

การเพิ่มความทนทานต่อสภาพอากาศของแก้วโซดาไลม์

นางสาวนันท์วัน ผ่องพุด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2554  
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.

IMPROVEMENT OF WEATHERING DURABILITY OF SODA LIME GLASS

Miss Nuntawan Pongput

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มความทนทานต่อสภาพอากาศของแก้วบรรจุภัณฑ์
โดย	นางสาวนันทวัน ผ่องพุด
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เทพีวรรณ จิตรวัชรโกมล

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุจฤทัย พงษ์เก่า คະซีมา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร.เทพีวรรณ จิตรวัชรโกมล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. กนิษฐิ์ ตะปะสา)

นันทวัน ผ่องพุด : การเพิ่มความทนทานต่อสภาพอากาศของแก้วบรรจุภัณฑ์.  
(IMPROVEMENT OF WEATHERING DURABILITY OF CONTAINER GLASS)  
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
ร่วม: ดร.เทพีวรรณ จิตรวัชรโกมล, 118 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อแก้ปัญหาการเกิดตำหนิฝ้าบนผิวแก้วโซดาไลม์ทั้งชนิดบรรจุภัณฑ์และกระจก ตำหนิฝ้ามีลักษณะเป็นคราบขาวอยู่บนผิวแก้วซึ่งมีปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดฝ้า คือความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูง จึงได้ศึกษาการปรับส่วนผสมแก้วโดยการเติมวัตุดิบเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ลงในสูตรแก้ว และการปรับผิวแก้วโดยการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากสารตั้งต้นต่างชนิดกัน และศึกษาผลของการปรับสูตรแก้วและการปรับผิวแก้วที่มีต่อความทนทานต่อสภาพอากาศ โดยตรวจสอบการละลายของธาตุกลุ่มต่างโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลาย พบว่าในกลุ่มแก้วบรรจุภัณฑ์ แก้วที่ผ่านการปรับผิวทมน้ำได้ดีที่สุด ส่วนสูตรที่เติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์แทนที่อะลูมินาปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และสูตรที่มีการเพิ่มซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่มีการทมน้ำมากที่สุดของในแต่กลุ่มนั้นๆ แต่ทมน้ำได้น้อยกว่าแก้วที่ผ่านการอบผิว การทดสอบความทนทานต่อสภาพอากาศพบว่าแก้วที่ผ่านการอบผิวเกิดฝ้าน้อยที่สุด และการเติมซิงค์ออกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ให้ผลดีกว่าการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเล็กน้อย ความแข็งที่ผิวแก้วพบว่าแก้วที่ผ่านการอบผิวมีความแข็งมากที่สุดคือ 5.600 GPa ส่วนสูตรที่เติมวัตุดิบตัวเติมมีค่าความแข็งที่ผิวใกล้เคียงกัน จากการทดลองสรุปได้ว่าการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นวิธีที่ทำให้แก้วสามารถต้านทานการเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสภาพอากาศได้ดีที่สุด เนื่องจากหลังการล้างคราบที่เกิดขึ้นหลังการอบผิวแล้ว ธาตุกลุ่มต่างบริเวณผิวแก้วจะถูกชะออกไปด้วยทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดฝ้าลดลง ในการอบกระจกโซดาไลม์โดยการใส่สารตั้งต้นต่างชนิดกันในการอบผิวเพื่อเป็นแหล่งของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้ผลใกล้เคียงกัน คือ ทำให้กระจกหลังอบผิวมีการทมน้ำและความแข็งแรงของผิวที่ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถต้านทานต่อสภาพอากาศดีขึ้น สูตรที่ดีที่สุดที่ได้ในการทดลองคือการใช้ซิงค์ซัลเฟต 10 กรัมในการอบผิวกระจกหลังอบผิวมีค่าความแข็ง 6.616 GPa จึงมีแนวโน้มที่จะต้านทานการเกิดฝ้าได้มากที่สุด

ภาควิชา.....วัสดุศาสตร์..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเซรามิก..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5272369023 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : SODA-LIME SILICA GLASS / WEATHERING / CONTAINER GLASS

NUNTAWAN PONGPUT: IMPROVEMENT OF WEATHERING DURABILITY OF CONTAINER GLASS. ADVISOR: ASST. PROF. SIRITHAN JIEMSIRILERS, Ph.D., CO- ADVISOR: TEPIWAN JITWATCHARAKOMOL, PhD. 118 pp.

This research aimed to resolve the weathering problem of soda-lime silicate glass which is commonly covered by white haze on its surface. The study focused on the effects of adding zirconium dioxide ( $ZrO_2$ ), zinc oxide ( $ZnO$ ), and surface treatment by dealcalization with sulfur dioxide gas ( $SO_2$ ) in different sources on weathering durability. The glass samples were tested to determine the solubility of the alkali, with water as solvent. The results showed that the glass with surface treatment was the most of hydrolytic resistance (HGB2) and the glass batch with  $ZrO_2$  instead of alumina at 1%, and the batch with the addition of  $ZnO$  2% were the most water resistant in each group but less than dealcalized glass. By determining the weathering durability, Dealcalized sample which was treated surface contributed to minimum occurrence of bloom defect. One with added  $ZnO$  2 % sample was slightly more durable than that with added  $ZrO_2$  1 % sample. Further, the investigation of the surface hardness revealed that dealcalized sample was the best of surface hardness (5.600 GPa). The group of reformulated glass reflected the trend of surface hardness. From the experiment, dealcalization was the best way to improve weathering durability. After rinsing away, the alkali ions at the near surface were reduced, leading to lower trend of weathering. In part of dealcalization on float glass, all of reagents that were used as a source of sulfur dioxide tended to improve hydrolytic resistance and surface hardness of the glass. The sample was dealcalized with  $ZnO$  10 g. which was maximum hardness (6.616 GPa). So that leads to improve weathering durability.

Department : Materials Science ..... Student's Signature .....

Field of Study : Ceramic Technology ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : 2011 ..... Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ต้องขอขอบคุณความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินการวิจัย จากบุคคลและหน่วยงานต่างๆ ดังนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.เทพีวรรณ จิตรวัชโกมล สำหรับคำแนะนำแนวทางการดำเนินงานวิจัย และคำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่สละเวลาอันมีค่า มาให้ความรู้คำชี้แนะรวมทั้งการตรวจแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง (National Center of Excellence for Petroleum, Petrochemicals and Advanced Materials) ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาและทุนวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญแก้ว กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้การสนับสนุนด้านวัตถุดิบ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณประดิษฐ์ มากทรัพย์ คุณอุสุมา นาคนิคาม ดร.เอกรัฐ มีชูวาศ และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือในการทำการทดลอง

สุดท้ายกราบขอพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่อบรมสั่งสอนและให้การสนับสนุนการศึกษามาโดยตลอด

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แก้ว (Glass) .....	4
2.1.1 ประเภทของผลิตภัณฑ์แก้วจำแนกตามการนำไปใช้งาน .....	5
2.1.2 โครงสร้างต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมแก้ว .....	9
2.1.3 ประเภทของผลิตภัณฑ์แก้วจำแนกตามองค์ประกอบหลักของแก้ว .....	9
2.1.4 วัตถุดิบในการผลิตแก้วโซดาไลม์ .....	11
2.1.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงสร้างแก้ว .....	13
2.1.6 โครงสร้างและส่วนประกอบของแก้ว .....	15
2.1.7 สมบัติของแก้ว .....	16
2.2 ดำเนินฝ้าบนผิวแก้ว (Weathering or Blooming) .....	21
2.3 เทคนิค PEEM และ LEEM .....	25
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย.....	29
3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	30
3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนประกอบของสูตรแก้วบรรจุภัณฑ์ .....	31
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการอบผิวแก้วและกระจก .....	31
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของแก้ว .....	31

	หน้า
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	32
3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ .....	32
3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ .....	32
3.2.3 การเตรียมชิ้นงานแก้ว.....	33
3.2.4 การหลอมแก้ว.....	34
3.2.5 การทดสอบสมบัติของแก้ว .....	34
3.2.6 วิเคราะห์สมบัติแก้วสูตรตั้งต้นเพื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการเติมตัวเติม .....	39
3.2.7 การเตรียมชิ้นงานกระจกโซดาไลม์.....	46
3.2.8 การวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานกระจกหลังการปรับสภาพผิวโดยการอบผิว ด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ .....	46
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล .....	49
4.1 การแก้ไขการเกิดฝ้าในแก้วบรรจุภัณฑ์ชนิดโซดาไลม์.....	49
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วตัวอย่าง.....	49
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติของแก้ว .....	52
4.2 การแก้ไขการเกิดฝ้าของกระจกที่ผลิตจากแก้วโซดาไลม์ .....	81
4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF).....	81
4.2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานกระจกหลังการปรับสภาพผิว โดยการอบด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ .....	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ .....	97
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	97
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก .....	105
ภาคผนวก ข .....	107
ภาคผนวก ค .....	114
ภาคผนวก ง.....	118
ภาคผนวก จ .....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	120



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของแก้ว .....	14
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบวัตถุดิบของสูตรแก้วโซดาไลม์และแก้วสูตรที่มีการเติมโดโลไมต์ .....	33
ตารางที่ 3.2 เกณฑ์การจำแนกระดับการทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำ ตามมาตรฐาน ISO 719.....	35
ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบวัตถุดิบของสูตรแก้วโซดาไลม์สูตรดั้งเดิม (D0) สูตรที่มีการเติม โดโลไมต์และมีการละลายน้อยที่สุด (D3) และสูตรแก้วที่มีการเติมวัตถุดิบตัวเติม ...	37
ตารางที่ 3.4 ความขึ้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้นในระยะเวลา 24 ชั่วโมง.....	41
ตารางที่ 3.5 เกณฑ์การแบ่งระดับการเกิดฝ้าโดยใช้ความเข้มแสงที่ต่างกันในการตรวจสอบ.....	43
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสูตรแก้วบรรจุภัณฑ์ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ .....	49
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโดโลไมต์.....	50
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต(NaHSO <sub>4</sub> ).....	51
ตารางที่ 4.4 ผลการจำแนกระดับการทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำตามมาตรฐาน ISO 719....	56
ตารางที่ 4.5 ค่าความแรงของสนาม (Field strength) ของธาตุต่างๆ.....	57
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าสีและการส่องผ่านแสงของแก้วสูตรต่างๆ .....	60
ตารางที่ 4.7 ค่าพลังงานอิสระในการเกิดปฏิกิริยา Hydration ของแต่ละองค์ประกอบของแก้ว...	69
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วก่อนและหลังการอบผิวด้วย ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	73
ตารางที่ 4.9 ความหนาชั้นเคลือบโลหะทองบนผิวแก้วที่เตรียมโดยวิธี Sputtering ที่เวลาต่างกัน .....	76
ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระจก.....	81
ตารางที่ 4.11 องค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นที่ใช้เป็นแหล่งของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ .....	82
ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าสีและความสามารถในการส่องผ่านแสง ของกระจกหลังอบผิว.....	88
ตารางที่ 4.13 ค่าพลังงานอิสระในการเกิดผลึกซัลเฟตของธาตุกลุ่ม Modifier .....	90
ตารางที่ 4.14 ปริมาณของธาตุกลุ่มต่างๆที่ถูกชะออกมาจากกระจกก่อนและหลังการอบผิว .....	92

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแร่ควอตซ์ แก้วซีลีกาและแก้วโซดาไลม์.....	4
ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตแก้วบรรจุภัณฑ์ .....	7
ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตกระจก .....	8
ภาพที่ 2.4 แผนภาพแสดงต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมแก้ว .....	9
ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานของแก้วชนิดหนึ่ง จากอุณหภูมิห้องจนถึง 1500 °C .....	19
ภาพที่ 2.6 CIELAB 1976 แสดง L*, a*, b* Color space .....	21
ภาพที่ 2.7 ลักษณะของตำหนิฝ้าที่เกิดบนผิวแก้ว.....	22
ภาพที่ 2.8 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของฤดูต่างๆ ในประเทศไทย.....	22
ภาพที่ 2.9 ปริมาณก๊าซพิษในอากาศบริเวณเขตอุตสาหกรรมและนอกเขตอุตสาหกรรม .....	23
ภาพที่ 2.10 ปฏิริยาเคมีแสดงกลไกการเกิดฝ้าบนผิวแก้ว .....	24
ภาพที่ 2.11 แผนผังการทำงานของ PEEM และ LEEM .....	27
ภาพที่ 3.1 แผนผังการทดลองขั้นตอนที่ 1.1 การเติมโดโลไมต์เพื่อทดแทนหินปูน ในสูตรแก้วโซดาไลม์ .....	32
ภาพที่ 3.2 แผนผังการเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมแก้ว .....	34
ภาพที่ 3.3 แผนผังการทดลองขั้นตอนที่ 1.2 การปรับสูตรแก้วโดยการเติมวัตถุดิบตัวเติม และขั้นตอนที่ 1.3 การอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ .....	36
ภาพที่ 3.4 การอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์.....	38
ภาพที่ 3.5 แผนผังการทดลองการทดสอบสมบัติของแก้วสูตรตั้งต้น เพื่อเปรียบเทียบกับ สูตรที่มีการเติมตัวเติม .....	39
ภาพที่ 3.6 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้นในตู้ควบคุมความชื้นอัตโนมัติ ....	42
ภาพที่ 3.7 การตรวจสอบปริมาณของการเกิดฝ้าของชิ้นงานแก้วในกล่องอะคริลิกสีดำทึบ .....	43
ภาพที่ 3.8 แผนผังการทดลองขั้นตอนที่ 2 การแก้ปัญหาการเกิดฝ้าของกระจกโซดาไลม์ .....	45
ภาพที่ 4.1 ผลการตรวจสอบปริมาณ Na <sub>2</sub> O ที่ถูกชะออกมาอยู่ในสารละลาย (ไมโครกรัม) .....	55
ภาพที่ 4.2 ลักษณะของผิวตัวอย่างแก้วก่อนและหลังการอบผิวและการล้างทำความสะอาด.....	58
ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L*a*b* ของแก้วสูตรต่างๆ .....	59
ภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าการส่องผ่านของแสง (Transmission) ของแก้วสูตรต่างๆ.....	60
ภาพที่ 4.5 ค่าความแข็งก่อนและหลังการเร่งสภาวะ .....	62
ภาพที่ 4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของแก้วเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ .....	63

ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ของแก้วสูตรทดลอง .....	64
ภาพที่ 4.8 ลักษณะของผิวตัวอย่างแก้วที่ผ่านการทดสอบการทนต่อสภาพอากาศ .....	66
ภาพที่ 4.9 ผลการจำแนกระดับการเกิดฝ้าของผิวแก้วหลังการเร่งสภาวะ .....	67
ภาพที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคผิวแก้วตัวอย่างแก้วหลังจากถูกนำไปเร่งสภาวะให้เกิดฝ้า .....	70
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของบริเวณที่เกิดฝ้าของตัวอย่าง D0 .....	72
ภาพที่ 4.12 ลักษณะของผิวแก้วหลังการเร่งสภาวะให้เกิดฝ้าเป็นเวลา 4 สัปดาห์ .....	74
ภาพที่ 4.13 ภาพผิวแก้วที่เกิดฝ้าจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM และ LEEM .....	79
ภาพที่ 4.14 สเปกตรัมของการวิเคราะห์ผิวแก้วบริเวณที่เกิดฝ้าเทียบกับพื้นผิวปกติ วิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM .....	80
ภาพที่ 4.15 ลักษณะทางจุลภาคของผิวแก้วหลังอบด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ .....	84
ภาพที่ 4.16 ผลการวัดสีของกระจกก่อนหลังการอบผิวโดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ( $\text{NaHSO}_4$ ) .....	85
ภาพที่ 4.17 ผลการวัดความสามารถในการส่องผ่านของแสง ของกระจกก่อน และหลังการอบผิวโดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต( $\text{NaHSO}_4$ ) .....	85
ภาพที่ 4.18 ผลการวัดสีของกระจกก่อนและหลังการอบผิวโดยใช้สารส้ม( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ) .....	86
ภาพที่ 4.19 ผลการวัดความสามารถในการส่องผ่านของแสงของกระจกก่อน และหลังการอบผิวโดยใช้สารส้ม( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ) .....	86
ภาพที่ 4.20 ผลการวัดสีของกระจกก่อนและหลังการอบผิวโดยใช้ซิงค์ซัลเฟต( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) .....	87
ภาพที่ 4.21 ผลการวัดความสามารถในการส่องผ่านของแสง ของกระจกก่อน และหลังการอบผิวโดยใช้ซิงค์ซัลเฟต( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) .....	87
ภาพที่ 4.22 ปริมาณของธาตุกลุ่มต่างๆที่ถูกชะออกมาจากโครงสร้างแก้วโดยเทคนิค AAS .....	89
ภาพที่ 4.23 ปริมาณของธาตุกลุ่มต่างๆที่ถูกชะออกมาจากกระจกก่อน และหลังการอบผิวกระจก .....	93
ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ของกระจกก่อนและหลังอบผิว .....	94
ภาพที่ 4.25 ค่าความแข็งของกระจกก่อนอบผิวและหลังอบผิวด้วยสารตั้งต้นชนิดต่างกัน .....	95

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime-silicate glass) เป็นแก้วชนิดที่มีกำลังการผลิตและถูกนำมาใช้มากที่สุดทั้งในต่างประเทศและในประเทศ เนื่องจากแก้วโซดาไลม์มีราคาถูก หลอมง่าย สามารถพบเห็นได้ทั่วไป เช่น ขวดน้ำ แก้วน้ำ กระจกนิรภัย (Safety Glass) กระจกกันกระสุน (Bullet Proof Glass) และกระจกเพื่อใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน มีองค์ประกอบหลักคือ ซิลิกา (Silica) หินปูน (Lime) และ โซดา (Soda)

สาเหตุที่แก้วโซดาไลม์ถูกนำมาเป็นบรรจุภัณฑ์ในหลากหลายประเภททั้งในรูปแบบของการนำมาบรรจุอาหาร เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง ยา และเวชภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากแก้วมีความโดดเด่นในด้านการทนต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสิ่งที่นำมาบรรจุได้มากกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ทั้งพลาสติกและโลหะ ทำให้อาหารหรือเครื่องดื่มที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์แก้วรสชาติไม่เปลี่ยนแปลง และไม่มีสารอันตรายปนเปื้อนลงในอาหารสามารถเก็บได้นาน มีความสวยงามหรูหรา สามารถเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้แก้วมีลักษณะโปร่งใสอันเนื่องมาจากแก้วมีสมบัติที่ยอมให้แสงขาวผ่านได้แต่ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้สามารถมองเห็นสิ่งของที่บรรจุอยู่ด้านในได้ และความสามารถที่ให้แสงส่องผ่านได้ทำให้แก้วชนิดโซดาไลม์ถูกนำมาผลิตเป็นกระจกอีกด้วย

ในประเทศไทยการผลิตแก้วชนิดโซดาไลม์มีทั้งโรงงานขนาดใหญ่และขนาดกลาง ซึ่งผลิตเพื่อการใช้ภายในประเทศและเพื่อการส่งออก แต่ในขณะที่แก้วมีการผลิตสูงแต่ในกระบวนการผลิตแก้วยังพบปัญหาอยู่หลายประการ เช่น การควบคุมความสม่ำเสมอของคุณภาพทั้งในเรื่องของสี ความใส ตาหนักจากเศษวัสดุที่ปนไฟจากเตา ความสามารถในการขึ้นรูปได้ของแก้วหลอม และการใช้พลังงานสูงในกระบวนการผลิต ซึ่งในส่วนของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการแก้ปัญหาในกระบวนการผลิตแก้วของโรงงานขนาดกลางแห่งหนึ่ง คือ ปัญหาเรื่องการเปลี่ยนแปลงของผิวแก้วหลังการผลิตที่มีปัจจัยกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสภาพแวดล้อม เกิดเป็นฝ้า (Foggy defect) อยู่บนผิวแก้วสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ซึ่งทำให้ไม่ผ่านการตรวจสอบตามมาตรฐานการควบคุมคุณภาพ และการเกิดตำหนิชนิดนี้เกิดขึ้นในตอนสุดท้ายหลังจากสิ้นสุดกระบวนการผลิตแล้ว จึงเป็นการแบกรับต้นทุนการผลิตทั้งกระบวนการผลิตสร้างความเสียหายอย่างมาก นอกจากนี้งานวิจัยยังครอบคลุมไปถึงการแก้ปัญหาเดียวกันนี้ที่เกิดขึ้นกับกระจกที่ผลิตจากแก้วชนิดโซดาไลม์อีกด้วย

การเกิดฝ้าบนผิวแก้วเกิดเนื่องมาจากปัจจัยส่งเสริมหลายประการ เช่น องค์ประกอบทางเคมีของแก้วนั้นๆ และปัจจัยจากสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง กล่าวคือ มีปริมาณน้ำในอากาศสูง ซึ่งในประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณที่มีอากาศร้อนชื้นบริเวณเส้นศูนย์สูตรทำให้มีความชื้นสัมพัทธ์สูงในช่วงฤดูฝน มีอากาศร้อนอบอ้าวในช่วงกลางวันทำให้เกิดช่วงของอุณหภูมิที่แตกต่างกันในช่วงกลางวันและกลางคืน อีกปัจจัยหนึ่งคือ ปริมาณแก๊สพิษชนิดต่างๆ ในอากาศโดยเฉพาะบริเวณที่เป็นเขตพื้นที่อุตสาหกรรมจะมีปริมาณแก๊สพิษสูง ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมานั้นส่งเสริมให้เกิดการเกิดตำหนิฝ้าได้เป็นอย่างดี

ดังนั้นการเพิ่มความสามารถในการทนทานต่อสภาพอากาศของแก้วและกระจกชนิดโซดาไลมนั้นจึงมีความสำคัญมาก ซึ่งจะนำไปสู่การแก้ปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วและกระจก ลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิต ช่วยลดพลังงานในการเผาขึ้นเป็นเป็นการประหยัดพลังงานและต้นทุนต่อหนึ่งหน่วยการผลิต นำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการแข่งขันทางการตลาดของอุตสาหกรรมแก้วและกระจกขนาดกลางได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาสูตรแก้วโซดาไลม์ที่มีความทนทานต่อสภาพอากาศได้สูงขึ้น
- 1.2.2 เพื่อหาวิธีการอบผิวแก้วและกระจกด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) เพื่อให้ได้แก้วและกระจกที่มีความทนทานต่อสภาพอากาศดีขึ้น
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ ของแก้วหลังจากปรับสูตรและผ่านการอบผิวแก้ว
- 1.2.4 เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวแก้วหลังผ่านการเก็บในภาวะความชื้นและอุณหภูมิที่ถูกควบคุม ซึ่งภาวะอากาศดังกล่าวเป็นภาวะที่ส่งเสริมให้ผิวแก้วเกิดการเปลี่ยนแปลง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนสูตรแก้วและผลจากการอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่อการเปลี่ยนแปลงของผิวแก้วอันเนื่องมาจากมีสภาพอากาศเป็นปัจจัยเร่งของบรรจุภัณฑ์แก้วและกระจกชนิดโซดาไลม์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การลดการเกิดตำหนิแบบฝ้าบนผิวแก้วบรรจุภัณฑ์และกระจกชนิดโซดาไลม์ ซึ่งจะทำให้สามารถลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตแก้ว ซึ่งนำไปสู่การลดต้นทุนในกระบวนการผลิตจากการทำความสะอาดผิวแก้วที่มีฝ้าก่อนส่งให้ลูกค้า สามารถควบคุมการผลิตให้อยู่ในระยะเวลา

ที่กำหนดได้ และนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เนื่องจากสามารถยืดอายุการใช้งานของบรรจุภัณฑ์แก้วและคงความใสของแก้วและกระจกได้นานขึ้น

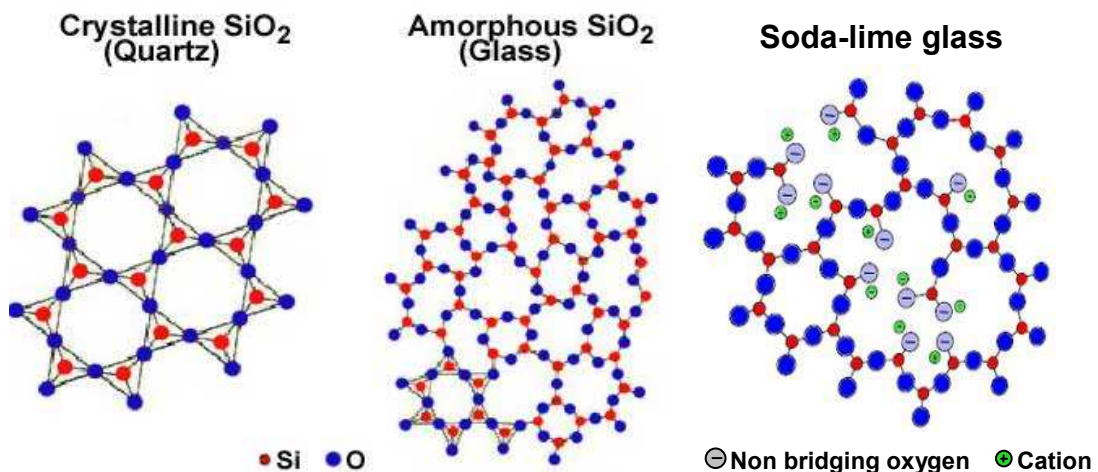
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แก้ว (Glass) [1]

คือ ของแข็งที่ประกอบด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่รวมกันโดยไม่มีระเบียบตัวอย่างมีระเบียบหรือวัสดุอสัณฐาน [2] แก้วเตรียมได้จากการหลอมสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงจนวัสดุบหลอมเป็นน้ำแก้วอยู่ในสถานะเป็นของเหลว จากนั้นถูกขึ้นรูปและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนองค์ประกอบของโครงสร้างแก้วไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเรียงตัวให้เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ดังนั้นของแข็งที่ได้จากการขึ้นรูปจากแก้วหลอมจึงเป็นลักษณะของแข็งที่ไม่มีผลึก แก้วมีสถานะเป็นสถานะแก้ว (Vitreous state) มีสมบัติกึ่งเสถียร (Metastable) มีพลังงานสะสมในโครงสร้างน้อยกว่าของเหลวแต่สูงกว่าของแข็งที่มีผลึก แต่แก้วสามารถเปลี่ยนกลายเป็นสารผลึกของแข็งได้โดยผ่านกระบวนการลดสภาพแก้ว (Devirification) เพื่อลดพลังงานสะสมในโครงสร้างเมื่อมีปัจจัยอื่นมากระตุ้น

แก้วมีลักษณะของโครงสร้างเป็นโครงข่ายร่างแหที่มีระเบียบพิสัยสั้น (Short range order) ตามที่แสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งแสดงภาพจำลองของโครงสร้างแก้ว 2 ชนิดคือ แก้วซิลิกา (Silica glass) และแก้วโซดาไลม์ (Soda-lime silicate glass) ซึ่งเป็นวัสดุอสัณฐานเปรียบเทียบกับผลึกควอตซ์ โดยโครงสร้างทั้งหมดมีองค์ประกอบหลักเหมือนกันคือ ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ )



ภาพที่ 2.1 ภาพจำลองการจัดเรียงตัวของโครงสร้างแร่ควอตซ์ แก้วซิลิกาและแก้วโซดาไลม์ [3-4]

ผลึกควอตซ์มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ มีระเบียบพิสัยยาว (Long range order) คือ มีการเรียงตัวของหน่วยเซลล์ (Unit cell) ที่มีความซ้ำกันต่อเนื่องทั้งโครงสร้าง ทำให้ผลึกควอตซ์มีความแข็งแรงมาก ส่วนโครงสร้างแก้วซิลิกาและแก้วโซดาไลม์มีลักษณะเป็นโครงข่ายร่างแห แต่แก้วโซดาไลม์จะมีองค์ประกอบนอกเหนือจากซิลิกาคือ มีธาตุในกลุ่มที่เป็น Modifier เช่น โซเดียม (Na) และแคลเซียม (Ca) แทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างสายโซ่ซิลิกา ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมตัวของแก้ว

แก้วเมื่อแข็งหลังจากการเย็นตัวของแก้วหลอมจะมีลักษณะอยู่ตัวเป็นเนื้อเดียว มีสมบัติที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ มีความแข็งแต่เปราะ โปร่งใสและมีรอยแตกที่ละเอียดคม สมบัติของแก้วสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการผสมวัตถุดิบตัวเติมอื่นๆ ลงในสูตรแก้ว หรือการปรับสภาพผิวแก้วด้วยวิธีต่างๆ แก้วยังเป็นวัสดุที่น่าสนใจเพราะสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำใหม่ได้ ทั้งการนำมากลับมาใช้ได้เลยโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการใดๆ รวมไปถึงการนำกลับมาหลอมใหม่โดยใช้เศษแก้วในรูปแบบของวัตถุดิบ นอกจากนั้นยังสามารถนำเศษแก้วไปใช้ได้ในงานอื่นๆ เช่นในงานวิศวกรรมก่อสร้าง เช่น ทำอิฐมวลเบา เป็นส่วนผสมของคอนกรีต เป็นต้น

## 2.1.1 ประเภทของผลิตภัณฑ์แก้วจำแนกตามการนำไปใช้งาน

### 2.1.1.1 แก้วบรรจุภัณฑ์ (Container glass) [5-6]

แก้วบรรจุภัณฑ์ คือ แก้วที่ใช้เพื่อการห่อหุ้มผลิตภัณฑ์ภายใน เพื่อให้สะดวกต่อการขนส่ง เพื่อเก็บรักษาสิ่งที่อยู่ภายในให้ปลอดภัยและคงคุณภาพให้ได้มากที่สุดก่อนและระหว่างการใช้งาน การผลิตแก้วบรรจุภัณฑ์มีสัดส่วนการผลิตคิดเป็น 65% ของอุตสาหกรรมการผลิตแก้วทั้งหมด [7]

#### ข้อดีของการใช้แก้วเป็นบรรจุภัณฑ์

- แก้วมีความทนทานต่อสารเคมีและเฉื่อยต่อการเกิดปฏิกิริยากับสิ่งของหรือผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ ยกเว้น กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และสารเคมีที่มีความเป็นด่างสูง จึงนิยมใช้เป็นภาชนะบรรจุเภสัชภัณฑ์ (Pharmaceutical Product)
- แก้วป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้ดี จึงทำให้รักษากลิ่นของผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ภายในได้ดี เช่น ขวดน้ำมันหอมระเหย ขวดน้ำหอม และแอมพูล (Ampule) สำหรับบรรจุยาฉีด เป็นบรรจุภัณฑ์แก้วที่มีลักษณะคือ ไม่มีฝาปิดแต่มีการหลอมแก้วปิดปากจุก จึงสามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและก๊าซได้อย่างสมบูรณ์



### ข้อดีของการใช้แก้วเป็นบรรจุภัณฑ์ (ต่อ)

- แก้วทนทานต่ออุณหภูมิสูงได้มากกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ จึงสามารถใช้บรรจุผลิตภัณฑ์ที่ต้องทำให้ปราศจากเชื้อได้ ทั้งการใช้ความร้อนแห้ง (Dry heat) และโดยวิธีอโตคลอฟิง (Autoclaving) ที่มีการทำในหม้อนึ่งอัดไอ โดยที่แก้วไม่เสียรูป และมีสิ่งที่เจือปนออกมากับผลิตภัณฑ์น้อยกว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดอื่นๆ
- แก้วสามารถคงรูปร่างไว้ได้เหมือนเดิมแม้จะใช้เป็นระยะเวลาานาน ซึ่งเมื่อใช้นานขึ้นจะไม่เสื่อมคุณภาพไปจนทำให้มีกลิ่นหรือรสปะปนไปกับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ จึงสามารถนำมาใช้ซ้ำ (Reuse) ได้หลายครั้ง เพียงแค่ผ่านการล้างทำความสะอาด
- แก้วใสสามารถทำให้มองเห็นสิ่งที่บรรจุอยู่ภายในได้ จึงสามารถตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายในได้ง่ายและมีความแวววาวทำให้ดูสวยงาม หรูหรา
- แก้วสามารถนำกลับมาหลอมซ้ำทำเป็นภาชนะใหม่ได้ (Recycle) ไม่ก่อให้เกิดปัญหาขยะ โดยที่สมบัติของแก้วไม่ลดลงตามจำนวนครั้งที่นำกลับมาใช้ใหม่

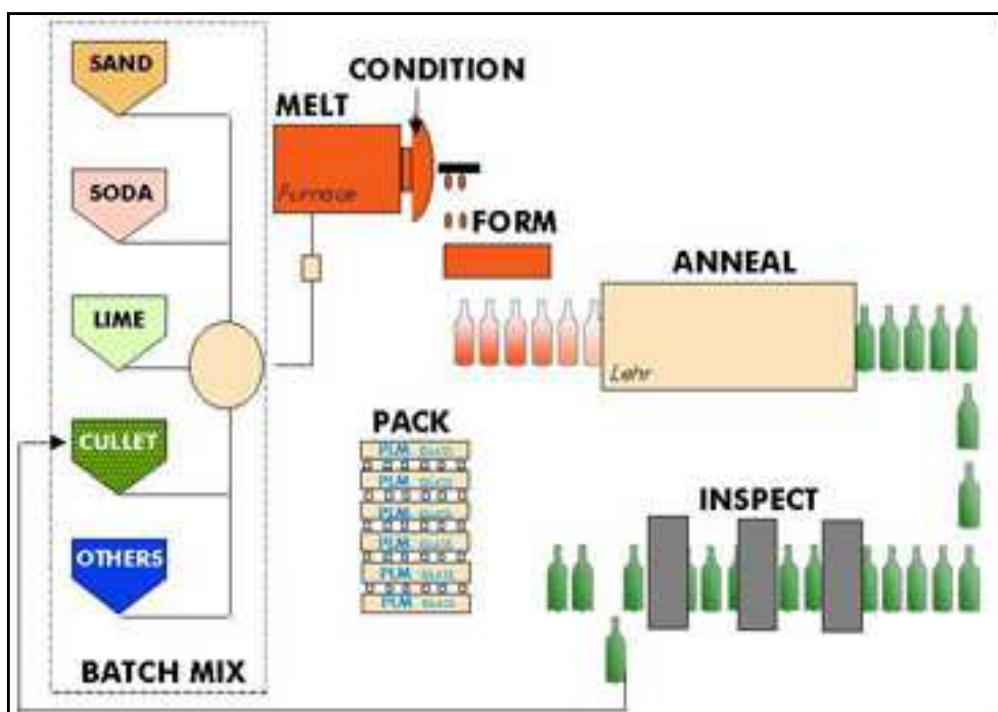
### ข้อเสียของการใช้แก้วเป็นบรรจุภัณฑ์

- แก้วมีน้ำหนักมากทำให้สิ้นเปลืองต้นทุนเรื่องการขนส่ง
- แก้วมีความเปราะทำให้แตกหักเสียหายได้ ทำให้ต้องใช้ความระมัดระวังมากขึ้นในการขนย้าย
- ถ้าใช้บรรจุของเหลวที่ไม่เหมาะสมอาจมีค้างหรือขึ้นส่วนที่ละลายหลุดออกมาปะปนได้

### กระบวนการผลิตแก้วบรรจุภัณฑ์

กระบวนการผลิตแก้วบรรจุภัณฑ์แสดงในภาพที่ 2.2 เริ่มจากการขังและผสมวัตถุดิบให้เข้ากันตามอัตราส่วนที่ต้องการและผสมกับเศษแก้ว แล้วจึงนำเข้าสู่เตาหลอมแก้วที่มีอุณหภูมิสูง จากนั้นวัตถุดิบจะเกิดการหลอมตัวเกิดการสลายตัวจนกลายเป็นของเหลว หรือน้ำแก้วที่มีความสามารถในการกักความร้อนสูง เนื่องจากมีความร้อนสูงและมีสมบัติเป็นกรด ดังนั้นผนังเตาหลอมจึงต้องทำจากวัสดุทนไฟที่มีสมบัติพิเศษที่สามารถทนการกักความร้อนดังกล่าวได้ เมื่อแก้วหลอมจนไม่มีของแข็งเจือปนแล้วน้ำแก้วจะไหลออกจากเตาหลอมแก้วแล้วถูกปรับสภาพให้เหมาะกับการขึ้นรูปที่ฟอร์ฮาร์ท (Forehearth) เป็นขั้นตอนที่ทำให้น้ำแก้วเป็นเนื้อเดียวกันและลดอุณหภูมิของน้ำแก้วลงจากอุณหภูมิหลอมเหลว (1400 – 1500 °C) จนทำให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม

ก่อนกระบวนการขึ้นรูป (ประมาณ  $1150^{\circ}\text{C}$ ) หลังจากนั้นน้ำแก้วที่เริ่มเย็นตัวลงจะมีความหนืดมากขึ้น จะถูกตัดออกเป็นท่อนเมื่อน้ำแก้วไหลผ่านรูปเปิดได้เป็น ก้อนแก้ว (Gob) ซึ่งจะเตรียมให้มีปริมาตรสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาด ความหนา และรูปร่างสม่ำเสมอ จากนั้นลำเลียงไปที่เครื่องขึ้นรูปโดยผิวหน้าของระบบลำเลียงที่มักทำเป็นโลหะ โดยที่ผิวสัมผัสจะถูกเคลือบด้วยแกรไฟต์เพื่อลดแรงเสียดทาน เพื่อลดสัมประสิทธิ์ของการเสียดทานและทำให้เป็นฉนวนจะส่งผลในการลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างก้อนแก้วและระบบการลำเลียงลง ทำให้แก้วมีอุณหภูมิลดลงไม่มากยังสามารถขึ้นรูปได้ กระบวนการขึ้นรูปมี 2 วิธี คือ เป่าและเป่า (Blow and blow) และอัดและเป่า (Press and blow) เมื่อขึ้นรูปเสร็จขวดแก้วที่ร้อนอยู่จะถูกส่งไปอบอ่อนในเตาอบเพื่อลดความเค้นในเนื้อ ที่เตาอบอ่อนอุณหภูมิของขวดแก้วจะลดลงประมาณ  $50 - 100^{\circ}\text{C}$  ในขั้นการอบอ่อนจะคงอุณหภูมิไว้ที่ประมาณ  $570$  องศาเซลเซียสเป็นเวลา  $2 - 3$  นาที แล้วจึงค่อยๆ ลดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยการลดอุณหภูมิดังกล่าวใช้เวลาประมาณ  $30 - 45$  นาที ในขั้นสุดท้ายของการบรรจุหีบห่อบางโรงงานจะนำขวดแก้วไปผ่านกรรมวิธีทางผิว (Surface treatment) โดยการทำให้ผิวนอกสิ้นป้องกันผิวนอกไม่ให้เกิดรอยขีดข่วนที่เกิดจากการเสียดสีหรือสัมผัสกันของขวดแก้วเองหรือขวดแก้วกับส่วนที่เป็นส่วนของเครื่องจักรที่ทำจากโลหะ หรือเพื่อให้ขวดแก้วมีความทนทานต่อสารเคมีมากขึ้น



ภาพที่ 2.2 กระบวนการผลิตแก้วบรรจุภัณฑ์

### 2.1.1.2 กระฉก [8]

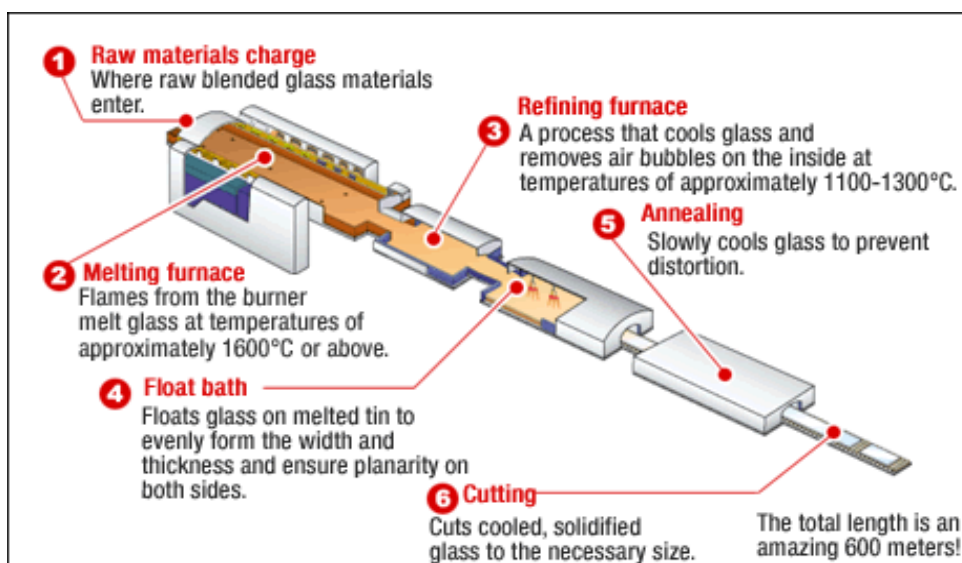
กระฉก คือ แก้วซึ่งมีองค์ประกอบของวัตถุดิบไม่ต่างจากองค์ประกอบของแก้วบรรจุภัณฑ์ แต่มีลักษณะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน กระฉกถูกนำมาใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น อุตสาหกรรมการก่อสร้าง อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมเฟอร์นิเจอร์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า การผลิตกระฉกนับเป็นสัดส่วนการผลิต 30% ในกลุ่มอุตสาหกรรมแก้วทั้งหมด [7] การผลิตกระฉกแบ่งเป็นชนิดใหญ่ๆ 2 ชนิด ตามวิธีการผลิต

- กระฉกโฟลต (Float glass)

กระฉกโฟลตมีความโปร่งใสสามารถมองเห็นได้ชัดแจ้ง โดยทั่วไปกระฉกโฟลตยอมให้แสงผ่านได้ร้อยละ 75-92 โดยขึ้นกับความหนาของกระฉก ให้ภาพสะท้อนที่สมบูรณ์ไม่บิดเบี้ยวหลอกตา รูปแบบของการนำไปใช้งาน เช่น กระฉกลามิเนต กระฉกฉนวน เป็นต้น

- กระฉกแผ่น (Sheet glass)

กระฉกแผ่นถูกนำมาใช้ในงานขนาดเล็ก เช่น หน้าต่าง กรอบรูป แผ่นกระฉกปูโต๊ะ มีความเรียบของผิวกระฉกน้อยกว่ากระฉกโฟลต



ภาพที่ 2.3 กระบวนการผลิตกระฉก [9]

#### กระบวนการผลิตกระฉก

แสดงในภาพที่ 2.3 ขั้นตอนส่วนใหญ่ของกระบวนการผลิตจะเหมือนกับการผลิตแก้วบรรจุภัณฑ์ต่างกันในส่วนของการขึ้นรูป กระฉกจะมีการขึ้นรูปโดยให้แก้วหลอมลอยบนอ่างดีบุกหลอมเหลว (Tin bath) เพื่อให้ผิวแก้วแผ่เรียบเป็นแผ่น การที่กระฉกลอยอยู่บนอ่างดีบุกขณะที่แก้ว

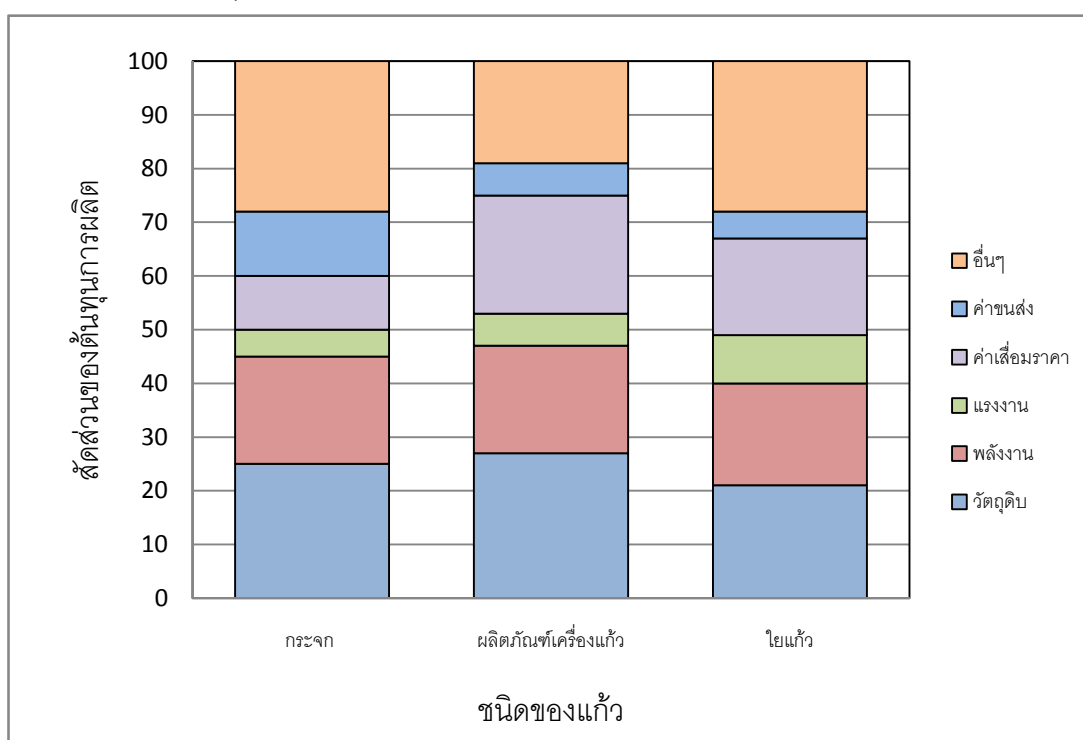
ยังร้อนทำให้ไอออนของดีบุกแทรกตัวเข้าไปในผิวกระจกได้บางส่วนซึ่งส่งผลดีทำให้กระจกสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ

### 2.1.1.3 ผลิตภัณฑ์อื่นๆ ของแก้ว

แก้วถูกนำไปใช้ได้หลากหลายรูปแบบ แก้วชนิดอื่นๆ ที่นอกเหนือจากการกล่าวมาข้างต้น คิดเป็นสัดส่วนการผลิตร้อยละ 10 เป็นผลิตภัณฑ์ประเภท หลอดภาพทีวี หลอดไฟฟ้า เลนส์แก้ว เส้นใยแก้วฉนวน เส้นใยแก้วเสริมแรงและอื่นๆ

### 2.1.2 โครงสร้างต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมแก้ว [7]

อุตสาหกรรมแก้วและกระจกเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ต้นทุนและเทคโนโลยีการผลิตขั้นสูง วัตถุดิบเป็นต้นทุนที่สำคัญที่สุดร้อยละ 20-27 ของต้นทุนรวม และมีสัดส่วนของพลังงานเป็นร้อยละ 10-20 ส่วนอื่นๆ แสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 แผนภาพแสดงต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมแก้ว

### 2.1.3 ประเภทของผลิตภัณฑ์แก้วจำแนกตามองค์ประกอบหลักของแก้ว [10]

แก้วมีสมบัติที่ต่างกันเนื่องมาจากองค์ประกอบภายในต่างกัน สามารถจำแนกชนิดของแก้วตามองค์ประกอบทางเคมีได้ดังนี้

### 2.1.3.1 แก้วซิลิกา (Silica glass)

แก้วซิลิกาเป็นแก้วที่มีซิลิคอน ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นธาตุโครงข่าย (Network former) มากกว่าร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบวัตถุดิบหลักคือ แร่ควอตซ์ (Quartz) ทำการหลอมที่อุณหภูมิสูงกว่า 1900 องศาเซลเซียส ในระบบที่เป็นสุญญากาศเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศในเนื้อแก้ว เนื่องจากแก้วหลอมชนิดนี้จะมีความหนืดสูง แก้วซิลิกามีความแข็งแรงและมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำทำให้ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันได้ดี จึงนำมาใช้เป็นแก้วในงานของวัสดุทนไฟ เเลนส์ใช้กับกล้องโทรทรรศน์หรือกล้องถ่ายรูป แต่แก้วซิลิกามักเกิดตำหนิขุ่นมัวอันเนื่องมาจากการสัมผัสกับธาตุโซเดียม (Na) ในเกลือ (NaCl) ที่อยู่บนนิ้วมือ ซึ่งทำให้เกิดการลดสภาพแก้วขึ้น เกิดเป็นผลึกขนาดเล็กเรียงตัวเป็นเส้นเหมือนขนแมว

### 2.1.3.2 แก้วโซดาไลม์ (Soda-lime glass)

แก้วโซดาไลม์มีวัตถุดิบหลักคือ ทราย (Sand) โซดาแอส (Soda ash) และหินปูน (Lime) หรือหินโดโลไมต์ (Dolomite) จึงทำให้แก้วมีส่วนประกอบออกไซด์หลัก คือ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  และ  $\text{CaO}$  แก้วโซดาไลม์เป็นแก้วชนิดที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ขวดแก้ว แก้วน้ำ กระจก เป็นต้น แก้วชนิดนี้สามารถขึ้นรูปเพื่อทำบรรจุภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ได้เพราะเมื่อหลอมจะได้น้ำแก้วที่มีความหนืดน้อย แต่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงทำให้ไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน

