

การวิเคราะห์การเกิดตำหนิในการผลิตกระจกโฟลต



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF DEFECT FORMATION IN FLOAT GLASS PRODUCTION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Science for Industry

Common Course

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์การเกิดตำหนิในการผลิตกระจกโฟลต
โดย	นายคุณุตม์ ไพบูลย์
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธิตี บวรรัตนารักษ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)	
.....	กรรมการ
(อาจารย์ ดร.อภิรัฐ ธีรภาพิเศษพงษ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.อนุชา วรรณก้อน)	

คุณุตม์ ไพบูลย์ : การวิเคราะห์การเกิดตำหนิในการผลิตกระจกโฟลต. (ANALYSIS OF DEFECT FORMATION IN FLOAT GLASS PRODUCTION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร. กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดตำหนิและหาแนวทางปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณตำหนิชนิดฟองอากาศและริม ด้วยการนำตัวแปรจากกระบวนการผลิตได้แก่ การชั่งน้ำหนักส่วนผสม อุณหภูมิในการหลอม อุณหภูมิในการขึ้นรูปและองค์ประกอบทางเคมีของกระจก มาหาความสัมพันธ์กับปริมาณตำหนิที่เกิดขึ้นด้วยการวิเคราะห์การถดถอย จากผลการวิเคราะห์ตำหนิฟองอากาศด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรีและเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี พบว่าฟองอากาศส่วนใหญ่พบแก๊ส CO₂ เป็นองค์ประกอบอยู่ที่ 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของความร้อนของวัตถุดิบและการไล่ฟองอากาศที่ไม่สมบูรณ์ และจากความสัมพันธ์ของปริมาณฟองอากาศและตัวแปรจากกระบวนการผลิตพบว่า อุณหภูมิการหลอมที่สูงขึ้น ปริมาณ fining agent ที่น้อยลง และกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ตำหนิชนิดฟองอากาศเพิ่มขึ้น จากการศึกษาตำหนิชนิดริมโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ในการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตำหนิชนิดริมเทียบกับบริเวณโดยรอบ โดยพบว่าริมมีปริมาณธาตุ Si และ Na สูงกว่าบริเวณโดยรอบ ซึ่งเกิดจากการชั่งวัตถุดิบที่คลาดเคลื่อนไปจากสูตรการผลิต โดยเกิดจากวัตถุดิบติดค้างบริเวณกรวยรับวัตถุดิบ ส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผสมไม่สม่ำเสมอ ยิ่งความแตกต่างของน้ำหนักส่วนผสมจากสูตรการผลิตยิ่งมาก จะทำให้ปริมาณริมเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถความผิดพลาดจากการชั่งนี้สามารถแก้ไขได้โดยติดตั้งค้อนลมเพื่อเคาะวัตถุดิบให้ลงไปโมผสมวัตถุดิบครบถ้วนตามสูตรการผลิต

CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270215023 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: float glass, bubble, ream

Kanut Paiboon : ANALYSIS OF DEFECT FORMATION IN FLOAT GLASS PRODUCTION. Advisor: Asst. Prof. KARN SERIVALSATIT Co-advisor: Asst. Prof. THANAKORN WASANAPIARNPONG

This research aims to study factors affecting defect formation and define process improvements for defect reduction in float glass production. Relations between the amount of the defects and data from the process, including batch weighing, melting temperature, forming temperature and chemical composition of glass were determined using regression analysis. Raman spectroscopy and mass spectroscopy were used to analyze the chemical composition of gases in bubbles. Most of the bubbles contained 30-70% CO₂, which resulted from thermal decomposition of raw materials and an incomplete fining process. The relationship between the amount of bubble defects and data from production revealed that increased melting temperature, a lack of fining agents, and increased production capacity all contributed to the formation of bubble defects. For ream defects analysis, SEM/EDS was used to determine element composition of ream defects and surrounding. The ream had higher level of Si and Na than the surrounding glass. This was caused by weighing raw materials that were not according to the production formula. The raw materials were trapped in the receiving cone. The greater weight difference resulted in an increased amount of reams. The batching problem could be avoided by installing an air knocker at the receiving cone to knock the raw materials into a mixer according to the production formula.

Field of Study: Science for Industry

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยความอนุเคราะห์จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานต์ เสรีวัลย์สถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดมา รวมถึงรองศาสตราจารย์ ดร. ธิติ บวรรัตน์รักษ์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. อภิรัฐ อธิภาวิเศษพงษ์ กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และดร. อนุชา วรรณก้อน กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและสละเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขรายละเอียดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท บีจี คอนเทนเนอร์ กล๊าส จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและโอกาสในการศึกษาต่อ บริษัท กบินทร์บุรีกล๊าส จำกัด คุณธนะชิต สาสะเน ผู้จัดการส่วน Hot End และพี่ๆ พนักงานทุกท่านสำหรับคำแนะนำ ข้อมูลและความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ โครงการวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม (Sci-Fi) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำนักงานสภานโยบายอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) ที่ได้จัดทำหลักสูตรการศึกษาที่สอดคล้องกับความต้องการของภาคอุตสาหกรรม โปรแกรมสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรม (ITAP) ที่ช่วยให้คำปรึกษาและดูแลโครงการให้สำเร็จลุล่วง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คุณุตม์ ไพบูลย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แก้วและนิยามของแก้ว.....	3
2.2 วัสดุดิบและบทบาทของวัสดุดิบ.....	4
2.2.1 Network former.....	4
2.2.2 Network modifiers.....	4
2.2.3 Intermediates.....	4
2.2.4 Fining agent.....	5
2.2.5 อื่น ๆ.....	5
2.3 กระบวนการผลิตกระจกโฟลต.....	5
2.3.1 การเตรียมวัสดุดิบ.....	6

2.3.2	กระบวนการหลอมวัสดุดิบ.....	7
2.3.2.1	เตาหลอมวัสดุดิบ.....	7
2.3.2.2	การหลอมวัสดุดิบ (Melting).....	8
2.3.2.3	การไล่ฟองอากาศ (Fining).....	9
2.3.2.4	การลดอุณหภูมิในน้ำแก้ว (Conditioning).....	10
2.3.3	การขึ้นรูปกระจก	10
2.3.4	การอบไล่ความเค้น (Annealing Lehr).....	11
2.3.5	การตรวจสอบคุณภาพกระจก.....	11
2.3.6	การตัดและบรรจุ	12
2.4	ตำหนิในกระบวนการผลิตกระจกโฟลต	12
2.5	การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย.....	14
2.5.1	แผนภาพการกระจาย (Scatter plot).....	14
2.5.2	สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square).....	16
2.5.3	วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method).....	16
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.6.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำหนิชนิดฟองอากาศในแก้ว	17
2.6.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำหนิชนิดริ้วในเนื้อแก้ว.....	22
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย	24
3.1	วิเคราะห์สาเหตุการเกิดตำหนิ.....	24
3.2	วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	24
3.2.1	วิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy).....	24
3.2.2	วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วด้วยแมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry)	24

3.2.3	วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (SEM/EDS).....	24
3.3	การเก็บรวบรวมข้อมูลจากระบวนการผลิตกระจกโฟลต	24
3.3.1	การเก็บข้อมูลการเตรียมวัตถุดิบ	25
3.3.2	การเก็บข้อมูลในกระบวนการหลอมวัตถุดิบ	26
3.3.3	การเก็บข้อมูลในกระบวนการขึ้นรูปกระจก.....	27
3.3.4	การเก็บข้อมูลตำหนิ.....	27
3.3.5	องค์ประกอบทางเคมีของกระจกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโคปี (XRF)	28
3.4	การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย	28
บทที่ 4	ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล.....	29
4.1	ตำหนิชนิดฟองอากาศ.....	29
4.1.1	วิเคราะห์การเกิดตำหนิชนิดฟองอากาศ	29
4.1.2	ข้อมูลปริมาณ ขนาดและตำแหน่งของฟองอากาศ	30
4.1.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตำหนิชนิดฟองอากาศ.....	33
4.1.3.1	การวิเคราะห์ตำหนิชนิดฟองอากาศด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี.....	33
4.1.3.2	การวิเคราะห์ตำหนิชนิดฟองอากาศด้วยเทคนิคแมสสเปกโทรเมตรี	35
4.1.4	การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย	36
4.1.4.1	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและอุณหภูมิบริเวณ melter.....	36
4.1.4.2	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและอุณหภูมิบริเวณ refiner	39
4.1.4.3	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและปริมาณ SO ₃ ในกระจก.....	42
4.1.4.4	ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและกำลังการผลิต	44

4.2	ตำหนิชนิดรีม	47
4.2.1	การวิเคราะห์การเกิดตำหนิชนิดรีม	47
4.2.2	ตำแหน่งของรีม.....	47
4.2.3	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตำหนิชนิดรีม	48
4.2.4	ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักวัดดูติบจากสูตรการผลิต	51
4.2.4	องค์ประกอบทางเคมีของกระจก.....	53
4.2.5	ปริมาณรีมก่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการ	53
4.2.6	การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย	55
4.2.6.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของน้ำหนักวัดดูติบก่อนและหลังผสมและปริมาณรีม.....	55
4.2.6.2	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเตาหลอมและปริมาณรีม.....	55
4.2.6.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปและปริมาณรีม	57
บทที่ 5	สรุปผล	29
5.1	ตำหนิชนิดฟองอากาศ.....	29
5.2	ตำหนิชนิดรีม	29
บรรณานุกรม.....	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	30
ประวัติผู้เขียน.....	CHULALONGKORN UNIVERSITY	32

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาตรและองค์ประกอบของแก๊ส O ₂ N ₂ CO ₂ และอากาศในกระจก	20
ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์ฟองอากาศจากการรีบอยล์ในแก้วสีชา	21
ตารางที่ 2.3 ผลวิเคราะห์ฟองอากาศจากปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งเจือปนที่เป็นโลหะ	21
ตารางที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์ฟองอากาศจากอิฐทนไฟในเตาหลอมบริเวณ Working end.....	22
ตารางที่ 2.5 ผลเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของริมและบริเวณโดยรอบ.....	22
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟองอากาศในกระจก	36
ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุในกระจกตัวอย่าง.....	49

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตกระจกโฟลต.....	6
รูปที่ 2.2 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ.....	6
รูปที่ 2.3 เตาหลอมแก้วชนิด Cross fired regenerative	7
รูปที่ 2.4 การไหลเวียนของน้ำแก้วเมื่อใช้ Bubbler.....	8
รูปที่ 2.5 กระบวนการหลอม.....	8
รูปที่ 2.6 (ก) อัตราการขยายตัว (ข) อัตราการลอยตัวของฟองอากาศ	10
รูปที่ 2.7 การปรับมุมที่อปโรลเป็นบวกเพื่อดีดกระจกให้กว้างออกและบางลง	11
รูปที่ 2.8 การปรับมุมที่อปโรลเป็นลบเพื่อดีดกระจกให้แคบและหนาขึ้น	11
รูปที่ 2.9 ตำแหน่งชนิดเม็ดหิน.....	12
รูปที่ 2.10 ตำแหน่งชนิดคอกท/นอท	12
รูปที่ 2.11 ตำแหน่งชนิดทิน	13
รูปที่ 2.12 ตำแหน่งชนิดฟองอากาศ.....	13
รูปที่ 2.13 ตำแหน่งชนิดริม	14
รูปที่ 2.14 แผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์เส้นตรงทางบวก	15
รูปที่ 2.15 แผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์เส้นตรงทางลบ	15
รูปที่ 2.16 แผนภาพการกระจายแสดงการไม่มีความสัมพันธ์กัน	16
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและอุณหภูมิ	17
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศและอุณหภูมิ	18
รูปที่ 2.19 ฟองอากาศในแก้วบอโรซิลิเกต.....	18
รูปที่ 2.20 รามานสเปกตรัมของแก๊ส N_2 O_2 CO_2 และ CO_2 ในกระจก.....	19
รูปที่ 2.21 ตำแหน่งการวิเคราะห์และองค์ประกอบทางเคมีของริมและบริเวณรอบ	23

รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลจากกระบวนการผลิตกระจกโฟลต	25
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลน้ำหนักวัตถุดิบก่อนและหลังผสม	26
รูปที่ 3.3 บริเวณการวัดอุณหภูมิในเตาหลอม	26
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในการขึ้นรูปกระจก.....	27
รูปที่ 4.1 แผนภูมิกำงปลาแสดงการเกิดปัญหาฟองอากาศ.....	29
รูปที่ 4.2 ปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กต่อชั่วโมง.....	30
รูปที่ 4.3 ปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่ต่อชั่วโมง.....	31
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งฟองอากาศขนาดเล็กในกระจก	32
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งฟองอากาศขนาดใหญ่ในกระจก.....	32
รูปที่ 4.6 รามานสเปกตรัมของฟองอากาศในแก้วโซดาไลม์	33
รูปที่ 4.7 รามานสเปกตรัมของ N ₂ ในแก้วโซดาไลม์	34
รูปที่ 4.8 รามานสเปกตรัมของ CO ₂ ในแก้วโซดาไลม์.....	34
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter..	37
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter.	37
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และความแตกต่าง	38
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและความแตกต่าง.....	39
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ refiner	40
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ refiner .	40
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และความแตกต่าง	41
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและความแตกต่าง.....	42
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และปริมาณ SO ₃ ในกระจก	43
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและปริมาณ SO ₃ ในกระจก.....	43
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และกำลังการผลิต.....	44
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและกำลังการผลิต	45

รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ฟองอากาศ.....	46
รูปที่ 4.22 แผนภูมิกำลังปลาแสดงสาเหตุการเกิดตำหนิชนิดริ้ว.....	47
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งริ้วในกระจก.....	48
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างริ้ว.....	49
รูปที่ 4.25 ปริมาณธาตุซิลิคอนในตัวอย่างริ้วที่ตำแหน่งต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.26 ปริมาณธาตุโซเดียมในตัวอย่างริ้วที่ตำแหน่งต่างๆ.....	50
รูปที่ 4.27 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักก่อนและหลังผสมก่อนติดตั้งก้อนลม.....	51
รูปที่ 4.28 บริเวณกรวยรับวัตถุดิบที่วัตถุดิบติดค้าง.....	52
รูปที่ 4.29 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักก่อนและหลังผสมหลังติดตั้งก้อนลม.....	52
รูปที่ 4.30 ปริมาณ SiO ₂ ในกระจกก่อนและหลังจากติดตั้งก้อนลม.....	53
รูปที่ 4.31 ปริมาณริ้วก่อนการติดตั้งก้อนลม.....	54
รูปที่ 4.32 ปริมาณริ้วหลังการติดตั้งก้อนลม.....	54
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณริ้วและความแตกต่างของน้ำหนักวัตถุดิบก่อนและหลังผสม.....	55
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณริ้วและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter.....	56
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณริ้วและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ working end.....	56
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณริ้วและอุณหภูมิน้ำแก้วก่อนการขึ้นรูป.....	57
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณริ้วและอุณหภูมิน้ำแก้วขณะขึ้นรูป.....	58
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณริ้วและอุณหภูมิน้ำดีทุกขณะขึ้นรูป.....	58
รูปที่ 4.39 การวิเคราะห์การเกิดริ้ว.....	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันกระบวนการผลิตกระจกแผ่นเรียบ (Flat Glass) นิยมผลิตด้วยการผลิตแบบโฟลต (Float Glass Process) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย เซอร์แอลลาสแตร์ พิลคิงตัน (Sir Alastair Pilkington) ในปี 1959 โดยมีวัตถุดิบหลักคือ ทราายแก้ว โซดาแอช (Na_2CO_3) หินปูน (CaCO_3) หินฟอสเฟต โดโลไมต์ ซอลต์เค้ก (Na_2SO_4) เศษกระจก และ สารให้สี เช่น ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) ซึ่งจะถูกนำมาหลอมจนเป็นน้ำแก้วที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นน้ำแก้วจะถูกลำเลียงไปยังอ่างตีบุกเพื่อทำการขึ้นรูป น้ำแก้วที่ลอยอยู่บนตีบุกนั้นจะถูกดึงเป็นแผ่นเรียบและควบคุมความหนาด้วยอุปกรณ์ที่ท็อปโรลแมชชีน (Top Roll Machine) จากนั้นกระจกจะถูกทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ เพื่อไล่ความเค้น (Annealing) ให้กระจกมีความเหมาะสมในการตัดตามขนาดที่ต้องการ ปัจจุบันกระจกที่เป็นนิยมและพบเห็นได้บ่อยจะมีด้วยกัน 2 สี คือกระจกใสและกระจกสีเขียว ซึ่งถูกใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างแพร่หลายไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้ตามอาคารบ้านเรือน รถยนต์ อุปกรณ์ต่าง ๆ หรือการนำไปแปรรูปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของกระจกเช่น กระจกเทมเปอร์ กระจกลามิเนต กระจกพิมพ์ลายและกระจกป้องกันความร้อน เป็นต้น ในการผลิตกระจกโฟลตอาจเกิดตำหนิผลิตภัณท์ที่เกิดขึ้นยกตัวอย่างเช่น ฟองอากาศ (Bubble) สโตน (Stone) นอท (Knot) และริม (Ream) เป็นต้น ซึ่งส่งผลเกิดผลิตภัณท์เสียขึ้นในกระบวนการผลิต อีกทั้งยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตและต้นทุนการผลิตตำหนิที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้จากปัจจัยหลายด้านเช่น วัตถุดิบที่ใช้ อุณหภูมิและเวลาการหลอม ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบ อุณหภูมิการหลอม และอัตราการลดอุณหภูมิของแผ่นกระจก เป็นต้น ซึ่งกระจกใสและกระจกสีเขียวจะพบปัญหาตำหนิที่แตกต่างกัน โดยการผลิตกระจกใสจะพบปัญหาตำหนิชนิดฟองอากาศเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่การผลิตกระจกสีเขียวจะพบปัญหาตำหนิชนิดริมเป็นหลัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดตำหนิและหาแนวทางปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณตำหนิทั้งสองชนิดนี้เป็นหลัก

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดตำหนิในกระบวนการผลิตกระจกโฟลต

1.2.2 เพื่อระบุแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดการเกิดตำหนิในผลิตภัณท์กระจก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาสาเหตุของการเกิดตำหนิตำหนิตัวด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตำหนิตัวชนิดฟองอากาศที่เกิดขึ้นโดยใช้เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy) และแมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry) และใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ร่วมกับเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (energy dispersive x-ray spectroscopy, EDS) ในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตำหนิตัวชนิดริ้ว และศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตกระจกโฟลตที่มีผลต่อปริมาณตำหนิตัวที่เกิดขึ้น โดยทำการเก็บข้อมูลจากการผลิตกระจกโฟลตได้แก่ ขนาดและปริมาณของตำหนิตัวที่เกิดขึ้น น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ อุณหภูมิในเตาหลอม อุณหภูมิของน้ำแก้ว ความเร็วในการขึ้นรูปกระจก และองค์ประกอบทางเคมีของกระจก เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับตำหนิตัวที่เกิดขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยในกระบวนการผลิตกระจกโฟลตที่มีผลต่อปริมาณตำหนิตัวที่เกิดขึ้น และสามารถระบุแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดปริมาณตำหนิตัวที่เกิดขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก้วและนิยามของแก้ว

“แก้ว” เป็นวัสดุที่เกิดจากการนำสารอนินทรีย์มาเผาจนหลอมจนเป็นน้ำแก้วที่อุณหภูมิสูง จากนั้นถูกขึ้นรูปและทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจนโครงสร้างแก้วไม่มีเวลาพอที่จะเรียงตัวให้เป็นระเบียบหรือเรียกว่าวัสดุอสัณฐาน (Amorphous Material) แก้วเป็นวัสดุที่มีความแข็ง เปราะและแวววาว นอกจากนี้แก้วยังมีสมบัติอื่นๆ ที่ทำให้แก้วถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น โปร่งใส ทนต่อการกัดกร่อน ยากต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ และสามารถนำกลับมาหลอมเพื่อขึ้นรูปใหม่ได้ โดยที่สมบัติของแก้วยังคงเหมือนเดิม[1]

ในปัจจุบันการแบ่งประเภทของแก้วสามารถแบ่งได้หลายวิธี เช่น แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี แบ่งตามการใช้งาน หรือแบ่งตามวิธีการผลิต เป็นต้น แต่โดยทั่วไปแล้วนิยามแบ่งประเภทของแก้วตามองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่

1. แก้วโซดาไลม์ (Soda Lime glass) เป็นแก้วที่ผลิตจากวัตถุดิบหลักคือ ทราย โซดาแอช และหินปูน ซึ่งเป็นแก้วที่พบเห็นได้ทั่วไปเช่น ขวดแก้ว หลอดไฟ กระจก สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลง
2. แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) เป็นแก้วที่มีโบรอนออกไซด์เป็นองค์ประกอบเพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนมีค่าต่ำ ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์และภาชนะในครัวเรือน
3. แก้วตะกั่ว (Lead glass) เป็นแก้วที่มีส่วนผสมของตะกั่วมากกว่า 24% ทำให้มีค่าดัชนีหักเหสูงกว่าแก้วชนิดอื่น ทำให้มีประกายแวววาวสวยงาม นิยมทำเครื่องประดับและเครื่องแก้วที่มีราคาสูงเช่น แก้วไวน์ เป็นต้น
4. แก้วโอปอล (Opal glass) เป็นแก้วที่มีการเติมสารบางชนิด เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ (NaF) หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ (CaF₂) เพื่อให้มีการตกผลึกหรือการแยกชั้นในเนื้อแก้วทำให้แก้วมีความขุ่นหรือโปร่งแสง นิยมใช้เป็นภาชนะบนโต๊ะอาหาร
5. แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate glass) เป็นแก้วที่มีอะลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลักมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่าง

เฉียบพลัน ทนต่ออุณหภูมิสูง ต้านทานกระแสไฟฟ้าสูง ทนการกัดกร่อน เหมาะสำหรับใช้งานที่อุณหภูมิสูง

6. แก้วอัลคาไลน์เอิร์ท อะลูมิโนซิลิเกต (Alkaline earth alumino silicate) เป็นแก้วที่มีส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์หรือแบเรียมออกไซด์ ทำให้ค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่วแต่ผลิตง่ายกว่า และมีความทนทานต่อกรดและด่างมากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

2.2 วัสดุติบและบทบาทของวัสดุติบ

2.2.1 Network former

ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักหรือเรียกว่า Glass forming oxide ซึ่งมีซิลิกาเป็นวัสดุติบหลักที่ทำให้เกิดแก้วคือ

ทรายแก้ว มีส่วนประกอบของซิลิการ้อยละ 95-99 โดยน้ำหนัก มีจุดหลอมเหลวสูง มีความแข็ง ทนต่อสารเคมีและเป็นวัสดุติบหลักและสำคัญในการผลิตแก้ว

2.2.2 Network modifiers

ทำหน้าที่ดัดแปลงโครงสร้าง เป็นตัวช่วยในการลดอุณหภูมิการหลอมและความหนืดของแก้วซึ่งวัสดุติบหลักคือ

โซดาแอช (Na_2CO_3) นอกจากมีสมบัติเป็นฟลักซ์ซึ่งลดอุณหภูมิในการหลอมแก้วและลดพลังงานในการหลอม นอกจากนี้ยังช่วยให้ให้น้ำแก้วอ่อนนิ่ม ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูป

หินปูน (CaCO_3) เมื่อได้รับความร้อนจะแตกตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีสมบัติช่วยในการแข็งตัวของน้ำแก้วเมื่ออุณหภูมิเย็นตัวลง และยังช่วยเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี

โดโลไมต์ ($\text{MgCO}_3\text{-CaCO}_3$) มีคุณสมบัติคล้ายกันกับหินปูนเนื่องจากมีออกไซด์ที่คล้ายกัน

2.2.3 Intermediates

เป็นกลุ่มที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงให้กับแก้ว ความทนต่อสารเคมี เพิ่มความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิอย่างเฉียบพลัน วัสดุติบที่ใช้ได้คือ

หินฟีนัมหรือเฟลด์สปาร์ ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{Si}_2\text{O}$) เป็นวัสดุติบที่ให้อะลูมินามีสมบัติช่วยเพิ่มความทนทานต่อสารเคมีและการสึกกร่อนได้ดี

2.2.4 Fining agent

ทำหน้าที่ช่วยในการไล่ฟองอากาศในกระบวนการหลอมแก้ว โดยสร้างฟองอากาศเพื่อรวมฟองอากาศให้มีขนาดใหญ่และมีกำลังลอยตัวของฟองอากาศเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดความหนืดของน้ำแก้ว ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้คือ

ซอลต์เค้ก (Na_2SO_4) เมื่อได้รับความร้อนจะแตกได้ Na_2O SO_2 และ O_2 ทำหน้าที่ในการไล่ฟองอากาศให้ลอยพ้นผิวน้ำแก้วและลดความหนืดของน้ำแก้ว

โค้ก (C) เป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดิวซ์ ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดออกซิเจน ซึ่งทำให้เกิดสีขาและช่วยให้โซเดียมซัลเฟสแตกตัวได้ง่ายขึ้น

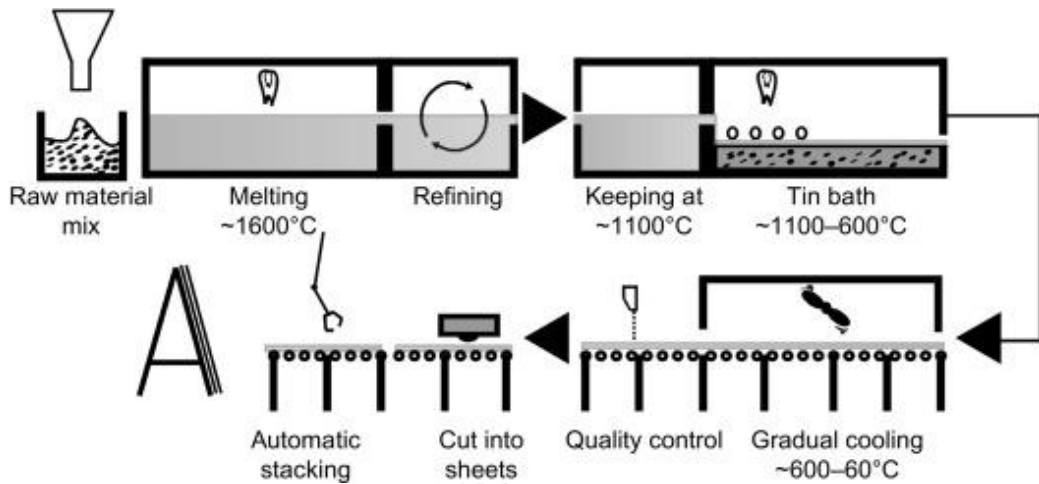
2.2.5 อื่น ๆ

สารให้สี (Colorant) ส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มโลหะทรานซิชันโดยแต่ละชนิดจะให้สีที่แตกต่างกัน เช่น เหล็ก (Fe) ให้สีเขียว โคบอลต์ (Co) ให้สีน้ำเงิน และ นิกเกิล (Ni) ให้สีน้ำตาล เป็นต้น

