพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้สะท้อนสถานะของฟองสแลก

#### 2.1 การหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า

ขั้นตอนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้า เริ่มต้นจากการเตรียมเศษเหล็ก โดยนำเศษเหล็กที่ผ่านการคัดแยกเกรดมาแล้ว บรรจุเป็นชั้นๆ ลงในถังบรรจุเศษเหล็ก แต่ละชั้นใช้เศษเหล็กต่างชนิดกันเพื่อให้เหล็กหลอมละลายได้ง่าย โดยใส่เศษเหล็กที่มีความหนาแน่นน้อยไว้ได้สุดของถังเพื่อรองรับน้ำหนักของเศษเหล็กทั้งหมด ชั้นถัดมาใส่เศษเหล็กที่มีความหนาแน่นมากและปานกลางตามลำดับ และชั้นบนสุดใส่เศษเหล็กที่มีน้ำหนักเบาเพื่อให้แก่งอิเล็กโตรดสามารถทะลุลงในเศษเหล็กได้อย่างรวดเร็วในช่วงต้น

จากนั้นถังบรรจุเศษเหล็กถูกยกมาเหนือเตาหลอม และเปิดถังจากด้านล่างเพื่อเทเศษเหล็กลงในเตา หลังจากที่เศษเหล็กลงในเตาหลอมเรียบร้อยแล้ว ฝาเตาถูกเลื่อนมาปิดพร้อมทั้งลดระดับแก่งอิเล็กโตรดทั้งสามแก่งลงมากลัดกับเศษเหล็กในเตา และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแก่งอิเล็กโตรดทำให้เกิดอาร์คไฟฟ้าเพื่อเริ่มหลอมเศษเหล็ก การอาร์คเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเศษเหล็กส่วนใหญ่หลอมละลายและยุบตัวลงสู่ก้นเตาจึงหยุดอาร์คเพื่อเติมเศษเหล็กและเริ่มทำให้เกิดอาร์คไฟฟ้าเพื่อหลอมเศษเหล็กอีกครั้ง เศษเหล็กถูกป้อนลงสู่เตาช้าๆ เช่นนี้จนกระทั่งน้ำเหล็กในเตามีปริมาณเพียงพอต่อความต้องการ จึงเข้าสู่ขั้นตอนกำจัดสิ่งสิ่งเจือปนออกจากน้ำเหล็ก

ขั้นตอนการกำจัดสิ่งเจือปนออกจากน้ำเหล็ก มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกสิ่งสกปรกที่ปะปนกับเศษเหล็กออกจากน้ำเหล็ก และปรับปรุงปริมาณธาตุต่างๆ ในน้ำเหล็กให้มีความเหมาะสม

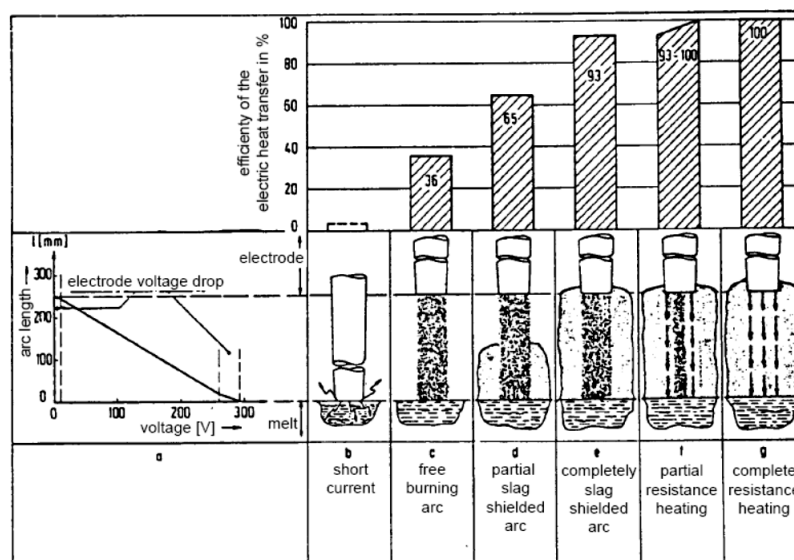
ขั้นตอนนี้ทำหลังจากที่เศษเหล็กหลอมละลายเป็นน้ำเหล็กทั้งหมด โดยพ่นคาร์บอนและแก๊สออกซิเจนผ่านท่อพ่นลงไปใต้น้ำเหล็ก แก๊สออกซิเจนที่ถูกพ่นลงไปนั้นทำปฏิกิริยากับธาตุอะลูมิเนียม ซิลิคอน และแมงกานีส เกิดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิคอนไดออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ลอยตัวขึ้นมาและรวมตัวกันเป็นชั้นของเหลวปกคลุมผิวน้ำเหล็กที่เรียกว่า สแลก

หลังจากที่น้ำเหล็กมีส่วนผสมทางเคมีเหมาะสมแล้ว เตาหลอมจะถูกเอียงเพื่อให้สแลกที่ปกคลุมอยู่บริเวณผิวน้ำเหล็กรินออกมาทางประตูเตาสแลกหน้าเตา จากนั้นทำการอาร์กไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องเพื่อให้อุณหภูมิน้ำเหล็กมีความเหมาะสมที่ประมาณ 1,600 องศาเซลเซียส ก่อนเทน้ำเหล็กออกจากเตาลงในเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อไปสู่กระบวนการถัดไป

## 2.2 เทคนิคการทำสแลกให้เป็นฟอง

สแลกคือของผสมจำพวกออกไซด์ และซัลไฟด์ของโลหะที่เป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารมลทินในเศษเหล็ก สารมลทินเหล่านี้รวมตัวกับสารก่อสแลก (slag former) และออกไซด์ของเหล็กกลายเป็นชั้นสแลกลอยอยู่บริเวณผิวของน้ำเหล็ก สารก่อสแลกถูกเติมลงในถังบรรจุเศษเหล็กพร้อมกับเศษเหล็ก และใส่เพิ่มลงในเตาเป็นช่วงๆ ระหว่างหลอม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดจุดหลอมเหลวของสารมลทินทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น สารก่อสแลกโดยทั่วไปประกอบด้วยปูนขาวและโคโคไลต์ ซึ่งมีสารประกอบแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก

การทำสแลกให้เป็นฟองมีวัตถุประสงค์อยู่สองประการ ประการแรกเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากลำอาร์กบริเวณปลายแท่งอิเล็กโทรดไปยังน้ำเหล็ก โดยฟองสแลกที่ปกคลุมแท่งอิเล็กโทรดนั้นทำหน้าที่เป็นฉนวน ช่วยลดการสูญเสียความร้อนจากลำอาร์กและน้ำเหล็กสู่บรรยากาศภายนอกโดยรอบดังรูปที่ 2.1 ประการที่สองคือช่วยลดความสึกหรอของอิฐทนไฟที่บุอยู่ที่ผนังเตาอันเนื่องมาจากความร้อน ถ้าไม่มีฟองสแลกส่งผลให้ความร้อนจากลำอาร์กกระจายไปสู่บริเวณผนังเตาหลอมอย่างมาก ทำให้อายุการใช้งานของเตาสั้นลง [1]



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นสแลก และประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากลำอาร์กสู่เนื้อเหล็ก [6]

นอกจากนั้น การทำสแลกให้เป็นฟองยังมีผลพลอยได้อื่นๆ เช่น ฟองสแลกที่ปกคลุมลำอาร์กทำให้ลำอาร์กเสถียรยิ่งขึ้น และช่วยลดความดังของเสียงอาร์กระหว่างการหลอม รวมถึงป้องกันไม่ให้ไนโตรเจนในบรรยากาศละลายลงสู่เนื้อเหล็ก

## 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำสแลกให้เป็นฟอง

เทคนิคการทำสแลกให้เป็นฟอง คือการเพิ่มปริมาตรให้กับฟองสแลกหรือทำให้สแลกฟูขึ้นโดยทำให้เกิดฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสแลกหลอมเหลว ซึ่งต้องคำนึงถึงปัจจัยหลักอยู่สองประการ ได้แก่ การทำให้สแลกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการกักฟองแก๊ส และการทำให้เกิดฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสแลก

### 2.3.1 การทำให้สแลกมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการกักฟองแก๊ส

คุณสมบัติในการกักฟองแก๊สของฟองสแลกขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีในสแลก และสมบัติทางกายภาพของสแลก K. Ito และ R.J. Fruehan [7] ได้ศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสภาวะของสแลก โดยกำหนดดัชนีที่เรียกว่า slag foaming index ซึ่งหมายถึงระยะเวลา



ที่ฟองแก๊สใช้ในการลอยผ่านชั้นสแลก หากสแลกใดมีค่า slag foaming index สูง ระยะเวลาที่ฟองแก๊สลอยผ่านชั้นสแลกนั้นจะนาน หรือกล่าวได้ว่าสแลกมีความสามารถในการคงสภาพอยู่มาก ระยะเวลาดังกล่าวแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.1

$$\Sigma = \frac{\Delta h}{V_g^s} = \frac{A \cdot \Delta h}{Q_g} \quad (2.1)$$

เมื่อ	$\Sigma$	=	ระยะเวลาที่ฟองแก๊สลอยผ่านชั้นสแลก
	$\Delta h$	=	ความหนาของสแลกที่เปลี่ยนแปลง
	$V_g^s$	=	ความเร็วแก๊ส
	$Q_g$	=	อัตราการพ่นแก๊ส
	$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของผิวสแลก

และจากการศึกษาผลของสมบัติทางกายภาพของสแลกต่อ slag foaming index K. Ito และ R.J. Fruehan [8] ได้สรุปเป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาดังกล่าวกับความหนืด ความหนาแน่น และแรงตึงผิว ดังสมการที่ 2.2

$$\Sigma = 5.7 \times 10^2 \frac{\mu}{\sqrt{\gamma \rho}} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$\Sigma$	=	ระยะเวลาที่ฟองแก๊สลอยผ่านชั้นสแลก
	$\mu$	=	ความหนืดของสแลก
	$\rho$	=	แรงตึงผิวของสแลก
	$\gamma$	=	ความหนาแน่นของสแลก

สมการที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่าสแลกที่สามารถฟูได้ดีต้องมีความหนืดสูง แต่ความหนาแน่นและแรงตึงผิวดำ และความหนืดมีผลต่อการฟูของสแลกมากกว่าความหนาแน่น และแรงตึงผิว เนื่องจากในสมการ ระยะเวลาแปรผกผันตามรากกำลังสองของความหนาแน่น

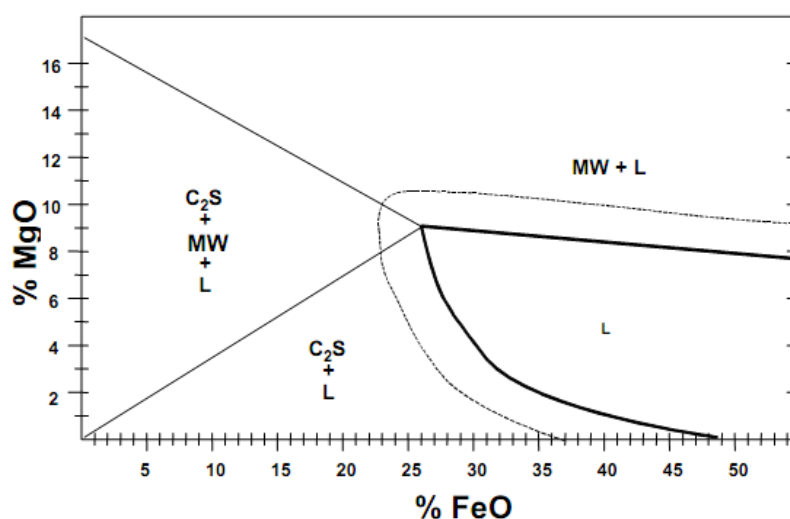
และแรงตึงผิว ตัวแปรที่มีผลต่อความหนืดของสแลกได้แก่ ปริมาณเหล็กออกไซด์ ปริมาณแมงกานีสออกไซด์ อุณหภูมิ และเบสิกซิตี [9] ดังตารางที่ 2.1 และค่าเบสิกซิตีที่นิยมใช้ ดังสมการที่ 2.3

$$Basicity(B_3) = \frac{\%CaO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3} \quad (2.3)$$

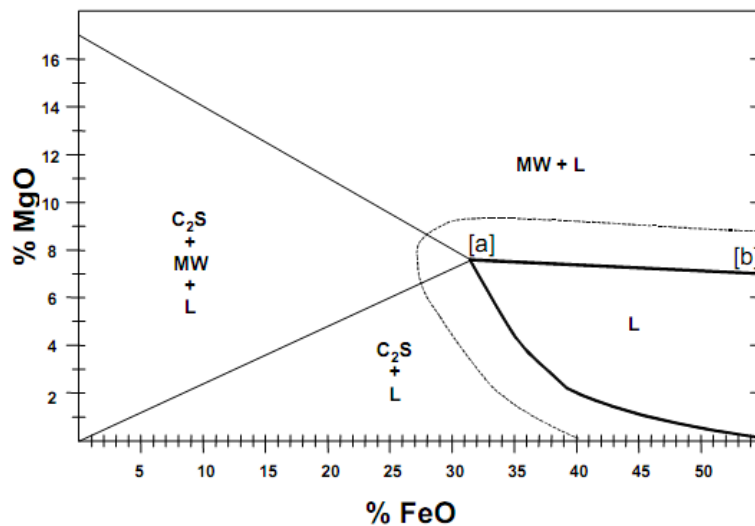
ตัวแปร	ผลกระทบ
เพิ่มปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก	ความหนืดของสแลกลดลง
เพิ่มปริมาณแมงกานีสออกไซด์ในสแลก	ความหนืดของสแลกเพิ่มขึ้น
เพิ่มอุณหภูมิ	ความหนืดของสแลกลดลง
เบสิกซิตี	มีผลต่อเวลาและขอบเขตของการเกิดฟองสแลก

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของสแลก

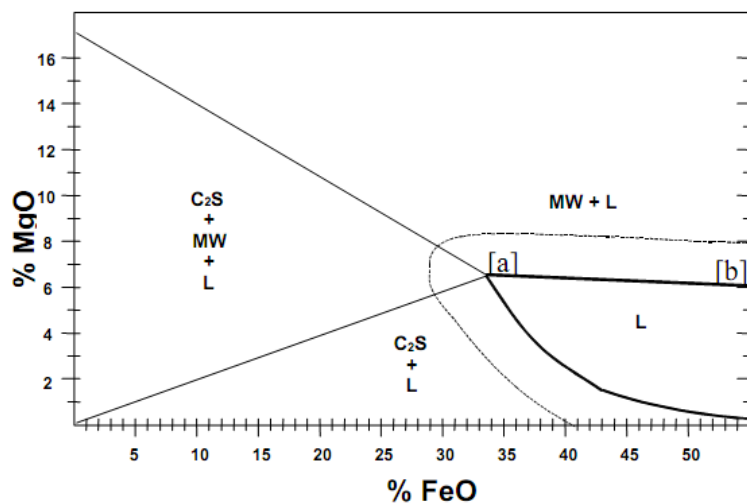
และ Isothermal Solubility Diagram (ISD) ของสแลกระบบ CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO-MgO ที่มีค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.0, 2.5 และ 3.0 ณ อุณหภูมิ 1,600 องศาเซลเซียส [10] ดังรูปที่ 2.2 ถึง 2.4



รูปที่ 2.2 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ที่ค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.0 [10]



รูปที่ 2.3 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ที่ค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 2.5 [10]



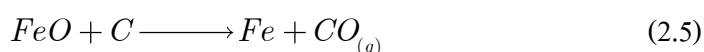
รูปที่ 2.4 Isothermal Solubility Diagram (ISD) ที่ค่าเบสิกซิตีเท่ากับ 3.0 [10]

ทั้งนี้ ในการปฏิบัติงานจริงสามารถปรับส่วนผสมของสแลกให้มีค่าเบสิกซิตี และ ปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ด้วยการเติมปูนขาวและโดโลไมต์ ส่วนปริมาณของเหล็กออกไซด์ สามารถควบคุมโดยอัตราการฟลักคาร์บอนและออกซิเจน ดังนี้

เพิ่มปริมาณของเหล็กออกไซด์โดยการฟั่นออกซิเจน

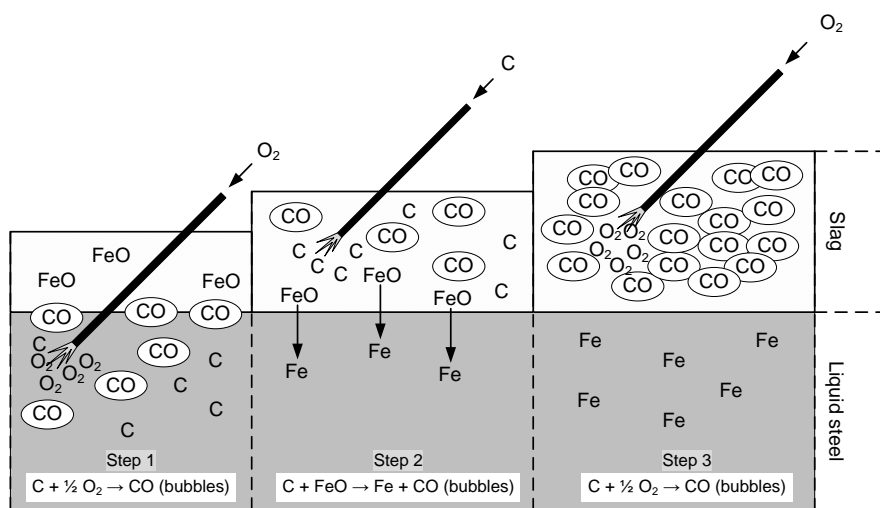


ลดปริมาณของเหล็กออกไซด์โดยการฟั่นคาร์บอน



### 2.3.2 การทำให้เกิดฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสแลก

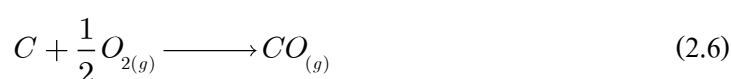
ฟองสแลกประกอบด้วยฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากการฟั่นแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนลงไปใต้น้ำเหล็กผ่านทางท่อพ่นดังรูปที่ 2.5 การฟูของสแลกมีลักษณะเป็นพลวัตร กล่าวคือมีการทำให้เกิดฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ใหม่ในสแลก ขณะเดียวกันก็มีการสูญเสียฟองแก๊สเดิมที่ลอยพ้นชั้นสแลกไป หากปริมาณฟองแก๊สที่เกิดใหม่มีเท่ากับปริมาณฟองแก๊สที่สูญเสียไป ระดับความหนาของชั้นสแลกจะคงที่หรืออยู่ในภาวะสมดุล ซึ่งปฏิกิริยาของการเกิดฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสแลกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ปฏิกิริยา ดังนี้



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำให้เกิดฟองแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในสแลก

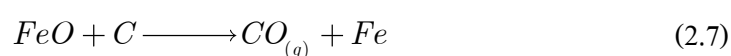
### 2.3.2.1 ปฏิริยาที่คาร์บอนจับตัวกับออกซิเจนในน้ำเหล็ก

เกิดจากการพ่นแก๊สออกซิเจนลงไปใต้น้ำเหล็กเพื่อปรับปรุงความบริสุทธิ์ของน้ำเหล็ก โดยทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเพื่อกำจัดคาร์บอน ซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัสที่เจือปนอยู่ ออกซิเจนที่พ่นลงไปนั้นทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในน้ำเหล็ก กลายเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการที่ 2.6



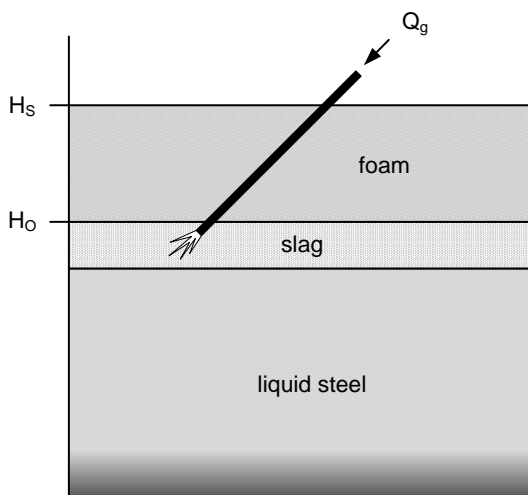
### 2.3.2.2 ปฏิริยาที่คาร์บอนจับตัวกับเหล็กออกไซด์ในสแลก

เกิดจากการพ่นคาร์บอนลงไปใบบริเวณเหนือรอยต่อระหว่างชั้นน้ำเหล็กและสแลก การพ่นคาร์บอนจะพ่นเป็นช่วงๆ เพื่อควบคุมปริมาณฟองแก๊สให้สแลกฟูได้พอเหมาะ ซึ่งคาร์บอนทำปฏิกิริยากับเหล็กออกไซด์ในสแลก ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และเหล็กกลับคืนไปยังน้ำเหล็กเพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.7



## 2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟองสแลก

การฟูหรือยุบของชั้นฟองสแลกเป็นกระบวนการพลวัต มีการเกิดฟองแก๊สขึ้นใหม่พร้อมๆ กับมีการสูญเสียฟองแก๊สในสแลก สามารถอธิบายพฤติกรรมนี้ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พิจารณารูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเรียงตัวของชั้นฟองสแลก สแลก และน้ำเหล็ก

กำหนดให้อัตราการเกิดฟองแก๊สในสแลกแปรผัน โดยตรงกับอัตราไหลของแก๊สที่พุ่งลงไปนชั้นสแลก การสลายตัวของฟองแก๊สแปรผันตรงกับความหนาของชั้นสแลก และเสถียรภาพของฟองสแลกจะถูกกำหนดด้วยช่วงชีวิตของฟองสแลก [5] ได้สมการความหนาของชั้นฟองสแลก ดังสมการที่ 2.8

$$\frac{dH_s}{dt} = K_1 Q_g - \frac{H_s - H_o}{\tau} \quad (2.8)$$

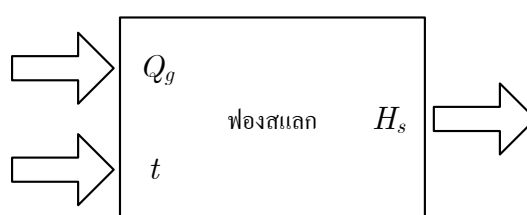
เมื่อ

- $H_s$  = ความหนาของสแลก
- $H_o$  = ความหนาของสแลกเริ่มต้น
- $Q_g$  = อัตราการไหลของแก๊ส
- $\tau$  = ค่าช่วงชีวิตฟองสแลก
- $K_1$  = ค่าคงที่การเกิดฟองสแลก

จากสมการที่ 2.8 เมื่อเข้าสู่สภาวะสมดุล ระดับความหนาของฟองสแลกจะคงที่  $\left(\frac{dH_s}{dt} = 0\right)$  กล่าวคืออัตราการเกิดฟองแก๊สใหม่เท่ากับอัตราสูญเสียฟองแก๊ส ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟองสแลกกับอัตราการไหลของแก๊สดังสมการที่ 2.9

$$Q_g = \frac{H_s - H_o}{K_1 \tau} = \frac{\Delta H}{K_1 \tau} \quad (2.9)$$

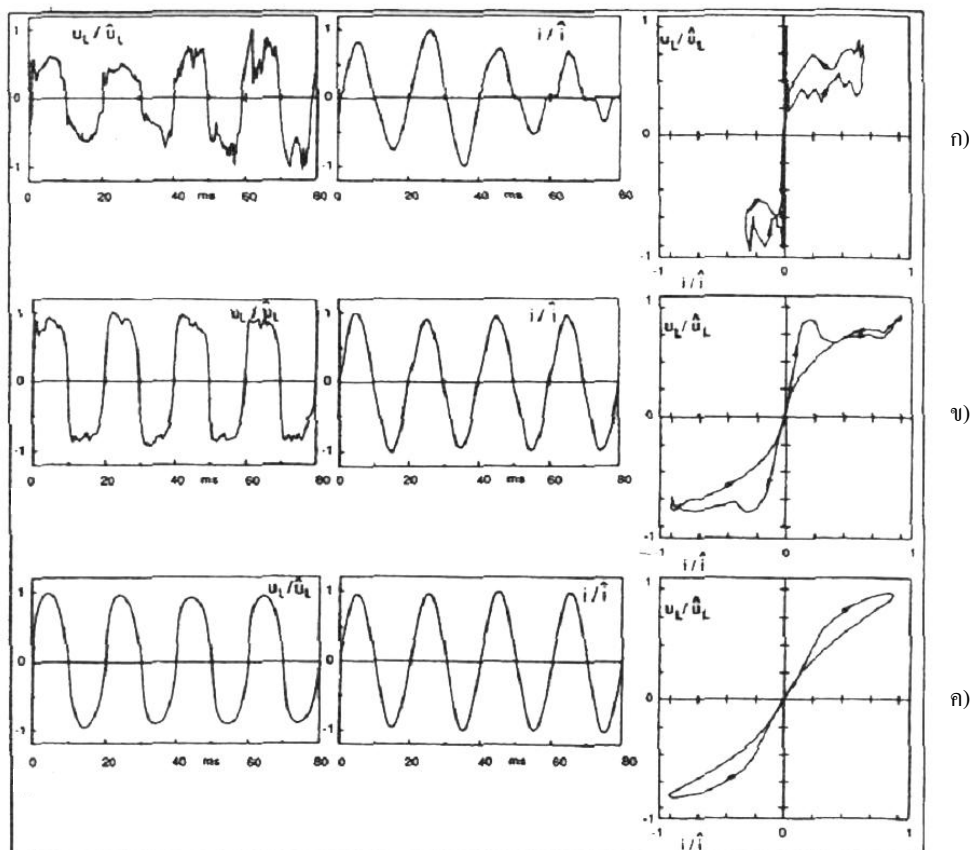
จากความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่า ที่ค่าช่วงชีวิตของฟองสแลกค่าหนึ่งสามารถควบคุมความหนาของฟองสแลกได้โดยอัตราการไหลของแก๊ส ( $Q_g$ ) นอกจากนั้น ที่ระดับความหนาของชั้นฟองสแลกเท่ากัน หากค่าช่วงชีวิตมีค่ามากอัตราการไหลของแก๊สจะมีค่าน้อย หมายถึงเป็นสภาวะที่ต้องการแก๊สเพิ่มเข้าไปน้อยหรือฟองสแลกมีเสถียรภาพดี ซึ่งนำมาเขียนเป็นแบบจำลองได้ดังรูปที่ 2.7 โดยปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการไหลของแก๊ส คืออัตราการพ่นแก๊สออกซิเจนและคาร์บอน ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อค่าช่วงชีวิตฟองสแลก คือส่วนผสมทางเคมีของสแลก อุณหภูมิ และค่าเบสิกซิตี