### 2.1.3.3 แก้วบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass)

แก้วบอโรซิลิเกตมีวัตถุดิบหลัก คือ ทราย กับ บอแรกซ์ (Borax  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) ทำให้แก้วมีธาตุซิลิคอน (Si) และโบรอน (B) เป็นธาตุก่อโครงข่าย (Glass former) มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำจึงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของอุณหภูมิได้ดี จึงนิยมนำมาใช้เป็นเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ และภาชนะสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

### 2.1.3.4 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate glass)

แก้วอะลูมิโนซิลิเกตมีวัตถุดิบหลัก คือ อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำจึงทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน และมีจุดอ่อนตัวของแก้ว (Softening point) สูง จึงนิยมนำมาทำภาชนะหุงต้มที่ต้องสัมผัสกับเปลวไฟหรือแหล่งให้ความร้อนโดยตรง

### 2.1.3.5 แก้วตะกั่ว (Lead glass) หรือแก้วคริสตัล (Crystal glass)

แก้วตะกั่วมีตะกั่วออกไซด์ (PbO) เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ซึ่งจะส่งผลให้แก้วมีคุณสมบัติในการหลอมลดลง แต่มีน้ำหนักมากขึ้นและมีดัชนีหักเหแสงมากขึ้นทำให้แก้วมีประกายแวววาวสวยงาม ถูกนำมาเป็นเครื่องประดับและของตกแต่งบ้านจึงมีราคาแพง และใช้เป็นปริซึม (Prism) ในอุปกรณ์ทางแสงต่างๆ

## 2.1.4 วัตถุดิบในการผลิตแก้วโซดาไลม์ [11]

### 2.1.4.1 ททรายแก้ว (SiO<sub>2</sub>)

ททรายแก้วที่นำมาใช้ควรมีขนาดประมาณ 20-200 เมช มีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อย่างน้อยร้อยละ 99.50 และต้องมีปริมาณเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) น้อยกว่าร้อยละ 0.04 ในททรายแก้วอาจมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และโครเมียมออกไซด์ (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งออกไซด์ของเหล็กออกไซด์และโครเมียมจะส่งผลต่อสีของแก้วทำให้แก้วมีสีเขียว และแก้วอาจมีสีเหลืองหากททรายแก้วที่นำมาใช้มีส่วนประกอบของคาร์บอนที่ปนเปื้อนมาในรูปอินทรีย์วัตถุมาก

### 2.1.4.2 หินปูน (CaCO<sub>3</sub>)

เป็นวัตถุดิบที่ให้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีบทบาทเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมตัวของแก้ว แต่มีข้อดีว่าการเติมเฉพาะซิลิกาและโซดาแอช เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์จะช่วยทำให้แก้วละลายน้ำลดลง

### 2.1.4.3 โดโลไมต์ (CaMg)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> [12-13]

เป็นวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซึ่งเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการหลอม แต่สิ่งที่ควรระวังของการใช้โดโลไมต์ในสูตรแก้วคือ อาจทำให้แก้วมีสีเขียว เนื่องจากมีเหล็กออกไซด์ที่ปนเปื้อนมามากเกินไป

### 2.1.4.4 อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

เป็นวัตถุดิบที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงทางเคมีและเพิ่มการทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันของแก้วได้มากขึ้น เนื่องจาก Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> มีบทบาทในการทำให้โครงข่ายแก้วมีความแข็งแรงของเพิ่มขึ้น

#### 2.1.4.5 โซดาแอซ ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

เป็นวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของ  $\text{Na}_2\text{O}$  ที่สามารถช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมตัวของแก้วทำให้ใช้พลังงานในการหลอมลดลง น้ำแก้วที่ได้มีความหนืดน้อยลงทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ง่ายขึ้น

#### 2.1.4.6 สารไล่ฟองอากาศ (Refining agent)

แก้วเมื่อถูกหลอมเป็นของเหลวจะมีความหนืดสูง ดังนั้นหากเกิดฟองขนาดเล็กในน้ำแก้ว ฟองดังกล่าวจะไม่สามารถลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของน้ำแก้วได้ โซเดียมไนเตรท ( $\text{NaNO}_3$ ) และ โซเดียมซัลเฟต ( $\text{NaSO}_4$ ) สามารถช่วยกำจัดฟองขนาดเล็กที่อยู่ในน้ำแก้ว โดยใช้กลไกการทำให้เกิดฟองขนาดใหญ่ขึ้นในน้ำแก้ว จากนั้นฟองขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจะไปรวมตัวกับฟองขนาดเล็กแล้วลอยขึ้นสู่ด้านบนแก้วหลอมเหลว

#### 2.1.4.7 สารฟอกสี (Decolourizer)

เป็นวัตถุดิบที่ช่วยเพิ่มความใสให้กับแก้วและทำให้แก้วไม่มีสีที่เกิดมาจากการปนเปื้อนของวัตถุดิบ เช่น ซีลีเนียมออกไซด์ ( $\text{SeO}_2$ ) และโคบอลต์ออกไซด์ ( $\text{CoO}$ ) ถูกใช้เพื่อฟอกสีเขียวที่เกิดจากมีปริมาณของเหล็กออกไซด์เจือปนอยู่สูง แต่วัตถุดิบชนิดนี้มักมีราคาแพง และมีข้อควรระวังหลายประการ เช่น หากใช้ซีลีเนียมออกไซด์มากเกินไปจะทำให้แก้วมีความใสลดลง

#### 2.1.4.8 สารให้สี (Colouring agent)

เป็นวัตถุดิบที่ทำให้แก้วมีสีตามต้องการมักเป็นจำพวกโลหะทรานซิชัน เช่น สนิมเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ทำให้ขวดแก้วมีสีชา (Amber) เนื่องจากเป็นตัวให้ออกซิเจน โครมิกออกไซด์ ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) ทำให้แก้วมีสีเขียว เป็นต้น

#### 2.1.4.9 เศษแก้ว (Cullet)

เศษแก้วถูกใช้เพื่อเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาในการหลอมละลายของวัตถุดิบตัวอื่นๆ ขนาดของเศษแก้วที่นำมาใช้ควรอยู่ในช่วงระหว่าง 150-420 ไมครอน และจะต้องน้อยกว่า 1,000 ไมครอน เนื่องจากถ้าขนาดใหญ่เกินไปอาจหลอมละลายไม่หมด ทำให้เกิดเป็นตำหนิในภายหลังการขึ้นรูปได้

## 2.1.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับโครงสร้างแก้ว

### 2.1.5.1 ทฤษฎีของ V.M.Goldschmidt [10]

ธาตุที่สามารถนำออกไซด์มาทำเป็นแก้วได้โดยไม่ต้องผสมด้วยสารอื่น คือ ธาตุซึ่งมีไอออนที่มีประจุบวก หรือ แคทไอออน (Cation) ที่เมื่อถูกล้อมรอบด้วยออกซิเจนไอออนที่มีประจุเป็นลบ หรือเรียกว่า แอนไอออน (Anion) เกิดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral triangle) หรือรูปพีรามิดฐานสามเหลี่ยม (Tetrahedron) เช่น ซิลิคอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งถูกนำมาทำเป็นแก้วซิลิกา (Silica glass) โดยไม่ต้องมีการผสมสารอื่นๆ การเกิดเป็นรูปทรงเรขาคณิตหลายด้าน (Polyhedron) ที่แตกต่างกันนั้นขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างรัศมีของไอออนบวกที่ถูกล้อมรอบกับรัศมีของออกซิเจนไอออน

### 2.1.5.2 ทฤษฎีของ W.H Zachariasen [14]

ธาตุที่เป็นธาตุสร้างโครงข่าย (Network former) ต้องมีสมบัติดังนี้

- ะตอมของธาตุนั้นต้องเชื่อมต่อกับอะตอมของออกซิเจนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 อะตอม
- ะตอมของธาตุนั้นต้องมีอะตอมของธาตุนั้นล้อมรอบ 3 หรือ 4 อะตอม
- ะตอมของธาตุนั้นเมื่อมีออกซิเจนอะตอมมาล้อมรอบแล้วเกิดเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม ซึ่งการเชื่อมต่อกันของรูปหลายเหลี่ยมต้องเกิดจากการเชื่อมต่อด้านมุมเท่านั้น
- รูปหลายเหลี่ยมที่เกิดขึ้นจากการที่ออกซิเจนอะตอมล้อมรอบอะตอมของธาตุนั้น ต้องมีการเชื่อมต่อกันที่มุมอย่างน้อยจำนวน 3 มุม

จากทฤษฎีของซาซาเรียนเซน ซิลิคอน (Si) และโบรอน (B) จึงถูกจัดอยู่ในกลุ่มธาตุที่ก่อโครงข่ายแก้ว

### 2.1.5.3 ทฤษฎีของ K.H.Sun [15]

การจำแนกบทบาทหน้าที่ของอะตอมต่างๆในโครงสร้างแก้ว จำแนกโดยใช้ค่าความแข็งแรงของพันธะเดี่ยว (Bond strength) ระหว่างธาตุนั้นกับออกซิเจนอะตอม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานสลายพันธะ (Dissociation energy,  $E_d$ ) หารด้วยจำนวนอะตอมของออกซิเจนที่ล้อมรอบอะตอมของไอออนบวกนั้น หรือ เลขโคออดิเนชัน (Coordination number) โดยธาตุที่เป็น Network former มีหน้าที่สร้างโครงข่ายของแก้วต้องมีค่าความแข็งแรงของพันธะของธาตุนั้นกับ



ออกซิเจนมากกว่า 80 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม กรณีที่ของธาตุที่เป็น Intermediate ซึ่งมีบทบาทก้ำกึ่งระหว่างธาตุที่เป็น Network former และธาตุที่เป็น Modifier จะมีค่าความแข็งแรงของพันธะของธาตุนั้นกับออกซิเจนอยู่ระหว่าง 80-50 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม และในกรณีที่ธาตุนั้นที่มีบทบาทเป็นตัวช่วยตัดแปลงโครงข่าย (Modifier) จะมีค่าความแข็งแรงของพันธะของธาตุนั้นกับออกซิเจนน้อยกว่า 50 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติต่างๆ ของออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของแก้ว [16]

บทบาทในโครงสร้างแก้ว	ธาตุ	ประจุ	พลังงานสลายพันธะ M-O (Dissociation energy) กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม	เลขโคออดิเนชัน	ค่าความแข็งแรงพันธะ M-O (Bond strength) กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม
Network former	Si	4	424	4	106
	B	3	356	3	89
	Al	3	402-317	4	101-79
	Zr	4	485	6	81
Intermediate	Al	3	317-402	6	53-67
	Zr	4	485	8	61
	Zn	2	144	2	72
Modifier	Mg	2	222	6	37
	Zn	2	144	4	36
	Ca	2	257	8	32
	Na	1	120	6	20

## 2.1.6 โครงสร้างและส่วนประกอบของแก้ว [6]

แก้วมีองค์ประกอบเป็นออกไซด์ของธาตุต่างๆ ซึ่งหากพิจารณาในด้านบทบาทในโครงสร้างของแก้วแล้วสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

### 2.1.6.1 Network former

ธาตุซึ่งออกไซด์สามารถเกิดการเรียงตัวเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายหลักของโครงสร้างแก้ว โดยที่ออกซิเจนอะตอมทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโดยการสร้างพันธะเคมี เช่น ธาตุซิลิคอน (Si) ธาตุเยอรมาเนียม(Ge) ซึ่งถ้านำออกไซด์ของธาตุเหล่านี้เพียงอย่างเดียวโดยไม่ผสมธาตุตัวอื่นๆมาหลอมจนกลายเป็นของเหลว โดยใช้อุณหภูมิที่สูงมากในการหลอมเนื่องจากพันธะระหว่างซิลิคอนและออกซิเจน (Si-O bond) เป็นพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงมากจึงทำให้มีจุดหลอมเหลวสูงจากนั้นทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นของแข็งจะทำให้เกิดเป็นแก้วได้

### 2.1.6.2 Intermediate

ธาตุซึ่งออกไซด์ของมันสามารถเกิดโครงข่ายร่วมกับโครงข่ายของแก้วที่เกิดจากธาตุในกลุ่ม Network former ได้ โดยเกิดเป็นพันธะโควาเลนต์ เช่นเดียวกับพันธะ Si-O จึงทำให้แก้วมีสมบัติสามารถทนทานต่อสารเคมีได้ดี ในขณะที่เดียวกันสามารถทำหน้าที่เป็นธาตุดัดแปลงโครงข่าย (Modifier) ได้เช่นกัน แต่ถ้านำออกไซด์ของธาตุกลุ่มนี้เพียงอย่างเดียวโดยไม่ผสมออกไซด์ของธาตุในกลุ่มอื่นมาทำให้หลอมแล้วทำให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็วจะได้ของแข็งที่มีผลึกไม่เกิดเป็นแก้ว ธาตุที่แสดงบทบาทเป็น Intermediate มักเป็นธาตุมีลติวาเลนต์ (Multivalent Elements) ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ธาตุเซอร์โคเนียม (Zr) และซิงค์ (Zn) เป็นต้น

### 2.1.6.3 Modifier

ธาตุกลุ่มนี้ได้แก่ โลหะโมโนวาเลนต์ (Monovalent Metals) หรือ พวกอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม (Na) และ โพแทสเซียม (K) ส่วนกลุ่มของโลหะไดวาเลนต์ (Divalent Metals) หรือ พวกอัลคาไลเอิร์ท เช่น แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ในกลุ่มของโลหะโมโนวาเลนต์ธาตุกลุ่มนี้ไม่เกิดพันธะร่วมกับโครงข่ายหลักของแก้ว เนื่องจากไอออนมีขนาดใหญ่จึงไม่สามารถแทรกเข้าไปอยู่ในโครงข่ายได้ ธาตุชนิดนี้ทำโครงข่ายสายโซ่มีความต่อเนื่องลดลง เนื่องจากไปสร้างพันธะกับธาตุออกซิเจนซึ่งแต่เดิมทำหน้าที่เชื่อมระหว่างอะตอมของซิลิกา 2 อะตอมจนทำให้โครงข่ายแก้วนั้นแตกออก จึงทำให้อุณหภูมิหลอมตัวของแก้วลดลง เมื่อหลอมเหลวน้ำแก้วจะมีความหนืดลดลง แต่จะทำให้มีความคงทนทางเคมีลดลงด้วย ในกลุ่มของโลหะไดวาเลนต์จะไม่ทำให้พันธะ Si-O แตกออกแต่จะเกิดพันธะร่วมกับโครงสร้างแก้ว เกิดการแทนที่ของพันธะโควาเลนต์

(Si-O) ด้วยพันธะอิเล็คโตรวาเลนซ์ระหว่างแมกนีเซียมและออกซิเจน (Mg-O) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าเดิมและของอะตอมชนิดนี้มีขนาดใหญ่จึงทำให้โครงสร้างแก้วบิดเบี้ยวไปจากเดิมด้วยส่งผลให้แก้วมีจุดหลอมเหลวต่ำลง แต่ความคงทนทางเคมีจะลดลงน้อยกว่าการแทนที่ด้วยโลหะกลุ่มโมโนวาเลนซ์ ออกไซด์ของธาตุกลุ่ม Modifier นี้หากนำมาหลอมเหลวโดยไม่ผสมกับออกไซด์ของธาตุกลุ่มอื่นเมื่อทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะไม่เกิดเป็นแก้ว

## 2.1.7 สมบัติของแก้ว

### 2.1.7.1 สมบัติด้านความแข็งแรง (Mechanical Strength) [6]

แก้วเป็นวัสดุที่มีความแข็งแต่เปราะ แก้วมีความแข็งแรงเนื่องจากองค์ประกอบภายในแก้วมีซิลิกาเป็นโครงข่าย ซึ่งพันธะของซิลิกากับออกซิเจนเป็นพันธะโควาเลนซ์ที่มีความแข็งแรงสูงมาก ความแข็งแรงของพันธะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงของแก้วโดยรวม แก้วเป็นวัสดุที่ไม่เปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร (Elastic material) ในกระบวนการผลิตขวดแก้วสามารถปรับปรุงให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้โดยกระบวนการที่ทำขึ้นในขั้นตอนก่อนเข้าเตาอบอ่อนเรียก “Hot-end treatment” เช่น วิธีไทเทเนียม (Titanizing) โดยการใช้ก๊าซสแตนนัสเตตราคลอไรด์ ( $\text{SnCl}_4$ ) หรือไทเทเนียมเตตราคลอไรด์ ( $\text{TiCl}_4$ ) ที่มีส่วนประกอบของดีบุก (Sn) และไทเทเนียม (Ti) พันบริเวณผิวของขวดในขณะที่ขวดแก้วมีความร้อนสูงหลังจากถูกถอดออกจากแม่แบบใหม่ๆ หลังจากนั้นจึงนำไปเข้าเตาอบอ่อน จะทำให้เกิดชั้นเคลือบบางๆ ของโลหะออกไซด์ซึ่งจะทำให้ผิวของแก้วมีความแข็งแรงมากขึ้นสามารถลดการเกิดรอยขีดข่วนและลดความเสียหายระหว่างผิวของขวดแก้วได้ การลดรอยขีดข่วนขนาดเล็กที่ผิวแก้วจะนำไปสู่การลดสาเหตุที่ทำให้ขวดแก้วแตกได้ง่ายขึ้นด้วย อีกวิธีหนึ่งเป็นวิธีที่ทำหลังกระบวนการอบอ่อนซึ่งเรียกว่า “Cold-end treatment” ซึ่งขั้นตอนนี้จะทำในขณะที่แก้วมีอุณหภูมิต่ำลงแล้ว ทำโดยการฉีดพ่นน้ำยาเคลือบผิวแก้วทำให้เกิดการหล่อลื่นช่วยในการลดการสึกกร่อนของผิวแก้ว สารที่นำมาฉีดพ่นได้แก่ พอลิเอทิลีนออกไซด์ไกลคอล (Polyethylene oxide glycol) และไอโอโนเมอร์ (Ionomer)

### 2.1.7.2 สมบัติด้านความทนทานต่อสารเคมีของแก้ว (Chemical Durability) [6]

แก้วเป็นวัสดุที่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสิ่งที่นำมาบรรจุได้น้อยเมื่อเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากวัสดุชนิดอื่น แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติการทนทานต่อสารเคมีนั้นขึ้นกับปัจจัยแวดล้อมหลายประการ เช่น องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว สมบัติทางเคมีของสิ่งที่นำมาบรรจุ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความดัน และอื่นๆ เช่นในกรณีของกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) จะเกิดปฏิกิริยากับแก้วได้เร็วและเป็นปฏิกิริยาที่มีความรุนแรงแม้จะเกิดที่อุณหภูมิห้อง ในกรณีของน้ำและ

ของเหลวที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบสามารถเกิดปฏิกิริยากับแก้วได้แต่มีความรุนแรงน้อยกว่ากรดไฮโดรฟลูออริก ขวดแก้วที่บรรจุสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบสามารถเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนกับเนื้อแก้ว โดยที่ไฮโดรเจนไอออน และหรือ ไฮโดรเนียมไอออน ซึ่งได้จากการการรวมตัวกันระหว่างไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) กับโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) ตามปฏิกิริยา  $H^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+$  เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของโมโนวาเลนต์แคทไอออนหรือไดวาเลนต์แคทไอออนที่ทำหน้าที่เป็น Modifier ในโครงสร้างแก้วจึงเกิดเป็นชั้นบางๆ ที่ผิวแก้วที่เรียกว่าไฮเดรตซิลิกา (Hydrated silica) ซึ่งชั้นดังกล่าวสามารถป้องกันการแพร่ออกมาของด่างที่เป็น Modifier ในเนื้อแก้วที่อยู่ลึกเข้าไปได้ในกรณีเมื่อแคทไอออนละลายออกมาแล้วทำให้สารละลายที่บรรจุมีสมบัติเป็นกรดหรือเป็นกลาง และกรณีที่มีปริมาณของสารละลายบรรจุอยู่ในขวดแก้วมากทำให้เมื่อแคทไอออนละลายออกมาแล้วมีความเข้มข้นต่ำ สารละลายดังกล่าวเมื่อสัมผัสกับผิวแก้วจะไม่เพิ่มความรุนแรงในการกัดกร่อนผิวแก้ว ทำให้ชั้น Hydrated silica ที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวแก้วยังคงอยู่ ส่งผลให้ธาตุกลุ่มต่างๆ ที่อยู่ด้านในจะไม่มีการละลายออกมาเพิ่มได้อีก แต่ถ้าสารละลายที่สัมผัสกับผิวแก้วนั้นมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นหลังจากแคทไอออนละลายออกมา สารละลายที่เป็นด่างนั้นจะไปละลายชั้น Hydrated silica เมื่อชั้นดังกล่าวถูกทำให้บางลงจะส่งผลให้ธาตุที่เป็น Modifier ในโครงสร้างที่อยู่ลึกเข้าไปจากผิวแก้วมีโอกาสแพร่ออกมาอีก และหากแก้วถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น การนำขวดแก้วที่บรรจุน้ำอยู่ภายในไปผ่านการฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งอัดไอ โมเลกุลของน้ำจะเกิดปฏิกิริยากับผิวแก้วจนทำให้เกิดการบวมพองและไปสลายพันธะเคมีระหว่างผิวแก้วด้านนอกกับเนื้อแก้วด้านในที่อยู่ลึกเข้าไป เกิดการหลุดออกมาเป็นเกล็ดขนาดเล็ก (Flakes) หรือเป็นของแข็งที่มีลักษณะเป็นรูเข็ม (Spicules) โดยผลึกนั้นจะมีองค์ประกอบของซิลิกาสูง

แก้วที่บรรจุด้วยสารละลายซึ่งมีสมบัติเกือบเป็นกลาง ที่มีองค์ประกอบเป็นเกลือของด่าง เช่น เกลือโซเดียมซัลเฟต ฟอสเฟต ทาร์เทรต และไบคาร์บอน เมื่อถูกนำไปผ่านการฆ่าเชื้อในออตoclave จะทำให้ผิวแก้วถูกกัดกร่อนได้มากที่สุด เนื่องจากแคทไอออนที่ในสารละลายนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาและทำลายโครงข่ายของซิลิกาได้ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่บรรจุสารประกอบดังกล่าวต้องบรรจุในขวดที่ผ่านกรรมวิธีปรับปรุงผิว (Surface treatment) โดยวิธีดีอัลคาไลส์ (Dealkalization) ซึ่งเป็นการกำจัดด่างที่ผิวออก หรือแก้วประเภทที่มีองค์ประกอบของธาตุกลุ่มต่างๆ น้อยซึ่งจะสามารถต้านทานต่อสารเคมีได้มากขึ้น ส่วนในกรณีของแก้วที่บรรจุของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ตัวทำละลาย น้ำมัน และไฮโดรคาร์บอน จะไม่เกิดปฏิกิริยากับผิวแก้ว

ปัจจัยที่ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย กับผิวแก้ว คือ อุณหภูมิและระยะเวลา หากมีการสัมผัสกันของสารละลายกับผิวแก้วนานขึ้นจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นด้วย ทำให้ด่างที่มีหน้าที่เป็น Modifier ถูกทำให้หลุดออกมาเพิ่มขึ้น

ขนาดของขวดแก้วหรือปริมาตรที่บรรจุส่งผลต่อความคงทนทางเคมีเช่นเดียวกัน หากภาชนะแก้วมีขนาดเล็กทำให้บรรจุสารได้น้อยเมื่อแคทไอออนหลุดออกมาจากผิวแก้วไปอยู่ในสารละลายจะส่งผลทำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นมากกว่าภาชนะแก้วที่มีขนาดใหญ่ที่สามารถบรรจุสารละลายได้มาก เพราะสัดส่วนของผิวขวดแก้วต่อปริมาตรของสารละลาย (Surface-to-volume ratio) ของขวดแก้วขนาดเล็กจะมากกว่าขวดแก้วขนาดใหญ่ ตัวอย่างของขวดแก้วโซดาไลม์ที่บรรจุของเหลวเป็นเวลา 6 เดือน ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่ามีไฮเดียมหลุดออกมาจากผิวแก้ว ปริมาณ 5 มิลลิกรัมต่อพื้นที่ 100 ตารางเซนติเมตร ดังนั้นหากสิ่งทีบรรจุในขวดแก้วนั้นมีความไวต่อความเป็นด่างจะทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนแปลงได้ เช่น ยาฉีดอินซูลินที่มี pH 3.0 – 3.5 ถ้าหากมีธาตุกลุ่มต่างถูกสกัดออกจากผิวขวดแก้วจนส่งผลให้ pH เปลี่ยนแปลงไปจนมีค่ามากกว่า 7.5 จะทำให้อินซูลินเกิดการสลายตัว

### 2.1.7.3 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของแก้วมีช่วงอุณหภูมิที่ทำให้แก้วมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญดังนี้

#### 1. อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature, $T_g$ )

คือ อุณหภูมิที่แสดงการเปลี่ยนแปลงความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของวัสดุ และเป็นอุณหภูมิสูงสุดที่เปลี่ยนสภาพจากแก้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งกลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดโดยผ่านกระบวนการดูดความร้อน ณ อุณหภูมินี้แก้วจะมีความหนืด  $10^{13.3}$  พาสคัล-วินาที โมเลกุลของโครงสร้างแก้วมีการเคลื่อนไหวพร้อมจะเปลี่ยนสถานะไปเป็นของเหลว โดย  $T_g$  ของแก้วโซดาไลม์อยู่ที่ประมาณ 540-550 องศาเซลเซียส อุณหภูมินี้มักถูกนำไปอ้างอิงเป็นการประมาณอุณหภูมิที่ใช้ในอบแก้ว (Annealing) ซึ่งเป็นกระบวนการที่สร้างขึ้นเพื่อลดความเครียดในเนื้อแก้ว หลังจากถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว

#### 2. อุณหภูมิอ่อนตัวของแก้ว (Softening point)

คือ อุณหภูมิที่แก้วเริ่มเกิดการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว ณ อุณหภูมินี้แก้วจะมีความหนืด  $10^{7.6}$  พาสคัล-วินาที

#### 3. อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization Temperature, $T_c$ )

คือ อุณหภูมิที่แก้วสามารถเกิดผลึกขึ้นได้หากมีการเย็นไฟ ณ อุณหภูมินี้เป็นระยะเวลาหนึ่งซึ่งจะเกิดกระบวนการคายความร้อนเนื่องจากเกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมในการสร้างผลึก

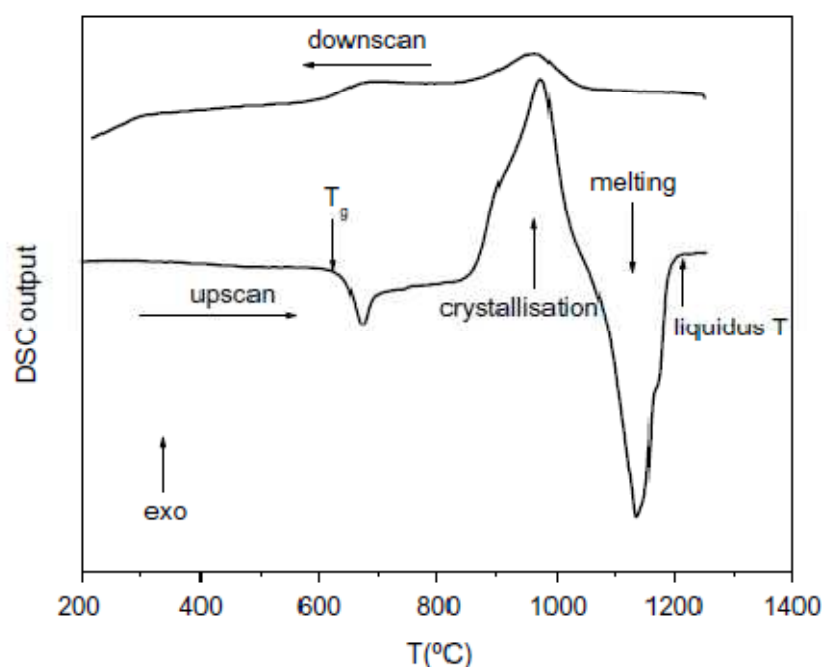
#### 4. อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting Temperature, $T_m$ )

คือ อุณหภูมิที่แก้วเริ่มเกิดการหลอมตัวโดยเกิดผ่านกระบวนการดูดความร้อน ณ อุณหภูมินี้แก้วจะมีความหนืด  $10^2$  พาสคัล-วินาที

#### 5. อุณหภูมิแก้วหลอมตัวโดยสมบูรณ์ (Liquidus Temperature, $T_L$ )

คือ อุณหภูมิที่แก้วหลอมกลายเป็นของเหลวที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันโดยสมบูรณ์ ความเป็นระเบียบในโครงสร้างแก้วหายไปทั้งหมด

การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนเชิงพลังงานของแก้วจะทำให้ทราบอุณหภูมิต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ภาพที่ 2.5 แสดงผลของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความร้อนเชิงพลังงาน



ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานของแก้วชนิดหนึ่ง จากอุณหภูมิห้องจนถึง  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$  [17]

Differential scanning calorimeter (DSC) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุเชิงพลังงาน โดยวัดค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงไปขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเกิดกระบวนการดูดหรือคายพลังงาน (endothermic or exothermic processes) ผลการวิเคราะห์เป็นกราฟระหว่างความแตกต่างของปริมาณความร้อนกับอุณหภูมิของสารที่นำมาทดลองเทียบกับสารอ้างอิง

จากภาพที่ 2.5 ที่อุณหภูมิประมาณ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟเนื่องมาจากแก้วเริ่มเกิดการดูดความร้อน ณ จุดนี้แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ซึ่งเป็น

อุณหภูมิที่เปลี่ยนจากสภาพจากของแข็งมาเป็นของเหลวหนืด ที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิของการเกิดผลึก ( $T_c$ ) ณ อุณหภูมินี้สามารถบ่งบอกจำนวนเฟสในเนื้อแก้วได้ โดยจำนวนของพีคจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนเฟสในเนื้อแก้ว ที่อุณหภูมิประมาณ 1100 องศาเซลเซียส เกิดการดูดความร้อนทำให้เส้นกราฟตกลงอย่างชัดเจนจุดนี้เป็นอุณหภูมิกการหลอมของผลึก ( $T_m$ ) และที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แก้วถูกหลอมจนเป็นเนื้อเดียวกันไม่เหลือความมีระเบียบในโครงสร้างเลยมีลักษณะเป็นน้ำแก้วที่ไม่มีผลึก

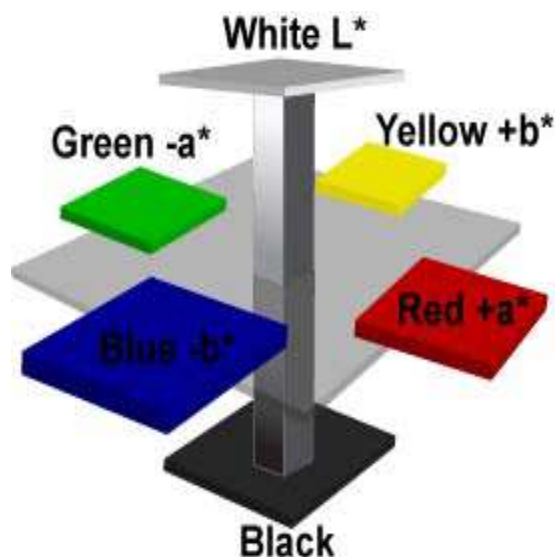
#### 2.1.7.4 สมบัติพื้นฐานทางด้านแสง [6]

แก้วเป็นวัสดุที่มีความใสสามารถมองเห็นทะลุผ่านได้ โดยการส่องผ่านของแสงแปรผกผันกับความหนาของแก้ว แก้วสามารถทำให้เกิดสีต่างๆได้ด้วยการเติมออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน และการเปลี่ยนแปลงบรรยากาศในการหลอม กล่าวคือ บรรยากาศออกซิเดชันและบรรยากาศรีดักชันที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของแก้วด้วย แก้วใสที่ไม่มีสีเกิดการดูดกลืนแสงบ้างเล็กน้อยโดยเกิดการดูดกลืนแสงเท่าๆ กันทุกช่วงคลื่น แก้วที่มีสีจะมีการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นแสงที่เฉพาะตัว เช่น แก้วสีชา (Amber) ดูดกลืนแสงมากหรือยอมให้แสงส่องผ่านได้น้อยมากในช่วงความยาวคลื่น 300 นาโนเมตรถึงประมาณ 470 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำให้แก้วสีชาสามารถป้องกันการส่องผ่านของรังสีอัลตราไวโอเล็ตได้ดีกว่าแก้วใสที่ไม่มีสี กระบวนการผลิตแก้วการตรวจสอบสีเป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การวัดสีและการส่องผ่านแสงของแก้วต้องมีการตรวจสอบไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจึงต้องมีการเก็บขวดแก้วสีไว้เป็นตัวอย่างในการผลิตครั้งต่อไป การวัดความแตกต่างของสีแก้วสามารถทำได้หลายระบบ ระบบหนึ่งซึ่งเป็นที่ยอมรับกว้างขวางที่จะกล่าวถึงในที่นี้คือ ระบบ CIELAB

การวัดค่าสีในระบบ CIE (CIELAB) เป็นระบบที่ประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ประการ คือ

- Light source คือ แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน เช่น A B C หรือ D65 งานวิจัยนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ D65 ซึ่งมี Degrees kelvin เท่ากับ 6500 อุณหภูมิแสงซึ่งเป็นแสงที่มีสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเหมือนกับแสงแดดในตอนกลางวันที่มีแดดจัด
- Color object คือ วัตถุที่มีสี เมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุดังกล่าวจะสะท้อนหรือกระจายแสงมาสู่เครื่องรับแสง
- Observer คือผู้สังเกตการณ์ เช่น สายตามนุษย์

ระบบ CIELAB 1976 สามารถบอกความแตกต่างของสีได้โดยมีลักษณะของ Color space ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 CIELAB 1976 แสดง  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  Color space [18]

ค่าสีในแกนต่างๆ มีความหมายดังนี้

$L^*$  เป็นค่าที่แสดงความสว่าง (Lightness) ของสี

- หาก  $L^*$  มีค่าเป็น 0 หมายถึง วัตถุนั้นมีสีดำ
- หาก  $L^*$  มีค่าเท่ากับ 100 หมายถึง วัตถุนั้นมีสีขาว

$a^*$  เป็นค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือสีเขียว (Red – Green)

- หาก  $a^*$  มีค่าเป็นบวก หมายถึง วัตถุนั้นมีความเป็นสีแดง
- หาก  $a^*$  มีค่าเป็นลบ หมายถึง วัตถุนั้นมีความเป็นสีเขียว

$b^*$  เป็นค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือน้ำเงิน (Yellow-Blue)

- หาก  $b^*$  มีค่าเป็นบวก หมายถึง วัตถุนั้นมีความเป็นสีเหลือง
- หาก  $b^*$  มีค่าเป็นลบ หมายถึง วัตถุนั้นมีความเป็นสีน้ำเงิน

## 2.2 ตาหนีฝ้ายบนผิวแก้ว (Weathering or Blooming) [19-20]

แก้วที่เกิดฝ้ายมีลักษณะเป็นคราบขาวเกาะอยู่ที่ผิวแก้ว สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งหากเป็นการเกิดในช่วงแรกๆ คราบดังกล่าวอาจเช็ดออกได้ แต่หากทิ้งไว้เป็นระยะเวลาอันยาวนานฝ้ายที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะที่รุนแรงขึ้นมีความหนาและแผ่ออกเป็นวงกว้างมากขึ้น และยากต่อการทำความสะอาดอาจติดอยู่ถาวร โดยฝ้ายที่เกิดขึ้นมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.7



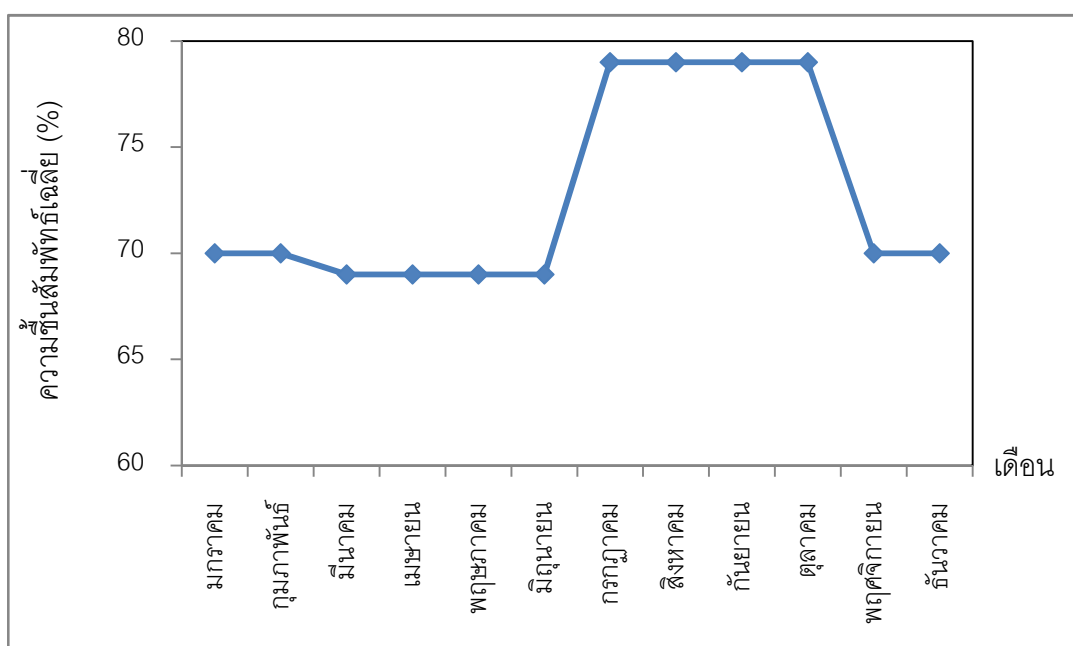


ภาพที่ 2.7 ลักษณะของตำหนิฝ้าที่เกิดบนผิวแก้ว [21]

### 2.2.1.1 ปัจจัยส่งเสริมให้เกิดฝ้า

#### 1. ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ [11]

ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้นใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้มีอากาศร้อนและมีความชื้นสูงเกือบตลอดทั้งปี ซึ่งพบว่าในช่วงฤดูฝนซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แก้วมีการเกิดฝ้ามากที่สุด จะเป็นช่วงเวลาที่มปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มากที่สุดเมื่อเทียบกับฤดูอื่นๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.8 และมีความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วงเวลากลางคืน 80 เปอร์เซ็นต์ และต่ำสุดเฉลี่ย 60 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณของไอน้ำในอากาศ ซึ่งหากปริมาณไอน้ำในอากาศสูงก็จะทำให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเกาะบนผิวแก้ว



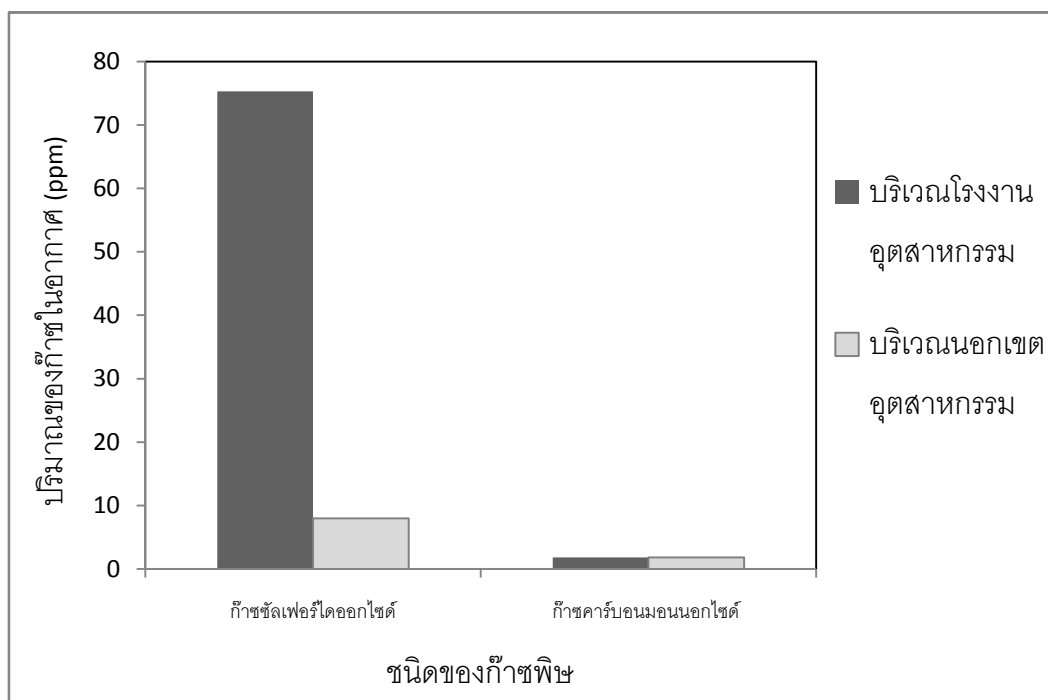
ภาพที่ 2.8 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของฤดูต่างๆ ในประเทศไทย

## 2. อุณหภูมิที่แตกต่างระหว่างกลางวันและกลางคืน

พื้นที่บริเวณภาคกลางของประเทศไทยมีอุณหภูมิแตกต่างกันมากระหว่างกลางวันกับกลางคืน โดยในฤดูฝนซึ่งเป็นช่วงเวลาที่แกว่จะเกิดฝ้ามากที่สุดมีอุณหภูมิเฉลี่ยในช่วงเวลากลางวันคือ 32 องศาเซลเซียส และช่วงเวลากลางคืนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 20 องศาเซลเซียส [11]

## 3. แก๊สกรดหรือแก๊สพิษในบรรยากาศ (Acidic gases)

แก๊สกรดหรือแก๊สพิษ เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ส่งเสริมให้เกิดฝ้าเนื่องจากเป็นสารตั้งต้นของผลึกฝ้าด้วย จากภาพที่ 2.9 พบว่าบริเวณพื้นที่ในเขตอุตสาหกรรม มีปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากกว่าบริเวณนอกเขตอุตสาหกรรมอย่างมาก ซึ่งแก๊สชนิดนี้จะเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดความรุนแรงของการเกิดฝ้ามากขึ้น

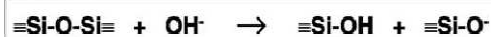
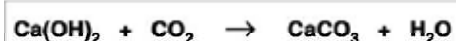
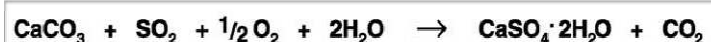


ภาพที่ 2.9 ปริมาณแก๊สพิษในอากาศบริเวณเขตอุตสาหกรรมและนอกเขตอุตสาหกรรม [22]

### 2.2.1.2 กลไกการเกิดตำหนิฝ้า

การเกิดฝ้าบนผิวแก้วเกิดได้ทั้งแก๊วบรรจุภัณฑ์และกระจก [23] ขั้นตอนการเกิดฝ้าเริ่มจากแก๊วถูกเก็บไว้ในบริเวณที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง จากนั้นเมื่อเข้าสู่ช่วงของอุณหภูมิที่ลดต่ำลง ไอน้ำในอากาศกลั่นตัวเป็นหยดน้ำเกาะอยู่ที่ผิวแก้ว (Adsorbed water) เมื่อผิวแก้วสัมผัสกับน้ำที่ผิว

ไฮโดรเจน (H) ซึ่งเป็นส่วนประกอบในโมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) สามารถแตกตัว (Decomposition) และแพร่เข้าไปในเนื้อแก้วผ่านกระบวนการแทนที่กับธาตุกลุ่มต่างที่ทำหน้าที่เป็นตัวปรับแต่งโครงสร้างแก้ว (Modifier) เช่น โซเดียมไอออน (Na<sup>+</sup>) และแคลเซียมไอออน (Ca<sup>2+</sup>) การแทนที่ในตำแหน่งที่ธาตุกลุ่มต่างอยู่ก่อนหน้านั้น เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนมีประจุบวกเหมือนกับธาตุกลุ่มต่างจึงสามารถแทนที่ในตำแหน่งของ Modifier ซึ่งมีประจุบวกได้ เมื่อเกิดการแทนที่ที่จะทำให้โซเดียมไอออน (Na<sup>+</sup>) หลุดออกมาจากโครงสร้างแก้วถูกชะมาอยู่บริเวณผิวแก้ว และหากมีปัจจัยจากภายนอกมาส่งเสริมคือมีก๊าซพิษในบรรยากาศจะทำให้เกิดฝ้ามากขึ้น โดยธาตุกลุ่มต่างที่ถูกชะออกมาจะทำปฏิกิริยากับก๊าซพิษ เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นหยดน้ำระเหยออกไปจึงเป็นการลดปริมาณของตัวทำลายทำให้สารละลายเกิดการอิมิตัวยิ่งยวดเกิดการตกผลึกติดอยู่บนผิว เช่นผลึกของโซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) หรือ CSH (Calcium silicate hydrate) ตัวอย่างของกระบวนการเกิดผลึก CSH บนผิวแก้วดังแสดงในภาพที่ 2.10 .ในระยะแรกของการเกิดผลึกฝ้าอาจจะยังไม่สามารถสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าได้ และยังสามารถขีดทำความสะอาดได้

**STEP 1****STEP 2****STEP 3****STEP 4****STEP 5**

ภาพที่ 2.10 ปฏิกิริยาเคมีแสดงกลไกการเกิดฝ้าบนผิวแก้ว [23]

หลังจากนั้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์กลับมาที่มีปริมาณสูงอีกครั้งในช่วงเวลากลางคืน หยดน้ำกลับมาเกาะบนผิวแก้วอีกทำให้เพิ่มพื้นที่ที่ผิวแก้วสัมผัสกับน้ำ ทำให้เกิดกระบวนการเกิดฝ้าเป็นพื้นที่กว้างขึ้น และน้ำจะละลายผลึกที่เกิดก่อนหน้าซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุกลุ่มต่างอยู่ ทำให้หยดน้ำที่อยู่บนผิวแก้วมีความเป็นด่างมากขึ้นและทำลายโครงสร้างของแก้วได้มากขึ้น เนื่องจากแก้วไม่ทนด่าง จึงเป็นการเร่งกระบวนการเกิดฝ้า เนื่องจากการที่โครงสร้างถูกกัดกร่อนทำให้พันธะต่างๆ บริเวณนั้นถูกทำลายหรือมีความแข็งแรงลดลง ทำให้ธาตุกลุ่มต่างหลุดออกมาได้ง่ายขึ้น

หากกระบวนการนี้เกิดเป็นวงจรรซ้ำๆ อย่างต่อเนื่อง จะเกิดผลึกฝังลึกเข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของเนื้อแก้ว ทำให้ผิวแก้วมีลักษณะเป็นคราบขาวสังเกตเห็นด้วยตาเปล่าได้และไม่สามารถขัดออกได้ในที่สุด จากกระบวนการเกิดฝ้าที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าหากสามารถทำให้ไอออนของธาตุกลุ่มต่างถูกชะออกมาน้อยลงก็จะเป็นการลดสารตั้งต้นของการเกิดฝ้าได้ ในกระบวนการผลิตสามารถลดการเกิดฝ้าและชะลอกการเกิดได้หลายวิธี เช่น การเคลือบผิวแก้ว การปรับสูตรแก้ว เป็นต้น

### 2.2.1.3 แนวทางการแก้ปัญหาการเกิดฝ้าบนผิวแก้ว

#### 1. การปรับสูตรแก้ว

การปรับสูตรแก้วให้มีความแข็งแรงมากขึ้นจะช่วยทำให้มีการละลายของต่างออกมาจากผิวแก้วลดลง การปรับสูตรแก้วสามารถทำได้โดยการเติมวัตถุดิบตัวเติมที่สามารถทำให้โครงสร้างแก้วมีความแข็งแรงมากขึ้นลงไป เช่น การเติมอะลูมินา เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจะช่วยให้พันธะของโครงข่ายแก้วแข็งแรงมากขึ้น

#### 2. การปรับผิวแก้ว (Surface treatment) [24]

การปรับผิวแก้วโดยทำการฉีดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ให้สัมผัสกับผิวแก้วที่มีอุณหภูมิระหว่าง 550 – 600 องศาเซลเซียส ซึ่งก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะไปทำปฏิกิริยากับอะตอมของโซเดียมที่ผิวของแก้วทำให้เกิดการสะสมของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) มองเห็นเป็นคราบ แต่คราบจะต้องล้างออกก่อนนำไปใช้ ซึ่งเป็นการลดปริมาณของโซเดียมที่ผิว

การปรับผิวแก้วด้วยการฉีดก๊าซฟลูออไรด์ไฮโดรคาร์บอนบนกับผิวแก้ว โดยฟลูออรีน (F) ในก๊าซจะทำปฏิกิริยากับแก้วร้อน ทำให้แก้วมีความทนทานต่อสารเคมียิ่งขึ้นและไม่ทิ้งรอยคราบให้ปรากฏ