เศษกระจก (Cullet) เป็นการนำเศษแก้วที่ใช้แล้วหรือของเสียจากกระบวนการผลิตมาหลอมใหม่ ซึ่งช่วยในการลดพลังงานในการหลอมและยังช่วยในเรื่องการรักษาสิ่งแวดล้อม

2.3 กระบวนการผลิตกระจกโฟลต

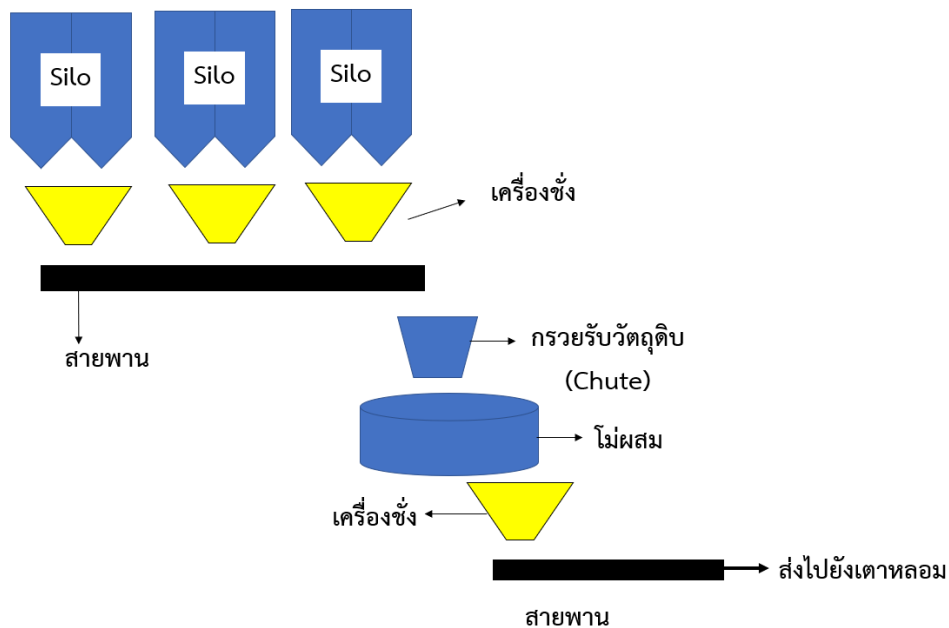
กระบวนการผลิตกระจกโฟลตเริ่มจากการที่นำวัตถุดิบมาซึ่งและผสมตามสัดส่วนที่กำหนด หลังจากนั้นวัตถุดิบที่ผสมเสร็จแล้วจะถึงส่งไปที่เตาหลอม ภายในเตาหลอมจะทำการหลอมวัตถุดิบที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียสจนเป็นน้ำแก้ว และทำการไล่ฟองอากาศ จากนั้นน้ำแก้วจะถูกส่งไปพักจนอุณหภูมิน้ำแก้วเหลือประมาณ 1100 องศาเซลเซียส น้ำแก้วจะถูกส่งไปยังอ่างตีบุกเพื่อทำการขึ้นรูปกระจก เมื่อกระจกทำการขึ้นรูปเสร็จแล้วจะถูกส่งไปทำการอบไล่ความเค้นด้วยโรลเลอร์ เพื่อให้สามารถตัดกระจกได้ง่ายขึ้นกระจกที่ผ่านการอบไล่ความเค้นแล้วจะผ่านการตรวจสอบคุณภาพ จากนั้นถูกส่งไปตัดตามขนาดและจัดเก็บตามความต้องการ [2,3] สรุปกระบวนการผลิตกระจกโฟลตแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตกระจกโฟลต[3]

2.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบจะเริ่มจากการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบชนิดต่างๆตามมาตรฐาน เช่น ค่าความชื้น ขนาดอนุภาค และองค์ประกอบทางเคมีเป็นต้น ก่อนจะถูกนำไปจัดเก็บในไซโล จากนั้นวัตถุดิบจะถูกชั่งตามสูตรของกระจกชนิดที่ผลิต หลังจากนั้นวัตถุดิบจะถูกลำเลียงไปยังโม่ผสมขนาดใหญ่เพื่อผสมวัตถุดิบทั้งหมดให้เข้ากันดังรูปที่ 2.2 โดยกระบวนการชั่งและผสมวัตถุดิบจะถูกควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นวัตถุดิบที่ผสมเสร็จเรียบร้อยแล้ว (Batch) จะถูกส่งไปยังเตาหลอมพร้อมกับเศษกระจก



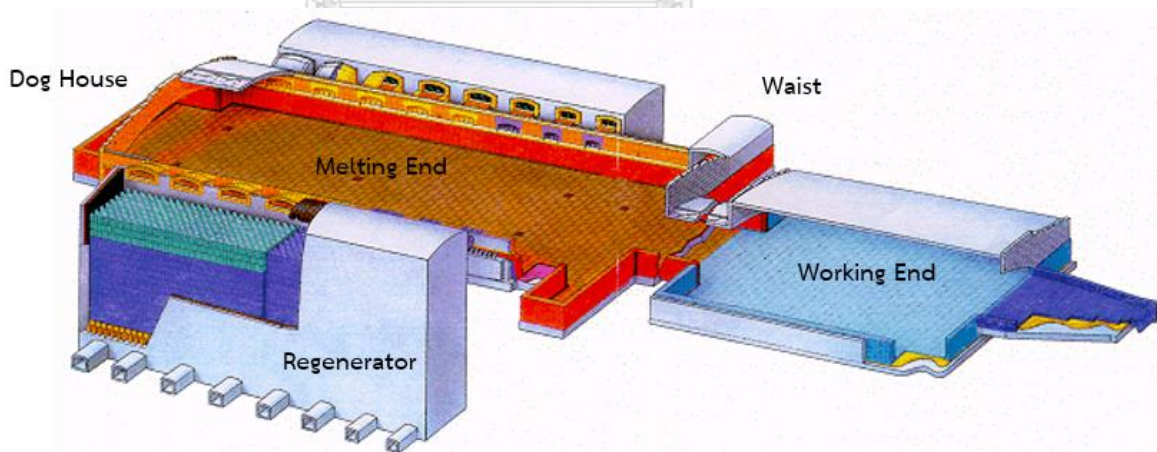
รูปที่ 2.2 กระบวนการเตรียมวัตถุดิบ

2.3.2 กระบวนการหลอมวัสดุดิบ

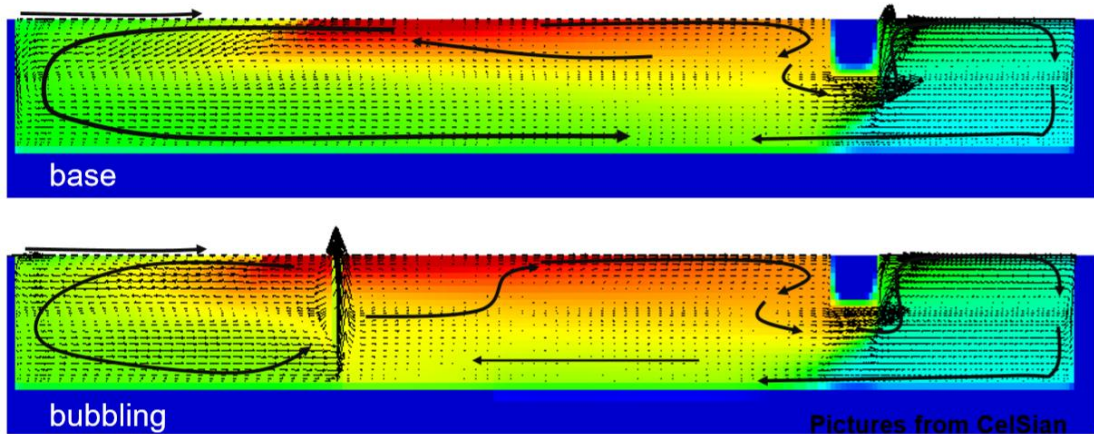
2.3.2.1 เตาหลอมวัสดุดิบ

เตาหลอมแก้วที่นิยมใช้ในกระบวนการผลิตกระจกโฟลตคือเตาหลอมชนิด Cross fired regenerative เป็นเตาหลอมที่มี Burner อยู่ทั้งด้านซ้ายและขวาดังรูปที่ 2.3 โดยจะสลับกันทำงานที่ละฝั่งและมี regenerator เพื่อเก็บความร้อนช่วยให้ลมที่ใช้ในการเผาไหม้มีอุณหภูมิสูงขึ้น โดยวัสดุดิบจะถูกป้อนเข้าสู่เตาหลอมทางบริเวณ Dog house จากนั้นจะถูกดันต่อไปบริเวณ Melting end เพื่อทำการหลอม โดยบริเวณด้านใต้ Melting end จะมีอุปกรณ์ปล่อยฟองอากาศเรียกว่า Bubbler เพื่อช่วยในการไหลเวียนของน้ำแก้วและช่วยในการไล่ฟองอากาศดังรูปที่ 2.4 หลังจากนั้นน้ำแก้วจะไหลผ่านไปยัง Waist ที่มี Cooler เพื่อช่วยในการไหลเวียนของน้ำแก้วโดยน้ำแก้วจะรอดผ่านใต้ cooler ยัง working end เพื่อพักน้ำแก้วให้มีอุณหภูมิและสภาพที่เหมาะสมกับการขึ้นรูป โดยน้ำแก้วจะถูกส่งต่อไปยังอ่างดีบุกผ่าน Canal

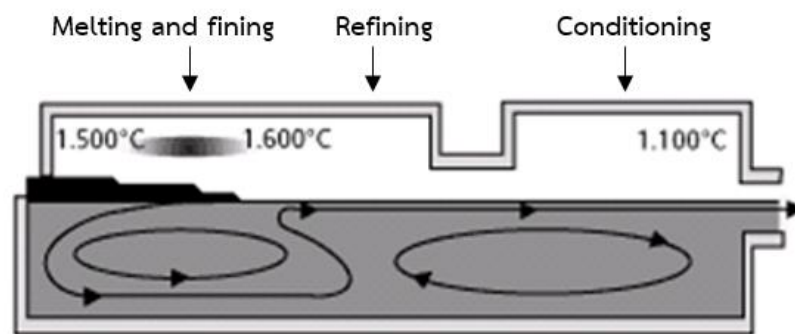
โดยกระบวนการหลอมมีด้วยกัน 3 ขั้นตอนคือ 1. การหลอมวัสดุดิบและ Primary fining ซึ่งเกิดในบริเวณที่มีอุณหภูมิที่สูงที่สุดในเตาหลอม 2. Refining ซึ่งเกิดในบริเวณที่อุณหภูมิต่ำลงมาประมาณ 1300 องศาเซลเซียส 3. การปรับสภาพน้ำแก้วโดยค่อยๆลดอุณหภูมิจนเหลือประมาณ 1100 องศาเซลเซียสเพื่อให้แก้วเหมาะสำหรับการขึ้นรูปดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.3 เตาหลอมแก้วชนิด Cross fired regenerative[4]



รูปที่ 2.4 การไหลเวียนของน้ำแก้วเมื่อใช้ Bubbler

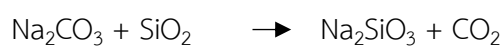
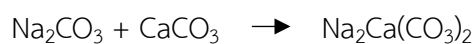


รูปที่ 2.5 กระบวนการหลอม[2]

2.3.2.2 การหลอมวัตถุดิบ (Melting)

เมื่อวัตถุดิบมาถูกลำเลียงมายังเตาหลอมจะถูกดันเข้าไปในเตาหลอมทางด้านหลังของเตาด้วย Batch charger ซึ่งภายในเตาหลอมให้ความร้อนจากแก๊สธรรมชาติและกระแสไฟฟ้า โดยปฏิกิริยาการหลอมวัตถุดิบมีด้วยกัน 5 ขั้นตอนคือ

1. การกำจัดน้ำออกวัตถุดิบ
2. การเกิดปฏิกิริยาในสถานะของแข็ง (Solid state reaction) ของวัตถุดิบแต่ละตัวโดยโซเดียมคาร์บอเนตและหินปูนทำปฏิกิริยากันเกิดเป็น $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ หรือโซเดียมคาร์บอเนตทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็น Na_2SiO_3



3. การหลอมของเกลือและวัตถุดิบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเช่น Na_2CO_3 และ $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 700 – 900 องศาเซลเซียส

4. การแตกตัวของโดโลไมต์และหินปูนเมื่อได้รับความร้อน ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น เกิดเป็นฟองในน้ำแก้ว



5. การหลอมของซิลิกาโดยที่ทรายทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมแคลเซียมคาร์บอเนตหรือโซเดียมซิลิเกต ที่อุณหภูมิประมาณ 750 – 1000 องศาเซลเซียส จนอยู่ในรูปโซเดียมซิลิเกตหรือโซเดียมแคลเซียมซิลิเกตที่หลอมเหลว เมื่อทรายทำปฏิกิริยากับโซเดียมคาร์บอเนตจะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในกระบวนการ

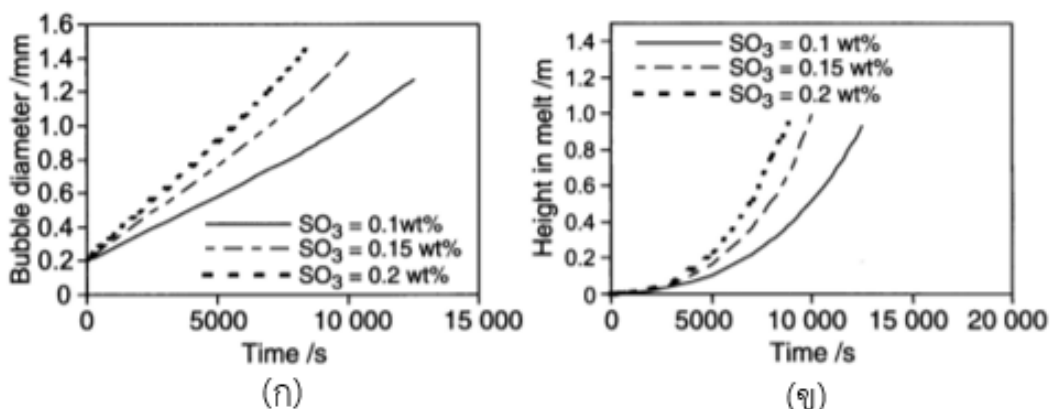
2.3.2.3 การไล่ฟองอากาศ (Fining)

Fining หรือการไล่ฟองอากาศ คือ การกำจัดฟองอากาศที่อยู่ในน้ำแก้วที่เกิดจากการหลอมวัตถุดิบโดยการเติมสารเคมี (Fining agent) นิยมใช้เป็นโซเดียมซัลเฟตและคาร์บอนลงในส่วนผสมเพื่อช่วยในการไล่ฟองอากาศ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นคือ



โดยการไล่ฟองอากาศมีด้วยกัน 2 วิธีคือ

1. Primary fining คือ การที่ฟองอากาศลอยตัวขึ้นจนพ้นผิวหน้าแก้วโดยอาศัยแรงลอยตัวของฟองอากาศ ฟองที่เกิดจาก fining agent จะรวมตัวกับฟองอากาศอื่นๆ จนมีขนาดใหญ่ ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่จะยิ่งลอยพ้นผิวหน้าแก้วได้ไวขึ้น โดยฟองอากาศที่มี fining agent จะมีอัตราการขยายตัวของฟองอากาศสูงขึ้นและทำให้อัตราการลอยตัวของฟองอากาศสูงด้วยดังรูปที่ 2.6 กระบวนการนี้จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากความหนืดของน้ำแก้วต่ำทำให้ฟองอากาศรวมตัวกันได้ง่ายและลอยตัวได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.6 (ก) อัตราการขยายตัว (ข) อัตราการลอยตัวของฟองอากาศ
 ระหว่างการไล่ฟองอากาศในแก้วโซดาไลม์ที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส[5]

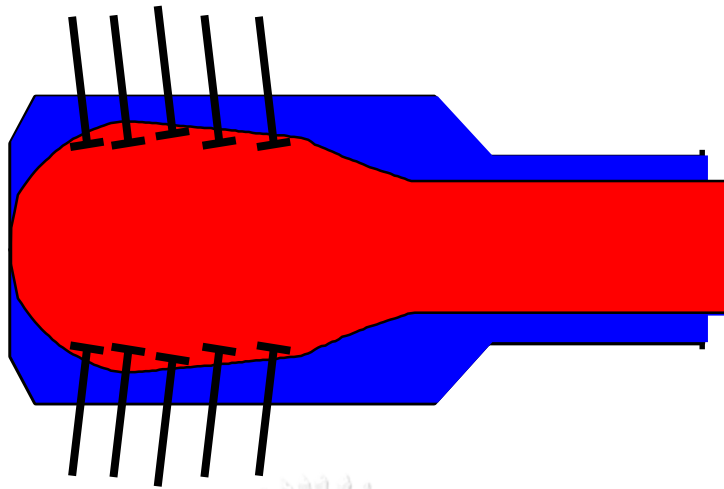
2. Secondary fining หรือ refining คือการที่ฟองอากาศขนาดเล็กที่เหลือจาก primary fining ถูกดูดซับกลับไปยังน้ำแก้ว โดยจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 1275 – 1300 องศาเซลเซียส แก๊สที่ได้จาก fining agent จะถูกดูดซึมน้ำแก้วได้ดีและไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแก้ว

2.3.2.4 การลดอุณหภูมิน้ำแก้ว (Conditioning)

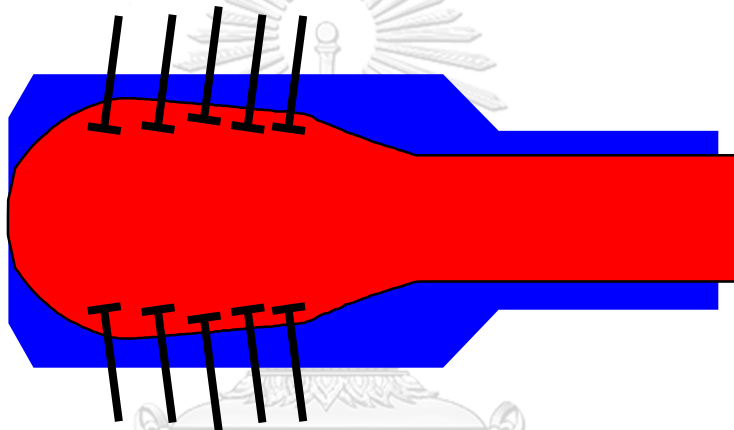
หลังจากที่วัตถุดิบถูกหลอมจนเป็นน้ำแก้วและถูกทำให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วน้ำแก้วจะถูกส่งมายังด้านท้ายของเตาหลอมเรียกว่า Conditioner หรือ Working end ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าเพื่อลดอุณหภูมิของน้ำแก้วให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปที่ประมาณ 1100 องศาเซลเซียส

2.3.3 การขึ้นรูปกระจก

น้ำแก้วที่อุณหภูมิเหมาะสมแล้วจะไหลต่อมายังส่วนของอ่างตีบุก (Tin Bath) โดยน้ำแก้วที่ไหลมายังอ่างตีบุกจะแผ่ตัวออกและลอยตัวอยู่บนตีบุกที่หลอมเหลว เนื่องจากน้ำแก้วมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำตีบุก ที่อ่างตีบุกทั้งสองด้านจะมีล้อกดขอบกระจกเรียกว่าที่อปโรล (Top roll machine) ทำหน้าที่ดึงขอบกระจกให้บางลงหรือหนาขึ้นเพื่อกำหนดความหนาของกระจก ถ้ามุมของที่อปโรลเป็นมุมบวกขอบกระจกจะกว้างออกและบางลงและถ้ามุมที่อปโรลเป็นลบที่อปโรลจะดันกระจกให้แคบลงและหนาขึ้น การปรับมุมของที่อปโรลแสดงดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 การปรับมุมที่อโรลเป็นบวกเพื่อตั้งกระจกให้กว้างออกและบางลง



รูปที่ 2.8 การปรับมุมที่อโรลเป็นลบเพื่อตั้งกระจกให้แคบและหนาขึ้น

2.3.4 การอบไล่ความเค้น (Annealing Lehr)

หลังจากกระจกถูกตั้งขึ้นรูปเป็นแผ่นแล้วจะถูกลำเลียงออกจากอ่างดีบุกที่อุณหภูมิประมาณ 570 องศาเซลเซียสโดยชุดโรลเลอร์ (Roller) และถูกทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ เพื่อลดความเค้นภายในเนื้อกระจกจนอุณหภูมิเท่ากับสภาวะแวดล้อมด้านนอก

2.3.5 การตรวจสอบคุณภาพกระจก

กระจกที่ผ่านการอบไล่ความเค้นแล้วจะถูกลำเลียงด้วยโรลเลอร์ผ่านกล้องตรวจสอบตำหนิ (Defect scanner) โดยตำหนิที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร จะถูกคัดทิ้งและมีการเก็บข้อมูลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ เช่น ปริมาณตำหนิ ชนิดตำหนิและตำแหน่งที่เกิดตำหนิเพื่อนำมาวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดตำหนิ

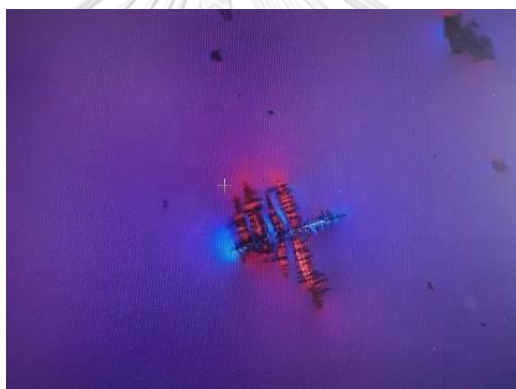
2.3.6 การตัดและบรรจุ

กระจกที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพจะถูกส่งมาที่กระบวนการตัดและบรรจุ ซึ่งจะเป็นส่วนท้ายของกระบวนการผลิตกระจกโฟลต โดยจะทำการตัดกระจกออกเป็นแผ่นตามที่ลูกค้าต้องการ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุม

2.4 ตำหนิในกระบวนการผลิตกระจกโฟลต

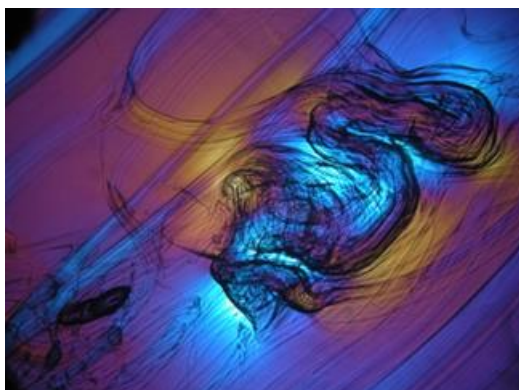
ตำหนิที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตสามารถเกิดขึ้นได้หลายชนิด แต่ละชนิดจะมีสาเหตุแตกต่างกันออกไป ตำหนิที่พบในกระบวนการผลิตถูกจำแนกได้ดังนี้

เม็ดหิน (Stone) คือ ตำหนิที่มีลักษณะเป็นผลึกหรือเป็นเม็ดหินติดมากับกระจกดังรูปที่ 2.9 อาจเกิดได้จากการตกผลึกของน้ำแก้ว น้ำแก้วทำปฏิกิริยากับอิฐทนไฟในเตาหลอมหรือวัตถุดิบหลอมไม่หมด เป็นต้น



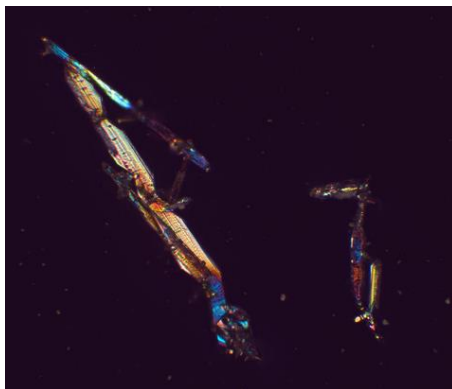
รูปที่ 2.9 ตำหนิชนิดเม็ดหิน

นอต (Knot) คือ ตำหนิที่ลักษณะเป็นริ้วไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับกระจกดังรูปที่ 2.10 อาจเกิดได้จากสิ่งเจือปนที่ละลายไปกับกระจก



รูปที่ 2.10 ตำหนิชนิดคอต/นอต

ทิน (Tin defect) คือ ตำหนิที่มีลักษณะเป็นเม็ดดังรูปที่ 2.11 เกิดจากดีบุกทำปฏิกิริยากับกระจก น้ำดีบุกกระเด็นลงบนผิวกระจกหรือไอระเหยดีบุกทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นทินออกไซด์แล้วตกลงบนผิวกระจกระหว่างการขึ้นรูปกระจก



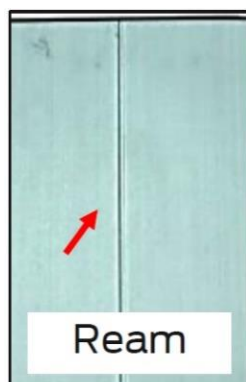
รูปที่ 2.11 ตำหนิชนิดทิน

ฟองอากาศ (Bubble) คือ ฟองอากาศดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเหลือจากกระบวนการหลอมวัตถุดิบไม่สามารถไล่ฟองอากาศได้หมดเกิดได้จากการไล่ฟองอากาศในเตาหลอมไม่สมบูรณ์ อุปกรณ์ในเตาหลอมรั่ว น้ำแก้วทำปฏิกิริยากับอิฐทนไฟในเตาหลอมหรือปฏิกิริยาในเตาหลอมที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.12 ตำหนิชนิดฟองอากาศ

ริม (Ream) คือ ริ้วในกระจกที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าต้องมองผ่านแสงฟลูออเรสเซนต์ดังรูปที่ 2.13 ส่งผลมาจากการที่ความหนาหรือดัชนีหักเหของแสงไม่สม่ำเสมอจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของกระจกซึ่งอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น องค์ประกอบทางเคมีของน้ำแก้วไม่สม่ำเสมอ น้ำแก้วไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือความเค้นในกระจกไม่สม่ำเสมอจากความร้อนและแรงเชิงกล เป็นต้น



รูปที่ 2.13 ตำนานชนิดรีม

2.5 การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย

การถดถอยอย่างง่ายเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้สำหรับศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเชิงปริมาณสองตัวซึ่งมีลักษณะความสัมพันธ์กันเชิงเส้น โดยตัวแปรหนึ่งคือตัวแปรอิสระเขียนแทนด้วย x และอีกตัวแปรหนึ่งคือตัวแปรตามเขียนแทนด้วย y โดยตัวแปรอิสระจะเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย เป็นกระบวนการทางสถิติที่ใช้สร้างสมการคณิตศาสตร์เชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม โดยวิธีต่างๆที่ใช้สำหรับตรวจสอบรูปแบบความสัมพันธ์คือ แผนภาพการกระจาย (Scatter plot)

2.5.1 แผนภาพการกระจาย (Scatter plot)

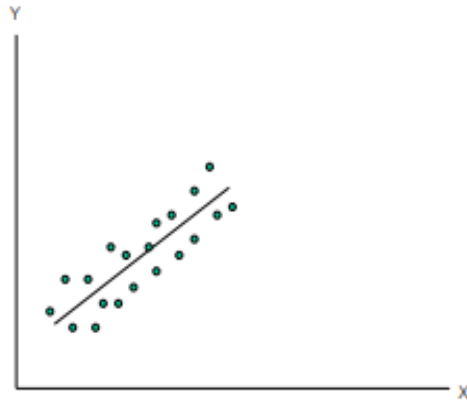
แผนภาพการกระจายคือกราฟที่ช่วยในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรโดยนำค่าของตัวแปรทั้งสองมาเขียนกราฟแต่ละจุดในกราฟการกระจายคือ ค่า x และ y เป็นคู่ๆ

ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงหมายถึงค่าตัวแปร y มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับตัวแปร x ส่วนความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งหมายถึงค่าตัวแปร y เปลี่ยนแปลงไม่เป็นสัดส่วนกับตัวแปร x

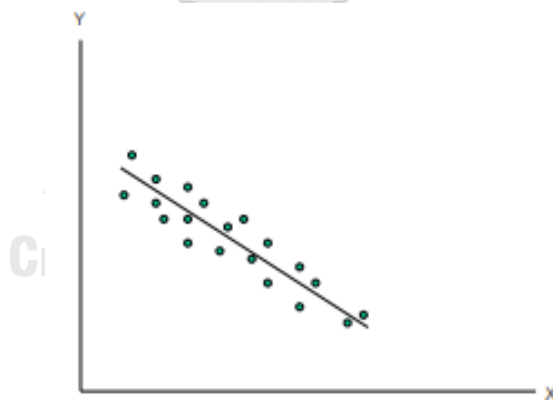
ความสัมพันธ์ทางบวกหมายถึงค่าของตัวแปร x และ y มีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อตัวแปร x มีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ตัวแปร y มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยและเมื่อตัวแปร x มีค่าลดลงจะส่งผลให้ตัวแปร y มีค่าลดลงด้วยดังรูปที่ 2.14

ความสัมพันธ์ทางลบหมายถึงค่าของตัวแปร x และ y มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางไปในทิศทางตรงกันข้ามกัน โดยเมื่อตัวแปร x มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลต่อตัวแปร y ให้มีค่าลดลงและเมื่อตัวแปร x มีค่าลดลงตัวแปร y จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.15

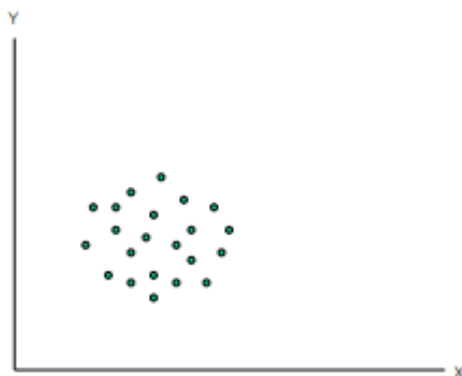
ไม่มีความสัมพันธ์กันคือตัวแปร x และ y ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันหรือทิศตรงข้ามกัน โดยเมื่อตัวแปร x เพิ่มขึ้นหรือลดลงตัวแปร y จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นสัดส่วนดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.14 แผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์เส้นตรงทางบวก



รูปที่ 2.15 แผนภาพการกระจายแสดงความสัมพันธ์เส้นตรงทางลบ



รูปที่ 2.16 แผนภาพการกระจายแสดงการไม่มีความสัมพันธ์กัน

2.5.2 สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square)

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจคืออิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตาม ซึ่งอธิบายค่าความแปรผันของตัวแปรว่าอธิบายได้ในรูปแบบของเชิงเส้นเป็นเท่าไร โดยนำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ที่คำนวณได้มายกกำลังสอง

โดยที่

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ} = r^2$$

$$\text{สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์} = r$$

ซึ่งหาได้จากสมการ

$$r = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\sum x^2 - n\bar{x}^2)(\sum y^2 - n\bar{y}^2)}} ; \bar{x} = \frac{\sum x}{n}, \bar{y} = \frac{\sum y}{n}$$

2.5.3 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method)

เป็นวิธีที่ใช้ในการสร้างสมการคณิตศาสตร์เชิงเส้นซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม โดยมีตัวแบบที่แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นเรียกว่า ตัวแบบถดถอย (Regression model) และมีรูปแบบสมการเส้นตรงซึ่งเรียกว่า สมการประมาณการถดถอย (Estimated regression equation) ดังนี้

$$\hat{y} = a + bx$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

$$b = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2}$$

โดย

\hat{y} คือ ตัวประมาณค่าตัวแปรตาม

a คือ จุดตัดบนแกน y ของเส้นตรงประมาณการถดถอย

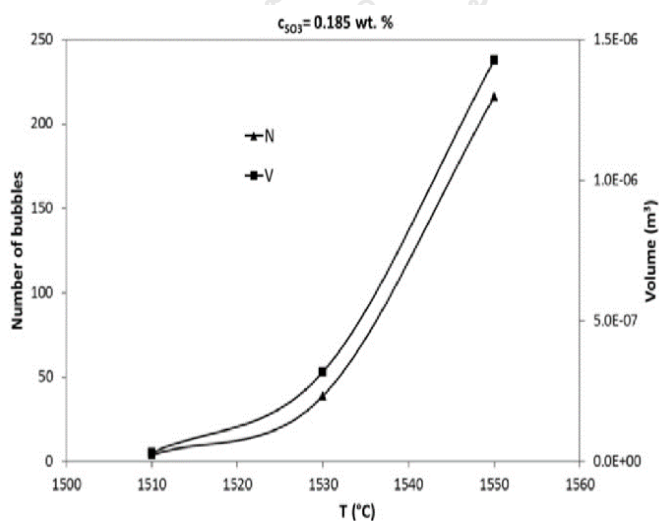
b คือ ความชันของเส้นตรงประมาณการถดถอย

โดยงานวิจัยนี้ได้้นำการวิเคราะห์การถดถอยมาใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรจากกระบวนการผลิตและปริมาณตำหนักที่เกิดขึ้น เพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลต่อปริมาณตำหนัก

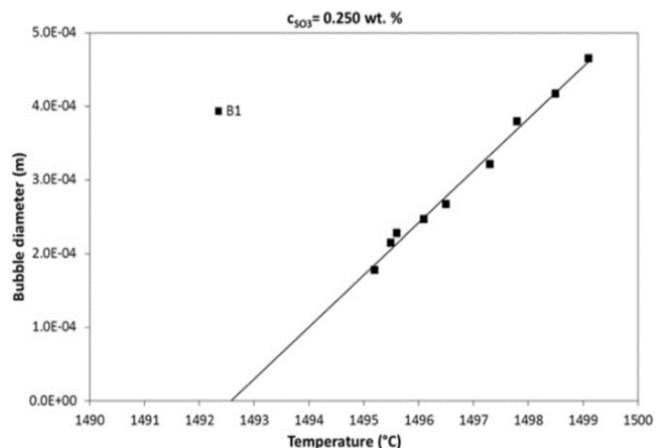
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำหนักชนิดฟองอากาศในแก้ว

ในปี 2015 M. Vernerova และคณะ [6] ได้ทำการทดลองการเกิดฟองอากาศในกระบวนการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงเพื่อระบุอุณหภูมิที่ทำให้เกิดฟองอากาศ โดยจุ่มลวดแพลตตินัมลงในน้ำแก้วเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างโลหะและซิลิกา ที่อุณหภูมิ 1400 จนถึง 1550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที และทำการตรวจสอบปริมาณและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณลวดแพลตตินัมโดยใช้ กล้อง CCD จากผลกการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิอย่างจะส่งผลให้ฟองอากาศมีปริมาณมากขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.17 และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศจะใหญ่ขึ้นดังรูปที่ 2.18

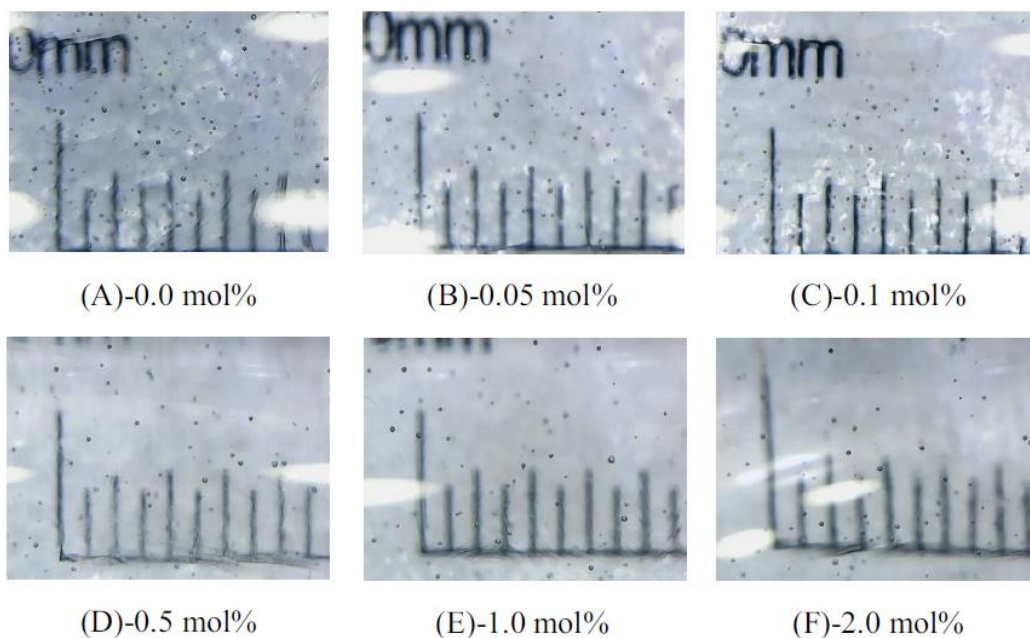


รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและอุณหภูมิ [6]



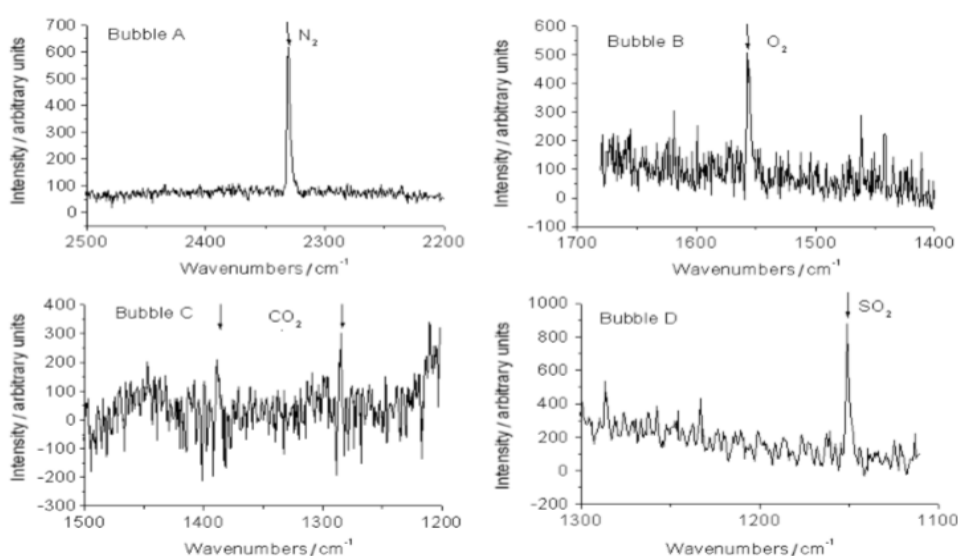
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดฟองอากาศและอุณหภูมิ [6]

ปี 2020 N. Singkiburin และคณะ[7] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของ Sb_2O_3 ต่อการไล่ฟองอากาศของแก้วชนิดบอโรซิลิเกต โดยทำการทดลองเปรียบเทียบปริมาณ Sb_2O_3 ที่ 0.5 0.05 0.01 0.5 1.0 และ 2.0 โมล% และทำการตรวจสอบขนาดและปริมาณฟองอากาศโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบดิจิทัล พบว่าปริมาณฟองอากาศมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ Sb_2O_3 ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ฟองอากาศในแก้วบอโรซิลิเกต [7]

ในปี 2003 S. Pedeché และคณะ[8] ได้ทำการวิเคราะห์หาชนิดของแก๊สในฟองอากาศโดยใช้เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman spectroscopy) โดยใช้ตัวอย่างกระจกจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม ตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ และขจัดจนฟองอากาศและผิวของกระจกมีระยะห่างกันน้อยกว่า 500 ไมครอน โดยผลที่ได้พบพีคของ N_2 O_2 CO_2 CO และ SO_2 ที่ wavenumber 2331, 1556, 1286, 2145 และ 1151 cm^{-1} ตามลำดับดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 รามานสเปกตรัมของแก๊ส N_2 O_2 CO_2 และ CO_2 ในกระจก [8]

ในปี 1980 O. Yanagisawa และคณะ[9] ได้ทำอธิบายเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแก๊สในฟองอากาศจำลองในกระจกโซดาไลน์ซิลิเกตด้วยการให้ความร้อนในกระบวนการหลอม ฟองอากาศจำลองประกอบด้วยแก๊สเพียงหนึ่งชนิดเป็นส่วนประกอบ โดยใช้ O_2 N_2 CO_2 และอากาศ ลักษณะการดูดซึมของแก๊สโดยกระจกถูกอธิบายด้วยความเข้มข้นของแก๊สและค่ารีด็อกซ์ของกระจก โดยทำการทดลองด้วยกันทั้งหมด 3 ตัวอย่างตัวอย่างละ 500 กรัมนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างกระจกที่ได้ไปให้ความร้อนเพื่อทำให้เกิดฟองที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ตัวอย่างได้ถูกนำไปทำการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สในฟองอากาศด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography) ซึ่งได้ผลเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่างก่อนและหลังให้ความร้อนดังตารางที่ 2.1 แก๊สในฟองอากาศจะถูกดูดซึมโดยแก้วทำให้ปริมาณของแก๊ส O_2 N_2 และ CO_2 ลดลงหลังจากให้ความร้อน โดยแก๊สที่ไม่สามารถระบุได้คาดว่าน่าจะมาจาก SO_3 สำหรับฟองอากาศ O_2 ในปฏิกิริยา reducing และเป็นไอน้ำสำหรับฟองอากาศอื่น

ตารางที่ 2.1 ปริมาตรและองค์ประกอบของแก๊ส O₂ N₂ CO₂ และอากาศในกระจก[9]

Samples	O ₂ Bubble			N ₂ Bubble				CO ₂ Bubble			Air Bubble			
	O ₂	X	α	N ₂	CO ₂	X	α	CO ₂	X	A	N ₂	O ₂	X	α
P (a)	100	-		82	-	18		100	-		93	7	-	
P (b)	93	7	0.86	64	2	34	1.07	94	6	1.08	74	3	23	1.05
O (a)	95	5		86	-	14		79	21		79	19	2	
O (b)	95	5	1.00	80	1	19	1.06	65	35	1.02	92	2	6	0.95
R (a)	98	2		98	-	2		79	21		74	15	11	
R (b)	80	20	0.87	98	-	2	1.06	65	35	1.02	92	2	6	0.89

X: แก๊สที่ไม่สามารถระบุได้

α : ปริมาตรฟองอากาศก่อนให้ความร้อนเทียบกับปริมาตรฟองอากาศหลังให้ความร้อน

a: องค์ประกอบของแก๊สก่อนให้ความร้อน

b: องค์ประกอบของแก๊สก่อนหลังความร้อน

ในปี 2018 M. Jezikova และคณะ[10] ได้ทำการวิเคราะห์ฟองอากาศโดยใช้เทคนิคแมสสเปกโตรเมตรีในการหาองค์ประกอบทางเคมีของฟองอากาศในแก้ว โดยนำตัวอย่างฟองอากาศด้วยกัน 3 ชนิดคือ

1. ฟองอากาศจากการรีบอยล์ (Re-boil) ซึ่งมาจาก fining gas นั่นคือ SO₂ และ O₂ ซึ่งง่ายต่อการรีบอยล์ อาจเกิดจากการที่อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นหลังจากการ refining การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยารีดอกซ์หรือมี fining gas มากเกินไป โดยฟองอากาศจากการรีบอยล์จะพบองค์ประกอบของ SO₂ เป็นส่วนใหญ่ ส่วน O₂ จะถูกดูดซึมไปจนหมดนอกจากนี้ยังพบองค์ประกอบของ CO₂ และ N₂ ด้วยโดยปริมาณที่พบขึ้นอยู่กับระยะเวลาของฟองอากาศในการหลอมและส่วนใหญ่จะไม่พบองค์ประกอบของ Ar ในฟองอากาศ โดยแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลวิเคราะห์ฟองอากาศจากการรีบอยล์ในแก้วสีชา[10]

No.	Dimensions [mm]			D.EQ.* [mm]	Volume [ml]	P [kPa]	Gas Composition [vol.%]									
	a	b	c				N ₂	CO ₂	O ₂	Ar	SO ₂	H ₂ S	COS	CO	CH ₄	H ₂
1	0.56	1.24	0.42	0.66	1.53E-04	10.1	5.9	9.1	-	-	85.0	-	-	-	-	-
2	1.38	1.96	0.38	1.01	5.38E-04	6.5	-	4.5	-	-	95.5	-	-	-	-	-
3	2.55	0.38	0.56	0.82	2.84E-04	4.0	-	17.4	-	-	82.6	-	-	-	-	-
4	0.36	1.44	0.70	0.71	1.90E-04	11.0	0.1	5.1	-	-	94.8	-	-	-	-	-

2. ฟองอากาศจากปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งเจือปนเช่น โลหะ คาร์บอนหรือสารประกอบคาร์บอน โดยส่วนใหญ่จะพบองค์ประกอบของ CO₂ สูง ในกรณีที่เกิดปฏิกิริยารีดิวซ์สูง CO และ H₂ จะถูกพบในองค์ประกอบของฟองอากาศและแก๊ส H₂S และ COS สามารถถูกพบได้อย่างมีนัยยะสำคัญซึ่งมาจากซัลเฟตในปฏิกิริยารีดิวซ์นี้ โดยฟองอากาศที่พบจะมีขนาดใหญ่และมีความดันฟองอากาศต่ำซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลวิเคราะห์ฟองอากาศจากปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งเจือปนที่เป็นโลหะ [10]

No.	Dimensions [mm]			D.EQ.* [mm]	Volume [ml]	P [kPa]	Gas Composition [vol.%]									
	a	b	c				N ₂	CO ₂	O ₂	Ar	SO ₂	H ₂ S	COS	CO	CH ₄	H ₂
1	7.00	3.00	0.60	2.33	6.60E-03	3.5	2.1	0.1	-	-	-	-	-	7.6	-	90.2
2	6.40	4.00	0.60	2.49	8.04E-03	4.0	1.6	0.3	-	-	-	-	-	12.0	-	86.1
3	8.4	3.6	0.6	2.63	9.50E-03	7.0	0.1	0.5	-	-	-	-	-	7.9	-	91.7
4	8.40	3.60	0.60	2.63	9.50E-03	7.0	0.1	0.5	-	-	-	-	-	13.6	-	85.8
5	8.00	4.40	1.00	3.28	1.84E-02	2.0	0.2	0.2	-	-	-	-	-	10.0	-	89.6
6	10.30	4.20	0.60	2.96	1.36E-02	3	0.5	0.1	-	-	-	-	-	6.5	-	92.9

3. ฟองอากาศจากอิฐทนไฟในเตาหลอม โดยสามารถเกิดจากอากาศในรูปฟองที่เกิดจากการกักความร้อนของอิฐทนไฟ โดยทั่วไปแก๊สที่เกิดจากจากอิฐทนไฟจะประกอบด้วยอากาศซึ่งจะพบ CO₂ และ O₂ ซึ่ง O₂ จะถูกดูดซึมไปในน้ำแก้วจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ฟองอากาศจะมีองค์ประกอบของ N₂ ในปริมาณที่สูงและจะพบ Ar ในฟองอากาศด้วยซึ่ง สัดส่วน N₂/Ar จะใกล้เคียงกับบรรยากาศที่ฟองอากาศอยู่แสดงให้เห็นดังตารางที่ 2.4 โดยจะพบฟองอากาศในบริเวณที่น้ำแก้วมีการสัมผัสกับอิฐทนไฟโดยตรง ซึ่งอาจเกิดได้จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงหรือน้ำแก้วไหลเร็ว

ตารางที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์ฟองอากาศจากอิฐทนไฟในเตาหลอมบริเวณ Working end[10]

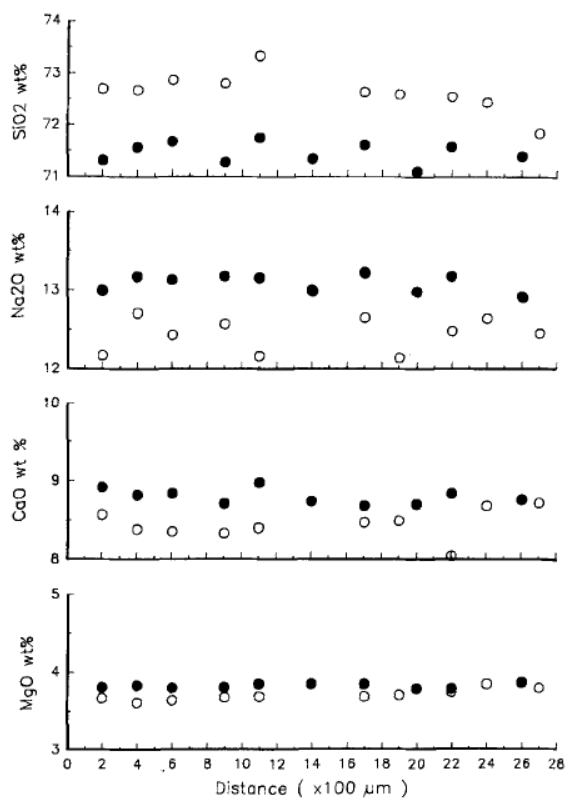
No.	Dimensions [mm]			D.EQ.* [mm]	Volume [ml]	P [kPa]	Gas Composition [vol.%]									
	a	b	c				N ₂	CO ₂	O ₂	Ar	SO ₂	H ₂ S	COS	CO	CH ₄	H ₂
1	0.68	0.38	0.36	0.45	4.87E-05	29.0	70.4	28.4	-	0.6	-	0.5	0.1	-	-	-
2	1.00	0.41	0.43	0.56	9.23E-05	27.0	68.2	30.9	-	0.6	-	0.2	0.1	-	-	-
3	0.38	0.25	0.25	0.29	1.24E-05	26.5	68.1	31.0	-	0.6	-	0.2	0.1	-	-	-
4	0.35	0.23	0.23	0.26	9.69E-06	27.5	65.4	33.7	-	0.5	-	0.3	0.1	-	-	-
5	0.23	0.17	0.17	0.19	3.48E-06	27.0	62.8	36.2	-	0.5	-	0.2	0.2	-	-	-
6	0.42	0.25	0.25	0.30	1.37E-05	31.0	59.9	39.4	-	0.4	-	0.2	0.1	-	-	-

2.6.2 gayวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตำหนิชนิดริมนเนื้อแก้ว

ในปี 1992 D. Liu และคณะ[11] ได้ทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของตำหนิชนิดริมนโดยใช้เทคนิคอิเล็กตรอนโพรบไมโครแอนาไลซิส (Electron probe microanalysis, EMPA) โดยเปรียบเทียบกันระหว่างบริเวณที่มีริมนและบริเวณเนื้อกระจกและใช้ความหนาแน่นของลำแสงอิเล็กตรอนที่ต่ำเนื่องจากโซเดียมไอออนในกระจกโซดาไลม์ซิลิเกตนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อได้รับพลังงานนอกจากนี้ ผลการทดลองพบว่าตัวอย่างริมนจะมี SiO₂ สูงกว่าและมี Na₂O ต่ำกว่าบริเวณเนื้อกระจกแสดงดังตารางที่ 2.5 และรูปที่ 2.21

ตารางที่ 2.5 ผลเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของริมนและบริเวณโดยรอบ[11]

	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SnO ₂	TiO ₂	ZrO ₂	P ₂ O ₅
Base	71.46	13.10	8.80	3.83	0.069	0.369	0.579	0.011	0.015	0.013	0.025	0.018
Ream	72.65	12.44	8.44	3.71	0.071	0.365	0.516	0.019	0.003	0.014	0.038	0.000
R-B	1.19	-0.66	-0.36	-0.12	0.002	-0.004	-0.063	-0.008	-0.012	0.001	0.13	-0.018



รูปที่ 2.21 ตำแหน่งการวิเคราะห์และองค์ประกอบทางเคมีของริมและบริเวณรอบ[11]

บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วิเคราะห์สาเหตุการเกิดตำหนิ

วิเคราะห์สาเหตุการเกิดตำหนิโดยใช้แผนภูมิแกงปลาเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดตำหนิ

3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ตัวอย่างกระจกและตำหนิจะถูกเก็บจากกระบวนการผลิตกระจกโดยตรงเพื่อนำวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

3.2.1 วิเคราะห์สเปกตรัมด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman spectroscopy)

ตัวอย่างกระจกที่มีฟองอากาศถูกนำมาตัดให้มีความกว้างและยาว 5 เซนติเมตรและนำมาขัดผิวให้ฟองอากาศภายในกระจกอยู่ห่างจากผิวกระจกน้อยกว่า 1 มิลลิเมตรและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก๊สในฟองอากาศด้วยกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลรามาน (Confocal Raman Microscope) ผลิตโดยบริษัท WITec รุ่น alpha300 R ที่กำลังขยาย 50 เท่า

3.2.2 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก๊สด้วยแมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry)

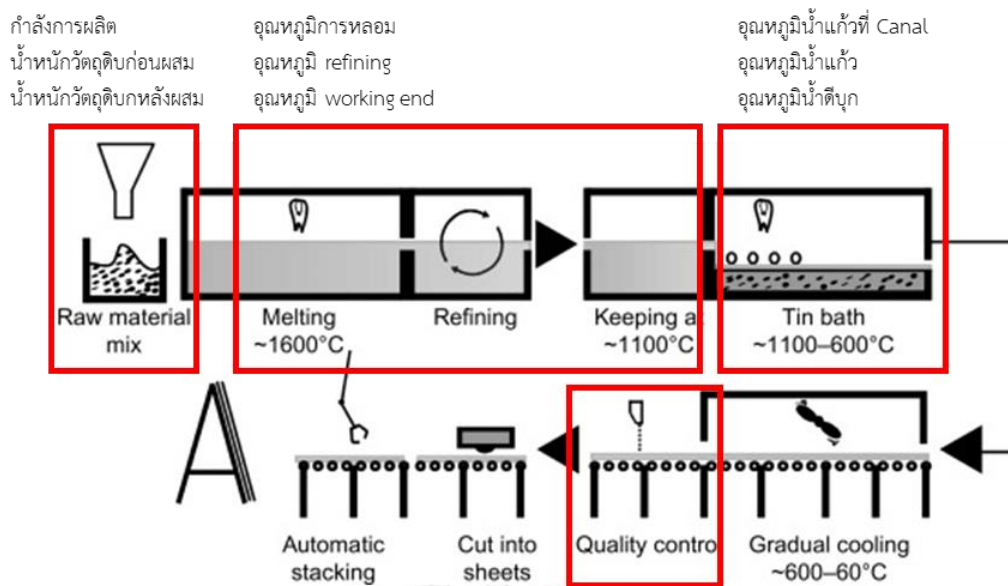
ตัวอย่างกระจกที่มีฟองอากาศถูกนำมาตัดและขัดผิวให้มีความกว้าง 5 มิลลิเมตร ยาว 15 มิลลิเมตรและหนา 3 มิลลิเมตร หลังตัวอย่างจะถูกนำไปห้องสุญญากาศและทำให้แตกแก๊สที่ออกมาจากฟองอากาศจะถูวิเคราะห์ด้วยเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์แบบ quadrupole