รูปที่ 2.7 แบบจำลองของฟองสแลก

## 2.5 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ใช้แสดงสถานะของฟองสแลก

สภาพของการหลอมเหล็กที่แตกต่างกันในช่วงเวลาต่างๆ มีผลกระทบต่อพฤติกรรมของอาร์คไฟฟ้า [11] สามารถอธิบายได้ด้วยกราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน-กระแสอาร์ค ดังรูปที่ 2.8

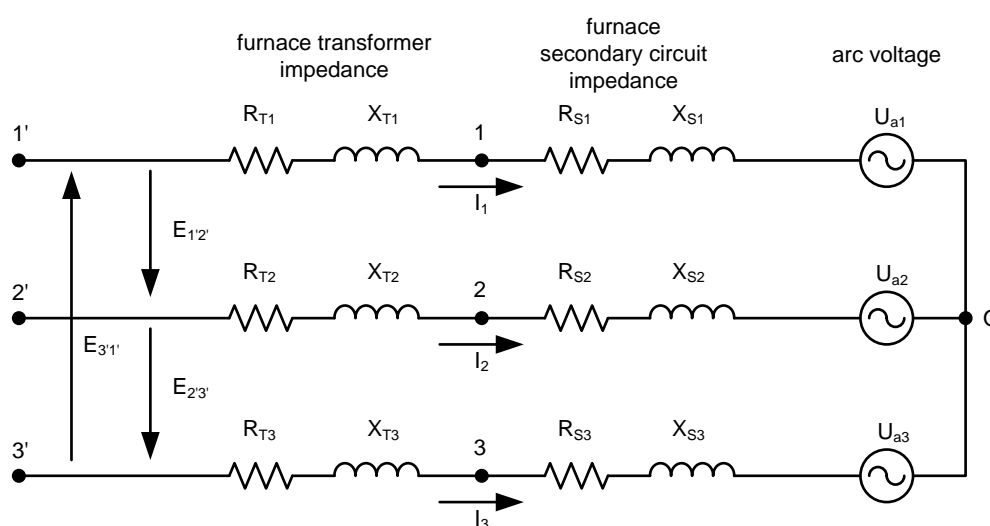


รูปที่ 2.8 กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน-กระแสอาร์กในช่วงเวลาต่างๆ [11]

รูปที่ 2.8 (ก) แสดงช่วงเริ่มต้นหลอมเหล็ก กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน-กระแสอาร์กมีความไม่เชิงเส้นเนื่องจากอาร์กไฟฟ้าไม่เสถียร ส่งผลให้กระแสอาร์กมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เกิดแรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิกหลายลำดับ รูปคลื่นของแรงดันและกระแสอาร์กมีความผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์และเกิดการกระเพื่อมอย่างมาก รูปที่ 2.8 (ข) แสดงช่วงเวลาหลังจากเริ่มต้นหลอมเหล็กไปประมาณ 7 นาที อาร์กไฟฟ้าเริ่มมีความเสถียร กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน-กระแสอาร์กมีความไม่เชิงเส้นลดลง การกระเพื่อมของแรงดันและกระแสอาร์กลดลง แรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิกลดลง และรูปที่ 2.8 (ค) แสดงช่วงเวลาหลังจากเริ่มต้นหลอมเหล็กประมาณ 27 นาที อาร์กไฟฟ้ามีความเสถียรมากยิ่งขึ้น กราฟลักษณะเฉพาะของแรงดัน-กระแสอาร์กใกล้เคียงเชิงเส้น รูปคลื่นของแรงดันและกระแสอาร์กมีความใกล้เคียงรูปไซน์มากยิ่งขึ้น



เนื่องจากแรงดันอาร์กและกระแสอาร์กที่เปลี่ยนไปตามสภาพการหลอม สามารถกล่าวได้ว่า แรงดันอาร์กและกระแสอาร์กสามารถสะท้อนพฤติกรรมของอาร์กไฟฟ้าได้ เมื่ออาร์กไฟฟ้าเสถียรมากขึ้น แรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิกมีค่าลดลง ซึ่งเราสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอาร์กและกระแสอาร์กจากวงจรสมมูลของเตาหลอมเหล็กแบบอาร์กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของเตาหลอมเหล็กแบบอาร์กไฟฟ้า

เมื่อ	$E_{1'2'}, E_{2'3'}, E_{3'1'}$	=	แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม
	$R_{Tn} + jX_{Tn}$	=	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเตาหลอม
	$R_{Sn} + jX_{Sn}$	=	อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม
	$U_{an}$	=	แรงดันอาร์ก
	$I_n$	=	กระแสเฟส
	$n$	=	1, 2, 3

อาร์กไฟฟ้ามีลักษณะเป็น โหลดไม่เชิงเส้น รูปคลื่นของกระแสที่ไหลเกิดความผิดเพี้ยนไปจากรูปไซน์ หรืออีกนัยหนึ่งคือมีกระแสที่ความถี่อื่นๆ ปะปนไปกับกระแสที่ความถี่หลักมูล

กระแสฮาร์โมนิกดังกล่าวไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเตาหลอมและอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม ทำให้เกิดแรงดันฮาร์โมนิกตกคร่อมตามกฎของโอห์ม แรงดันตกคร่อมดังกล่าวเมื่อรวมกับแรงดันที่ความถี่หลักมูลส่งผลให้รูปคลื่นแรงดันผิดเพี้ยนจากรูปไซน์ด้วย

พารามิเตอร์ที่วิทยานิพนธ์นี้นำมาใช้แสดงสถานะฟองสแตกภายในเตาหลอมคือค่าความเพี้ยนฮาร์โมนิกและสัญญาณรบกวนรวมของแรงดันอาร์ค โดยกำหนดเป็นดัชนีการเกิดฟองสแตกสำหรับแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแตกดังสมการที่ 2.10 ดัชนีการเกิดฟองสแตกดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยยิ่งฟองสแตกหนายิ่งมีค่ามาก

$$\text{slag foaming index} = 1 - (THD + N)_{\text{arc voltage}} \quad (2.10)$$

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 (2.11)

$$(THD + N)_{\text{voltage}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 + V_{\text{noise}}^2}{V_1^2}} \quad (2.11)$$

เมื่อ

- $V_1$  = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันที่ความถี่หลักมูล
- $V_n$  = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันฮาร์โมนิกลำดับที่  $n$
- $V_{\text{noise}}$  = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน
- $n$  = ลำดับฮาร์โมนิก

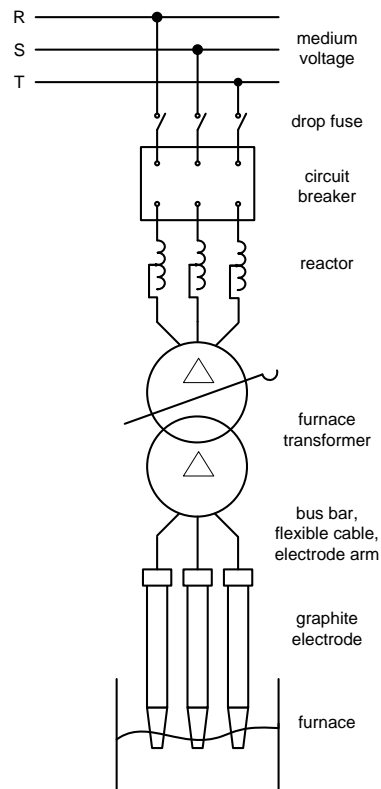
### บทที่ 3

#### การออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก

บทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการออกแบบและสร้างระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ได้แก่ เตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า หลักการทำงานของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก และการเลือกคุณสมบัติตัวกรองและอัตราชักสัญญาณ

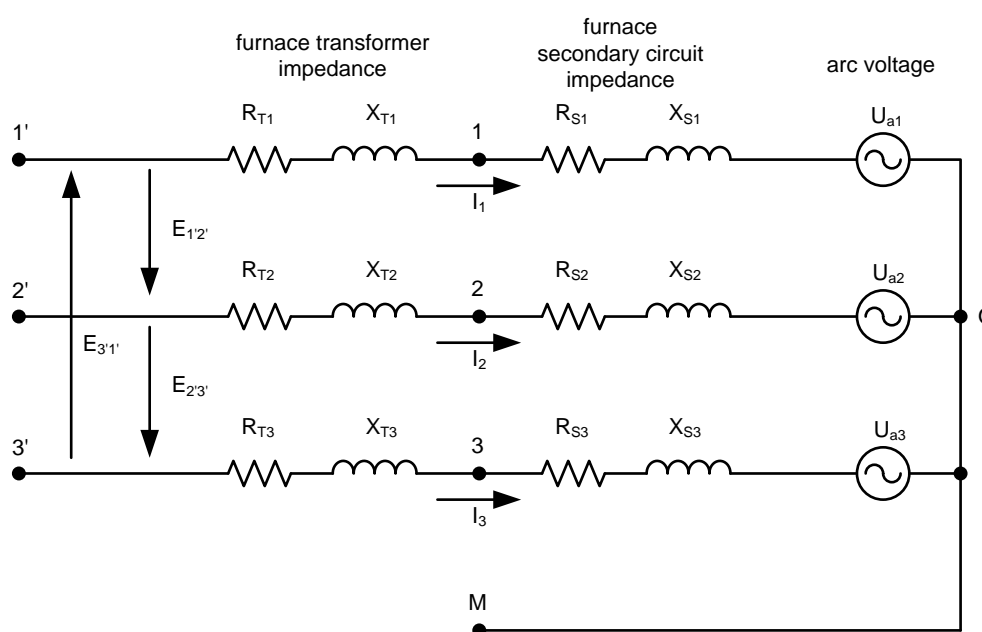
#### 3.1 เตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้ากำลังของเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบด้วยหม้อแปลงเตาหลอม รีแอกเตอร์ บัสบาร์กระแสสูง สายเคเบิลแบบอ่อน แขนจับแท่งอิเล็กโทรด และแท่งอิเล็กโทรด แสดงวงจรไฟฟ้ากำลังของเตาหลอมดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรไฟฟ้ากำลังของเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า

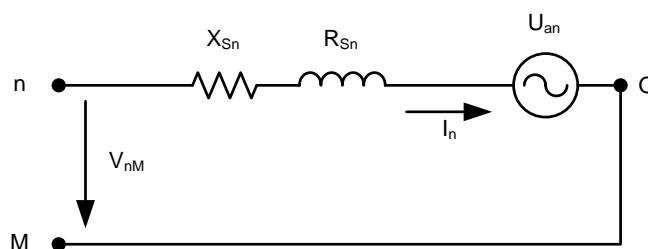
เมื่อพิจารณาตั้งแต่หม้อแปลงเตาหลอมเป็นต้นไป วงจรสมมูลของเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเตา  $R_{Tn} + jX_{Tn}$  อิมพีแดนซ์ของวงจรด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตา  $R_{Sn} + jX_{Sn}$  และแรงดันอาร์ค  $U_{an}$  ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 จุดวัดแรงดันอาร์คในทางปฏิบัติ

เมื่อ	$E_{1'2'}, E_{2'3'}, E_{3'1'}$	=	แรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม
	$R_{Tn} + jX_{Tn}$	=	อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงเตาหลอม
	$R_{Sn} + jX_{Sn}$	=	อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม
	$U_{an}$	=	แรงดันอาร์ค
	$I_n$	=	กระแสเฟส
	$n$	=	1, 2, 3

เมื่อพิจารณาวงจรอาร์คแต่ละเฟส แรงดันเฟสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม  $V_{1M}, V_{2M}$  และ  $V_{3M}$  คือผลรวมของแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ทางด้านวงจรทุติยภูมิ  $V_{Sn} = I_n (R_{Sn} + jX_{Sn})$  กับแรงดันอาร์ค  $U_{an}$  ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรอาร์กแยกแต่ละเฟส

เนื่องจากแรงดันอาร์ก  $U_{an}$  เป็นแรงดันระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับน้ำเหล็ก ซึ่งมีแรงดันฮาร์มอนิกปนอยู่ และกระแส  $I_n$  ที่ไหลประกอบด้วยกระแสฮาร์มอนิกเนื่องจากอาร์กไฟฟ้าเป็นโพลดิโพลไม่เชิงเส้น ดังนั้นแรงดันเฟสด้านทุติยภูมิ  $V_{1M}$ ,  $V_{2M}$  และ  $V_{3M}$  จึงประกอบด้วยแรงดันที่ความถี่หลักมูลและแรงดันฮาร์มอนิกที่สะท้อนเสถียรภาพของอาร์กไฟฟ้าได้เช่นกัน

### 3.2 หลักการทำงานของระบบตรวจสอบการเกิดฟองสแลก

ระบบตรวจสอบการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์กไฟฟ้า เริ่มจากแนวคิดที่ว่าแรงดันอาร์กของเตาหลอมสามารถแสดงสถานะของฟองสแลกภายในเตาได้เนื่องจากฟองสแลกที่ปกคลุมถ่ออาร์กส่งผลต่อเสถียรภาพของอาร์กไฟฟ้า หลักการทำงานคือนำสัญญาณแรงดันเฟสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอมทั้งสามเฟสมาวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงความถี่และคำนวณค่าพารามิเตอร์เป็นดัชนีการเกิดฟองสแลกเพื่อนำไปแสดงสถานะของฟองสแลกในเตาหลอม ระบบที่ออกแบบประกอบด้วยสี่ส่วนหลัก คือ ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ ส่วนดึงสัญญาณ ส่วนประมวลผลข้อมูล และส่วนแสดงผลและจัดเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 3.4



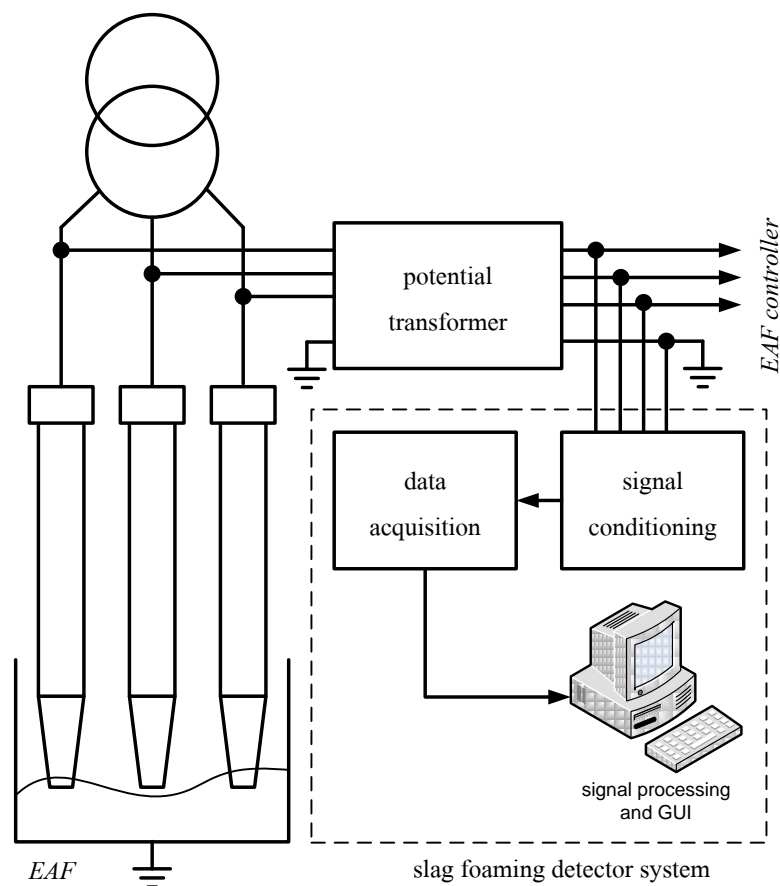
รูปที่ 3.4 แผนภาพบล็อกของระบบตรวจสอบการเกิดฟองสแลก

การทำงานของระบบ เริ่มจากวัดสัญญาณแรงดันเฟสด้านทฤษฎีของหม้อแปลงเตาหลอม ผ่านหม้อแปลงแรงดัน ซึ่งหม้อแปลงดังกล่าวถูกใช้สำหรับลดระดับแรงดันก่อนทำการวัดสัญญาณแรงดันอาร์กที่วัดได้ถูกนำไปปรับให้มีความเหมาะสมโดยส่วนปรับแต่งสัญญาณ (signal conditioning) ก่อนแปลงสัญญาณที่ได้จากแอนะล็อกเป็นดิจิทัลด้วยส่วนดึงสัญญาณ (data acquisition) ข้อมูลที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์สเปกตรัมเชิงความถี่ด้วยวิธีผลการแปลงฟูเรียร์ ช่วงเวลาสั้น (Short Time Fourier Transform: STFT) โดยแบ่งสัญญาณในโดเมนเวลาออกเป็นหลายส่วนและให้มีการเหลื่อมกันด้วยการคูณสัญญาณกับฟังก์ชันวินโดว์ (window function) จากนั้นสัญญาณแต่ละส่วนถูกแปลงด้วยผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) เพื่อหาตัวแทนของสัญญาณในโดเมนความถี่ ซึ่งผลการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้นแสดงดังสมการที่ 3.1

$$X(\omega) = \sum_{n=0}^{L-1} x_{(n)} w_{(n)} e^{-j\omega n} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$X(\omega)$	=	ผลการแปลงฟูเรียร์ช่วงเวลาสั้น
	$x_{(n)}$	=	ข้อมูลซีกตัวอย่าง
	$w_{(n)}$	=	ฟังก์ชันวินโดว์
	$L$	=	จำนวนข้อมูล

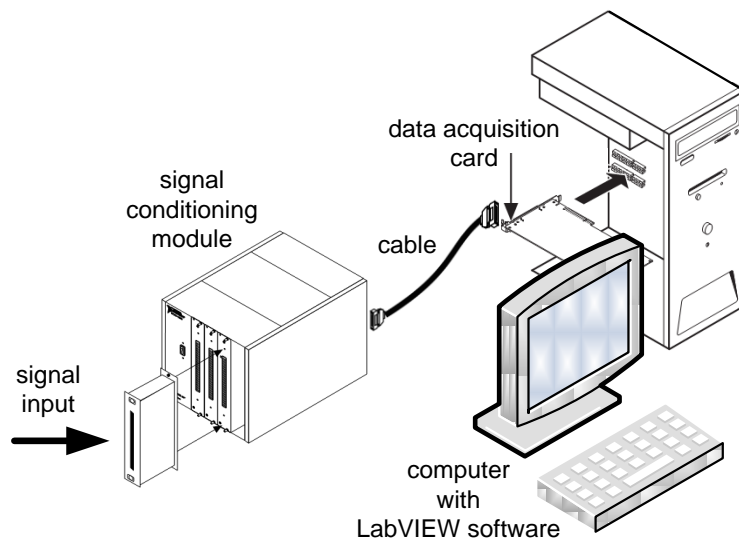
สเปกตรัมเชิงความถี่ที่ได้ถูกนำไปประมวลผลเป็นดัชนีการเกิดฟองสแลก ตามสมการที่ 2.10 และ 2.11 โดยมีการวนรอบทุกๆ หนึ่งวินาที และนำไปแสดงผลแก่ผู้ใช้งานในรูปแบบกราฟ พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลเพื่อเก็บเป็นสถิติการหลอมต่อไป โดยการติดตั้งระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลกแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนภาพบล็อกของการติดตั้งระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก

### 3.3 ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก

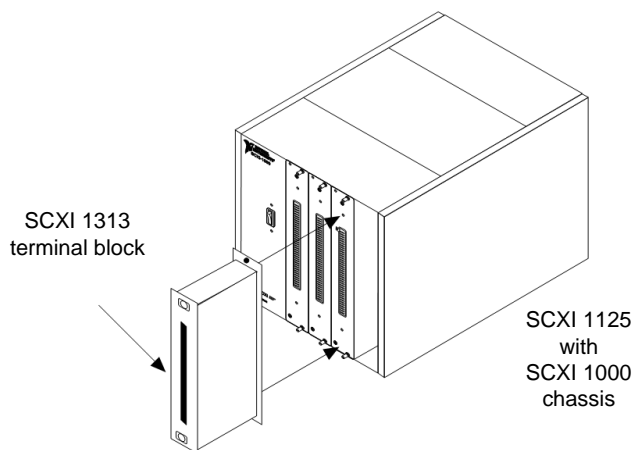
ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า ประกอบด้วยอุปกรณ์วัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ เชื่อมต่อผ่านสายนำสัญญาณไปยังการ์ดดึงสัญญาณแบบ PCI ที่ติดตั้งอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ซึ่งติดตั้งซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลข้อมูลและติดต่อผู้ใช้งาน มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก

### 3.3.1 ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ

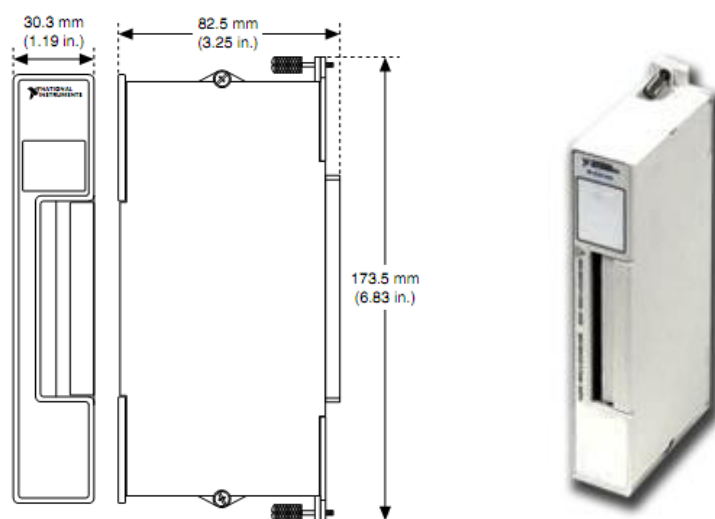
ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณทำหน้าที่รับสัญญาณแรงดันอาร์กเป็นสัญญาณอินพุต พร้อมทั้งปรับเงื่อนไขสัญญาณให้เหมาะสมก่อนส่งผ่านไปยังส่วนดึงสัญญาณ ซึ่งส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 โมดูลหลักทำงานร่วมกัน ได้แก่ SCXI-1313 SCXI-1125 และ SCXI-1000 ดังรูปที่ 3.7 โดยทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์ในตระกูล NI-DAQ ของบริษัท National Instruments



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อของแต่ละโมดูลในส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ

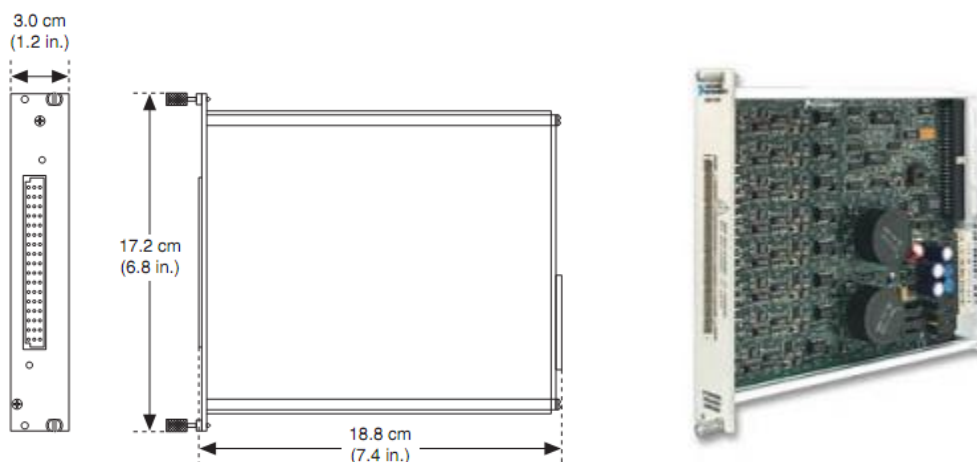


SCXI-1313 [12] เป็นมอดูลบล็อกขั้วต่อแบบโปรแกรมได้ขนาด 18 ขั้วต่อ ประกอบด้วยขั้วต่อสัญญาณ 8 คู่ และขั้วต่อกราวด์ 1 คู่ รองรับแรงดันกระแสสลับขาเข้าได้สูงสุด 300 โวลต์อาร์เอ็มเอส หรือแรงดันขาเข้ากระแสตรงสูงสุด  $\pm 300$  โวลต์ เมื่อใช้งานร่วมกับมอดูล SCXI-1125 อีกทั้งสามารถกำหนดสัดส่วนการลดทอนโดยการโปรแกรมได้สองระดับ คือ 100:1 และ 1:1

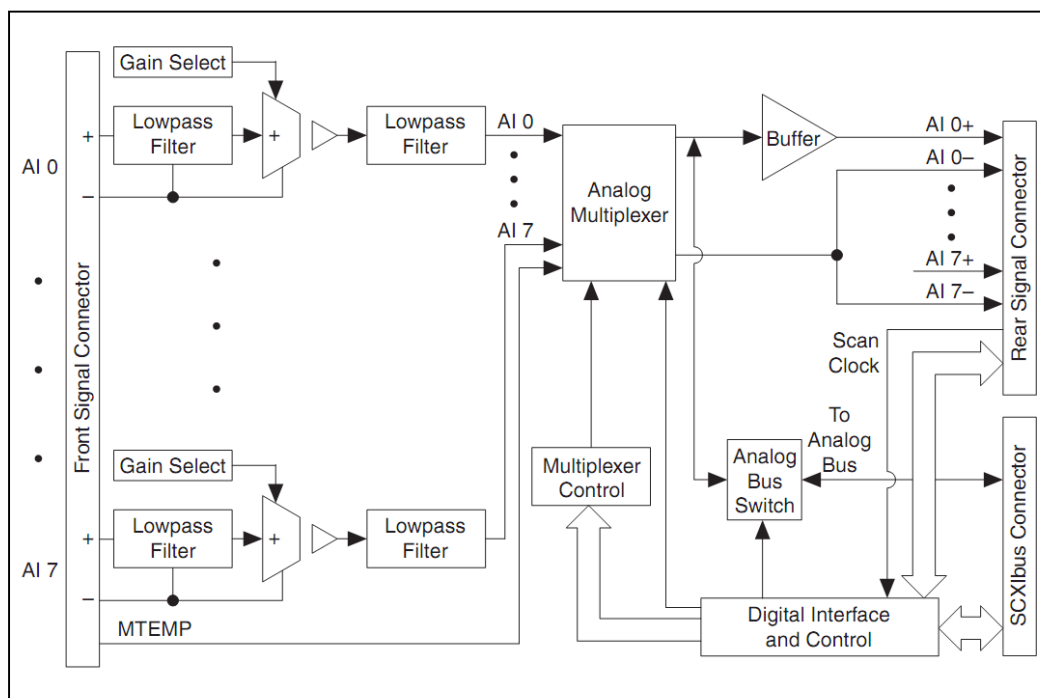


รูปที่ 3.8 มอดูล SCXI-1313

SCXI-1125 [13] เป็นมอดูลปรับเงื่อนไขสัญญาณขนาด 8 ช่องสัญญาณอินพุตแบบแยกโคด พร้อมส่วนขยายสัญญาณและตัวกรองต่ำผ่านแบบโปรแกรมได้ ตัวกรองต่ำผ่านเป็นชนิดบัตเตอร์เวิร์ท (butterworth) ชนิด 4 ขั้ว สามารถเลือกความถี่คัตออฟได้สองระดับ คือ 4 เฮิรตซ์ และ 10 กิโลเฮิรตซ์ ส่วนขยายสัญญาณมีอัตราขยายตั้งแต่ 1 ถึง 2,000 เท่า สามารถรองรับแรงดันขาเข้าตั้งแต่  $\pm 2.5$  มิลลิโวลต์-ยอดถึงยอด ถึง  $\pm 5$  โวลต์-ยอดถึงยอด



รูปที่ 3.9 มอดูล SCXI-1125



รูปที่ 3.10 แผนภาพบล็อกของมอดูล SCXI-1125

SCXI-1000 [14] เป็นเซตซีสำหรับติดตั้งมอดูล SCXI-1313 และ SCXI-1125 มีช่องเชื่อมต่อรองรับมอดูลได้สูงสุด 4 มอดูล ทำหน้าที่เป็นบัลลิสัญญาณให้กับมอดูลต่างๆ อีกทั้งยังมีแหล่งจ่ายภายในตัวเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงให้กับมอดูลที่เชื่อมต่อ



รูปที่ 3.11 มอดูล SCXI-1000

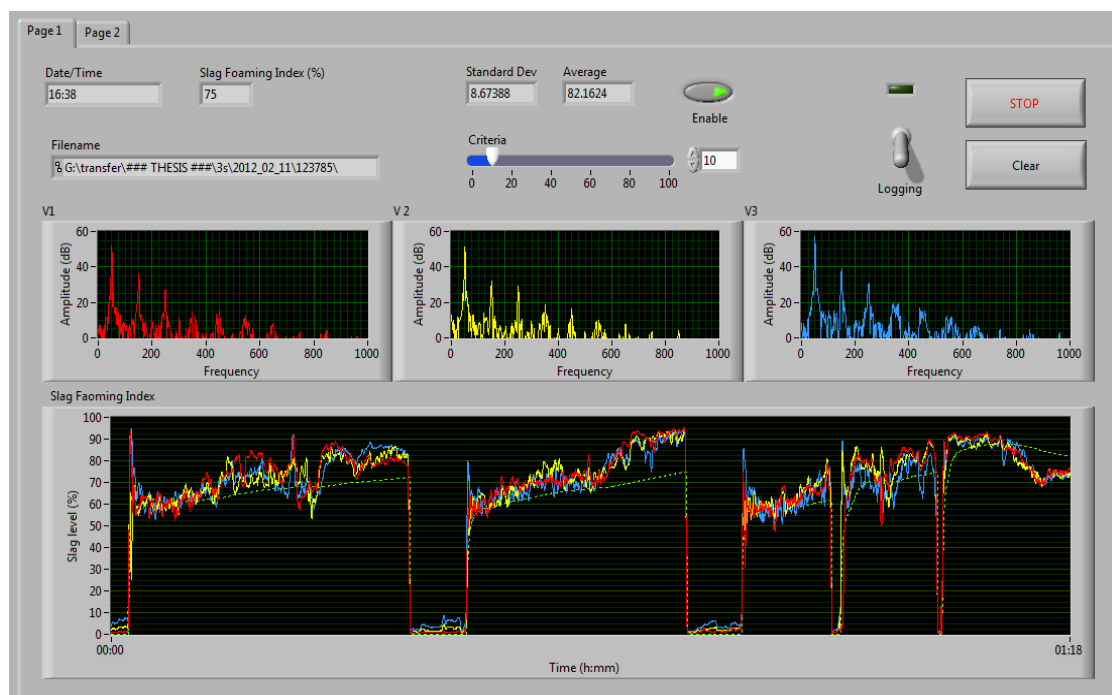
### 3.3.2 ส่วนดึงสัญญาณ

ส่วนดึงสัญญาณทำหน้าที่แปลงสัญญาณแรงดันอาร์คที่ได้จากส่วนปรับเงื่อนไขสัญญาณจากแอนะล็อกเป็นดิจิทัล โดย PCI-6024E [15] เป็นการ์ดดึงสัญญาณแบบ PCI ที่ความละเอียด 12 บิต มีช่องสัญญาณแอนะล็อกรับเข้า 16 ช่องสัญญาณ สามารถชักตัวอย่างสัญญาณสูงสุดที่อัตรา 200,000 ตัวอย่างต่อวินาที



รูปที่ 3.12 การ์ด PCI-6024E





รูปที่ 3.14 หน้าจอของส่วนติดต่อผู้ใช้งานของระบบตรวจสอบการเกิดฟองสแลก

### 3.4 การเลือกคุณสมบัติตัวกรองและอัตราซีกสัญญาณ

จากทฤษฎีการซีกตัวอย่างของไนควิสต์-แชนนอน (Nyquist–Shannon sampling theorem) ระบุเงื่อนไขของการซีกตัวอย่างไว้ว่า ถ้าสัญญาณที่ต้องการซีกตัวอย่างมีความถี่สูงสุดเท่ากับ  $f_{\max}$  อัตราการซีกตัวอย่างต่ำสุดต้องมากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุด หรือ  $f_s > 2f_{\max}$  เพื่อให้สัญญาณที่ได้มีองค์ประกอบของสัญญาณเดิมครบถ้วน และสามารถเป็นตัวแทนของสัญญาณเดิมได้อย่างสมบูรณ์ โดยเรียกอัตรการซีกตัวอย่างต่ำสุดที่สองเท่าของความถี่สูงสุด หรือ  $f_s = 2f_{\max}$  ว่าอัตราไนควิสต์ (Nyquist rate) ซึ่งในกรณีที่อัตรการซีกตัวอย่างน้อยกว่าอัตราไนควิสต์ สัญญาณเชิงความถี่ที่ได้จะเกิดการซ้อนทับกันในช่วงส่วนปลายความถี่หรือเกิดการเคลือบแฝง (aliasing) ส่งผลทำให้สัญญาณดิจิทัลที่ได้มีความผิดเพี้ยน ในที่นี้กำหนดให้ช่วงความถี่ที่สนใจนำไปวิเคราะห์อยู่ในช่วง 0 – 2 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นแนวทางการเลือกคุณสมบัติตัวกรองและอัตราซีกสัญญาณของฮาร์ดแวร์มีดังนี้

1. มอดูล SCXI-1125 เป็นมอดูลที่รวมคุณสมบัติของตัวกรองด้านการเคลือบแฝง (anti aliasing filter) ภายในตัว เป็นตัวกรองแบบต่ำผ่าน (low-pass filter) ชนิดบัตเตอร์เวิร์ท (Butterworth) โดยสามารถเลือกความถี่คัตออฟ (cutoff frequency:  $f_c$ ) ได้สองค่า คือ 4.0 เฮิรตซ์ และ 10 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกความถี่คัตออฟ ที่ 10 กิโลเฮิรตซ์เพื่อให้ครอบคลุมช่วงความถี่ของสัญญาณที่สนใจ

2. การ์ด PCI-6024E สามารถเลือกอัตราการซักร้อยได้สูงสุด 200,000 ตัวอย่างต่อวินาที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการเคลือบแฝง จึงพิจารณาเลือกอัตราการซักร้อยสัญญาณเป็น 5 เท่าของ ความถี่สูงสุดของสัญญาณ หรือที่อัตรา 10,000 ตัวอย่างต่อวินาที ด้วยมาตรฐานสอง (binary scale) ที่ความละเอียด ( $n$ ) เท่ากับ 12 บิต และมีค่าผิดพลาดจากการควอนไทซ์ (quantization error) คือ  $\frac{FS}{2^n}$  หรือร้อยละ 0.02

## บทที่ 4

### ซอฟต์แวร์ระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก

ซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ได้แก่ ส่วนตั้งค่าและเริ่มต้นทำงานของฮาร์ดแวร์ ส่วนประมวลผลข้อมูลเพื่อหาดัชนีการเกิดฟองสแลก ส่วนแสดงผล และส่วนบันทึกข้อมูล โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกพัฒนาซอฟต์แวร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW เนื่องจากช่วยอำนวยความสะดวกในการเขียน โปรแกรมติดต่อกับฮาร์ดแวร์ต่างๆ อีกทั้งยังมีฟังก์ชันสนับสนุนการประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล ตลอดจนการแสดงผลข้อมูลและจัดเก็บข้อมูลต่างๆ อย่างมากมาย

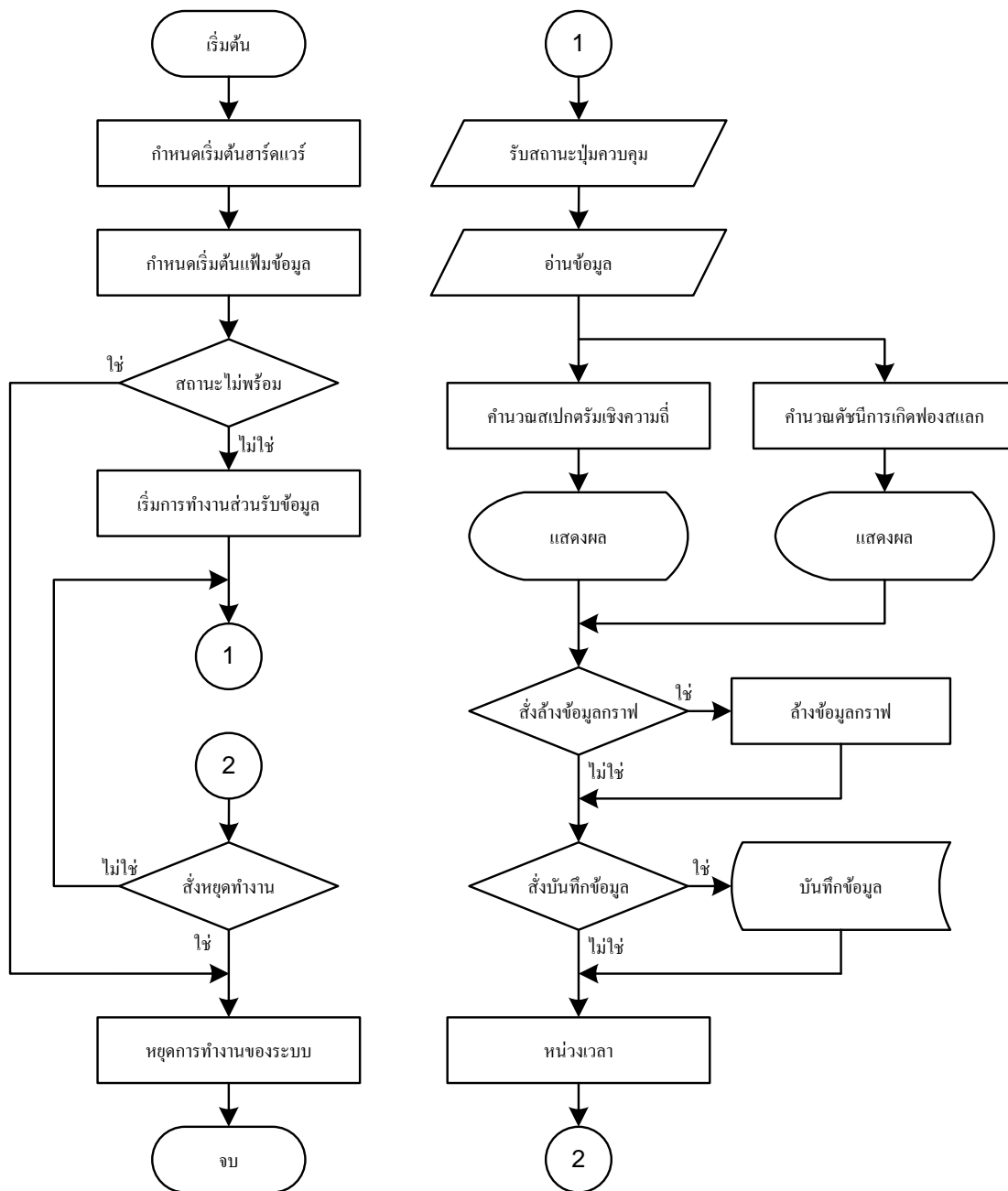
#### 4.1 โปรแกรม LabVIEW

โปรแกรม LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท National Instrument มีวัตถุประสงค์เพื่อสนับสนุนงานด้านการวัด และระบบเครื่องมือวัดทางวิศวกรรม มีชุดคำสั่งที่รองรับการทำงานของอุปกรณ์ และฟังก์ชันสนับสนุนการจัดการด้านการวัดและการประมวลผลข้อมูลต่างๆ อย่างมากมาย โดย LabVIEW มีลักษณะเป็นส่วนประสานกราฟิกกับผู้ใช้ หรือ GUI (graphic user interface) กล่าวคือ โปรแกรมย่อยต่างๆ มีลักษณะเป็นกราฟิกซึ่งถูกแสดงด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ ผู้ใช้งานสามารถลากและวางรูปภาพหรือสัญลักษณ์เหล่านั้นเพื่อนำมาเขียน โปรแกรมได้โดยไม่ต้องเขียนคำสั่งเป็นบรรทัดเหมือนโปรแกรมอื่นๆ เช่น โปรแกรมภาษา C หรือภาษา JAVA จึงง่ายต่อการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้งานร่วมกับเครื่องมือวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 4.2 หลักการทำงานของซอฟต์แวร์ของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก

ซอฟต์แวร์ของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก ประกอบด้วยส่วนของการตั้งค่าและเริ่มต้นทำงานของฮาร์ดแวร์ ส่วนประมวลผลข้อมูลเพื่อหาดัชนีการเกิดฟองสแลก ส่วนแสดงผล และส่วนบันทึกข้อมูล เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจึงแบ่งโปรแกรมออกเป็น

สองส่วนตามลักษณะงาน คือ ส่วนของโปรแกรมที่ทำงานเพียงครั้งเดียว และส่วนของโปรแกรมที่ทำงานแบบวนรอบ โดยผังงานโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผังงาน โปรแกรมระบบตรวจสอบการเกิดฟองสแลก



### 4.3 ส่วนงานของโปรแกรมที่ทำงานเพียงครั้งเดียว

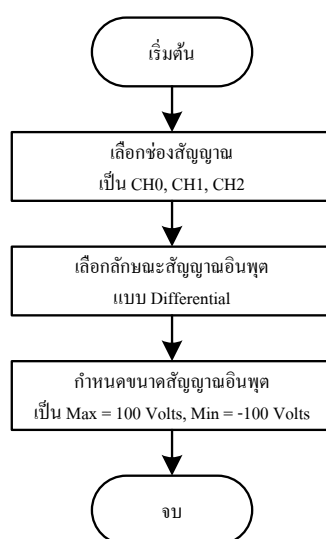
โปรแกรมย่อยที่ทำงานเพียงครั้งเดียว ประกอบด้วย การกำหนดเริ่มต้นฮาร์ดแวร์ การกำหนดเริ่มต้นแฟ้มข้อมูล และส่วนรับข้อมูลอินพุตจากส่วนดึงสัญญาณ ซึ่งโปรแกรมเหล่านี้ เป็นโปรแกรมแบบสำเร็จรูป ดังนี้

#### 4.3.1 การกำหนดเริ่มต้นฮาร์ดแวร์

การกำหนดเริ่มต้นฮาร์ดแวร์เป็นการกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของฮาร์ดแวร์ในระบบ ก่อนเริ่มต้นการทำงาน ประกอบด้วยกันสองส่วน คือ

4.3.1.1 การกำหนดเริ่มต้นส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (มอดูล SCXI-1313 และ SCXI-1125) ดังนี้

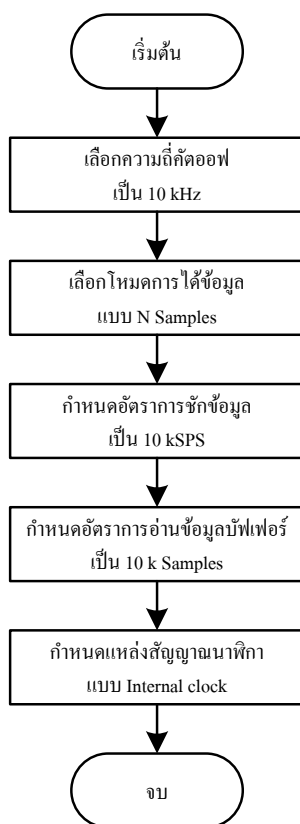
- เลือกช่องสัญญาณที่ใช้งาน เลือกใช้ CH0, CH1 และ CH2
- เลือกลักษณะสัญญาณอินพุตแบบ Differential เนื่องจากสัญญาณอินพุต เป็นลักษณะ ground signal source [16]
- กำหนดขนาดสัญญาณอินพุตสูงสุดและต่ำสุดที่  $\pm 100$  โวลต์



รูปที่ 4.2 ผังงานการกำหนดเริ่มต้นส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ

4.3.1.2 การกำหนดเริ่มต้นตัวกรองและส่วนดึงสัญญาณ (มอดูล SCXI-1125 และ การ์ด PCI-6024E) ดังนี้

- เลือกความถี่คัตออฟของตัวกรองต่ำผ่านที่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์
- เลือกโหมดการได้ข้อมูล เป็น โหมด N Samples
- กำหนดอัตราการซีกข้อมูลที 10,000 ตัวอย่างต่อวินาที
- กำหนดอัตราการอ่านข้อมูลบัพเฟอ์ทุกๆ 10,000 ตัวอย่าง
- กำหนดแหล่งที่มาสัญญาณนาฬิกาสำหรับการซีกข้อมูล เป็นสัญญาณนาฬิกาภายใน

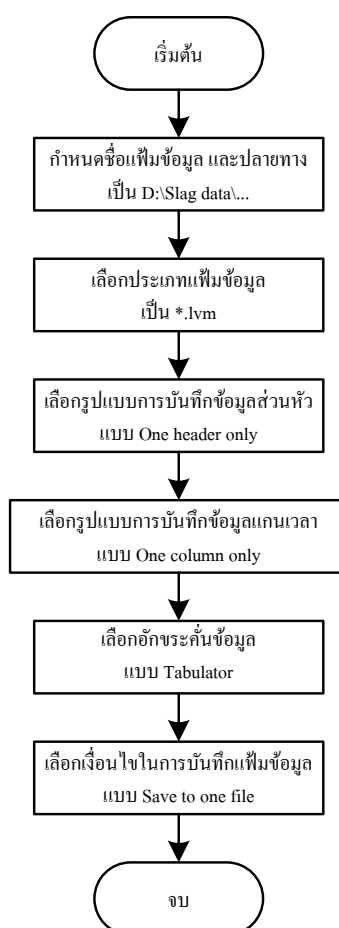


รูปที่ 4.3 ผังงานการกำหนดเริ่มต้นตัวกรองและส่วนดึงสัญญาณ

### 4.3.2 การกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูล

การกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูลเป็นการกำหนดคุณสมบัติสำหรับเปิดเพิ่มข้อมูลเพื่อบันทึกข้อมูลสถานะของฟองสแลก โดยกำหนดในโปรแกรมสำเร็จรูป ดังนี้