อีกวิธีหนึ่งคือการป้องกันไม่ให้น้ำเกาะกับผิวแก้วหรือสัมผัสผิวแก้วโดยตรง โดยการเคลือบผิวแก้วด้วยสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น ขี้ผึ้ง (Wax) สเตียเรต (Stearate) ซิลิโคน (Silicone) กรดโอเลอิก (Oleic acid) และ พอลิเอทิลีน (Polyethylene) ซึ่งจะทำในขณะที่ยังอยู่ในเตาอบและมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส

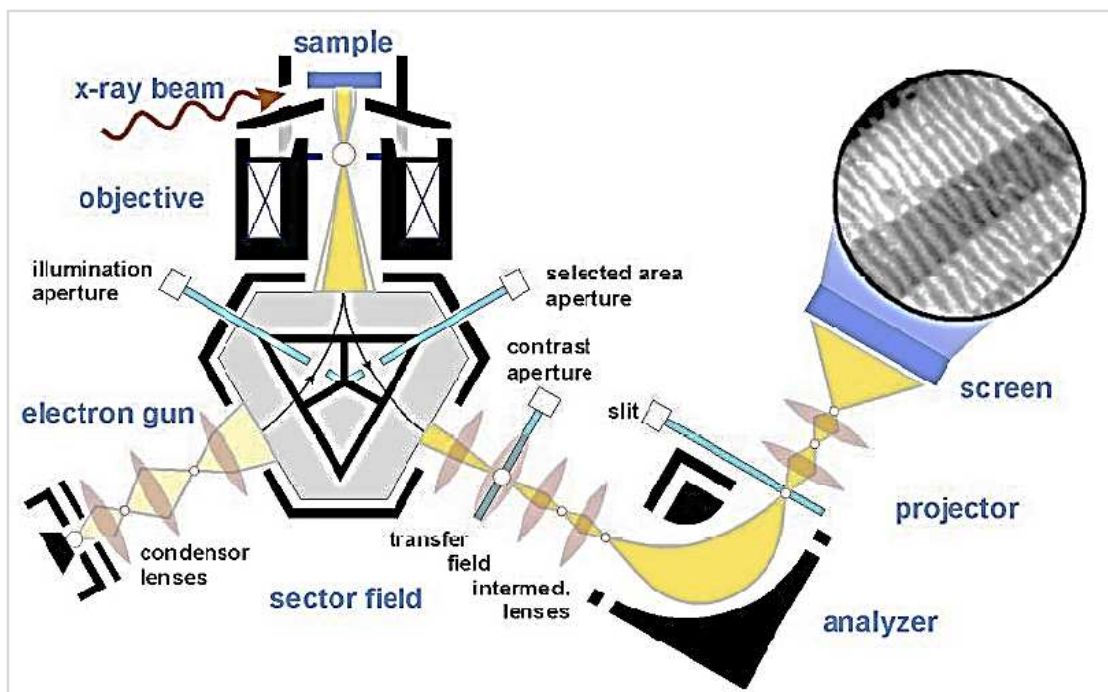
### 2.3 เทคนิค PEEM และ LEEM [25-26]

การใช้เทคนิค PEEM และ LEEM ในการวิเคราะห์ผิวแก้วที่เกิดฝ้ามีประโยชน์เป็นอย่างมาก เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์ตรวจสอบตัวอย่างได้ในระดับที่มีความลึกน้อยมากจากผิว คือ มีความลึกในการวิเคราะห์น้อยกว่า 10 นาโนเมตร

PEEM (Photoemission electron microscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้แสงซินโครตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสงเพื่อวิเคราะห์ตัวอย่าง โดยแสงซินโครตรอนดังกล่าวได้จากการเร่งอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าและมีมวลน้อยในเครื่องเร่งอนุภาค เช่น การเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน หรือโพสิตรอน การเร่งอนุภาคเริ่มจากการผลิตลำอนุภาคอิเล็กตรอนขึ้นโดยใช้ปืนอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกเร่งความเร็วให้สูงขึ้นที่เครื่องเร่งอนุภาคแบบตรง Linear accelerator (Linac) แล้วส่งต่ออนุภาคมาที่มีความเร็วสูงไปที่วงกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งอนุภาคจะถูกทำให้เคลื่อนที่เป็นวงโค้งตามแนวของวงแหวนสุญญากาศโดยอาศัยการใช้แม่เหล็กแบบสองขั้ว (Dipole) จำนวนมากเป็นตัวบังคับทิศทางและแม่เหล็กแบบสี่ขั้ว (Quadrupole) ใช้ในการบีบลำอนุภาค เมื่ออนุภาคที่มีประจุถูกเร่งมีความเร็วสูงใกล้ความเร็วแสงแล้วบังคับให้เกิดการเลี้ยวโค้งอย่างรวดเร็ว นั้น จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งก็คือ แสงซินโครตรอน ซึ่งมีความเข้มสูงและมีค่าพลังงานต่อเนื่อง ครอบคลุมช่วงตั้งแต่นิวตรอนรังสีอินฟราเรดจนถึงรังสีเอกซ์ ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM ที่มีการใช้แสงซินโครตรอนในการวิเคราะห์จึงสามารถสร้างภาพจากโฟโตอิเล็กตรอนจากผิวตัวอย่างได้ โดยอาศัยการเปลี่ยนค่าพลังงานของแสงซินโครตรอนในช่วง UV ถึง X-ray เพื่อกระตุ้นอิเล็กตรอนจนทำให้หลุดออกจากผิวของสารตัวอย่าง จึงสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Micro X-ray absorption spectroscopy ( $\mu$ -XAS) และเทคนิค Micro X-ray photoemission spectroscopy ( $\mu$ -XPS) สามารถวิเคราะห์ธาตุและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีบริเวณพื้นผิวของตัวอย่างได้ เทคนิคนี้จึงสามารถดูภาพเหมือนกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนซึ่งจะให้ภาพที่มีความละเอียดอยู่ในช่วงระหว่าง 10-100 นาโนเมตรพร้อมกับทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทาง Spectroscopy ไปด้วย

LEEM หรือ Low-energy electron microscopy เป็นเทคนิคที่มีแหล่งกำเนิดแสงคืออิเล็กตรอน สามารถถ่ายภาพผิวตัวอย่างได้ความละเอียดในระดับนาโนเมตร แผนผังการทำงานของ PEEM และ LEEM แสดงในภาพที่ 2.11

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ต้องมีความขรุขระในระดับนาโนเมตร และต้องนำไฟฟ้าได้หรือหากตัวอย่างไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ต้องนำไปผ่านเคลือบด้วยโลหะก่อนนำมาวิเคราะห์ และเนื่องจากเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ทำการวิเคราะห์ภายใต้ระบบสุญญากาศสูง ดังนั้นตัวอย่างจึงต้องไม่มีการปลดปล่อยแก๊ส (Outgassing) มากเกินไป คือสามารถคงลักษณะของส่วนที่ต้องการวิเคราะห์ไว้ได้ภายใต้ระบบที่มีสภาวะสุญญากาศระดับ  $10^{-10}$  torr



ภาพที่ 2.11 แผนผังการทำงานของ PEEM และ LEEM

## 2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tournié และคณะ [27] และ Chitwatcharakomol [20] ศึกษาการเกิดฝ้าบนผิวแก้ว ซึ่งพบว่าเกิดจากผิวแก้วเกิดปฏิกิริยากับน้ำในอากาศ ละลายธาตุกลุ่มต่างออกมา จากนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศจะละลายในน้ำที่เกาะบนผิวแก้วเกิดการสร้างผลึกที่เป็นสารประกอบของธาตุกลุ่มต่างขึ้น หลังจากนั้นเมื่อแก้วผ่านช่วงที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นของวัน น้ำที่ผิวจะระเหยกลับไปในอากาศทิ้งผลึกไว้บนผิวแก้ว

การเกิดตำหนิฝ้าเกิดจากการถูกกัดกร่อนของผิวแก้วประกอบด้วยปัจจัยหลายอย่าง โดย Hench [28] ได้ทำการศึกษาปัจจัยทั้ง สูตรองค์ประกอบวัตถุดิบของแก้ว สภาพของผิวแก้ว ปัจจัยจากสภาวะแวดล้อมในการเก็บแก้ว เพื่อศึกษาผลต่อการเกิดการกัดกร่อนของผิวแก้ว จากการศึกษาพบว่า การทำให้เกิดออกไซด์ฟิล์มของเซอร์โคเนียมออกไซด์บนผิวแก้วมีส่วนช่วยทำให้ผิวแก้วทนความชื้นสูงได้มากขึ้น

การปรับสูตรแก้วโดยเติมวัตถุดิบตัวเติมเพื่อให้แก้วมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นนั้นทำได้หลายวิธี เซอร์โคเนียมไดออกไซด์จัดเป็นตัวเติมที่ทำให้ผิวแก้วเกิดความแข็งแรงได้มากที่สุด โดยมักเติมประมาณ 2% Paul [29] ได้ศึกษาพบว่า การเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์จะทำให้เกิดความทนกรดและทนด่างมากขึ้น และตัวเติมชนิดซิงออกไซด์ประมาณ 7% สามารถเพิ่มความทนทานต่อ

กรดและด่างได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งการทนต่อความเป็นกรดและด่างนั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความสามารถในการต้านทานการเกิดฝ้าของแก้ว

นอกจากการปรับสูตรตั้งต้นแล้วมีทางเลือกสำหรับการพัฒนาสมบัติการทนต่อสภาพอากาศ คือการปรับสภาพของผิวแก้วด้วยวิธีการต่างๆ จากการศึกษาของ Gorokhovski และคณะ [30] พบว่าการทำฉีดยกฝ้าด้วยซิลิโคนไดออกไซด์บนผิวแก้วที่อุณหภูมิ 450-700 องศาเซลเซียสทำให้เกิดสารประกอบของซิลิโคนซิลิเกตเกิดขึ้น และที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาทีแก้วมีความแข็งที่ผิวมากที่สุด มีสมบัติการทนต่อสารเคมีมากที่สุด และมีค่าการละลายของธาตุกลุ่มด่างน้อยกว่าแก้วที่ไม่มีการปรับผิวด้วยซิลิโคนไดออกไซด์

การประเมินคุณภาพของผิวแก้วหลังจากผ่านการเร่งสภาพที่ทำโดยการควบคุมความชื้นและอุณหภูมิแล้วสามารถทำได้หลายวิธี จากการศึกษาของ Walters และคณะ [21] พบว่าการประเมินคุณภาพด้วยวิธีการสังเกตด้วยตาเปล่าโดยแบ่งระดับของการเกิดตำหนิฝ้าเป็น 5 ระดับ โดยแยกด้วยปริมาณของการเกิดฝ้าและความเข้มแสงที่ใช้ตรวจสอบเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและมีผลสอดคล้องกับวิธีอื่นๆ อีกทั้งยังมีต้นทุนต่ำ มีประสิทธิภาพ และนำไปใช้ได้จริงในงานอุตสาหกรรม

การศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผิวแก้วเป็นวิธีที่สามารถทำการตรวจสอบได้ชัดเจนมากขึ้น สามารถศึกษาว่าเกิดกระบวนการอย่างไรในการเกิดฝ้าบนผิวแก้ว จากผลงานวิจัยของ Bach [31] ได้รวบรวมวิธีการต่างๆ ในการวิเคราะห์ผิวแก้ว ทำให้ทราบว่าสารประกอบบนผิวแก้วเป็นชนิดใด ซึ่งจะทำให้สามารถวางแผนงานในการแก้ไขปัญหาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการพัฒนาสมบัติการทนต่อสภาพอากาศของแก้วบรรจุภัณฑ์และกระจกที่ผลิตจากแก้วชนิดโซดาไลม์ โดยจำลองสภาวะการทดลองที่มีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเหมือนกับในฤดูฝนซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดตำหนิฝ้ามากที่สุด และนำผลการทดลองที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับตัวอย่างแก้วโซดาไลม์สูตรที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมที่มีปัญหาตำหนิฝ้า เพื่อให้ได้สูตรแก้วหรือวิธีการปรับผิวแก้วที่ทำให้เกิดตำหนิฝ้าในปริมาณที่น้อยกว่าและเกิดฝ้าช้ากว่าสูตรแก้วเดิม

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาสูตรแก้วโซดาไลม์และวิธีการปรับสภาพผิวแก้วโดยการอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยได้ทำการศึกษาแก้วชนิดโซดาไลม์ทั้งประเภทแก้วบรรจุภัณฑ์และกระจก เพื่อให้แก้วที่ได้หลังกระบวนการดังกล่าวมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากสภาพอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงได้ดีขึ้น กล่าวคือสามารถลดความรุนแรงของการเกิดตำหนิฝ้า และเพิ่มระยะเวลาการเกิดตำหนิฝ้าให้ช้าลง การเปลี่ยนองค์ประกอบวัตถุดิบของสูตรแก้วทำโดยเติมวัตถุดิบตัวเติมคือ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ( $ZrO_2$ ) และซิงค์ออกไซด์ ( $ZnO$ ) ลงในสูตรแก้วเดิมของโรงงาน (D0) ที่เกิดปัญหาการเกิดฝ้า การเปลี่ยนแปลงปริมาณวัตถุดิบต่างๆ จะอยู่บนพื้นฐานของการคงสมบัติของแก้วหลอมไว้เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการผลิต ซึ่งจะทำให้หลังจากการปรับสูตรแก้วแล้วโรงงานสามารถนำไปประยุกต์ในกระบวนการผลิตได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตมากนัก เนื่องจากการผลิตแก้วนั้นการเปลี่ยนสูตรในแต่ละครั้งนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะต้องทำในเตาที่มีขนาดใหญ่และมีการหลอมอย่างต่อเนื่องจึงมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดความเสียหายมากหากสมบัติของแก้วที่ผลิตเปลี่ยนไป ดังนั้นการรักษาสมบัติของแก้วหลอมให้คล้ายเดิมจะไม่ก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการผลิตตามมาในภายหลัง เช่น ความหนืดของแก้วหลอม สี ความใส ความหนาแน่นของแก้วหลังขึ้นรูป

อีกวิธีหนึ่งที่ถูกเลือกใช้เพื่อแก้ปัญหาเกิดการฝ้าในงานวิจัยนี้คือ การปรับสภาพผิวแก้วโดยการอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งได้มาจากการเผาสารตั้งต้นที่ต่างกันคือ โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ( $NaHSO_4$ ) สารส้ม ( $KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$ ) และซิงค์ซัลเฟต ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ )

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

#### **ส่วนที่ 1 การแก้ไขการเกิดฝ้าในแก้วบรรจุภัณฑ์ชนิดโซดาไลม์**

ตอนที่ 1.1 การเติมโดโลไมต์ ( $CaMg(CO_3)_2$ ) เพื่อทดแทนหินปูนในสูตรแก้วชนิดโซดาไลม์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ของโรงงานที่เกิดปัญหาเกิดฝ้า ซึ่งขึ้นงานแก้วได้จากการหลอมแก้วในห้องปฏิบัติการ



ตอนที่ 1.2 การเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ ในสูตรแก้วชนิดโซดาไลม์ที่ผ่านการหาปริมาณการเติมโคโลไมต์ที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1.1 เลือกมาปรับปรุงต่อในขั้นตอนนี้ ซึ่งเกณฑ์การเลือกสูตรที่มีปริมาณของโคโลไมต์ที่เหมาะสมคือเป็นสูตรที่มีค่าการทนต่อน้ำที่ดีที่สุดเมื่อทำการทดลองตามมาตรฐาน ISO 719 [32]

ตอนที่ 1.3 การอบผิวแก้วโซดาไลม์ด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่แตกตัวจากการเผาโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต โดยการอบผิวตัวอย่างแก้วที่หลอมขึ้นจากสูตรที่ผ่านการหาปริมาณการเติมโคโลไมต์ที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1.1

### ปัจจัยที่ถูกแปรค่าในการทดลอง

- ชนิดของวัตถุดิบตัวเติม
- ปริมาณของวัตถุดิบตัวเติมในแต่ละสูตร
- การอบผิวแก้วเปรียบเทียบกับแก้วที่มีการเติมตัวเติม

### ปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลอง

- อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการหลอมแก้วและการอบอ่อน

## ส่วนที่ 2 การแก้ไขการเกิดฝ้าของกระจกที่ผลิตจากแก้วโซดาไลม์

### ปัจจัยที่ถูกแปรค่าในการทดลอง

- ชนิดของสารตั้งต้นที่ถูกใช้เป็นแหล่งของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- ปริมาณของสารตั้งต้นที่ถูกใช้เป็นแหล่งของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

### ปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลอง

- อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบผิวแก้ว

## 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาแก้วโซดาไลม์ 2 ชนิดคือ แก้วบรรจุภัณฑ์และกระจก เนื่องจากงานวิจัยนี้อยู่บนพื้นฐานของการแก้ปัญหาจริงที่เกิดขึ้นในโรงงานผลิตแก้วแห่งหนึ่ง วัตถุดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยได้มาจากโรงงานดังกล่าว จึงเป็นวัตถุดิบที่มีคุณภาพระดับเดียวกับวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว (Industrial grade) ทั่วไป วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

### 3.1.1 วัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนประกอบของสูตรแก้วบรรจุภัณฑ์

- 3.1.1.1 ททราย ( $\text{SiO}_2$ )
- 3.1.1.2 โซดาแอช ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- 3.1.1.3 โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )
- 3.1.1.4 โซเดียมไนเตรต ( $\text{NaNO}_3$ )
- 3.1.1.5 หินปูน ( $\text{CaCO}_3$ )
- 3.1.1.6 แอนติโมนีไตรออกไซด์ ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ )
- 3.1.1.7 อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )
- 3.1.1.8 โดโลไมต์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )

### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการอบผิวแก้วและกระจก

- 3.1.2.1 โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ( $\text{NaHSO}_4$ ) (AR grade Panreac)
- 3.1.2.2 ซิงค์ซัลเฟต ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) (LR grade คีตาภัณฑ์พาณิชย์)
- 3.1.2.3 สารส้ม ( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) (LR grade คีตาภัณฑ์พาณิชย์)

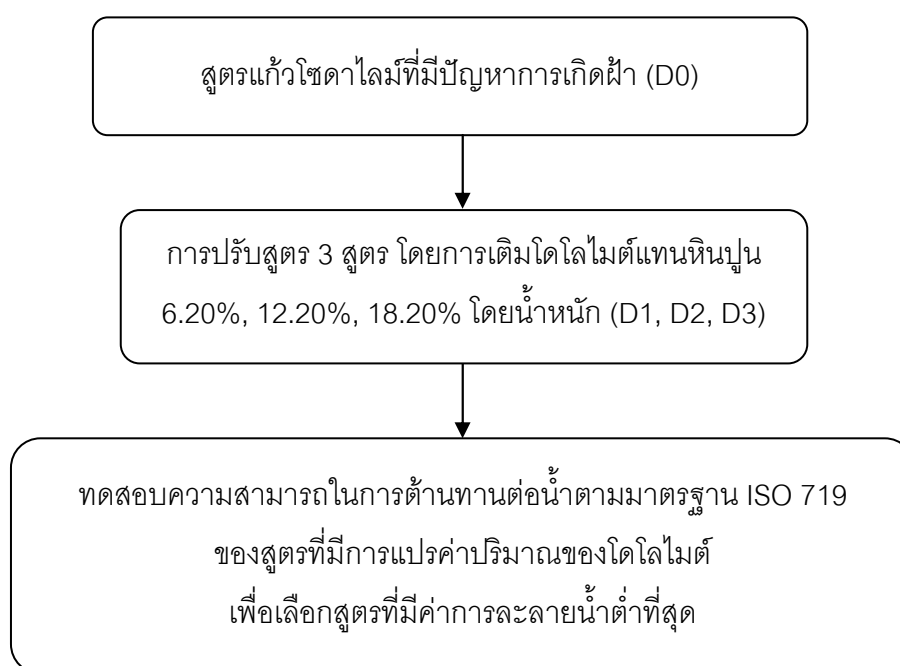
### 3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของแก้ว

- 3.1.3.1 โพรพานอล (Propanol) (AR grade, Riedel-de Haen)
- 3.1.3.2 น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
- 3.1.3.3 อะซีโตน (Acetone) (AR grade, Merck)
- 3.1.3.4 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) (AR grade, Merck)

### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### ตอนที่ 1 การแก้ไขการเกิดฝ้าในแก้วบรรจุภัณฑ์ชนิดโซดาไลม์

ตอนที่ 1.1 การเติมโดโลไมต์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ในสูตรแก้วชนิดโซดาไลม์ที่ใช้ทำบรรจุภัณฑ์ของโรงงานที่เกิดปัญหาการเกิดฝ้า ซึ่งชิ้นงานแก้วได้จากการหลอมแก้วในห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 3.1 แผนผังการทดลองขั้นตอนที่ 1.1 การเติมโดโลไมต์เพื่อทดแทนหินปูนในสูตรแก้วโซดาไลม์

#### 3.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้เป็นองค์ประกอบในสูตรแก้วได้มาจากโรงงานผลิตแก้วที่มีปัญหาการเกิดฝ้า หลังกระบวนการผลิตซึ่งเป็นวัตถุดิบคุณภาพระดับเดียวกับที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตแก้ว

#### 3.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

เตรียมตัวอย่างโดยการนำผงวัตถุดิบ 8 กรัม ผสมกับซีเมนต์ที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF จำนวน 2 กรัม จากนั้นอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 34 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบโดยวิธี X-ray fluorescence แบบ wavelength dispersive (Bruker รุ่น S8 Tiger)

### 3.2.3 การเตรียมชิ้นงานแก้ว

ซึ่งวัตถุดิบตามสูตรที่แสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย

- สูตร D0 คือ สูตรแก้วโซดาไลม์ของโรงงานที่เกิดตำหนิฝ้าโดยจะให้เป็นสูตรพื้นฐานในการปรับสูตรในขั้นตอนที่การเติมวัตถุดิบตัวเติม
- สูตร D1, D2 และ D3 เตรียมโดยเติมโดโลไมต์ทดแทนในส่วนของหินปูน 6.20%, 12.20% และ 18.20% โดยน้ำหนัก ลงในสูตร D0 ตามลำดับ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ลงในสูตรแก้ว

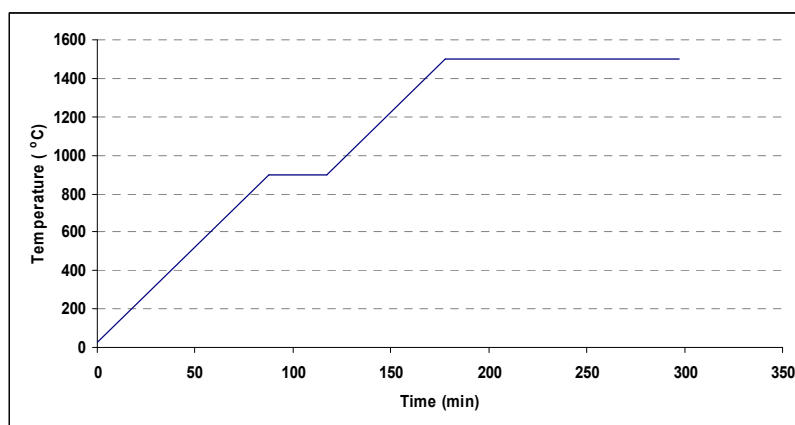
การทดลองในขั้นตอนแรกนี้ทำการหาปริมาณที่เหมาะสมของการเติมโดโลไมต์ลงไป ในสูตรแก้วก่อนทำการเติมวัตถุดิบตัวเติมตัวอื่นลงไป เนื่องจากสูตรแก้วโซดาไลม์ทั่วไปโดยส่วนใหญ่จะมีการเติมโดโลไมต์แต่จากสูตรเดิมของทางโรงงานไม่มี หลังจากนั้นนำสูตรที่มีการแปรค่าปริมาณโดโลไมต์ไปทำการทดลองเพื่อหาสูตรที่มีการต้านทานต่อการละลายน้ำมากที่สุดแล้วจึงปรับสูตรต่อไปโดยการเติมวัตถุดิบตัวเติมตัวอื่น

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบวัตถุดิบของสูตรแก้วโซดาไลม์และแก้วสูตรที่มีการเติมโดโลไมต์

วัตถุดิบ	สูตร	D0	D1	D2	D3
	ทราย (SiO <sub>2</sub> )		60.635	60.635	60.635
โซดาแอช (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )		18.000	18.000	18.000	18.000
โซเดียมซัลเฟต (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )		0.700	0.700	0.700	0.700
โซเดียมไนเตรท (NaNO <sub>3</sub> )		0.540	0.540	0.540	0.540
หินปูน (CaCO <sub>3</sub> )		18.950	12.750	6.750	0.750
แอนติโมนีไตรออกไซด์ (Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		0.055	0.055	0.055	0.055
อะลูมินา (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		1.115	1.115	1.115	1.115
โดโลไมต์ (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )		0.000	6.200	12.200	18.200
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)		0.005	0.005	0.005	0.005
รวม		100.000	100.000	100.000	100.000

### 3.2.4 การหลอมแก้ว

นำส่วนผสมของวัตถุดิบในแต่ละสูตรผสมให้เข้ากันแล้วจึงนำไปหลอม โดยบรรจุส่วนผสมวัตถุดิบที่เข้ากันแล้วลงในเบ้าหลอมที่ทำจากอะลูมินา การหลอมแก้วทำในเตาไฟฟ้าตามภาพที่ 3.2 โดยขึ้นอุณหภูมิด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องถึง 900 องศาเซลเซียส แล้วเย็นอุณหภูมิลงไว้ที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วขึ้นอุณหภูมิต่อด้วยอัตราเดิมถึง 1550 องศาเซลเซียสแล้วเย็นอุณหภูมิลงไว้ที่ 1550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.2 แผนผังการเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมแก้ว

การขึ้นรูปชิ้นงานแก้วทำโดยเทแก้วหลอมลงบนแผ่นเหล็กที่ถูกทำให้ร้อนโดยวางบน Hot plate เมื่อชิ้นงานแก้วเริ่มแข็งตัวให้ย้ายไปเข้าเตาอบแก้วซึ่งถูกทำให้ร้อนไว้แล้วที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส ทันทันทีและทำการอบอ่อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

### 3.2.5 การทดสอบสมบัติของแก้ว

#### 3.2.5.1 ความต้านทานต่อการละลายน้ำ (Hydrolytic Resistance)(ISO 719: 1985) [32]

เมื่อแก้วสัมผัสกับน้ำจะเกิดกลไกการชะขององค์ประกอบของแก้วที่ไม่ได้เกิดพันธะที่แข็งแรงกับโครงสร้างแก้วออกมา องค์ประกอบส่วนใหญ่ที่ถูกชะออกมามากเป็นกลุ่มขององค์ประกอบต่าง และการที่องค์ประกอบต่างละลายออกมาเป็นขั้นตอนแรกของการเกิดตำหนิฝ้าอีกด้วย ดังนั้นความสามารถในการต้านทานการละลายน้ำของแก้วถูกนำมาเป็นเกณฑ์ในการเลือกสูตรแก้วที่มีการเติมปริมาณโดโลไมต์ที่เหมาะสม คือ สูตรที่มีค่าการละลายของธาตุกลุ่มต่างออกมาจากแก้วน้อยที่สุดจะถูกนำไปเติมตัวเติมอื่นต่อไป การทดสอบทำตามมาตรฐาน ISO 719 โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส การทดลองเริ่มจากการทุบแก้วใน

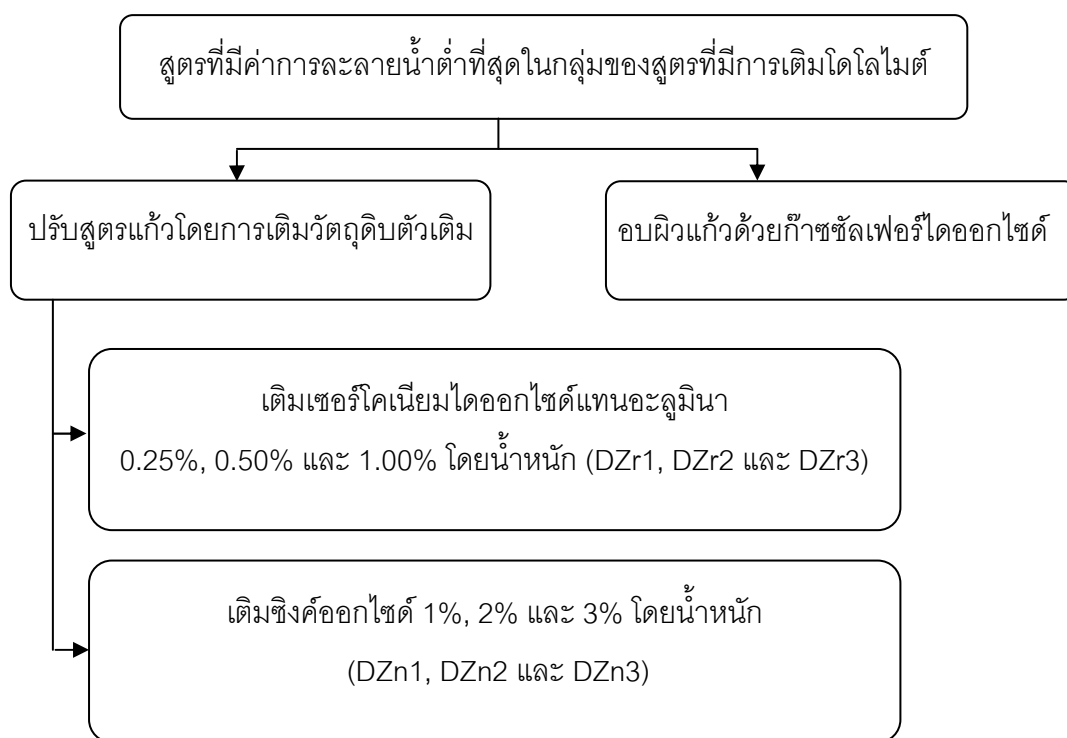
ครกเหล็กชุบแข็ง แล้วทำการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 30-50 เมช เก็บตัวอย่างผงแก้วที่ค้างบน ตะแกรง 50 เมช ประมาณ 7-10 กรัม นำผงแก้วไปล้างทำความสะอาดโดยใช้อะซีโตนประมาณ 30 มิลลิลิตรเพื่อทำความสะอาดโดยแกว่งปีกเกอร์ให้ผงแก้วสัมผัสกับอะซีโตน จนทั่วแล้วริน สารละลายที่ขุ่นออกจนเหลือแต่ผงแก้วทำ 2 ครั้ง จากนั้นนำอะซีโตน 30 มิลลิลิตรใส่ลงไป แล้วนำไปแช่ในอ่างที่มีเครื่องกำเนิดคลื่นเสียงระดับอัลตราโซนิก (Ultrasonic Bath) เป็นเวลา 1 นาที แล้วรินสารละลายที่ขุ่นออกเหลือแต่ผงแก้วทำซ้ำกันอย่างน้อย 2 ครั้ง หรือจนกว่าอะซีโตนจะไม่ขุ่น จากนั้นอบที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที เพื่อกำจัดอะซีโตนส่วนเกินแล้วทิ้งไว้ให้เย็นใน ตู้ดูดความชื้น จากนั้นนำผงแก้วที่แห้งแล้วไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ให้ได้น้ำหนักประมาณ 2 กรัม จดบันทึกน้ำหนักแล้วบรรจุผงแก้วลงในขวดปริมาตรแบบมีฝาปิดปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทำ ทั้งหมดจำนวน 3 ขวด จากนั้นปิเปตน้ำปราศจากไอออน ที่ผ่านการต้มให้เดือดเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดก๊าซในน้ำออกมาแล้ว ปิเปตมา 50 มิลลิลิตร ไปใส่ในขวดปริมาตรที่มีผงแก้วบรรจุอยู่ จากนั้นนำขวดปริมาตรซึ่งบรรจุน้ำและผงแก้วไปแช่ในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียสเป็น เวลา 60 นาที โดยนาที่ที่ 1-5 ไม่ปิดจุกขวดปริมาตรเพื่อป้องกันการขยายตัวอย่างรุนแรงของก๊าซ ในน้ำเมื่อได้รับความร้อน หลังจากนั้นนาที่ที่ 5 จึงค่อยปิดฝาจุกขวดปริมาตรได้ เมื่อครบ 60 นาทีนำ ขวดปริมาตรออกมาจากน้ำร้อนแล้วทำให้ขวดปริมาตรเย็นลงโดยการเปิดน้ำไหลผ่านด้านข้างขวด แล้วปิเปตสารละลายใส่ด้านบนผงแก้วมาปริมาณ 25 มิลลิลิตร ถ่ายลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปไตเตรทกับกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01M จดบันทึกค่าที่ได้แล้ว นำไปจำแนกระดับการทอนน้ำตามตารางที่ 3.2 ผลทดสอบการทอนน้ำที่ได้ถูกนำมาเป็นเกณฑ์ในการ เลือกระดับการทอนน้ำมากที่สุด เพื่อนำไปปรับปรุงสูตรต่อไปในขั้นตอนที่ 1.2

ตารางที่ 3.2 เกณฑ์การจำแนกระดับการทอนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำตามมาตรฐาน ISO 719

ปริมาณ 0.01M HCl ที่ใช้ในการ ไตเตรทจนถึงจุดยุติ (มิลลิลิตร)	ปริมาณ $\text{Na}_2\text{O}$ ที่ถูกชะออกมา อยู่ในสารละลาย (ไมโครกรัม)	ระดับความต้านทานต่อน้ำ
<0.1	< 31	1
0.1 - 0.2	31 - 62	2
0.2 - 0.85	62 - 264	3
0.85 - 2.0	264 - 620	4
2.0 - 3.5	620 - 1085	5
> 3.5	> 1085	>5

### ตอนที่ 1.2 การเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ในสูตรแก้ว

การเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ทำโดยเติมลงในสูตรแก้วที่ถูกเลือกมาจากขั้นตอนที่ 1.1 ที่ผ่านการหาปริมาณการเติมโคโลไมต์ที่เหมาะสม สูตรที่เลือกมาปรับต่อในขั้นตอนนี้เป็นสูตรแก้วที่มีค่าการละลายน้ำขององค์ประกอบกลุ่มต่างต่ำที่สุด



ภาพที่ 3.3 แผนผังการทดลองขั้นตอนที่ 1.2 การปรับสูตรแก้วโดยการเติมวัตถุดิบตัวเติม และขั้นตอนที่ 1.3 การอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

สูตร DZr1, DZr2 และ DZr3 เตรียมโดยเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 0.25%, 0.50% และ 1.00% โดยน้ำหนักตามลำดับโดยเติมแทนในส่วนของอะลูมินา ในสูตรที่เลือกมาจากขั้นตอนที่ 1.1 ซึ่งสูตรที่เลือกมามีค่าการละลายของต่างออกมาจากแก้วน้อยที่สุดเมื่อมีน้ำเป็นตัวทำละลาย

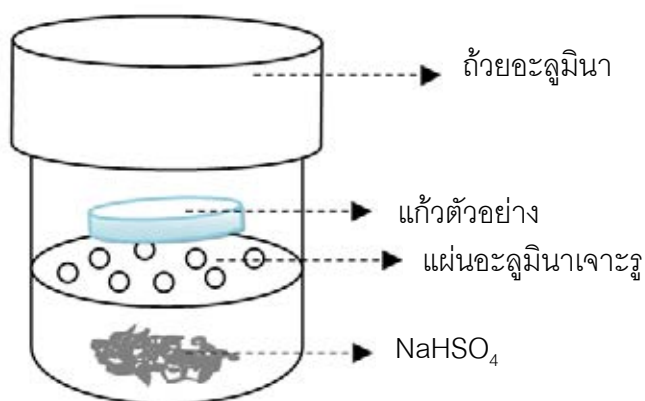
สูตร DZn1, DZn2 และ DZn3 เตรียมโดยการเติมซิงค์ออกไซด์ 1%, 2% และ 3% โดยน้ำหนักตามลำดับ ลงในสูตรที่เลือกมาจากขั้นตอนที่ 1.1 สูตรที่เลือกมาเป็นสูตรที่มีค่าการละลายขององค์ประกอบกลุ่มต่างออกมาจากแก้วน้อยที่สุดเมื่อใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย โดยองค์ประกอบของวัตถุดิบในสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.3





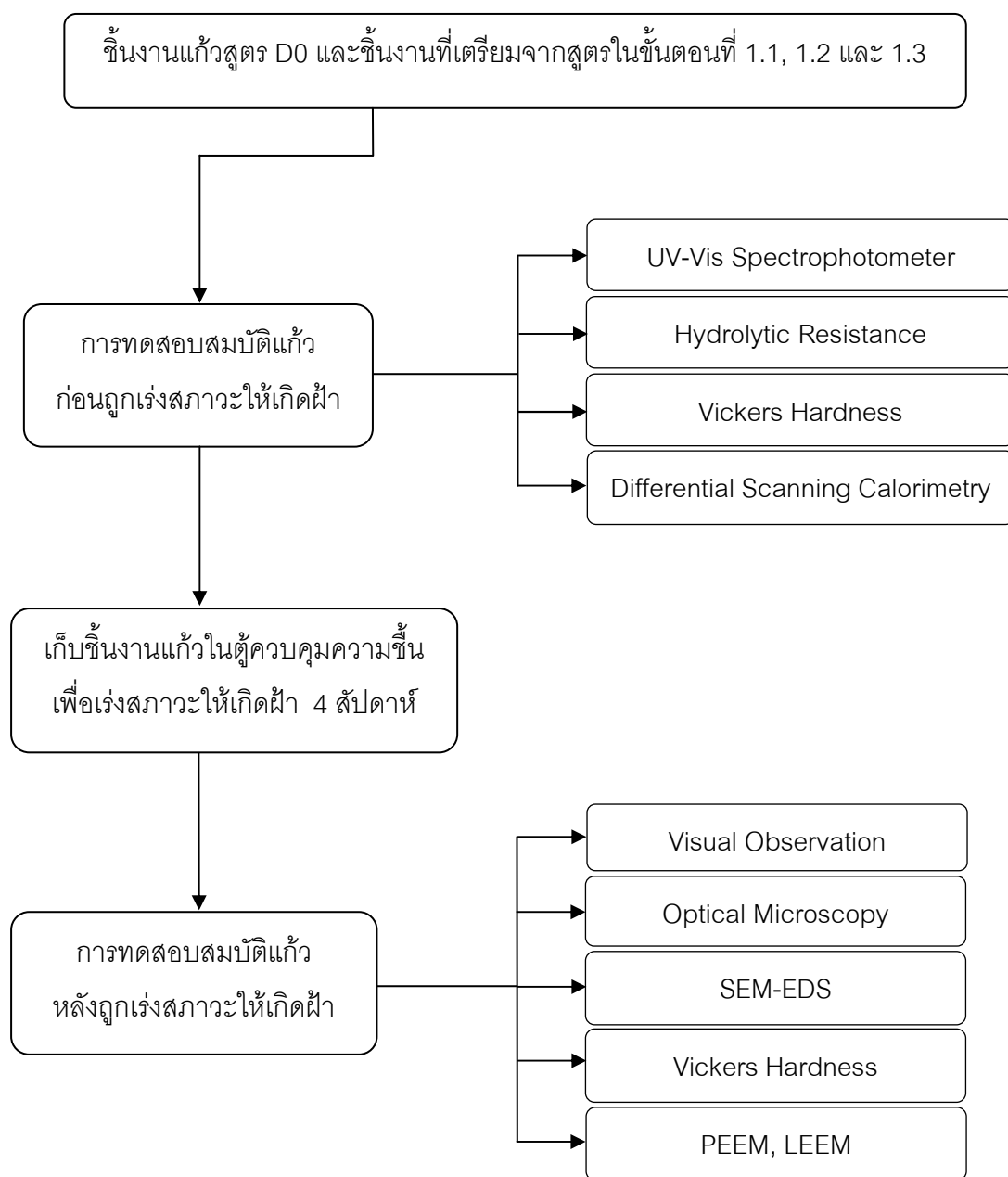
### ตอนที่ 1.3 การอบผิวแก้วโซดาไลม์ด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ [30]

ตัวอย่างแก้ว DS ได้จากการนำตัวอย่างแก้วสูตรที่ได้จากการเลือกในขั้นตอนที่ 1.1 ซึ่งเป็นสูตรที่มีการทนต่อน้ำมากที่สุดในกลุ่มของสูตรที่มีการเติมโคโลไมต์ มาผ่านกระบวนการอบผิวแก้ว ทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการอบผิวแก้วสูตรดังกล่าวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งแตกต่างจากการเผาโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ( $\text{NaHSO}_4$ ) จำนวน 15 กรัม ที่ถูกบรรจุอยู่ในด้านล่างของถ้วยอะลูมินาตามภาพที่ 3.4 และเนื่องจากวิธีการอบผิวด้วยก๊าซนี้มีเป้าหมายเพื่อนำไปประยุกต์ใช้จริงในกระบวนการอบอ่อนแก้วของโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตแก้ว ดังนั้นเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์คือ 570 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกับกระบวนการอบอ่อนของแก้วหลังการขึ้นรูปเพื่อลดความเครียดและอบเป็นเวลา 5 นาที



ภาพที่ 3.4 การอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

### 3.2.6 วิเคราะห์สมบัติแก้วสูตรตั้งต้นเพื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการเติมตัวเติม



ภาพที่ 3.5 แผนผังการทดลองการทดสอบสมบัติของแก้วสูตรตั้งต้น เพื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่มีการเติมตัวเติม

#### 3.2.6.1 การวิเคราะห์สีและความสามารถในการส่งผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometry

สูตรแก้วที่มีการเติมวัตถุดิบตัวเติมและสูตรเดิมที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมถูกเตรียมเป็นชิ้นงานโดยการหลอมในห้องปฏิบัติการและนำมาวัดสีด้วยเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

(Analytik jena รุ่น Specord 250) โดยทำการวิเคราะห์ในระบบสีแบบ CIE L\*a\*b\* และทำการวัดค่าการส่องผ่านของแสง (Transmission) ในช่วง 300 ถึง 1,100 นาโนเมตรและอ่านค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงที่ 585 นาโนเมตร การเตรียมชิ้นงานแก้วเพื่อวัดสีทำโดยการขัดด้วยแผ่นขัดเพชรความละเอียด 60 ,45 และ 6 ไมครอน ตามลำดับและในขั้นตอนสุดท้ายขัดด้วยแผ่นสักลมลาดกับสารแขวนลอยของผงซีเรียมออกไซด์ (CeO<sub>2</sub>) ที่มีความละเอียดประมาณ 1 ไมครอน เตรียมชิ้นงานแก้วให้ผิวทั้งสองด้านเป็นระนาบและมีพื้นผิวสองด้านขนานกัน ไม่มีรอยขีด การวัดสีและการส่องผ่านของแสงเพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสีและความใสของสูตรแก้วเดิมที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม(D0) เพื่อศึกษาแนวโน้มของการนำสูตรแก้วไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรมเนื่องจากโรงงานแก้วจะให้ความสำคัญในเรื่องของสีและความใสเป็นอย่างมาก

### 3.2.6.2 การทดสอบความต้านทานต่อการละลายน้ำ (Hydrolytic Resistance)

การทดสอบหาปริมาณการละลายของธาตุกลุ่มต่างที่ออกมาจากผิวแก้วตามมาตรฐาน ISO 719 [32] ทำการทดสอบโดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นในขั้นตอนที่ 1.1

### 3.2.6.3 การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ของผิวแก้ว (Vickers Hardness)

ทดสอบความแข็งด้วยเครื่อง Vickers hardness tester ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น HMV-2000 โดยใช้หัวกดเพชรที่มีรูปทรงพีระมิดฐานเป็นรูปเหลี่ยมจัตุรัส มีมุมระหว่างหน้าต่อหน้า 136 องศา การเตรียมชิ้นงานแก้วทำโดยขัดให้เรียบเหมือนการเตรียมชิ้นงานเพื่อวัดสีในข้อ 3.2.6.1 ทำการทดสอบความแข็งผิวแบบวิกเกอร์ 10 ครั้งต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง โดยใช้แรงกด 300 กรัมแรง (g) ใช้เวลาในการกด 15 วินาที โดยชิ้นงานแก้วก่อนถูกแรงสภาวะและชิ้นงานแก้วหลังการผ่านการเก็บในสภาวะที่แรงให้เกิดฝ้าถูกนำมาวัดค่าความแข็งวิกเกอร์เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยค่าความแข็งวิกเกอร์ (Vickers micro hardness, HV) คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$HV = 1.8544 \times \left( \frac{F}{d^2} \right) \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

เมื่อ HV = ความแข็ง Vickers หน่วย กิโลกรัมแรง/ตารางมิลลิเมตร (kg<sub>f</sub>.mm<sup>-2</sup>)

F = แรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตก หน่วย กิโลกรัมแรง (kg<sub>f</sub>)

d = ความยาวเฉลี่ยระหว่างรอยหัวกด 2 หัว หน่วย มิลลิเมตร (mm)

หมายเหตุ: ค่า HV ที่วัดได้นี้มีหน่วยเป็น กิโลกรัมแรง/ตารางมิลลิเมตร ( $\text{kg}_f.\text{mm}^{-2}$ ) สามารถเปลี่ยนหน่วยเป็นหน่วยในระบบ SI โดยเปลี่ยนเป็นหน่วย เมกะพาสคัล ( $1 \text{ kg}_f.\text{mm}^{-2} = 9.807 \text{ MPa}$ )

#### 3.2.6.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแก้วด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของแก้วและหาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ที่ชื่อ NETZSCH รุ่น STA 449 F3 Jupiter โดยเตรียมตัวอย่างผงแก้วขนาดเล็กกว่า 300 ไมครอน ที่ผ่านการอบแห้งเพื่อกำจัดความชื้นแล้วประมาณ 20 มิลลิกรัม ใส่ลงในถ้วยแพลตตินัม (Platinum crucible) ทำการทดสอบโดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึง 1000 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในบรรยากาศที่มีไนโตรเจนร้อยละ 80 ออกซิเจนร้อยละ 20 และใช้ถ้วยแพลตตินัมเปล่าเป็นตัวอ้างอิง

#### 3.2.6.5 การทดสอบความต้านทานต่อสภาพอากาศภายใต้สภาวะจำลอง (Weathering Test)

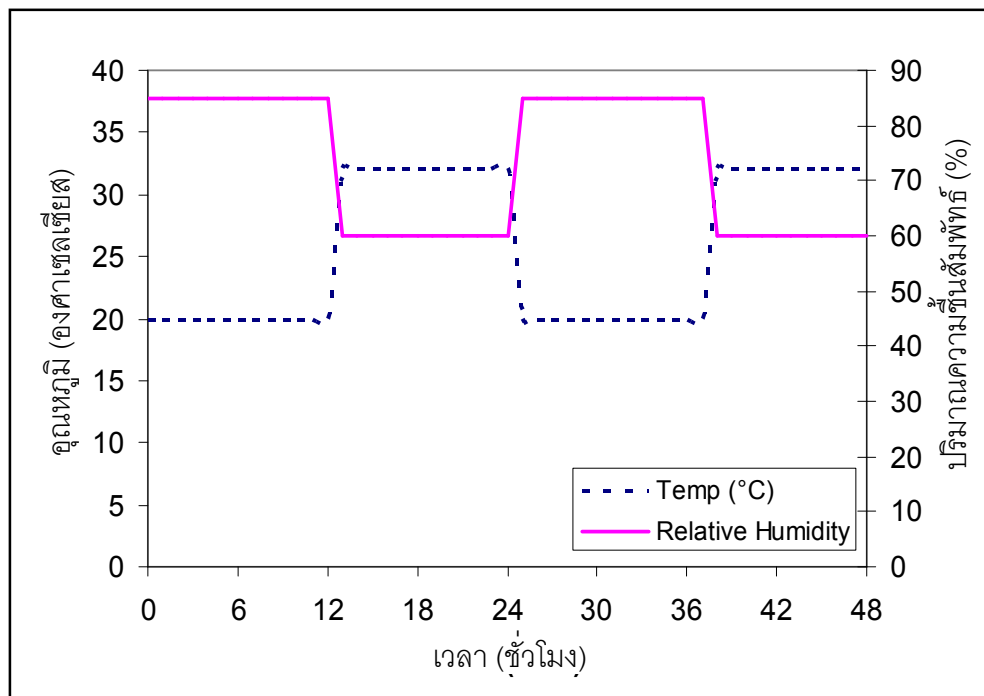
ชิ้นงานแก้วถูกทดสอบความต้านทานต่อสภาพอากาศ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดฝ้า ถูกสร้างขึ้นในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ (Weathering Chamber) ยี่ห้อ Termaks ทำการควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเป็นวงจรต่อเนื่อง 24 ชั่วโมงดังแสดงในตารางที่ 3.4 สภาวะที่จำลองขึ้นมานั้นอ้างอิงมาจากสภาพอากาศในฤดูฝนของประเทศไทย ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดปัญหาการเกิดฝ้ามากที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงอื่นของปี

ตารางที่ 3.4 ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้นในระยะเวลา 24 ชั่วโมง