3.2.3 วิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (SEM/EDS)

ตัวอย่างกระจกที่มีริมนถูกนำมาตัดให้มีความกว้างและยาว 10 มิลลิเมตรและความหนา 5 มิลลิเมตร แล้วนำไปฉาบผิวด้วยทองแล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของริมนและบริเวณโดยรอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลิตโดยบริษัท JEOL รุ่น JSM-6480 LV ที่กำลังขยาย 20 เท่า

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูลจากกระบวนการผลิตกระจกโฟลต

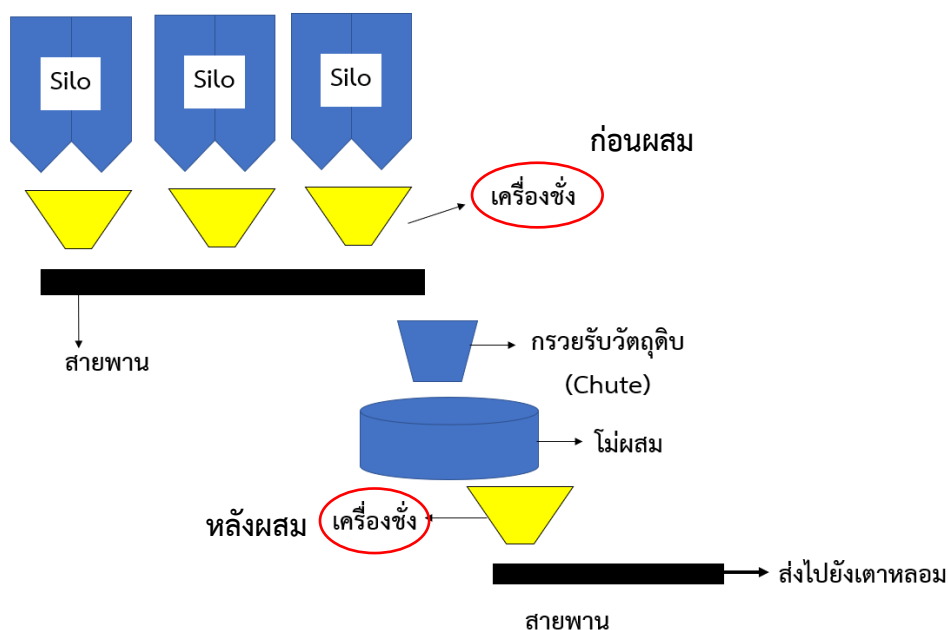
ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลปัจจัยที่สามารถทำให้เกิดตำหนิได้จากกระบวนการผลิตตั้งแต่ การเตรียมวัตถุดิบ การหลอมวัตถุดิบ การขึ้นรูปกระจก และการตรวจสอบคุณภาพของกระจก



รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลจากกระบวนการผลิตกระจกโพลต์

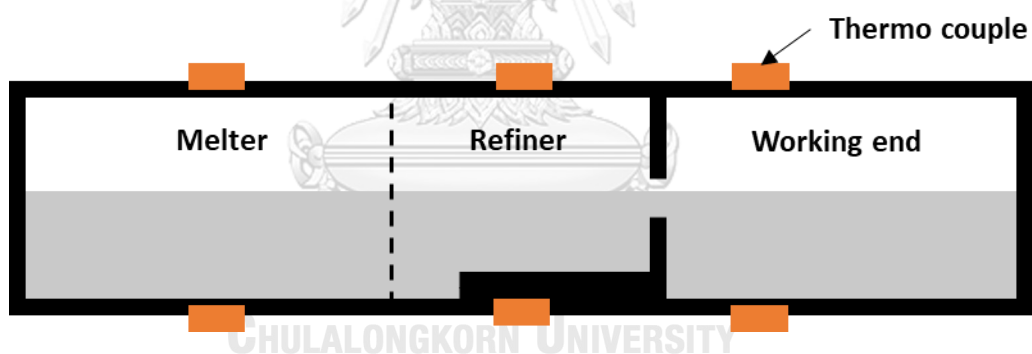
3.3.1 การเก็บข้อมูลการเตรียมวัตุดิบ

1. ทำการเก็บข้อมูลผลของกำลังการผลิตต่อการเกิดฟองอากาศและระยะเวลาในการไล่ฟองอากาศ
2. ทำการเก็บข้อมูลน้ำหนักวัตุดิบจากเครื่องชั่ง โดยจะนำน้ำหนักวัตุดิบก่อนและหลังผสมมาเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบว่าวัตุดิบที่เข้าไปในเตาหลอมมีปริมาณถูกต้องตามสูตรที่กำหนด



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งการเก็บข้อมูลน้ำหนักวัตถุดิบก่อนและหลังผสม

3.3.2 การเก็บข้อมูลในกระบวนการหลอมวัตถุดิบ

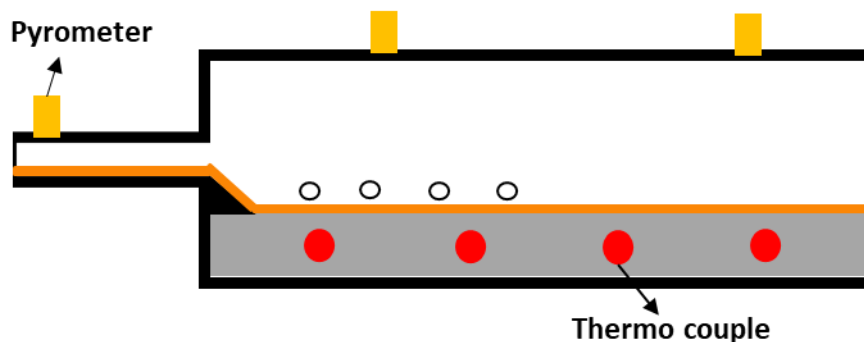


รูปที่ 3.3 บริเวณการวัดอุณหภูมิในเตาหลอม

ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในเตาหลอมที่วัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermo couple) ประเภท B ที่ทนอุณหภูมิสูงไว้ในอิฐทนไฟบริเวณพื้นเตาหลอมและหลังเตาหลอมที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเตาหลอม โดยจะทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในเตาหลอมทั้งหมด 3 ตำแหน่งได้แก่

1. บริเวณ Melter เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดการไล่ฟองอากาศและมีผลต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำแก้ว
2. บริเวณ Refiner เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดการดูดซึมของฟองอากาศขนาดเล็กสู่น้ำแก้ว
3. บริเวณ Working end เนื่องจากเป็นบริเวณที่ปรับสภาพน้ำแก้วให้เหมาะสมกับการขึ้นรูป

3.3.3 การเก็บข้อมูลในกระบวนการขึ้นรูปกระจก



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในการขึ้นรูปกระจก

ทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิในการขึ้นรูปบริเวณอ่างตีบุกซึ่งเป็นบริเวณที่อาจทำให้เกิดความเค้นสะสมในกระจกส่งผลให้เกิดการเป็ยงแสงได้ โดยทำการวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ประเภท B และไพโรมิเตอร์ (Pyrometer) ที่ตำแหน่งต่างๆ ได้แก่

1. อุณหภูมิน้ำแก้วบริเวณ Canal (ก่อนการขึ้นรูป)
2. อุณหภูมิน้ำแก้วขณะขึ้นรูป
3. อุณหภูมิน้ำตีบุกช่วงต้นของอ่างตีบุก

3.3.4 การเก็บข้อมูลตำหนิ

1. ปริมาณตำหนิ (จำนวนตำหนิต่อชั่วโมง)
2. ขนาดของตำหนิ แบ่งเป็น 10 ระดับจากเล็กไปใหญ่ โดยตามมาตรฐาน มอก. 1344 – 2541 ตำหนิขนาด DC 1 – DC4 เป็นขนาดที่ยอมรับได้ไม่กระทบกับคุณภาพกระจกและตำหนิ DC5 – DC10 เป็นขนาดที่ยอมรับไม่ได้จำเป็นต้องคัดทิ้งซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิต

- DC 1 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.2-0.49 มิลลิเมตร
- DC 2 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.5-0.69 มิลลิเมตร
- DC 3 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.7-0.99 มิลลิเมตร
- DC 4 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1-1.29 มิลลิเมตร
- DC 5 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.3-1.59 มิลลิเมตร
- DC 6 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1.6-1.99 มิลลิเมตร
- DC 7 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2-4.9 มิลลิเมตร

- DC 8 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5-19.9 มิลลิเมตร
- DC 9 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20-39 มิลลิเมตร
- DC 10 เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 40 มิลลิเมตรขึ้นไป

3. ตำแหน่งของตำหนิในกระจก

3.3.5 องค์ประกอบทางเคมีของกระจกด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโคปี

(XRF)

ตัวอย่างกระจกจะถูกเก็บโดยตรงจากกระบวนการผลิตโดยนำมาตัดให้มีขนาดกว้าง 5 เซนติเมตรและยาว 5 เซนติเมตรและนำไปขัดผิวกระจกให้เรียบ โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโคปีของ Bruker รุ่น S8 tiger series 2 โดยเน้นไปที่ออกไซด์ดังนี้

SiO_2 เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักของกระจกและมีผลต่อความหนาแน่นของซึ่งอาจส่งผลต่อค่าดัชนีหักเหทำให้เกิดริม

Fe_2O_3 เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดสีของกระจกซึ่งหากมีปริมาณไม่สม่ำเสมออาจทำให้เกิดริม

SO_3 เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่มาจาก fining gas มีผลต่อการไล่ฟองอากาศ

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย

นำข้อมูลที่รวบรวมมาหาความสัมพันธ์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายโดยจับคู่ตัวแปรจากกระบวนการผลิตซึ่งเป็นตัวแปรอิสระและปริมาณตำหนิที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นตัวแปรตาม โดยใช้แผนภาพการกระจายในการหาความสัมพันธ์ของตัวแปร ใช้วิธีกำลังสองที่น้อยที่สุดในการหาสมการการถดถอยเพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์เชิงเส้นของตัวแปรและใช้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจในการหาอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีผลต่อตัวแปรตาม

บทที่ 4

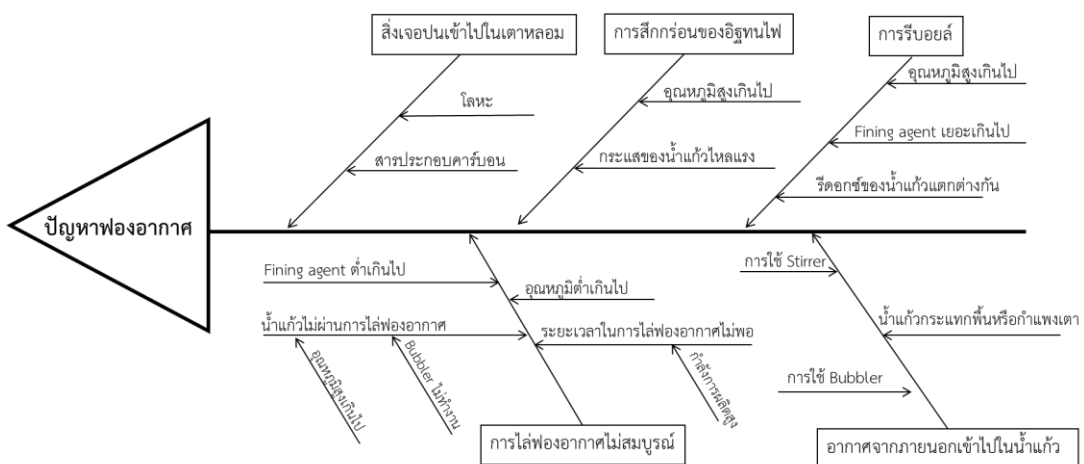
ผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผล

4.1 ตำนานชนิดฟองอากาศ

4.1.1 วิเคราะห์การเกิดตำนานชนิดฟองอากาศ

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาการเกิดตำนานชนิดฟองอากาศโดยใช้แผนภูมิแกงปลา ดังรูปที่ 4.1 พบว่ามีสาเหตุหลักด้วยกันทั้งหมด 5 สาเหตุได้แก่

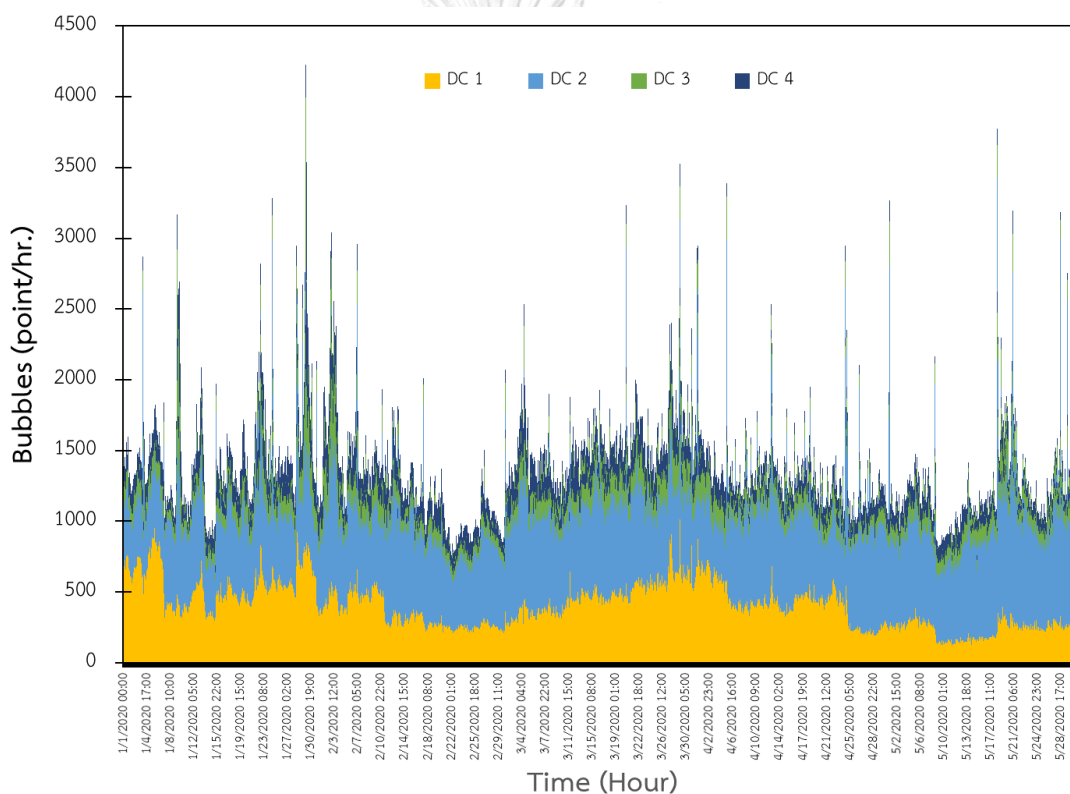
1. สิ่งเจือปนที่มากับวัตถุดิบ ได้แก่ โลหะหรือสารประกอบคาร์บอน
2. การสีกกร่อนของอิฐทนไฟ เกิดได้จากอุณหภูมิของเตาหลอมสูงเกินไปหรือการกัดกร่อนบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลแรง
3. การรีบอยล์ (reboil) เกิดได้จากการที่อุณหภูมิบริเวณ refining สูงเกินไป fining agent เยอะเกินไปและรีดอกซ์ของน้ำแก้วเก่าและใหม่แตกต่างกัน
4. การกวนน้ำแก้ว เกิดจากการที่น้ำแก้วกระแทกที่ก้นน้ำแก้วหรือกำแพงเตาหรือการใช้ stirrer ในการกวนน้ำแก้วทำให้อากาศเข้าไปสู่น้ำแก้ว
5. การไล่ฟองอากาศไม่สมบูรณ์ เกิดจากการที่อุณหภูมิในการไล่ฟองอากาศต่ำเกินไป ระยะเวลาในการไล่ฟองอากาศไม่เพียงพอ fining agent ต่ำเกินไปหรือน้ำแก้วไม่ผ่านการไล่ฟองอากาศ



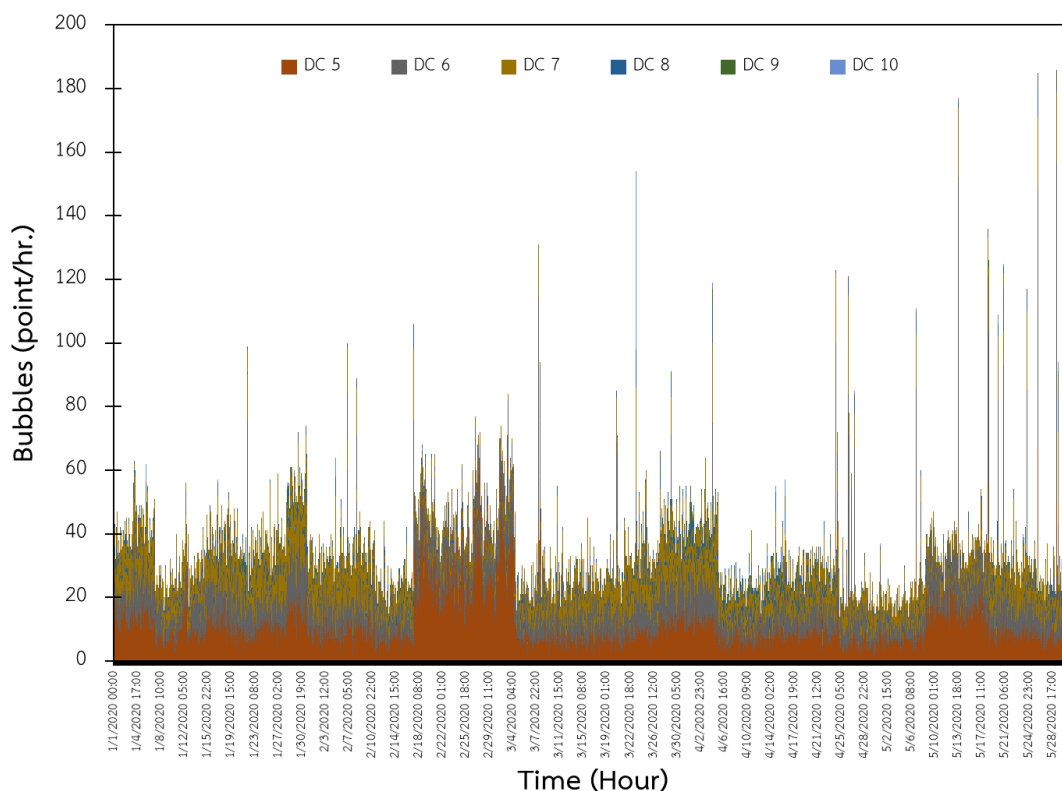
รูปที่ 4.1 แผนภูมิแกงปลาแสดงการเกิดปัญหาฟองอากาศ

4.1.2 ข้อมูลปริมาณ ขนาดและตำแหน่งของฟองอากาศ

จากการเก็บข้อมูลปริมาณฟองอากาศที่เกิดขึ้นทุกๆ 1 ชั่วโมงในกระบวนการผลิตกระจกใสในปี 2563 ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง เดือนพฤษภาคม โดยเป็น 2 กลุ่มคือกลุ่มฟองอากาศขนาดเล็กที่ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพกระจก (DC 1 – DC 4) และกลุ่มฟองอากาศขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อคุณภาพกระจก (DC 5 – DC 10) โดยฟองอากาศขนาดเล็กจะมีปริมาณมากประมาณ 1,300 ฟองต่อชั่วโมง ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นฟองอากาศขนาด DC 1 และ DC 2 อยู่ที่ 440 และ 650 ฟองต่อชั่วโมงตามลำดับซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 และฟองอากาศขนาดใหญ่มีปริมาณฟองอากาศอยู่ประมาณ 30 ฟองต่อชั่วโมง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นฟองอากาศขนาด DC 5 อยู่ที่ประมาณ 15 ฟองต่อชั่วโมงแสดงดังรูปที่ 4.3



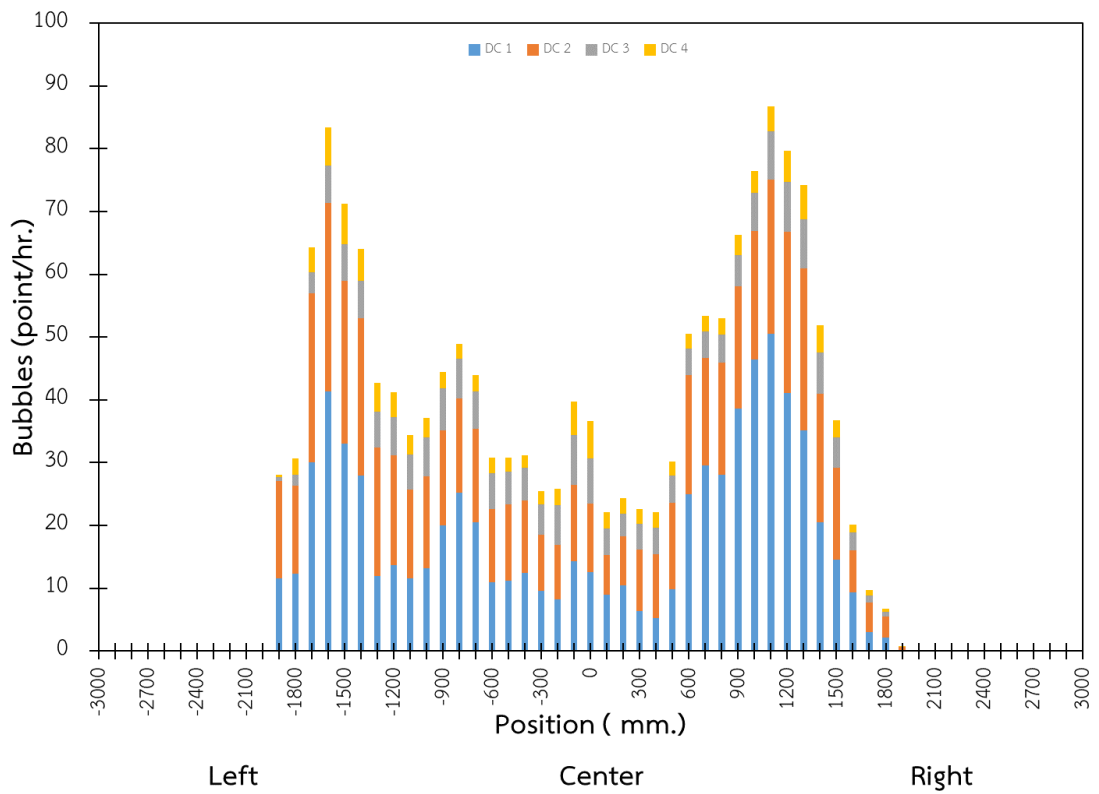
รูปที่ 4.2 ปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กต่อชั่วโมง



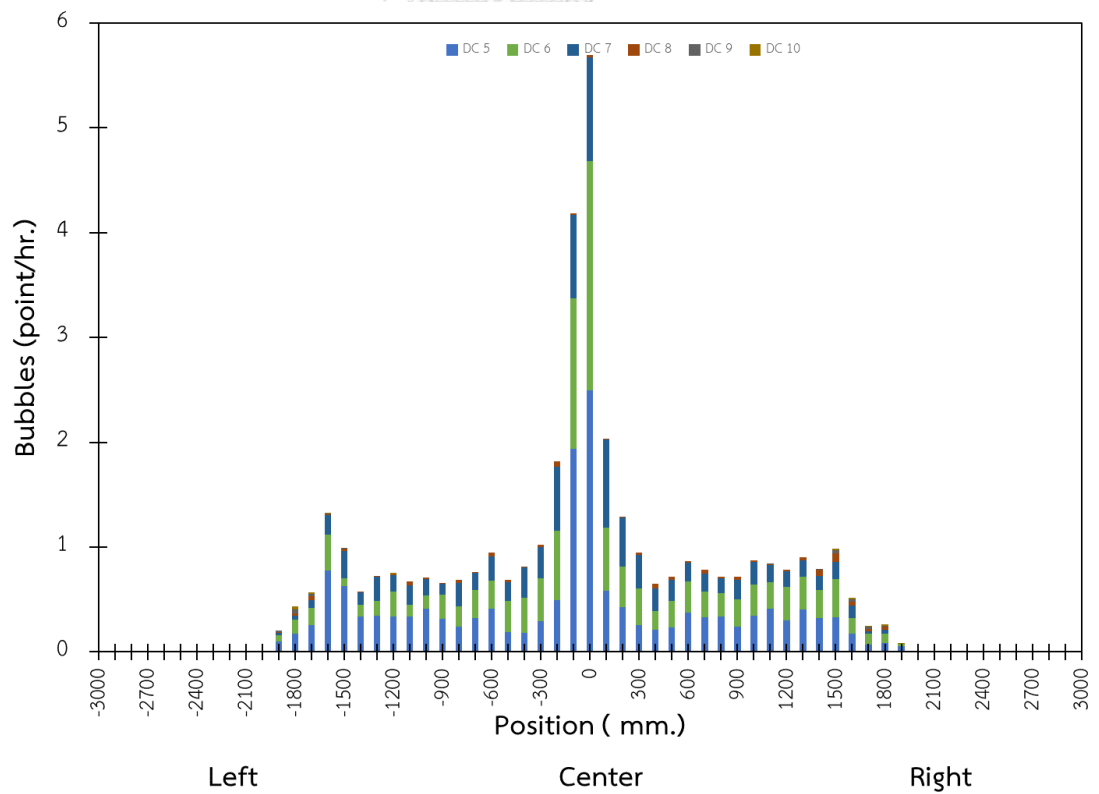
รูปที่ 4.3 ปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่ต่อชั่วโมง

จากการเก็บข้อมูลตำแหน่งของฟองอากาศในกระจกพบว่าพบฟองอากาศขนาดเล็กบริเวณขอบด้านซ้ายและขวาเป็นส่วนใหญ่แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4 ตำแหน่งฟองอากาศขนาดเล็กในกระจกซึ่งอาจมาจากการกักความร้อนของอิฐทนไฟที่อยู่บริเวณใต้ข้างของเตาหลอมทำให้อากาศที่อยู่ในรูปพุ่งออกมาและฟองอากาศขนาดใหญ่จะไหลไปรวมตัวอยู่ตรงกลางเนื่องจากการไหลของน้ำแก้ว

ฟองอากาศขนาดใหญ่มักจะถูกพบที่บริเวณตรงกลางของกระจกแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.5 อาจเกิดจากการที่กระแสน้ำแก้วด้านบนบนเตาหลอมจะไหลเข้าสู่ตรงกลางของเตาหลอมทำให้ฟองอากาศขนาดใหญ่ที่ลอยอยู่ด้านบนแต่ยังไม่พ้นผิวน้ำแก้วไหลเข้ามาอยู่ตรงกลางของเตาหลอม รูปที่ 4.5 ตำแหน่งฟองอากาศขนาดใหญ่ในกระจก