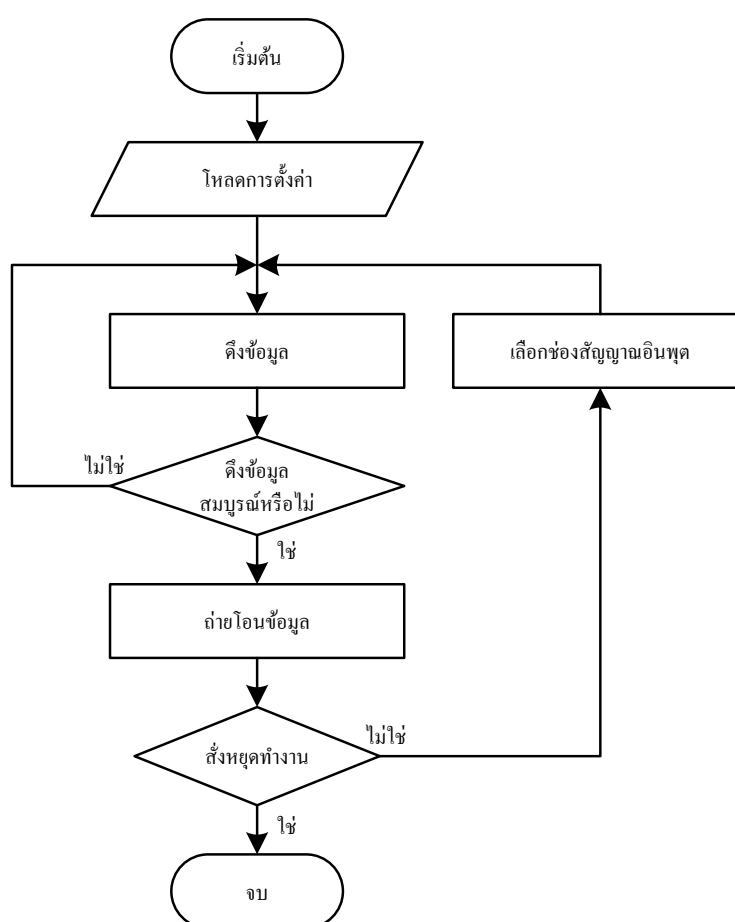
- กำหนดชื่อเพิ่มข้อมูล และปลายทางในการจัดเก็บเพิ่มข้อมูล
- เลือกประเภทเพิ่มข้อมูลเป็นประเภท \*.lvm
- เลือกรูปแบบการบันทึกข้อมูลส่วนหัวแบบเดี่ยว
- เลือกรูปแบบการบันทึกข้อมูลแกนเวลาแนวตั้งแบบเดี่ยว
- เลือกอักขระคั่นข้อมูลแบบเลื่อนแคร์
- เลือกเงื่อนไขในการบันทึกเพิ่มข้อมูลแบบไฟล์เดี่ยว



รูปที่ 4.4 ผังงานการกำหนดเริ่มต้นเพิ่มข้อมูล

### 4.3.3 ส่วนรับข้อมูลอินพุตจากส่วนดึงสัญญาณ

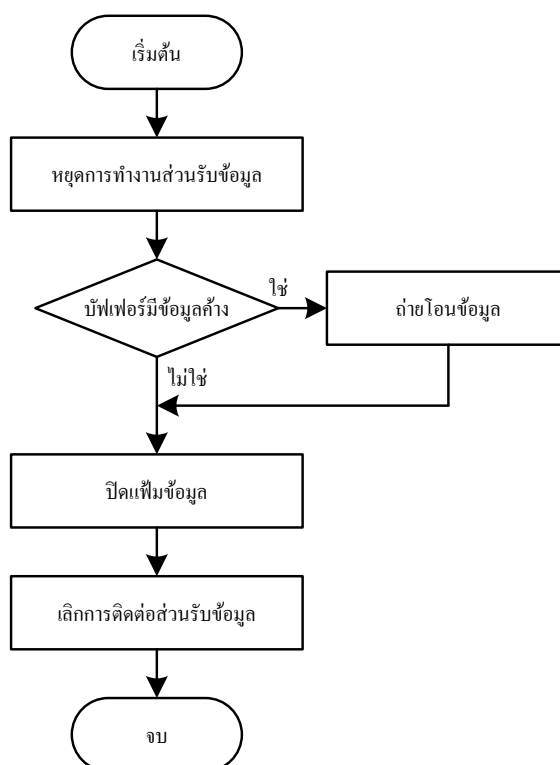
โปรแกรมในส่วนนี้เป็นการสั่งให้ส่วนดึงสัญญาณเริ่มต้นทำงาน เริ่มจากโหลดข้อมูลการตั้งค่า ได้แก่ช่องสัญญาณอินพุตที่ใช้ ลักษณะสัญญาณอินพุต ย่านวัด อัตราการชักข้อมูล อัตราการอ่านข้อมูลบัพเฟอร์ และแหล่งสัญญาณนาฬิกา ตามหัวข้อ 4.3.2.1 และ 4.3.2.2 เพื่อให้มอดูล SCXI และการ์ดดึงสัญญาณทำงานตามที่กำหนด จากนั้นจึงเริ่มดึงข้อมูล และตรวจสอบสถานะของการดึงข้อมูลว่าได้ข้อมูลครบถ้วนตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้หรือไม่ จากนั้นจึงถ่ายโอนข้อมูลจากบัพเฟอร์ออกมายังหน่วยความจำ และถ้าไม่มีการสั่งหยุดทำงาน โปรแกรมจะวนรอบไปยังขั้นตอนเลือกช่องสัญญาณอินพุตถัดไป และเริ่มดึงข้อมูลอีกครั้ง



รูปที่ 4.5 ฟังงานส่วนรับข้อมูลอินพุตจากส่วนดึงสัญญาณ

#### 4.3.4 ส่วนหยุดการทำงานระบบ

โปรแกรมในส่วนนี้เป็นขั้นตอนในการสั่งให้ระบบหยุดทำงาน โดยเมื่อได้รับสัญญาณขัดจังหวะให้หยุดทำงานจากปุ่มควบคุมหรือส่วนตรวจสอบสถานะ ส่วนรับข้อมูลจะหยุดดึงข้อมูล และตรวจสอบถ้ามีข้อมูลค้างอยู่ในบัฟเฟอร์ให้ถ่ายโอนข้อมูลก่อน จากนั้นจึงปิดแฟ้มข้อมูล และเลิกติดต่อกับส่วนรับข้อมูล ดังนี้



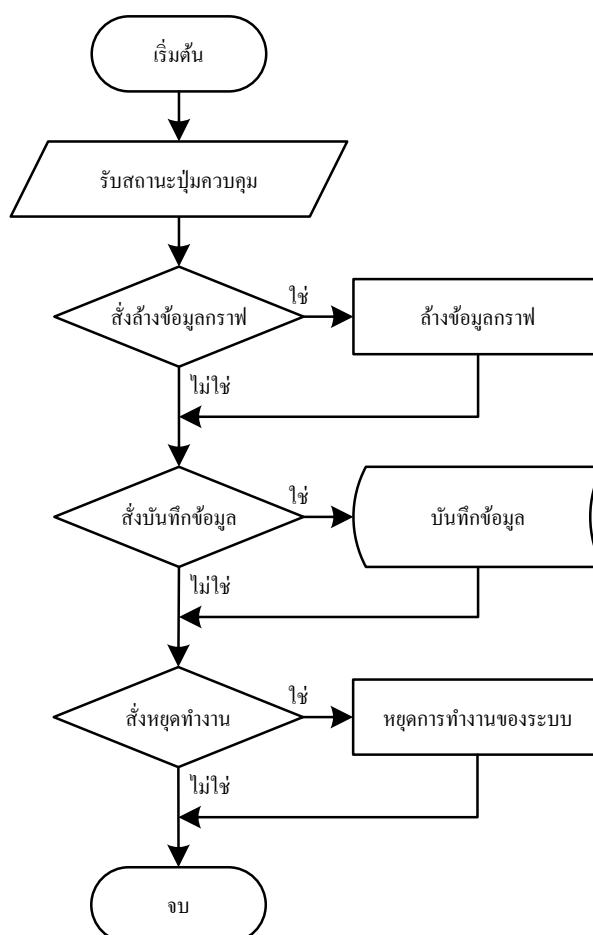
รูปที่ 4.6 ผังงานส่วนหยุดการทำงานระบบ

#### 4.4 ส่วนของโปรแกรมที่ทำงานแบบวนรอบ

โปรแกรมย่อยที่ทำงานแบบวนรอบ มีลักษณะการทำงานแบบวนซ้ำ โดยเริ่มต้นและสิ้นสุดการทำงานในทุกๆ รอบการทำงาน โดยกำหนดให้มีการหน่วงเวลาทุก 1 วินาที ประกอบด้วยส่วนตรวจสอบสถานะของปุ่มควบคุม และส่วนประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล ดังนี้

#### 4.4.1 ส่วนตรวจสอบสถานะปุ่มควบคุม

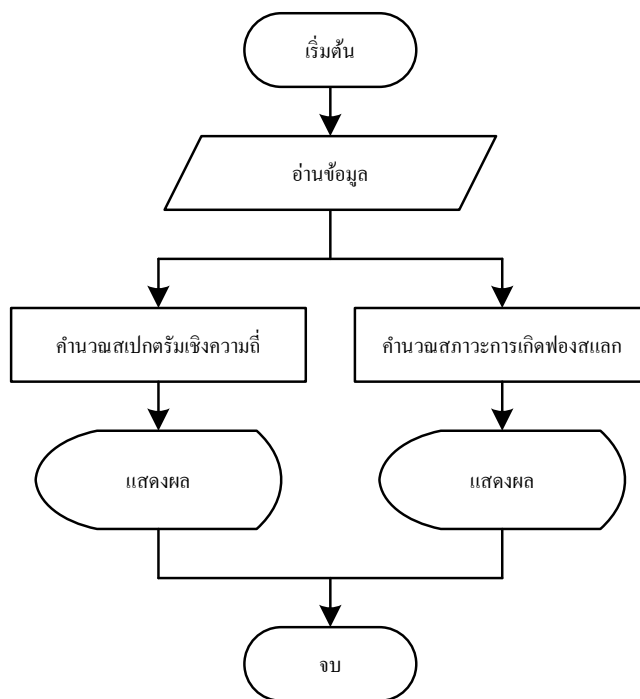
โดยรับข้อมูลสถานะปุ่มควบคุมต่างๆ ได้แก่ ปุ่มหยุดการทำงาน ปุ่มล้างข้อมูลกราฟ ปุ่มบันทึกข้อมูลดัชนีการเกิดฟองสแตก และตรวจสอบว่ามีการสั่งหยุดการทำงานหรือไม่



รูปที่ 4.7 ผังงานส่วนตรวจสอบสถานะปุ่มควบคุม

#### 4.4.2 ส่วนประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล

โปรแกรมส่วนการประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัลนี้ ทำหน้าที่แปลงข้อมูลแรงดันอาร์คเป็นสเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดันด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Spectral Measurements Express VI และคำนวณข้อมูลแรงดันอาร์คเป็นดัชนีการเกิดฟองสแตกด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SINAD Analyzer VI โดยข้อมูลที่ประมวลผลได้ถูกแสดงผลในรูปแบบกราฟบนหน้าจอ



รูปที่ 4.8 ผังงานส่วนประมวลผลข้อมูลทางดิจิทัล

โปรแกรมสำเร็จรูป Spectral Measurements Express VI เป็นโปรแกรมสำหรับวัดสเปกตรัมกำลัง (power spectrum) ของลำดับข้อมูลสัญญาณอินพุต โดยใช้ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) แบบ fast radix-2 [17] สำหรับหาตัวแทนของสัญญาณในโดเมนความถี่และนำมาคำนวณหาสเปกตรัมกำลัง  $S_{xx}$  ดังสมการที่ 4.1 แผนภาพบล็อกของโปรแกรมสำเร็จรูป Spectral Measurements Express VI แสดงได้ดังรูปที่ 4.9

$$S_{xx} = \frac{|F\{X\}|^2}{n^2} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$S_{xx}$  = สเปกตรัมกำลัง

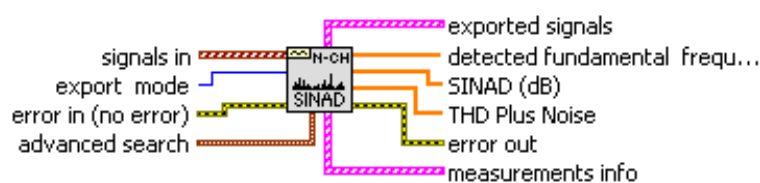
$X$  = ลำดับข้อมูล

$n$  = จำนวนข้อมูล



รูปที่ 4.9 แผนภาพบล็อกของโปรแกรมสำเร็จรูป Spectral Measurements Express VI

โปรแกรมสำเร็จรูป SINAD Analyzer VI เป็นโปรแกรมสำหรับวัดค่าความเพี้ยน (distortion) ของลำดับข้อมูลสัญญาณอินพุต โดยใช้ผลการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) แบบ fast radix-2 ในการหาตัวแทนของสัญญาณในโดเมนความถี่และนำมาคำนวณหาค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกและสัญญาณรบกวนรวม (Total Harmonic Distortion plus Noise, THD+N) ดังสมการที่ 2.11 แผนภาพบล็อกของโปรแกรมสำเร็จรูป SINAD Analyzer VI แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แผนภาพบล็อกของโปรแกรมสำเร็จรูป SINAD Analyzer VI

เนื่องด้วยโปรแกรมส่วนต่างๆ ล้วนถูกเขียนขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW ประกอบไปด้วย ส่วนประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI) ที่เรียกว่าแผงส่วนหน้า (front panel) และส่วนของรหัสต้นฉบับ (source code) ที่เรียกว่าแผนภาพบล็อก (block diagram) ซึ่งทั้งสองส่วนสามารถดูรายละเอียดในภาคผนวก ข



## บทที่ 5

### การทดสอบและผลการทดสอบ

บทนี้กล่าวถึงวิธีดำเนินการทดสอบ และผลการทดสอบระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแตกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์ให้ดำเนินการทดสอบที่โรงหลอมของบริษัท สยามสตีลซินดิเกต จำกัด (มหาชน) ตำบลท้ายบ้าน อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งดำเนินการด้านอุตสาหกรรมผลิตเหล็กข้อย่อย ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10-40 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SD30 SD40 และ SD50 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิต มอก. 24-2548 และเหล็กเส้นกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12-25 มิลลิเมตร ชั้นคุณภาพ SR24 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมการผลิต มอก. 20-2543

#### 5.1 เตาหลอมเหล็กและกระบวนการหลอมเหล็กที่ทำการทดสอบ

เตาหลอมของบริษัท สยามสตีลซินดิเกต จำกัด (มหาชน) เป็นเตาหลอมชนิดอาร์คไฟฟ้า กระแสสลับสามเฟส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเตา 4.20 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางอิเล็กโทรด 0.41 เมตร พิกัดหม้อแปลงอาร์คขนาด 18 เมกกะโวลต์แอมป์ เตาหลอมมีระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ มีท่อพ่นออกซิเจนจำนวน 3 ท่อ และท่อพ่นคาร์บอนจำนวน 1 ท่อ โดยกระบวนการหลอมมีลักษณะเป็นการหลอมแบบไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือการหลอมหนึ่งเตา มีการใส่เศษเหล็กลงในเตาจำนวน 3 ถัง ซึ่งระหว่างการใส่เศษเหล็กแต่ละถังมีการให้พลังงานความร้อนจากการอาร์คของแท่งอิเล็กโทรดเพื่อหลอมละลายเศษเหล็ก และมีการเติมฟลักซ์เพื่อปรับสภาพสแตก เมื่อเศษเหล็กถึงที่สามถูกหลอมละลายทั้งหมด จึงเข้าสู่กระบวนการทำสแตกให้เป็นฟอง และกระบวนการปรับปรุงส่วนผสมของน้ำเหล็กให้มีความเหมาะสม จนกระทั่งอุณหภูมิถึง 1,600 องศาเซลเซียส จึงเทสแตกทิ้งแล้วเทน้ำเหล็กลงในถังรับน้ำเหล็กเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการหลอมเหล็กของบริษัท สยามสตีลซินดิเกท จำกัด (มหาชน)

เนื่องด้วยการทดสอบสามารถกระทำได้เฉพาะช่วงที่มีการผลิตจริงเท่านั้น ดังนั้นรายละเอียดต่างๆ ของกระบวนการผลิตจึงต้องนำมาพิจารณา ดังนี้

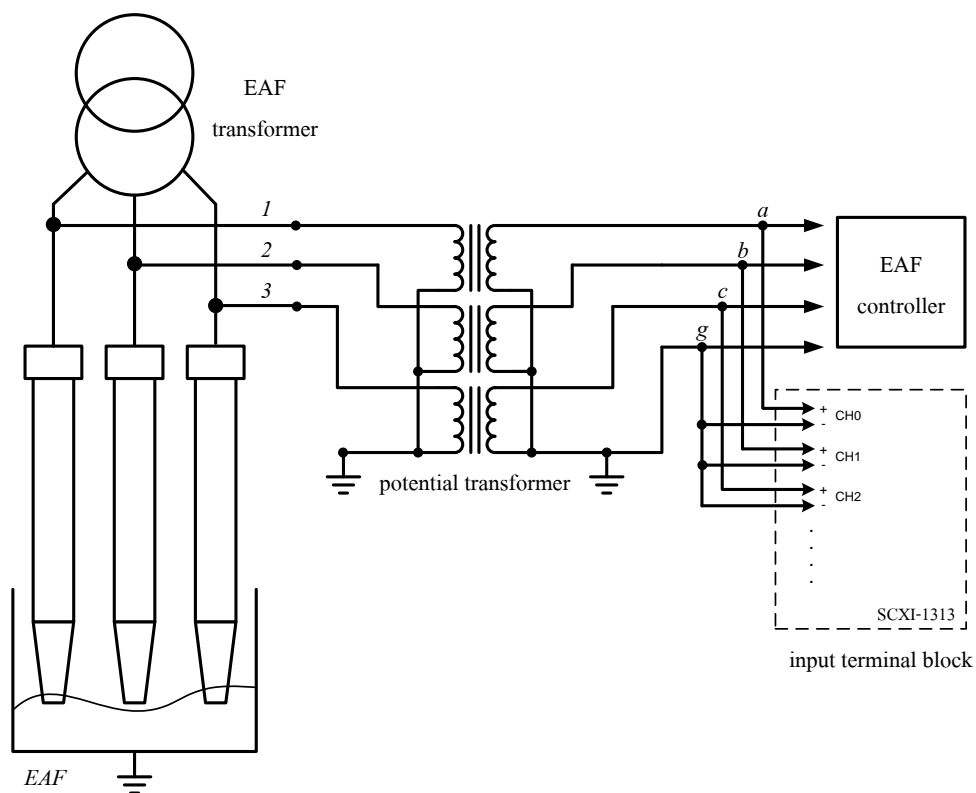
1. การควบคุมการฟูของสแลก สามารถทำได้โดยควบคุมจากการปรับอัตราการฟั่นแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนเท่านั้น อีกทั้งขั้นตอนการฟั่นแก๊สออกซิเจนและคาร์บอนกระทำโดยผู้ปฏิบัติงาน จึงยากที่จะควบคุมให้สแลกมีความฟูคงที่ตลอดการหลอม
2. การควบคุมส่วนผสมทางเคมีเพื่อให้สแลกมีสภาวะเหมาะสมต่อการฟูเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก จึงไม่สามารถควบคุมให้สแลกมีสภาวะที่เหมาะสมตลอดช่วงการหลอมได้
3. ระดับแรงดันอาร์กของเตามีระดับแรงดันไม่คงที่ โดยแปรตามความต้องการให้ความร้อนของเตาในแต่ละช่วงของการหลอม

## 5.2 การติดตั้งใช้งานระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก

ในการทดสอบใช้งานระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก มีรายละเอียดที่ต้องพิจารณาสำหรับการติดตั้งระบบ ดังนี้

1. เตาหลอมของโรงงานที่ใช้ดำเนินการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้ แรงดันสาย ( $V_{L-L}$ ) ทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงเตาหลอม มีค่าอยู่ในช่วงระดับแรงดัน 330-450 โวลต์
2. มีการติดตั้งหม้อแปลงแรงดันสำหรับป้อนกลับไปยังระบบควบคุมเตาเป็นหม้อแปลงขนาด 260/52 โวลต์ และมีการเดินสายสัญญาณป้อนกลับจากหม้อแปลงแรงดันมายังระบบควบคุมเตาหลอมบริเวณห้องควบคุมเตา

จากปัจจัยที่กล่าวข้างต้น จึงพิจารณาให้ติดตั้งระบบตรวจสอบการเกิดฟองสแตก  
 ในบริเวณห้องควบคุมเตาเพื่อความสะดวกในการวัด โดยขนานสัญญาณแรงดันอิเล็กทรอนิกส์  
 จากขั้วต่อด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแรงดันเป็นสัญญาณอินพุตของระบบ ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3



รูปที่ 5.2 การต่อวัดสัญญาณแรงดัน



รูปที่ 5.3 การติดตั้งระบบตรวจสอบการเกิดฟองสแตก

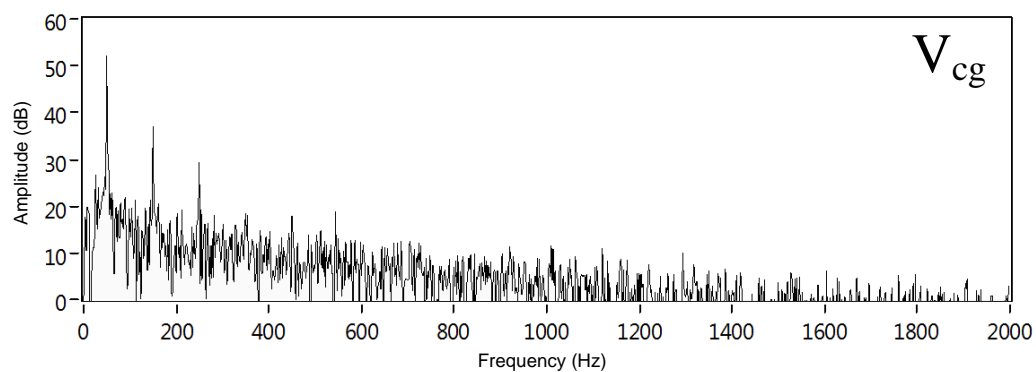
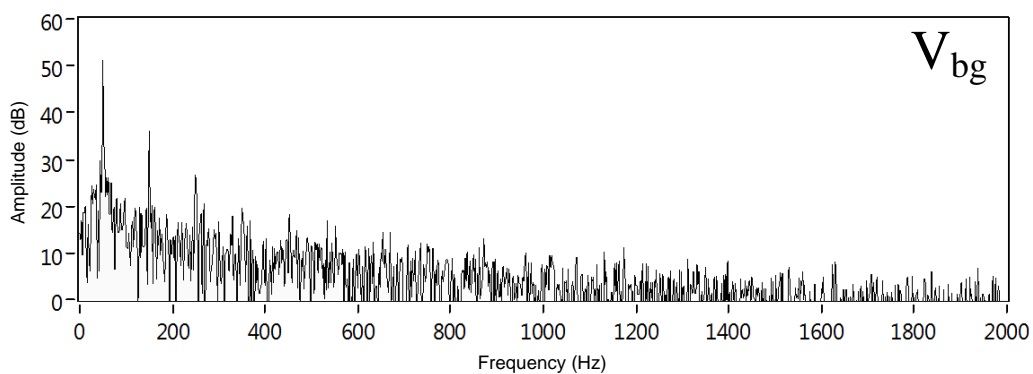
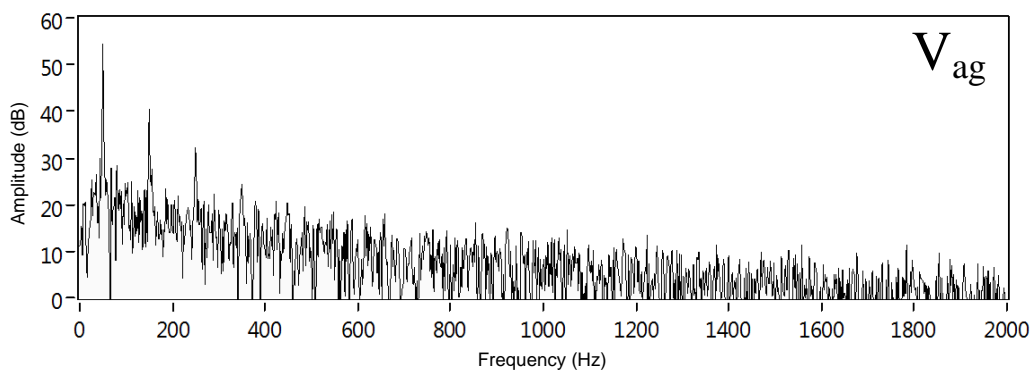
พิจารณารูปที่ 5.2 ในขณะที่เตาหลอมทำงาน แรงดัน  $V_{12}$ ,  $V_{23}$  และ  $V_{31}$  ทางด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงแรงดันมีขนาดแรงดันสายอยู่ในช่วง 330 ถึง 450 โวลต์ (แรงดันเฟส 190.5 ถึง 260 โวลต์) หม้อแปลงแรงดันมีขนาด 260/52 โวลต์ ดังนั้นแรงดัน  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  และ  $V_{cg}$  ตรงจุดวัดทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงแรงดันมีระดับแรงดันเฟสอยู่ในช่วง 38.1 ถึง 52 โวลต์ (53.9 ถึง 73.5 โวลต์-ยอดถึงยอด) เนื่องจากส่วนปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (มอดูล SCXI-1313 และ SCXI-1125) สามารถกำหนดอัตราขยายรวม (overall gain) ตั้งแต่ 0.01 เท่า ถึง 2,000 เท่า จึงสามารถรองรับระดับแรงดันขาเข้าได้ตั้งแต่  $\pm 2.5$  มิลลิโวลต์-ยอดถึงยอด ถึง 300 โวลต์อาร์เอ็มเอส และแรงดันเฟสที่จุดวัด ( $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  และ  $V_{cg}$ ) มีขนาดสูงสุด 73.5 โวลต์-ยอดถึงยอด จึงกำหนดให้ส่วนวัดและปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติมีอัตราขยายสัญญาณรวมเท่ากับ 0.05 เท่า หรือรองรับแรงดันขาเข้าสูงสุด  $\pm 100$  โวลต์-ยอดถึงยอด