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ความชื้นสัมพัทธ์
0-12	20	85%
13-24	32	60%

การเตรียมชิ้นงานแก้วก่อนนำมาทดสอบเร่งสภาวะ ทำโดยขัดตัวอย่างให้เรียบและเป็นระนาบเดียวกันโดยขัดผิวหน้าของแก้วโดยให้ผิวแก้วออกไปน้อยที่สุด จากนั้นเช็ดทำความสะอาดผิวแก้วด้วยโพรพานอลก่อนนำไปเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น เพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับความชื้นในบรรยากาศขณะนั้นๆ ก่อนการทดสอบไปเร่งสภาวะให้เกิดฝ้า การทดสอบเร่งสภาวะให้เกิดฝ้า

ชิ้นงานแก้วถูกเก็บในบรรยากาศที่จำลองขึ้นเป็นเวลาต่อเนื่อง 4 สัปดาห์ ตามภาพที่ 3.6 โดยทำควบคุมปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเป็นวงจรซ้ำๆ ซึ่งชิ้นงานแก้วจะถูกนำมาตรวจสอบการเกิดตำหนิฝ้าในทุกๆ สัปดาห์



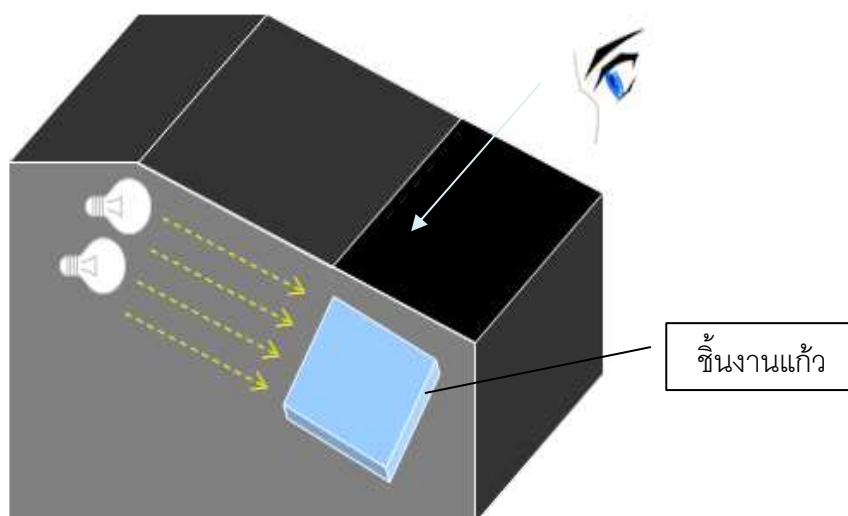
ภาพที่ 3.6 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ถูกสร้างขึ้นในตู้ควบคุมความชื้นอัตโนมัติ

### 3.2.6.6 การตรวจสอบปริมาณการเกิดฝ้าด้วยตาเปล่าภายใต้แสงไฟที่มีระดับความเข้มแสงต่างกัน (Visual Observation) [21]

ชิ้นงานแก้วหลังการผ่านภาวะที่เร่งให้เกิดฝ้าถูกนำมาตรวจสอบระดับของการเกิดฝ้าด้วยตาเปล่าภายใต้ระดับแสงความเข้มแตกต่างกันเพื่อจำแนกปริมาณการเกิดฝ้า โดยมีหลอดเดย์ไลท์หรือหลอดที่มีอุณหภูมิแสงเหมือนกับแสงแดดในช่วงกลางวันเป็นแหล่งกำเนิดแสง แบ่งเป็นความเข้ม 2 ระดับคือ ระดับความเข้มแสงปกติ (500 ลักซ์) และความเข้มสูง (1000 ลักซ์) โดยมีการแยกระดับของปริมาณการเกิดฝ้าตามตารางที่ 3.5 การตรวจสอบชิ้นงานแก้วทำในกล่องอะคริลิกสีดำซึ่งภายในมีการติดตั้งหลอดไฟภายในตามภาพที่ 3.7

ตารางที่ 3.5 เกณฑ์การแบ่งระดับการเกิดฝ้าโดยใช้ความเข้มแสงที่ต่างกันในการตรวจสอบ

A	ดีมาก	ไม่พบจุดหรือฝ้าเมื่อตรวจสอบโดยใช้ความเข้มแสงสูงและวางชิ้นงานห่างจากจุดให้กำเนิดแสงประมาณ 6 นิ้ว
B	ดี	พบจุดเล็กน้อยหรือฝ้าบางๆ เมื่อตรวจสอบในภาวะเดียวกับข้อ A
C	พอใช้	พบฝ้ามากเมื่อตรวจสอบในภาวะเดียวกับข้อ A
D	แย่มาก	พบฝ้าเล็กน้อยเมื่อตรวจสอบด้วยแสงความเข้มปกติและวางชิ้นงานห่างจากจุดให้กำเนิดแสงประมาณ 6 นิ้ว
E	แย่มาก	พบกลุ่มของตำหนิฝ้าเกาะตัวกันหนาแน่นเมื่อตรวจสอบด้วยภาวะเดียวกับข้อ D



ภาพที่ 3.7 การตรวจสอบปริมาณของการเกิดฝ้าของชิ้นงานแก้วในกล่องอะคริลิกสีดำทึบ

### 3.2.6.7 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope)

ชิ้นงานแก้วหลังผ่านการเร่งภาวะให้เกิดตำหนิฝ้าถูกนำมาศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยการ  
ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ยี่ห้อ Nikon รุ่น Eclipse ME 6000 เพื่อศึกษา  
การเปลี่ยนแปลงผิวแก้วเมื่อถูกเก็บไว้ในสภาวะที่มีความชื้นสูง

### 3.2.6.8 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบลักษณะผิวแก้วและตำหนิฝ้าที่เกิดขึ้นหลังการเร่งสภาวะ และการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของแก้วในบริเวณที่เกิดฝ้าเปรียบเทียบกับบริเวณพื้นผิวปกติ อีกส่วนหนึ่งเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผิวกระจกก่อนทำการอบผิวเพื่อเปรียบเทียบกับกระจกหลังการอบผิวทำโดยใช้เทคนิค Energy dispersive spectroscopy (EDS) การเตรียมชิ้นงานทำโดยตัดชิ้นงานด้วยมีดตัดกระจกและเนื่องจากผิวแก้วไม่นำไฟฟ้าจึงต้องให้เกิดการนำไฟฟ้าโดยการเคลือบผิวด้วยทองคำก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM-EDS

### 3.2.6.9 วิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวแก้วโดยการใช้เทคนิค Photo Emission Electron Microscopy (PEEM) และ เทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM)

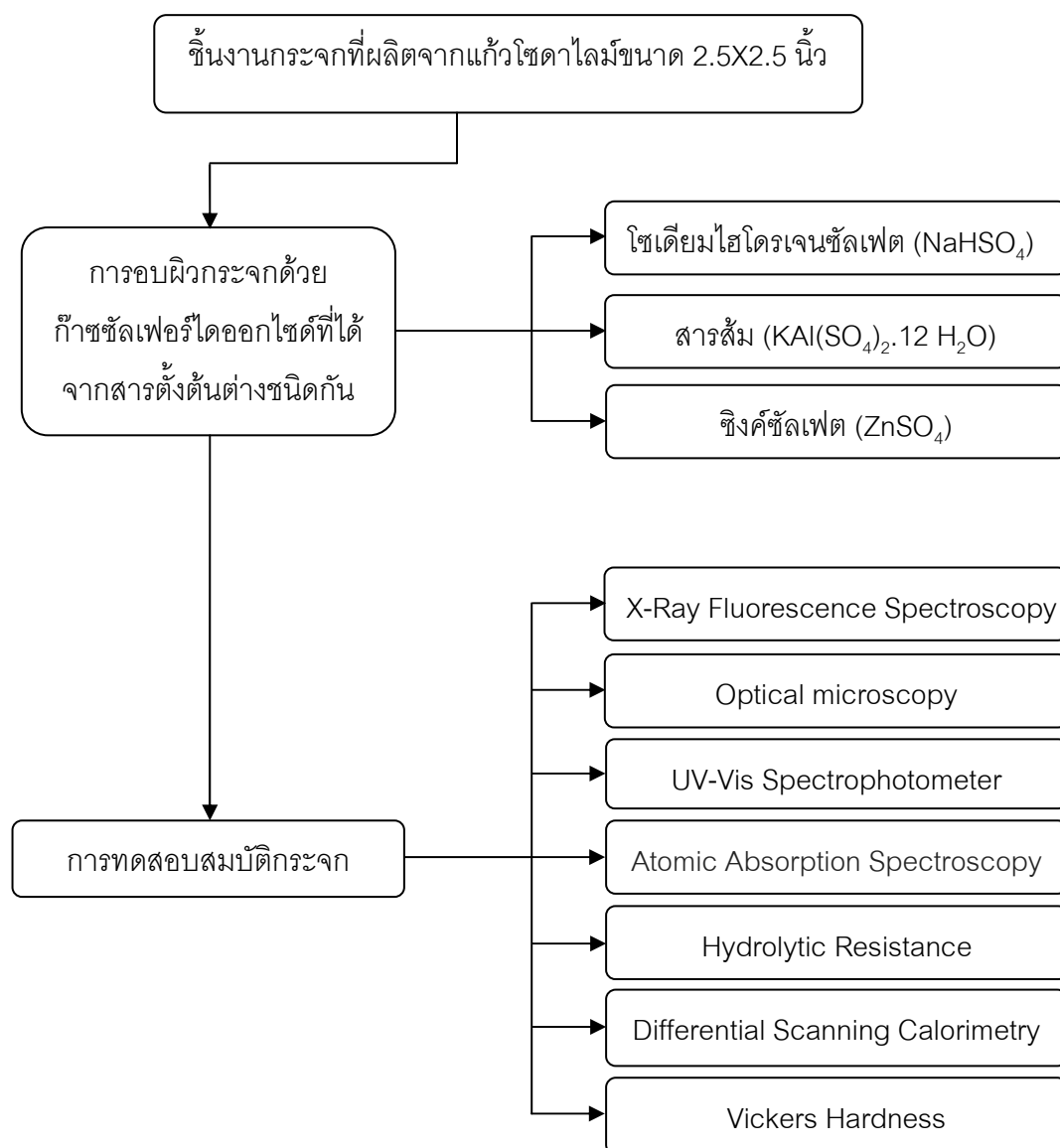
งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการหาวิธีการเตรียมชิ้นงานแก้วเพื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Photo Emission Electron Microscopy (PEEM) และ เทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM) ยี่ห้อ ELMITEC รุ่น PEEM III เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีการวิเคราะห์ในระดับพื้นผิวเท่านั้น จึงได้ภาพและสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของบริเวณเกิดฝ้าได้แม้จะเกิดปกคลุมด้วยระดับความหนาที่น้อยมาก ซึ่งในการเกิดฝ้าระยะเริ่มแรกอาจไม่พบหรือเห็นไม่ชัดเมื่อตรวจดูด้วยเทคนิค SEM และเมื่อต้องการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS พบว่าความลึกที่ใช้วิเคราะห์นั้นลึกกว่าระดับความหนาของชั้นที่เกิดผลึก ผลการทดลองที่ได้จึงรวมองค์ประกอบของเนื้อแก้วไปด้วย นอกจากนั้นเทคนิคที่นำมาใช้นี้อาจมีประโยชน์อย่างมากเมื่อใช้วิเคราะห์กระจกหรือแก้วชนิดที่ได้จะเกิดผลเสียในการใช้งานอย่างมากแม้จะเกิดฝ้าในปริมาณน้อยมากก็ตาม ซึ่งจะเกิดปัญหาในการนำไปใช้งาน เช่น กระจกสำหรับทำสแกนเนอร์ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการหา condition ที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่างที่เป็นแก้วในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM และ LEEM แม้เทคนิคนี้จะมีข้อดีอยู่หลายประการ แต่ข้อเสียคือการเตรียมชิ้นงานเพื่อทดสอบทำได้ยากโดยเฉพาะวัตถุที่ไม่นำไฟฟ้า และเทคนิคดังกล่าวยังไม่พบว่ามีกรรมนำมาวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นแก้ว ดังนั้นการหาวิธีการเตรียมชิ้นงานที่เหมาะสมจะสามารถทำให้ง่ายต่อการทดลองเพื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Micro-XPS ต่อไปในอนาคต

วิธีการเตรียมตัวอย่างทำโดยการเคลือบผิวของชิ้นงานแก้วด้วยทองเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้า โดยใช้เทคนิค Sputter coating ด้วยเครื่อง Sputter ที่ถูกสร้างขึ้นโดยสถาบันวิจัยแสง

ซินโครตรอน โดยใช้กำลังการสปีดเตอร์ 100 วัตต์ และมีการแปรค่าเวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว คือ 40, 30 และ 15 วินาที เพื่อให้ความหนาของชั้นเคลือบของแตกต่างกัน ตรวจสอบความหนาของชั้นทองที่เคลือบด้วยเวลาที่ต่างกันด้วยเทคนิค Atomic Force Microscope (AFM)

## ตอนที่ 2 การแก้ไขการเกิดฝ้าของกระจกที่ผลิตจากแก้วโซดาไลม์

จากการทดลองในตอนต้นที่ 1 ทำการทดลองเพื่อแก้ปัญหาการเกิดฝ้าของแก้วบรรจุภัณฑ์ชนิดโซดาไลม์โดยการปรับสูตรและวิธีการปรับผิวแก้ว จากผลการทดลองพบว่าการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เคลือบผิวแก้วทำให้แก้วต้านทานการเกิดฝ้าได้ดีขึ้น จึงได้ทำการทดลองต่อเนื่องเพื่อศึกษาการใช้สารตั้งต้นชนิดต่างกันเป็นตัวให้กำเนิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยทำการทดลองกับกระจกโพลีเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) แผนผังในการทดลองดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แผนผังการทดลองขั้นตอนที่ 2 การแก้ปัญหาการเกิดฝ้าของกระจกโซดาไลม์



### 3.2.7 การเตรียมชิ้นงานกระจกโซดาไลม์

เตรียมชิ้นงานโดยการตัดกระจกด้วยมีดตัดกระจกให้ได้ขนาด 2.5 x 2.5 นิ้ว

#### 3.2.7.1 การปรับผิวกระจกโดยการอบผิวกระจกด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ชิ้นงาน FNS1, FNS3, FNS5 และ FNS10 เตรียมโดยอบผิวกระจกด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวเมื่อเผาโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ( $\text{NaHSO}_4$ ) ซึ่งถูกบรรจุไว้ด้านล่างถ้วยพอร์ซเลนที่ใช้เป็นภาชนะบรรจุชิ้นงาน และใช้กระบือียงเคลือบปิดด้านบน ทำการอบผิวแก้วที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเดียวกับที่ใช้ในกระบวนการอบอ่อน เป็นเวลา 5 นาที โดยมีการแปรค่าปริมาณของโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต คือ 1, 3, 5 และ 10 กรัม ตามลำดับ

ชิ้นงาน FAI1, FAI3, FAI5 และ FAI10 เตรียมโดยอบผิวกระจกด้วยการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่แตกตัวจากการเผาสารส้มซึ่งถูกแปรค่าปริมาณ คือ 1, 3, 5 และ 10 กรัม ตามลำดับ

ชิ้นงาน FZS1, FZS3, FZS5 และ FZS10 เตรียมโดยอบผิวกระจกด้วยการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่แตกตัวจากการเผาซิงค์ซัลเฟตซึ่งถูกแปรค่าปริมาณ คือ 1, 3, 5 และ 10 กรัม ตามลำดับ

### 3.2.8 การวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานกระจกหลังการปรับสภาพผิวโดยการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ผิวกระจกหลังจากผ่านการอบด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้วจะมีลักษณะเป็นฝ้าขาวเกาะอยู่บนผิว ซึ่งสารประกอบที่เกาะอยู่บนผิวกระจกนั้นเกิดจากปฏิกิริยาของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับต่างที่อยู่บริเวณผิวกระจก ซึ่งหากนำวิธีนี้ไปใช้ในกระบวนการผลิตต้องนำกระจกไปล้างออกด้วยน้ำสะอาดเพื่อเป็นการกำจัดฝ้าก่อนการนำมาใช้งาน

#### 3.2.8.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระจกด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

การศึกษาร่ององค์ประกอบทางเคมีของกระจกเพื่อตรวจสอบว่ากระจกที่นำมาทำการทดลองเป็นกระจกชนิดโซดาไลม์

### 3.2.8.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวกระจกโดยการใช้อุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope)

หลังจากการอบกระจกด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะเกิดคราบขาวเกาะอยู่บนผิวกระจก ถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

### 3.2.8.3 การวิเคราะห์สีและความสามารถในการส่องผ่านของแสงด้วย UV-Vis Spectrophotometry

การวิเคราะห์สีและความสามารถในการส่องผ่านของแสง เพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกระจกที่ไม่ผ่านการอบผิวและกระจกหลังอบผิวด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ การเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ต้องกำจัดคราบขาวที่เกิดขึ้นหลังการอบผิวด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยการล้างด้วยน้ำเสียก่อน จากนั้นจึงเซ็ดให้แห้งก่อนนำไปทำการวัดสีตามที่อธิบายไว้ในขั้นตอนที่ 3.2.7.1

### 3.2.8.4 การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของคราบขาวที่เกาะที่ผิวกระจกหลังการอบผิวโดยใช้เทคนิค Atomic absorption spectroscopy (AAS)

องค์ประกอบของคราบขาวหรือผลึกที่เกิดขึ้นหลังการอบผิวกระจกถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS การเตรียมตัวอย่างโดยล้างคราบขาวที่เกาะบนผิวกระจกด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำน้ำดังกล่าวไปทำการวัดปริมาณของธาตุกลุ่มต่าง ๆ คือ Na Ca และ Mg เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของธาตุกลุ่มต่าง ๆ ที่ถูกกำจัดออกหลังการอบผิวแก้วและการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ

### 3.2.8.5 การทดสอบความต้านทานต่อการละลายน้ำ (Hydrolytic Resistance) ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) [23]

การตรวจสอบระดับการทนต่อน้ำของกระจก ทำการวิเคราะห์โดยใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส การเตรียมสารละลายเพื่อมาทดสอบทำตามมาตรฐาน ISO 719 [32] ที่อธิบายไว้ในขั้นตอนที่ 1.1 แต่ต่างกันคือนำสารละลายไปหาปริมาณของกลุ่มต่าง ๆ โดยแยกชนิด Na, Ca และ Mg ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

### 3.2.8.6 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแก้วด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของแก้วและหาอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ของทั้งกระจกที่ไม่ผ่านการอบผิวและกระจกหลังอบผิวโดยใช้สารตั้งต้นต่างชนิดกัน โดยเตรียมตัวอย่างแก้วและทำการทดสอบเหมือนในขั้นตอนที่ 3.2.6.4

### 3.2.8.7 การทดสอบความแข็งวิกเกอร์ของผิวกระจก (Vickers Hardness)

หลังล้างคราบขาวออกนำกระจกมาทำการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ โดยวัดค่าความแข็ง 10 ครั้งต่อ 1 ชิ้นตัวอย่าง โดยใช้แรงกด 50 กรัมแรง (gf) ใช้เวลาในการกด 10 วินาที การวัดความแข็งของผิวกระจกเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกระจกโซดาไลม์ที่ไม่ผ่านการอบผิวและกระจกหลังผ่านการอบผิวด้วยก๊าซซิลเฟอไรด์ออกไซด์



#### 4.1.1.1 โดโลไมต์ ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ )

โดโลไมต์ถูกนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อตรวจสอบหาปริมาณอัตราส่วนของแมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์และปริมาณเหล็กออกไซด์ เนื่องจากในธรรมชาติการเกิดของแร่โดโลไมต์พบว่าจะมีเหล็กเกิดปะปนอยู่ด้วย [12-13] ซึ่งโดโลไมต์ที่จะนำมาใช้ในการหลอมแก้วควรมีปริมาณเหล็กอยู่น้อย ไม่เช่นนั้นอาจส่งผลทำให้แก้วมีสีเขียวเนื่องมาจากออกไซด์ของเหล็กได้ ผลขององค์ประกอบทางเคมีของโดโลไมต์ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโดโลไมต์

ออกไซด์	โดโลไมต์ (%โดยน้ำหนัก)
CaO	57.18
MgO	36.39
SiO <sub>2</sub>	5.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.27
K <sub>2</sub> O	0.15
รวม	100.00

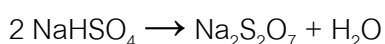
จากตารางที่ 4.2 พบว่าโดโลไมต์มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักโดยมีอยู่ร้อยละ 57.18 โดยน้ำหนัก และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ซึ่งเป็นองค์ประกอบรองมีอยู่ร้อยละ 36.39 โดยน้ำหนัก การเติมโดโลไมต์แทนการเติมหินปูนในการทดลองเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เข้าไปในสูตรแก้ว ซึ่งเป็นการเปลี่ยนวัตถุดิบในกลุ่มเดียวกันคือกลุ่ม Modifier แต่เมื่อแมกนีเซียมสร้างพันธะกับออกซิเจน (Mg-O) ในโครงสร้างแก้วแล้วจะมีความแข็งแรง 37 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม ซึ่งมากกว่าพันธะระหว่างออกซิเจนกับแคลเซียม (Ca-O) ที่มีความแข็งแรงของพันธะ 32 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม [10] จึงทำให้เมื่อมีการเติมโดโลไมต์โครงสร้างแก้วจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น มีความหนาแน่นมากขึ้นด้วยเพราะอะตอมของแมกนีเซียมมีขนาดอะตอมเล็กกว่าแคลเซียมในขณะที่มีประจุเท่ากัน ส่วนปริมาณเหล็กออกไซด์ที่พบในโดโลไมต์พบว่ามีอยู่ร้อยละ 0.27 โดยน้ำหนัก ซึ่งหากเติมโดโลไมต์แทนที่ของหินปูนตามสูตร D3 ซึ่งมีการแทนที่ของโดโลไมต์มากที่สุดจะมีสัดส่วนของเหล็กออกไซด์ในสูตรร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก เทียบกับสูตรก่อนเติม D0 มีปริมาณเหล็กออกไซด์อยู่ร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนัก ปริมาณที่

เพิ่มขึ้นอาจทำให้แก๊วมีสีเขียวน้อยลง ดังนั้นการเติมโดโลไมต์จากแหล่งวัตถุดิบแห่งนี้ในสูตรแก้ว อาจจำเป็นต้องมีการใช้วัตถุดิบที่เป็นตัวฟอกสีควบคู่ไปด้วย จะทำให้แก้วที่มีความใสและมีสีเขียวน้อยลง

#### 4.1.1.2 โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต (NaHSO<sub>4</sub>)

การเผาให้ความร้อนกับ NaHSO<sub>4</sub> จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

1. ปฏิกิริยากำจัดน้ำเกิดที่ 315 องศาเซลเซียส



2. การแตกตัวเกิดที่ 460 องศาเซลเซียส:



จากปฏิกิริยาพบว่า จะมีการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ออกมาที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส การใช้ NaHSO<sub>4</sub> ในการอบผิวแก้วที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียสจึงต้องมีการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต พบว่าเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส มีปริมาณของ SO<sub>3</sub> ลดลงดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อนำโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตไปใช้ในการอบผิว 1 ครั้งจะมีก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างการอบผิวแก้วร้อยละ 5.74 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตที่ใช้อบผิวครั้งหนึ่งแล้วไปใช้ซ้ำ พบว่ามีก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างการอบผิวแก้วร้อยละ 2.35 ของน้ำหนัก ซึ่งลดลงเป็นปริมาณกว่าครึ่งหนึ่งของก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาในครั้งแรก ดังนั้นในการนำโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตกลับมาใช้ซ้ำต้องมีการเติมโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตใหม่ที่ไม่ผ่านการใช้งานมาก่อนเข้าไปประมาณครึ่งหนึ่งของปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตที่ใช้ในการเผาครั้งแรก เพื่อควบคุมปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ปลดปล่อยออกมาในระบบให้มีปริมาณคงที่

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต(NaHSO<sub>4</sub>)

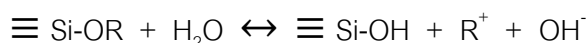
ออกไซด์	โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ก่อนเผา (%โดยน้ำหนัก)	โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต เผา1ครั้ง (%โดยน้ำหนัก)	โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต เผา2ครั้ง (%โดยน้ำหนัก)
Na <sub>2</sub> O	17.84	23.58	25.93
SO <sub>3</sub>	82.16	76.42	74.07
รวม	100.00	100.00	100.00

## 4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติของแก้ว

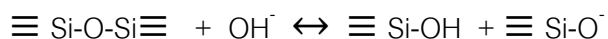
### 4.1.2.1 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการละลายน้ำ (Hydrolytic Resistance)

กลไกการเกิดฝ้าของแก้ว (Weathering) คล้ายกับกลไกการละลายของแก้วที่เกิดขึ้นเมื่อแก้วถูกแช่อยู่ในน้ำ (Dissolution) คือการละลายอันเนื่องมาจากมีน้ำเป็นตัวทำละลายเหมือนกัน แต่สิ่งที่ต่างกันคือการเกิดฝ้าผิวแก้วไม่ได้สัมผัสกับน้ำอยู่ตลอดเวลา แต่มีการแห้งแล้วเปียกเป็นวงจรรซ้ำๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เปลี่ยนแปลง ลักษณะตำหนิที่เกิดขึ้นเมื่อแก้วถูกเก็บอยู่ในบริเวณที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงจะมีความรุนแรงมากกว่าแก้วเมื่อถูกแช่อยู่ในน้ำ เพราะเมื่อแก้วแช่อยู่ในน้ำจะเกิดเป็นชั้นของ Hydrate Silica ซึ่งชั้นดังกล่าวจะต่อมของธาตุกลุ่มต่างถูกชะออกไปจนแทบจะไม่มี Na เหลืออยู่เลย เหลือเพียงสายโซ่ซิลิกากับโมเลกุลของน้ำ (H<sub>2</sub>O) มีลักษณะเป็นชั้นที่มีความพรุนตัวสูงซึ่งอาจเรียกว่า Gel layer กลไกการเกิดชั้นดังกล่าวมาจากการกลั่นตัวของโมเลกุลของ ไฮลีนอล (Silinol) 2 โมเลกุล [29] กลไกที่แก้วละลายน้ำเกิดขึ้นดังนี้

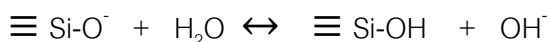
ขั้นตอนที่ 1 H<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> จากโมเลกุลน้ำเข้าไปแทนที่ธาตุที่เป็น Modifier



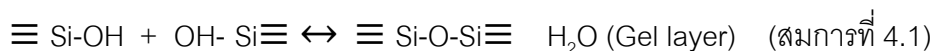
ขั้นตอนที่ 2 OH<sup>-</sup> ในสารละลายที่เกิดจากขั้นตอนที่ 1 ทำลายพันธะ Siloxane เกิดเป็นออกซิเจนที่ไม่ได้เชื่อมระหว่างซิลิคอน (Non bringing oxygen)



ขั้นตอนที่ 3 Non bringing oxygen ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น OH<sup>-</sup> ทำให้เพิ่มการเกิดกลไกตามขั้นตอนที่ 2 และเกิดไฮลีนอล (Si-OH)



ขั้นตอนที่ 4 การเกิดเป็น gel layer ที่มีโมเลกุลของน้ำแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ซิลิกา



การเกิดฝ้าและแก้วที่แช่ในน้ำมีความแตกต่างกันคือ ปริมาณของน้ำที่เป็นสารละลาย กรณีที่แก้วแช่ในน้ำจะมีปริมาณตัวทำละลายมากกว่าแก้วที่เกิดฝ้ามาก เมื่อไอออนของธาตุกลุ่มต่างหลุดออกไปละลายอยู่ในน้ำจะมีผลทำให้ความเป็นด่างเพิ่มขึ้นไม่มากจึงไม่กัดกร่อนผิวแก้วเพิ่มขึ้นไปอีกทำให้ชั้นที่เป็น Gel layer ดังกล่าวไม่ถูกทำลาย จึงหยุดการแพร่ของ Na ได้ แต่การเกิดฝ้าหากมีชั้นดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อความเป็นด่างในสารละลายสูงขึ้นเนื่องจากมีตัวทำละลายน้อยก็จะไปทำลายโครงสร้างของชั้นดังกล่าวให้บางลงจนทำให้โซเดียมแพร่ออกมาได้ง่ายขึ้นเช่นเดิม จึงเกิด

การกัดกร่อนเข้าไปในเนื้อแก้ว [33] จากการวิจัยของ Chopinet และคณะ [34] พบว่าลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นหลังการเกิดฝ้ามีบางส่วนเกิดฝังเข้าไปในเนื้อแก้ว

การทดสอบความต้านทานต่อการละลายน้ำของแก้วจึงเป็นการตรวจสอบขั้นตอนหนึ่งที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเกิดฝ้า น้ำที่เป็นตัวทำละลายจะระเหยของค์ประกอบกลุ่มต่างของแก้วซึ่งมีพันธะที่ไม่แข็งแรงมากกับโครงสร้างแก้วออกมาและธาตุกลุ่มต่างดังกล่าวจะเป็นสารตั้งต้นในการเกิดผลึกเมื่อน้ำที่เกาะอยู่ที่ผิวแก้วระเหยออกไป [35]

การทดลองเพื่อประเมินระดับการทนต่อน้ำของแก้วตามมาตรฐาน ISO 719 [32] มีการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำของการทำทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้แก้วมาตรฐาน SRM NIST 622 และ SRM NIST 623 ซึ่งเป็นแก้วมาตรฐานชนิดโซดาไลม์และแก้วบอโรซิลิเกต ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในภาคผนวก ก จากการจำแนกตามมาตรฐาน ISO 719 จะมีความต้านทานต่อน้ำระดับ 3 และ 2 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อนำแก้วตัวอย่างมาทำการทดลองผลที่ได้คือแก้วมาตรฐานแก้วโซดาไลม์มีระดับการทนน้ำระดับ 3 และแก้วมาตรฐานแก้วบอโรซิลิเกตมีความทนน้ำระดับ 2 ซึ่งตรงกับค่ามาตรฐานของแก้วนั้น ทำให้สรุปได้ว่าการทดลองเพื่อตรวจสอบระดับการทนน้ำที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีความถูกต้องสามารถเชื่อถือได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการไต่เตทรหดกับสารละลายที่ได้จากการสกัดธาตุกลุ่มต่าง คือ



จากสมการที่ 4.2 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ที่ใช้ในการไต่เตทรหดปริมาณ 1 มิลลิลิตร สมมูลกับปริมาณของโซเดียมไดออกไซด์ ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) 310 ไมโครกรัมซึ่งโซเดียมที่อยู่ในสารละลายถูกสกัดออกมาจากโครงสร้างแก้ว ดังนั้นจากผลการทดลองปริมาณ HCl ที่ใช้ไต่เตทรหดจนถึงจุดยุติสามารถคำนวณกลับไปเป็นปริมาณของโซเดียมที่ถูกชะออกมาได้ ผลการทดลองถูกแสดงเปรียบเทียบในภาพที่ 4.1

ผลการทดลองพบว่าสูตร D0 คือ สูตรแก้วเดิมที่เกิดฝ้าได้ง่ายมีการละลายของต่างออกมา 164.3 ไมโครกรัม ซึ่งมีปริมาณการถูกชะออกมามากที่สุดเมื่อเทียบกับแก้วสูตรอื่น

กลุ่มของสูตรที่มีการเติมโดโลไมต์ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่จะเพิ่มองค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์เข้าไปในสูตร เนื่องจากโดยทั่วไปของการผลิตแก้วโซดาไลม์นั้นจะมีการเติมโดโลไมต์อยู่แล้วจึงทำการปรับสูตรแก้วเพื่อให้เหมือนกับมาตรฐานทั่วไปก่อนนำไปปรับโดยการเติมตัวเติมพิเศษอื่นๆ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโดโลไมต์ความต้านทานการละลายน้ำของแก้วจะมากขึ้นตามไปด้วย พบว่าสูตร D3 ที่มีการเติมโดโลไมต์แทนในสัดส่วนของหินปูนร้อยละ 18.20 โดยน้ำหนัก มีปริมาณโซเดียมที่ละลายออกมาจากโครงสร้างแก้วน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม



ที่มีการเติมโดโลไมต์คือ 127.1 ไมโครกรัม นอกจากนั้นการเติมแมกนีเซียมออกไซด์โดยการใส่โดโลไมต์เป็นส่วนผสมในสูตรแก้ว ทำให้แก้วที่ได้มีการละลายออกมาของธาตุกลุ่มต่างลดลง เนื่องจากในโครงสร้างของแก้วที่มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบจะมีความแข็งแรงมากกว่าแก้วที่มีแต่แคลเซียมเท่านั้น เนื่องจากเมื่อแมกนีเซียมเข้าไปสร้างพันธะกับออกซิเจนในแก้วจะมีพลังงานพันธะ (Bond energy, BE) มากกว่าแคลเซียมตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น และจากงานวิจัยของ Abo-Naf และคณะ [36] พบว่าความแข็งแรงสนาม(Field strength) หรือ พลังงานโพลาร์ไลเซชันของประจุบวกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการถูกชะออกของต่างลดลง จากทฤษฎีของ Dietzel [10] แสดงค่า ความแข็งแรงของสนาม (Field strength ,F)

$$F = \frac{Z_c}{r_c + r_o} \quad (\text{สมการที่ 4.3})$$

โดย  $Z_c$  คือ ค่าประจุของไอออนบวก

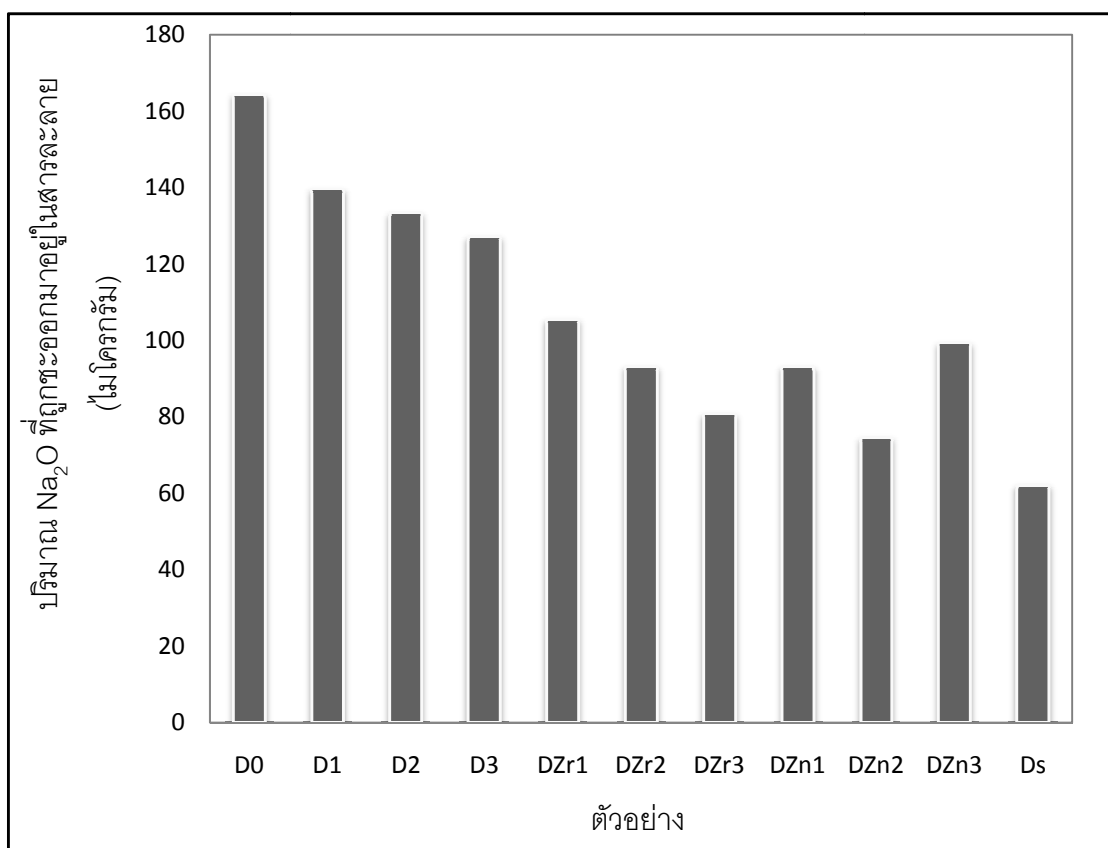
$r_c$  คือ รัศมีของไอออนบวก

$r_o$  คือ รัศมีของออกซิเจน

ความแข็งแรงของสนาม (Field Strength) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงของพันธะที่ถูกสร้างขึ้น [37] แมกนีเซียมมีค่าความแข็งแรงของสนาม 0.45 และ 0.53 ขึ้นกับเลขโคออดิเนชันคือ 6 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งมีความมากกว่าแคลเซียมที่มีขนาดอะตอมใหญ่กว่าทำให้มีค่าความแข็งแรงของสนาม 0.33 มีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 8 และการที่แมกนีเซียมมีขนาดอะตอมเล็กกว่าแคลเซียมจึงทำให้สามารถแทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่ซิลิกาได้ดีกว่าแคลเซียม แก้วจึงมีความหนาแน่นสูงกว่าการเติมแคลเซียมเพียงอย่างเดียว ซึ่งเมื่อโครงสร้างแก้วโดยรวมมีความแข็งแรงและมีความหนาแน่นสูงขึ้นทำให้ต่างที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างแก้วถูกชะออกมาลดลงไปด้วย สูตร D3 จึงเป็นสูตรที่ถูกเลือกนำไปปรับต่อในขั้นตอนการเติมตัวเติมพิเศษคือ เซอร์โคเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ต่อไป

การเติมซิงค์ออกไซด์ลงในสูตร D3 ที่ถูกใช้เป็นสูตรพื้นฐาน โดยเพิ่มซิงค์ออกไซด์ไปในสูตรแก้วร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เป็นสูตร DZn1, DZn2 และ DZn3 ตามลำดับ พบว่าสูตร DZn2 เป็นสูตรที่มีปริมาณธาตุกลุ่มต่างถูกชะออกมาน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับในกลุ่มสูตรที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์เอง ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่าสูตรแก้วเดิม (D0) และน้อยกว่าสูตรแก้วที่มีการเติมโดโลไมต์เพียงอย่างเดียว (D1, D2 และ D3) สาเหตุที่การเติมซิงค์ออกไซด์ทำให้แก้วทนน้ำมากขึ้นเนื่องมาจาก ซิงค์ออกไซด์เมื่ออยู่ในโครงสร้างแก้วสามารถเป็นได้ทั้งกลุ่ม Intermediate และ Modifier ขึ้นกับเลขโคออดิเนชัน (Coordination Number) ตามการจำแนกของ K.H Sun [15]

การเติมเซอร์โคเนียมในสูตรแก้วส่งผลให้มี  $\text{Na}_2\text{O}$  ถูกชะออกมาจากโครงสร้างแก้วลดลง เนื่องจาก เซอร์โคเนียมมีค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเซอร์โคเนียมกับออกซิเจน (Zr-O) เท่ากับ 81 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม ในกรณีที่ไม่มีบทบาทเป็น Network former และ 61 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม ในกรณีที่ไม่มีบทบาทเป็น Intermediate ซึ่งมากกว่าการเกิดพันธะระหว่างออกซิเจนกับ Mg และ Ca ที่มีบทบาทเป็น Modifier และการเติมซิงค์ออกไซด์ลงในสูตรแก้ว หากการเข้าไปอยู่ของอะตอม Zn ในโครงสร้างแก้วทำหน้าที่เป็น Intermediate มีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 2 จะมีความแข็งแรงของพันธะระหว่างซิงค์กับออกซิเจน (Zn-O) เท่ากับ 72 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม ซึ่งมากกว่าการเกิดพันธะระหว่างออกซิเจนกับ Mg, Ca และ Zr (ในกรณีที่มี Zr มีเลขโคออดิเนชันเท่ากับ 8) แต่หาก Zn ไปทำหน้าที่เป็น Modifier มีเลขโคออดิเนชัน เท่ากับ 4 จะมีความแข็งแรงของพันธะระหว่างซิงค์กับออกซิเจน (Zn-O) เท่ากับ 36 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม ซึ่งน้อยกว่า Mg-O ที่มีความแข็งแรง 37 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม เล็กน้อยแต่ยังมีค่ามากกว่าพันธะของ Ca-O และ Na-O ทำให้เมื่อเติม Zn ลงไปในสูตรแก้วจะมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้ธาตุกลุ่มต่างถูกชะออกมาน้อยลง เนื่องจากมีการบกพร่องในโครงสร้างที่เกิดจากการถูกทำลายพันธะเนื่องจากน้ำน้อยลง ทำให้มีโอกาสในการแพร่ออกมาลดลง



ภาพที่ 4.1 ผลการตรวจสอบปริมาณ  $\text{Na}_2\text{O}$  ที่ถูกชะออกมาอยู่ในสารละลาย (ไมโครกรัม)

ตารางที่ 4.4 ผลการจำแนกระดับการทนทานต่อการกัดกร่อนของน้ำตามมาตรฐาน ISO 719

สูตร	ปริมาณ HCl ที่ใช้ ไตเตรทจนถึงจุดยุติ (มิลลิลิตร)	ปริมาณ Na <sub>2</sub> O ที่ถูกชะออกมา (ไมโครกรัม)	ระดับ การทนต่อน้ำ
แก้วมาตรฐาน SRM NIST- 622 Soda-lime silicate glass	0.38	118.83	HGB 3
แก้วมาตรฐาน SRM NIST- 623 Borosilicate glass	0.11	35.13	HGB 2
D0	0.53	164.3	HGB 3
D1	0.45	139.5	HGB 3
D2	0.43	133.3	HGB 3
D3	0.41	127.1	HGB 3
DZr1	0.34	105.4	HGB 3
DZr2	0.30	93.0	HGB 3
DZr3	0.26	80.6	HGB 3
DZn1	0.30	93.0	HGB 3
DZn2	0.24	74.4	HGB 3
DZn3	0.32	99.2	HGB 3
DS	0.20	62.0	HGB 2

จากการทดลองของ Pyare และคณะ [38] พบว่าปริมาณของธาตุกลุ่มต่างที่ถูกชะออกมา มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความแรงของสนาม (F) ดังเช่นที่กล่าวมาข้างต้นในกรณีของการเติม Mg ซึ่งการเติม Zn และ Zr ที่ทำให้มีการละลายของ ธาตุกลุ่มต่างออกมามีสาเหตุหนึ่งมาจากการที่มีค่าความแรงของสนาม (F) ของอะตอมสูงเช่นเดียวกัน ซึ่งค่าความแรงของสนามแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าความแรงของสนาม (Field strength) ของธาตุต่างๆ [39]

ธาตุ	เลขโคออดิเนชัน	ค่าความแรงของสนาม
Na	6	0.19
Ca	8	0.33
Mg	6	0.45
Mg	4	0.53
Zn	4	0.44
Zr	4	0.77

การอบผิวแก้วโซดาไลม์ด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือตัวอย่างแก้ว DS ที่ได้จากการนำสูตรแก้ว D3 ไปปรับผิวแก้ว เมื่อนำไปทดสอบความต้านทานต่อการละลายน้ำพบว่าตัวอย่างแก้ว DS มีธาตุกลุ่มต่างละลายออกมาน้อยที่สุดคือ 62.0 ไมโครกรัม เนื่องมาจากในขั้นตอนของการปรับผิวแก้วมีการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อบผิวแก้วที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ของแก้วโซดาไลม์ทั่วไปที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 550-600 องศาเซลเซียส ณ อุณหภูมินี้จะตอมต่างๆ ในโครงสร้างแก้วยังสามารถเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย [40-41] และเมื่อมีปัจจัยภายนอกมากระตุ้นซึ่งก็คือก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตในภาชนะปิด ความดันที่เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยส่งเสริมให้ผิวแก้วสัมผัสกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มากขึ้น เมื่อก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ไปสัมผัสที่ผิวแก้ว จะเกิดปฏิกิริยากับโซเดียมก่อนธาตุกลุ่มต่างตัวอื่นๆ เนื่องจากพันธะของโซเดียมกับออกซิเจนใช้พลังงานในการสลายพันธะน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับออกซิเจนและแมกนีเซียมหรือแคลเซียม หลังจากที่พันธะถูกทำลายกลายเป็นไอออนอิสระแล้วโซเดียมไอออนคงความสามารถในการแพร่มากกว่าไอออนของธาตุกลุ่มต่างตัวอื่นๆ ด้วยเนื่องจากโซเดียมไอออนมีขนาดเล็กทำให้เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าตัวอื่นๆ ซึ่งโซเดียมที่แพร่ออกมาจะเกิดปฏิกิริยากับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ผิวได้เป็นสารประกอบของโซเดียมและซัลเฟตเช่น  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  เป็นต้น ซึ่งผลึกพวกนี้สามารถละลายน้ำได้ง่ายหลังจากขั้นตอนการปรับผิวแก้วแล้วเมื่อนำชิ้นงานแก้วไปล้างด้วยน้ำสะอาด [33] พบว่าผลึกหรือคราบขาวที่เกาะอยู่ที่ผิวแก้วถูกกำจัดออกหมดเหลือเพียงผิวแก้วที่มีความใสสะอาดเหมือนก่อนอบผิว ในขั้นตอนการล้างตัวอย่างด้วยน้ำทำให้โซเดียมที่ผิวแก้วถูกกำจัดออกไปด้วย เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของผลึกที่ถูกน้ำล้างออกไป ดังนั้นเมื่อนำไปทดสอบความต้านทานต่อตัวอย่างแก้ว DS จึงมีการละลายของธาตุกลุ่มต่างออกมาน้อยที่สุด เนื่องจากถูกกำจัดโซเดียมที่อยู่บริเวณผิวแก้วออกไปก่อนในขั้นตอนการอบผิวแก้วแล้ว

จากตารางที่ 4.4 การทดสอบความต้านทานต่อการละลายน้ำ พบว่าแต่ละกลุ่มที่มีการเติมวัตถุดิบตัวเติมมีสูตรที่มีค่าการละลายของธาตุกลุ่มต่างต่ำที่สุดในกลุ่มนั้นๆ คือ D3, DZr3, DZn2 ซึ่งจะใช้ทั้ง 3 สูตรเป็นตัวแทนของแต่ละกลุ่มในการเติมตัวเติมชนิดต่าง เพื่อเปรียบเทียบกับสูตรแก้วเดิม (D0) และแก้วที่มีการอบผิว (DS) สำหรับการทดลองในขั้นต่อไป

#### 4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์สีและความสามารถในการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometry

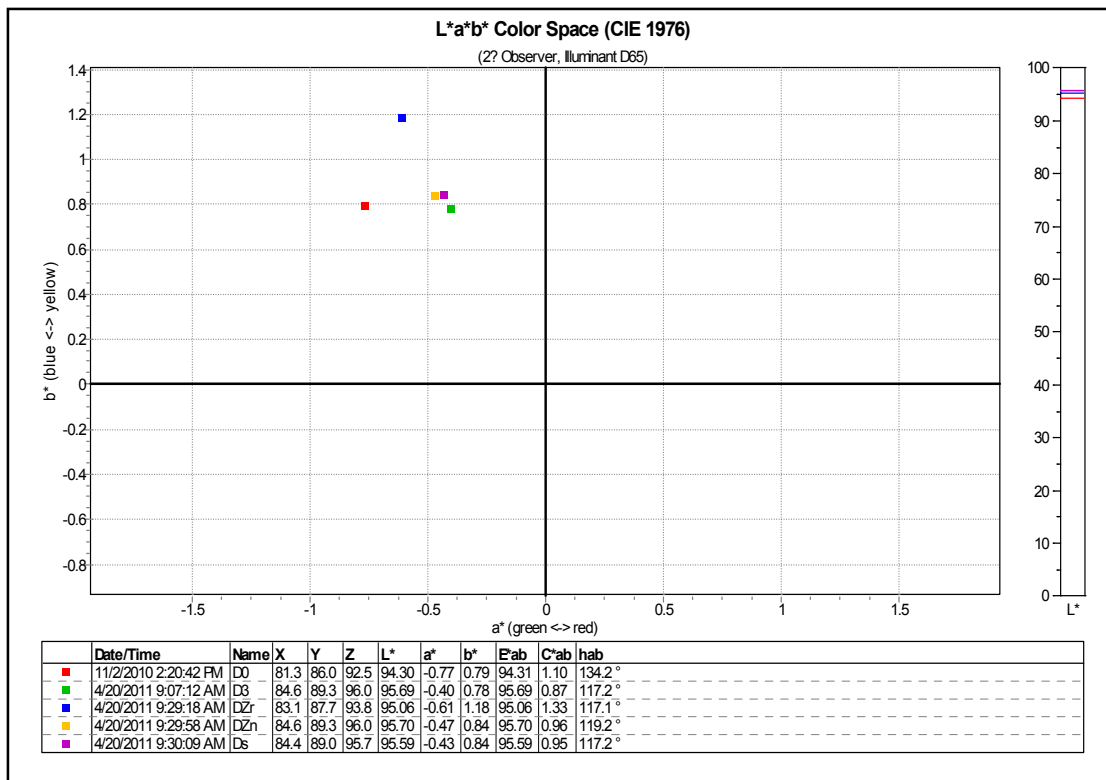
ผลการทดสอบค่าสีในระบบสีแบบ CIE L\*a\*b\* และการวัดค่าการส่องผ่านของแสง (Transmission) ของสูตรแก้วเดิมคือ D0 และสูตรแก้วที่มีการละลายของธาตุกลุ่มต่างออกมาน้อยที่สุดในแต่ละกลุ่มคือ D3 ในกลุ่มที่มีการเติมโดโลไมต์, DZr3 กลุ่มที่มีการเติมเซอร์โคเนียม และ DZn2 กลุ่มที่มีการเติมซิงค์ และตัวอย่างแก้ว DS ที่มีการอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แสดงในภาพที่ 4.3 - 4.4 และตารางที่ 4.5