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งฟองอากาศขนาดเล็กในกระจก

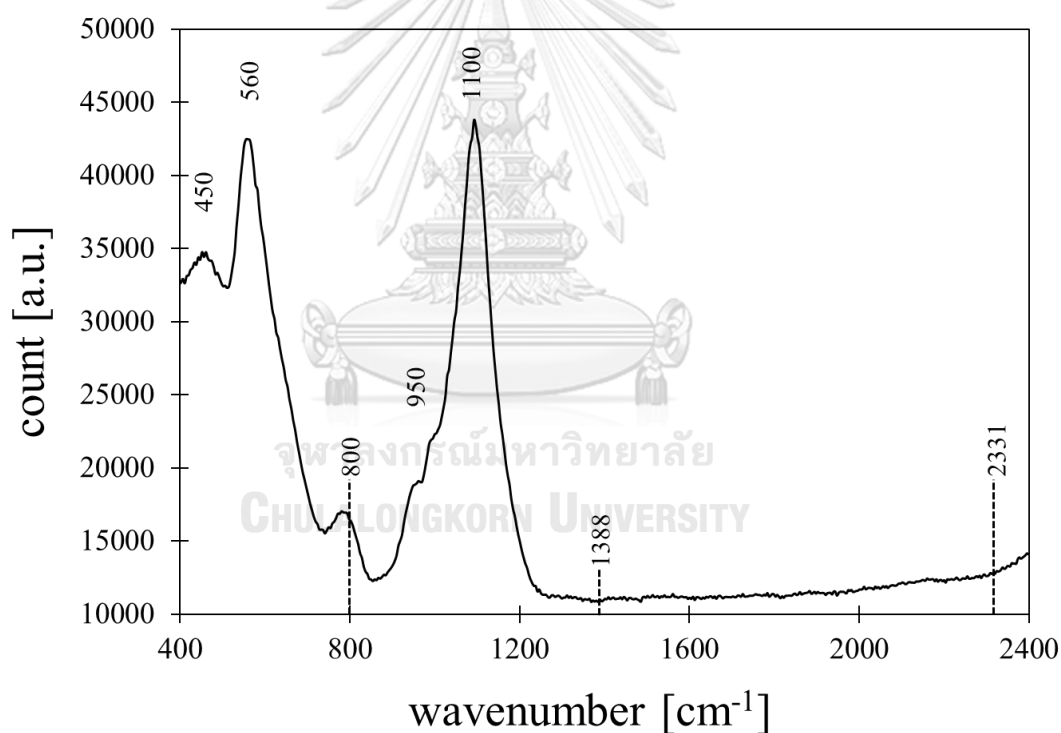


รูปที่ 4.5 ตำแหน่งฟองอากาศขนาดใหญ่ในกระจก

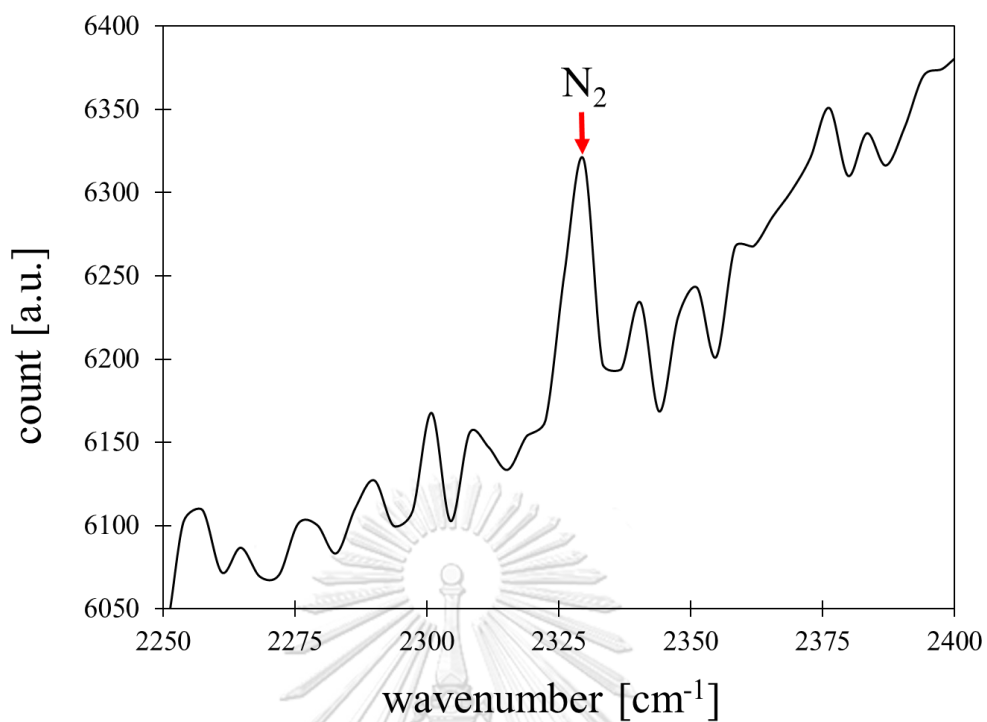
4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตำหนักนิตฟองอากาศ

4.1.3.1 การวิเคราะห์ตำหนักนิตฟองอากาศด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี

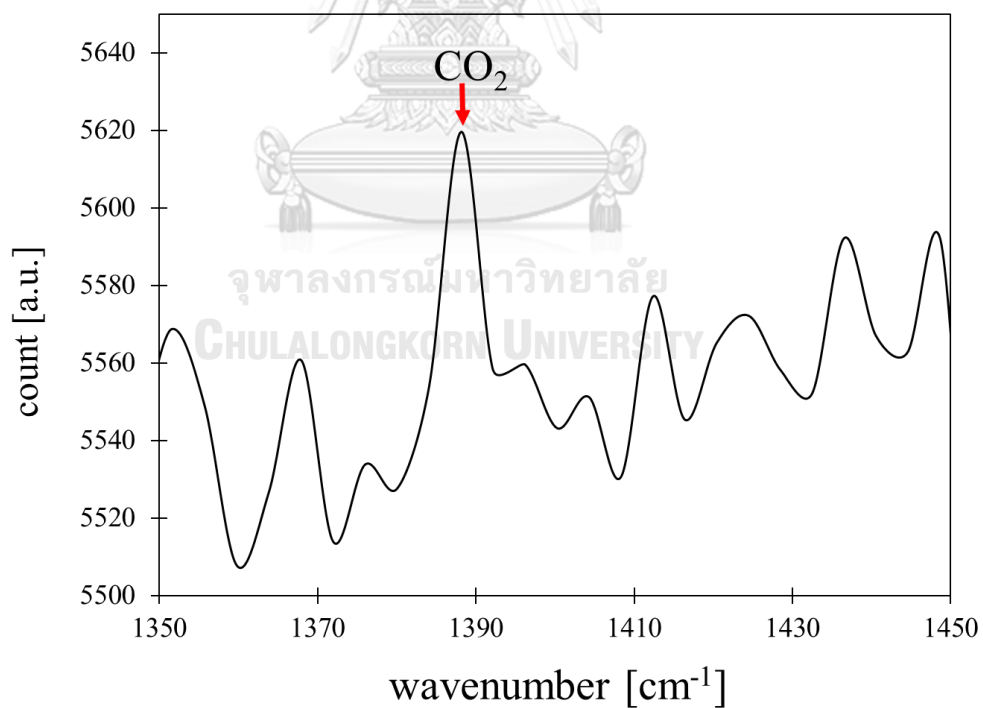
จากการวิเคราะห์ฟองอากาศในกระจกโชดาไลม์ด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโคปีพบพิครามานสเปกตรัมของแก้วโชดาไลม์ที่เลขคลื่น 450 560 950 และ 1100 cm^{-1} เปรียบเทียบกับงานวิจัยของ M. Wang [12] ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.6 และพบพิคของ CO_2 และ N_2 ที่เลขคลื่น 1388 และ 2331 cm^{-1} ตามลำดับเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ S. Pedeche [8] แต่พิคของ CO_2 และ N_2 ที่พบจะมีความเข้มของพิคที่ต่ำเนื่องจากปริมาตรของฟองอากาศที่เล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 ตามลำดับ โดย CO_2 และ N_2 เป็นแก๊สที่พบในอากาศซึ่งมาจากการเผาไหม้บรรยากาศภายในเตาหลอมหรืออากาศภายนอกเข้าไปในน้ำแก้ว



รูปที่ 4.6 รามานสเปกตรัมของฟองอากาศในแก้วโชดาไลม์



รูปที่ 4.7 รามานสเปกตรัมของ N₂ ในแก้วโซดาไลม์



รูปที่ 4.8 รามานสเปกตรัมของ CO₂ ในแก้วโซดาไลม์

4.1.3.2 การวิเคราะห์ตำหนักชนิดฟองอากาศด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตำหนักชนิดฟองอากาศในกระจกด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรีแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยสามารถแบ่งกลุ่มตามองค์ประกอบทางเคมีได้ 4 กลุ่ม ได้แก่ 1. ฟองอากาศที่มีปริมาณ CO_2 ที่สูงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ 2. ฟองอากาศที่มีปริมาณ N_2 สูงประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์และมี CO_2 ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ 3. ฟองอากาศที่มีปริมาณ CO_2 ที่ค่อนข้างต่ำประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 4. ฟองอากาศที่มีปริมาณ CO_2 ประมาณ 30 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ โดยสาเหตุการเกิดฟองอากาศแต่ละกลุ่มได้แก่

1. ฟองอากาศที่มีปริมาณ CO_2 ที่ค่อนข้างสูงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ได้แก่ตัวอย่างที่ 1 และ 2 ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์หรือสารประกอบคาร์บอนเข้าไปในเตาหลอมแล้วเกิดการเผาไหม้อาจมาจากวัตถุดิบหรือฝุ่นจากอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้

2. ฟองอากาศที่มีปริมาณ N_2 และ CO_2 ประมาณ 80 และ 20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับได้แก่ตัวอย่างที่ 3 4 และ 5 ซึ่งเกิดจากอากาศที่มาจากการกักความร้อนหรือรุกรุนของอิฐทนไฟในบริเวณที่อุณหภูมิค่อนข้างสูงคือบริเวณ melter หรือ refiner

3. ฟองอากาศที่มีปริมาณ CO_2 ค่อนข้างต่ำได้แก่ตัวอย่างที่ 6 – 11 ซึ่งบ่งบอกถึงระยะเวลาที่อยู่ในเตาหลอมที่สั้นเกิดขึ้นบริเวณท้ายของเตาที่มีอุณหภูมิค่อนข้างต่ำคือบริเวณ working end อาจเกิดจากการที่มีการกวนน้ำแก้วทำให้อากาศเข้าไปในน้ำแก้ว น้ำแก้วระเหยบริเวณชั้นหรือกำแพงของเตาทำให้อากาศเข้าไปในน้ำแก้วหรือมีอิฐทนไฟมีรอยแตกทำให้อากาศภายนอกเข้าไปในน้ำแก้ว

4. ซึ่งฟองอากาศมีปริมาณ CO_2 ประมาณ 30 – 70 เปอร์เซ็นต์ได้แก่ตัวอย่างที่ 12 – 19 ซึ่งเกิดจากกระบวนการหลอมวัตถุดิบที่เหลืออยู่ในน้ำแก้วเนื่องจากการไล่ฟองอากาศที่ไม่สมบูรณ์ ปริมาณ CO_2 จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาของฟองอากาศในเตาหลอม โดยฟองอากาศกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่พบเยอะที่สุด

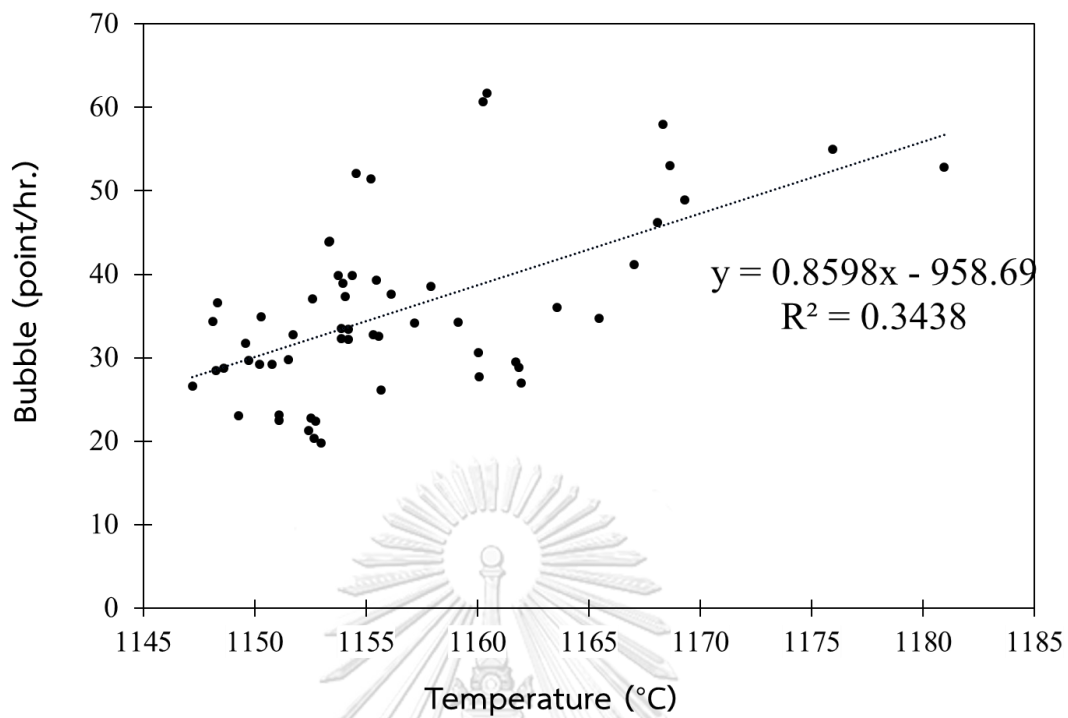
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของฟองอากาศในกระจก

Sample No.	Dimension [mm]			D.EQ [mm]	Volume [ml]	p [kPa]	Gas composition [vol.%]									
	a	b	c				N ₂	CO ₂	O ₂	Ar	SO ₂	H ₂ S	COS	CO	CH ₄	H ₂
1	1.68	1.13	1.17	1.3	0.00116	24	7.2	91.7	-	-	1.1	-	-	-	-	-
2	2.55	1.5	1.53	1.8	0.00306	30	11.3	86.4	-	0.1	2.2	-	-	-	-	-
3	2.4	1.17	1.05	1.43	0.00154	23	77.7	20.6	-	0.8	-	-	-	-	-	-
4	0.38	0.28	0.28	0.31	0.0000156	26.5	80.4	18.8	-	0.6	-	0.1	0.1	-	-	-
5	0.1	0.1	0.1	0.1	5.24E-07	3.5	84.8	15.2	-	-	-	-	-	-	-	-
6	1.48	0.85	0.82	1.01	0.00054	20.5	86.1	11.8	-	1.2	0.9	-	-	-	-	-
7	0.62	0.43	0.45	0.49	0.0000628	27.5	88.7	9.6	-	1	-	0.7	-	-	-	-
8	3.2	1.78	1.83	2.18	0.00546	22.5	87	9.3	-	1.1	-	0.7	-	-	-	-
9	2.19	1.07	1.12	1.38	0.0017	25	92.2	5.3	-	1	1.5	-	-	-	-	-
10	1.75	1	0.92	1.17	0.000843	27	93.5	4.5	-	1	1	-	-	-	-	-
11	1.69	0.9	0.9	1.11	0.000717	24.5	96	2.3	-	0.9	0.8	-	-	-	-	-
12	0.35	0.25	0.23	0.27	0.0000103	26.5	34.3	64.8	-	0.4	-	0.1	0.4	-	-	-
13	0.45	0.27	0.28	0.32	0.0000178	27	35.9	63	-	0.3	-	0.2	0.6	-	-	-
14	0.42	0.33	0.33	0.36	0.0000239	26.5	38.4	60.2	-	0.4	-	0.4	0.6	-	-	-
15	5.32	2.66	2.12	3.11	0.0157	21.5	41.9	54.2	-	0.5	3.4	-	-	-	-	-
16	1.4	0.83	0.73	0.95	0.000444	25	53.6	44.7	-	0.6	1.1	-	-	-	-	-
17	3.42	1.66	1.6	2.09	0.00476	19	60.2	36.2	-	0.6	3	-	-	-	-	-
18	0.27	0.18	0.18	0.21	4.58E-06	18	68.7	30.5	-	0.5	-	-	0.3	-	-	-
19	0.11	0.08	0.08	0.09	0.0000369	6	68.8	31.2	-	-	-	-	-	-	-	-

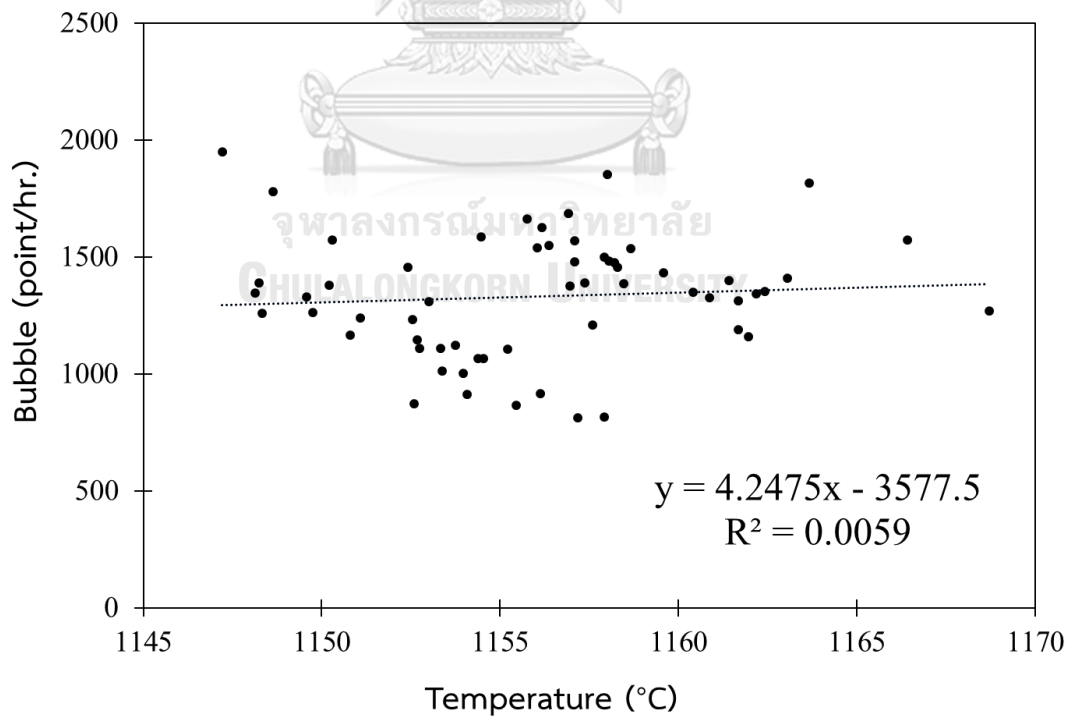
4.1.4 การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย

4.1.4.1 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและอุณหภูมิ บริเวณ melter

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและอุณหภูมิด้านใต้เตาหลอม บริเวณ melter พบว่าฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter สูงขึ้นแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.9 เนื่องมาจากการอุณหภูมิต่ำที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดของน้ำแก้วลดลง ซึ่งควรจะช่วยให้มีฟองอากาศน้อยลงแต่อุณหภูมิต่ำที่สูงขึ้นยังส่งผลต่อการไหลของน้ำแก้ว เมื่อน้ำแก้ว ไหลเร็วขึ้นทำให้ระยะเวลาในการไล่ฟองอากาศจึงน้อยลงส่งผลให้ฟองอากาศเพิ่มขึ้นหรือเกิดจากการใช้อัตราการปล่อยฟองอากาศของ Bubbler ในเตาหลอมที่สูงขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิด้านใต้ร้อนขึ้นและฟองอากาศจาก Bubbler ค้างอยู่ในแก้ว แต่ในขณะเดียวกันอุณหภูมิน้ำแก้วบริเวณ melter ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.10 โดยช่วงอุณหภูมิต่ำที่พบปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่ที่น้อยที่สุดคือ 1145 ถึง 1150 องศาเซลเซียส

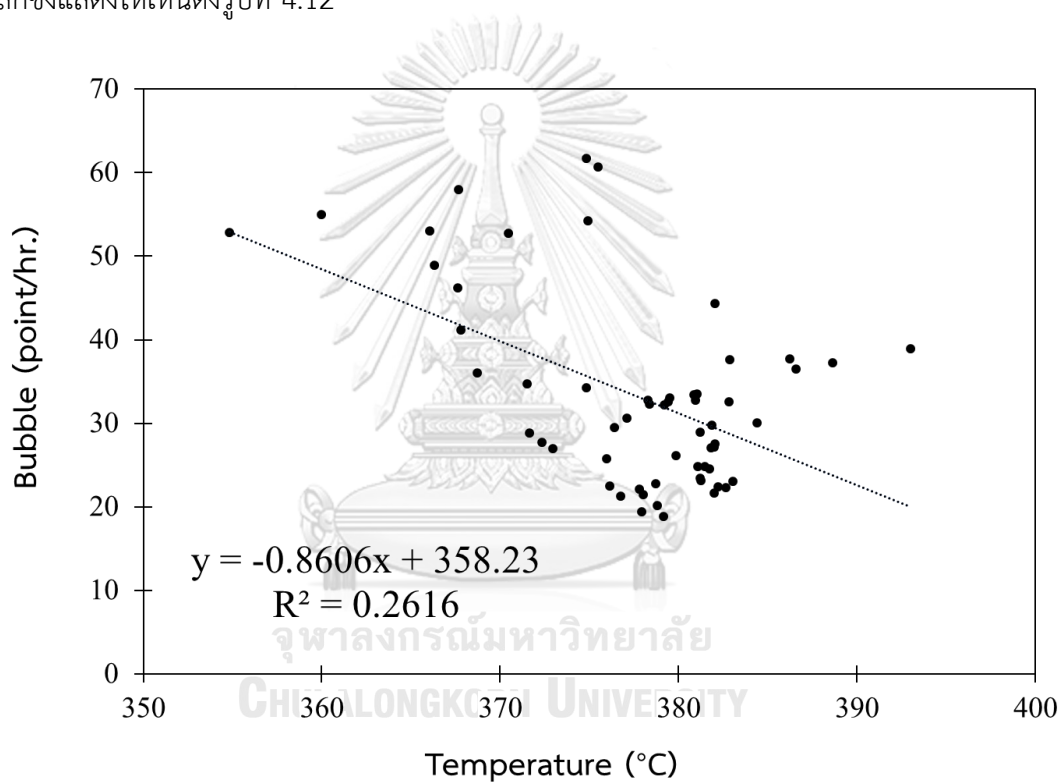


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter

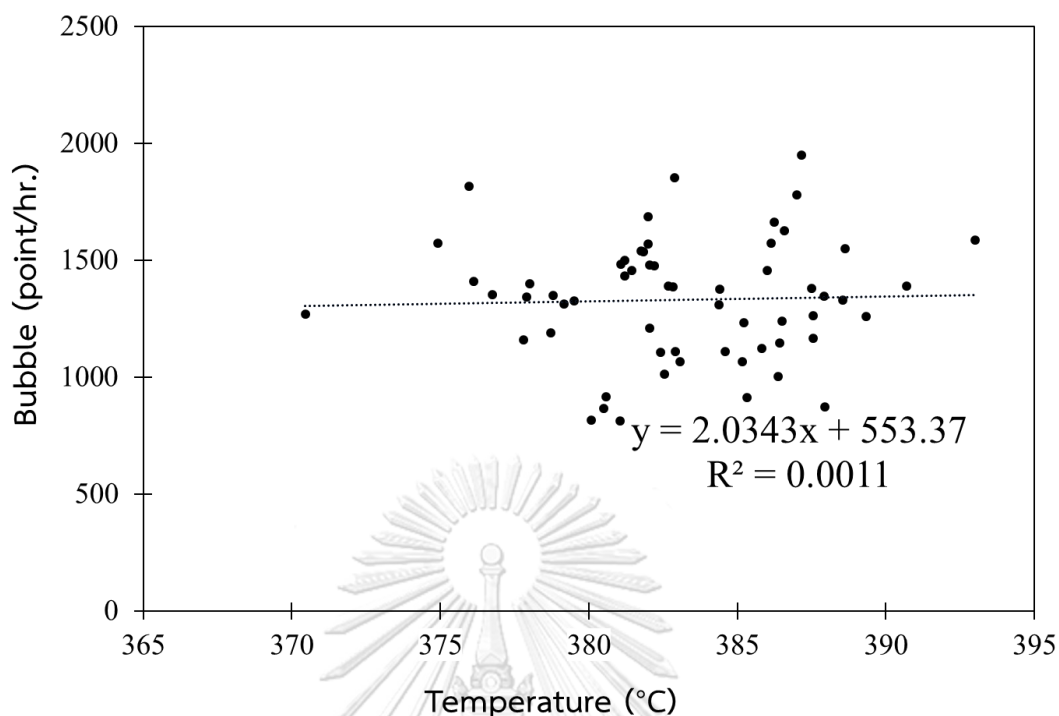


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและความแตกต่างของอุณหภูมิ ด้านบนและด้านล่างบริเวณ melter พบว่าฟองอากาศขนาดใหญ่จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิลดลงดังรูปที่ 4.11 เนื่องมาจากอัตราการปล่อยฟองอากาศของ Bubbler ที่สูงขึ้นจะทำให้ความร้อนด้านบนของเตาหลอมเกิดการแลกเปลี่ยนกับด้านใต้ส่งผลให้อุณหภูมิเตาหลอมด้านบนลดลงและอุณหภูมิเตาหลอมด้านใต้เพิ่มขึ้นทำให้ความต่างของอุณหภูมิลดลง โดยฟองอากาศจาก Bubbler ที่ค้างอยู่ในน้ำแก้วทำให้ปริมาณฟองอากาศเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างบริเวณ melter ไม่มีความสัมพันธ์กันกับปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.12



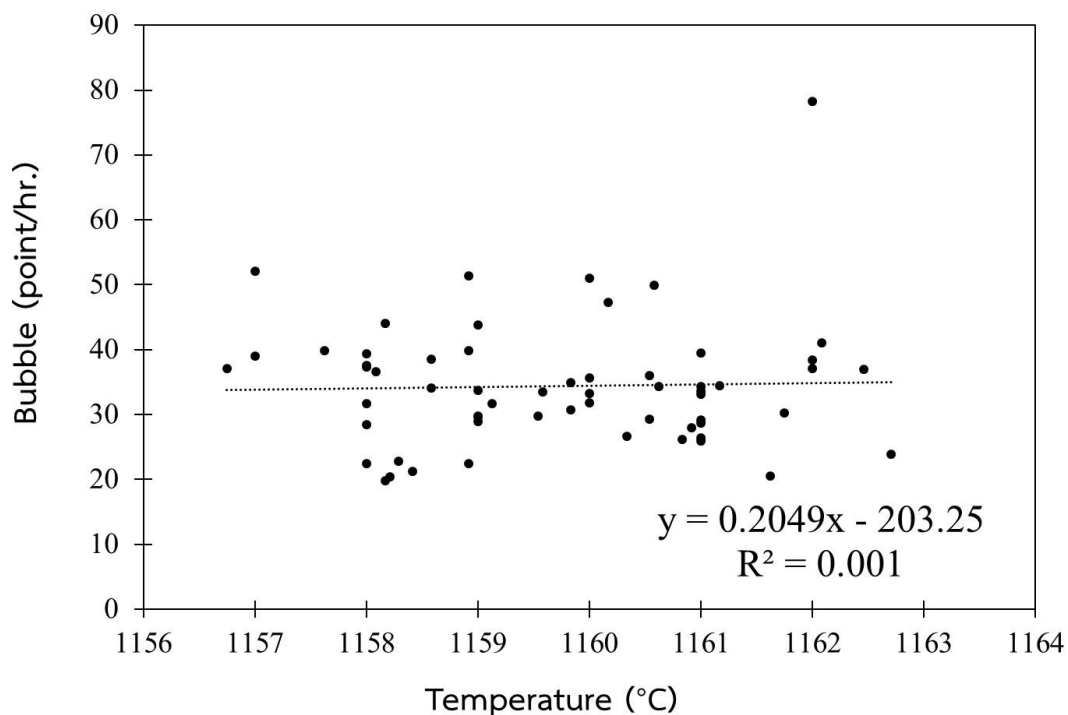
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างบริเวณ melter