### 5.3 การทดสอบระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก

การทดสอบใช้งานระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก ประกอบด้วยการทดสอบหาดัชนีการเกิดฟองสแลกที่เหมาะสม การทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแลก การเปรียบเทียบผลการวัดกับอัตราการฟุ้งแก๊ส และการเปรียบเทียบผลการวัดกับส่วนผสมทางเคมีของสแลก

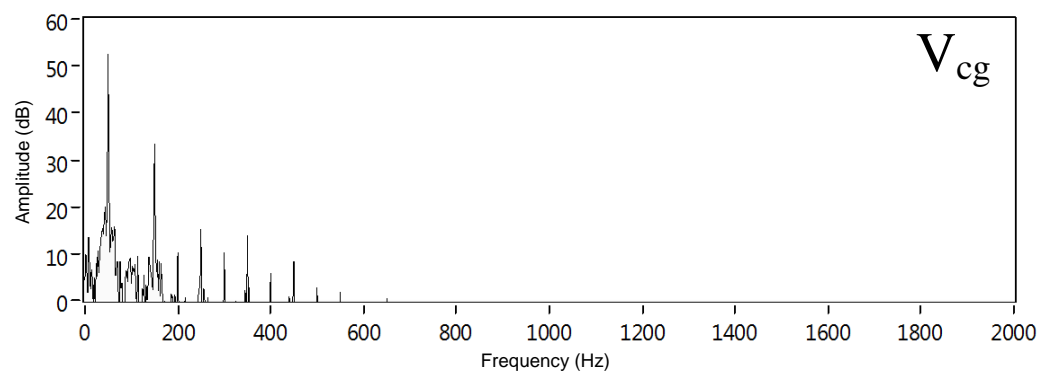
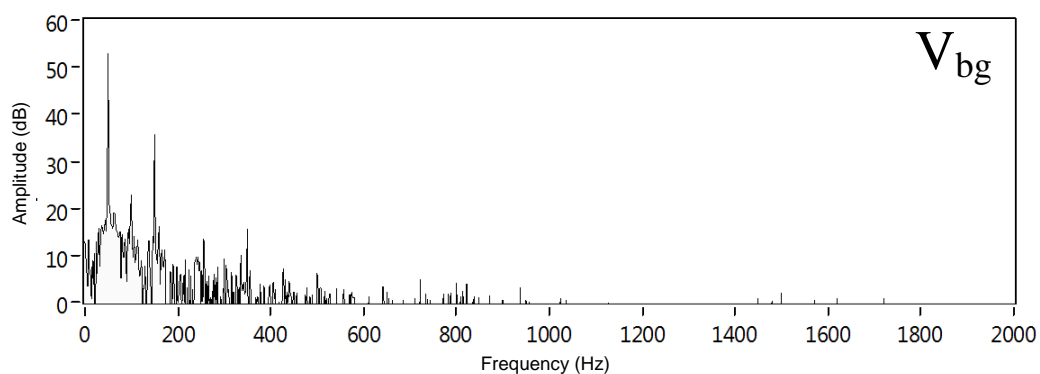
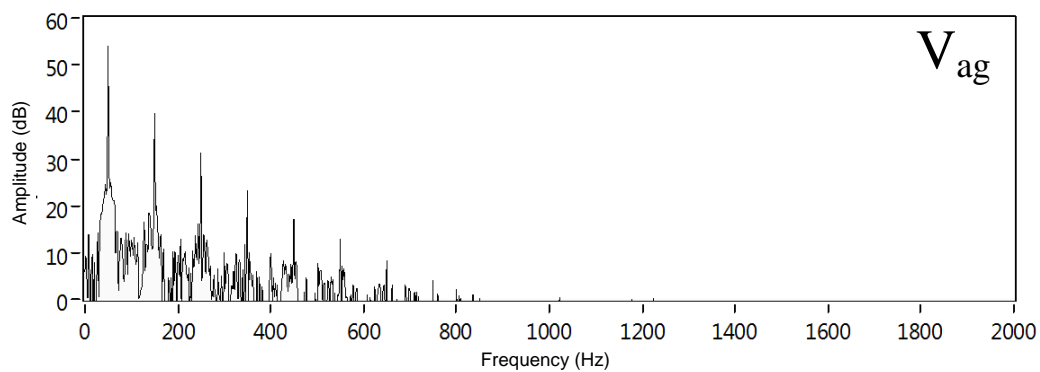
#### 5.3.1 การทดสอบหาดัชนีการเกิดฟองสแลกที่เหมาะสม

เพื่อกำหนดดัชนีการเกิดฟองสแลกที่เหมาะสม เริ่มจากทดสอบวัดสเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดัน ณ จุดวัด  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  และ  $V_{cg}$  ขณะที่สแลกไม่เป็นฟอง และสแลกเป็นฟอง ซึ่งผลการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 5.4 และ 5.5



รูปที่ 5.4 สเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดัน ณ จุดวัด  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  และ  $V_{cg}$

ขณะสแลกไม่เป็นฟอง



รูปที่ 5.5 สเปกตรัมเชิงความถี่ของแรงดัน ณ จุดวัด  $V_{ag}$ ,  $V_{bg}$  และ  $V_{cg}$

ขณะสแลกเป็นฟอง

จากผลการทดสอบพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงระดับของฮาร์มอนิก และอินเตอร์ฮาร์มอนิกที่ชัดเจนตลอดช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 – 2,000 เฮิรตซ์ โดยระดับของอินเตอร์ฮาร์มอนิกมีค่าระหว่าง 0 ถึง 20 เดซิเบลขณะสแลกไม่เป็นฟอง และลดลงต่ำกว่า 10 เดซิเบลขณะ

สแตกเป็นฟอง ดังนั้น ดัชนีการเกิดฟองสแตกจากสมการที่ 2.10 และ 2.11 จึงกำหนดให้พิจารณาถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ 40 ดังสมการที่ 5.1

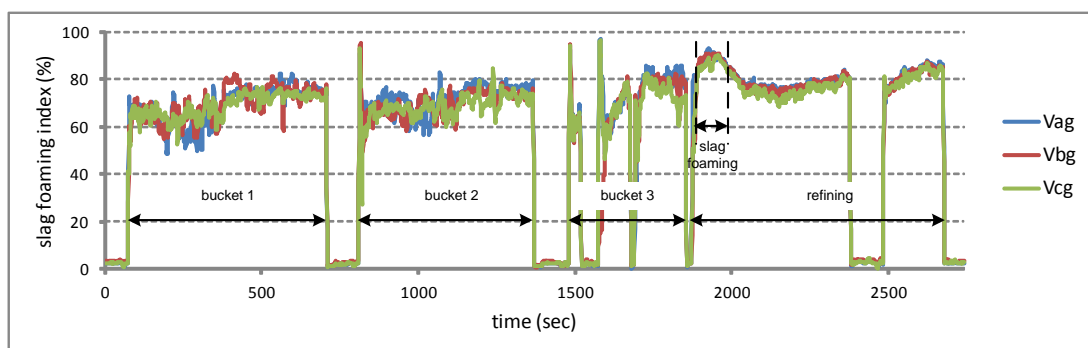
$$\text{slag foamng index} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{40} V_n^2 + V_{noise}^2}{V_1^2}} \quad (5.1)$$

เมื่อ

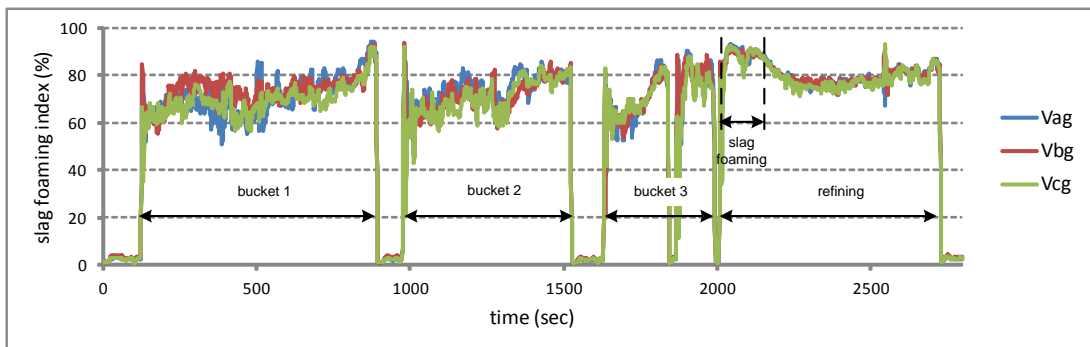
- $V_1$  = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันที่ความถี่หลักมูล
- $V_n$  = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่  $n$
- $V_{noise}$  = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน
- $n$  = ลำดับฮาร์มอนิก

### 5.3.2 การทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแตก

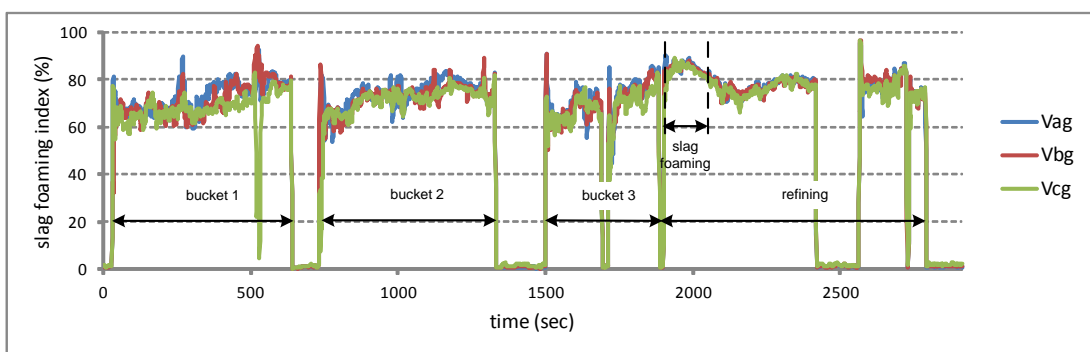
การทดสอบวัดการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแตก มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบว่าดัชนีการเกิดฟองสแตกที่ได้จากระบบ สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแตกภายในเตาได้หรือไม่ โดยบันทึกค่าดัชนีการเกิดฟองสแตกของแต่ละเตา ของเตาหลอมที่ 123938 ถึง 123940 จำนวน 3 เตา



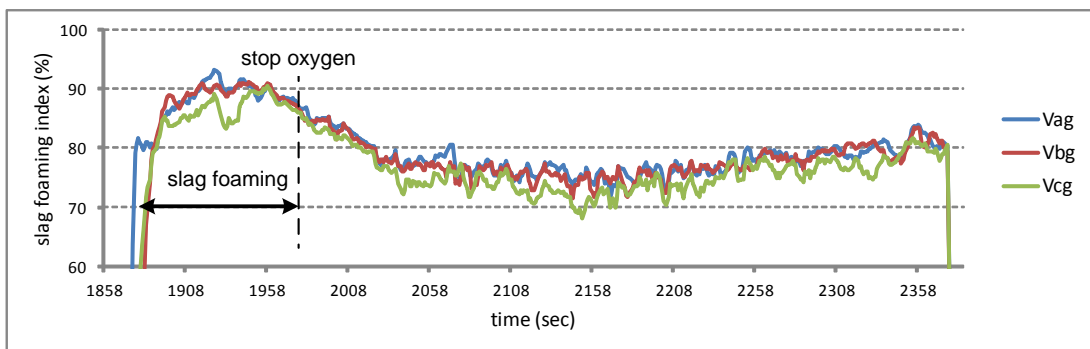
รูปที่ 5.6 ดัชนีการเกิดฟองสแตกของเตาหลอมที่ 123938



รูปที่ 5.7 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123939

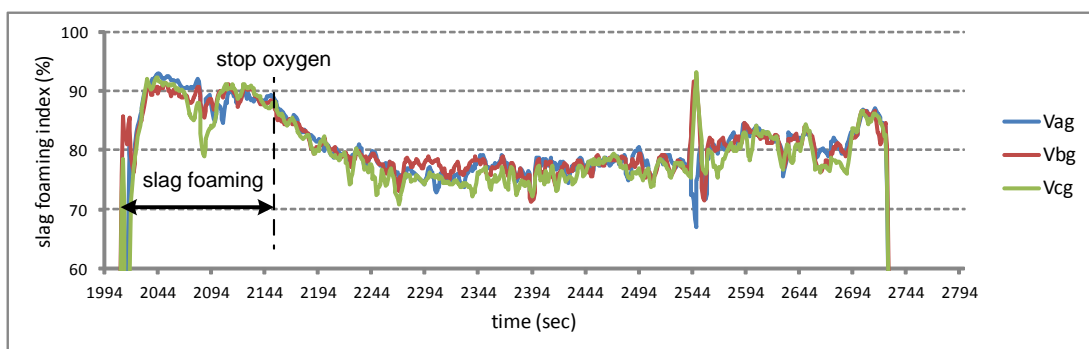


รูปที่ 5.8 ดัชนีการเกิดฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123940

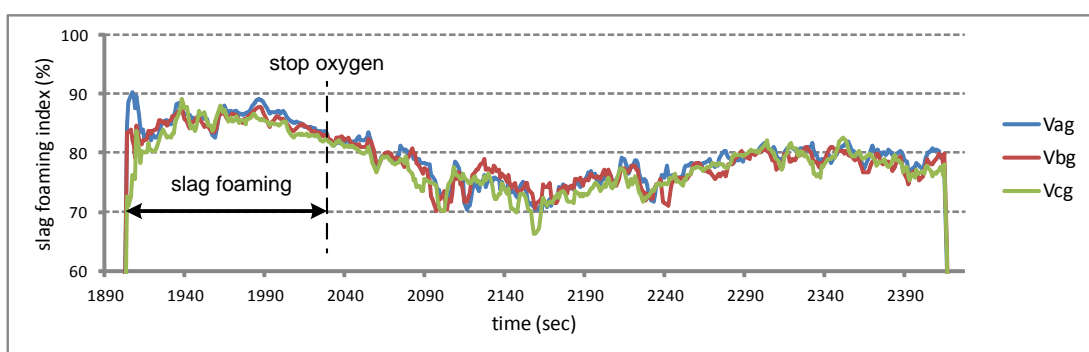


รูปที่ 5.9 ดัชนีการเกิดฟองสแลก ช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123938





รูปที่ 5.10 คำนีการเกิดฟองสแลก ช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123939



รูปที่ 5.11 คำนีการเกิดฟองสแลก ช่วงการทำฟองสแลกของเตาหลอมที่ 123940

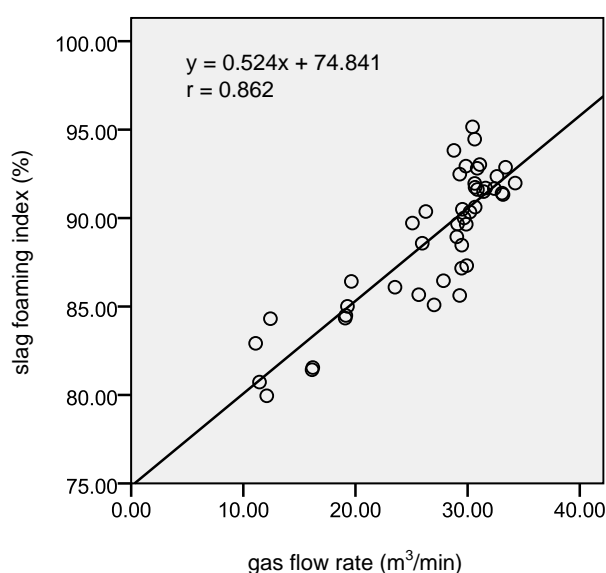
จากผลการทดสอบพบว่าสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงระดับฟองสแลกผ่านคำนีการเกิดฟองสแลกในช่วงขั้นตอนการหลอมต่างๆ ตลอดกระบวนการหลอมดังรูปที่ 5.6 ถึง 5.8 เมื่อพิจารณารูปเฉพาะช่วงการทำฟองสแลกดังรูปที่ 5.9 ถึง 5.11 หลังจากหยุดการพ่นแก๊สออกซิเจน สแลกจะยุบตัวลง พบว่าค่าเฉลี่ยของคำนีการเกิดฟองสแลกมีค่าลดลงดังตารางที่ 5.1

เตาหลอมที่	ค่าเฉลี่ยคำนีการเกิดฟองสแลก ช่วงการทำฟองสแลก (%)	
	ก่อนหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน	หลังจากหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน
123938	85.49	77.25
123939	88.99	79.04
123940	83.96	76.88

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยคำนีการเกิดฟองสแลกที่เปลี่ยนแปลง เมื่อหยุดพ่นแก๊สออกซิเจน

### 5.3.3 การเปรียบเทียบผลการวัดกับอัตราการฟุ้งแก๊ส

การเปรียบเทียบผลการวัดกับอัตราการฟุ้งแก๊ส มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการเกิดฟองสแลกกับระดับฟองสแลกภายในเตา โดยทดลองปรับอัตราการฟุ้งแก๊สในแต่ละครั้งของการหลอมระหว่าง 10 ถึง 35 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ของเตาหลอมที่ 124598 ถึง 124692 จำนวนทั้งสิ้น 46 เตา พร้อมทั้งบันทึกอัตราการฟุ้งแก๊ส และระดับฟองสแลกที่ได้จากดัชนีการเกิดฟองสแลกของแต่ละเตาในช่วงการทำฟองสแลก



รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก และค่าเฉลี่ยอัตราการฟุ้งแก๊สออกซิเจน

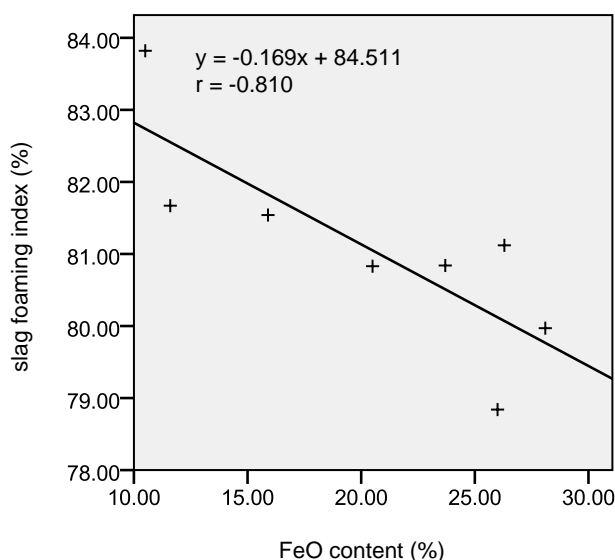
ได้ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก และค่าเฉลี่ยอัตราการฟุ้งแก๊สออกซิเจนดังรูปที่ 5.12 ซึ่งคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน  $r = 0.862$  (Sig. = 0.01, p value 0.000) พบว่าค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความสัมพันธ์ทางบวกกับค่าเฉลี่ยอัตราการฟุ้งแก๊สออกซิเจนในระดับสูง หรือกล่าวได้ว่าเมื่ออัตราการฟุ้งแก๊สออกซิเจนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้สแลกเป็นฟองเพิ่มขึ้น ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกจึงมีค่าสูงขึ้น

### 5.3.4 การเปรียบเทียบผลการวัดกับส่วนผสมทางเคมีของสแลก

การเปรียบเทียบผลการวัดกับส่วนผสมทางเคมีของสแลก มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการเกิดฟองสแลก กับสภาวะของสแลกภายในเตา โดยบันทึกข้อมูลระดับฟองสแลกที่ได้จากดัชนีการเกิดฟองสแลกของแต่ละเตาในช่วงการทำฟองสแลก จำนวนทั้งสิ้น 8 เตาหลอมจาก 46 เตาหลอม พร้อมทั้งเก็บรวบรวมข้อมูลผลการวิเคราะห์ตัวอย่างสแลก ประกอบด้วยค่าร้อยละของเหล็กออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และค่าเบสิกซิตีของสแลก เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีการเกิดฟองสแลก และปริมาณเหล็กออกไซด์ (FeO) ในสแลก

เตาหลอมที่	ร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบ (%wt)					เบสิกซิตี	ดัชนีการเกิดฟองสแลก (%)
	FeO	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
124623	26.3	4.1	37.4	14.9	11.3	1.4	81.12
124637	20.5	3.1	40.4	16.7	12.7	1.4	81.83
124656	26.0	2.8	40.5	12.7	12.5	1.6	78.84
124661	10.5	2.9	50.0	17.3	13.5	1.6	83.82
124662	11.6	2.5	46.7	17.2	15.8	1.4	81.67
124671	28.1	2.3	37.3	14.4	10.0	1.5	79.97
124679	23.7	3.4	38.4	13.2	14.6	1.4	80.84
124680	15.9	2.9	46.0	13.5	15.5	1.6	81.54

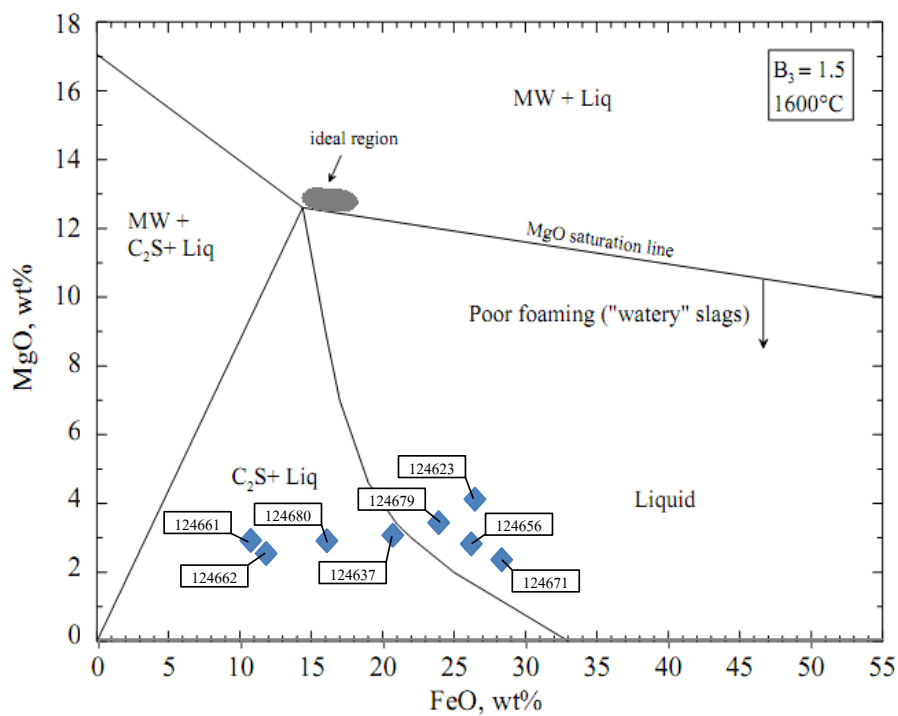
ตารางที่ 5.2 ผลวิเคราะห์สารประกอบในสแลก และค่าดัชนีการเกิดฟองสแลก



รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก และปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก

ได้ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก และปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกดังรูปที่ 5.13 ซึ่งคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน  $r = -0.810$  (Sig. = 0.01, p value 0.000) พบว่าค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความสัมพันธ์ทางลบกับปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกในระดับสูง หรือกล่าวได้ว่าเมื่อปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกมากขึ้น ส่งผลให้สแลกมีความหนืดลดลงและเป็นฟองได้ไม่ดี ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกจึงมีค่าลดลง

เมื่อนำมาพล็อตลงใน Isothermal Solubility Diagram พบว่า ตัวอย่างสแลกสำหรับเตาหลอมที่ 124623, 124656, 124671 และ 124679 มีสัดส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์อยู่ในบริเวณ  $C_2S + Liquid$  และตัวอย่างสแลกสำหรับเตาหลอมที่ 124637, 124661, 124662 และ 124680 มีสัดส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์อยู่ในบริเวณ Liquid ดังรูปที่ 5.14 โดยในบริเวณ  $C_2S + Liquid$  จะมีค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกสูงกว่าบริเวณ Liquid ดังตารางที่ 5.3 เนื่องจากในบริเวณ Liquid สแลกมีสถานะเป็นของเหลวอย่างเดียวและมีความหนืดต่ำ ส่งผลให้สแลกฟูได้ไม่ดี