ตัวอย่างแก้ว DS ถูกเตรียมโดยการอบผิวแก้วสูตร D3 ซึ่งจะเกิดเป็นคราบขาว หลังจากนั้นจึงล้างคราบออก แก้วที่ได้คงมีความใสดังแสดงในภาพที่ 4.2 ความใสของแก้วตัวอย่างหลังการอบผิวถูกนำไปตรวจสอบเปรียบเทียบกับสูตรแก้วอื่นๆ ที่ไม่มีการอบผิว



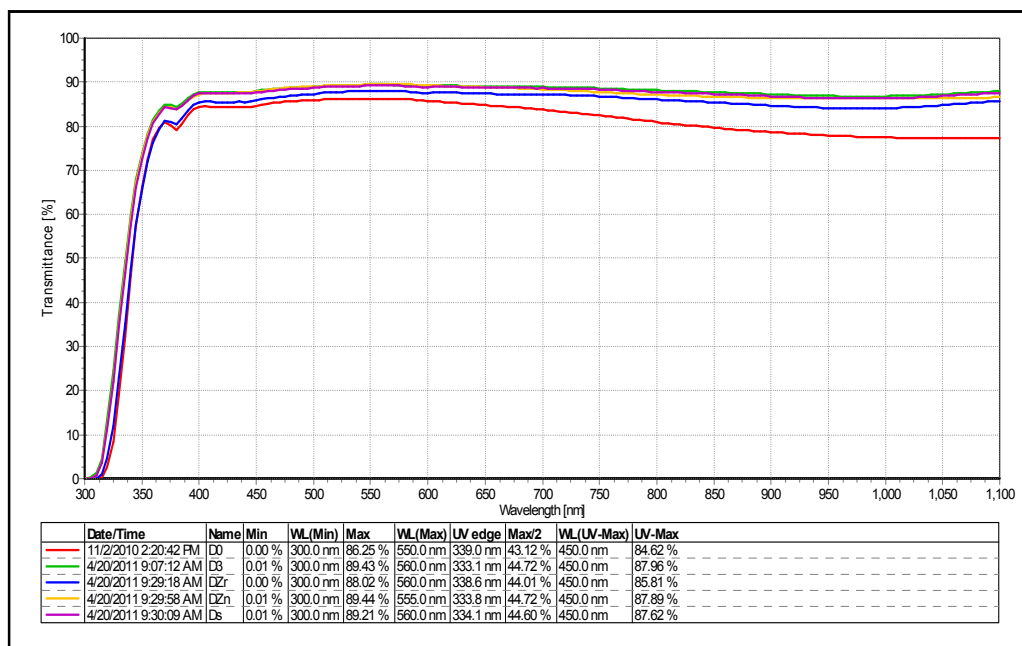
ภาพที่ 4.2 ลักษณะของผิวตัวอย่างแก้วก่อนและหลังการอบผิวและการล้างทำความสะอาด

ตัวอย่างแก้ว DS ก่อนอบผิวจะมีความใสและเมื่อนำไปอบด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่ามีคราบขาวเกาะอยู่ที่ผิวแก้ว ซึ่งเป็นคราบที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาของไฮเดรียมที่ผิวแก้ว และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดเป็นผลึกจำพวก  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  เป็นต้น ซึ่งผลึกดังกล่าวสามารถละลายน้ำได้ง่าย [33] เมื่อล้างออกจะได้แก้วที่มีความใสเหมือนก่อนการอบจากการสังเกตด้วยตาเปล่า เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพจึงนำแก้วที่ได้หลังการอบผิวแล้วไปตรวจสอบสีและความโปร่งใส



ภาพที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สีในระบบ CIE L\*a\*b\* ของแก้วสูตรต่างๆ

ตัวอย่างแก้วทั้ง 5 สูตรเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะเห็นเป็นแก้วใสที่ไม่มีสีเหมือนกันทุกตัวอย่าง แต่เพื่อการควบคุมคุณภาพจึงต้องใช้เครื่องมือวัดสีเพื่อทำการวัดค่าสีที่แน่นอน จากผลการทดสอบวัดสีในระบบ CIE L\*a\*b\* พบว่าแก้วสูตรเดิมของโรงงานคือ D0 ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมคุณภาพให้แก้วที่เตรียมขึ้นใหม่มีค่าเบี่ยงเบนไปจากเดิมไม่มากนัก แก้วเดิม (D0) มีค่า  $a^*$  ซึ่งเป็นค่าแกนสีระหว่างสีเขียว-แดง เท่ากับ  $-0.77$  คือมีสีเขียว และ  $b^*$  ซึ่งเป็นค่าแกนสีน้ำเงิน-เหลือง เท่ากับ  $0.79$  ซึ่งหากแปรค่าตามแกนสีแล้ว แก้ว D0 จะมีสีเหลืองอมเขียว ส่วนแก้วสูตร D3, DZn2 และ DS มีค่าสีตามแกน  $b^*$  ใกล้เคียงกับแก้ว D0 คือมีสีค่อนข้างเหลือง แต่ค่าสีตามแกน  $a^*$  ของแก้วทั้งสามตัวจะมีค่าน้อยกว่าแก้ว D0 เดิม ซึ่งแสดงว่าแก้วทั้งสามตัวมีสีเขียวน้อยกว่าและใสมากกว่า (มีค่าใกล้เคียงจุด origin มากกว่า) ส่วนแก้วสูตร DZr3 ที่มีการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์พบว่ามีค่าสีตามแกน  $a^*$  น้อยกว่าแก้ว D0 ดังนั้นแก้ว DZr3 จึงมีสีเขียว น้อยกว่าสูตรเดิม แต่สูตร DZr3 มีค่าสีตามแกน  $b^*$  มากกว่าแก้ว D0 ซึ่งแสดงว่าการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ลงไปทำให้แก้วมีสีเหลืองมากขึ้น ซึ่งแก้วใสไม่ควรจะมีค่า  $b^*$  มากกว่า 1 แต่อย่างไรก็ตามความแตกต่างที่กล่าวมาข้างต้นมีค่าความแตกต่างกันน้อยมาก ทำให้สีของแก้วไม่สามารถสังเกตความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นแก้วที่เตรียมขึ้นใหม่สามารถใช้ทดแทนกันได้ แต่ในกรณีแก้ว DZr3 ควรใช้วัตถุดิบที่เป็นตัวฟอกสีควบคู่ไปด้วย



ภาพที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ค่าการส่องผ่านของแสง (Transmission) ของแก้วสูตรต่างๆ

ค่าการส่องผ่านของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และแสงขาว (Visible light) แสดงถึงความโปร่งใสของแก้ว ตัวอย่างแก้วสูตรเดิม D0 มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงที่ 585 นาโนเมตร น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างแก้วทุกสูตรมีค่าร้อยละ 86.04 ส่วนสูตร D3, DZn2 และสูตร DS มีค่าการส่องผ่านของแสงใกล้เคียงกันคือร้อยละ 89.31, 89.43 และ 89.07 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งมากกว่าแก้วสูตรเดิมและมากกว่าสูตร DZr3 ที่มีการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่ยอมให้แสงส่องผ่านได้ร้อยละ 87.84 ซึ่งอาจมาจากแก้วที่มีการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์มีความหนืดเมื่อหลอมมากกว่าแก้วตัวอื่นๆ เมื่อเกิดฟองอากาศขณะหลอมแก้วจึงไม่สามารถกำจัดออกได้หมดยังคงมีฟองอากาศขนาดเล็กๆ ที่ถูกขังอยู่ในเนื้อแก้วเมื่อแก้วแข็งตัวแล้ว ดังนั้นจึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้แก้วสูตร DZr3 มีค่าการส่องผ่านของแสงน้อยกว่าแก้วสูตรอื่นๆ

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าสีและการส่องผ่านแสงของแก้วสูตรต่างๆ

ตัวอย่าง	L*	a*	b*	%Transmission
D0	94.30	- 0.77	0.79	86.04
D3	95.69	- 0.40	0.78	89.31
DZr3	95.06	- 0.61	1.18	87.84
DZn2	95.70	- 0.47	0.84	89.43
Ds	95.59	- 0.43	0.84	89.07

### 4.1.2.3 ผลการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ของผิวแก้ว (Vickers Hardness)

ตัวอย่างแก้วก่อนถูกนำไปทดสอบความทนทานต่อสภาพอากาศด้วยการเร่งสภาวะและหลังการเร่งสภาวะถูกนำมาทดสอบด้วย Vickers Hardness Tester ด้วยแรงกด 300 กรัมแรง (g) ใช้เวลาในการกด 15 วินาที ผลการทดลองที่ได้แสดงในภาพที่ 4.5 ความแข็งแรงของโครงสร้างแก้วมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับความแข็งแรงบริเวณพื้นผิว ความต้านต่อสารเคมีของแก้ว [42-43] และความแข็งแรงของพันธะ

จากการศึกษาความแข็งแรงของแก้ว Orowan [44] พบว่าความแข็งแรงของแก้วสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\text{Theoretical strength} = \sqrt{\frac{E\gamma}{a}} \quad (\text{สมการที่ 4.4})$$

จากสมการ E คือ โมดูลัสของยัง (Yong's modulus)

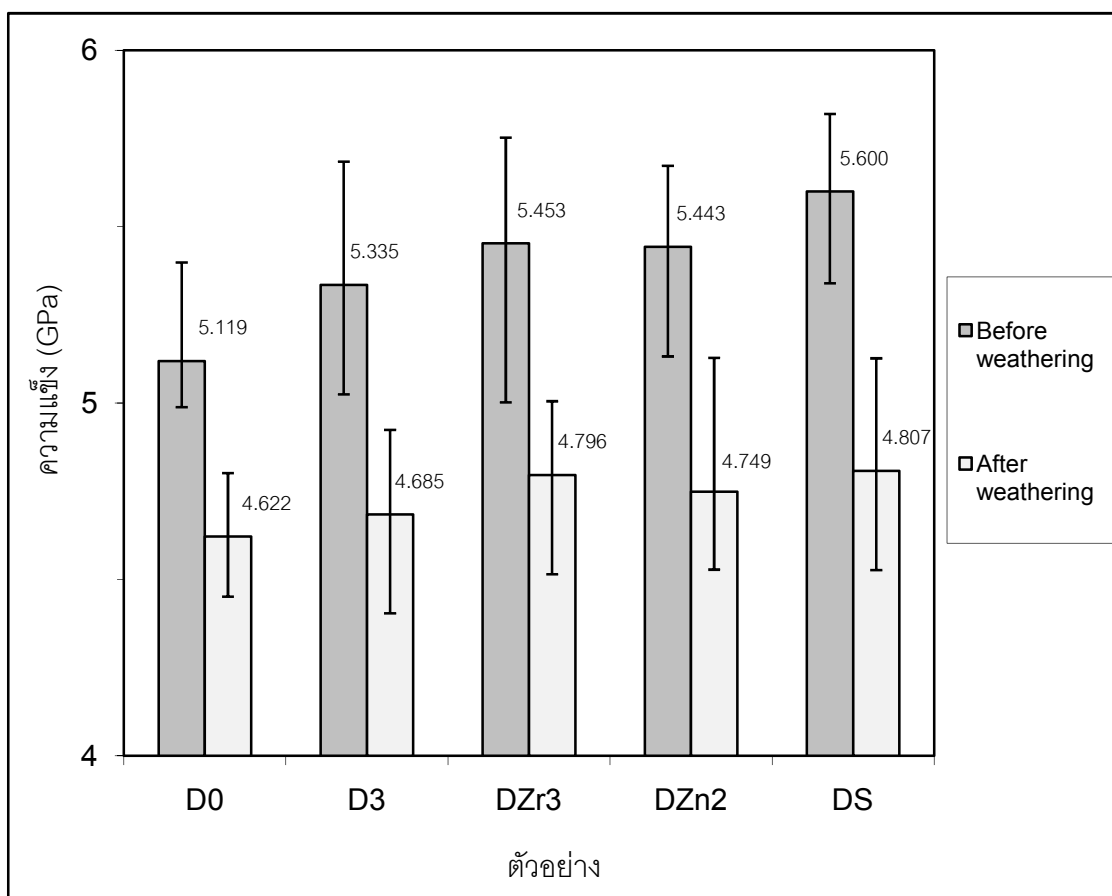
$\gamma$  คือ พลังงานพื้นผิว

a คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมของไอออนบวกและไอออนลบ

ผลการทดลองวัดความแข็งแรงของผิวแก้ว พบว่าสูตรแก้วเดิม D0 มีค่าความแข็งแรงน้อยที่สุดคือ 5.119 GPa และตัวอย่าง D3 คือสูตรที่มีการเติมโดโลไมต์พบว่าแก้วมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นคือ 5.335 GPa และแก้วสูตร DZr3 ที่มีการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และ DZn2 ที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์มีค่าความแข็งแรงมากกว่า D3 ซึ่งมีการเติมโดโลไมต์เพียงอย่างเดียว ซึ่งทั้งสองสูตรมีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกันคือ 5.453 GPa และ 5.443 GPa ตามลำดับ

ตัวอย่าง DS ที่ผ่านการอบผิวมา มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดคือ 5.600 GPa จากผลการทดลองพบว่ามีความสัมพันธ์กับสมการที่ 4.4 กล่าวคือ ค่า a คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมที่เกิดพันธะ ซึ่งแปรผกผันกับค่าความแข็งแรงของสนามและค่าความแข็งแรงของแก้ว ค่าความแข็งแรงของสนามได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 พบว่า Mg, Zr และ Zn มีค่าความแข็งแรงของสนามมากกว่า Na และ Ca ดังนั้นการเติมลงไปทำให้พันธะโดยรวมของแก้วมีระยะห่างน้อยลงหรือมีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่ความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น





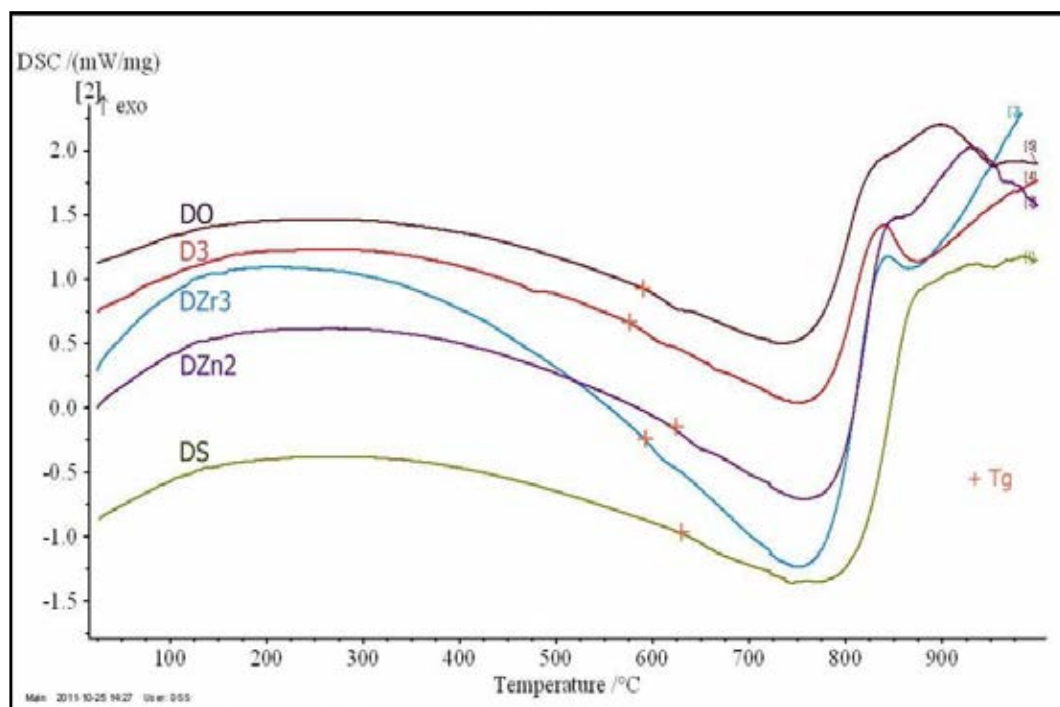
ภาพที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงก่อนและหลังการเร่งสภาพ

ตัวอย่างแก้ว DS ที่ผ่านการกำจัดต่างออก (Dealkalization) มีค่าความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจากการกำจัดต่างออกจากโครงสร้างที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ณ อุณหภูมินี้จะตอมของโครงสร้างแก้วบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย เมื่อแก้วสูญเสียไอออนของกลุ่ม Modifier ออกไป ทำให้ผิวแก้วบริเวณดังกล่าวเกิดการเคลื่อนที่จัดเรียงเป็นบริเวณที่มีพันธะของ Si-O มากกว่าเดิม หรือเกิดเป็น Si-rich area พันธะของซิลิคอนกับออกซิเจนเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากกว่าพันธะอื่นๆ ในโครงสร้างแก้ว ดังนั้นการที่มีพันธะนี้มากบริเวณผิวทำให้แก้วมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นมาก [42] และบริเวณดังกล่าวยังเกิดแรงอัด (Compression) [24, 45] เนื่องจากการเรียงตัวของอะตอมที่เกิดขึ้น พันธะของ Si-O มีความยาวของพันธะ 1.62 อังสตรอม[46] ซึ่งน้อยกว่าความยาวของพันธะ Na-O มีความยาว 2.35 อังสตรอม[29] พันธะของ Si-O ที่เกิดขึ้นมีความยาวน้อยกว่าพันธะโดยรวมก่อนการอบผิวที่มีพันธะของ Na-O อยู่ด้วยจึงเกิดแรงอัดบริเวณผิวแก้ว จึงทำให้แก้วมีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าแก้ว D3 เดิม แก้วที่มีความแข็งแรงที่ผิวสูงนั้นสะท้อนถึงโครงสร้างของแก้วที่มีความแข็งแรง ซึ่งจะทำให้กลุ่มต่างที่เป็น Modifier หลุดออกมาจากแก้วได้ยากขึ้น นำไปสู่การเกิดฝ้าได้ยากขึ้นตามมา

จากการทดลองพบว่าภายหลังจากการเร่งสภาวะเป็นเวลา 4 สัปดาห์พบว่า แก้วทุกตัวอย่างมีความแข็งแรงที่ผิวลดลงกว่าก่อนเร่งสภาวะ จากงานวิจัยของ Pavan และคณะ [43, 47] พบว่าหลังจากแก้วถูกเร่งสภาวะจะทำให้มีความแข็งแรงที่ผิวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจากการเกิด Gel layer ขึ้นทำให้มีน้ำอยู่ในโครงสร้างและโครงสร้างดังกล่าวมีลักษณะพรุนตัว การเกิด Gel layer มีกลไกตามที่แสดงในสมการที่ 4.1 ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นลดลง ผิวแก้วมีความแข็งแรงลดลง [35, 45] และจากสมการที่ 4.4 พบว่าหากมีค่าพลังงานพื้นผิว (Surface energy) ลดลงจะทำให้ค่าความแข็งแรงต่ำลงด้วย จากการศึกษาของ Chertier และคณะ [40] พบว่าแก้วที่ถูกเร่งสภาวะจะมีค่าพลังงานพื้นผิวประมาณ 20-40 มิลลิจูล/ตารางเมตร ซึ่งน้อยกว่าแก้วที่สะอาดที่มีพลังงานพื้นผิวอยู่ในช่วงตั้งแต่ 400-1,000 มิลลิจูล/ตารางเมตร ทำให้แก้วที่ถูกเร่งสภาวะจะมีความแข็งแรงลดลงสอดคล้องกับผลการทดลอง

#### 4.1.2.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแก้วด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

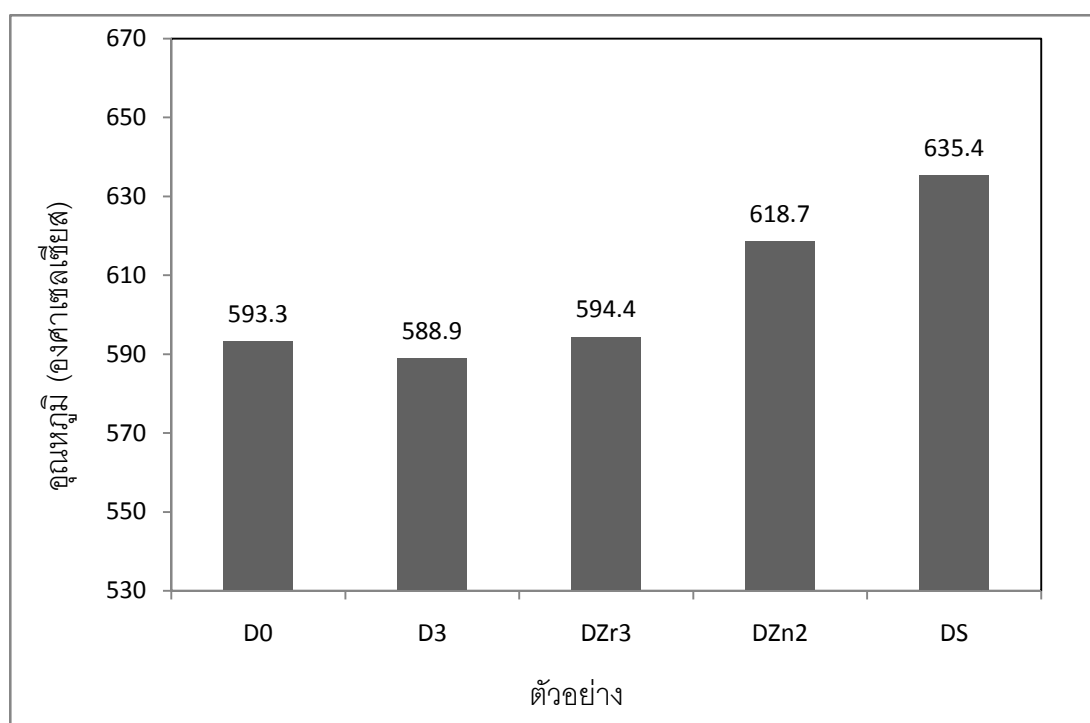
ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนเชิงพลังงานของแก้วและอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) เปรียบเทียบกันแสดงดังภาพที่ 4.6 และข้อมูลดิบดังแสดงในภาคผนวก ข เส้นกราฟแสดงค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการดูดและคายความร้อน (Endothermic or exothermic processes) ของผงแก้ว



ภาพที่ 4.6 ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของแก้วเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ

จากภาพที่ 4.6 - 4.7 ตัวอย่างแก้ว D0, D3 และ DZr3 มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ใกล้เคียงกันคือ 593.3, 588.9 และ 594.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่ง  $T_g$  ที่อ่านได้เป็นบริเวณที่เส้นกราฟการหักลงแสดงถึงการดูดความร้อนเข้าไปในระบบเกิดจากการเปลี่ยนสภาพของผงแก้ว จากของแข็งที่อะตอมถูกตรึงอยู่กับที่ไปเป็นพันธะที่อะตอมมีการเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย จะต้องมีการดูดพลังงานความร้อนเข้าไป ดังนั้น  $T_g$  จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความแข็งแรงของโครงสร้างแก้ว กล่าวคือหากแก้วมีโครงสร้างที่แข็งแรงมาก  $T_g$  ก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย สูตร D0 และ D3 ที่มีการเติมโดโลไมต์มีค่า  $T_g$  ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเติมโดโลไมต์เข้าไปในสูตรเป็นการแทนที่ของแมกนีเซียมออกไซด์ในสัดส่วนของแคลเซียมออกไซด์บางส่วน ซึ่งเป็นแมกนีเซียมและแคลเซียมเป็นวัตถุดิบในกลุ่มที่เป็น Modifier ในโครงสร้างแก้วเหมือนกัน ส่วนแก้ว DZr3 ที่มีการเติมเซอร์โคเนียมเข้าไปแทนในส่วนของอะลูมินาซึ่งมีหน้าที่เป็น Intermediate ในโครงสร้างแก้วเหมือนกัน ทำให้  $T_g$  มากกว่า D3 และ D0 ไม่มากนัก

แก้ว DZn2 มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ 618.7 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นกว่าแก้วเดิม (D0) การเติมซิงค์ออกไซด์เข้าไปในสูตรเป็นการเพิ่มวัตถุดิบกลุ่ม intermediate ความแข็งแรงของพันธะระหว่างซิงค์กับออกซิเจนที่ไม่ได้เชื่อมระหว่างซิลิคอน (Non-bridging Oxygen) Zn-O มากกว่าพันธะระหว่าง Modifier ตัวอื่นๆ ส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างแก้ว ซึ่งทำให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการจะทำให้อะตอมบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ได้



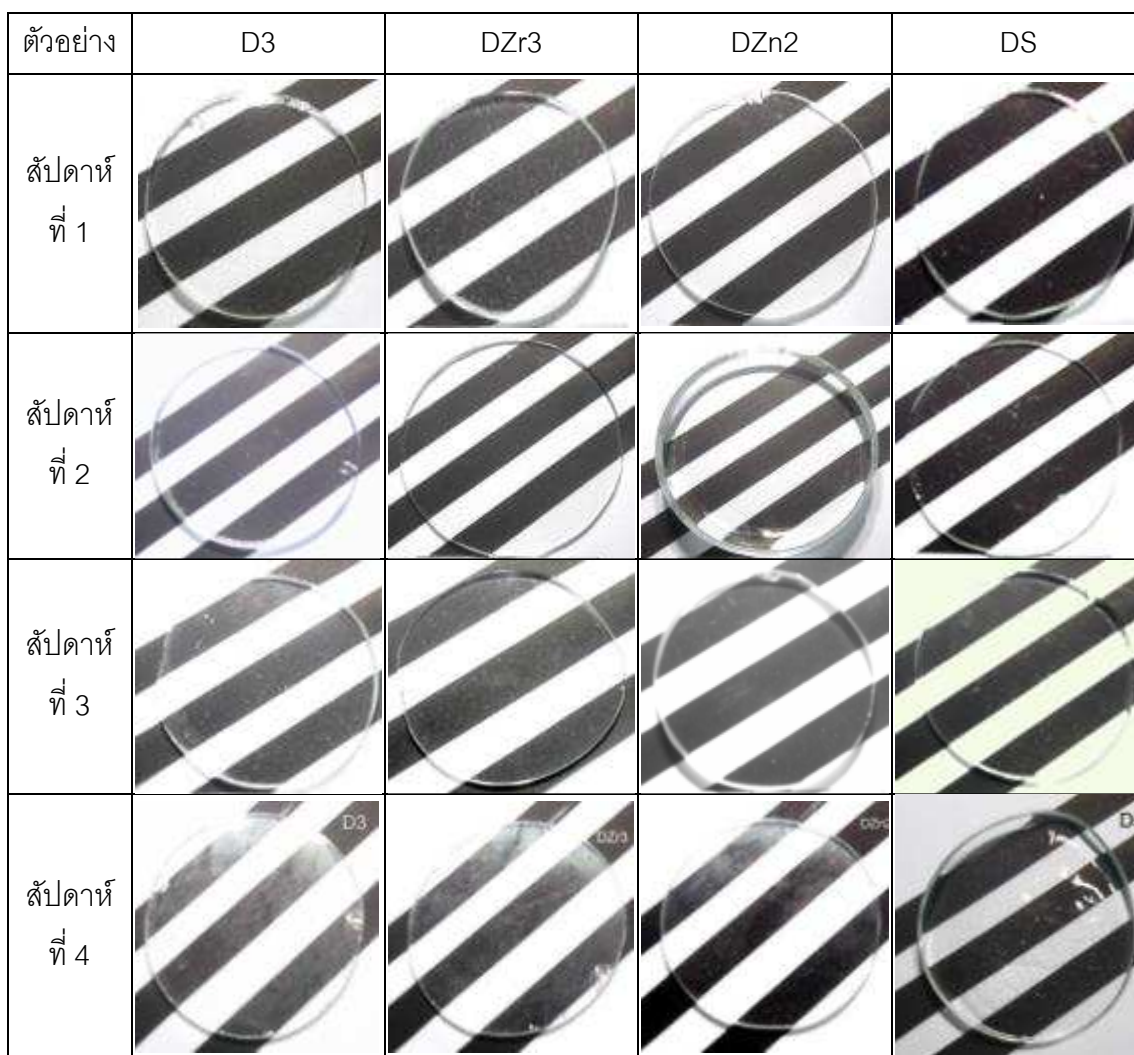
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ของแก้วสูตรทดลอง

แก้วสูตร DS มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วประมาณ 635.4 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกสูตร แม้จะมีส่วนผสมวัตถุดิบเหมือนกับตัวอย่างแก้ว D3 แต่เนื่องมาจากแก้วดังกล่าวถูกนำไปผ่านการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นการลดปริมาณด่างที่ผิวแก้ว (Dealkalization) จึงทำให้แก้วมีปริมาณองค์ประกอบของด่างที่เป็นช่วยลดอุณหภูมิลดลง ส่งผลให้มีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้วสูงขึ้นกว่าสูตรอื่น

#### 4.1.2.5 ผลการทดสอบความต้านทานต่อสภาพอากาศภายใต้สภาวะจำลอง (Weathering Test)

สูตรแก้วที่มีความสามารถในการทนน้ำได้ดีที่สุดของแต่ละกลุ่มคือ D3, DZr3 และ DZn2 และแก้ว DS ที่ผ่านการอบผิว ถูกนำมาทดสอบการทนทานต่อการเกิดฝ้า ในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ (Weathering Chamber) ซึ่งความชื้นและอุณหภูมิที่ถูควบคุมนั้นเป็นสภาวะที่ส่งเสริมให้เกิดฝ้าได้เป็นอย่างดี ลักษณะของชิ้นงานแก้วหลังถูกนำไปเร่งสภาวะแสดงในภาพที่ 4.8

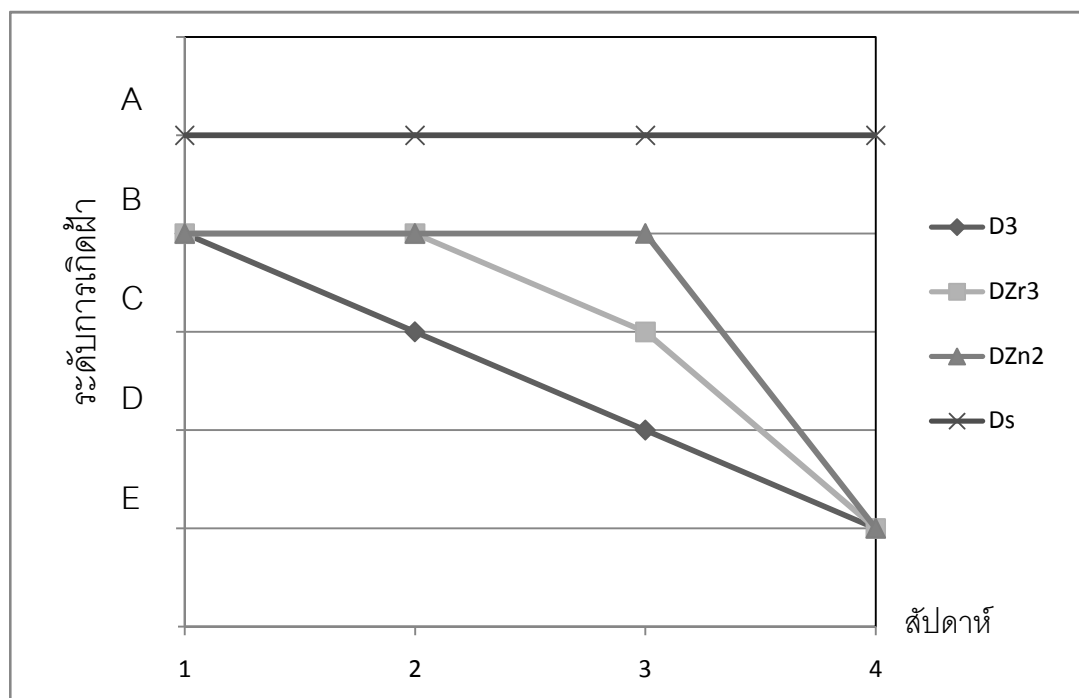
จากข้อมูลของผู้ประกอบการแก้วที่ผลิตขึ้นในโรงงานที่เกิดปัญหา (D0) มีการเกิดฝ้ามากในช่วงฤดูฝน พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 13 วันหลังจากสิ้นสุดกระบวนการผลิตจะเกิดฝ้าคราบขาวที่ผิวแก้ว ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้นการวิจัยจึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนาให้มีการเกิดฝ้าน้อยที่สุดและเกิดที่เวลามากกว่า 13 วัน จากการทดลองพบว่า จะเกิดฝ้ามากขึ้นแปรผันตามระยะเวลาที่ถูกเก็บในตู้ควบคุมความชื้น ลักษณะการเกิดฝ้าที่สังเกตได้คือ มีคราบขาวเกิดปกคลุมผิวตัวอย่างแก้ว โดยสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนในสัปดาห์ที่ 4 เกิดเป็นคราบสีขาวแผ่ปกคลุมผิวประมาณร้อยละ 70-80 ของผิวแก้วทั้งหมด ซึ่งการเปรียบเทียบปริมาณการเกิดฝ้าทำโดยการตรวจสอบด้วยตาเปล่าที่ระดับความเข้มแสงต่างกันในช่วงตอนต่อไป



ภาพที่ 4.8 ลักษณะของผิวตัวอย่างแก้วที่ผ่านการทดสอบการทนต่อสภาพอากาศ

#### 4.1.2.6 ผลการตรวจสอบปริมาณการเกิดฝ้าด้วยตาเปล่าภายใต้แสงไฟที่มีระดับความเข้มแสงต่างกัน (Visual Observation)

ระดับความเข้มแสงที่แตกต่างกันที่นำมาใช้ในการตรวจสอบปริมาณของการเกิดฝ้าด้วยตาเปล่า คือระดับความเข้มแสงปกติ (500 ลักซ์) และระดับความเข้มแสงสูง (1000 ลักซ์) การตรวจสอบทำโดยวางชิ้นงานห่างจากจุดให้กำเนิดแสงประมาณ 6 นิ้ว เพื่อจำแนกปริมาณการเกิดฝ้าของชิ้นงานแก้วหลังการเก็บในผ่านภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดฝ้า ผลการตรวจสอบดังแสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ผลการจำแนกระดับการเกิดฝุ่นของผิวแก้วหลังการเร่งสภาวะ

ผลการตรวจสอบเพื่อจำแนกระดับของการเกิดฝุ่นตามภาพที่ 4.9 โดยแกน Y เป็นระดับของการฝุ่นโดยอ้างอิงเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบจากงานวิจัยของ Walter และคณะ [21] พบว่าการตรวจสอบด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพและมีผลสอดคล้องกับวิธีอื่นที่ใช้ในการตรวจสอบเช่น การตรวจสอบปริมาณของธาตุกลุ่มต่างที่ถูกชะออกมาด้วยวิธี AAS การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง การตรวจสอบปริมาณน้ำหนัที่หายไป

จากการตรวจสอบด้วยวิธีนี้พบว่าสัปดาห์ที่ 1 ชิ้นงานแก้ว D3, DZr3 และ DZn2 เมื่อตรวจสอบด้วยหลอดที่ให้ความเข้มแสงสูง (1000 ลักซ์) พบจุดเล็กน้อยหรือฝุ่นบางๆ จัดอยู่ในเกรด B จะมีเพียงตัวอย่าง DS เท่านั้นที่ไม่มีการเกิดฝุ่นเลยเมื่อตรวจสอบด้วยความเข้มแสงระดับเดียวกันจัดอยู่ในระดับ A

สัปดาห์ที่ 2 ชิ้นงานแก้ว DZr3 และ DZn2 ไม่มีการเกิดฝุ่นเพิ่มขึ้นมากนักจึงถูกจัดอยู่ในระดับ B เช่นเดิม และ DS ถูกจัดอยู่ในระดับ A เช่นเดิมคือไม่มีการเกิดฝุ่นเลย มีเพียงตัวอย่าง D3 เท่านั้นที่มีการเติมโดโลไมต์ที่มีการเกิดฝุ่นเพิ่มมากขึ้นจนสามารถสังเกตเห็นฝุ่นมากเมื่อตรวจสอบโดยใช้ความเข้มแสงสูงถูกจัดอยู่ในระดับ C

สัปดาห์ที่ 3 ชิ้นงานแก้วมีระดับการเกิดฝุ่นที่แตกต่างกันเรียงลำดับจากเกิดฝุ่นมากไปน้อยคือ  $D3 > DZr3 > DZn2 > DS$  โดยชิ้นงานแก้ว DZr2 และ D3 ที่เกิดฝุ่นมากขึ้น ซึ่งชิ้นงานแก้ว

DZr3 เกิดฝ้ามากเมื่อตรวจสอบโดยใช้ความเข้มแสงสูงจัดอยู่ในระดับ C และเมื่อตรวจสอบด้วยแสงความเข้มปกติ (500 ลักซ์) ชั้นงาน D3 พบฝ้าเล็กน้อยจัดอยู่ในการเกิดฝ้าระดับ D

สัปดาห์ที่ 4 ชั้นงานแก้วสูตร DZn2 และ DZr3 มีการเกิดฝ้าเพิ่มมากขึ้นกว่าในสัปดาห์ที่ 3 ทำให้ D3, DZn2 และ DZr3 ถูกจัดอยู่ในการเกิดฝ้าระดับเดียวกันคือระดับ D มีตำหนิฝ้ามากเมื่อตรวจสอบด้วยความเข้มแสงปกติ

โดยภาพรวมแล้วชั้นงานแก้ว DS หรือตัวอย่างแก้วที่ถูกอบผิวด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถต้านทานการเกิดฝ้าได้ดีที่สุด จากการตรวจสอบไม่เห็นฝ้าทั้งในระดับความเข้มสูงและความเข้มแสงปกติตลอด 4 สัปดาห์ ผลการทดลองสามารถจัดลำดับความสามารถในการต้านทานการเกิดฝ้าได้ดังนี้  $DS > DZr3 > DZn2 > D3$  ซึ่งผลการทดลองมีความสัมพันธ์กับปริมาณของ  $Na_2O$  ที่ถูกชะออกมาจากแก้ว และพบว่าการทำจัดต่าง (Dealkalization) มีผลต่อการต้านทานการเกิดฝ้ามากกว่าการเติมวัตุดิบตัวเติม เนื่องจากธาตุกลุ่มด่างที่อยู่บริเวณใกล้กับผิวที่มีปริมาณลดลง การที่ธาตุกลุ่มด่างจะหลุดออกมาจากโครงสร้างนั้นต้องมาจากการแพร่ออกมาจากเนื้อแก้วที่ลึกลงไปอีก เป็นการเพิ่มระยะเวลาและระยะทางในการแพร่ซึ่งทำให้เป็นการลดสารตั้งต้นในการเกิดฝ้าได้ [48] David E และคณะ [49] ได้สรุปเนื้อหาเกี่ยวกับความทนทานของผิวแก้วไว้ว่า กลไกในการแพร่ของ  $H^+$  หรือ  $H_3O^+$  เข้าไปในเนื้อแก้วและแทนที่ธาตุที่มีไอออนบวกที่ทำหน้าที่เป็น Modifier เป็นกลไกที่กำหนดอัตราการเกิดกักร่อนของผิวแก้ว ซึ่งหากพิจารณาในแง่ของเทอร์โมไดนามิกส์ จะสามารถสรุปได้ดังนี้

$$\Delta G_{hyd}(glass) = \sum x_i * (\Delta G_{hyd})_i \quad (\text{สมการที่ 4.5})$$

จากสมการที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานอิสระในการเกิดปฏิกิริยา Hydration ของแก้วซึ่งเป็นผลรวมของค่าพลังงานอิสระในการเกิดปฏิกิริยา Hydration ของแต่ละองค์ประกอบในแก้วนั้นๆ ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงในตารางที่ 4.7 หากแก้วมีองค์ประกอบเป็นธาตุที่มีพลังงานอิสระน้อย จะทำให้ผลรวมเป็นแก้วที่มีพลังงานอิสระของการเกิด Hydration ลดลง ทำให้แก้วนั้นเกิดการกักร่อนได้ง่าย จากการทดลองพบว่าการเติม Zn และ Zr เข้าไปในสูตรทำให้แก้วเกิดฝ้าได้ช้าลง อันเนื่องมาจากแก้วมีแนวโน้มจะเกิด Hydration ได้ยากขึ้น ตัวอย่างแก้ว DS ที่มีการอบผิวจะมีปริมาณ Na ลดลง จึงเป็นการเพิ่มพลังงานอิสระในการเกิด Hydration ทำให้แก้วถูกกักร่อนยากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการเร่งสมภาวะให้เกิดฝ้าของตัวอย่างแก้ว พบว่า DS เกิดฝ้าน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.7 ค่าพลังงานอิสระในการเกิดปฏิกิริยา Hydration ของแต่ละองค์ประกอบของแก้ว [50]




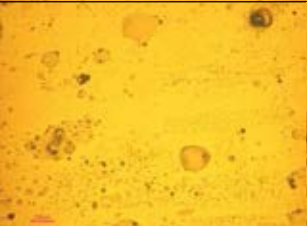
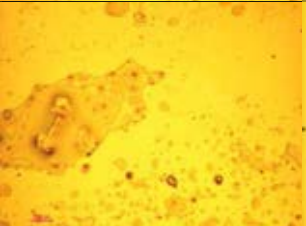

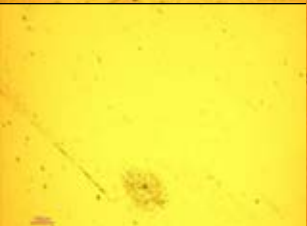
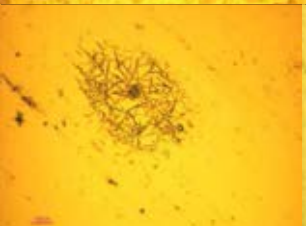


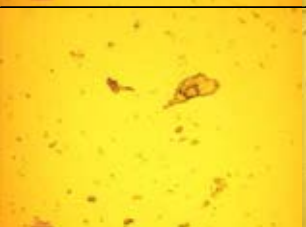

องค์ประกอบของแก้ว	Species ที่เกิดขึ้นหลังการ Hydration	$\Delta G_{hyd}$ (กิโลแคลอรี/โมล)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	$\text{Na}^+, \text{H}_2\text{SiO}_3$	-30.32
$\text{CaSiO}_3$	$\text{Ca}^{2+}, \text{H}_2\text{SiO}_3$	-17.49
$\text{MgSiO}_3$	$\text{Mg}^{2+}, \text{H}_2\text{SiO}_3$	-13.44
$\text{ZnSiO}_3$	$\text{Zn}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SiO}_3$	14.33
$\text{ZrSiO}_4$	$\text{ZrO}(\text{OH})^+ + \text{HSiO}_3^-$	45.10
$\text{SiO}_2$	$\text{H}_2\text{SiO}_3$	3.76

ส่วนการเติมวัตถุดิบตัวเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างนั้น พบว่ามีผลใกล้เคียงกัน สูตร  $\text{DZn}_2$  ที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ได้ผลดีกว่าการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์เล็กน้อย การเติมตัวเติมทำให้โครงสร้างแก้วมีความแข็งแรงได้เช่นเดียวกันแม้ว่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเซอร์โคเนียกับออกซิเจนจะมีพลังงานพันธะมากกว่าพันธะของซิงค์กับออกซิเจน [51-52] แต่ปริมาณของซิงค์ที่เติมลงไปในสูตรมีมากกว่าการเติมเซอร์โคเนีย จึงทำให้ Zn แสดงหน้าที่เป็น Intermediate ซึ่งจะมีค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่าง Zn-O เท่ากับ 72 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอมซึ่งมีค่ามากกว่า Zr ที่เป็น Intermediate ที่มีค่าความแข็งแรงของพันธะระหว่าง Zr-O เท่ากับ 61 กิโลแคลอรี/กรัมอะตอม ดังนั้นการเติมซิงค์ออกไซด์ลงในสูตรสามารถเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างแก้วและทำให้ลดการเกิดฝ้าได้ดีกว่าการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์

#### 4.1.2.7 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (Optical microscope)

โครงสร้างจุลภาคของผิวแก้วหลังผ่านการเร่งสภาวะให้เกิดฝ้าถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง เพื่อศึกษากลไกของการเกิดฝ้าเมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลงไป ผลการตรวจสอบแสดงในภาพที่ 4.10

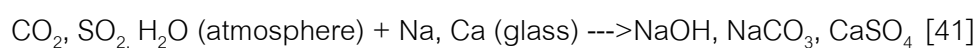


กลไกการเกิดฝ้า	กำลังขยาย 20 เท่า	กำลังขยาย 50 เท่า	กำลังขยาย 100 เท่า
ความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้น เกิดหยดน้ำกลั่นตัวลงเกาะบนผิวแก้ว			
ความชื้นสัมพัทธ์ลดลง น้ำเริ่มระเหยกลับ หยดน้ำจึงแห้งลง เริ่มทำให้สารละลายอิมิตัวยิ่งยวดเกิดผลึกขนาดเล็กๆ ขึ้น			
ความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มและลดเป็นวงจรซ้ำๆ ทำให้ผลึกที่มีเกิดก่อนหน้าทำหน้าที่เป็นผลึกเริ่มต้น (seeding agent) เมื่อหยดน้ำแห้ง ความเข้มข้นของสารละลายสูงขึ้น เกิดการตกผลึกซ้ำทำให้ผลึกเกิดการรวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ			
ความชื้นสัมพัทธ์ลดเพิ่มเป็นวงจรซ้ำๆ เกิดการตกผลึกทับถมกัน ทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น มีลักษณะเป็นชั้นๆ			

ภาพที่ 4.10 โครงสร้างทางจุลภาคผิวแก้วตัวอย่างแก้วหลังจากถูกนำไปเร่งสภาวะให้เกิดฝ้า

เมื่อตรวจสอบพื้นผิวของแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงหลังการเร่งสภาวะสามารถสังเกตเห็นกระบวนการการเกิดฝ้าได้ดังนี้ พบว่าขั้นตอนแรกของการเกิดฝ้าเกิดขึ้นเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในระบบสูงขึ้น ซึ่งเป็นสภาวะที่ถูกจำลองมาจากช่วงเวลากลางคืนในฤดูฝน ทำให้ไอน้ำในบรรยากาศกลั่นตัวเป็นของเหลวเกิดเป็นหยดน้ำเกาะอยู่บนผิวแก้ว ในขั้นตอนนี้ไฮโดรเจนไอออนที่เป็นองค์ประกอบของโมเลกุลน้ำเกิดการแตกตัวและแพร่ลงในเนื้อแก้ว โดยผ่านกระบวนการแพร่แบบแทนที่ในตำแหน่งของโซเดียมไอออนที่อยู่ในโครงสร้างแก้ว ทำให้โซเดียมไอออนถูกแลกเปลี่ยนออกมาอยู่ในน้ำที่เกาะอยู่ที่บริเวณผิวแก้ว

เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ลดลงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งจำลองสภาวะมาจากช่วงเวลากลางวันในฤดูฝน หยดน้ำที่อยู่บนผิวแก้วจะระเหยกลับสู่ระบบกลายเป็นไอน้ำ หยดน้ำค่อยๆ แห้งตัวจนสังเกตเห็นคราบน้ำมีลักษณะเป็นวงๆ ซึ่งเป็นการลดปริมาณสารละลายลง ทำให้ความเข้มข้นของโซเดียมเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำที่เกาะอยู่บนผิวมีความเป็นด่างมากขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแก้วจะไม่ทนต่อความเป็นด่าง [36] จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนของผิวแก้วเกิดการทำลายโครงสร้างแก้วเพิ่มขึ้นไปอีก เมื่อน้ำที่ผิวแห้งลงอีกจะเป็นการลดปริมาณตัวทำละลายลงจนทำให้เกิดสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดนำไปสู่การตกผลึกบนผิวแก้ว ผลึกดังกล่าวคือ สารประกอบของธาตุกลุ่มต่างๆที่ถูกชะออกมาจากโครงสร้างแก้ว เช่น สารประกอบของโซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เป็นต้น การเกิดผลึกดังกล่าวหากมีปัจจัยภายนอกจำพวกก๊าซพิษหรือก๊าซกรด (Acidic gas) จำพวกก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) จะยังเป็นปัจจัยส่งเสริมให้เกิดผลึกมากขึ้น อธิบายปฏิกิริยาได้ดังนี้