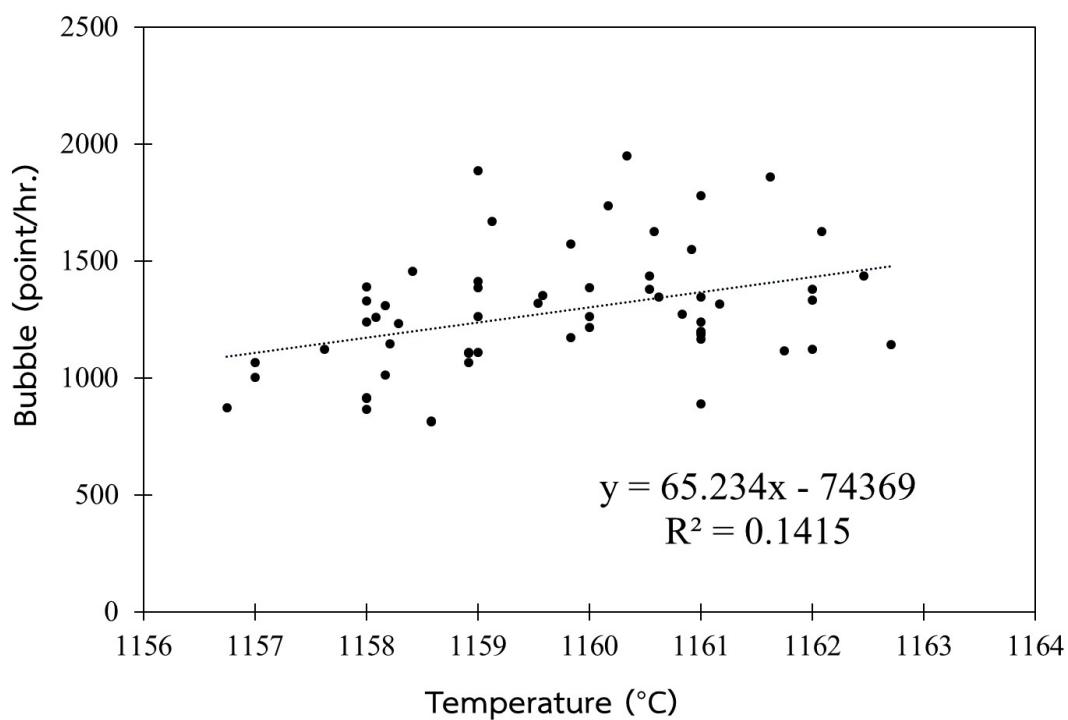
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างบริเวณ melter

4.4.1.2 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและอุณหภูมิบริเวณ refiner

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและอุณหภูมิบริเวณ refiner พบว่าฟองอากาศขนาดใหญ่ไม่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิด้านบนใต้บริเวณ refiner ดังรูปที่ 4.13 เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับบริเวณ melter ซึ่งไม่มีผลต่อการไล่ฟองอากาศจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่ ในขณะที่ฟองอากาศขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิด้านบนใต้บริเวณ refiner สูงขึ้นดังรูปที่ 4.14 เนื่องมาจากเป็น refiner เป็นบริเวณที่ฟองอากาศขนาดเล็กจะถูกดูดซึมไปในน้ำแก้วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ฟองอากาศถูกดูดซึมได้ยากขึ้นหรือเกิดจากการที่อิฐทนไฟบริเวณ refiner เกิดการกักร้อนทำให้อากาศที่อยู่ในรูพรุนของอิฐทนไฟออกมา โดยช่วงอุณหภูมิที่พบปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กน้อยที่สุดคือ 1155 ถึง 1160 องศาเซลเซียส

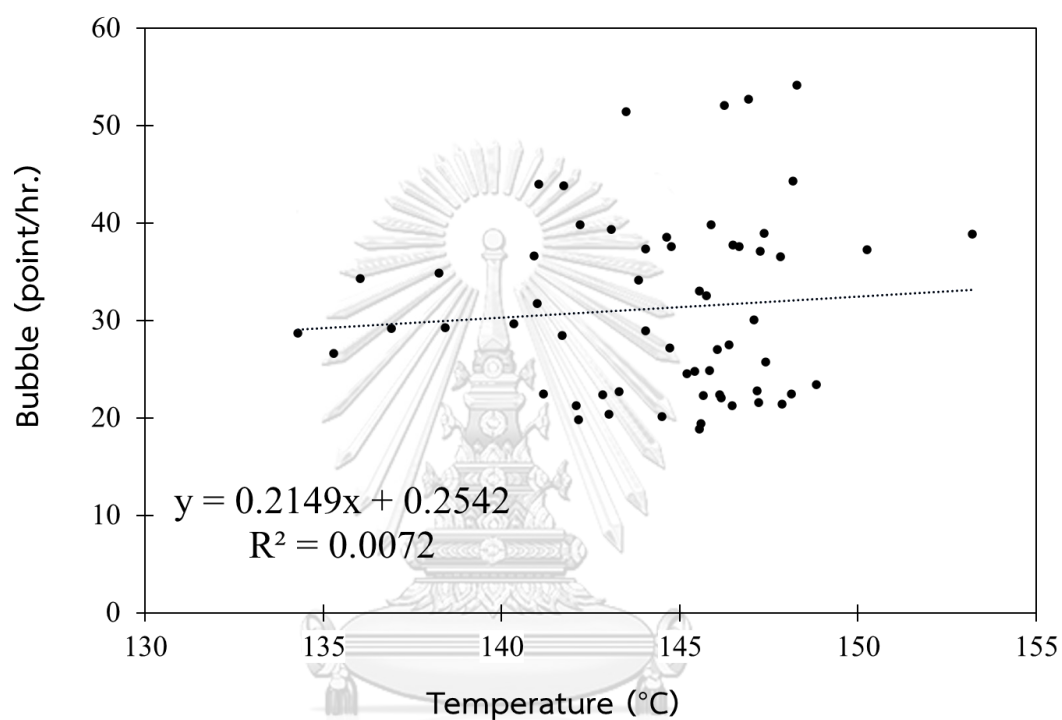


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ refiner

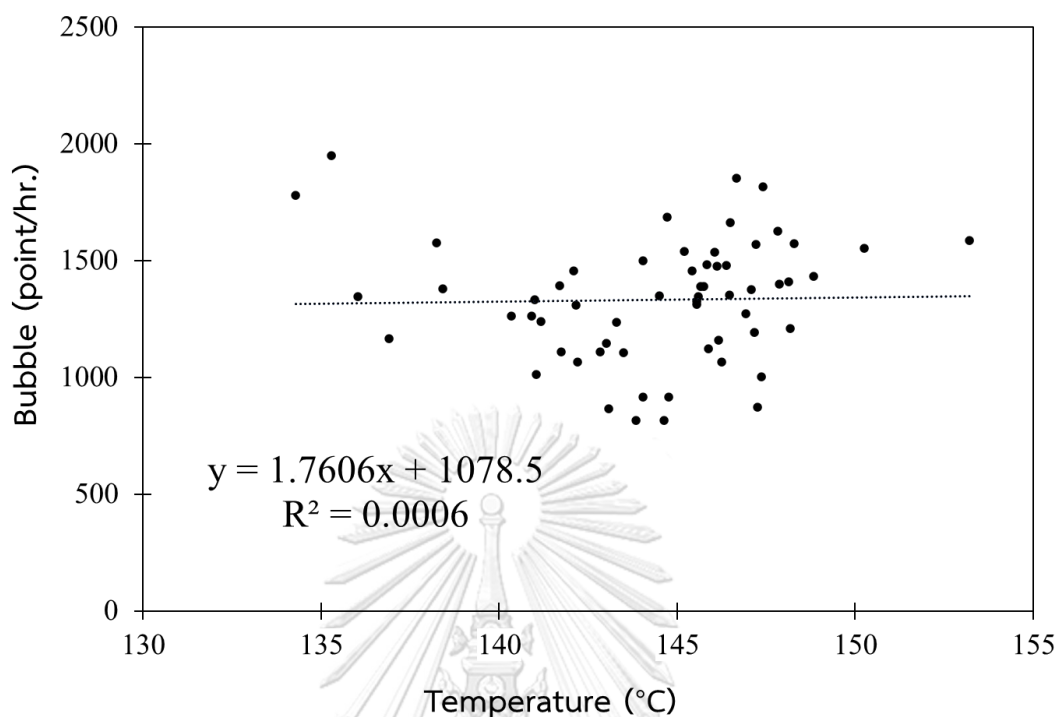


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ refiner

จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและความแตกต่างของอุณหภูมิ ด้านบนและด้านล่างบริเวณ refiner พบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างบริเวณ refiner ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณฟองอากาศทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 ตามลำดับ



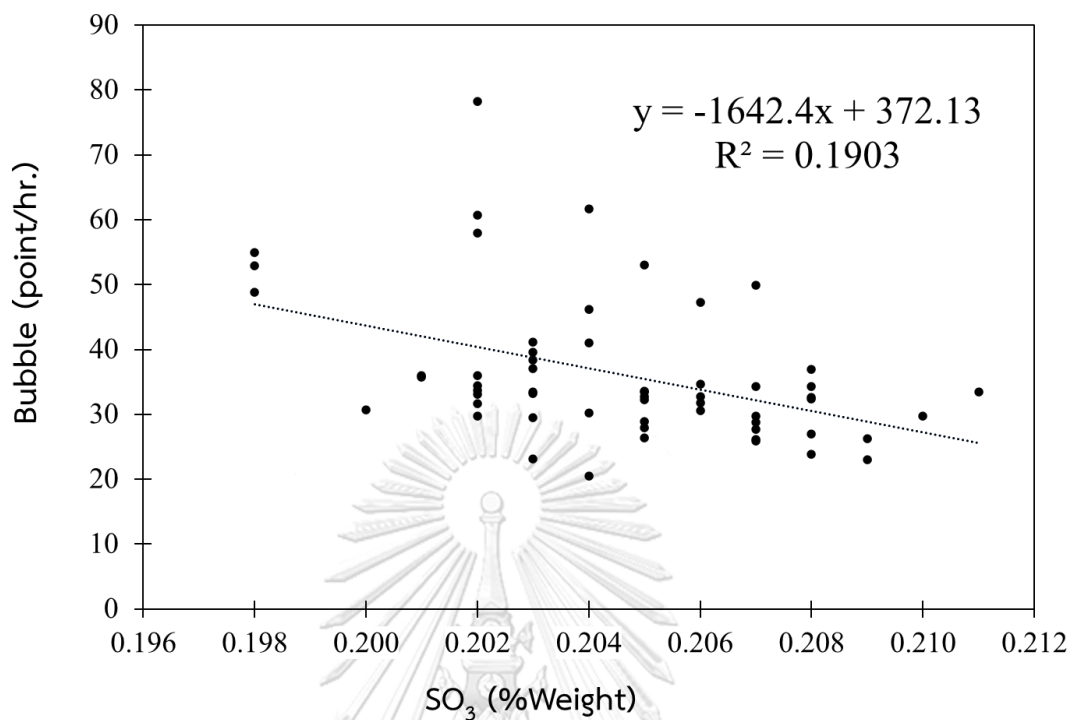
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างบริเวณ refiner



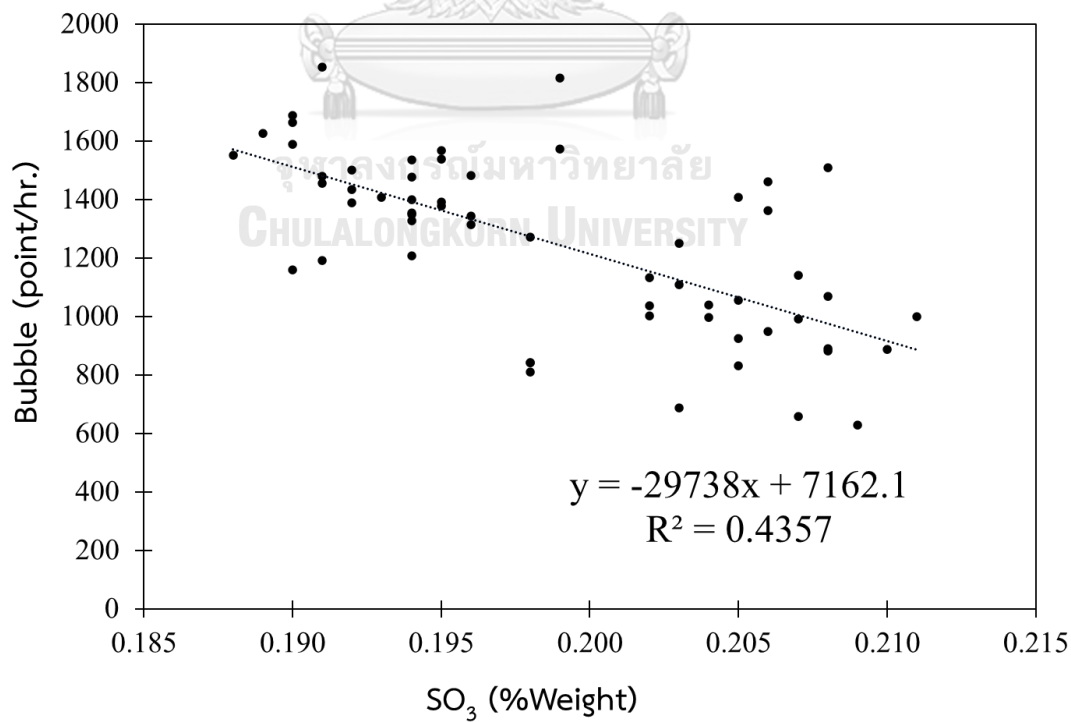
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างบริเวณ refiner

4.4.1.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและปริมาณ SO_3 ในกระจก

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและปริมาณ SO_3 ในกระจกพบว่า ฟองอากาศทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก มีปริมาณน้อยลงเมื่อปริมาณ SO_3 ในกระจกเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณ SO_3 บ่งบอกถึงปริมาณซอลต์เค้กที่ใช้เป็น fining agent ซึ่งช่วยให้ฟองอากาศขยายตัว นอกจากนี้ยังช่วยลดความหนืดของน้ำแก้ว ช่วยให้ฟองอากาศลอยตัวได้ไวขึ้น ช่วยให้การไล่ฟองอากาศมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ฟองอากาศที่เกิดจาก fining agent นั้นคือแก๊ส SO_2 ที่มีขนาดเล็กไม่สามารถไล่ออกไปหมด จะถูกดูดซึมเข้าสู่ น้ำแก้วได้ง่าย ทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กลดลง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และปริมาณ SO_3 ในกระจก

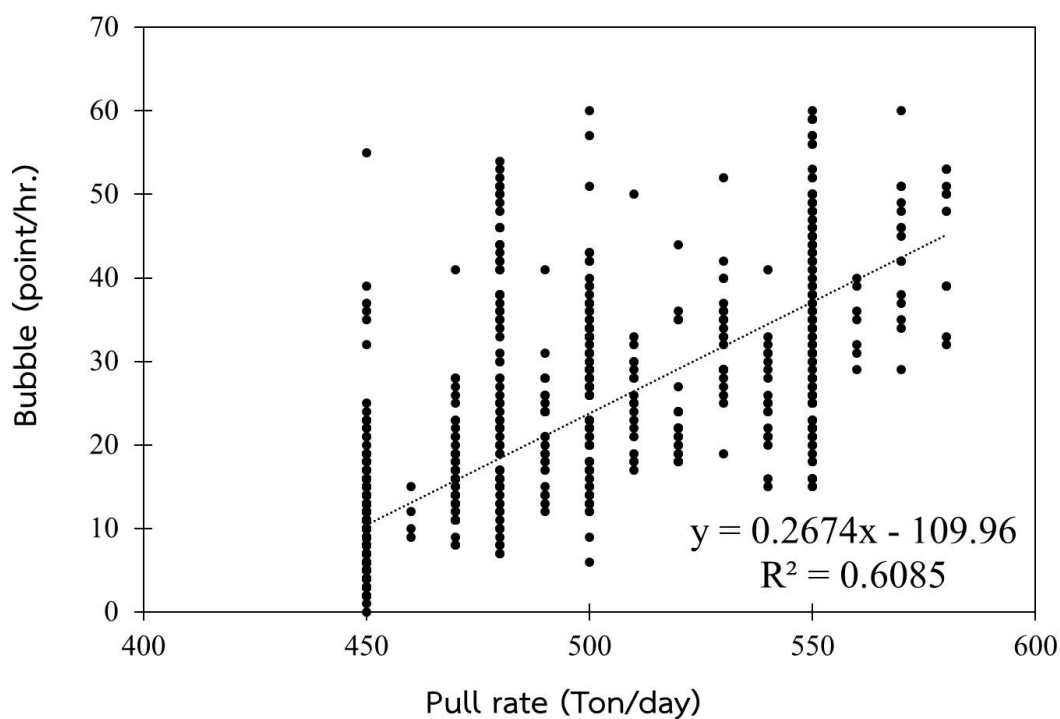


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและปริมาณ SO_3 ในกระจก

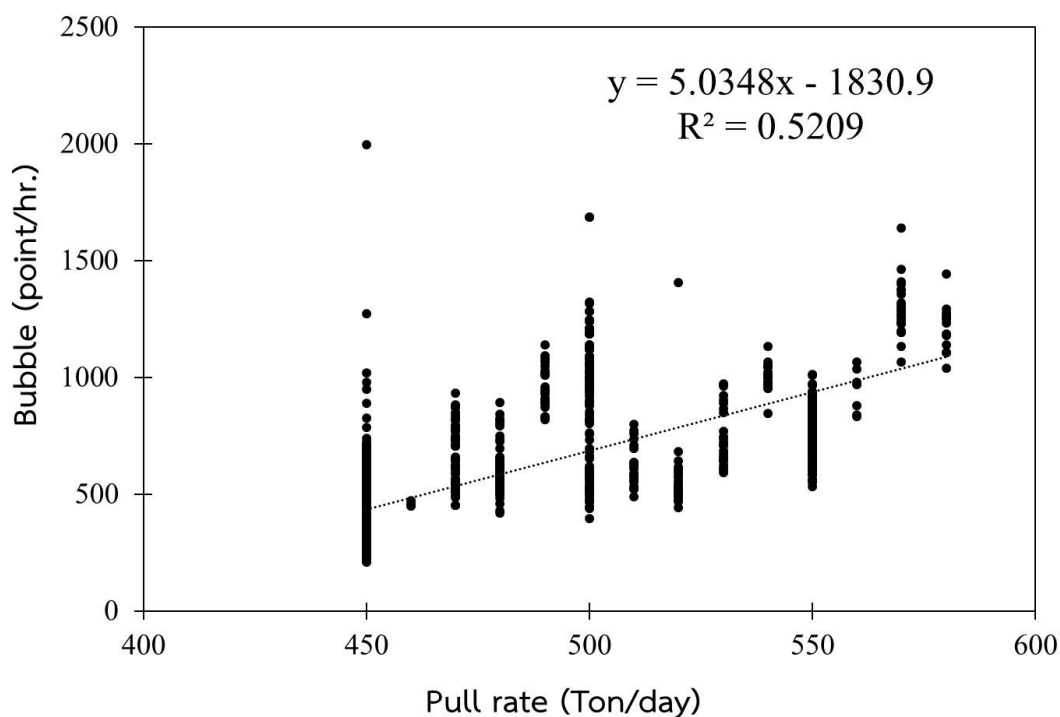
4.4.1.4 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและกำลังการผลิต

ผลิต

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศและกำลังการผลิตพบว่า ปริมาณฟองอากาศทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กมีปริมาณลดลงเมื่อกำลังการผลิตลดลงดังรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 ตามลำดับ เนื่องจากการลดกำลังการผลิตลงทำให้ระยะเวลาในการไล่ฟองอากาศเพิ่มขึ้นทำให้ฟองอากาศขนาดใหญ่มีปริมาณลดลงและทำให้ระยะเวลาในการที่ฟองอากาศขนาดเล็กถูกดูดซึมได้นานขึ้นทำให้ฟองอากาศขนาดเล็กมีปริมาณลดลง



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และกำลังการผลิต



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กและกำลังการผลิต

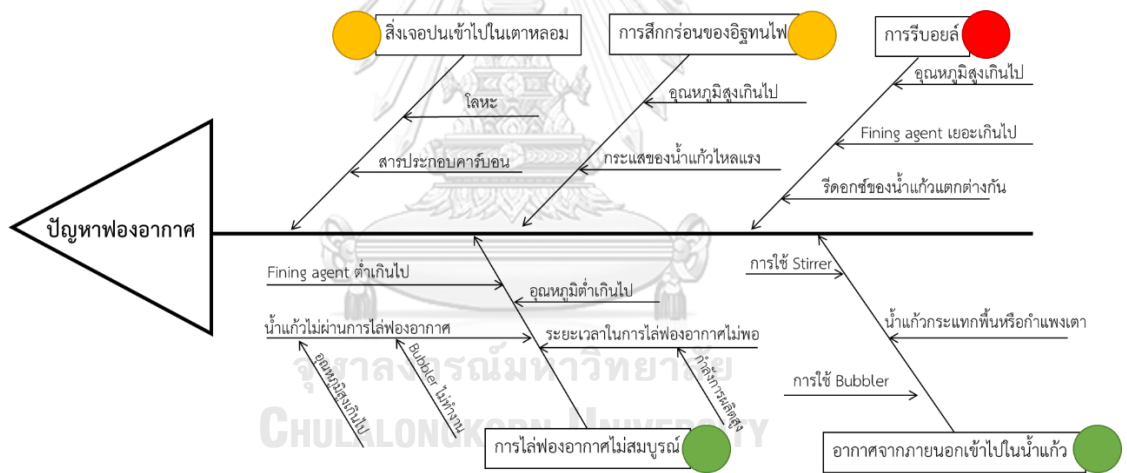
จากผลการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีของแก๊สในฟองอากาศทั้ง 19 ตัวอย่างด้วยเทคนิคแมสสเปกโตรเมตรีดังตารางที่ 4.1 พบว่าสาเหตุหลักของการเกิดฟองอากาศ คือการไล่ฟองอากาศไม่สมบูรณ์ และอากาศจากภายนอกเข้าไปในน้ำแก้วซึ่งเป็นปริมาณมาก ส่วนสาเหตุรองคือการกัดกร่อนของอิฐทนไฟและมีสิ่งเจือปนเข้าไปในเตาหลอมซึ่งพบในปริมาณที่น้อย และไม่พบฟองอากาศที่เกิดจากการรบกวนแสดงดังรูปที่ 4.21

จากการหาความสัมพันธ์ของปริมาณฟองอากาศและตัวแปรจากระบวนการผลิตด้วยการวิเคราะห์การถดถอยพบว่าอุณหภูมิบริเวณ melter ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นซึ่งเกิดจากอัตราการไหลของน้ำแก้วที่สูงขึ้นจากอุณหภูมิและอัตราการปล่อยฟองอากาศที่สูงขึ้น และอุณหภูมิบริเวณ refiner ที่สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศขนาดเล็กเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นของน้ำแก้วซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการ refining ลดลง ส่งผลให้เกิดการไล่ฟองอากาศไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้การที่อุณหภูมิสูงขึ้นสามารถส่งผลให้อิฐทนไฟในเตาหลอมเกิดการกัดกร่อนได้ซึ่งเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดฟองอากาศ

ความแตกต่างของอุณหภูมิด้านบนและด้านล่างบริเวณ melter ที่ลดลงส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่เพิ่ม ซึ่งมาจากการใช้ bubbler ที่ทำการปล่อยฟองอากาศเข้าไปในเตาหลอม เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำแก้วด้านบนและด้านล่าง ซึ่งการที่ความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูงขึ้นมาจากการใช้อัตราการปล่อยฟองอากาศที่สูงซึ่งอาจทำให้ฟองอากาศตกค้างอยู่ภายในน้ำแก้วได้

ปริมาณ SO₃ ในกระจกที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็ก ลดลงจากการที่ปริมาณซอลต์เค้กซึ่งเป็น fining agent ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการไล่ฟองอากาศดีขึ้น ดังนั้นปริมาณซอลต์เค้กที่น้อยเกินไปส่งผลให้เกิดการไล่ฟองอากาศไม่สมบูรณ์

กำลังการผลิตที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาในการไล่ฟองอากาศน้อยลงและเกิดฟองอากาศที่เกิดจากการหลอมวัสดุดิบเพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาในการไล่ฟองอากาศที่น้อยลงจะส่งผลให้เกิดการไล่ฟองอากาศไม่สมบูรณ์



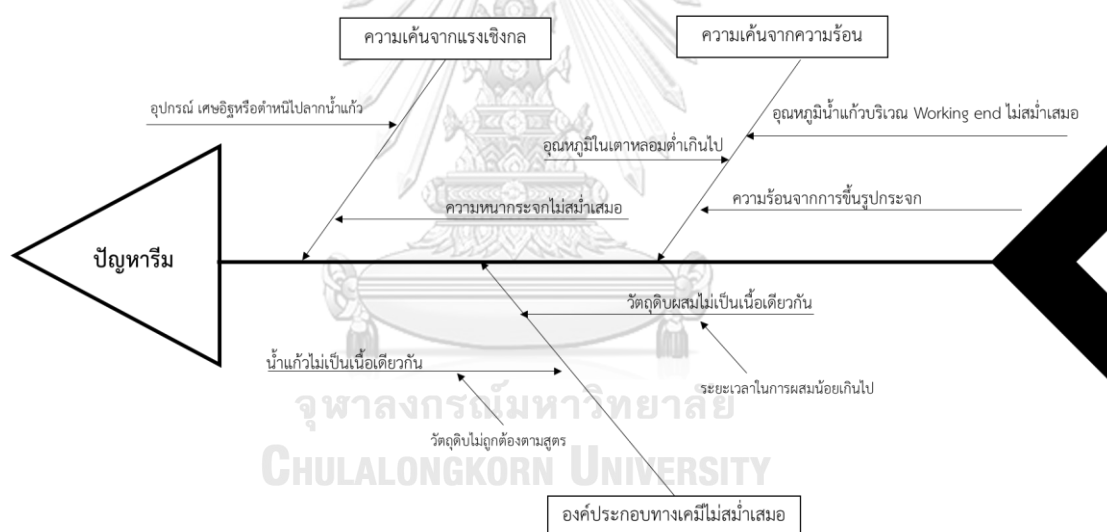
รูปที่ 4.21 การวิเคราะห์ฟองอากาศ

4.2 ตำหนิชนิดรีม

4.2.1 การวิเคราะห์การเกิดตำหนิชนิดรีม

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาตำหนิชนิดรีมโดยใช้แผนภูมิแก๊งปลาตั้งรูปที่ 4.21 พบว่ามีสาเหตุหลักด้วยกันทั้งหมด 3 สาเหตุได้แก่