รูปที่ 5.14 ส่วนผสมทางเคมีของสแลกบน Isothermal Solubility Diagram

บริเวณ	ค่าเฉลี่ยร้อยละโดยน้ำหนักของสารประกอบ (%wt)					ค่าเฉลี่ยเบสิกซิตี	ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก (%)
	FeO	MgO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Liquid	26.0	3.2	38.4	13.8	12.1	1.5	80.19
C <sub>2</sub> S+Liquid	14.6	2.9	45.8	16.2	14.4	1.5	82.22

ตารางที่ 5.3 ค่าเฉลี่ยผลวิเคราะห์สารประกอบในสแลก และค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลก

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบและสร้างระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า โดยมีหลักการคือตรวจวัดแรงดันอาร์คของเตา เพื่อนำมาวิเคราะห์และแปลความหมายข้อมูลเป็นดัชนีการเกิดฟองสแลกด้วยโปรแกรม LabVIEW จากการทดสอบใช้งานจริงใน โรงหลอมเหล็ก โดยมีจำนวนการหลอมทั้งสิ้น 46 เตา แล้วนำดัชนีการเกิดฟองสแลกที่ได้จากระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในช่วงการทำฟองสแลก ไปเปรียบเทียบกับอัตราการพ่นแก๊สออกซิเจน พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความสัมพันธ์ (ทางบวก) กับค่าเฉลี่ยอัตราการพ่นแก๊สออกซิเจนในระดับสูง และจากการนำผลวิเคราะห์ตัวอย่างสแลกจำนวน 8 เตาจากการหลอม 46 เตา ไปเปรียบเทียบระหว่างดัชนีการเกิดฟองสแลกที่ได้จากระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก และปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลก พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ค่าเฉลี่ยดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความสัมพันธ์ (ทางลบ) กับปริมาณเหล็กออกไซด์ในสแลกในระดับสูง

กล่าวคือระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกสามารถสะท้อนระดับฟองสแลกและสถานะของฟองสแลกภายในเตาได้ จึงสามารถนำไปใช้ควบคุมการทำฟองสแลกได้ ตลอดจนนำไปประยุกต์เป็นระบบควบคุมการพ่นแก๊สออกซิเจนสำหรับกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ และค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกสามารถนำไปบันทึกและจัดเก็บไว้ใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าได้

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ดัชนีการเกิดฟองสแลกที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ อาศัยการเก็บรวบรวมข้อมูลและดำเนินการทดลองกับเตาหลอมและสภาพการหลอมหนึ่งเท่านั้น การนำระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก

ไปใช้กับเตาหลอมอื่นๆ ที่มีสภาพการหลอมแตกต่างกัน จำเป็นต้องทดสอบและปรับแต่งพารามิเตอร์ต่างๆ เพิ่มเติมเพื่อให้ดัชนีการเกิดฟองสแลกมีความเหมาะสม

### 6.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลกในเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้า สามารถนำไปใช้ควบคุมการทำฟองสแลกได้
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบควบคุมการพ่นแก๊สออกซิเจนสำหรับกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าโดยอัตโนมัติ
3. สามารถนำค่าดัชนีการเกิดฟองสแลกไปใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมเหล็กแบบอาร์คไฟฟ้าได้

## รายการอ้างอิง

- [1] Matsuura, H., and Fruehan, R.J. Slag Foaming in an Electric Arc Furnace. ISIJ International 49, No. 10 (2009): 1530–1535.
- [2] Marique, C., Nyssen, P., and Salamone, PH. On-line control of the foamy slag in EAF. 6th Electric Steelmaking Conference, pp.154-161. Düsseldorf, 1999.
- [3] Malmberg, D., Hahlin, P., and Nilsson, E. Microwave Technology in Steel and Metal Industry, an Overview. ISIJ International 47, No. 4 (2007): 533–538.
- [4] Matschullat, T., Rieger, D., Krüger, K., and Döbbeler, A. Foaming Slag and Scrap Melting Behavior in Electric arc Furnace - a New and Very Precise Detection Method with Automatic Carbon Control. Archives of Metallurgy and Materials 53 (2008): 399-403.
- [5] ปวีณ มหาสุวีระชัย. ระบบตรวจสังเกตสแลกที่เป็นฟองในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าแบบคอนสตีล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [6] Ameling, D., Petry, J., Sittard, M., Ullrich, W., and Wolf, J. Untersuchungen zur Schaumslagbildung im Elektrolichtbogenofen. Stahl und Eisen 3 (1986): 45-50.
- [7] Ito, K., and Fruehan, R.J. Study on the Foaming of CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO Slags: Part I. Foaming Parameters and Experimental Results. Metallurgical and Materials 20B (1989): 509-514.
- [8] Ito, K., and Fruehan, R.J. Study on the Foaming of CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO Slags: Part II. Dimensional Analysis and Foaming in Iron and Steelmaking Processes. Metallurgical and Materials 20B (1989): 515-521.
- [9] Bruker AXS. Slag Analysis by X-ray Fluorescence Spectrometry [Online]. 2008. Available from: <http://www.bruker.com> [2012, February 21]



- [10] Pretorius, E.B., and Carlisle, R.C. Foamy Slag Fundamentals and their Practical Application to Electric Furnace Steelmaking. 56<sup>th</sup> Electric Furnace Conference, 1998.
- [11] Carlos, J., and Pérez, F. Monitoring of the energy consumption working points in the electric arc furnace. Master's Thesis, Faculty of Engineering. Pontificia Universidad Javeriana, 2004.
- [12] National Instrument. Installation Guide SCXI<sup>TM</sup>-1313 High-Voltage Attenuator Terminal Block [Online]. 2009. Available from: <http://www.ni.com> [2012, January 12]
- [13] National Instrument. SCXI<sup>TM</sup> SCXI-1125 User Manual [Online]. 2009. Available from: <http://www.ni.com> [2012, January 15]
- [14] National Instrument. SCXI<sup>TM</sup> SCXI Chassis User Manual [Online]. 2009. Available from: <http://www.ni.com> [2012, January 12]
- [15] National Instrument. Low-Cost E Series Multifunction DAQ – 12 or 16-Bit, 200 kS/s, 16 Analog Inputs [Online]. 2009. Available from: <http://www.ni.com> [2012, January 20].
- [16] National Instrument. DAQ PCI-6023E/6024E/6025E User Manual [Online]. 1998. Available from: <http://uhv.cheme.cmu.edu> [2012, February 3]
- [17] Fahy, K., and Pérez, E. Fast Fourier Transforms and Power Spectra in LabVIEW [Online]. 2011. Available from: <http://fy.chalmers.se> [2013, January 14]

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายละเอียดอุปกรณ์ของระบบตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติ

## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1000)

## SCXI Chassis

### NI SCXI-1000, NI SCXI-1000DC, NI SCXI-1001

- Shielded enclosures for SCXI modules
- Low-noise environment for signal conditioning
- Rugged, compact chassis
- Forced air cooling
- Optional USB data acquisition and control module
- Optional rack mounting
- 3 internal analog buses
- Timing circuitry for high-speed multiplexing
- AC, DC, or battery-power options
- NI-DAQmx driver software simplifies chassis configuration

#### Operating Systems

- Windows 2000/NT/XP

#### Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- Lookout
- VI Logger

#### Driver Software<sup>1</sup>

- NI-DAQmx
- NI-SWITCH

<sup>1</sup>Included with DAQ device or switch



### Overview

National Instruments offers rugged, low-noise SCXI chassis to house, power, and control your SCXI modules and conditioned signals. The unique SCXI chassis architecture includes the SCXIbus, which routes analog and digital signals and acts as the communication conduit between modules. Chassis control circuitry manages this bus, synchronizing the timing between each module and the DAQ device. With this architecture, you can scan input channels from several modules in several chassis at rates up to 333 kS/s for every DAQ device.

The versatility of SCXI lies in its various chassis options and expandability. You can choose from a number of different standard AC or DC power options. You can control the system by connecting directly to an M Series, E Series, B Series or USB multifunction DAQ device. You can even daisy-chain up to eight chassis for control by a single DAQ device. Regardless of your configuration, programming the system does not change. You use the same function calls you use with a DAQ device by itself. NI-DAQ or NI-SWITCH driver software handles all low-level programming.

### The SCXIbus

The SCXIbus is a guarded analog and digital bus located in the backplane of the SCXI chassis. Modules inserted into the chassis connect to this backplane automatically. This bus acts as a conduit for routing signals, transferring data, programming modules, and passing timing signals.

### Chassis Control Circuitry

Each SCXI chassis includes control circuitry. This circuitry handles all signal routing on the SCXIbus. During high-speed analog input operations, it controls which input signals are connected to the bus and routed back to the DAQ device. It also ensures tight synchronization between the SCXI modules and the DAQ device.

### Expandability

If your initial system requires more SCXI modules than one chassis can hold, or your system requirements change, simply add another chassis. With the SCXI expandable architecture, you can daisy-chain up to eight chassis to a single multifunction DAQ device. Whether you are using a single-chassis or multichassis system, you can still acquire data at rates up to 333 kS/s.

### Power Options

These SCXI chassis offer a number of standard AC power options. Simply choose the option for your country or a country compatible with your power specifications. If you move your system to another country, you can easily reconfigure the system for any of the other AC power configurations.

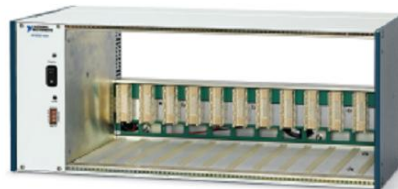
## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1000)

### SCXI Chassis



#### SCXI-1000

The NI SCXI-1000 is a 4-slot chassis available with a number of standard AC power options. This chassis is ideal for single-chassis or low-channel-count applications. If your application grows, you can daisy-chain two or more SCXI-1000 chassis. You can also use off-the-shelf true sine wave DC-to-AC power inverters to power AC chassis with a DC power supply.



#### SCXI-1001

The SCXI-1001 is a 12-slot chassis with a number of standard AC power options. As in the SCXI-1000 Series, you can daisy-chain up to eight chassis to acquire or control up to 3,072 channels with a single DAQ device. This chassis is ideal for high-channel-count systems. You can use off-the-shelf true sine wave DC-to-AC power inverters to power AC chassis with a DC power supply.



#### SCXI-1000DC

The SCXI-1000DC is a 4-slot chassis that accepts DC power. You can power it with any 9.5 to 16 VDC power supply, or use the optional SCXI-1382 12 VDC battery pack (shown in the picture). You should also consider the optional SCXI-1383 power supply/float charger to operate the chassis from an AC power outlet when necessary. This chassis is ideal for portable applications or other times when AC power is not always available.

#### Ordering Information

NI SCXI-1000.....	776570-0P <sup>1</sup>
NI SCXI-1000DC.....	776570-00
NI SCXI-1001.....	776571-0P <sup>1</sup>

<sup>1</sup>To choose your power option, replace the "P" with the appropriate number for your country's power:

- 1 – U.S. 120 VAC
- 2 – Swiss 220 VAC
- 3 – Australian 240 VAC
- 4 – Universal Euro 240 VAC
- 5 – North American 240 VAC
- 6 – United Kingdom 240 VAC
- 7 – Japanese 100 VAC

#### BUY NOW!

For complete product specifications, pricing, and accessory information, call (800) 813 3693 (U.S. only) or go to [ni.com/signalconditioning](http://ni.com/signalconditioning).

## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1313)

### SCXI Terminal Blocks

#### SCXI Terminal Blocks

- Terminal blocks for quick, easy connections
- Strain-relief clamps for reliable wiring
- Connectivity options including BNC and thermocouple plugs
- Shielded front-mount terminal blocks
- Rack and DIN-rail mount options available
- Terminal block options for specific measurement types
- Onboard temperature sensor for cold-junction compensation
- Isothermal construction for high-accuracy thermocouple measurements
- High-voltage attenuation
- AC/DC coupling
- Bridge offset nulling, shunt calibration
- Current inputs



#### Overview

National Instruments SCXI terminal blocks provide a convenient method for connecting and disconnecting signals to your system. The NI SCXI-13xx front-mount terminal blocks feature direct connections to transducers at the screw terminals located within a fully shielded enclosure or at front-mounted BNC connectors. Strain-relief clamps hold the signal wires safely in place. You can also choose either the TC-2095 or BNC-2095 rack-mount terminal blocks for minithermocouple connectors or BNC connectors. These terminal blocks are ideal solutions for high-channel-count temperature or voltage applications.

TBX DIN-rail mount terminal blocks are an alternative to the SCXI-13xx terminal blocks which attach directly to the front of an SCXI module. The TBX system includes shielded cables that connect the front I/O connector of an SCXI module to a TBX terminal block.

Some terminal blocks are designed for specific input types, such as thermocouples, strain gages, and high-voltage inputs. See tables 2, 3, and 4 to determine which SCXI terminal blocks are compatible with your SCXI module.



Figure 1. Terminal Block Configuration

Terminal Block	Compatible SCXI Modules	Cabling	CJC	Special Features
TBX-1303	SCXI-1100, SCXI-1102, SCXI-1102B/C, SCXI-1181	SH96-96 or R96-96	✓	Open TC detection, isothermal construction, selectable ground referencing
TBX-1316	SCXI-1120/D, SCXI-1125, SCXI-1126	SH32-32-A	–	200:1 attenuation (up to 1,000 VDC)
TBX-1325	SCXI-1124	SH48-48-A	–	High-voltage 250 VDC
TBX-1326	SCXI-1162, SCXI-1162HV, SCXI-1163, SCXI-1163R	SH48-48-B	–	High-voltage 250 VDC
TBX-1328	SCXI-1120, SCXI-1120D, SCXI-1121, SCXI-1125, SCXI-1126	SH32-32-A	✓	Sockets for current input resistors, isothermal construction, high-voltage 250 VDC
TBX-1329	SCXI-1120, SCXI-1120D, SCXI-1121, SCXI-1125, SCXI-1126	SH32-32-A	–	Selectable AC coupling (rejects up to 250 VDC)
TBX-96	SCXI-1100, SCXI-1102, SCXI-1102B/C	SH96-96 or R96-96	–	–
TBX-24F <sup>1</sup>	All modules	Users-supplied wiring	–	–
CB-50	SCXI-1180	NB1	–	–

<sup>1</sup>The TBX-24F is a general-purpose feedthrough terminal block that you can use with any SCXI module or front-mounting terminal blocks.

Table 1. TBX Terminal Block Selection Guide



## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1313)

### SCXI Terminal Blocks

#### TBX Terminal Block

##### Selection Guide

Use the following steps to select the correct combination of TBX terminal blocks and cables for your SCXI system:

**1. Select the required terminal blocks** – For each SCXI module, use table 1 to select the proper TBX terminal block. If a TBX-13xx terminal block is not available for your SCXI module, select the appropriate number of general-purpose TBX-24F feedthrough terminal blocks.

**2. Select cabling** – For each TBX terminal block, table 1 lists the cable needed to connect the TBX terminal block to the SCXI module. Shielded cables are available in lengths of 1, 2, and 5 m. If using the TBX-1303, you also have the option to build a custom cable using the SBS-96F backshell kit. For each TBX-1303 for which you will build a custom cable, select two SBS-96F kits. If using the TBX-24F, you will use discrete wires to connect the TBX-24F to an SCXI front-mounting terminal block. Therefore, select the appropriate SCXI front-mounting terminal block for each SCXI module that will use the TBX-24F.

**3. Rack-mount accessory (optional)** – If mounting for 19 in. rack enclosures is needed, use table 2 to select the appropriate number of TBX-RM1 rack-mount kits.

**4. Calibration** – Calibration of cold-junction sensors and attenuation terminal blocks is available for some devices. For more information, please visit [ni.com/calibration](http://ni.com/calibration).

Module	Terminal Blocks	CJC <sup>1</sup> Sensor	Other Terminal Block Functions
SCXI-1100	SCXI-1303 <sup>1</sup>	✓	Isothermal, signal ground referencing, and open thermocouple detection
SCXI-1102	SCXI-1300 <sup>1</sup>	✓	–
SCXI-1102B	SCXI-1308	–	Current input, 249 Ω resistor across each input
SCXI-1102C	BNC-2055	–	BNC connectors, signal ground referencing
	TC-2055	✓	Thermocouple plugs, signal ground referencing, isothermal
SCXI-1104/C	SCXI-1300	–	–
SCXI-1120	SCXI-1305	–	BNC connectors, AC/DC coupling and ground referencing
SCXI-1120D	SCXI-1320	✓	–
SCXI-1126	SCXI-1327	✓	Extends signal input range to 300 V <sub>max</sub> , switch configurable per channel
	SCXI-1328	✓	Isothermal, high-accuracy design for thermocouples
	SCXI-1338	✓	Current input, 249 Ω resistor across each input
SCXI-1125	SCXI-1304/5	–	BNC connectors, AC/DC coupling and ground referencing
	SCXI-1313A	✓	Extends signal input range to 150 V <sub>max</sub> , programmable per channel
	SCXI-1320	✓	–
	SCXI-1327	✓	Extends signal input range to 300 V <sub>max</sub> , switch configurable per channel
	SCXI-1328	✓	Isothermal, high-accuracy design for thermocouples
	SCXI-1338	✓	Current input, 249 Ω resistor across each input
SCXI-1121	SCXI-1320	✓	–
	SCXI-1321	✓	Offset nulling and shunt calibration for strain gages
	SCXI-1327	✓	Extends signal input range to 300 V <sub>max</sub> , switch configurable per channel
	SCXI-1328	✓	Isothermal, high-accuracy design for thermocouples
	SCXI-1305	–	BNC connectors, AC/DC coupling and signal ground referencing
SCXI-1122	SCXI-1322	✓	–
SCXI-1124	SCXI-1325	–	–
SCXI-1127	SCXI-1321	–	–
SCXI-1128	SCXI-1332	–	Set up an 8 column by 4 row matrix
SCXI-1129	SCXI-1333	–	Configures SCXI-1129 as quad, 4 x 16 (2-wire) matrix
	SCXI-1334	–	Configures SCXI-1129 as 4 x 64 (2-wire) matrix
	SCXI-1335	–	Configures SCXI-1129 as 8 x 32 (2-wire) matrix
	SCXI-1336	–	Configures SCXI-1129 as 16 x 16 (2-wire) matrix
	SCXI-1337	–	Configures SCXI-1129 as a dual 8 x 16 (2-wire) matrix
	SCXI-1339	–	Configures SCXI-1129 as a dual 4 x 32 (2-wire) matrix
SCXI-1140	SCXI-1301	–	–
	SCXI-1304	–	AC/DC coupling and signal ground referencing (configurable per channel)
	SCXI-1305	–	BNC connectors, AC/DC coupling and signal ground referencing
SCXI-1141	SCXI-1304	–	AC/DC coupling and signal ground referencing (configurable per channel)
SCXI-1142	SCXI-1305	–	BNC connectors, AC/DC coupling and signal ground referencing
SCXI-1143	SCXI-1301	–	–
SCXI-1160	SCXI-1324	–	–
SCXI-1181	–	–	Screw terminals located in module
SCXI-1162/HV	SCXI-1326	–	–
SCXI-1163/R	–	–	–
SCXI-1180	SCXI-1302	–	50-pin terminal block
SCXI-1181	SCXI-1300	✓	–
SCXI-1181K	SCXI-1301	–	–
SCXI-1503	SCXI-1306	✓	–
SCXI-1520	SCXI-1314	–	Quarter-bridge completion/shunt resistor
SCXI-1540	SCXI-1315	–	–
SCXI-1581	SCXI-1300	–	–

<sup>1</sup>Cold-junction compensation (CJC) sensor for thermocouple measurements. <sup>2</sup>Recommended for thermocouples; includes isothermal design and high-precision CJC sensor. <sup>3</sup>Recommended for RTDs when using both SCXI-1102 and SCXI-1581.

Table 3. SCXI-13xx, TC, and BNC Selection Guide

Terminal Block	Width Required (TBX-RM1 Rack-Mount)
TBX-1303	One-half
TBX-1325, TBX-1326, TBX-1328, TBX-1329, TBX-24F, CB-50	One-third

Table 2. Rack-Mount Widths of TBX Terminal Blocks

Module	Connector and Shell Assembly
SCXI-1100, SCXI-1102B/C, SCXI-1140, SCXI-1141, SCXI-1181	SCXI-1310
SCXI-1120, SCXI-1120D, SCXI-1121, SCXI-1126, SCXI-1181	SCXI-1330

Table 4. Custom Cabling Accessories

## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1313)

### SCXI Terminal Blocks



Figure 1. SCXI-1303 Terminal Block



Figure 2. SCXI-1305 Terminal Block



Figure 3. SCXI-1310 Connector and Shell Assembly

<b>SCXI-1300</b> .....	777687-00
The SCXI-1300 connects input signals to the SCXI-1100, SCXI-1102/B/C, and SCXI-1104/C modules. The SCXI-1300 is a general-purpose terminal block with an onboard temperature sensor for cold-junction compensation. Also works with SCXI-1181 and SCXI-1181K modules.	
<b>SCXI-1301</b> .....	777687-01
20-screw terminal block for the SCXI-1140, SCXI-1181, and SCXI-1181K modules.	
<b>SCXI-1302</b> .....	777687-02
50-screw terminal block for the SCXI-1180 feedthrough panel.	
<b>SCXI-1303</b> (see Figure 1) .....	777687-03
Terminal block for use with the SCXI-1100 and SCXI-1102/B/C modules. Designed especially for high-accuracy thermocouple measurements, the SCXI-1303 includes isothermal construction that minimizes errors caused by thermal gradients between terminals and the cold-junction sensor. The SCXI-1303 also includes circuitry for open-thermocouple detection as well as automatic ground referencing for floating (nongrounded) thermocouples.	
<b>SCXI-1304</b> .....	777687-04
The SCXI-1304, for the SCXI-114x modules, includes AC coupling circuitry, with switches on each channel. Each channel also includes a switchable connection to ground through a 100 k $\Omega$ bias resistor to provide a reference for floating input sources.	
<b>SCXI-1305</b> (see Figure 2) .....	777687-05
Includes convenient BNC connectors for use with the SCXI-1120/D, SCXI-1121, SCXI-1125, SCXI-1126, and SCXI-114x. Functionally equivalent to the SCXI-1304 terminal block, the SCXI-1305 includes switchable AC coupling circuitry and ground referencing on each channel.	
<b>SCXI-1306</b> .....	779698-01
Terminal block for the SCXI-1503 RTD module. Provides 16 pairs of screw terminals for differential input signals and 16 pairs of screw terminals for current excitation signals. You can configure each channel for voltage or resistive measurements.	
<b>SCXI-1308</b> .....	777687-08
Current input terminal block for the SCXI-1100 and SCXI-1102/B/C analog input modules. Each input includes a 249 $\Omega$ precision resistor so you can read 0 to 20 mA and 4 to 20 mA current inputs.	
<b>SCXI-1310</b> (see Figure 3) .....	777687-10
Connector and shell assembly used to create custom cabling solutions from the SCXI-1100, SCXI-1102/B/C, SCXI-1104/C, SCXI-114x, and SCXI-1181 to custom terminations. A low-cost alternative to SCXI terminal blocks, it consists of a hardened plastic enclosure and one connector with solder pins for signal connections.	
<b>SCXI-1313A</b> .....	777687-13
Extends the input range of the SCXI-1125 to 150 V <sub>rms</sub> or 150 VDC, on a per-channel basis programmatically through software commands. The SCXI-1313A also includes an onboard temperature sensor for thermocouples cold-junction compensation.	

BUY ONLINE at [ni.com](http://ni.com) or CALL 800 813 3693 (U.S.)



## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1313)

### SCXI-13xx, TBX, and BNC/TC Terminal Block Specifications

#### Specifications

Typical for 25 °C unless otherwise noted.

#### SCXI-13xx

Cold-Junction Sensor

Accuracy and repeatability<sup>4</sup>

Terminal Block	Accuracy		
	15 to 35 °C	0 to 15 °C and 35 to 55 °C	Repeatability
SCXI-1300	1.3 °C	1.3 °C	0.5 °C
SCXI-1303 <sup>1</sup>	0.5 °C	0.85 °C	0.25 °C
SCXI-1320	1.3 °C	1.3 °C	0.5 °C
SCXI-1321	1.3 °C	1.3 °C	0.5 °C
SCXI-1322	0.8 °C	1.2 °C	0.4 °C
SCXI-1327	0.9 °C	1.3 °C	0.5 °C
SCXI-1328	0.5 °C	0.9 °C	0.2 °C

Sensor output for SCXI-1300,

SCXI-1320, SCXI-1321 .....	±10 mV/°C
SCXI-1303/1322/1327/1328 .....	1.91 V (at 0 °C) to 0.58 V (at 55 °C) (thermistor)

Maximum field wire gauge

for SCXI-1300/1302/1303/ 1314/1322/1324 .....	26-16 AWG
1301/1304/1313A/1315/1320/1321/ 1325/1327/1328/1331/1332 .....	26-14 AWG

AC coupling (SCXI-1304

and SCXI-1305) .....	The AC coupling circuitry on each channel has a corner frequency of 0.16 Hz, rejection capacity of ±50 VDC, and input impedance of 2 MΩ differential,
----------------------	---

1 MΩ common mode

Corner frequency .....	0.16 Hz 1-pole RC
DC rejection capacity .....	±50 VDC
Current input SCXI-1308/1338 .....	0 to 20 mA

#### BNC-2095, TC-2095

Input connectors

BNC-2095 .....	32 BNC connectors
TC-2095 .....	32 thermocouple plugs, uncompensated

Output (to SCXI module) .....