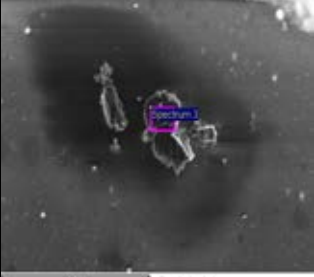
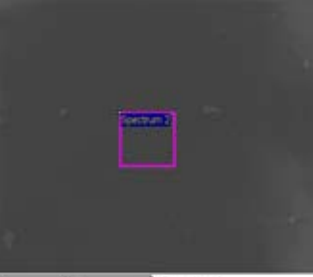


และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นอีกครั้งน้ำในบรรยากาศจะกลับมาเกาะอยู่บนผิวแก้วอีกเพิ่มพื้นที่ที่น้ำสัมผัสกับผิวแก้ว และน้ำที่มาเกาะตัวอีกครั้งจะละลายผลึกที่มีองค์ประกอบของธาตุกลุ่มต่างๆที่เกิดขึ้นก่อนหน้านี้ ทำให้น้ำที่ปกคลุมอยู่บนผิวแก้วมีความเป็นด่างมากกว่าครั้งแรก และจะมีความเป็นด่างจะมากขึ้นเรื่อยๆ ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ส่วนผลึกที่ละลายไม่หมดจะทำหน้าที่เป็นผลึกเริ่มต้น (Seeding agent) เกิดการตกผลึกซ้ำบนผลึกเดิมอาศัยกลไกการเติมโตของผลึกโดยไอออนเดินทางโดยกระบวนการแพร่ผ่านวัฏภาคของเหลวไปที่ผิวหน้าผลึกเดิม จากนั้นเกิดการจัดเรียงตัวให้เข้าสู่ปริภูมิแลตทิซของผลึกเดิมทำให้ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งกระบวนการการเติมโตของผลึกจะใช้พลังงานน้อยกว่าการเกิดผลึกในครั้งแรกมาก จึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีการโตของผลึกต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งในระยะแรกของการเกิดผลึกอาจยังไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า แต่เมื่อความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มและลดเป็นวงจรรซ้ำๆ ต่อไปเรื่อยๆ กระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นก็จะเกิดอย่างซ้ำๆ และมีแนวโน้มที่จะมีความรุนแรงมากกว่า

ตอนเริ่มต้น เนื่องจากสารละลายที่ปกคลุมอยู่มีความเป็นด่างมากขึ้นเรื่อยๆ จึงกัดกร่อนโครงสร้างแก้วได้มากขึ้น ผลึกที่เกิดขึ้นจะใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ มีลักษณะเติบโตสะสมเป็นชั้นๆ จนสามารถมองเห็นเป็นคราบขาวได้อย่างชัดเจนเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า และอาจเกิดฝังลึกลงไปบนเนื้อแก้วที่ถูกกัดกร่อน หากเป็นเช่นนั้นผลึกหรือคราบขาวที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถขีดออกได้ [53]

#### 4.1.2.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope)

ส่วนแรกของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และ Energy dispersive spectroscopy (EDS) คือ การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของบริเวณที่เกิดฝ้าของแก้วสูตร D0 คือสูตรเดิมที่มีการเกิดปัญหาฝ้า เพื่อหาองค์ประกอบของผลึกที่เกาะอยู่บนผิวแก้ว ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.11 และสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS แสดงในภาคผนวก ค

ตัวอย่าง	สเปกตรัม1	สเปกตรัม2	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
				สเปกตรัม1	สเปกตรัม2
D0			Si	19.93	24.42
			Al	1.32	1.71
			Na	10.54	9.97
			Ca	3.40	4.01
			O	64.81	59.89
			รวม	100.00	100.00

ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของบริเวณที่เกิดฝ้าของตัวอย่าง D0

การเกิดฝ้าบนผิวแก้วนอกจากจะมีผลึกขนาดใหญ่ที่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงแล้ว ยังมีผลึกขนาดเล็กเกิดขึ้นบนผิวแก้วอีกด้วย ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ด้วยเทคนิค SEM ที่มีกำลังขยายมากกว่า จากภาพที่ 4.11 ที่แสดงองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานแก้ว D0 ของบริเวณที่เกิดผลึกเทียบกับบริเวณที่ไม่มีผลึก พบว่าสเปกตรัม 1 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากบริเวณที่เกิดฝ้ามีปริมาณธาตุกลุ่มต่าง คือ โซเดียม (Na) มากกว่าสเปกตรัม 2 ที่ได้จากบริเวณที่พื้นผิวปกติที่ไม่เกิดฝ้า และออกซิเจน (O) มีปริมาณสูงเช่นเดียวกันพบว่าปริมาณของ Na ที่เป็นองค์ประกอบของผลึกมากกว่า Ca เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่และความเข้มข้นของ Na มีค่ามากกว่า Ca จึงสามารถแพร่ออกมาได้ง่ายเกิดเป็นผลึกบนผิวแก้ว แต่พบว่ามี Si ปรากฏอยู่ด้วย แต่จาก

งานวิจัยต่างๆ พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็น  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{NaCO}_3$  and CSH (Calcium silicate hydrate) [54] ซึ่งพบว่ามีองค์ประกอบของ Si อยู่ร้อยละน้อย ซึ่งอาจเกิดมาจากการที่ผลึกที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กจึงย่อมมีความบางมาก ทำให้การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ซึ่งมีความลึกในการวิเคราะห์ประมาณ 10 ไมโครเมตร อาจวิเคราะห์ลงลึกไปถึงเนื้อแก้วจึงมีการรวมองค์ประกอบของ Si ที่อยู่ในเนื้อแก้วด้วย ดังนั้นจึงนำตัวอย่างแก้วไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM ที่มีระดับความลึกจากพื้นผิวของที่วิเคราะห์ <10 นาโนเมตร จากผิวซึ่งน้อยกว่าความลึกที่วิเคราะห์ด้วย EDS

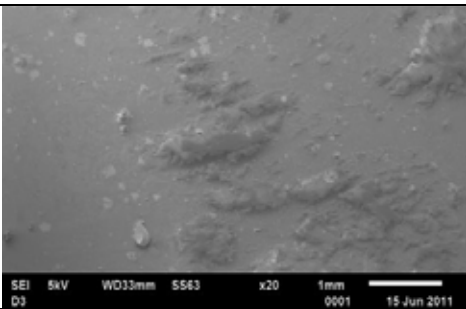
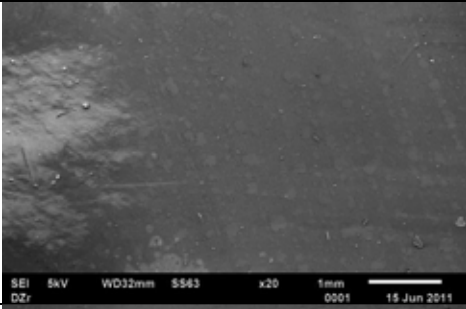
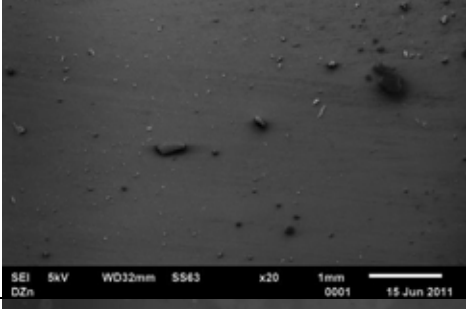
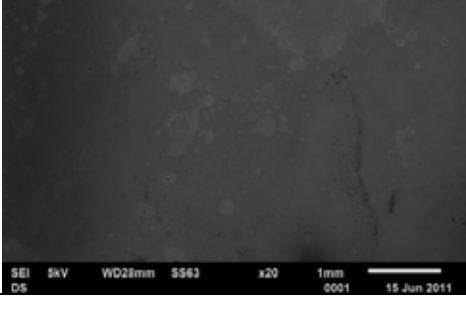
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผลึกที่เกิดขึ้นจะมีองค์ประกอบหลักคือธาตุกลุ่มต่างๆ ที่เป็น Modifier ในแก้ว ดังนั้นหากสามารถปรับปรุงให้แก้วลดการถูกชะออกมาของกลุ่ม Modifier ได้จะทำให้ลดสารตั้งต้นของการเกิดผลึกฝ้าได้ [53]

ส่วนที่ 2 การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของบริเวณผิวแก้วของตัวอย่างก่อนอบผิวและหลังอบผิว เพื่อเปรียบเทียบว่าการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ช่วยในการลดปริมาณของธาตุกลุ่มต่างๆ บริเวณใกล้ผิวแก้วได้หรือไม่ โดยใช้เทคนิค EDS เนื่องจากบริเวณที่ต้องการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีคือบริเวณผิวแก้วที่ถูกลดปริมาณต่างๆ ที่ผิวลง (Dealkalization) เท่านั้น ผลการตรวจสอบแสดงในตารางที่ 4.8 ตัวอย่างแก้ว DS ซึ่งเป็นแก้วที่เตรียมจากนำแก้ว D3 ไปอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และนำไปล้างคราบขาวออก พบว่าองค์ประกอบทางเคมีบริเวณผิวแก้วของ DS ที่ผ่านการอบผิวมีปริมาณโซเดียม (Na) ลดลงจาก 21.44 เป็นร้อยละ 12.91 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณของซิลิคอน (Si) เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 58.91 เป็น 67.27 โดยน้ำหนัก ซึ่งการลดปริมาณโซเดียมลงจะเป็นการลดสารตั้งต้นที่ทำให้เกิดฝ้าได้

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วก่อนและหลังการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ตัวอย่างแก้ว	
	D3	DS
Si	58.91	67.27
Al	7.82	5.25
Na	21.44	12.91
Ca	6.50	7.83
Mg	5.33	6.74
Total	100.00	100.00

ส่วนที่ 3 ของการทดลองที่มีการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในการตรวจสอบคือตัวอย่างแก้วที่ผ่านการเร่งสภาวะในตู้ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิเป็นเวลา 4 สัปดาห์ เป็นการตรวจสอบดูผิวแก้วโดยรวมด้วยกำลังขยาย 20 เท่า ซึ่งถือว่าเป็นกำลังขยายที่ต่ำสำหรับการใช้เทคนิคนี้แต่ข้อดีคือ จะเห็นความสูงและต่ำของพื้นผิว (Topography) ได้ดีกว่าการใช้กล้องจุลทรรศน์แสง ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.12 และสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS แสดงในภาคผนวก ค

ตัวอย่าง	ภาพผิวแก้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM	ลักษณะของผิวแก้ว
D3		ผิวแก้วมีผลึกฝ้ายเกิดทับถมกันจนเป็นกลุ่มผลึกที่มีความสูงชันมาจากพื้นผิว
DZr3		ผิวแก้วมีฝ้ายเกิดครอบคลุมพื้นที่กว้าง แต่ไม่มีการเกิดเป็นลักษณะผลึกทับถมกัน มีลักษณะเป็นคราบที่มีความหนาไม่มาก
DZn2		มีผลึกขนาดใหญ่อยู่บนผิวแก้วแต่ไม่ปรากฏเป็นวงกว้างเท่าตัวอย่าง D3 และ DZr3
DS		ผิวแก้วมีคราบปกคลุมอยู่แต่ไม่เป็นผลึกขนาดใหญ่ทับถมและมีบริเวณไม่กว้างเท่าตัวอย่าง D3 และ DZr3

ภาพที่ 4.12 ลักษณะของผิวแก้วหลังการเร่งสภาวะให้เกิดฝ้ายเป็นเวลา 4 สัปดาห์

จากผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าแก้วตัวอย่าง D3 มีความรุนแรงของการเกิดฝ้ามากที่สุดคือ เกิดผลึกเกาะตัวบนผิวแก้วเป็นบริเวณกว้างและมีขนาดใหญ่ทับถมกัน จึงทำให้สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าชัดเจนซึ่งมีความสอดคล้องกับการตรวจสอบด้วยปริมาณของการเกิดฝ้าด้วยตาเปล่าที่ระดับแสงความเข้มแตกต่างกัน ส่วนแก้วตัวอย่าง DZr3 และ DZn2 เกิดคราบขาวและผลึกขนาดใหญ่ ซึ่งมีความรุนแรงของการเกิดฝ้าน้อยกว่าตัวอย่างแก้ว D3 แต่จากการสังเกตด้วยตาเปล่าที่ความเข้มแสงต่างกันเมื่อถูกเร่งสภาวะ 4 สัปดาห์ พบว่าตัวอย่าง D3, DZr3 และ DZn2 ถูกจำแนกการเกิดฝ้าอยู่ในระดับเดียวกันคือ เกิดฝ้ามากเมื่อสังเกตด้วยความเข้มแสงปกติ (500 ลักซ์) แต่จะไม่สามารถบอกความแตกต่างของลักษณะของความหนาของฟิล์มที่เกิดปกคลุมหรือความรุนแรงของการเกิดฝ้าได้ดีเท่าการวิเคราะห์ด้วย SEM แต่การจำแนกด้วยตาเปล่าที่ความเข้มแสงต่างกันมีข้อดี คือ สามารถมองเห็นภาพรวมของทั้งชิ้นงานแต่เทคนิค SEM จะตรวจสอบได้เป็นบริเวณแคบกว่า ภาพที่ได้อาจไม่ใช่ตัวแทนที่ดีที่สุดของทั้งชิ้นตัวอย่างแก้ว และข้อดีอีกประการของการใช้ตาเปล่าในการตรวจสอบตัวอย่างแก้วคือมีต้นทุนต่ำกว่าสามารถทำได้ง่ายในกระบวนการผลิตจริง

#### 4.1.2.9 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวแก้วโดยการใช้นิเทศน์ Photo Emission Electron Microscopy (PEEM) และเทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM)

การเตรียมชิ้นงานแก้วเพื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Photo Emission Electron Microscopy (PEEM) และเทคนิค Low Energy Electron Microscopy (LEEM) ทำโดยการเคลือบผิวของชิ้นงานแก้วด้วยโลหะทอง เพื่อให้ผิวแก้วนำไฟฟ้าด้วยเครื่อง Sputter โดยใช้กำลังการสับเตออร์ 100 วัตต์ จากนั้นนำไปตรวจสอบความหนาของชั้นทองที่เคลือบด้วยเวลาที่ต่างกันด้วยเทคนิค Atomic Force Microscope (AFM) ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความหนาชั้นเคลือบโลหะทองบนผิวแก้วที่เตรียมโดยวิธี Sputtering ที่เวลาต่างกัน

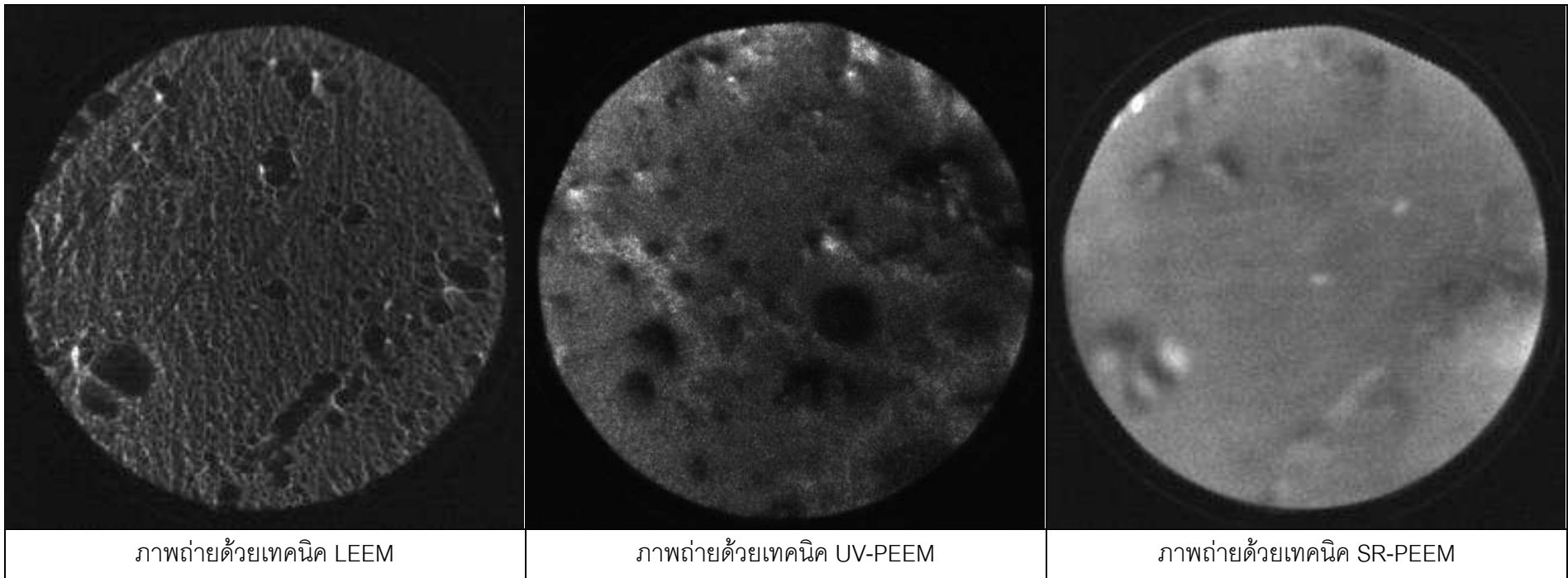
เวลาในการเคลือบผิว (วินาที)	ผลการวิเคราะห์ความหนาด้วยเทคนิค AFM	ความหนาของชั้นทองบนผิวแก้ว (นาโนเมตร)
40		42.774
30		26.345
15		10.293

จากการตรวจสอบด้วยเครื่อง AFM เพื่อหาความหนาของชั้นทองที่เคลือบอยู่บนผิวแก้ว พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการ Sputtering ชั้นเคลือบจะมีความหนาขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่ทำการเคลือบโดยใช้เวลา 40 วินาที จะได้ชั้นเคลือบทองที่ได้มีความหนา 42.774 นาโนเมตร และมีสีทองแวววาวชัดเจน เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง PEEM และ LEEM พบว่ามีการนำไฟฟ้าได้ดี แต่ไม่เห็นลักษณะต่างๆ ของผิวแก้วเลย เนื่องจากจากชั้นทองที่เคลือบมีความหนามากเกินไป จึงต้องมีการปรับลดความหนาลง โดยลดเวลาในการเคลือบผิวเป็น 30 วินาที ซึ่งชั้นเคลือบทองที่ได้มีความหนา 26.345 นาโนเมตร ตัวอย่างมีความเข้มของสีทองลดลง เมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ พบว่าสามารถนำไฟฟ้าได้ แต่ยังคงไม่เห็นลักษณะต่างๆ ของผิวแก้ว ระดับความลึกของการวิเคราะห์ทำได้แค่ในส่วนของชั้นที่เคลือบทองเท่านั้น ดังนั้นความหนาของชั้นเคลือบทองที่ใช้เวลาในการเคลือบ 30 วินาทียังได้ชั้นเคลือบที่มีความหนามากเกินไปสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ จึงปรับลดเวลาลงอีกเหลือ 15 วินาที พบว่าชั้นเคลือบมีความหนา 10.293 นาโนเมตร และพบว่าสามารถวิเคราะห์ทะลุผ่านชั้นทองที่เคลือบไว้ได้ เห็นลักษณะความแตกต่างของผิวแก้วที่เกิดฝ้าปกคลุมได้

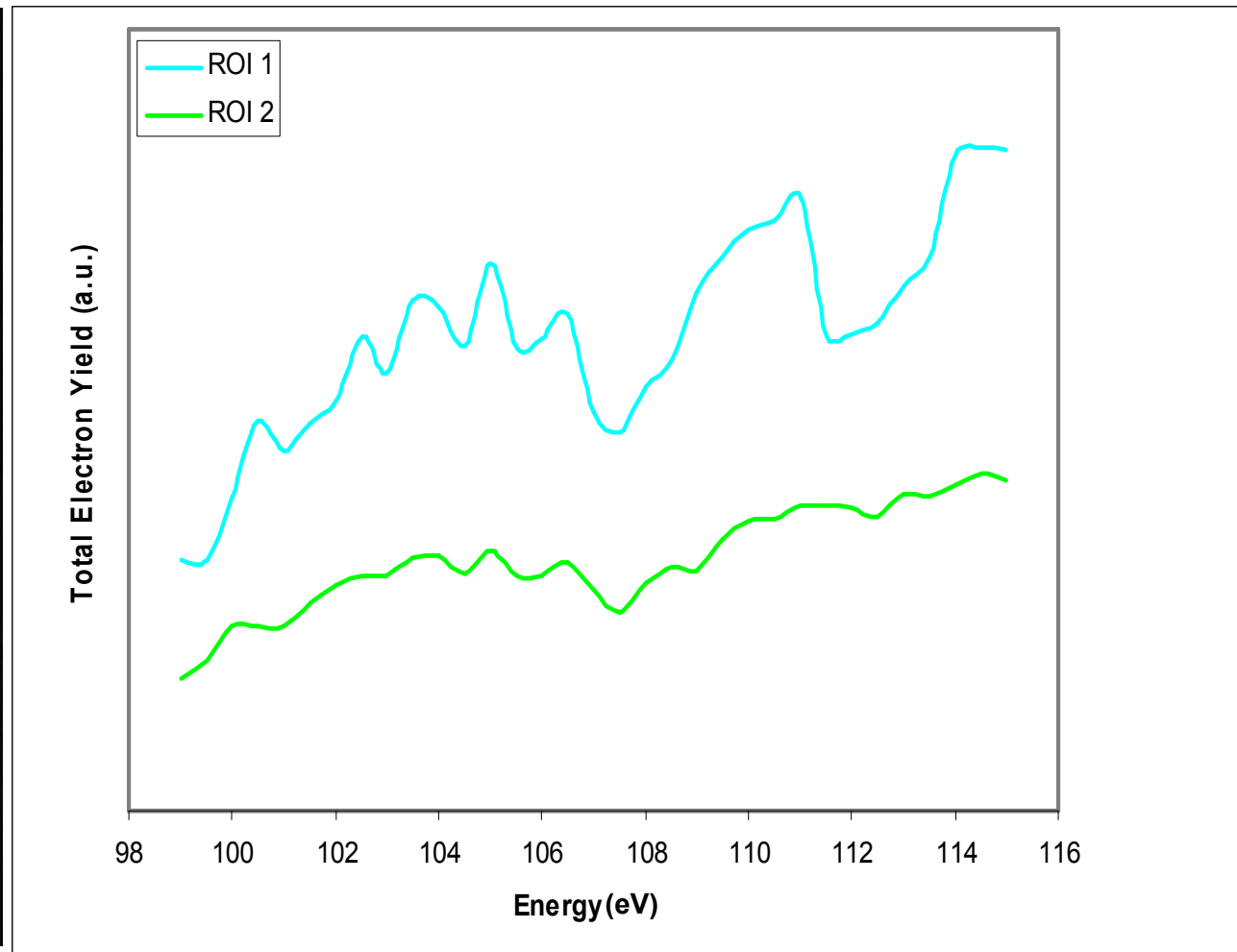
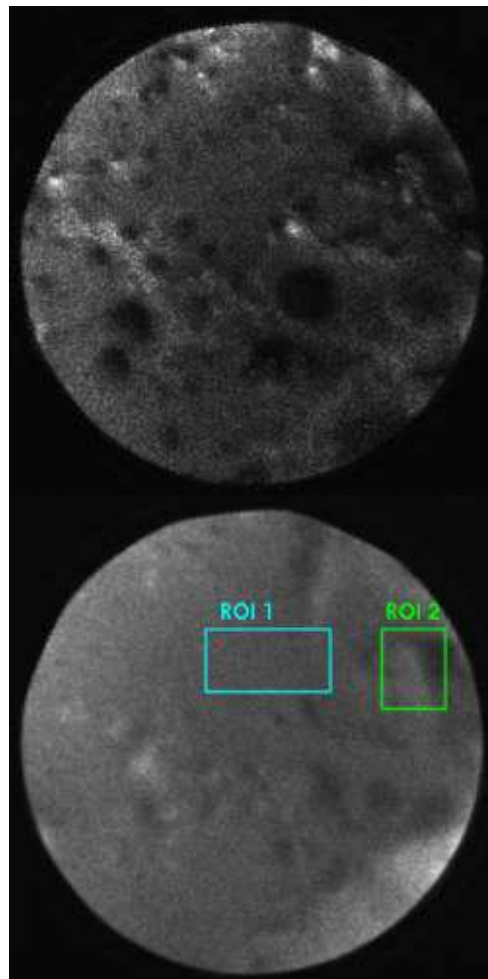
จากการวิเคราะห์ผิวแก้วที่เกิดฝ้าด้วยเทคนิค PEEM และ LEEM พบว่าปัญหาสำคัญคือ การเตรียมตัวอย่างแก้วให้เหมาะสมกับการวิเคราะห์ การเตรียมตัวอย่างแก้วให้สามารถนำไฟฟ้าได้ใช้เทคนิคการเคลือบด้วยชั้นโลหะพบว่าความหนาของชั้นทองที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์คือ 10.293 นาโนเมตร ที่ถูกเตรียมขึ้นจากการใช้เทคนิค Sputtering หากเตรียมชั้นงานหนามากกว่านี้ จะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ทะลุชั้นความหนาของเคลือบทองได้ แต่หากชั้นเคลือบมีความหนาน้อยกว่านี้ก็จะไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ผิวแก้ว DS ที่ถูกเร่งสภาวะเป็นเวลา 4 สัปดาห์แสดงในภาพที่ 4.13 ภาพ a) เป็นภาพจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค LEEM ซึ่งภาพที่ได้เป็นการแปรผลมาจากสภาพความสูงต่ำของพื้นผิวที่แตกต่างกัน (Topography contrast) แสดงให้เห็นถึงความขรุขระของพื้นผิวที่มีผลึกฝ้าเกาะอยู่ ภาพที่ 4.13 b) เป็นภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UV-PEEM คือ ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้มีต้นกำเนิดแสงเป็นแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV light) ซึ่งภาพที่ได้เป็นผลมาจากความแตกต่างของค่าฟังก์ชันงาน (Work function) ซึ่งคือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการทำให้โฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมา และภาพที่ 4.13 c) ภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยเทคนิค SR-PEEM หรือการใช้แหล่งกำเนิดแสงในการวิเคราะห์เป็นแสงซินโครตรอน (Synchrotron light) ซึ่งภาพที่ได้เกิดจากความแตกต่างของธาตุบนพื้นผิว (Elemental contrast) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าภาพ SR-PEEM มีความแตกต่างของพื้นผิวแก้วน้อยที่สุด ทั้งที่เป็นภาพที่ถ่ายจากบริเวณเดียวกัน แต่ข้อดีของการใช้เทคนิค SR-PEEM คือสามารถวิเคราะห์สเปกตรัมของบริเวณที่สนใจได้แม้จะเป็นบริเวณที่แคบมาก โดยใช้ภาพจาก LEEM และ UV-



PEEM ที่เห็นความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวมากกว่า เป็นภาพอ้างอิงในการเลือกบริเวณที่จะวิเคราะห์ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Micro-XAS บนพื้นผิวที่เกิดฝ้าเปรียบเทียบกับบริเวณที่เป็นพื้นผิวปกติแสดงในภาพที่ 4.14 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Absorption Spectroscopy เมื่อมีการแปรค่าพลังงานของแสงซินโครตรอน เพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ พบว่าสเปกตรัมที่ได้จากบริเวณพื้นผิวปกติ (ROI 1) จะปรากฏพีค Total Electron Yield ที่มีความเข้มสูงสุดที่ค่าพลังงานประมาณ 110 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งเป็นพีคของซิลิคอน และเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณที่มีฝ้า (ROI 2) พบว่าไม่ปรากฏพีคดังกล่าว ซึ่งมีผลสอดคล้องกับงานวิจัยต่างๆ ที่พบว่าบริเวณผลึกที่เป็นฝ้าสะสมอยู่มีองค์ประกอบของซิลิกาน้อย สามารถสรุปได้ว่าแม้ลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นปกคลุมผิวแก้วจะมีความหนาแน่นน้อยมาก แต่การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM นี้สามารถวิเคราะห์การดูดกลืนพลังงานของอะตอมต่างๆ ด้วยเทคนิค XAS เฉพาะบริเวณผลึกฝ้าได้ไม่หลงลึกไปถึงเนื้อแก้ว



ภาพที่ 4.13 ภาพผิวแก้วที่เกิดฝ้าจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM และ LEEM



ภาพที่ 4.14 สเปกตรัมของการวิเคราะห์ผิวแก้วบริเวณที่เกิดฝ้าเทียบกับพื้นผิวปกติวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM

## 4.2 การแก้ไขการเกิดฝ้าของกระจกที่ผลิตจากแก้วโซดาไลม์

จากการทดลองในตอนที่ 1 ที่ทำทดลองเพื่อแก้ปัญหาการเกิดฝ้ากับแก้วชนิดโซดาไลม์โดยการปรับสูตรและการปรับผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ พบว่าสามารถต้านทานการเกิดฝ้าได้ดีกว่าการเติมวัตถุเติมตัวเติม จึงได้ทำการทดลองในส่วนของการอบผิวแก้วต่อเพื่อศึกษาการใช้สารตั้งต้นชนิดต่างกันที่เป็นตัวให้กำเนิดของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โดยทำการทดลองกับกระจกโพลีเอทิลีน

### 4.2.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

#### 4.2.1.1 กระจก

กระจกที่นำมาใช้ในงานวิจัยถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบว่าเป็นกระจกชนิดใด ซึ่งผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระจก

ออกไซด์	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	72.28
Na <sub>2</sub> O	14.10
CaO	9.22
MgO	3.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61
K <sub>2</sub> O	0.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08
TiO <sub>2</sub>	0.03
SO <sub>3</sub>	0.15
Cl	0.01
รวม	100.00



จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต พบว่าเมื่อนำโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตไปใช้ในการอบผิวหนึ่งครั้งที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียสจะมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาระหว่างกระบวนการอบผิวแก้วร้อยละ 5.74 ของน้ำหนักโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต

สารส้มเมื่อนำไปอบผิวที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียสพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก โดยมีปริมาณของ  $\text{SO}_3$  เพิ่มขึ้นมาเล็กน้อย ดังนั้นการใช้สารส้มที่อุณหภูมิดังกล่าวแทบจะไม่มี การปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาในระบบเลย

การใช้ซิงค์ซัลเฟตเพื่อเป็นแหล่งของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์พบว่าเมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิดังกล่าวแล้วจะมีการปลดปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมาร้อยละ 4.34 โดยน้ำหนักซึ่งน้อยกว่าปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตเล็กน้อย

#### 4.2.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของชิ้นงานกระจกหลังการปรับสภาพผิวโดยการอบด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์


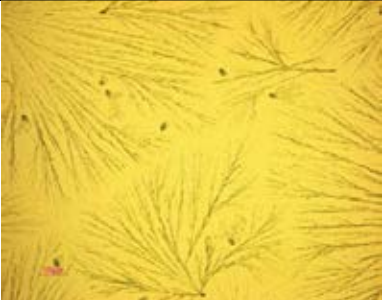
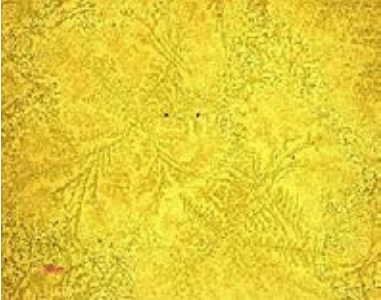
##### 4.2.2.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของผิวแก้วโดยการใช้อัลตร้าไมครอสโคปแสง (Optical microscope)

หลังจากการอบกระจกด้วยสารตั้งต้นที่เป็นแหล่งของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ชนิดต่างๆ โดยใช้สารตั้งต้นปริมาณ 10 กรัม จะเกิดคราบขาวเกาะอยู่ที่ผิวแก้ว ซึ่งเมื่อนำมาตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4.15

จากภาพถ่ายผิวแก้วหลังการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้อัลตร้าไมครอสโคปแสงที่กำลังขยาย 10 เท่า กำลังขยายตาวัตถุพบว่า มีผลึกเกาะที่ผิวแก้วโดยเกิดลักษณะผลึกที่แตกต่างกันคือ การใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ( $\text{NaHSO}_4$ ) เป็นสารตั้งต้น ผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับผลึกอยู่บนผิวแก้วที่เกิดฝ้าจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง มีความสมบูรณ์ของผลึกและมีขนาดใหญ่ทำให้เมื่อล้างผลึกออกจะสามารถลดปริมาณของโซเดียมที่ผิวได้มากกว่า มีประสิทธิภาพมากกว่าสารตั้งต้นตัวอื่น

การใช้สารส้มและซิงค์ซัลเฟตเป็นสารตั้งต้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการอบผิวแก้วพบว่าหลังการอบผิวแก้วมีลักษณะเป็นผลึกแบบเดนไดรต์ (Dendrite) เกิดขึ้น โดยที่การใช้สารส้มเกิดเป็นลักษณะของผลึกเดนไดรต์ที่ยังมีพื้นที่ว่างอยู่ยังไม่เชื่อมต่อกันทั้งหมด มีความต่อเนื่องเป็นโครงข่ายน้อยกว่าการในกรณีที่ใช้ซิงค์ซัลเฟตเป็นแหล่งกำเนิดของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งลักษณะดังกล่าวอาจวิเคราะห์ได้ว่าการเกิดผลึกบนผิวแก้วที่ใช้สารส้มอบผิวเป็นการเกิดผลึกในช่วงเริ่มต้นเท่านั้น เมื่อเทียบกับลักษณะที่เกิดขึ้นบนผิวแก้วที่ใช้ซิงค์ซัลเฟตในการอบผิวพบว่า

ลักษณะผลึกที่เกิดขึ้นมีการขยายตัวเกิดทั่วพื้นผิวมากกว่ากรณีที่ใช้สารส้ม ปัจจัยดังกล่าวอาจเกิดมาจากปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ ถูกปลดปล่อยออกมาในระบบ ซึ่งการใช้สารส้มจะมีปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เกิดขึ้นน้อยกว่าการใช้ซิงค์ซัลเฟต จากงานวิจัยของ Carmona และคณะ [54] พบว่าการเกิดผลึกของ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์นั้นเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการเกิดผลึก

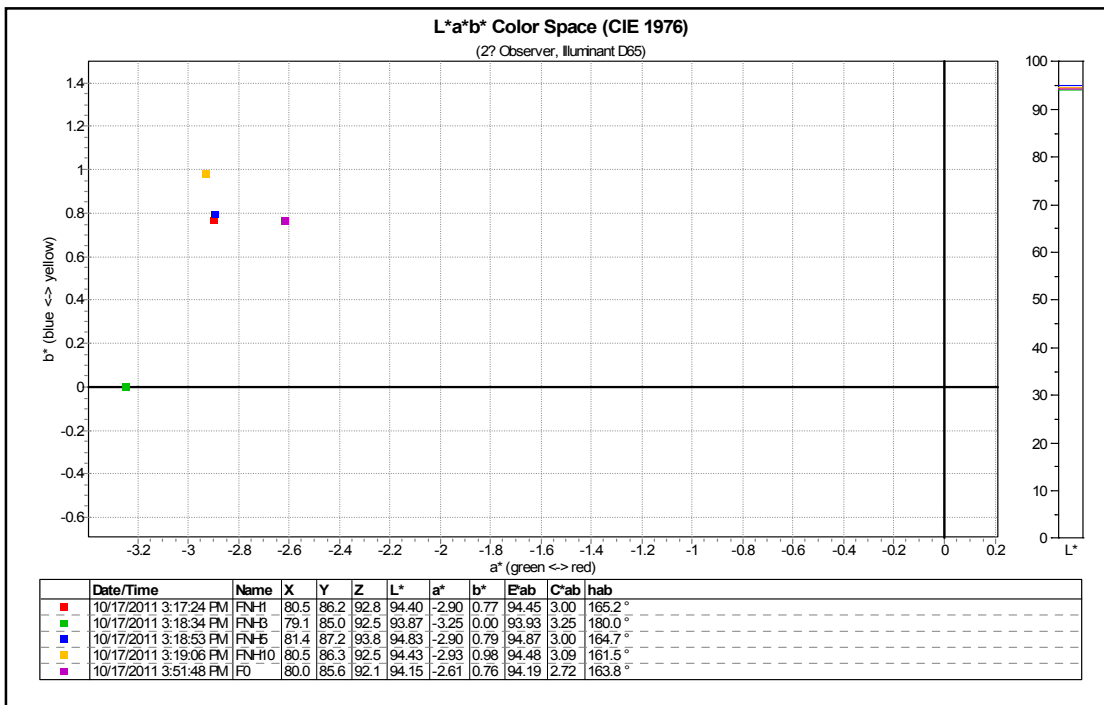
สารตั้งต้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ลักษณะของผิวกระจกหลังอบผิว
โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต ( $\text{NaHSO}_4$ )	
สารส้ม ( $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ )	
ซิงค์ซัลเฟต ( $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )	

ภาพที่ 4.15 ลักษณะทางจุลภาคของผิวแก้วหลังอบด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

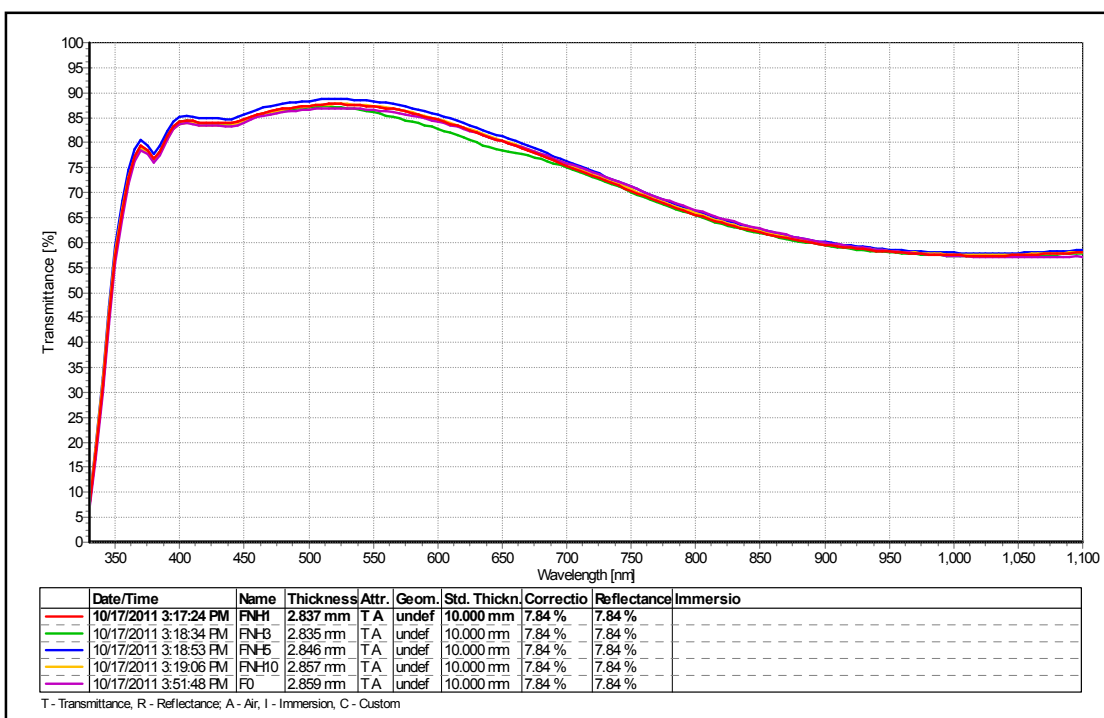
#### 4.2.2.2 ผลการวิเคราะห์สีและความสามารถในการส่องผ่านของแสงด้วยเทคนิค UV-Vis Spectrophotometer

เพื่อการควบคุมคุณภาพของกระจกหลังจากนำไปอบผิว ต้องมีการตรวจสอบสมบัติทางแสงของกระจกก่อนและหลังการอบผิวเปรียบเทียบกัน โดยนำตัวอย่างกระจกไปตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าสีและความใสหลังการอบผิว โดยต้องกำจัดคราบขาวที่เกาะอยู่บนกระจกออก

ก่อนด้วยการล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์สีและความใสแสดงในภาพที่ 4.16-4.21 และตารางที่ 4.12

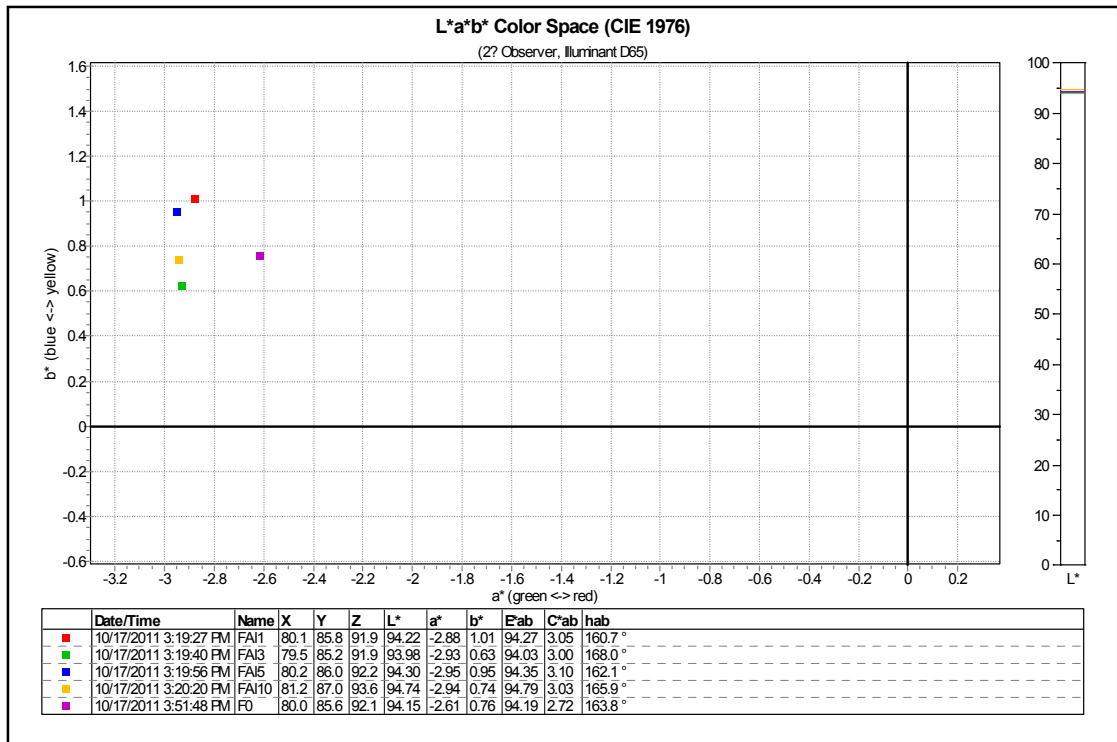


ภาพที่ 4.16 ผลการวัดสีของกระจกก่อนหลังการอบผิวโดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต(NaHSO<sub>4</sub>)

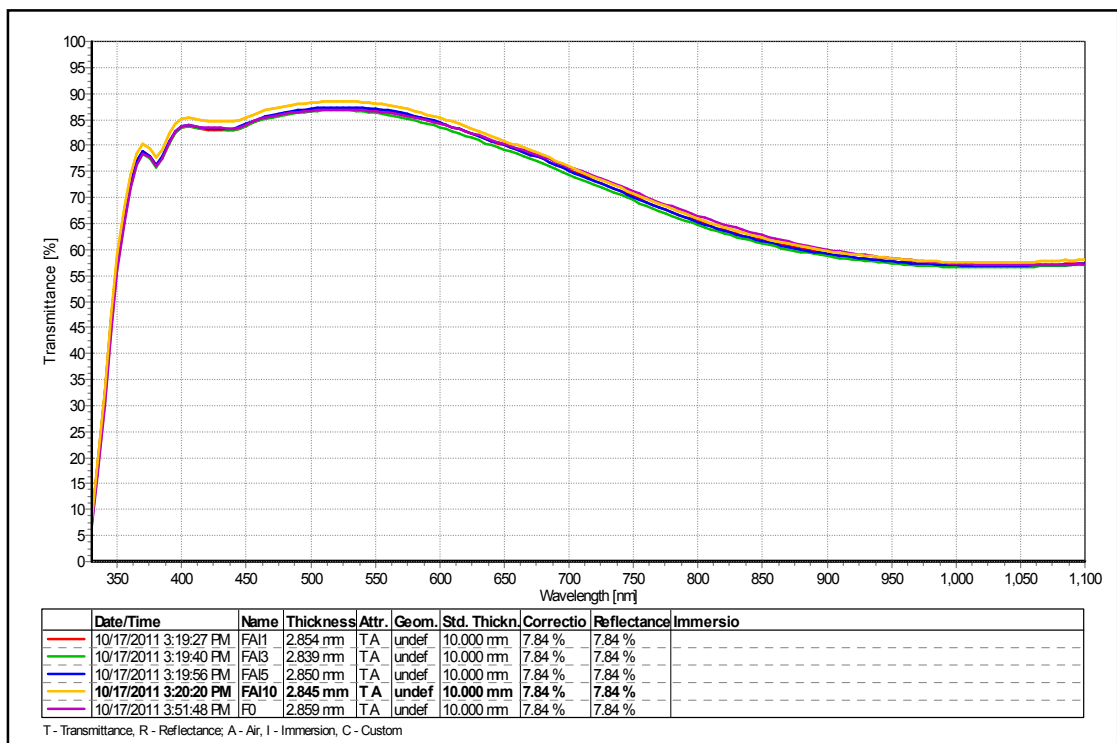


ภาพที่ 4.17 ผลการวัดความสามารถในการส่องผ่านของแสงของกระจกก่อนและหลังการอบผิวโดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต(NaHSO<sub>4</sub>)

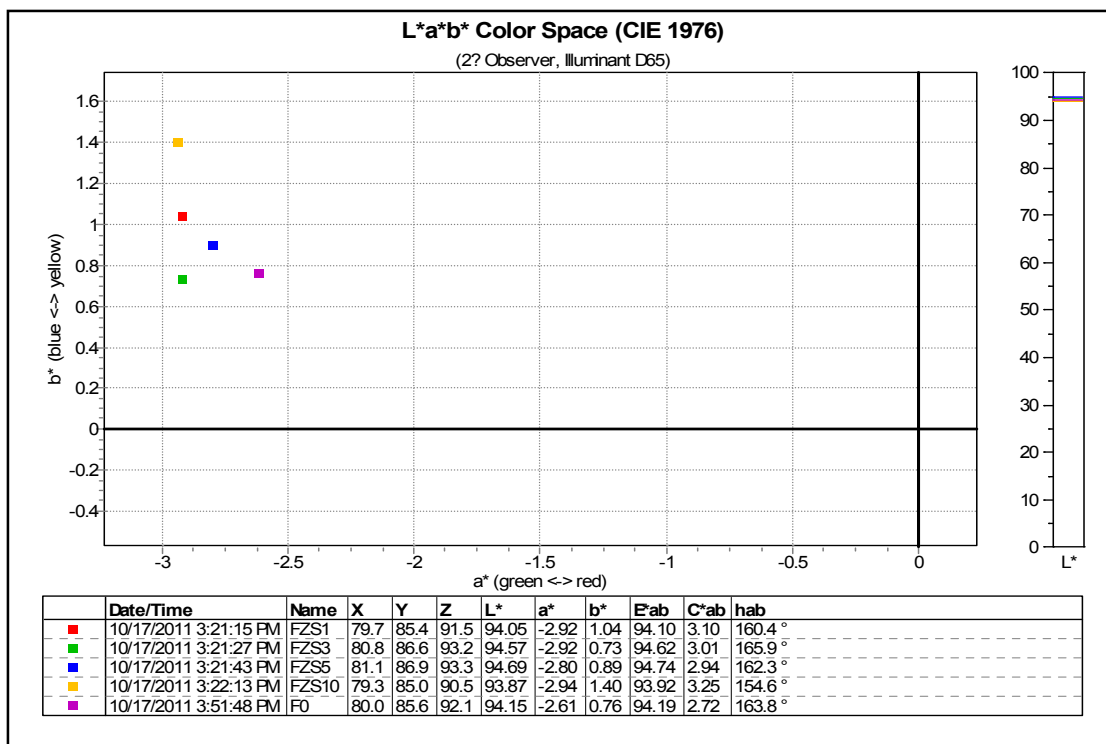




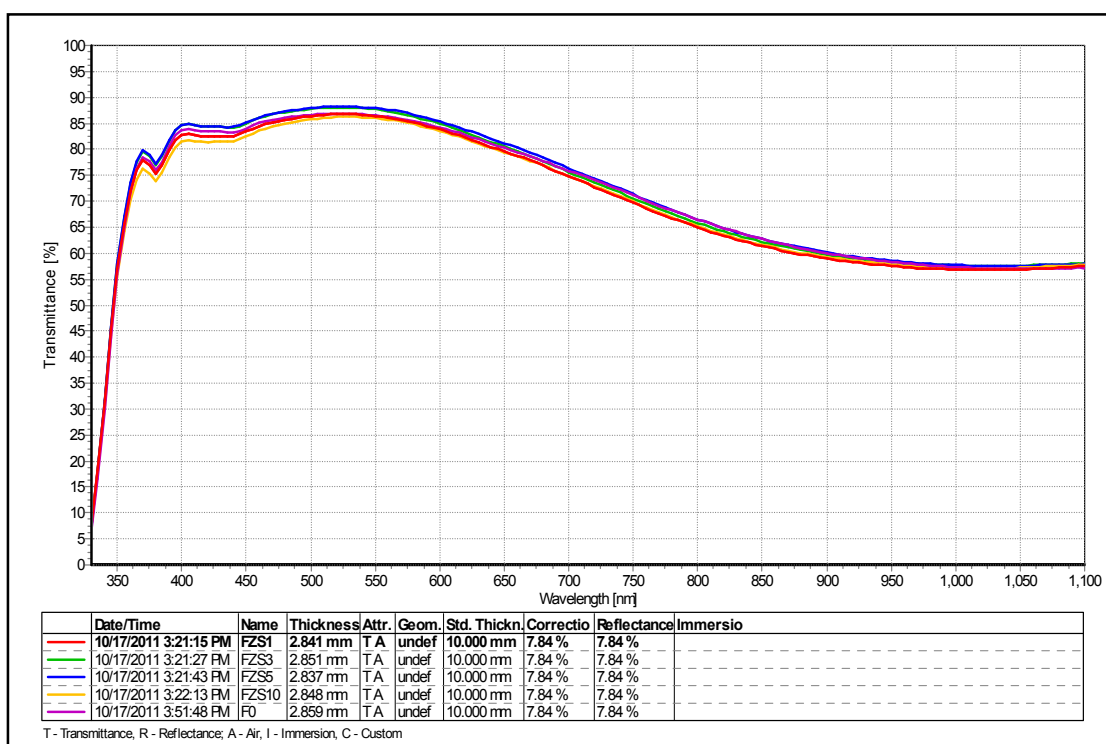
ภาพที่ 4.18 ผลการวัดสีของกระจกก่อนและหลังการอบผิวโดยใช้สารส้ม( $KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$ )