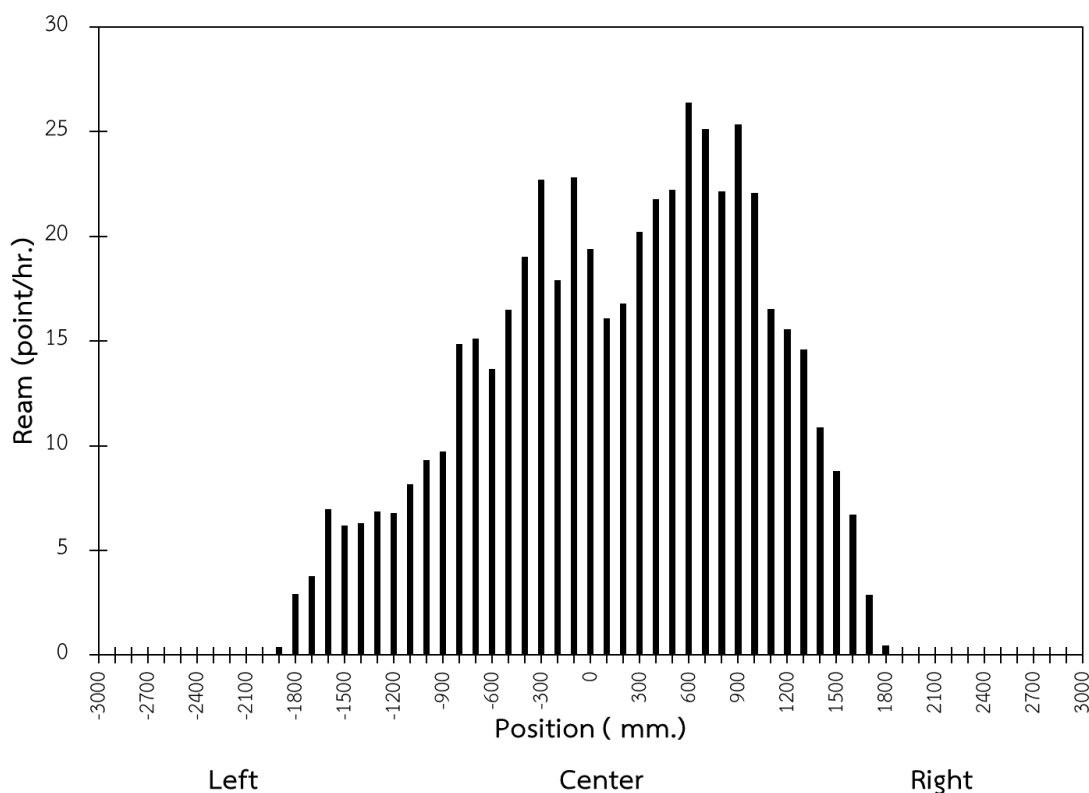
1. ความเค้นจากแรงเชิงกลซึ่งเกิดจาก อุปกรณ์ เศษอิฐทนไฟหรือตำหนิไปชุดน้ำแก้วหรือความไม่สม่ำเสมอของความหนากระຈก
2. ความเค้นจากความร้อนซึ่งเกิดจากอุณหภูมิน้ำแก้วก่อนการขึ้นรูปหรือบริเวณ working end ไม่สม่ำเสมอ
3. ความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมีของกระຈกซึ่งเกิดจากวัตถุดิบไม่ถูกต้องตามสูตรหรือวัตถุดิบผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 4.22 แผนภูมิแก๊งปลาแสดงสาเหตุการเกิดตำหนิชนิดรีม

4.2.2 ตำแหน่งของรีม

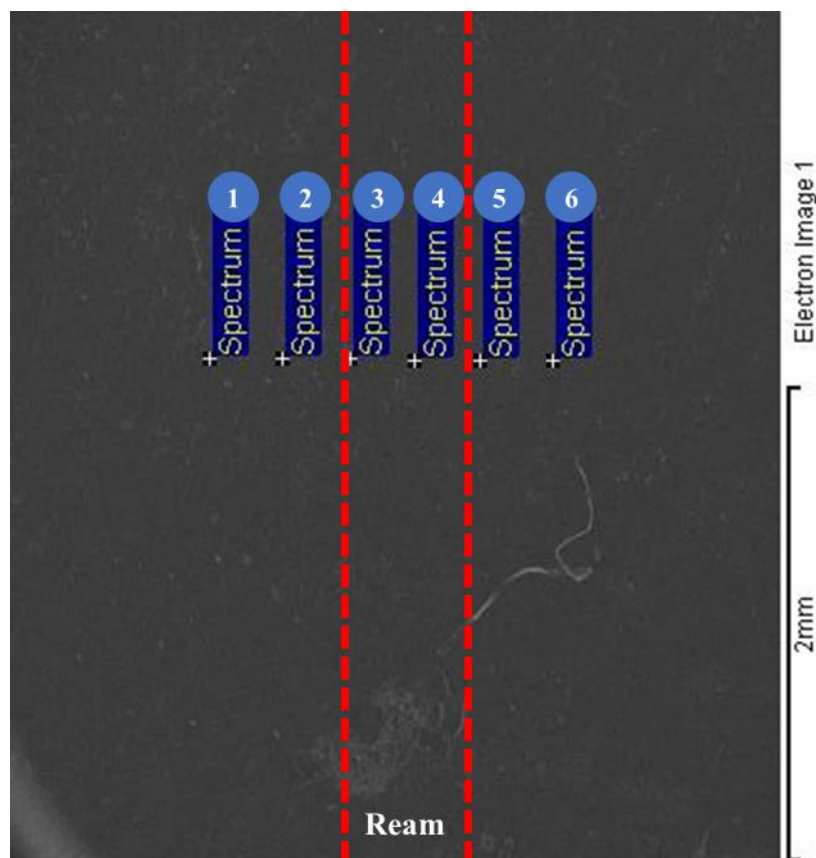
จากการเก็บข้อมูลตำแหน่งของรีมในกระຈกพบว่าปริมาณรีมค่อนข้างกระจายทั่วทั้งแผ่นโดยบริเวณฝั่งขวาถึงตรงกลางจะมีปริมาณรีมหนาแน่นที่สุดดังรูปที่ 4.23 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารีมไม่ได้เกิดจากสาเหตุความเค้นจากแรงเชิงกล เนื่องจากรีมที่เกิดจากแรงเชิงกลมักจะเกิดจากการที่มีอุปกรณ์ อิฐทนไฟหรือตำหนิไปชุดน้ำแก้วช่วงก่อนการขึ้นรูป ดังนั้นรีมจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเดิมไม่กระจายทั่วทั้งแผ่นกระຈก



รูปที่ 4.23 ตำแหน่งรีมในกระจก

4.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตำหนักนิตรีม

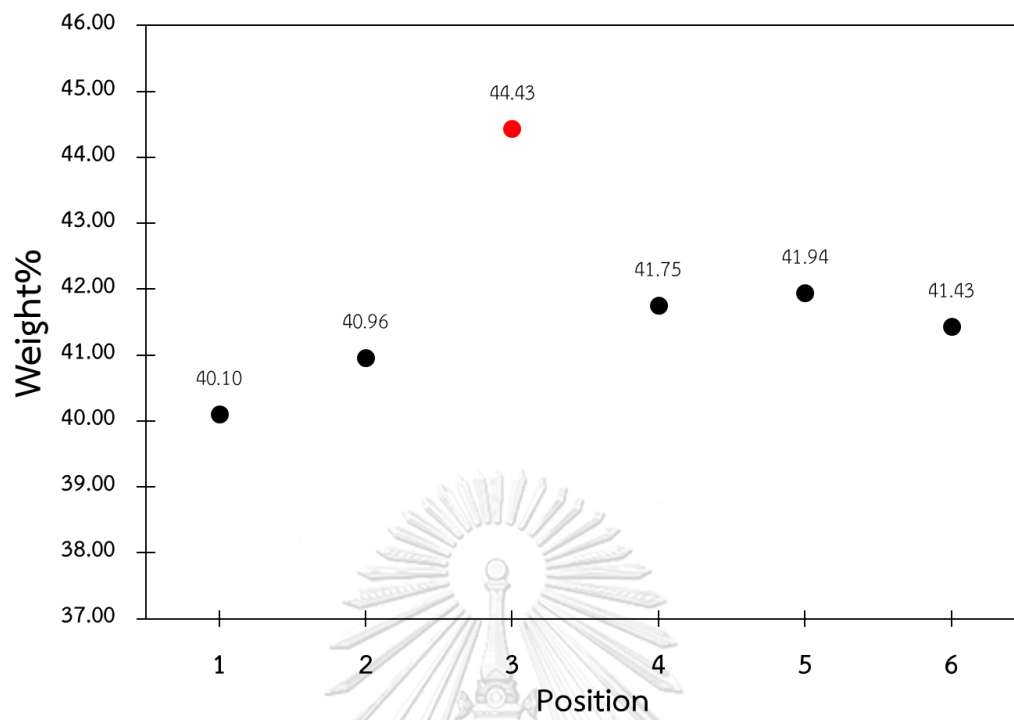
ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุของตัวอย่างรีมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วมกับการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (SEM/EDS) ที่ตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 4.24 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีบริเวณรีมประกอบด้วยธาตุออกซิเจน (O) โซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) อลูมิเนียม (Al) ซิลิคอน (Si) แคลเซียม (Ca) และไอรอน (Fe) ดังตารางที่ 4.2 โดยพบว่าบริเวณรีมในตำแหน่งที่ 3 มีปริมาณธาตุซิลิคอน (Si) และโซเดียม (Na) สูงกว่าตำแหน่งอื่นแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.25 และรูปที่ 4.26 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารีมที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่องค์ประกอบทางเคมีของกระจกไม่สม่ำเสมอซึ่งเกิดจากวัตถุดิบที่ผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือวัตถุดิบไม่ถูกต้องตามสูตรการผลิต



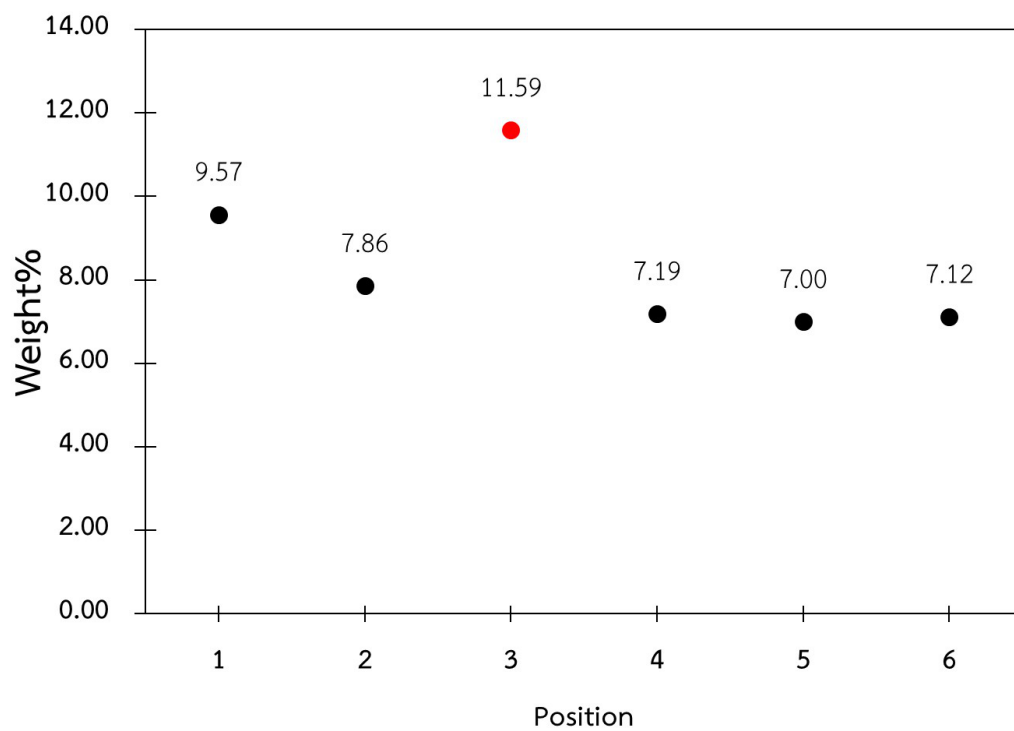
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งการวิเคราะห์ปริมาณธาตุในตัวอย่างรีม

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุในกระจกตัวอย่าง

ตำแหน่ง	ปริมาณธาตุ [ร้อยละโดยน้ำหนัก]						
	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe
1	40.84	9.57	1.21	0.23	40.10	7.35	0.69
2	41.39	7.86	1.43	0.95	40.96	6.27	1.15
3	34.13	11.59	2.20	1.08	44.43	6.57	0.00
4	40.85	7.19	1.30	0.66	41.75	7.65	0.60
5	39.49	7.00	1.99	0.52	41.94	7.62	1.43
6	37.57	7.12	2.63	0.40	41.43	7.66	1.19



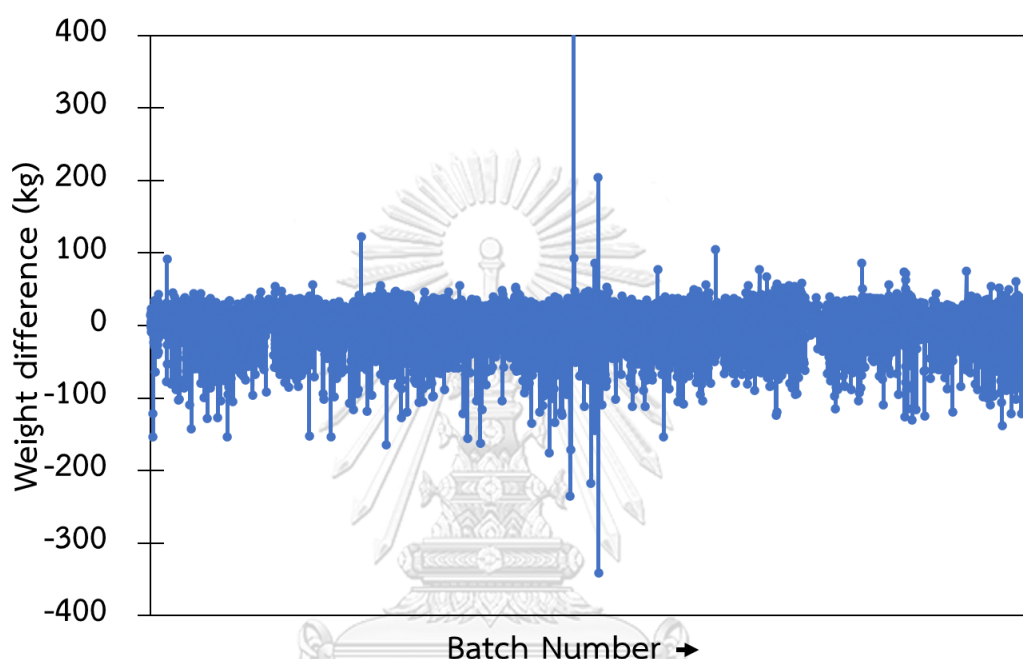
รูปที่ 4.25 ปริมาณธาตุซิลิคอนในตัวอย่างรีมที่ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 4.26 ปริมาณธาตุโซเดียมในตัวอย่างรีมที่ตำแหน่งต่างๆ

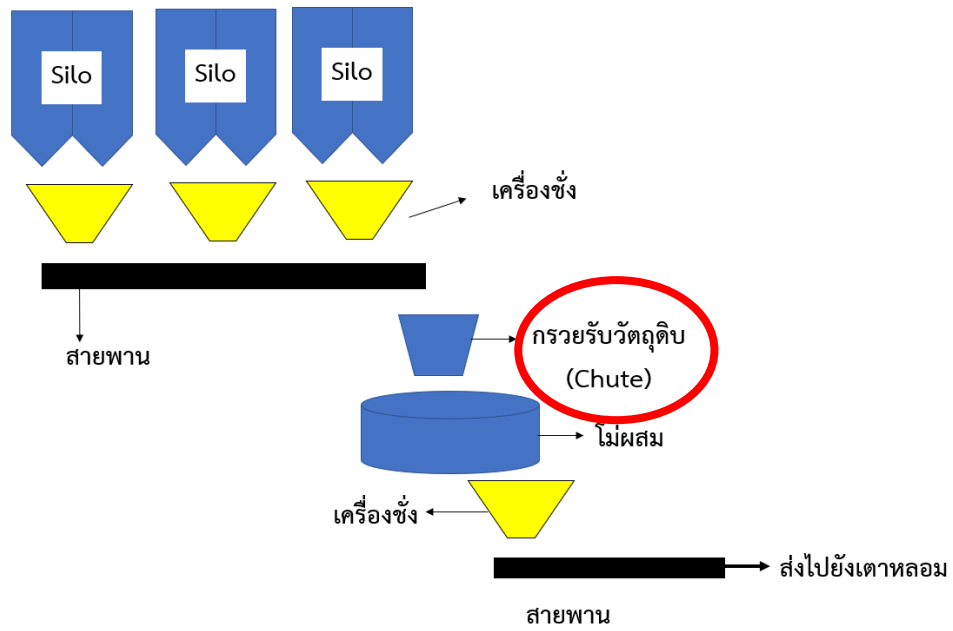
4.2.4 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักวัตถุดิบจากสูตรการผลิต

จากการเก็บข้อมูลน้ำหนักของวัตถุดิบก่อนและหลังผสมพบว่า น้ำหนักของวัตถุดิบหลังจากผสมมีการคลาดเคลื่อนไปจากน้ำหนักวัตถุดิบก่อนผสมเฉลี่ย 77 กิโลกรัมต่อครั้ง โดยพบทั้งกรณีที่น้ำหนักเพิ่มขึ้นและน้ำหนักลดลงดังรูปที่ 4.27

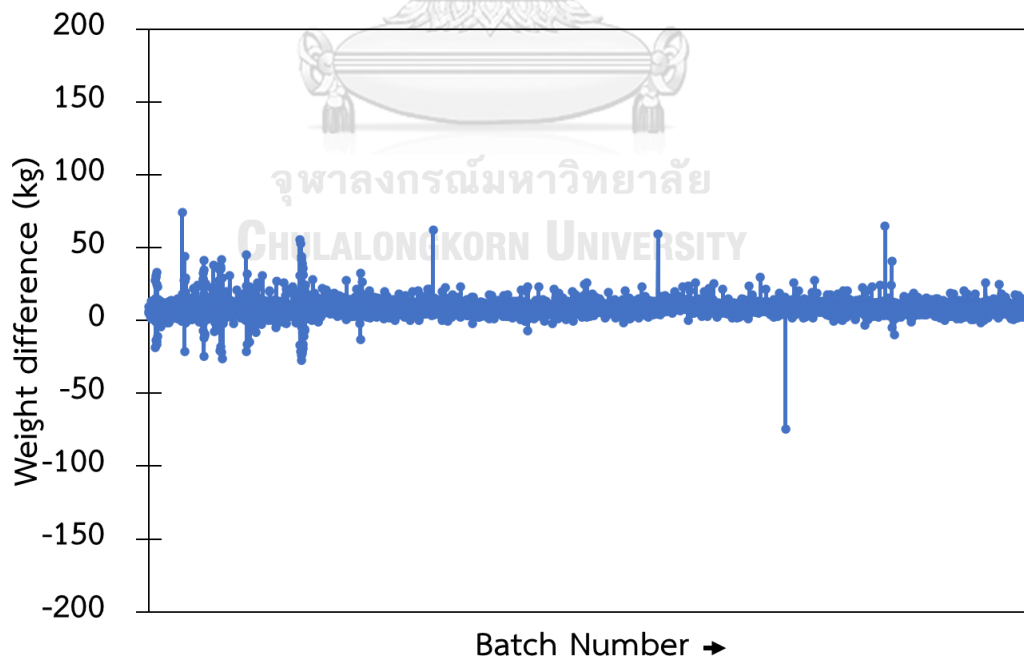


รูปที่ 4.27 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักก่อนและหลังผสมก่อนติดตั้งค้อนลม

จากการตรวจสอบกระบวนการผสมวัตถุดิบพบว่า มีวัตถุดิบติดค้างภายในกรวยรับวัตถุดิบดังรูปที่ 4.28 จึงทำการติดตั้งค้อนลมเพื่อทำการเคาะให้วัตถุดิบที่ติดค้างภายในกรวยรับวัตถุดิบให้ลงสู่ไม่ผสมครบถ้วนตามสูตรการผลิต เมื่อทำการติดตั้งค้อนลมแล้วพบว่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักวัตถุดิบหลังจากผสมมีคลาดเคลื่อนไปจากน้ำหนักวัตถุดิบก่อนผสมโดยเฉลี่ยลดลงเหลือ 20 กิโลกรัมต่อครั้ง ดังรูปที่ 4.29



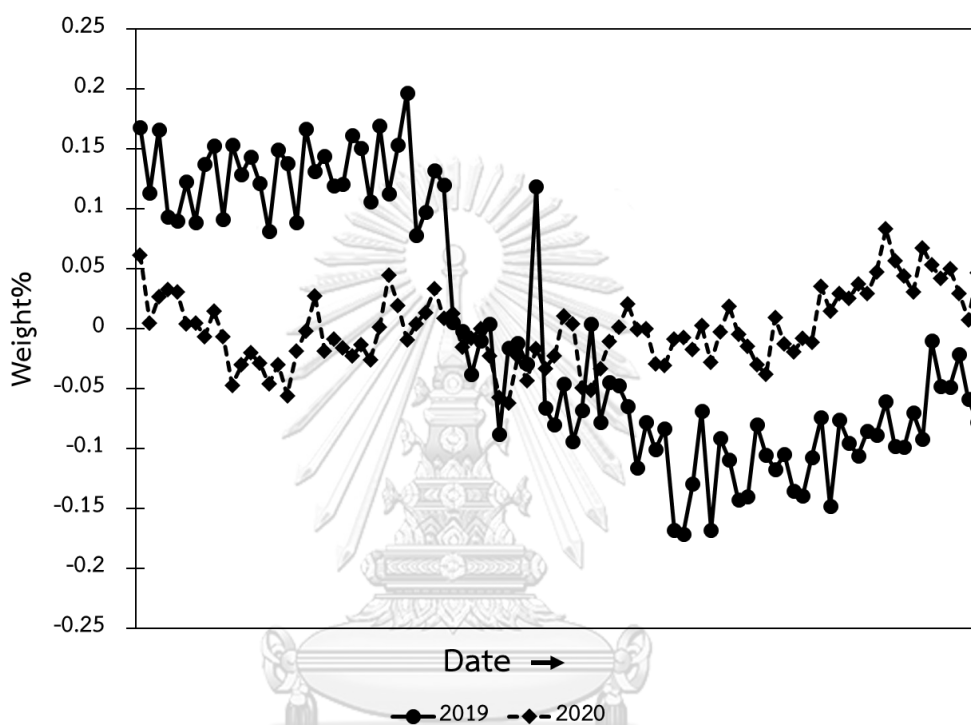
รูปที่ 4.28 บริเวณกรวยรับวัสดุดิบที่วัสดุดิบติดค้าง



รูปที่ 4.29 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักก่อนและหลังผสมหลังติดตั้งค้อนลม

4.2.4 องค์ประกอบทางเคมีของกระจก

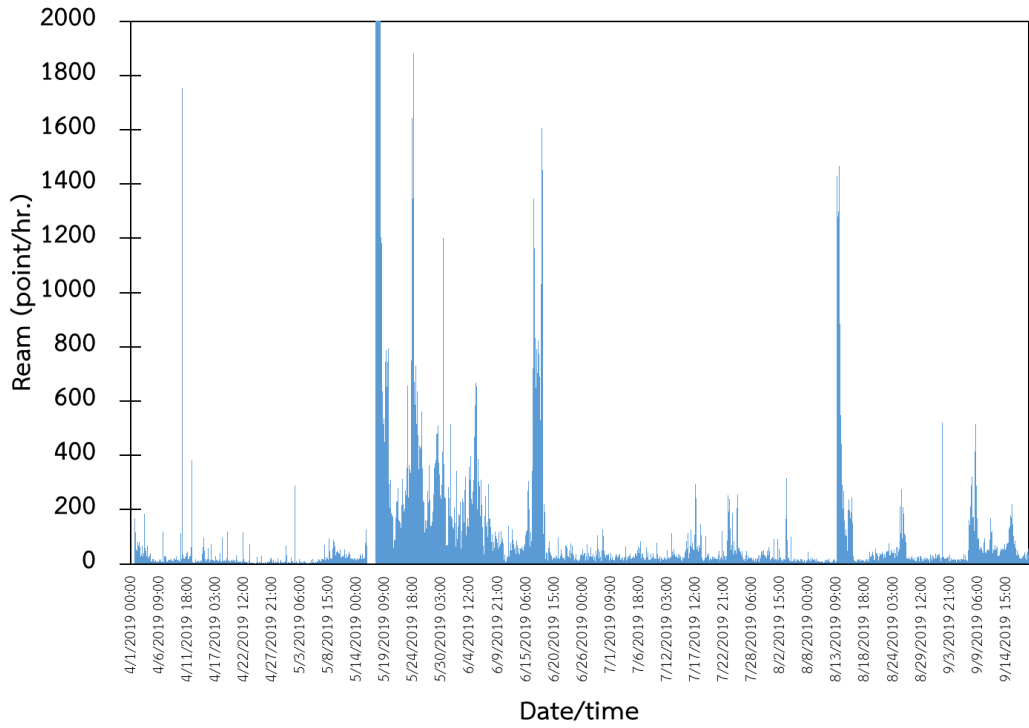
จากการเก็บข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของกระจกในทุกวันพบว่า ปริมาณ SiO_2 ในกระจกก่อนการติดตั้งค้อนลมมีการแกว่งตัวที่ค่อนข้างสูง หลังจากการติดตั้งค้อนลมการแกว่งตัวของปริมาณ SiO_2 ลดลงดังรูปที่ 4.30 ซึ่งมาจากการที่เตาหลอมได้รับวัตถุดิบครบถ้วนตามสูตรการผลิต