96-pin DIN

Cold-junction sensor (TC-2095)

Output .....	1.91 V (0 °C) to 0.58 V (55 °C)
Accuracy (15 to 35 °C) <sup>4</sup> .....	0.5 °C for SCXI-1102/B/C 0.65 °C for SCXI-1100
Repeatability (15 to 35 °C) <sup>4</sup> .....	0.35 °C for SCXI-1102/B/C 0.5 °C for SCXI-1100

Signal referencing

CH+ input .....	10 MΩ to +5 V, user switchable
CH- input .....	10 MΩ or +10 Ω to ground, user switchable 1-pole RC

#### Physical

Dimensions .....	49.3 by 4.3 by 18.8 cm (19.0 by 1.7 by 7.4 in.)
------------------	--

#### TBX Series

Typical for 25 °C unless otherwise noted.

Maximum working voltage (signal + common mode)

TBX-1316 .....	1000 VDC, 680 V <sub>rms</sub>
TBX-1325 .....	250 V <sub>rms</sub>
TBX-1326/1328/1329/24F .....	300 V <sub>rms</sub>

Signal referencing on TBX-1303

CH+ input .....	10 MΩ to +5 V (socketed)
CH- input .....	10 MΩ or 10 Ω to ground (user configurable, socketed)

Input impedance for TBX-1316

Differential .....	40 MΩ
Single-ended .....	20 MΩ

Absolute accuracy for TBX-1316

Gain error .....	1%
Temperature drift .....	20 ppm/°C

AC coupling (TBX-1329 only)

Corner frequency .....	0.072 Hz 1-pole RC
DC rejection capacity .....	250 VDC

Wire resistance of cables .....

0.21 Ω/m per conductor

#### Cold-Junction Sensor (TBX-1303 and TBX-1328)

Accuracy and repeatability<sup>4</sup>

Terminal Block	Accuracy		
	15 to 35 °C	0 to 15 °C and 35 to 55 °C	Repeatability
TBX-1303 <sup>1</sup>	0.5 °C	0.65 °C	0.35 °C
TBX-1328	0.5 °C	0.9 °C	0.2 °C

Sensor output .....	1.91 V (at 0 °C) to 0.58 V (at 55 °C) (thermistor)
---------------------	--

#### General

##### Physical

Compatible DIN rails <sup>5</sup> .....	DIN EN 50 022, DIN EN 50 035
Screw terminal size	
TBX-1316 .....	26-12 AWG
Others .....	26-14 AWG

##### Dimensions

TBX-13036 .....	19.7 by 11.2 by 7.62 cm (7.8 by 4.4 by 3.0 in.)
TBX-1316 .....	30 by 20 by 8.1 cm (11.8 by 7.9 by 3.2 in.)
TBX-1325/1326/1328/13296 .....	12.7 by 11.2 by 7.62 cm (5.0 by 4.4 by 3.0 in.)
TBX-24F .....	12.4 by 4.3 by 5.1 cm (4.9 by 1.7 by 2.0 in.)
TBX-96 .....	19.8 by 12.6 by 6.3 cm (7.8 by 4.9 by 2.5 in.)

BUY ONLINE at [ni.com](http://ni.com) or CALL 800 813 3693 (U.S.)

## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1313)

### SCXI-13xx, TBX, and BNC/TC Terminal Block Specifications

#### Certification and Compliance

SCXI-1320/1321/1326/1327/ 1328/1338 .....	300 V, CAT II working voltage
SCXI-1322/1324/1325 .....	250 V, CAT II working voltage
TBX-1316 .....	1000 V, CAT III working voltage
TBX-1328/1329 .....	300 V, CAT II working voltage
TBX-1325/1326 .....	250 V, CAT II working voltage

#### European Compliance

EMC .....	EN 61326 Group I Class A, 10 m, Table 1 Immunity
Safety .....	EN 61010-1

#### North American Compliance

EMC .....	FCC Part 15 Class A using CISPR
Safety (SCXI-1320/1321/1326/1327/1328/ 1338/SCXI-1322/1324/1325) .....	UL Listed to UL 3111-1 CAN/CSA C22.2 No. 1010.1
Safety (TBX-1325/1326/1328/1329) ..	UL Listed to UL 3111-1 CAN/CSA C22.2 No. 1010.1

#### Australia and New Zealand Compliance

EMC (except TBX-1316) .....	AS/NZS 2064.1/2 (CISPR-11)
-----------------------------	----------------------------

<sup>1</sup>Accuracy and repeatability include combined effects of sensor, circuitry, and thermal gradients between the sensor and any screw terminal. Thermal gradients for nonisothermal terminal blocks (SCXI-1300, SCXI-1320, SCXI-1321, SCXI-1322, and SCXI-1327) are assumed to be 0.4 °C.

<sup>2</sup>With SCXI-1102 module. With SCXI-1100 module, add error of 0.15 °C.

<sup>3</sup>Accuracy and repeatability include combined effects of sensor, circuitry, and thermal gradients between the sensor and thermocouple connection.

<sup>4</sup>Accuracy and repeatability include combined effects of sensor, circuitry, and thermal gradients between the sensor and any screw terminal.

<sup>5</sup>TBX-1316 is not DIN-rail mountable.

<sup>6</sup>Height dimension (7.62 cm) includes DIN-rail mounting and plastic cover.

For a definition of specific terms, please visit [ni.com/glossary](http://ni.com/glossary).

## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1125)

# SCXI 8-Channel Isolated Analog Input Modules

SCXI 8-Channel Isolated Analog Input

### NI SCXI-1125, NI SCXI-1120, NI SCXI-1120D

- 8 channels
- 333 kS/s maximum sampling rate
- Gain and lowpass filter settings per channel
- Up to 300  $V_{rms}$  working isolation per channel
- Signal inputs from  $\pm 2.5$  mV to  $\pm 1000$  VDC with TBX-1316
- NI-DAQ driver software simplifies configuration, measurement and scaling

#### SCXI-1125

- Programmable gain and filter settings
- 300  $V_{rms}$  working isolation per channel,

#### SCXI-1120, SCXI 1120D

- Jumper selectable filter per channel
  - 4 Hz and 10 kHz filter (SCXI-1120)
  - 4.5 kHz and 22.5 kHz (SCXI-1120D)
- 250  $V_{rms}$  working isolation per channel

#### Operating Systems

- Windows 2000/NT/XP

#### Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- VI Logger

#### Driver Software

- NI-DAQ 7

#### Calibration Certificate Included

See page 21.



### Overview

The National Instruments SCXI-1125, SCXI-1120, and SCXI-1120D are 8-channel isolated analog input modules. These modules share a common architecture, providing 250 to 300  $V_{rms}$  of working isolation and lowpass filtering for each analog input channel. This architecture is ideal for amplification and isolation of millivolt, volt, 0 to 20 mA, 4 to 20 mA, and thermocouple signals. Each module can multiplex these eight channels into a single channel of the DAQ device, and you can add modules to increase channel count. These modules also offer parallel mode operation for increased scanning rates.

### Analog Input

#### SCXI-1125

The analog inputs of the NI SCXI-1125 consist of eight programmable isolation amplifiers. You can program each channel independently for input ranges from  $\pm 2.5$  mV to  $\pm 5$  V. With the SCXI-1313 high-voltage attenuator terminal block, the input range is extended to  $\pm 300$  V. With the TBX-1316, the input range is extended to  $\pm 1000$  VDC (680  $V_{rms}$ ). Each channel also includes a programmable lowpass filter that you can configure for 4 Hz or 10 kHz. With the SCXI-1125 you can perform random scanning meaning you can select only the channels from which you want to acquire data as well as scan channels in any order. Each channel is individually isolated with a working common-mode voltage of 300  $V_{rms}$  between channels or channel to earth. In addition, the SCXI-1125 is CE certified as double insulated, Category II, for 300  $V_{rms}$  of operational isolation.

#### SCXI-1120, SCXI-1120D

The analog inputs of the NI-1120/D consist of eight isolation amplifiers. You can configure each amplifier using jumpers for input ranges from  $\pm 2.5$  mV to  $\pm 5$  V (SCXI-1120) or  $\pm 5$  mV to  $\pm 10$  V (SCXI-1120D). With the SCXI-1327 high-voltage attenuator terminal block, the input range is extended to  $\pm 250$  V. With the TBX-1316, the input range is extended to  $\pm 1000$  VDC (680  $V_{rms}$ ). Each channel also includes a lowpass filter that is jumper configurable for 4 Hz or 10 kHz (SCXI-1120), or for 4.5 or 22.5 kHz (SCXI-1120D). Each channel is individually isolated with a working common-mode voltage of 250  $V_{rms}$  between channels or channel to earth. In addition, the SCXI-1120 and SCXI-1120D are CE certified as double insulated, Category II, for 250  $V_{rms}$  of operational isolation.

### Cold-Junction Compensation

Each of these modules can read the cold-junction sensor from the SCXI-1320, SCXI-1321, SCXI-1327, SCXI-1328, and TBX-1328 terminal blocks. The SCXI-1125 can scan the sensor along with other channels, but the SCXI-1120/D must read the cold-junction sensor as a separate analog input operation. This is commonly done once before the start of a continuous acquisition.

Module	$\pm 2.5$ mV	$\pm 5$ mV to $\pm 5$ V	$\pm 10$ V	$\pm 1000$ V	0 to 20 mA	Thermocouple
SCXI-1125	✓	✓	–	✓*	✓	✓
SCXI-1120	✓	✓	–	✓	✓	✓
SCXI-1120D	–	✓	✓	✓	✓	✓

\*Using attenuating terminal block.

Table 1. Module Compatibility

ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1125)

# SCXI 8-Channel Isolated Analog Input Modules

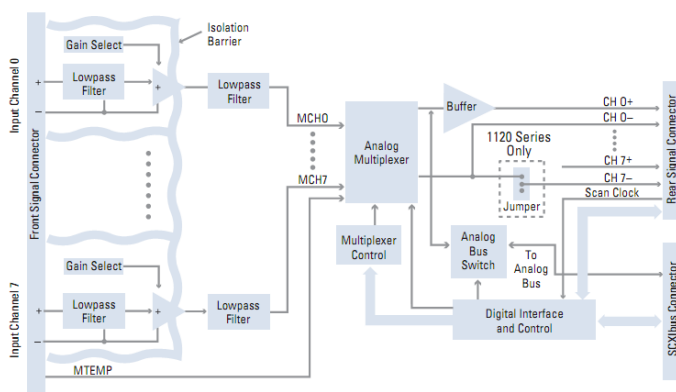


Figure 1. SCXI-1125, SCXI-1120, and SCXI-1120D Block Diagram

Terminal Block	Part Number	Type	CJ Sensor	Compatible Modules	Cabling	Special Functions	Page
SCXI-1313	777687-13	Screw terminals Front-mounting	✓	SCXI-1125	-	Programmable 100:1 attenuator	328
SCXI-1320	777687-20	Screw terminals Front-mounting	✓	SCXI-1125 SCXI-1120	-	IC Sensor for CJ	329
SCXI-1327	777687-27	Screw terminals Front-mounting	✓	SCXI-1120	-	100:1 attenuator	329
SCXI-1328	777687-28	Screw terminals Front-mounting	✓		-	Isothermal construction Prewired ground referencing	329
SCXI-1338	777687-38	Screw terminals Front-mounting	✓		-	For current inputs	330
SCXI-1305 <sup>1</sup>	777687-05	BNC connectors Front-mounting	-		-	AC coupling	328
TBX-1316	777207-16	Screw terminals DIN-rail mount	-		SH32-32-A (183230-01)	200:1 attenuator	331
TBX-1328	777207-28	Screw terminals DIN-rail mount	✓		SH32-32-A (183230-01)	DIN-rail mount Isothermal construction Prewired ground referencing	331
TBX-1329	777207-29	Screw terminals DIN-rail mount	-		SH32-32-A (183230-01)	DIN-rail mount AC coupling	331
SCXI-1330	777687-30	Solder pins Front-mounting	-		-	Low-cost connector and shell assembly	329

<sup>1</sup>The SCXI-1305 is not intended for high-voltage (>42 V) usage.

Table 2. Terminal block options for SCXI-1125, SCXI-1120, and SCXI-1120D.

## Calibration

The SCXI-1125 contains calibration hardware to null out error sources. With programmable offset calibration, software-programmable analog switches ground the inputs of each of the instrumentation amplifiers for offset error calibration. An onboard EEPROM stores the calibration constants for each channel for each input range in a user-defined area. The EEPROM also stores a set of factory calibration constants in permanent memory, and cannot be modified. NI-DAQ driver software transparently uses the calibration constants to correct for gain and offset errors.

## Ordering Information

NI SCXI-1125 .....776572-25  
 NI SCXI-1120 .....776572-20  
 NI SCXI-1120D .....776572-20D

### Accessories

SCXI current resistors (4-pack) .....776582-01

For information on extended warranty and value-added services, see page 20.

### BUY ONLINE!

Visit [ni.com/info](http://ni.com/info) and enter *scxi1120*, *scxi1120d* and/or *scxi1125*.

See page 276 to configure your complete system.

SCXI 8-Channel Isolated Analog Input

Data Acquisition and  
Signal Conditioning

ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1125)

# SCXI 8-Channel Isolated Analog Input Modules

SCXI 8-Channel Isolated Analog Input

## Specifications

Absolute Accuracy Table

Module	Nominal Range <sup>1</sup>	Overall Gain <sup>1</sup>	Percent of Reading <sup>2</sup>			System Noise (peak, 3 sigma) <sup>3</sup>				Temperature Drift	
			Typical	Max	Offset	Single Point		Average		Percent of Reading/°C	Offset (µV/°C)
						4 Hz	10 kHz or FBW	4 Hz	10 kHz or FBW		
SCXI-1125	±1000 V <sub>rms</sub> <sup>4</sup>	0.005	0.3996	1.2489	854 mV	115 mV	1.62 V	24.5 mV	401 mV	0.0034	132 mV
	±300 V <sup>3</sup>	0.01	0.2548	0.6498	500 mV	57.7 mV	946 mV	12.7 mV	203 mV	0.0029	44 mV
	±250 V <sup>3</sup>	0.02	0.2548	0.6498	250 mV	29.9 mV	478 mV	6.26 mV	100 mV	0.0029	44 mV
	±100 V <sup>3</sup>	0.05	0.2548	0.6498	100 mV	12.0 mV	183 mV	2.51 mV	40.1 mV	0.0029	22 mV
	±50 V <sup>3</sup>	0.1	0.2548	0.6498	50 mV	5.67 mV	111 mV	1.27 mV	20.3 mV	0.0029	11 mV
	±25 V <sup>3</sup>	0.2	0.2548	0.6498	25 mV	2.82 mV	47.9 mV	641 µV	10.1 mV	0.0029	4.4 mV
	±10 V <sup>3</sup>	0.5	0.2478	0.6478	10 mV	1.05 mV	19.1 mV	238 µV	4.06 mV	0.0029	2.2 mV
	±5 V	1	0.2478	0.6478	5.0 mV	528 µV	8.59 mV	122 µV	2.03 mV	0.0027	1.12 mV
	±2.5 V	2	0.2478	0.6478	2.5 mV	254 µV	4.25 mV	59.7 µV	1.01 mV	0.0027	460 µV
	±1 V	5	0.2478	0.6478	1.0 mV	109 µV	1.68 mV	23.7 µV	403 µV	0.0027	240 µV
	±500 mV	10	0.2478	0.6478	508 µV	68.2 µV	882 µV	12.2 µV	202 µV	0.0027	130 µV
	±250 mV	20	0.2478	0.6478	258 µV	32.0 µV	474 µV	6.26 µV	101 µV	0.0027	64 µV
	±100 mV	50	0.2478	0.6478	108 µV	10.9 µV	180 µV	2.37 µV	40.4 µV	0.0027	42 µV
	±50 mV	100	0.2478	0.6478	58 µV	6.20 µV	88.2 µV	1.24 µV	20.3 µV	0.0027	31 µV
	±25 mV	200	0.2478	0.6478	33 µV	2.58 µV	47.9 µV	0.593 µV	10.4 µV	0.0027	24.4 µV
	±20 mV	250	0.2478	0.6478	28 µV	2.25 µV	37.1 µV	0.499 µV	8.57 µV	0.0027	22.2 µV
	±10 mV	500	0.2478	0.6478	18 µV	1.27 µV	21.8 µV	0.268 µV	4.69 µV	0.0027	21.1 µV
	±5 mV	1000	0.2478	0.6478	13 µV	0.713 µV	14.9 µV	0.170 µV	3.13 µV	0.0027	20.9 µV
	±2.5 mV	2000	0.2478	0.6478	11 µV	0.420 µV	11.2 µV	0.099 µV	2.49 µV	0.0027	20.3 µV
	SCXI-1120	±1000 V <sub>rms</sub> <sup>4</sup>	0.005	0.3996	1.2489	854 mV	162 mV	1.94 V	38.6 mV	488 mV	0.0034
±500 V <sub>rms</sub> <sup>4</sup>		0.01	0.2548	0.6498	337 mV	86.5 mV	972 mV	18.8 mV	244 mV	0.0029	44 mV
±250 V <sup>2</sup>		0.02	0.2548	0.6498	250 mV	37.3 mV	503 mV	9.11 mV	122 mV	0.0029	44 mV
±100 V <sup>2</sup>		0.05	0.2548	0.6498	132 mV	15.3 mV	199 mV	3.68 mV	48.4 mV	0.0029	22 mV
±50 V <sup>2</sup>		0.1	0.2548	0.6498	65.3 mV	7.73 mV	98.9 mV	1.79 mV	24.4 mV	0.0029	11 mV
±25 V <sup>2</sup>		0.2	0.2548	0.6498	31.9 mV	4.28 mV	54.6 mV	895 µV	12.3 mV	0.0029	4.4 mV
±10 V <sup>2</sup>		0.5	0.2478	0.6498	11.9 mV	1.57 mV	26.2 mV	375 µV	4.92 mV	0.0029	2.2 mV
±5 V		1	0.2478	0.6498	11.3 mV	840 µV	10.8 mV	188 µV	2.41 mV	0.0027	1.12 mV
±2.5 V		2	0.2478	0.6498	5.13 mV	385 µV	5.00 mV	88.7 µV	1.20 mV	0.0027	460 µV
±1 V		5	0.2478	0.6498	2.02 mV	157 µV	2.22 mV	36.4 µV	482 µV	0.0027	240 µV
±500 mV		10	0.2478	0.6478	1.00 mV	80.2 µV	993 µV	18.5 µV	241 µV	0.0027	130 µV
±250 mV		20	0.2478	0.6478	487 µV	45.0 µV	518 µV	9.18 µV	123 µV	0.0027	64 µV
±100 mV		50	0.2478	0.6478	193 µV	15.5 µV	221 µV	3.61 µV	49.3 µV	0.0027	42 µV
±50 mV		100	0.2478	0.6478	93.6 µV	7.74 µV	108 µV	1.82 µV	24.9 µV	0.0027	31 µV
±25 mV		200	0.2478	0.6478	45.3 µV	4.21 µV	54.9 µV	0.940 µV	13.3 µV	0.0027	24.4 µV
±20 mV		250	0.2478	0.6478	35.6 µV	3.38 µV	50.6 µV	0.788 µV	11.6 µV	0.0027	22.2 µV
±10 mV		500	0.2478	0.6478	18.0 µV	1.97 µV	29.3 µV	0.454 µV	7.03 µV	0.0027	21.1 µV
±5 mV		1000	0.2478	0.6478	13.0 µV	0.962 µV	25.5 µV	0.260 µV	5.58 µV	0.0027	20.9 µV
±2.5 mV		2000	0.2478	0.6478	11.1 µV	0.908 µV	22.4 µV	0.314 µV	5.07 µV	0.0027	20.3 µV

<sup>1</sup>Absolute Accuracy (15 to 35 °C). To calculate the absolute accuracy for the SCXI-1125, SCXI-1120, and SCXI-11200 refer to page 194 or visit [ni.com/accuracy](http://ni.com/accuracy)

Data Acquisition and Signal Conditioning

Module	Range <sup>1</sup>	Gain <sup>1</sup>	Percent of Reading <sup>2</sup>			System Noise (peak, 3 sigma) <sup>3</sup>				Temperature Drift	
			Typical	Max	Offset	Single Point		Average		Percent of Reading/°C	Offset (V/°C)
						4.5 kHz	22.5 kHz	4.5 kHz	22.5 kHz		
SCXI-1120D	±1000 V <sub>rms</sub> <sup>4</sup>	0.01	0.3533	0.8832	1.04 V	842 mV	4.29 V	206 mV	1.53 V	0.0059	44 mV
	±500 V <sub>rms</sub> <sup>4</sup>	0.02	0.3533	0.8832	0.52 V	475 mV	3.15 V	103 mV	1.45 V	0.0059	44 mV
	±200 V <sup>2</sup>	0.05	0.3533	0.8832	0.52 V	179 mV	2.46 V	47.3 mV	1.45 V	0.0059	22 mV
	±100 V <sup>2</sup>	0.1	0.3533	0.8832	260 mV	104 mV	2.32 V	30.4 mV	1.45 V	0.0059	11 mV
	±50 V <sup>2</sup>	0.2	0.3533	0.8832	104 mV	71.6 mV	2.23 V	26.1 mV	1.45 V	0.0059	4.4 mV
	±20 V <sup>2</sup>	0.5	0.3533	0.8832	52.2 mV	46.9 mV	1.96 V	21.4 mV	1.33 V	0.0059	2.2 mV
	±10 V <sup>2</sup>	1	0.3525	0.8812	21.0 mV	9.65 mV	40.9 mV	2.11 mV	14.9 mV	0.0059	900 µV
	±5 V	2	0.3525	0.8812	10.6 mV	4.38 mV	30.4 mV	1.04 mV	14.3 mV	0.0057	460 µV
	±2 V	5	0.3525	0.8812	5.4 mV	2.13 mV	23.5 mV	483 µV	14.3 mV	0.0057	240 µV
	±1 V	10	0.3525	0.8812	2.28 mV	1.03 mV	22.2 mV	300 µV	14.3 mV	0.0057	108 µV
	±500 mV	20	0.3525	0.8812	1.25 mV	677 µV	21.5 mV	256 µV	14.3 mV	0.0057	64 µV
	±200 mV	50	0.3525	0.8812	726 µV	448 µV	18.9 mV	208 µV	12.8 mV	0.0057	42 µV
	±100 mV	100	0.3525	0.8812	414 µV	297 µV	13.2 mV	140 µV	9.45 mV	0.0057	28.8 µV
	±50 mV	200	0.4192	1.0480	310 µV	271 µV	13.9 mV	140 µV	9.45 mV	0.0057	24.4 µV
	±20 mV	500	0.7800	1.9500	258 µV	263 µV	9.50 mV	139 µV	6.35 mV	0.0057	22.2 µV
	±10 mV	1000	1.3036	3.2590	227 µV	252 µV	4.81 mV	136 µV	3.21 mV	0.0057	20.9 µV
	±5 mV	2000	2.4008	6.0020	216 µV	243 µV	2.42 mV	131 µV	1.61 mV	0.0057	20.4 µV

<sup>1</sup>Absolute Accuracy (15 to 35 °C). To calculate the absolute accuracy for the SCXI-1125, SCXI-1120, and SCXI-11200 refer to page 194 or visit [ni.com/accuracy](http://ni.com/accuracy)

<sup>1</sup>V<sub>rms</sub> refers to sinusoidal waveform; V refers to DC or AC peak.  
<sup>2</sup>With SCXI-1327 high-voltage terminal block.  
<sup>3</sup>With SCXI-1313 high-voltage terminal block.  
<sup>4</sup>With TBX-1316 high-voltage terminal block.