ภาพที่ 4.19 ผลการวัดความสามารถในการส่องผ่านของแสงของกระจกก่อนและหลังการอบผิวโดยใช้สารส้ม( $KAl(SO_4)_2 \cdot 12 H_2O$ )



ภาพที่ 4.20 ผลการวัดสีของกระจกก่อนและหลังการอบผิวโดยใช้ซิงค์ซัลเฟต( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ )



ภาพที่ 4.21 ผลการวัดความสามารถในการส่องผ่านของแสง  
ของกระจกก่อนและหลังการอบผิวโดยใช้ซิงค์ซัลเฟต( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ )

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ค่าสีและความสามารถในการส่องผ่านแสงของกระจกหลังอบผิว

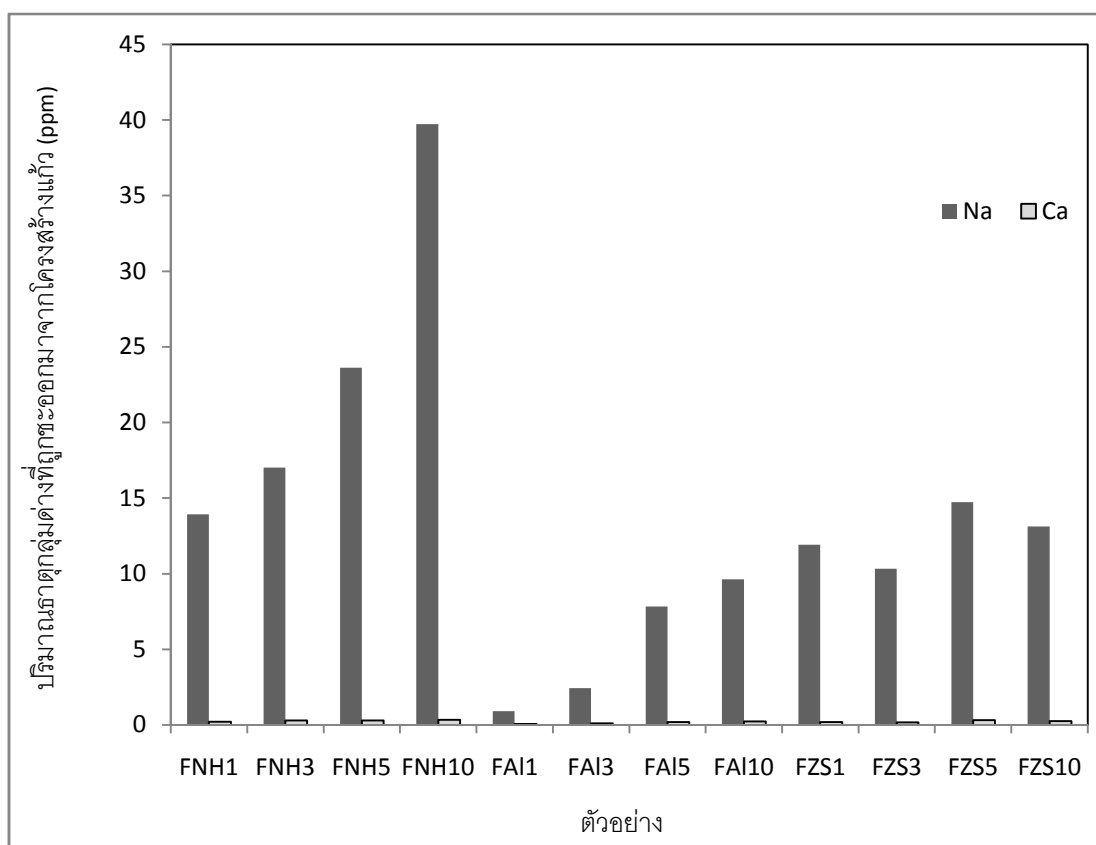
ตัวอย่าง	L*	a*	b*	T %
F0	94.15	-2.61	0.76	85.09
FNH1	94.40	-2.90	0.77	85.56
FNH3	93.87	-3.25	0.00	83.82
FNH5	94.83	-2.90	0.79	86.56
FNH10	94.43	-2.93	0.98	85.67
FAI1	94.22	-2.88	1.01	85.28
FAI3	93.98	-2.93	0.63	84.52
FAI5	94.30	-2.95	0.95	85.46
FAI10	94.74	-2.94	0.74	86.32
FZS1	94.05	-2.92	1.04	84.85
FZS3	94.57	-2.92	0.73	85.95
FZS5	94.69	-2.80	0.89	86.34
FZS10	93.87	-2.94	1.40	84.49

จากการตรวจสอบค่าสีของกระจกก่อนอบผิวมีค่า  $a^*$  -2.61 และ  $b^*$  0.76 แสดงถึงกระจกมีสีเขียวอมเหลือง ส่วนกระจกที่ผ่านการอบผิวทุกตัวพบว่ามีความเขียวมากขึ้นกว่าก่อนอบผิว และค่าสีตามแกนสีเหลืองน้ำเงินพบว่ามีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งมีค่าสีเหลืองมากกว่าและเหลืองน้อยกว่ากระจกก่อนอบผิว แต่โดยรวมทั้งหมดของกระจกที่ผ่านการอบผิวไม่มีการเปลี่ยนแปลงสีอย่างนัยสำคัญจนทำให้สังเกตเห็นด้วยตาเปล่าได้

การวิเคราะห์ความสามารถในการส่องผ่านของแสงพบว่ากระจกที่ไม่ผ่านการอบผิวมีค่าร้อยละ 85.09 ส่วนการอบผิวกระจกด้วยสารตั้งต้นต่างๆ ทำให้ความสามารถในการส่องผ่านของผิวนั้นไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนักมีทั้งที่มีความสามารถในการส่องผ่านของแสงเพิ่มขึ้นและลดลงแต่ก็มีความแตกต่างจากแก้วเดิมเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นการอบผิวแก้วแล้วมีคราบขาวเกิดขึ้นนั้น เมื่อผ่านกระบวนการล้างทำความสะอาดแล้ว ผลึกที่เกาะอยู่ที่ผิวสามารถกำจัดออกได้ และไม่มี ความแตกต่างทางด้านความใสของกระจกเมื่อเทียบกับกระจกที่ไม่ได้อบผิว

#### 4.2.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของคราบขาวที่เกาะบนผิวกระจกหลังการอบผิว โดยใช้เทคนิค Atomic absorption spectroscopy (AAS)

ผลึกหรือคราบขาวที่เกิดขึ้นหลังการอบผิวสามารถละลายน้ำได้ง่ายและจะละลายตัวเมื่อทิ้งไว้ในอากาศสักครู่หนึ่ง เนื่องจากสัมผัสกับความชื้นที่อยู่ในบรรยากาศ จากสมบัติดังกล่าวพบว่าคล้ายกับผลึกพวกที่มีโซเดียมเป็นองค์ประกอบ เช่น โซเดียมออกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ), โซเดียมซัลเฟต ( $\text{NaSO}_4$ ) ดังนั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบของคราบขาวหรือผลึกที่เกิดขึ้นหลังการอบผิวกระจกนั้นจึงไม่สามารถใช้เทคนิค SEM-EDS ได้เนื่องจากหากทิ้งไว้สักครู่หนึ่งผลึกดังกล่าวก็จะละลายกลายเป็นของเหลว ดังนั้นการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกที่ปกคลุมผิวแก้วหลังอบนั้นจึงใช้เทคนิค Atomic absorption spectroscopy (AAS) ซึ่งสามารถใช้สารละลายในการวิเคราะห์ได้ การเตรียมตัวอย่างทำโดยใช้น้ำที่ปราศจากไอออนในการล้างคราบขาวที่เกาะบนผิวแก้วเพื่อนำไปตรวจหาปริมาณของธาตุกลุ่มต่างๆที่ถูกระบายออกมาจากโครงสร้างแก้ว ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.22 ปริมาณของธาตุกลุ่มต่างๆที่ถูกระบายออกมาจากโครงสร้างแก้วโดยเทคนิค AAS

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลึกด้วยเทคนิค AAS พบว่าในทุกสูตร จะมียปริมาณของโซเดียมมากกว่าแคลเซียมมาก เนื่องมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นที่ผิวสูงกว่าแคลเซียมและมีขนาดเล็กกว่าทำให้สามารถแพร่ออกมาที่ผิวเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีขนาดใหญ่กว่าทำให้เกิดการแพร่ได้ยากกว่า [55]

และหากพิจารณาในแง่เทอร์โมไดนามิกส์ โดยยกตัวอย่างผลึกที่เกิดขึ้นตามตารางที่ 4.13 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 800-900 องศาเซลวิน ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ครอบคลุมอุณหภูมิในการอบผิวคือ 843 องศาเซลวิน พบว่าการทำปฏิกิริยาของ Na กับก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) แล้วเกิดเป็นผลึกนั้นใช้ค่าพลังงานอิสระน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับ Ca และ Mg

ตารางที่ 4.13 ค่าพลังงานอิสระในการเกิดผลึกซัลเฟตของธาตุกลุ่ม Modifier [56]

ปฏิกิริยาของธาตุในกลุ่ม Modifier	Δ G (kJ/mol)	
	800 K	900 K
$\text{Na}_2\text{O} + \text{SO}_3(\text{g}) \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4$	-438.52	-424.25
$\text{CaO} + \text{SO}_3(\text{g}) \rightarrow \text{Ca}_2\text{SO}_4$	-254.76	-237.06
$\text{MgO} + \text{SO}_3(\text{g}) \rightarrow \text{Mg}_2\text{SO}_4$	-137.30	-119.37

การเปรียบเทียบผลของการใช้สารตั้งต้นต่างชนิดกัน พบว่าองค์ประกอบของสารละลายที่ได้จากการล้างผลึกที่เกิดขึ้นหลังจากการอบผิวโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ฟอสเฟตมีปริมาณโซเดียม (Na) ในสารละลายมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้สารส้มและซิงค์ซัลเฟต และมีสัดส่วนของโซเดียม (Na) มากขึ้นตามปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ฟอสเฟตที่ใช้เพิ่มขึ้นด้วย สูตร FNH 10 คือกระจกที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ฟอสเฟต 10 กรัมในการอบผิว พบว่ามีความเข้มข้นของโซเดียม (Na) ในสารละลายที่ได้จากการล้างผลึกสูงที่สุดเกือบ 40 ppm แสดงถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยากับโซเดียมในโครงสร้างแก้วได้มากที่สุด ส่วนการใช้สารส้มในการอบผิวหรือกลุ่ม FAI พบว่าปริมาณของโซเดียม (Na) ที่อยู่ในสารละลายที่ได้จากการล้างผลึกหลังการอบผิวมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารส้มที่ใช้ กระจก FAI10 มีการใช้สารส้มปริมาณ 10 กรัม ในการอบผิวเป็นตัวอย่างที่สามารถดึงโซเดียมออกมาได้มากที่สุด มีความเข้มข้นของโซเดียมในสารละลาย 9.63 ppm แต่เมื่อเทียบกับการใช้สารตั้งต้นตัวอื่นแล้วสารส้มสามารถกำจัดธาตุกลุ่มต่างได้น้อยที่สุด การใช้ซิงค์ซัลเฟตในการอบผิวพบว่าได้ผลดีกว่าการใช้สารส้มเล็กน้อย กระจก FZS5 หรือการใช้ซิงค์ซัลเฟตที่ปริมาณ 5 กรัม ให้ผลดีต่อการกำจัดธาตุกลุ่มต่างมากที่สุด สารละลายที่ได้จากการล้างผลึกหลังอบผิวมีความเข้มข้นของโซเดียม 14.73 ppm

ดังนั้นการใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตเป็นแหล่งของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่จะใช้ในกระบวนการอบผิวจะให้ผลดีในการกำจัดธาตุกลุ่มต่างออกได้มากที่สุดในช่วงขั้นตอนของการ Dealkalization เนื่องจากโซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตมีอัตราส่วนขององค์ประกอบของซัลเฟอร์ในผลึกมากกว่าสารตั้งต้นตัวอื่นๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าความสามารถในการกำจัดต่างออกจากโครงสร้างแก้วแปรผันตามปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในระบบ ยกเว้นในกรณีที่ใช้ซิงค์ซัลเฟตในการอบผิวจะไม่แปรผันตามปริมาณ

#### 4.2.2.4 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการละลายน้ำ (Hydrolytic Resistance) ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

การตรวจสอบการละลายของธาตุกลุ่มต่างออกมาจากกระจกที่ผ่านการอบผิวโดยมีน้ำเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส ทำโดยนำสารละลายไปหาปริมาณของกลุ่มต่างคือ Na, Ca และ Mg ด้วยเทคนิค Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) การใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์การทนต่อการละลายน้ำแตกต่างจากแก้วบรรจุภัณฑ์ที่วิเคราะห์โดยการไตเตรทสารละลายที่สกัดธาตุกลุ่มต่างออกมาจากแก้วกับกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เนื่องจากตัวอย่างกระจกที่ผ่านการอบผิวเมื่อนำมาทำการทดลอง พบว่าความเข้มข้นของธาตุกลุ่มต่างที่ละลายออกมามีความแตกต่างกันน้อยมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถจำแนกความแตกต่างของระดับการทนน้ำได้ จึงต้องใช้เทคนิค AAS ในการตรวจสอบความแตกต่างของความเข้มข้น ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.14 และภาพที่ 4.23

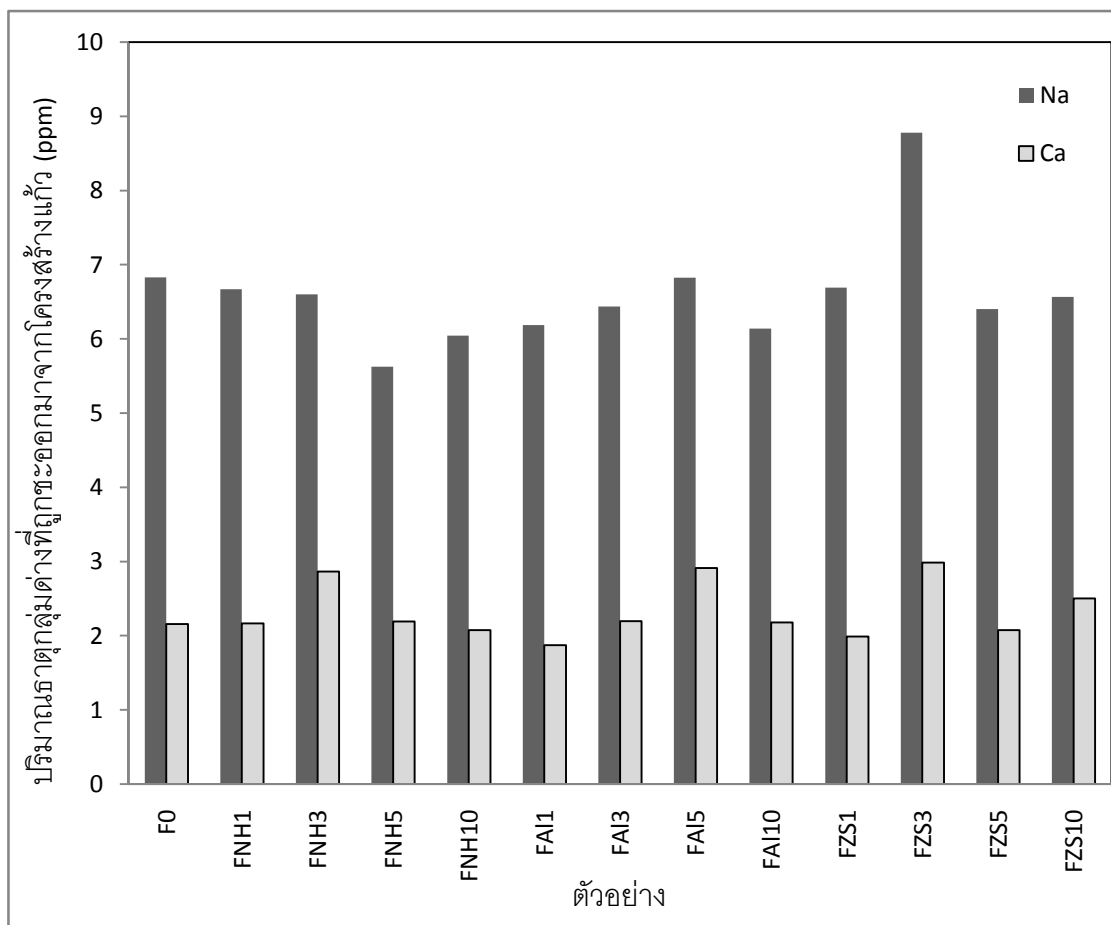
ผลการตรวจสอบพบว่าตัวอย่าง F0 ซึ่งเป็นกระจกที่ไม่ผ่านการอบผิว มีปริมาณความเข้มข้นของธาตุโซเดียมที่ถูกชะออกมาจากโครงสร้างแก้ว 6.8276 ppm ตัวอย่างกระจกกลุ่มที่มีการใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตในการอบผิว พบว่าทุกตัวอย่างที่มีการใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตในปริมาณแตกต่างกัน จะได้กระจกที่มีธาตุกลุ่มต่างถูกชะออกมาน้อยกว่ากระจกที่ไม่ผ่านการอบผิวเล็กน้อย โดยปริมาณการใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟต 5 กรัม ในการอบผิว คือ สูตร FNH 5 จะทำให้โซเดียมถูกชะออกมาน้อยสุดปริมาณที่ตรวจสอบได้คือ 5.6235 ppm

ส่วนตัวอย่างกลุ่มที่มีการใช้สารส้มในการอบผิว พบว่าทุกตัวอย่างที่มีการแปรค่าปริมาณสารส้ม จะได้กระจกหลังอบผิวที่มีธาตุกลุ่มต่างถูกชะออกลดลงเช่นเดียวกัน โดยสูตร FA110 ที่มีการใช้สารส้ม 10 กรัม มีปริมาณโซเดียมถูกชะออกมาน้อยสุดในการอบผิวคือ 6.1388 ppm และการใช้ซิงค์ซัลเฟตในการอบผิวพบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วจะมีปริมาณโซเดียมที่ถูกชะออกมาลดลง กระจก FZ55 ที่มีการใช้ซิงค์ซัลเฟต 5 กรัม ในการอบผิวมีปริมาณโซเดียมถูกชะออกมาน้อยที่สุดคือ 6.4036 ppm จากผลการทดลองยังสรุปไม่ได้แน่ชัดว่าการสารตั้งต้นชนิดใดและปริมาณเท่าไรจะทำให้ได้ผลดีต่อการลดปริมาณธาตุกลุ่มต่างที่ถูกชะออกมาน้อยที่สุด อาจเนื่องมาจาก

เทคนิคการวิเคราะห์วิธีนี้ในขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างมีการทุบกระเจกให้เป็นผงละเอียดตามมาตรฐาน ISO 719 ดังนั้นปริมาณของโซเดียมที่ถูกชะออกมาโดยน้ำไม่ได้มาจากบริเวณของผิวกระเจกที่ผ่านการอบผิวนั้น แต่โซเดียมดังกล่าวถูกชะออกมาจากเนื้อในของกระเจกด้วย ทำให้ผลของการอบผิวกบดบั้งจากปริมาณโซเดียมที่ออกมาจากด้านในของกระเจกที่ไม่ผ่านการอบผิวทำให้มีความแตกต่างของผลการทดลองไม่มากนัก จึงได้ทำการทดลองในส่วนของการ Vickers Hardness และ DSC เพื่อหาข้อมูลและเหตุผลสนับสนุนเพิ่มเติมในการสรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 4.14 ปริมาณของธาตุกลุ่มต่างที่ถูกชะออกมาจากกระเจกก่อนและหลังการอบผิว

ตัวอย่าง	ปริมาณโซเดียม (Na) (ppm)	ปริมาณแคลเซียม (Ca) (ppm)
F0	6.8276	2.1580
FNH1	6.6690	2.1660
FNH3	6.5985	2.8660
FNH5	5.6235	2.1930
FNH10	6.0422	2.0770
FAI1	6.1853	1.8740
FAI3	6.4349	2.1970
FAI5	6.8239	2.9110
FAI10	6.1388	2.1800
FZS1	6.6900	1.9890
FZS3	8.7784	2.9870
FZS5	6.4036	2.0740
FZS10	6.5653	2.5040

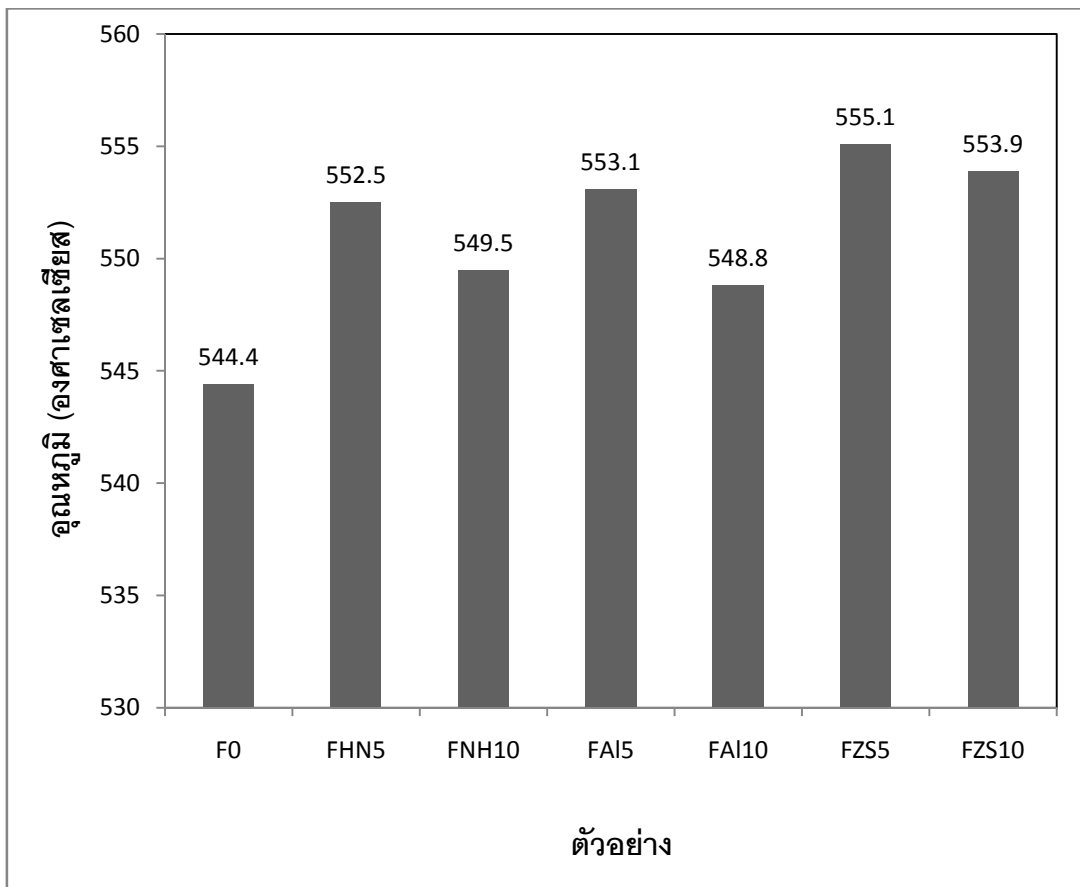


ภาพที่ 4.23 ปริมาณของธาตุกลุ่มต่างๆที่ถูกชะออกมาจากกระจกก่อนและหลังการอบผิวกระจก

#### 4.2.2.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของกระจกด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)

สมบัติทางความร้อนเชิงพลังงานของกระจกก่อนการอบผิวและกระจกหลังอบผิวโดยใช้สารตั้งต้นต่างชนิดกันแสดงในภาพที่ 4.24 และข้อมูลดิบที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก





ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ของกระจกก่อนและหลังอบผิว

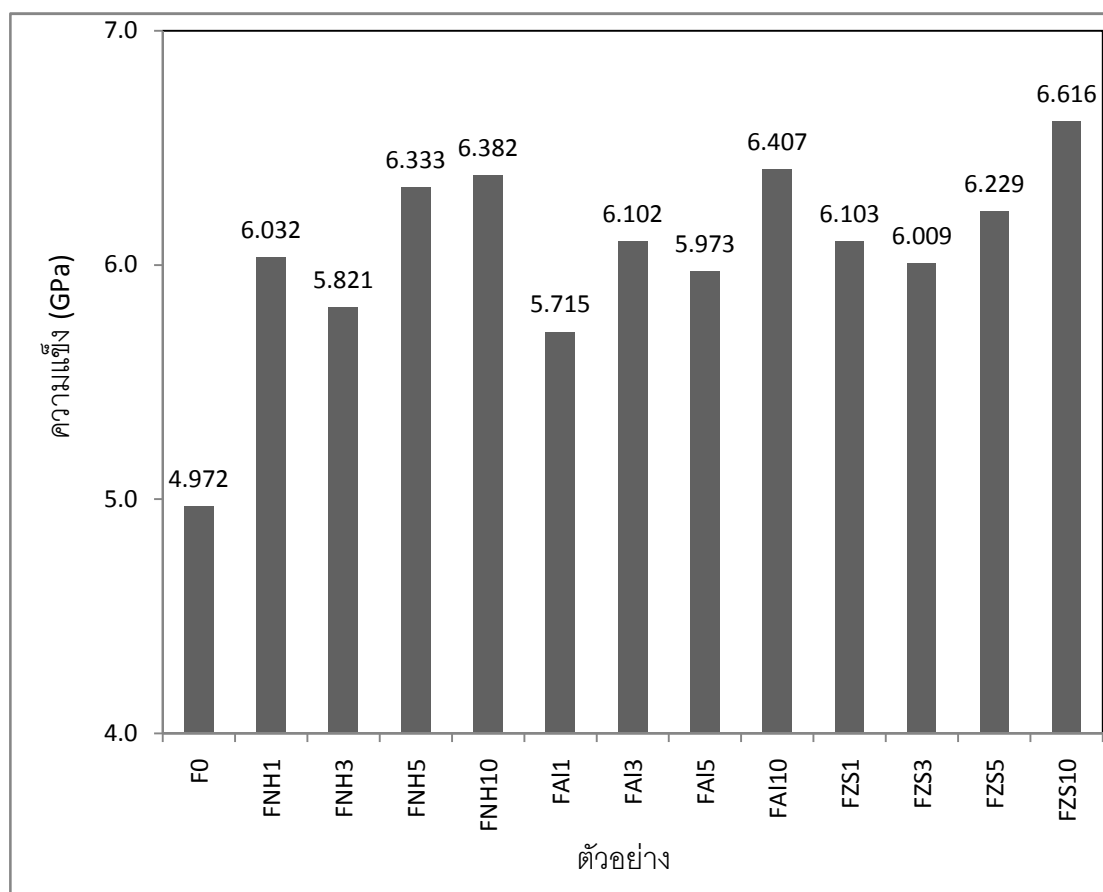
การทดลองหาอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ได้ทำการทดลองเฉพาะกระจกที่มีปริมาณของด่างที่ถูกดึงออกมาในขั้นตอน Dealkalization มากที่สุดกลุ่มละ 2 ตัวอย่าง เปรียบเทียบกับตัวอย่างกระจกที่ไม่อบผิว พบว่ากระจกก่อนอบผิวมีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว 544.4 องศาเซลเซียส และในทุกกลุ่มของสารตั้งต้นพบว่าการใช้สารตั้งต้นที่ปริมาณ 5 กรัม มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วมากกว่าการใช้ปริมาณ 10 กรัม เล็กน้อย ตัวอย่างกระจก FZS5 ที่มีการใช้ซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 5 กรัม มีอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วสูงที่สุด คือ 555.1 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่ากระจกก่อนอบผิวเล็กน้อย

#### 4.2.2.6 ผลการทดสอบความแข็งวิกเกอร์ของผิวกระจก (Vickers Hardness)

การทดสอบความแข็งของผิวแก้วด้วยเทคนิค Vickers Microhardness ทดสอบโดยใช้แรงกด 50 กรัมแรง ( $g_f$ ) ใช้เวลาในการกด 15 วินาที การใช้แรงกดเพื่อทดสอบความแข็งของกระจกที่ผ่านการอบผิวใช้แรงน้อยกว่าที่ใช้ในการทดสอบแก้วบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากความแข็งของกระจกที่อบผิวด้วยสารตั้งต้นชนิดต่างกันมีความแข็งต่างกันไม่มาก เนื่องจากไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่อยู่ภายในมีเพียงชั้นผิวนอกที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น การใช้แรงกดน้อยลงทำให้

หวัลดลงลึกไปจากผิวแก้วไม่มากนักจึงทำให้สามารถศึกษาผลของการอบผิวได้ดีกว่า ผลการทดสอบความแข็งวิกเกอร์แสดงภาพที่ 4.25 และข้อมูลดิบแสดงในภาคผนวก จ

ผลการทดสอบค่าความแข็งพบว่าตัวอย่างกระจกที่ไม่ผ่านการอบผิว (F0) มีค่าความแข็งน้อยที่สุดคือ 4.972 GPa และกระจกที่อบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากสารตั้งต้นทุกชนิดมีค่าความแข็งสูงขึ้น ในตัวอย่างที่มีการใช้โซเดียมไฮโดรเจนซัลเฟตและสารส้มที่ปริมาณ 10 กรัม ในการอบผิว คือ FNH10 และ FAI10 พบว่ามีความแข็งสูงที่สุดในการใช้สารตั้งต้นแต่ละกลุ่ม และการใช้ซิงค์ซัลเฟตที่ปริมาณ 10 กรัม (FZS10) มีค่าความแข็งสูงที่สุดเมื่อเทียบกับทุกๆ ตัวอย่าง คือ มีค่าความแข็ง 6.616 GPa แต่โดยรวมแล้วทั้ง FNH10, FAI10 และ FZS10 ก็มีค่าความแข็งที่ไม่แตกต่างกันมากนัก



ภาพที่ 4.25 ค่าความแข็งของกระจกก่อนอบผิวและหลังอบผิวด้วยสารตั้งต้นชนิดต่างกัน

การที่กระจกหลังการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์มีความแข็งเพิ่มมากขึ้นเกิดจากกระจกดังกล่าวได้ผ่านกระบวนการกำจัดด่างออก (Dealkalization) ทำให้ลดปริมาณของธาตุกลุ่มด่างที่มีพันธะไม่แข็งแรงมากหลุดออกมา และที่อุณหภูมิ 570 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงสภาพแก้ว ( $T_g$ ) ของแก้วโซดาไลม์ทั่วไป อะตอมในโครงสร้าแก้วสามารถ

เคลื่อนที่ได้เล็กน้อยทำให้เกิดจัดเรียงตัวเป็นบริเวณที่มีซิลิกาสูง (Silica rich area) ทำให้กระจกหลังการอบมีความแข็งที่ผิวสูงขึ้น และหากกระจกดังกล่าวถูกเก็บอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสูง กระจกนั้นจะเกิดฝ้าได้ช้าลงเนื่องจากโซเดียมที่อยู่ในบริเวณผิวแก้วมีความเข้มข้นลดลง และในกรณีที่โซเดียมไอออนจากภายในเนื้อแก้วแพร่ออกมาก็ต้องอาศัยระยะเวลาเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีระยะทางในการแพร่ไกลมากขึ้น Senturkv และคณะ [57] พบว่าหลังจากการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ผิวแก้วจะมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องมาจากการจัดเรียงโครงสร้างที่มี Si-O เชื่อมต่อกันทำให้มีปริมาณของ Bringing Oxygen เพิ่มขึ้นทำให้โซเดียมที่จะแพร่ผ่านออกไปที่ผิวเป็นไปได้ยากขึ้น ทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดฝ้าลดลง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยและพัฒนาแก้วโซดาไลม์ทั้งชนิดเป็นบรรจุภัณฑ์และกระจกให้มีความสามารถในการต้านทานต่อสภาพอากาศมากขึ้น โดยมีการปรับปรุงด้วยการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และซิงค์ออกไซด์ และการปรับผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ข้อสรุปดังนี้

1. การปรับปรุงแก้วโซดาไลม์ที่มีสูตร  $72.49 \text{ SiO}_2 - 13.51 \text{ Na}_2\text{O} - 1.36 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 12.48 \text{ CaO}$  โดยการเติมตัวเติมที่เป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ( $\text{ZrO}_2$ ) โดยแทนที่ในส่วนของอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 1.00 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แก้วที่มีความต้านทานต่อน้ำมากขึ้น ความแข็งแรงที่ผิวมากขึ้นใกล้เคียงกันโดยมีสมบัติทางแสงและสีไม่แตกต่างไปจากสูตรแก้วเดิมที่ไม่มีการเติมตัวเติมดังกล่าว

2. การปรับปรุงแก้วโซดาไลม์โดยการเติมตัวเติมที่เป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ ( $\text{ZrO}_2$ ) โดยแทนที่ในส่วนของอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 1.00 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ได้แก้วที่มีความสามารถต้านทานต่อสภาพอากาศได้ดีขึ้น กล่าวคือมีการเกิดฝ้าที่สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนเมื่อเก็บในที่ที่มีสภาวะเหมาะสมกับการเกิดฝ้าไปแล้วเป็นเวลา 21 วัน ซึ่งเป็นการยืดระยะเวลาการเกิดฝ้าเมื่อเทียบกับแก้วสูตรเดิมที่เกิดฝ้ามากที่เวลา 13 วัน

3. การอบผิวแก้วด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถกำจัดต่างออกจากผิวแก้วดี โดยปริมาณต่างที่ถูกกำจัดออกจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในการอบผิวแก้ว

4. การอบผิวด้วยสารตั้งต้นที่เป็นแหล่งของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่างชนิดกันให้ผลดีต่อการเพิ่มความต้านทานต่อน้ำและความแข็งแรงของกระจกได้ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีผลดีกว่าการเติมวัตถุดิบตัวเติมอีกด้วย การใช้สารตั้งต้นที่ให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถเลือกตัวที่มีต้นทุนต่ำที่สุดได้เพราะให้ผลไม่ต่างกันมากนัก ซึ่งในที่นี้คือ สารส้มมีต้นทุนต่ำที่สุด และหลังจากการอบผิว

พบว่าแก้วที่ได้มีความใสและสีไม่ต่างไปจากเดิม สามารถคงคุณสมบัติทางแสงไว้ได้เหมือนก่อนการอบผิว

5. การวิเคราะห์ผิวแก้วฝ้าด้วยเทคนิค PEEM พบว่าการเคลือบทองเพื่อทำให้ตัวอย่างแก้วนำไฟฟ้าให้มีความหนาประมาณ 11 นาโนเมตร ทำให้ตัวอย่างแก้วที่เกิดฝ้าสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิค PEEM ได้และจากการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบของผลึกฝ้าไม่มีธาตุซิลิคอนอยู่ ทำให้สรุปได้ว่าการวิเคราะห์ดังกล่าวมีการวิเคราะห์ที่ระดับความลึกน้อยกว่าความหนาของผลึกที่เคลือบอยู่ ไม่ลงลึกลงไปถึงเนื้อแก้วจึงไม่พบซิลิคอนที่เป็นองค์ประกอบหลักของแก้ว และเทคนิคนี้มีความละเอียดสูงจึงสามารถใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบการเกิดฝ้าบนแก้วแม้จะเกิดในปริมาณที่น้อยมากหรือในช่วงเริ่มต้นของการเกิดฝ้าได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาความสามารถในการกำจัดต่างของสารตั้งต้นที่ต่างชนิดกัน ด้วยการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีที่ผิวของกระจกหลังจากผ่านการอบผิวด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว
2. จากการทดลองกระจกที่ผ่านการอบผิวให้ผลดีในเรื่องของการละลายน้ำ และสมบัติด้านความแข็งที่ผิวไม่ต่างกันนัก เพื่อเป็นการสนับสนุนผลการทดลองเพิ่มขึ้นควรนำกระจกที่ได้ไปเร่งสภาวะในสภาวะจำลองที่เหมาะสมต่อการเกิดฝ้าเพื่อตรวจสอบปริมาณของการเกิดฝ้าเปรียบเทียบกัน
3. นำตัวอย่างที่ได้หลังจากการเร่งให้เกิดฝ้าแล้วไปตรวจสอบด้วยเทคนิค PEEM เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมีของผลึกโดยเฉพาะชนิดและปริมาณของธาตุกลุ่มต่างๆที่หลุดออกมาจากโครงสร้างแก้วและเกิดฝ้า ตรวจสอบเลขโคออดิเนชันของธาตุกลุ่มต่างๆเพื่อเป็นการตรวจสอบโครงสร้างของผลึกฝ้าที่เกิดขึ้น
4. เพิ่มวิธีในการปรับผิวแก้วเช่นการเปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการอบผิวเป็นจำพวกสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ เคลือบที่ผิว เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่มาเกาะที่ผิว ความชอบน้ำของผิว และความสามารถในการต้านทานการเกิดฝ้ากับการใช้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์อบผิวแก้ว

## รายการอ้างอิง

- [1] Bray, C., Dictionary of glass: materials and techniques, University of Pennsylvania Press, 2001, 256.
- [2] สุวิน บุศราคำ, เคมีของแก้ว. วิทยาศาสตร์ มข. 20-23 (2537)
- [3] NDT Resource center, Solid State Structure[Online]. 2001. Available from: <http://www.ndted.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Structure/solidstate.htm> [2011, October 15]
- [4] Spiller, M. S., Glass and glaze[Online]. Available from: [http://www.doctorspiller.com/ceramics\\_2.htm](http://www.doctorspiller.com/ceramics_2.htm) [2011, August 8]
- [5] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. คู่มือการใช้แก้วเพื่อการหีบห่อ. กรุงเทพมหานคร: ม.ป.ท., 2546.
- [6] ภาวณี ถนอมเกียรติ และคณะ, การบรรจุและเก็บรักษาเภสัชภัณฑ์. กรุงเทพมหานคร: ม.ป.ท., 2546.
- [7] กรมทรัพยากรธรณี. เซรามิกและแก้วของไทย: วัตถุดิบและแนวทางการพัฒนา. กรุงเทพมหานคร: 2543.
- [8] พรรณชลัท สุริโยธิน. วัสดุและการก่อสร้าง: กระจก. 144, กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [9] AGE group, Production of float glass, [Online]. Available from: [http://www.agc-group.com/en/about/flatglass\\_03.html](http://www.agc-group.com/en/about/flatglass_03.html) [2011, October 8]
- [10] Varshneya, A. K. Fundamentals of inorganic glasses. Boston, London: Academic Press Inc. Harcourt Brace&Company, 1993.
- [11] วิรัช มณีสาร, สถิติองค์ประกอบอตุณิยมวิทยาของภาคต่างๆในประเทศไทย คาบ 30 ปี (พ.ศ. 2504-2533): กรมอตุณิยมวิทยา, 2538.
- [12] Trendall, A. F. Technique for optical identification of iron-bearing dolomite: a modification and an evaluation The Canadian Mineralogist 8 (1965): 253-255.
- [13] Beran A, Z. J. Refinement and comparison of the crystal structures of a dolomite and of an Fe-rich ankerite. Tschermaks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen 24 (1997): 279-286.

- [14] Zachariasen, W. H. The atomic arrangement in glass. Journal of the American Chemical Society 54 (1932): 3841-3851.
- [15] Sun, K.-H. Fundamental condition of glass formation. Journal of the American Ceramic Society 30 (1947): 277-281.
- [16] Kingery, W. D., Bowen, H.K. and Uhlmann. Introduction to ceramics. 1989.
- [17] Mackenzie, R. C. Differential thermal analysis. London: Academic Press, 1970.
- [18] Kassen, H. Spectrophotometer for measuring colour and colour differences in the production[Online]. Available from: [mhttp://www.productpilot.com/en/suppliers/harrer-kassen-gmbh/product/mf\\_bat\\_0000339124/en](http://www.productpilot.com/en/suppliers/harrer-kassen-gmbh/product/mf_bat_0000339124/en) [2 June 2011]
- [19] Romich, H., Evaluation of protective glazing system. e-PRESERVATION Science 1 (2004): 8.
- [20] Chitwatcharakomol, T. Causes and prevention of soda bloom in glass industry. Material Science, Bangkok, Chulalongkorn University, 1996.
- [21] Walters, H. V. and Adams, P. B. Effects of humidity on the weathering of glass. Journal of Non-Crystalline Solids 19 (1975): 183-199.
- [22] สำนักจัดการคุณภาพอากาศและเสียง, คุณภาพอากาศบริเวณกรมประชาสัมพันธ์ เขตพญาไท. กรมควบคุมมลพิษ, กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ, 2554.
- [23] Sinton, C. W. and LaCourse, W. C. Experimental survey of the chemical durability of commercial soda-lime-silicate glasses. Materials Research Bulletin 36 (2001): 2471-2479.
- [24] Vogel, W. Glass Chemistry. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 1994.
- [25] Scholl, A. Applications of photoemission electron microscopy (PEEM) in magnetism research. Current Opinion in Solid State and Materials Science 7 (2003):
- [26] J. Stohr, S. A. X-ray spectro-microscopy of complex materials and surfaces. IBM Journal of Research and Development 44 (2000):
- [27] Tournié, A., Ricciardi, P. and Colomban, P. Glass corrosion mechanisms: A multiscale analysis. Solid State Ionics 179 (2008): 2142-2154.
- [28] L.L, H. Characterization of glass corrosion and durability. Journal of Non-Crystalline Solids 19 (1975): 27-39.

- [29] Paul, A. Chemistry of Glasses. London: Chapman and Hall, London, 1990.
- [30] Gorokhovskii, V. A. and Shcherbakova, V. P. Sulfur dioxide treatment as a possible means of improving window glass technology. Glass and Ceramics 27 (1970): 134-137.
- [31] Hans, B. Advanced surface analysis of silicate glasses, oxides and other insulating materials: a review. Journal of Non-Crystalline Solids 209 (1997): 1-18.
- [32] Glass -- Hydrolytic resistance of glass grains at 98 degrees C -- Method of test and classification. 1985.
- [33] KORANYI, G. Surface properties of silicate glasses. BUdapest: 1962.
- [34] Marie Helene Chopinet, M. V., R. Falcone, P. Lehuédé, M. Vallotto, Michele Nardone, A. Sodo. Soda-Lime-Silica Glass Containers: Chemical Durability and Weathering Products. Advanced Materials Research 39-40 (2008):
- [35] Helmut, F. Durability and corrosion of silicate glass surfaces. Journal of Non-Crystalline Solids 42 (1980): 529-534.
- [36] Abo-Naf, S. M., El Batal, F. H. and Azooz, M. A. Characterization of some glasses in the system  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{RO}$  by infrared spectroscopy. Materials Chemistry and Physics 77 (2003): 846-852.
- [37] Wang, M., Cheng, J., Liu, Q., Tian, P. and Li, M. The effect of light rare earths on the chemical durability and weathering of  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$  glasses. Journal of Nuclear Materials 400 (2010): 107-111.
- [38] Pyare, R., Srivastava, M. R. C. and Nath, P. Durability of  $\text{Na}^{2+} \cdot \text{O} \cdot \text{RO} \cdot \text{SiO}_2$  glasses in water. Journal of Materials Science 17 (1982): 2932-2938.
- [39] Hollowat, D. G. The physical properties of glass. London: 1973.
- [40] Bourhis, E. L. Glass: Mechanical and Technology. 2006.
- [41] H.DOREMUS, R. Glass Science. 1994.
- [42] Hand, R. J. and Tadjiev, D. R. Mechanical properties of silicate glasses as a function of composition. Journal of Non-Crystalline Solids 356 (2010): 2417-2423.



- [43] Tadjiev, D. R. and Hand, R. J. Inter-relationships between composition and near surface mechanical properties of silicate glasses. Journal of Non-Crystalline Solids 354 (2008): 5108-5109.
- [44] Orowan, E. Fracture and strength of solids. Reports on Progress in Physics 12 (1949): 185.
- [45] Sugarman, B. Strength of glass (a review). Journal of Materials Science 2 (1967): 275-283.
- [46] G.E. Brown, G. V. G. a. P. H. R. The nature and the variation in length of the Si-O and Al-O bonds in framework silicates. The american mineralogist 54 (1969):
- [47] Kolluru, P. V., Green, D. J., Pantano, C. G. and Muhlstein, C. L. Effects of Surface Chemistry on the Nanomechanical Properties of Commercial Float Glass. Journal of the American Ceramic Society 93 (2010): 838-847.
- [48] Yashchishin, I. I., Shevchenko, V. V., Grabauskas, I. Y. and Chesnulis, V. I. Increased efficiency of the chemical treatment of flat glass. Glass and Ceramics 40 (1983): 316-318.
- [49] David E. Clark, B. K. Z. Corrosion of glass, ceramics, and ceramic superconductors: principles, testing, characterization, and applications. 1992.
- [50] Jon Frederick , K. D. Glass fiber composition with improved biosolubilit. 2000.
- [51] Xianfeng, M., Qitu, Z., Chunhua, L. and Zhongzi, X. Study on Chemical Durability of BAP System Glass Doped with Rare Earths. Journal of Rare Earths 25, Supplement 1 (2007): 125-128.
- [52] Smedskjaer, M. M. and Yue, Y. Z. Inward cationic diffusion in glass. Journal of Non-Crystalline Solids 355 (2009): 908-912.
- [53] Trocellier, P., Djanarthany, S., Chêne, J., Haddi, A., Brass, A. M., Poissonnet, S. and Farges, F. Chemical durability of alkali-borosilicate glasses studied by analytical SEM, IBA, isotopic-tracing and SIMS. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 240 (2005): 337-344.

- [54] Carmona, N., Villegas, M. A. and Fernández Navarro, J. M. Corrosion behaviour of R<sub>2</sub>O–CaO–SiO<sub>2</sub> glasses submitted to accelerated weathering. Journal of the European Ceramic Society 25 (2005): 903-910.
- [55] Cailleteau, C., Angeli, F., Devreux, F., Gin, S., Jestin, J., Jollivet, P. and Spalla, O. Insight into silicate-glass corrosion mechanisms. Nat Mater 7 (2008): 978-983.
- [56] Stern, K. H. Sulfates. <sup>1</sup> High Temperature Properties and Thermal Decomposition of Inorganic Salts with Oxyanions: CRC Press, 2000.
- [57] Senturk, U., Varner, J. R. and LaCourse, W. C. Structure-hardness relation for high-temperature SO<sub>2</sub>-dealcalized float glass. Journal of Non-Crystalline Solids 222 (1997): 160-166.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

Department of Commerce  
 Elliot L. Richardson,  
 Secretary  
 National Bureau of Standards  
 Robert Ambler, Acting Director

**National Bureau of Standards  
 Certificate  
 Standard Reference Materials  
 Chemical Resistance (Durability) of Glass  
 622 - Soda-Lime-Silica Glass  
 623 - Borosilicate Glass**

W. Capps and M. Cellarosi

These Standard Reference Materials are certified and designed to check test methods and to calibrate equipment for the determination of the Resistance of Glass Containers to Chemical Attack.