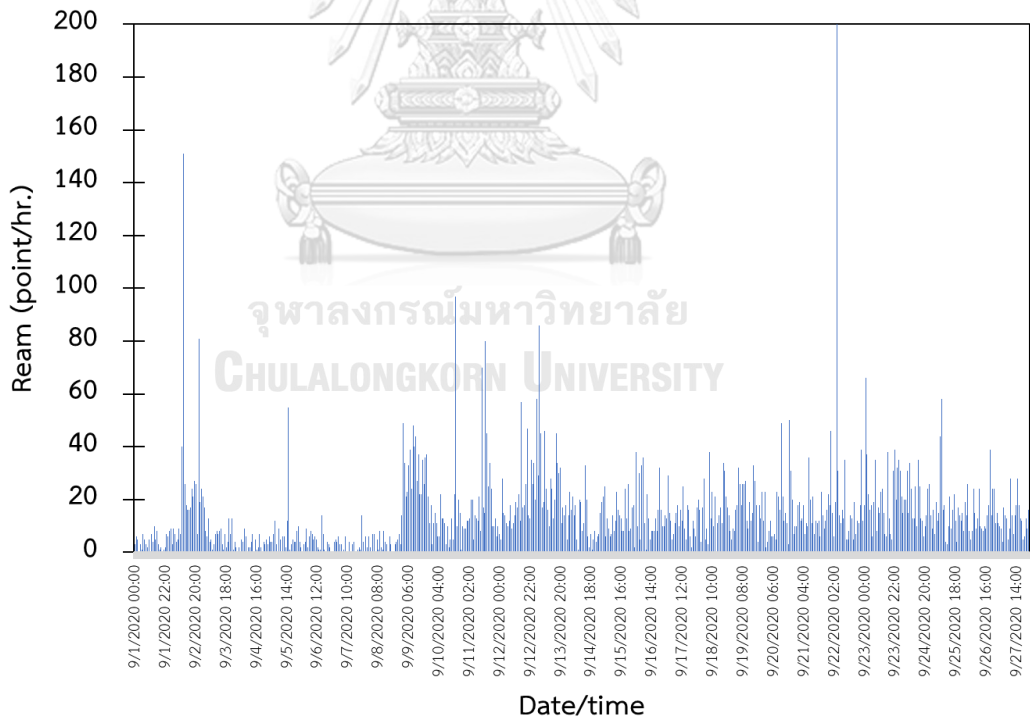
รูปที่ 4.30 ปริมาณ SiO_2 ในกระจกก่อนและหลังจากติดตั้งค้อนลม

4.2.5 ปริมาณริมห่อนและหลังการปรับปรุงกระบวนการ

หลังจากทำการติดตั้งค้อนลมเพื่อทำการเคาะวัตถุดิบให้ลงไปไม่ผสมครบถ้วนพบว่า ริมมีปริมาณลดลงจากเฉลี่ย 38 จุดต่อชั่วโมงเหลือเฉลี่ย 10 จุดต่อชั่วโมงดังรูปที่ 4.31 และรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.31 ปริมาณเริ่มก่อนการติดตั้งค้อนลม

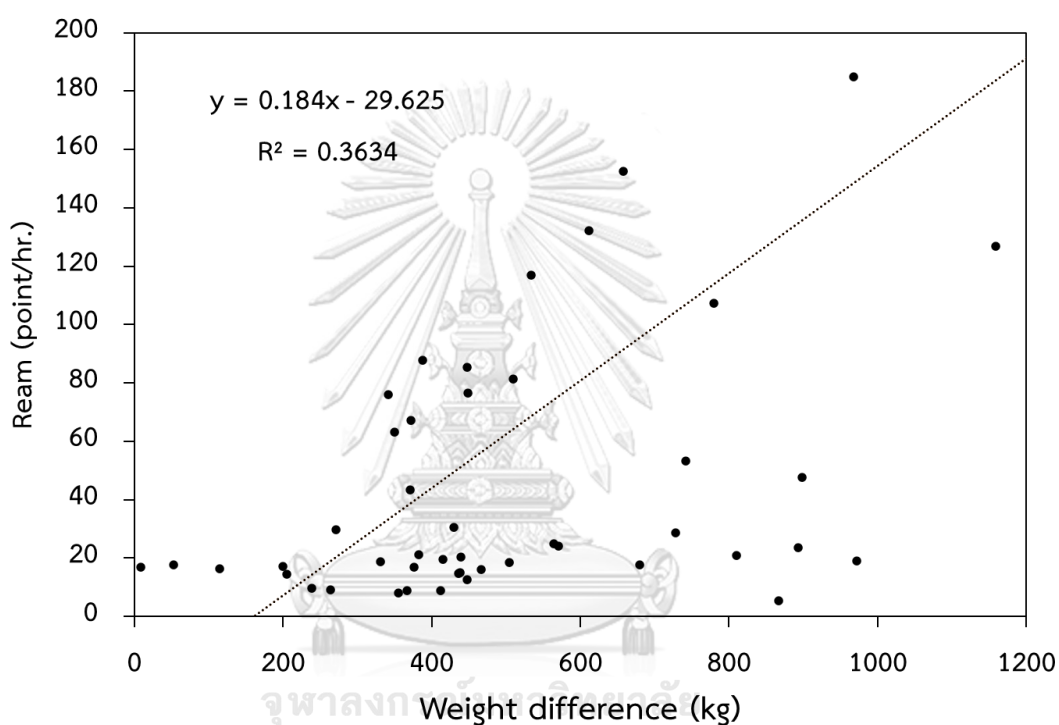


รูปที่ 4.32 ปริมาณเริ่มหลังการติดตั้งค้อนลม

4.2.6 การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย

4.2.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของน้ำหนักวัตุดิบก่อนและหลังผสมและปริมาณรีม

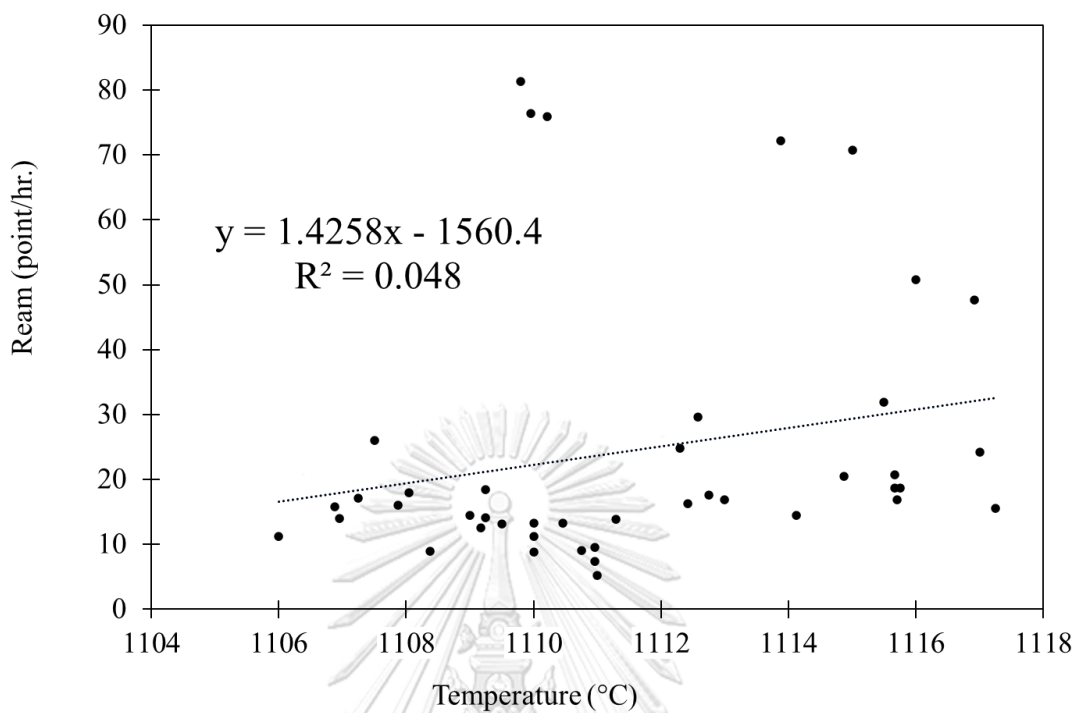
จากความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของน้ำหนักวัตุดิบก่อนและหลังผสมและปริมาณรีมพบว่า ความแตกต่างของน้ำหนักวัตุดิบที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณรีมเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.33 เนื่องจากวัตุดิบที่ขาดหรือเกินทำให้องค์ประกอบทางเคมีของน้ำแก้วไม่สม่ำเสมอส่งผลให้เกิดรีม



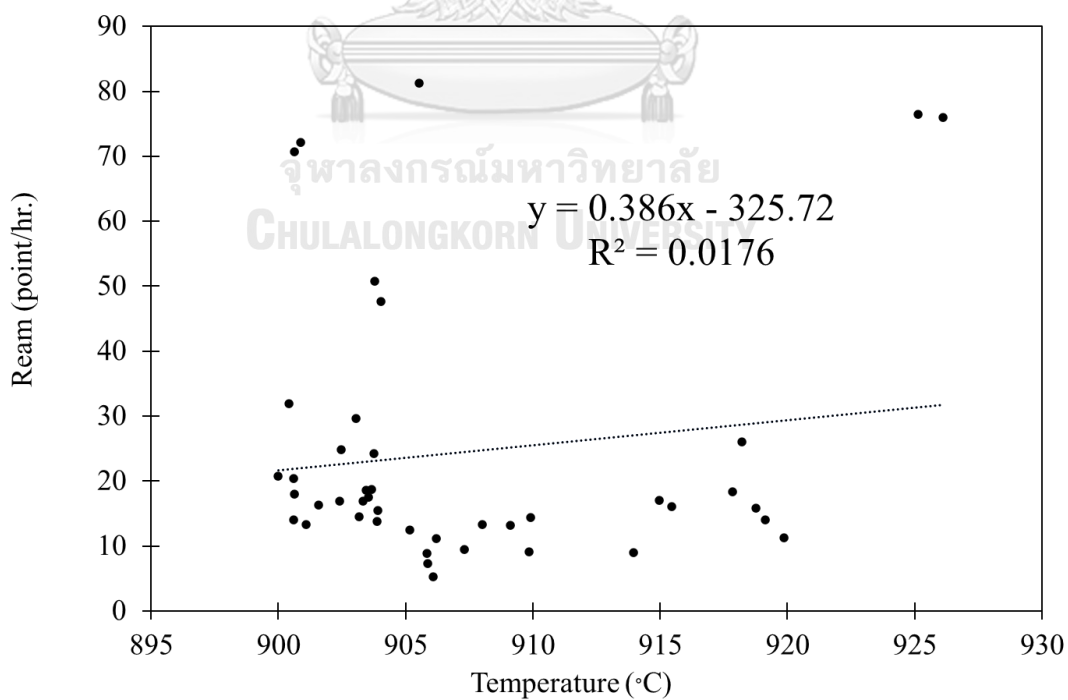
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและความแตกต่างของน้ำหนักวัตุดิบก่อนและหลังผสม

4.2.6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเตาหลอมและปริมาณรีม

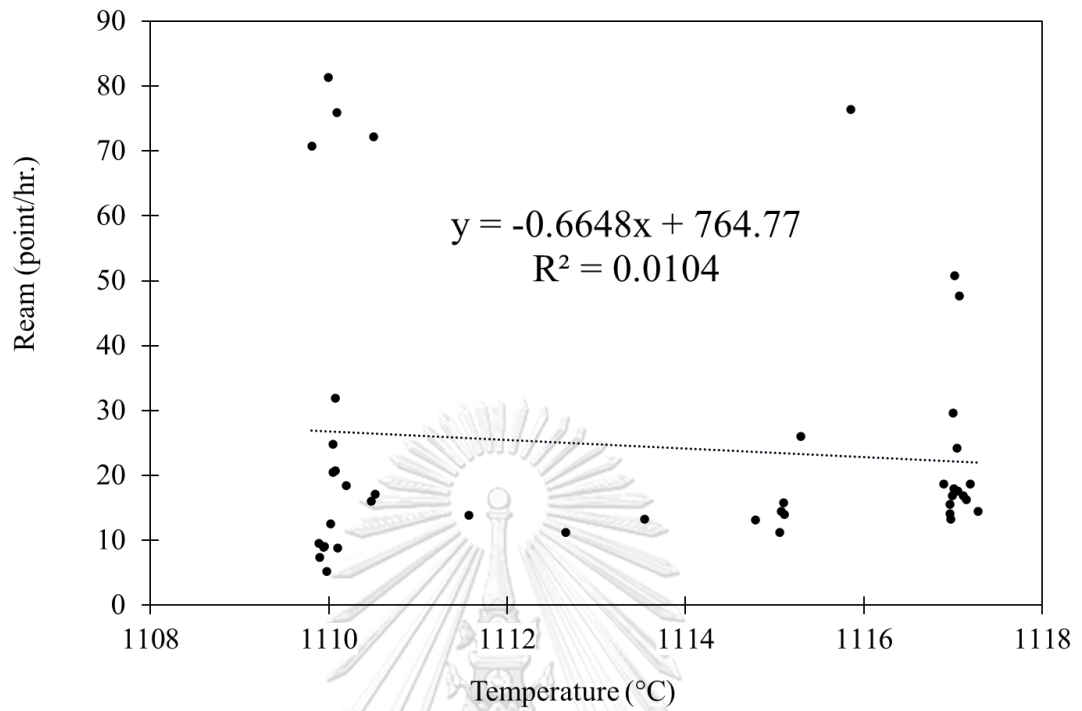
จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter พบว่าไม่มีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 4.34 เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ working end ดังรูปที่ 4.35 และจากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและอุณหภูมิน้ำแก้วก่อนการขึ้นรูปไม่มีความสัมพันธ์เช่นเดียวกันดังรูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นอุณหภูมิในเตาหลอมไม่ส่งผลต่อปริมาณรีม



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter



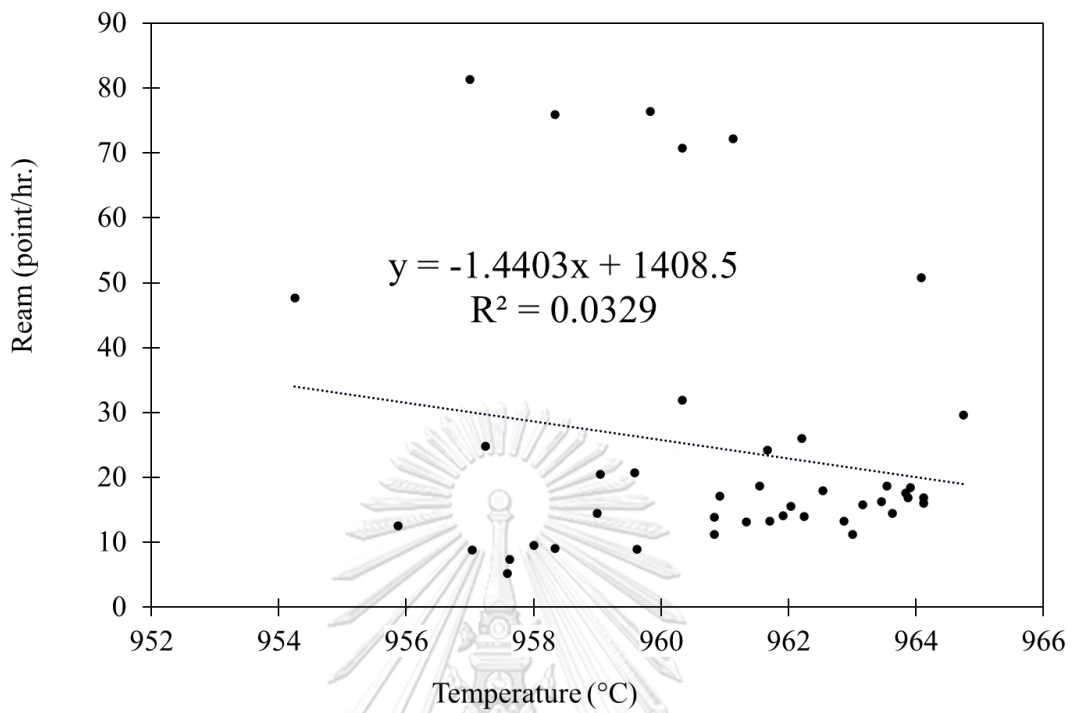
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ working end



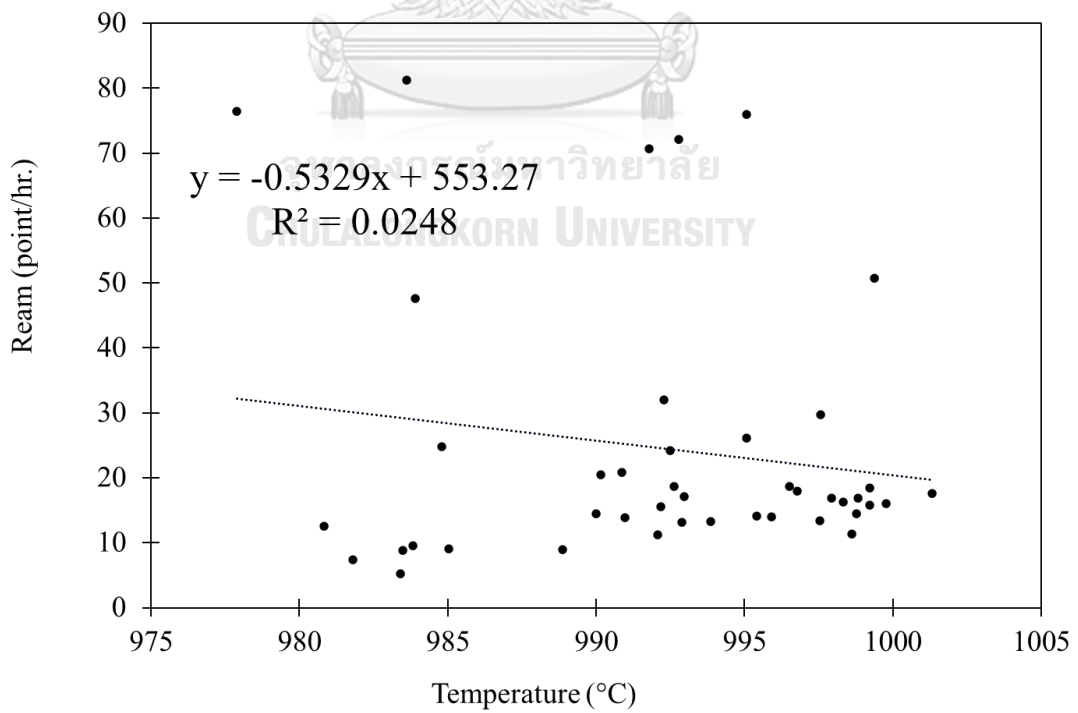
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและอุณหภูมิน้ำแก้วก่อนการขึ้นรูป

4.2.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการขึ้นรูปและปริมาณรีม

จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและอุณหภูมิน้ำแก้วขณะขึ้นรูปดังรูปที่ 4.37 พบว่าไม่มี
ความสัมพันธ์กัน เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรีมและอุณหภูมิน้ำดีบุกขณะขึ้นรูปดังรูปที่
4.38 ดังนั้นอุณหภูมิจนรูปไม่ใช่สาเหตุของการเกิดรีม



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณริมและอุณหภูมิน้ำแก้วขณะขึ้นรูป

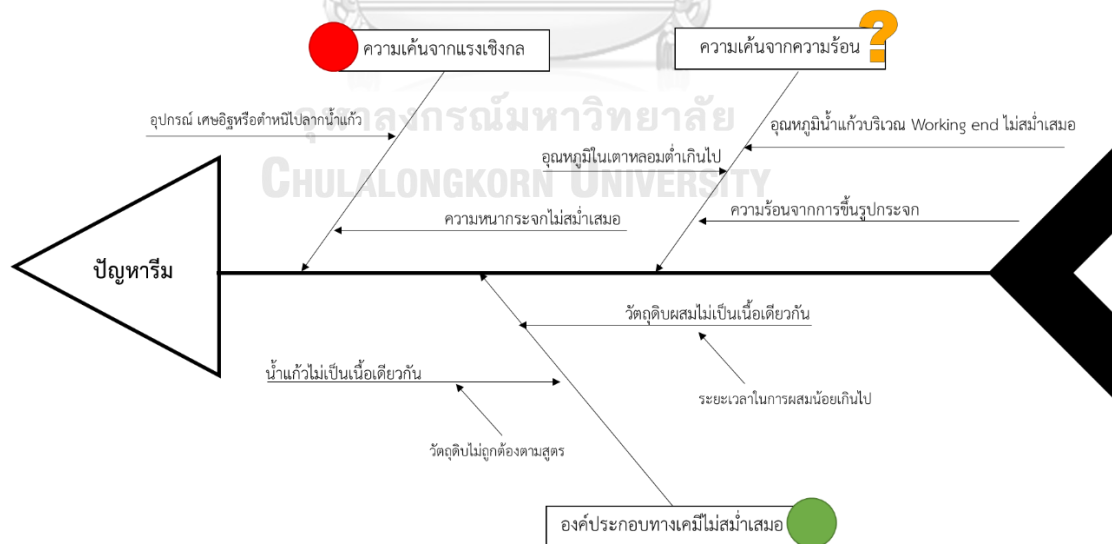


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณริมและอุณหภูมิน้ำตึกขณะขึ้นรูป

จากการวิเคราะห์ข้อมูลและหาความสัมพันธ์ของปริมาณริ้มที่เกิดขึ้นกับตัวแปรจากการผลิตพบว่าริ้มมีสาเหตุหลักมาจากการที่องค์ประกอบทางเคมีของกระจกนั้นไม่สม่ำเสมอ ความเค้นจากแรงเชิงกลไม่ใช่สาเหตุของการเกิดริ้มแสดงดังรูปที่ 4.39 ส่วนความเค้นจากความร้อนยังไม่สามารถวิเคราะห์ได้เนื่องด้วยข้อจำกัดของตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิน้ำแก้ว

จากข้อมูลตำแหน่งการเกิดริ้มพบว่าริ้มที่เกิดขึ้นกระจายทั่วทั้งแผ่นกระจกซึ่งแสดงให้เห็นว่าสาเหตุของการเกิดริ้มไม่ได้มาจากความเค้นจากแรงเชิงกลซึ่งเป็นการชูดน้ำแก้วหรือกระจกทำให้มีความเค้นตกค้างในกระจกซึ่งจะเป็นการทำให้เกิดริ้มตำแหน่งเดิมซ้ำๆ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวอย่างริ้มและบริเวณโดยรอบพบว่า บริเวณริ้มมีปริมาณธาตุ Si และ Na ที่สูงกว่าบริเวณโดยรอบแสดงให้เห็นว่า ริ้มที่เกิดขึ้นเป็นริ้มที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี โดยหลังจากการตรวจสอบและหาความสัมพันธ์ของน้ำหนักวัตถุดิบที่คลาดเคลื่อนไปจากสูตรการผลิตกับปริมาณริ้มโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพบว่า น้ำหนักของวัตถุดิบที่คลาดเคลื่อนไปจากสูตรการผลิตส่งผลให้ปริมาณริ้มเพิ่มขึ้น โดยน้ำหนักวัตถุดิบที่คลาดเคลื่อนไปจากสูตรการผลิตเกิดจากการที่วัตถุดิบติดค้างบริเวณกรวยรับวัตถุดิบบริเวณไม่ผสมวัตถุดิบ ซึ่งหลังจากการแก้ไขโดยการติดตั้งค้อนลมเพื่อเคาะวัตถุดิบให้ลงไปไม่ผสมวัตถุดิบครบถ้วนแล้ว น้ำหนักวัตถุดิบที่คลาดเคลื่อนไปจากสูตรการผลิตน้อยลงและส่งผลให้ปริมาณริ้มลดลง



รูปที่ 4.39 การวิเคราะห์การเกิดริ้ม

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 ตำหนิชนิดฟองอากาศ

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการเกิดตำหนิชนิดฟองอากาศสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดตำหนิและแนวทางการควบคุมกระบวนการผลิตดังนี้

1. อุณหภูมิบริเวณ melter ที่สูงขึ้นส่งผลต่อปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ดังนั้นควรควบคุมอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ melter ไม่ให้เกิน 1150 องศาเซลเซียส
2. อุณหภูมิบริเวณ refiner ที่สูงขึ้นส่งผลต่อปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่เพิ่มขึ้น ดังนั้นควรควบคุมอุณหภูมิด้านใต้บริเวณ refiner ไม่ให้เกิน 1160 องศาเซลเซียส
3. ปริมาณ SO_3 ในกระจกที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศขนาดใหญ่และขนาดเล็กลดลง ควรที่จะเพิ่มปริมาณ fining agent คือซอลต์เค้กและโค้ก
4. กำลังการผลิตที่สูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณฟองอากาศทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ในกรณีที่กำลังการผลิตสูง ควรที่จะเพิ่มปริมาณการใช้ fining agent

5.2 ตำหนิชนิดริ้ว

จากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาการเกิดตำหนิชนิดริ้วสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดตำหนิชนิดริ้ว และแนวทางการแก้ไขปัญหาในกระบวนการผลิตดังนี้

ริ้วที่พบเป็นริ้วที่เกิดจากความไม่สม่ำเสมอขององค์ประกอบทางเคมี โดยบริเวณริ้วมีธาตุ Si และ Na สูงกว่ากระจกโดยรวม ซึ่งเกิดจากการชั่งวัตถุดิบที่คลาดเคลื่อนไปจากสูตรการผลิต ซึ่งเกิดจากวัตถุดิบติดค้างบริเวณกรวยรับวัตถุดิบที่ไม่ผสม ส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของส่วนผสมไม่สม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณริ้วเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาได้โดยติดตั้งค้อนลมเพื่อเคาะวัตถุดิบให้ลงไปไม่ผสมวัตถุดิบครบถ้วนตามสูตรการผลิต

บรรณานุกรม

- [1] Shelby, J. E. *Introduction to glass science and technology*. Royal Society of Chemistry, 2020.
- [2] Pilkington, L. A. B. Review lecture: the float glass process. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 314, 1516 (1969), 1-25.
- [3] Achintha, M. *Sustainability of glass in construction*. Elsevier, City, 2016.
- [4] Hubert, M. *Industrial glass processing and fabrication*. Springer, City, 2019.
- [5] Beerkens, R. G., Kuhn, W. S., Lentjes, F.-T. and Backx, T. *Melting and fining*. Springer, City, 2002.
- [6] Vernerová, M., Cincibusová, P., Kloužek, J., Maehara, T. and Nemeč, L. Method of examination of bubble nucleation in glass melts. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 411 (2015), 59-67.
- [7] Singkiburin, N., Srisittipokakun, N. and Keawkhao, J. *Effect of antimony (III) oxide on reduction of bubbles from glass melting process*. IOP Publishing, City, 2020.
- [8] Pedeche, S., Simon, P., Matzen, G., Moulin, B., Blanchard, K. and Querel, G. Probing gas bubbles inside industrial glasses by Raman scattering. *Journal of Raman Spectroscopy*, 34, 3 (2003), 248-252.
- [9] Yanagisawa, O., Tanaka, C., Kokubu, Y. and Suzuki, Y. The change of gas composition in bubble. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 38 (1980), 599-604.
- [10] Jezikova, M., Janos, F., Ullrich, J. and Muijsenberg, E. *Glass Defects Identification Using a Mass Spectrometer, Sem-Edx Microanalysis and HTO Analysis*. Wiley Online Library, City, 2018.
- [11] Liu, D., Park, J. S., Benoit, R. and Jackson, F. Chemical analysis of ream defect in float glass. *X-Ray Spectrometry*, 21, 6 (1992), 293-298.
- [12] Wang, M., CHeng, J., Li, M. and He, F. Raman spectra of soda–lime–silicate glass doped with rare earth. *Physica B: Condensed Matter*, 406, 20 (2011), 3865-3869.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	คุณutm ไพบูลย์
วัน เดือน ปี เกิด	21 มิถุนายน 2539
สถานที่เกิด	จังหวัดลพบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวัสดุศาสตร์ สาขาเซรามิก คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2558 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท โครงการวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562
ผลงานตีพิมพ์	K. Paiboon et al., "Analysis of Bubble in Float Glass Production" SmartMat@2020: 160-167 (E-Proceeding) และนำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในการประชุม The 5th International Conference on Smart Materials and Nanotechnology (SmartMat@2020) ที่สวนนงนุช พัทยา ในวันที่ 1-4 ธันวาคม 2563