## ส่วนวัดและปรับเงื่อนไขสัญญาณ (SCXI-1125)

# SCXI 8-Channel Isolated Analog Input Modules

## Specifications

### Input Characteristics

Number of channels ..... 8 differential  
Input signal ranges

Module	Signal Ranges
SCXI-1125	±2.5 mV to ±5 V
SCXI-1120	±2.5 mV to ±5 V
SCXI-1120D	±5 mV to ±10 V

Input coupling ..... DC (or AC with SCXI-1305 or TBX-1329)  
Maximum working voltage (without SCXI-1313, 1327, or TBX-1316)

Module	Signal and Common Mode
SCXI-1125	±300 V <sub>rms</sub>
SCXI-1120, SCXI-1120D	±250 V <sub>rms</sub>

Module	Powered On	Powered Off
SCXI-1125	±300 V <sub>rms</sub>	±300 V <sub>rms</sub>
SCXI-1120, SCXI-1120D	±250 V <sub>rms</sub>	±250 V <sub>rms</sub>

Overvoltage protection  
Inputs protected ..... CH0, CH7

### Transfer Characteristics

Nonlinearity

Module	Percent of Full Scale Range
SCXI-1125	±0.02%
SCXI-1120, SCXI-1120D	±0.04%

Offset error ..... See accuracy table  
Gain error ..... See accuracy table

### Amplifier Characteristics

Input impedance

Module	Normal Powered On	Powered Off/Overload
SCXI-1125	> 1 G	4.5 M
SCXI-1120	> 1 G	50 k
SCXI-1120D	> 1 M	500 k

Input bias current

SCXI-1125	±100 pA
SCXI-1120	±80 pA
SCXI-1120D	±15 pA

NMR (Normal Mode Rejection Ratio)

SCXI-1125/1120/1120D	60 dB
----------------------	-------

CMRR (Common Mode Rejection Ratio) (DC to 60 Hz)

Module	Filter	CMRR 50 or 60 Hz
SCXI-1125	4 Hz	160 dB
	10 kHz	100 dB
SCXI-1120	4 Hz	160 dB
	10 kHz	100 dB
SCXI-1120D	4.5 kHz	110 dB
	10 kHz	98 dB

Output range ..... ±5 V

Output impedance

Module	Multiplexed Mode	Parallel Mode
SCXI-1125, SCXI-1120, SCXI-1120D	100	330

<sup>1</sup>V<sub>rms</sub> refers to sinusoidal waveform; V refers to DC or AC peak.

<sup>2</sup>With SCXI-1327 high-voltage terminal block.

<sup>3</sup>With SCXI-1313 high-voltage terminal block.

<sup>4</sup>With TBX-1316 high-voltage terminal block.

<sup>5</sup>Includes effects of AI-MIO-16E-2 with 1 or 2 m SCXI cable assembly.

<sup>6</sup>Includes effects of AI-MIO-16X or AI-AI-16XE-10 with 1 or 2 m SCXI cable assembly.

### Dynamic Characteristics

Input signal bandwidth

Module	Filter	Input Range	Bandwidth
SCXI-1125	4 Hz	All ranges	4 Hz
SCXI-1120	10 kHz	All ranges	10 kHz
SCXI-1125/1120	10 kHz <sup>2,3</sup>	All ranges	2.6 kHz
SCXI-1125/1120	10 kHz <sup>4</sup>	All ranges	500 Hz
SCXI-1120D	4.5 kHz	±250 V to ±50 mV	4.5 kHz
		±20 mV to ±10 mV	4 kHz
		±5 mV	3.5 kHz
	22.5 kHz	±250 V to ±1 V	22.5 kHz
		±50 mV to ±20 mV	22 kHz
		±10 V to ±50 mV	20 kHz
		±10 mV	17 kHz
		±5 mV	14 kHz

Multiplexer performance

Module	Scan Interval (Per Channel, Any Gain and Filter Setting)		
	Settle to ±0.012 % <sup>5</sup>	Settle to ±0.006 % <sup>6</sup>	Settle to ±0.0015 % <sup>6</sup>
SCXI-1125	3 μs	10 μs	20 μs
SCXI-1120			
SCXI-1120D			

System noise ..... See accuracy table

Filter type

SCXI-1125 ..... Third-order Butterworth  
SCXI-1120, SCXI-1120D ..... Third order RC

Cutoff frequency (-3dB)

SCXI-1125 ..... 4 Hz, 10 kHz (programmable)  
SCXI-1120 ..... 4 Hz, 10 kHz (lumper selectable)  
SCXI-1120D ..... 4.5 kHz, 22.5 kHz (lumper selectable)

Stability

Module	Gain Temperature Coefficient	Offset Coefficient
SCXI-1125	20 ppm/°C	±0.2 ±220 (gain) μV/°C
SCXI-1120	20 ppm/°C	±42 ±250 (gain) μV/°C
SCXI-1120D	50 ppm/°C	±20 ±220 (gain) μV/°C

### Physical

Dimensions ..... 3.1 by 17.3 by 20.3 cm  
(12.2 by 6.8 by 8.0 in)

### I/O Connector

Rear ..... 50-pin male ribbon cable rear connector  
Front ..... 32-pin male DIN C connector

### Environment

Operating temperature ..... 0 to 50 °C  
Storage temperature ..... -20 to 70 °C  
Relative humidity ..... 5 to 90% noncondensing

### Certification and Compliance

SCXI-1120/D ..... 250 V, Cat III working voltage  
SCXI-1125 ..... 300 V, Cat III working voltage

### European Compliance

EMC EN 61326 Group I Class A, 10m, Table 1 Immunity  
Safety ..... EN 61010-1

### North American Compliance

EMC ..... FCC Part 15 Class A using CISPR  
CAN/CSA C22.2 No. 1010.1  
Safety ..... UL Listed to UL 3111-1

### Australia & New Zealand Compliance

EMC ..... AS/NZS 2064.1/2 (CISPR-11)

For a definition of specific terms, please visit [ni.com/glossary](http://ni.com/glossary)



## ส่วนตึงสัญญาณ (PCI-6024E)

### Low-Cost E Series Multifunction DAQ – 12 or 16-Bit, 200 kS/s, 16 Analog Inputs

#### NI E Series – Low-Cost

- 16 analog inputs at up to 200 kS/s, 12 or 16-bit resolution
- Up to 2 analog outputs at 10 kS/s, 12 or 16-bit resolution
- 8 digital I/O lines (TTL/CMOS); two 24-bit counter/timers
- Digital triggering
- 4 analog input signal ranges
- NI-DAQ driver that simplifies configuration and measurements

#### Families

- NI 6036E
- NI 6034E
- NI 6025E
- NI 6024E
- NI 6023E

#### Operating Systems

- Windows 2000/NT/XP
- Real-time performance with LabVIEW
- Others such as Linux® and Mac OS X

#### Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio
- VI Logger

#### Other Compatible Software

- Visual Basic, C/C++, and C#

#### Driver Software (included)

- NI-DAQ 7



Family	Bus	Analog Inputs	Input Resolution	Max Sampling Rate	Input Range	Analog Outputs	Output Resolution	Output Rate	Output Range	Digital I/O	Counter/Timers	Triggers
NI 6036E	PCI, PCMCIA	16 SE/8 DI	16 bits	200 kS/s	±0.05 to ±10 V	2	16 bits	10 kS/s <sup>1</sup>	±10 V	8	2, 24-bit	Digital
NI 6034E	PCI	16 SE/8 DI	16 bits	200 kS/s	±0.05 to ±10 V	0	–	–	–	8	2, 24-bit	Digital
NI 6025E	PCI, PXI	16 SE/8 DI	12 bits	200 kS/s	±0.05 to ±10 V	2	12 bits	10 kS/s <sup>1</sup>	±10 V	8	2, 24-bit	Digital
NI 6024E	PCI, PCMCIA	16 SE/8 DI	12 bits	200 kS/s	±0.05 to ±10 V	2	12 bits	10 kS/s <sup>1</sup>	±10 V	8	2, 24-bit	Digital
NI 6023E	PCI	16 SE/8 DI	12 bits	200 kS/s	±0.05 to ±10 V	0	–	–	–	8	2, 24-bit	Digital

<sup>1</sup>10 kS/s typical when using the single DMA channel for analog output; 1 kS/s maximum when using the single DMA channel for either analog input or counter/timer operations. 1 kS/s maximum for PCMCIA DAQCard devices in all cases.

Table 1. Low-Cost E Series Model Guide

#### Overview and Applications

National Instruments low-cost E Series multifunction data acquisition devices provide full functionality at a price to meet the needs of the budget-conscious user. They are ideal for applications ranging from continuous high-speed data logging to control applications to high-voltage signal or sensor measurements when used with NI signal conditioning. Synchronize the operations of multiple devices using the RTSI bus or PXI trigger bus to easily integrate other hardware such as motion control and machine vision to create an entire measurement and control system.

#### Highly Accurate Hardware Design

NI low-cost E Series DAQ devices include the following features and technologies:

**Temperature Drift Protection Circuitry** – Designed with components that minimize the effect of temperature changes on measurements to less than 0.0010% of reading/°C.

**Resolution-Improvement Technologies** – Carefully designed noise floor maximizes the resolution.

**Onboard Self-Calibration** – Precise voltage reference included for calibration and measurement accuracy. Self-calibration is completely software controlled, with no potentiometers to adjust.

**NI DAQ-STC** – Timing and control ASIC designed to provide more flexibility, lower power consumption, and a higher immunity to noise and jitter than off-the-shelf counter/timer chips.

**NI MITE** – ASIC designed to optimize data transfer for multiple simultaneous operations using bus mastering with one DMA channel, interrupts, or programmed I/O.

**NI PGIA** – Measurement and instrument class amplifier that guarantees settling times at all gains. Typical commercial off-the-shelf amplifier components do not meet the settling time requirements for high-gain measurement applications.

**PFI Lines** – Eight programmable function input (PFI) lines that you can use for software-controlled routing of interboard and intraboard digital and timing signals.

**RTSI or PXI Trigger Bus** – Bus used to share timing and control signals between two or more PCI or PXI devices to synchronize operations.

**RSE Mode** – In addition to differential and nonreferenced single-ended modes, NI low-cost E Series devices offer the referenced single-ended (RSE) mode for use with floating-signal sources in applications with channel counts higher than eight.

**Onboard Temperature Sensor** – Included for monitoring the operating temperature of the device to ensure that it is operating within the specified range.



## ส่วนตึงสัญญาณ (PCI-6024E)

### Low-Cost E Series Multifunction DAQ – 12 or 16-Bit, 200 kS/s, 16 Analog Inputs

Models	Full-Featured E Series				Low-Cost E Series			Basic
	NI 6030E, NI 6031E, NI 6032E, NI 6033E	NI 6052E	NI 6070E, NI 6071E	NI 6040E	NI 6034E, NI 6036E	NI 6023E, NI 6024E, NI 6025E	PCI-6013, PCI-6014	
Measurement Sensitivity <sup>1</sup> (mV)	0.0023	0.0025	0.009	0.008	0.0036	0.008	0.004	
Nominal Range (V)	Absolute Accuracy (mV)							
Positive FS	Negative FS							
10	-10	1.147	4.747	14.369	15.373	7.560	16.504	8.984
5	-5	2.077	0.876	5.193	5.897	1.790	5.263	2.003
2.5	-2.5	–	1.190	3.605	3.859	–	–	–
2	-2	0.836	–	–	–	–	–	–
1	-1	0.422	0.479	1.452	1.556	–	–	–
0.5	-0.5	0.215	0.243	0.735	0.789	0.399	0.846	0.471
0.25	-0.25	–	0.137	0.379	0.405	–	–	–
0.2	-0.2	0.102	–	–	–	–	–	–
0.1	-0.1	0.061	0.064	0.163	0.176	–	–	–
0.05	-0.05	–	0.035	0.091	0.100	0.0611	0.106	0.069
10	0	0.976	1.232	6.765	7.269	–	–	–
5	0	1.992	2.119	5.391	5.645	–	–	–
2	0	0.802	0.860	2.167	2.271	–	–	–
1	0	0.405	0.428	1.092	1.146	–	–	–
0.5	0	0.207	0.242	0.568	0.583	–	–	–
0.2	0	0.098	0.111	0.235	0.247	–	–	–
0.1	0	0.059	0.059	0.127	0.135	–	–	–

**Note:** Accuracies are valid for measurements following an internal calibration. Measurement accuracies are listed for operational temperatures within  $\pm 1$  °C of internal calibration temperature and  $\pm 10$  °C of external or factory-calibration temperature. One-year calibration interval recommended. The Absolute Accuracy at Full Scale calculations were performed for a maximum range input voltage (for example, 10 V for the  $\pm 10$  V range) after one year, assuming 100 pt averaging of data.

<sup>1</sup>Smallest detectable voltage change in the input signal at the smallest input range.

Table 2. E Series Analog Input Absolute Accuracy Specifications

Models	Full-Featured E Series				Low-Cost E Series			Basic
	NI 6030E, NI 6031E, NI 6032E, NI 6033E	NI 6052E	NI 6070E, NI 6071E	NI 6040E	NI 6034E, NI 6036E	NI 6023E, NI 6024E, NI 6025E	PCI-6013, PCI-6014	
Nominal Range (V)	Absolute Accuracy (mV)							
Positive FS	Negative FS							
10	-10	1.430	1.405	8.127	8.127	2.417	8.127	3.835
10	0	1.201	1.176	5.685	5.685	–	–	–

Table 3. E Series Analog Output Absolute Accuracy Specifications

### High-Performance, Easy-to-Use Driver Software

NI-DAQ is the robust driver software that makes it easy to access the functionality of your data acquisition hardware, whether you are a beginning or advanced user. Helpful features include:

**Automatic Code Generation** – DAQ Assistant is an interactive guide that steps you through configuring, testing, and programming measurement tasks and generates the necessary code automatically for NI LabVIEW, LabWindows/CVI, or Measurement Studio.

**Cleaner Code Development** – Basic and advanced software functions have been combined into one easy-to-use yet powerful set to help you build cleaner code and move from basic to advanced applications without replacing functions.

**High-Performance Driver Engine** – Software-timed single-point input (typically used in control loops) with NI-DAQ achieves rates of up to 50 kHz. NI-DAQ also delivers maximum I/O system throughput with a multithreaded driver.

**Test Panels** – With NI-DAQ, you can test all of your device functionality before you begin development.

**Scaled Channels** – Easily scale your voltage data into the proper engineering units using the NI-DAQ Measurement Ready virtual channels by choosing from a list of common sensors and signals or creating your own custom scale.

**LabVIEW Integration** – All NI-DAQ functions create the waveform data type, which carries acquired data and timing information directly into more than 400 LabVIEW built-in analysis routines for display of results in engineering units on a graph.

**For information on applicable hardware for NI-DAQ 7, visit [ni.com/dataacquisition](http://ni.com/dataacquisition).**

**Visit [ni.com/oem](http://ni.com/oem) for quantity discount information.**

BUY ONLINE at [ni.com](http://ni.com) or CALL (800) 813 3693 (U.S.)



## ส่วนตั้งสัญญาณ (PCI-6024E)

### Low-Cost E Series Multifunction DAQ – 12 or 16-Bit, 200 kS/s, 16 Analog Inputs

#### Recommended Accessories

Signal conditioning is required for sensor measurements or voltage inputs greater than 10 V. National Instruments SCXI is a versatile, high-performance signal conditioning platform, intended for high-channel-count applications. NI SCC products provide portable, flexible signal conditioning options on a per-channel basis. Both signal conditioning platforms are designed to increase the performance and reliability of your DAQ system, and are up to 10 times more accurate than terminal blocks (please visit [ni.com/sigcon](http://ni.com/sigcon) for more details). Refer to the table below for more information:

Sensor/Signals (>10 V)			
System Description	DAQ Device	Signal Conditioning	
High-performance	PCI-60xxE, PXI-60xxE, DAQCard-60xxE	SCXI	
Low-cost, portable	PCI-60xxE, PXI-60xxE, DAQCard-60xxE	SCC	

Signals (<10 V) <sup>1</sup>			
System Description	DAQ Device	Terminal Block	Cable
Shielded	PCI-60xxE	SCB-68	SH6868-EP
Shielded	PXI-60xxE	TB-2705	SH6868-EP
Shielded	DAQCard-60xxE	SCB-68	SHC6868-EP
Low-cost	PCI-6025E/PXI-6025E	Two TBX-68s	SH1006868
Low-cost	PCI-60xxE/PXI-60xxE	CB-68LP	R6868
Low-cost	DAQCard-60xxE	CB-68LP	RC6868

<sup>1</sup>Terminal blocks do not provide signal conditioning (i.e., filtering, amplification, isolation, and so on), which may be necessary to increase the accuracy of your measurements.

Table 4. Recommended Accessories

#### Ordering Information

##### PCI

NI PCI-6036E	.....	778465-01
NI PCI-6034E	.....	778075-01
NI PCI-6025E	.....	777744-01
NI PCI-6024E	.....	777743-01
NI PCI-6023E	.....	777742-01

##### PCMCIA

NI DAQCard-6036E	.....	778561-01
NI DAQCard-6024E	.....	778269-01

##### PXI

NI PXI-6025E	.....	777798-01
--------------	-------	-----------

Includes NI-DAQ driver software.

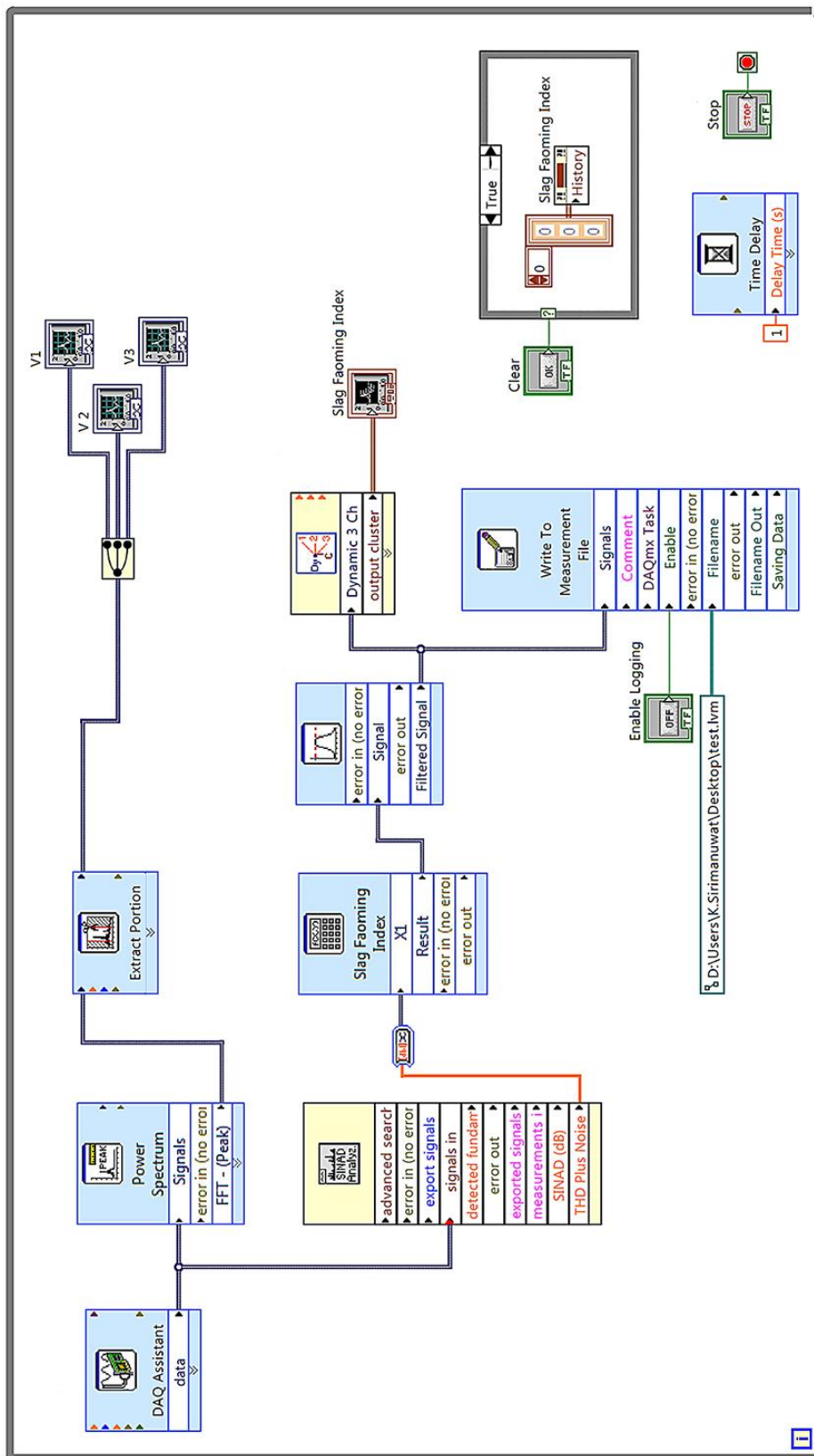
#### BUY NOW!

For complete product specifications, pricing, and accessory information, call (800) 813 3693 (U.S.) or go to [ni.com/dataacquisition](http://ni.com/dataacquisition).

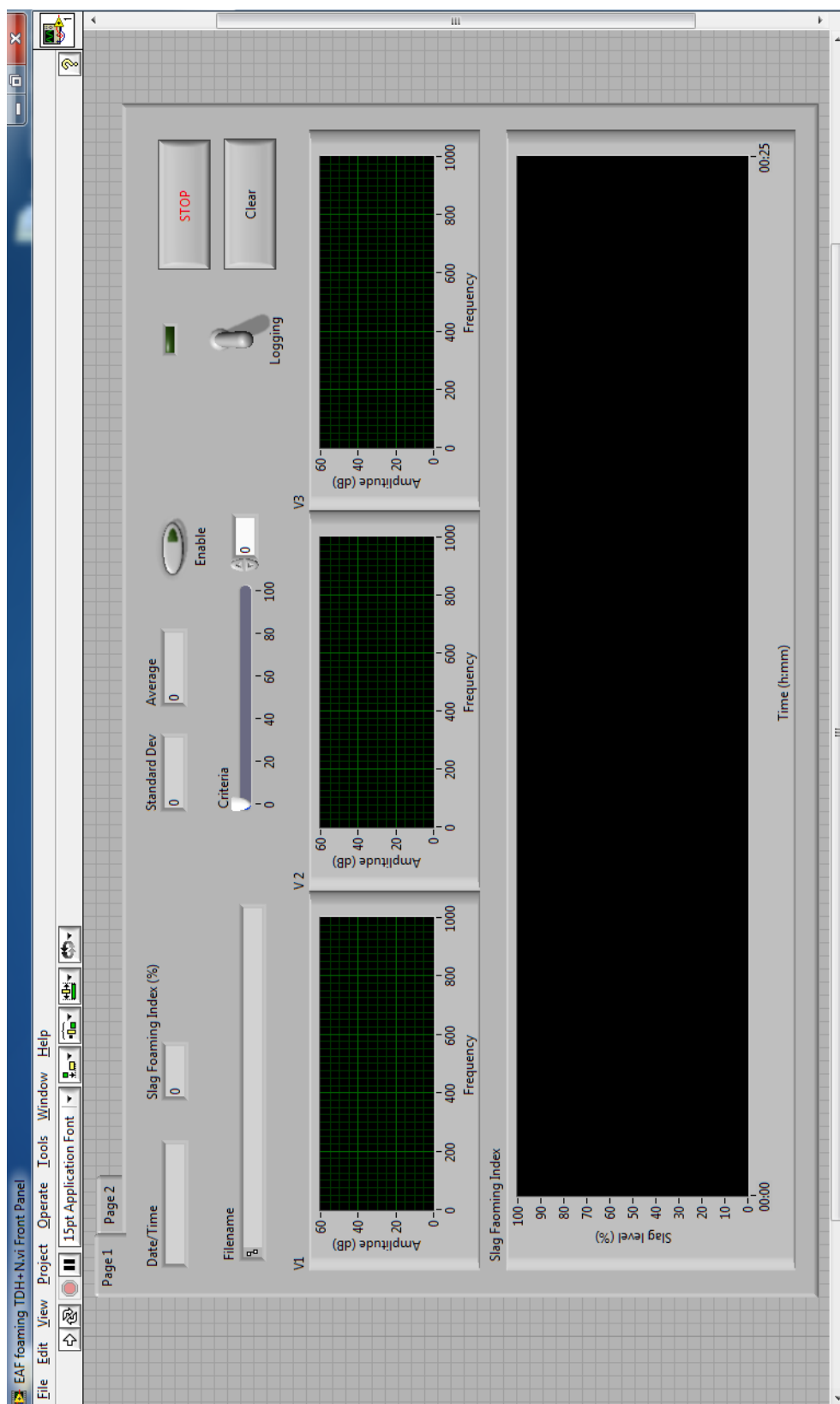
BUY ONLINE at [ni.com](http://ni.com) or CALL (800) 813 3693 (U.S.)

ภาคผนวก ข

โปรแกรมของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองอากาศ



รหัสต้นฉบับ (source code) ของระบบตรวจสังเกตการเกิดฟองสแลก



ส่วนประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (GUI) ของระบบตรวจสอบสังเกตการเกิดฟองสแลก

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกอบพล สิริมานุวัฒน์ เกิดวันที่ 3 ธันวาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เมื่อปี พ.ศ. 2550 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2552 มีผลงานตีพิมพ์ระดับชาติในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35