<u>SRM</u>	<u>Type</u>	<u>ml of N/50 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></u>
622	Soda-Lime-Silica Glass	7.67 ± 0.38
623	Borosilicate Glass	0.34 ± 0.05

These values represent the volume of fiftieth-normal sulfuric acid used to titrate to the methyl-red end point the alkaline extract from a crushed sample of glass after exposure to high-purity water [1] at 121°C (ASTM C225-73, Method P-W, with Mortar Crushing option [2]). This method of test is also specified in the U.S. Pharmacopeia [3] and in the National Formulary [4].

The indicated uncertainties are the 95 percent tolerance limits for coverage of 95 percent of measured values of these lots of glass samples. An example of the use of the statistical tolerance limit is given in NBS Monograph 148 (pp. 13-14). In brief, if all the samples were measured, 95 percent of the measured values would fall within the indicated tolerance limits 95% of the time.

The technical and support aspects involved in the preparation, certification, and issuance of these Standard Reference Materials were coordinated through the Office of Standard Reference Materials by R. E. Michaelis and C. L. Stanley.

Washington, D.C. 20234  
 March 19, 1976

J. Paul Cali, Chief  
 Office of Standard Reference Materials

(over)

## SUPPLEMENTARY INFORMATION

These Standard Reference Materials are issued as cullet weighing about 2.2 kg each. The materials were prepared and furnished to NBS by Corning Glass Works, Corning, New York, and Owens-Illinois, Inc., Toledo, Ohio. Direction and coordination of the ASTM interlab comparison was given by Frank Bacon, Chairman, ASTM Subcommittee C-14.03 on Chemical Properties of Glass. The laboratories that cooperated in these measurements are:

Brockway Glass Co., Brockway, Pennsylvania  
 Corning Glass Works, Corning, New York  
 Eli Lilly Co., Indianapolis, Indiana  
 Emhart Corp., Hartford, Connecticut  
 Johns-Manville, Toledo, Ohio  
 Kerr Glass Corp., Lancaster, Pennsylvania  
 National Bureau of Standards, Washington, D.C.  
 Owens-Illinois, Inc., Kimble Division, Vineland, New Jersey  
 Owens-Illinois, Inc., Toledo, Ohio

Statistical analysis of the data leading to certification was performed by H. H. Ku, National Bureau of Standards.

The nominal compositions (wt. %) of these SRM's are offered for information only.

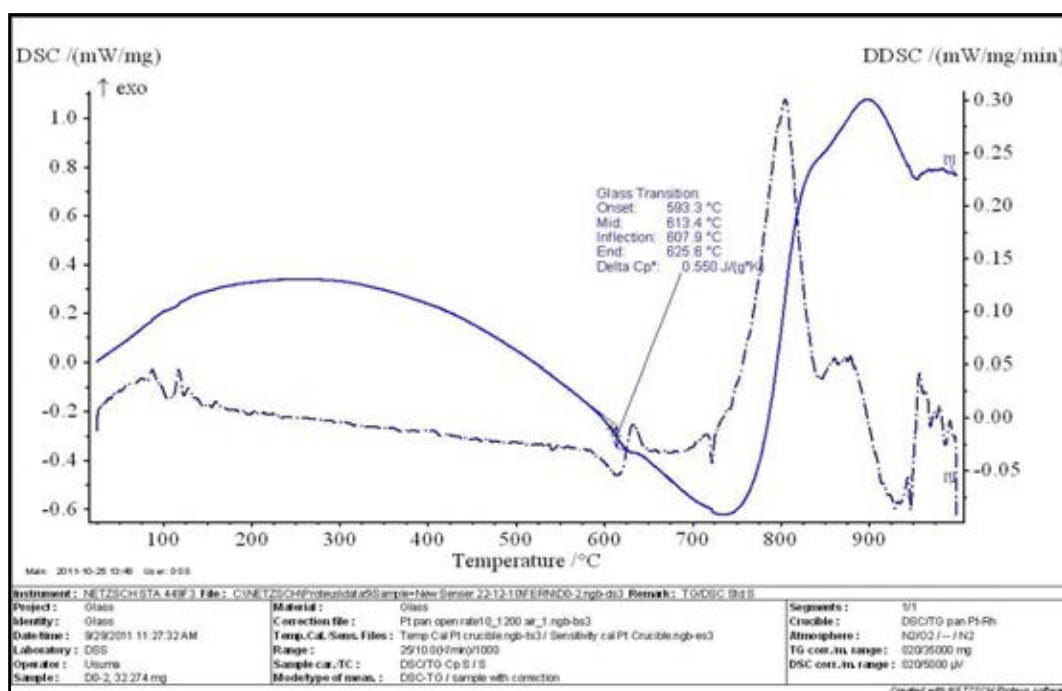
SRM 622		SRM 623	
Soda-Lime-Silica Glass		Borosilicate Glass	
SiO <sub>2</sub>	71.7	SiO <sub>2</sub>	73
CaO	11.5	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.7
Na <sub>2</sub> O	14.0	Na <sub>2</sub> O	6.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.3
K <sub>2</sub> O	0.2	BaO	2.2
MgO	0.5	K <sub>2</sub> O	0.6
SO <sub>3</sub>	0.2	CaO	0.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04		

## REFERENCES

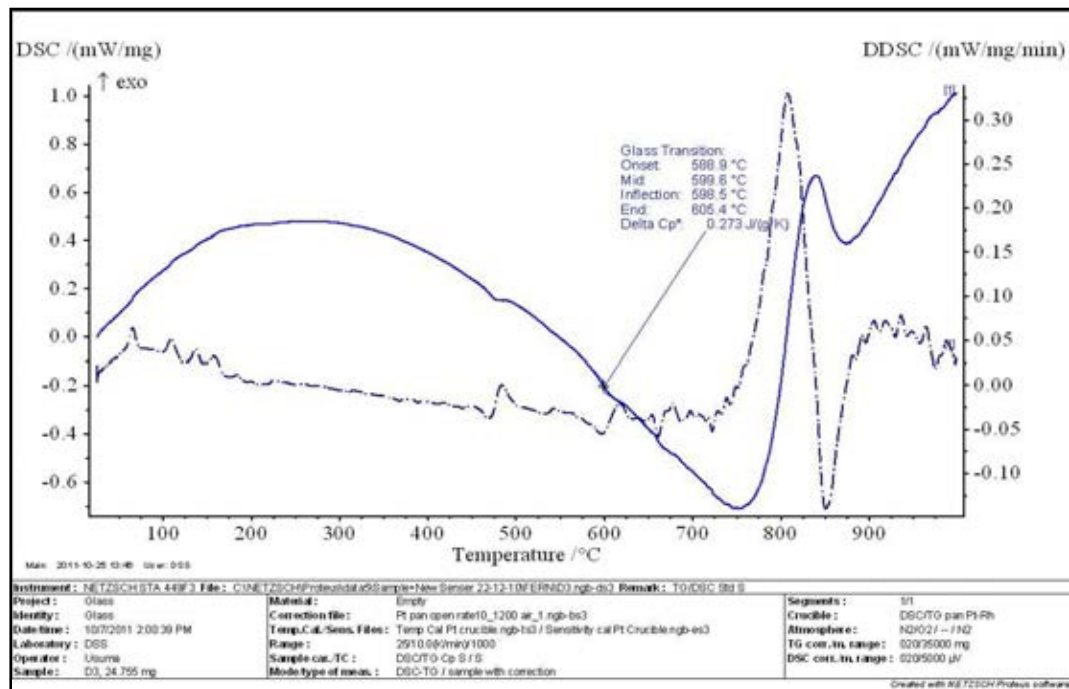
- [1] ASTM Method of Test, D1193-74, for Reagent Water, 1974 Book of ASTM Standards, Part 31.
- [2] ASTM Method of Test, C225-73, for Resistance of Glass Containers to Chemical Attack, 1974 Book of ASTM Standards, Part 17.
- [3] The United States Pharmacopeia, 19th Revision, Mack Printing Co., Easton, Pa., 1975, page 643.
- [4] The National Formulary, 14th Edition, Mack Printing Co., Easton, Pa., 1975, page 878.

## ภาคผนวก ข

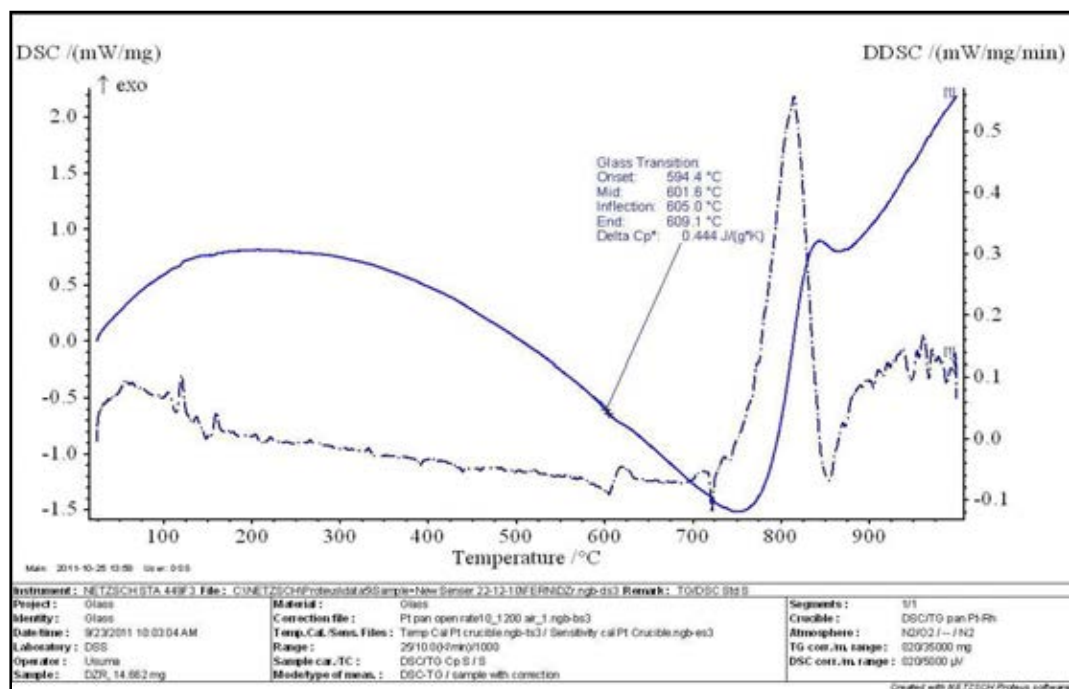
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของตัวอย่าง D0



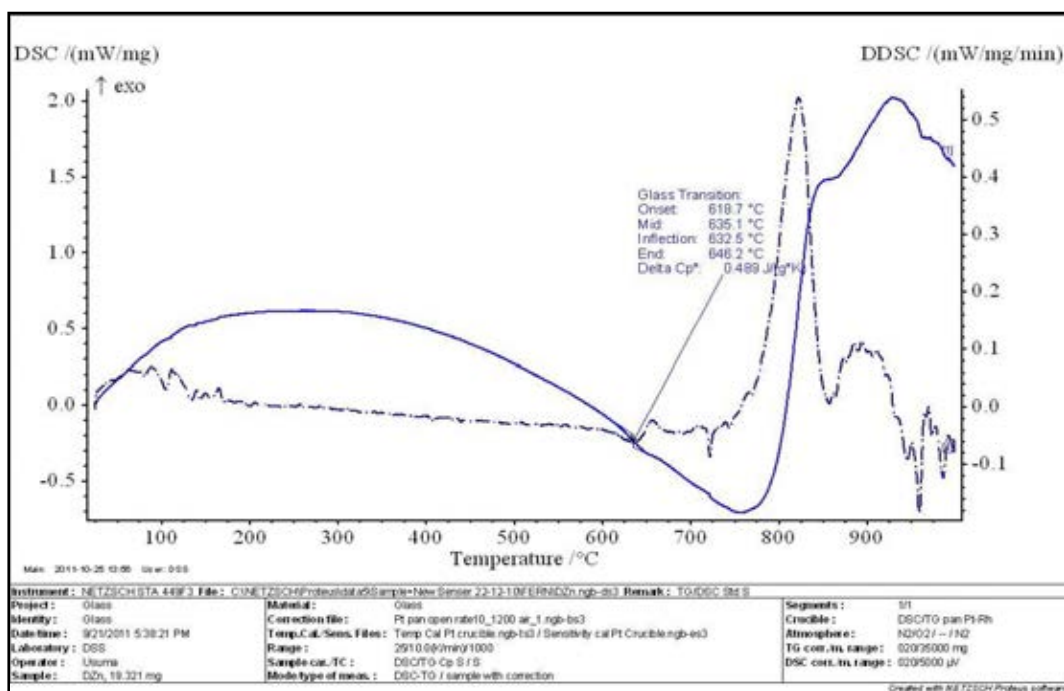
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของตัวอย่าง D3



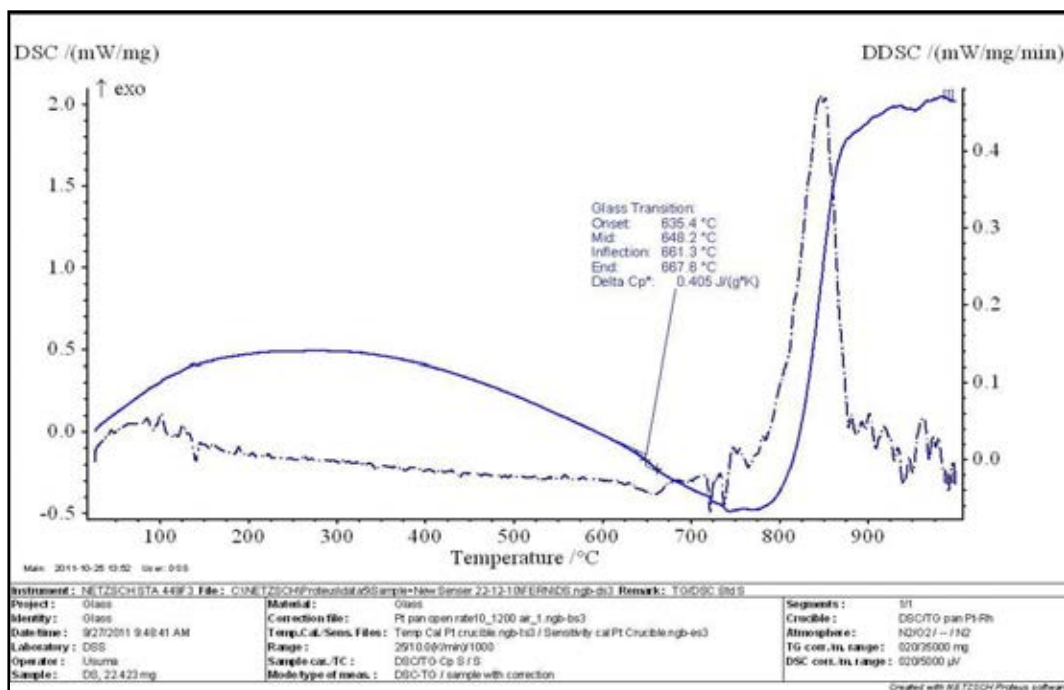
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของตัวอย่าง DZr3



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของตัวอย่าง DZn2

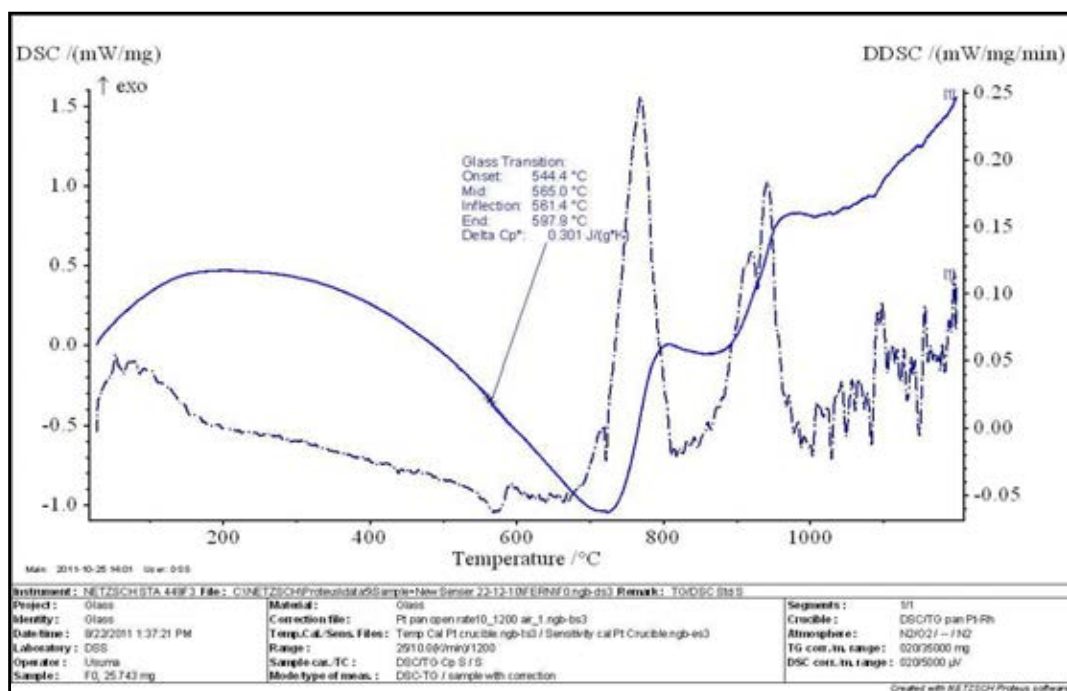


ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของตัวอย่าง DS

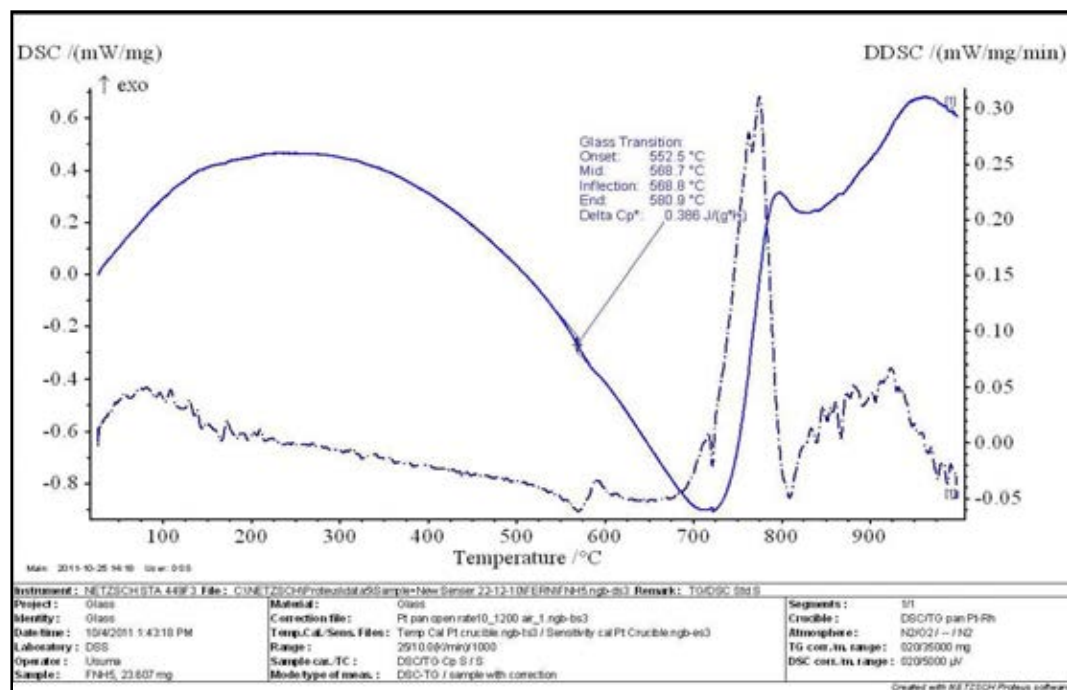


ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSC ของตัวอย่าง FO

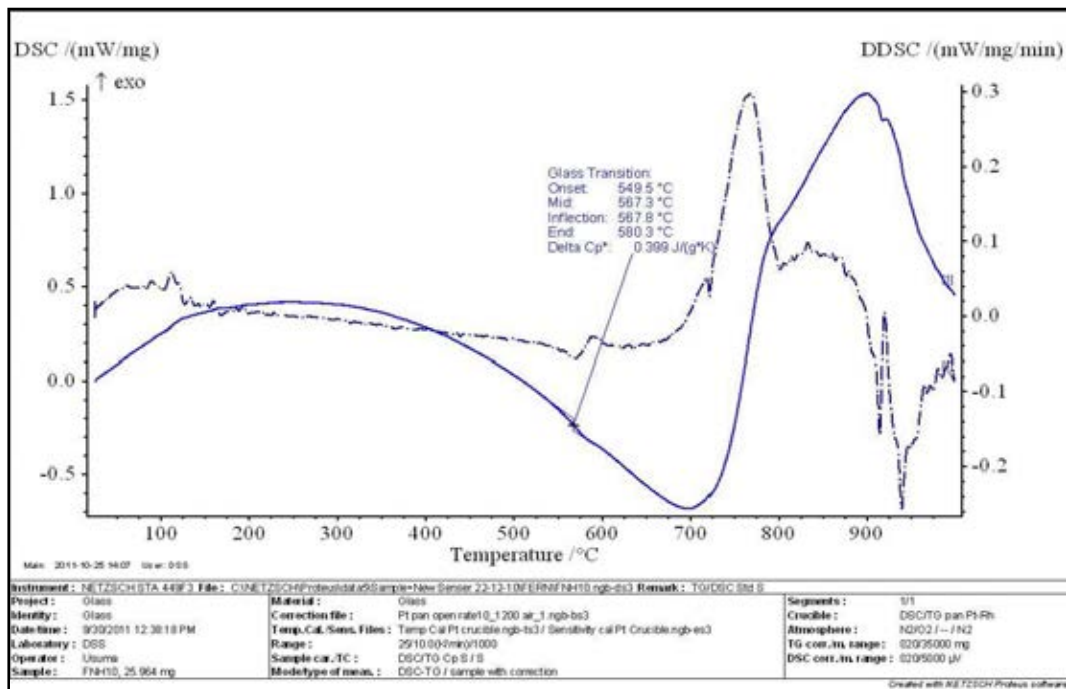




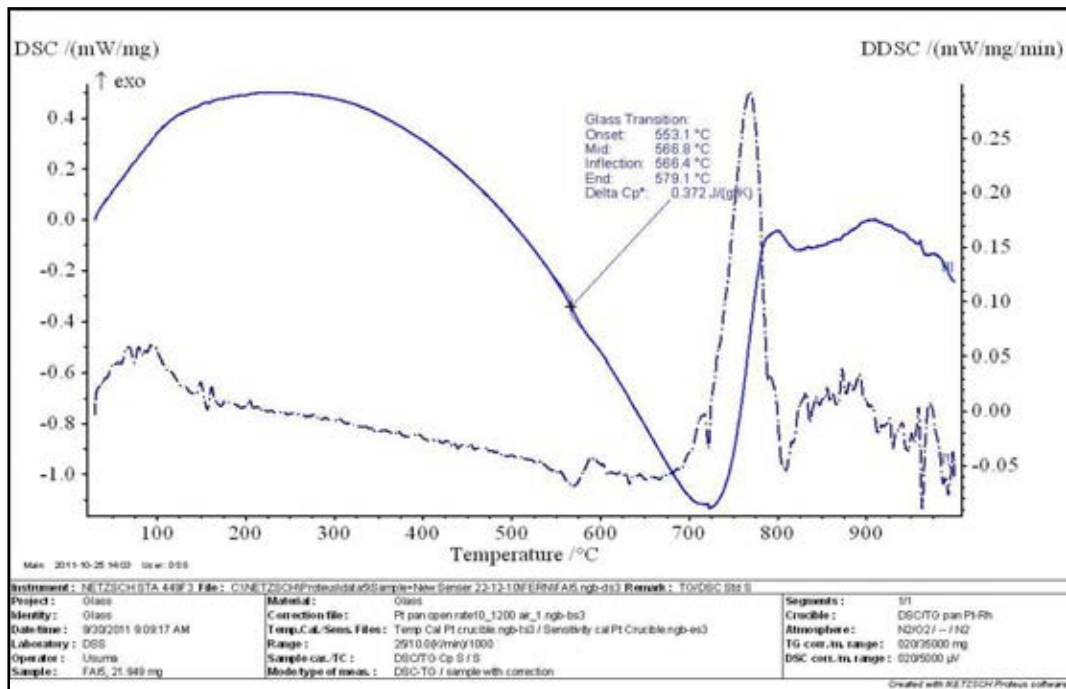
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSCของตัวอย่าง FNH5



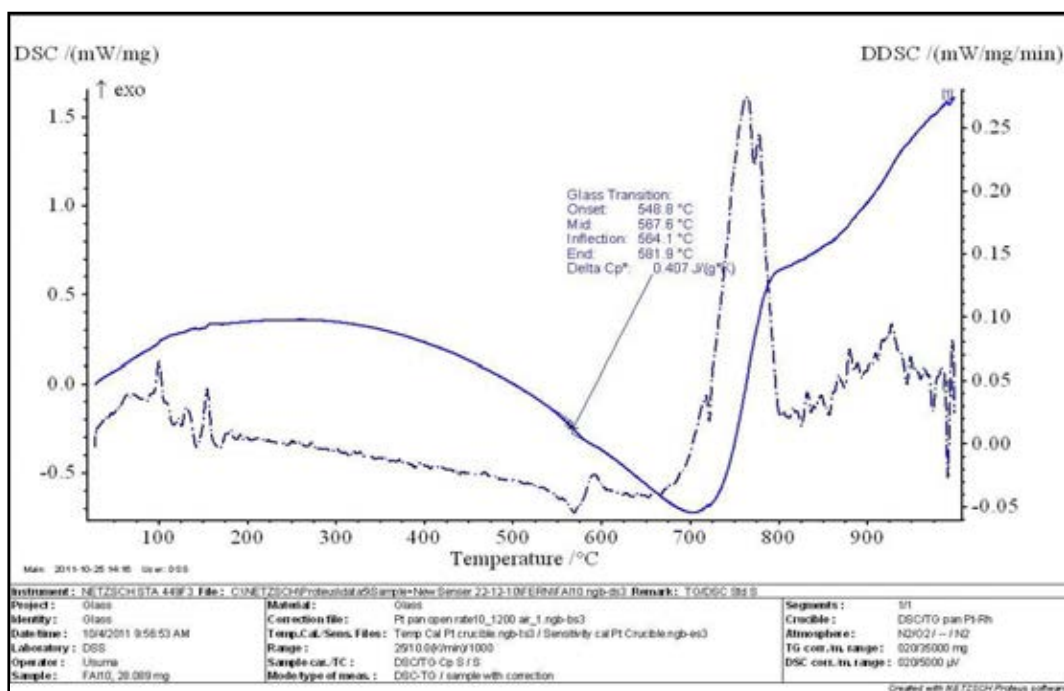
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSCของตัวอย่าง FNH10



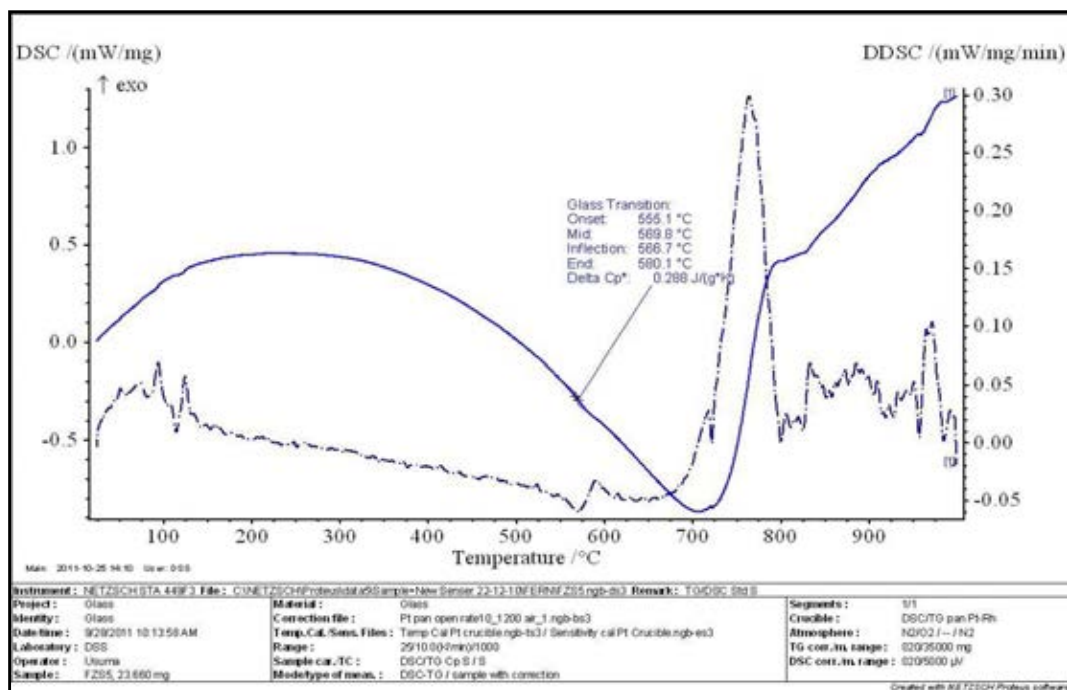
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSCของตัวอย่าง FAI5



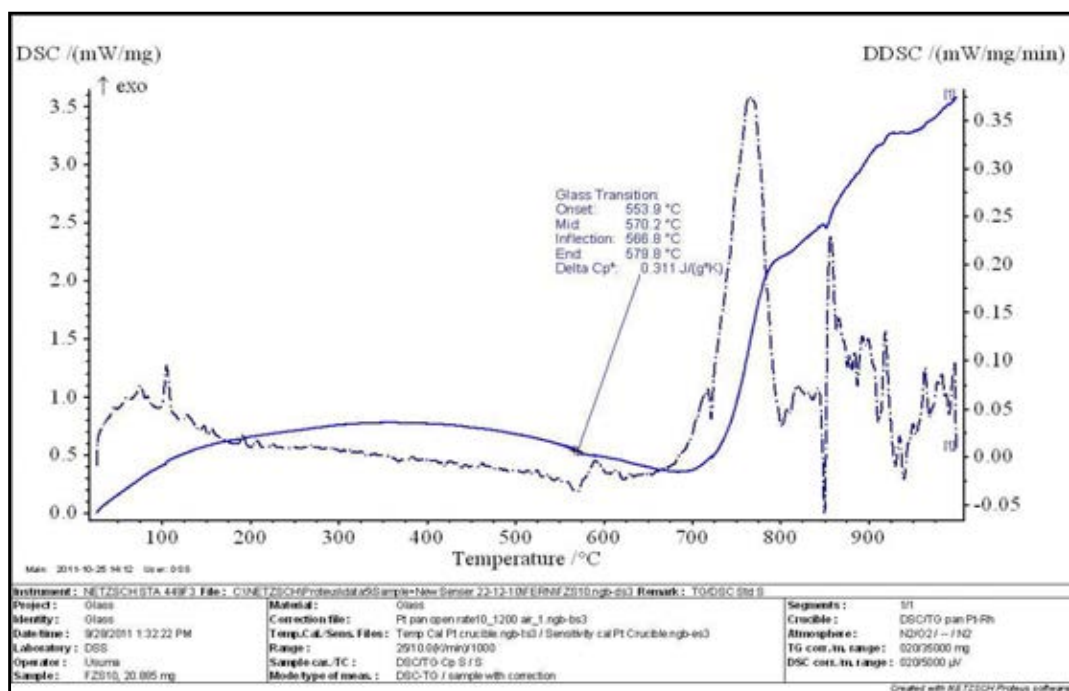
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSCของตัวอย่าง FAI10



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSCของตัวอย่าง FZS5



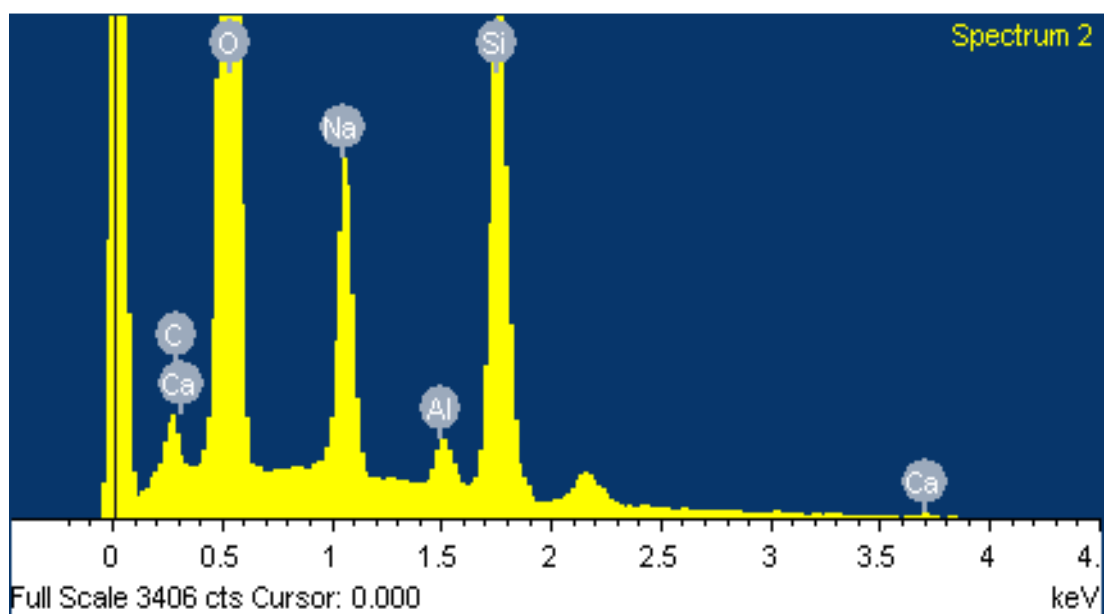
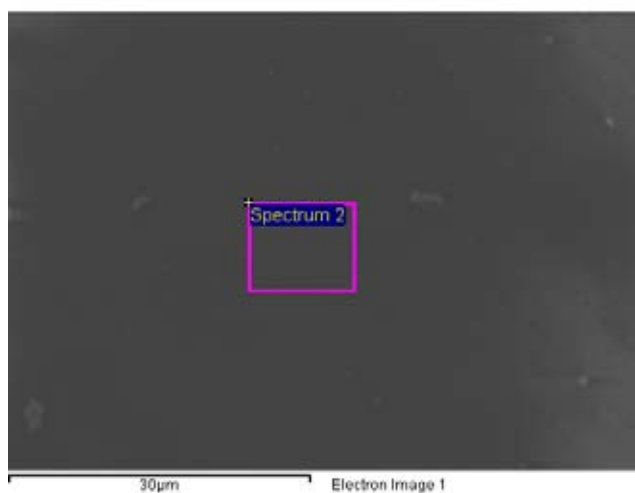
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค DSCของตัวอย่าง FZS10



## ภาคผนวก ค

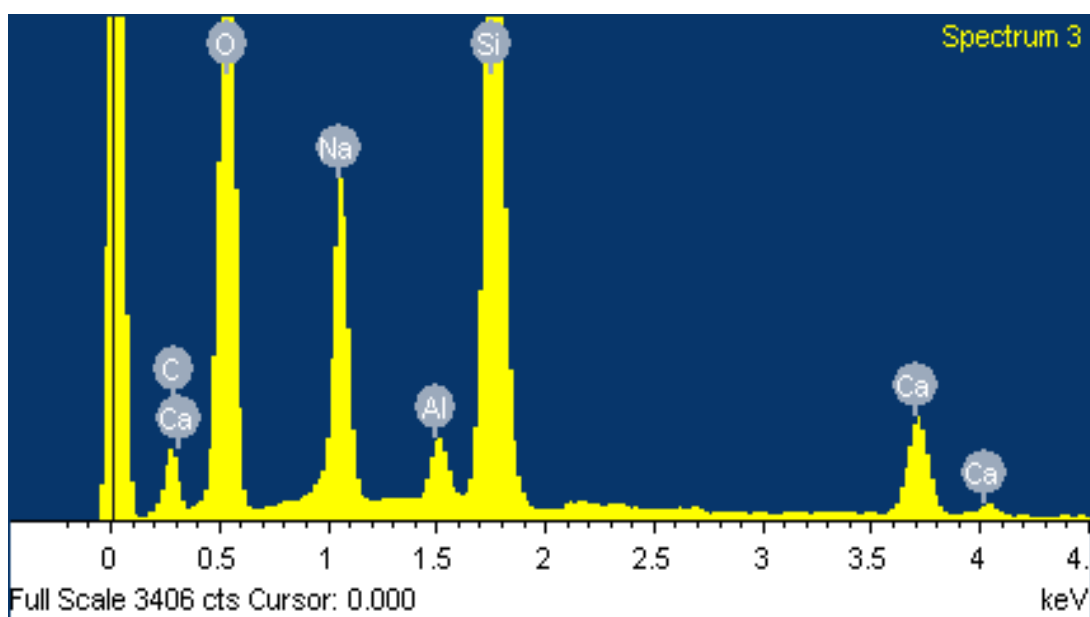
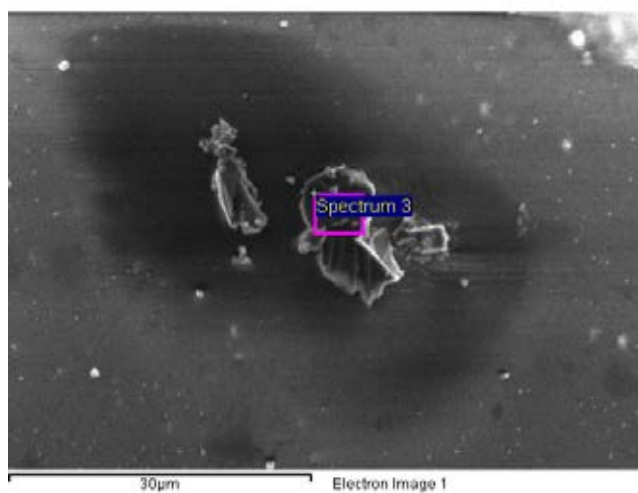
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของตัวอย่าง D0 บริเวณที่ไม่เกิดฝ้า

Element	Weight%	Atomic%
O K	79.21	85.91
Na K	9.51	8.35
Al K	0.95	0.70
Si K	10.16	7.30
Ca K	0.09	0.05
Totals	100.00	100.00



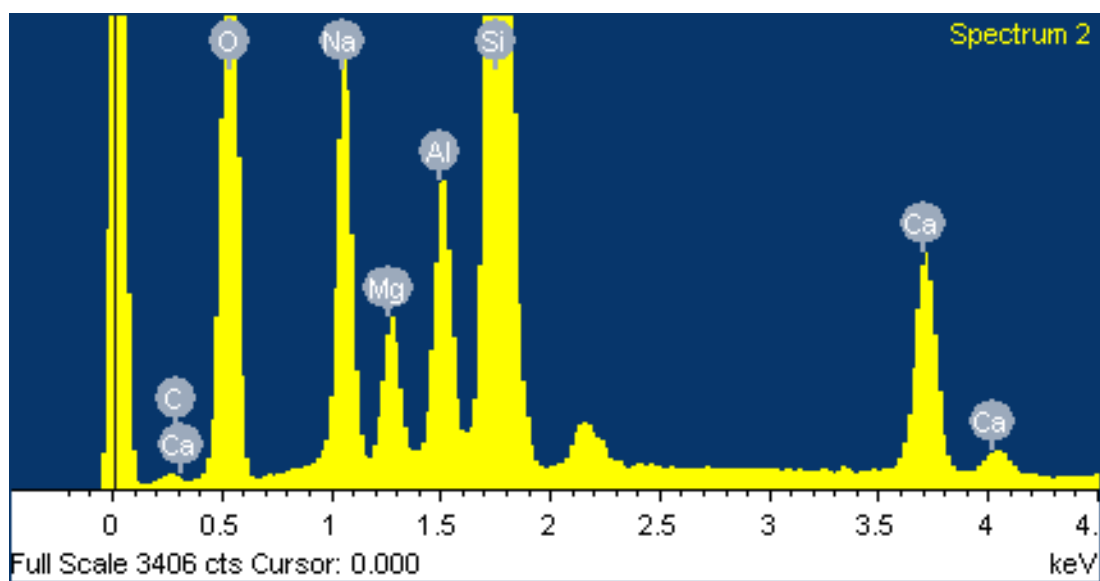
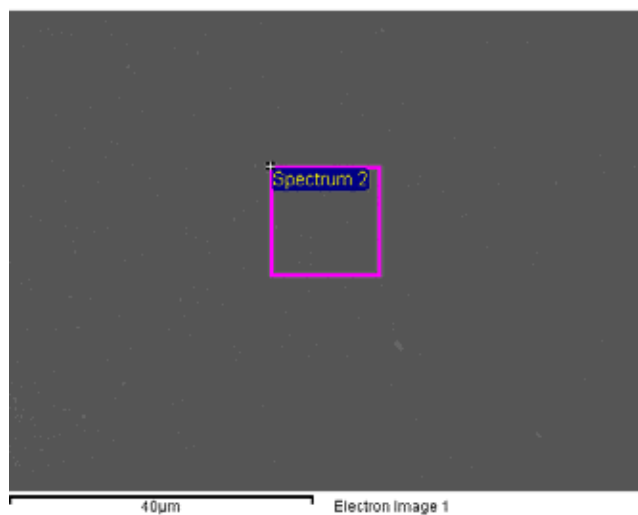
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของตัวอย่าง D0 บริเวณที่เกิดฝ้า

Element	Weight%	Atomic%
O K	64.81	75.67
Na K	10.54	8.56
Al K	1.32	0.91
Si K	19.93	13.25
Ca K	3.40	1.51
Totals	100.00	100.00



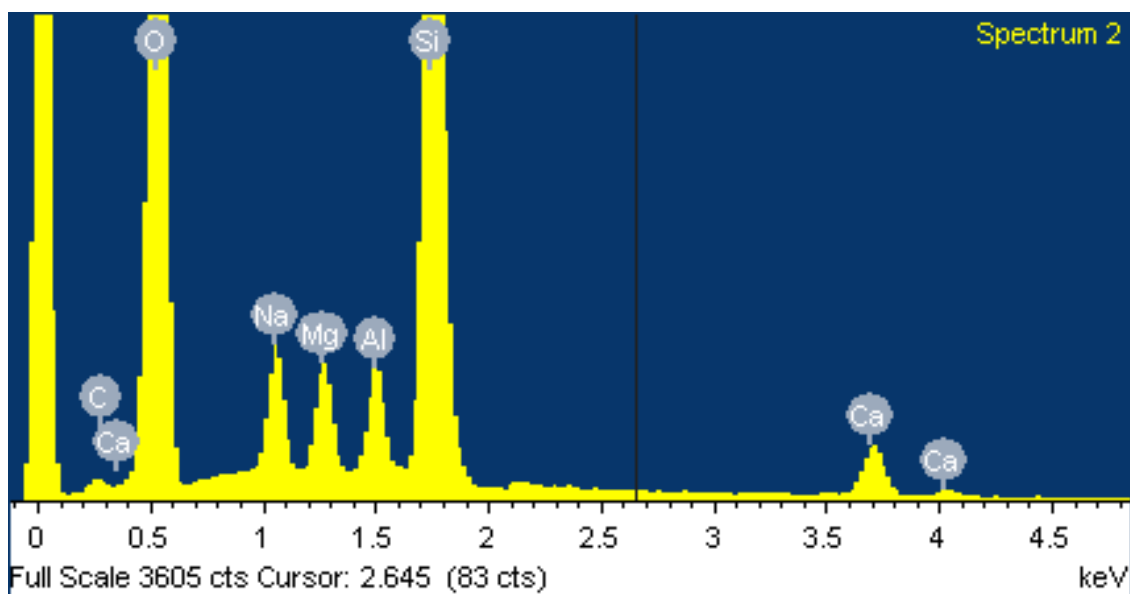
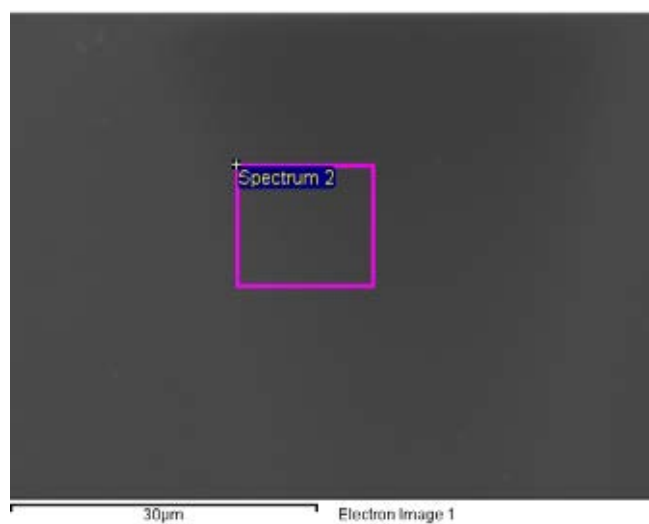
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของตัวอย่าง D3

Element	Weight%	Atomic%
O K	47.81	61.28
Na K	8.21	7.33
Mg K	2.26	1.90
Al K	3.70	2.82
Si K	32.90	24.03
Ca K	5.13	2.64
Totals	100.00	100.00



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของตัวอย่าง DS

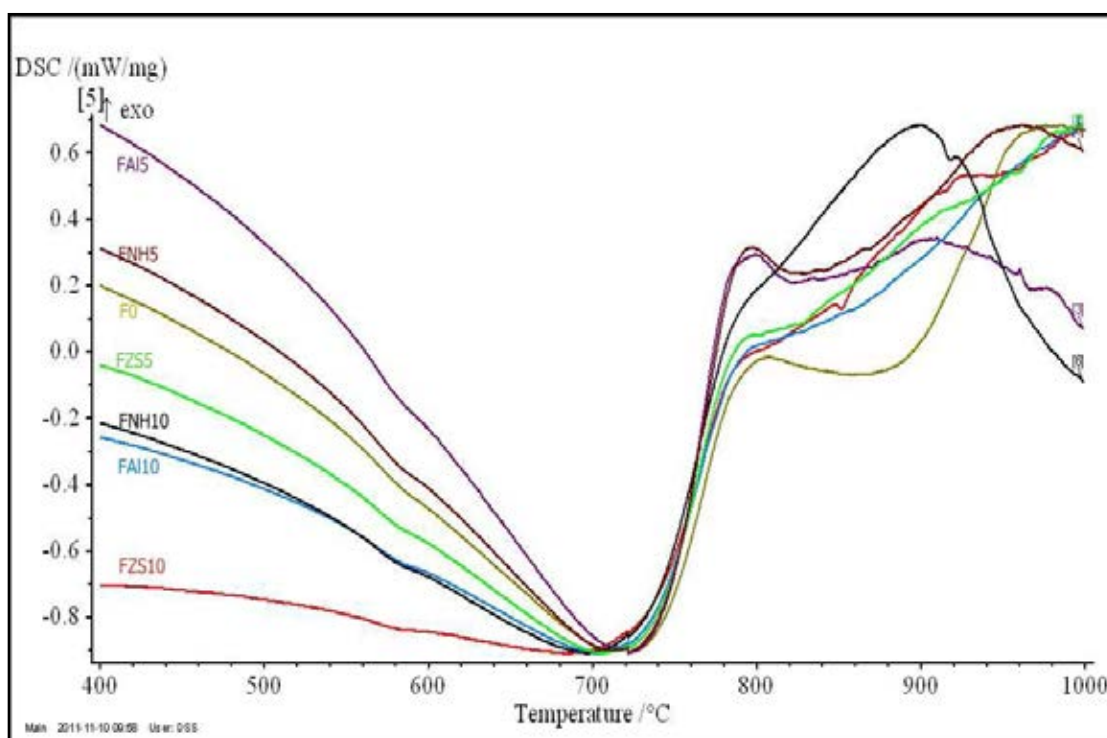
Element	Weight%	Atomic%
O K	70.19	80.04
Na K	3.92	3.11
Mg K	2.58	1.940
Al K	1.93	1.30
Si K	19.87	12.90
Ca K	1.48	0.67
Totals	100.00	100.00





### ภาคผนวก ง

ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิของกระจกก่อนและหลังการอบผิวด้วยสารตั้งต้นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่างชนิดกัน



## ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ค่าความแข็งวิกเกอร์ของกระจกก่อนและหลังการอบผิวด้วยสารตั้งต้นชนิดต่างกัน

Microhardness				
Indent Type		HV		
Test Force		50g <sub>f</sub>		
Dwell Time		15sec		
Indentation	Microhardness	Diagonal		
Number	Number	Mean	Diagonal 1	Diagonal 2
F0	507.00	13.60	14.00	13.00
FNH1	615.03	12.31	12.56	12.02
FNH3	593.60	12.60	12.70	12.30
FNH5	645.70	12.00	12.40	11.60
FNH10	650.80	12.00	12.30	11.60
FAI1	582.76	12.65	13.01	12.23
FAI3	622.20	12.20	12.60	11.90
FAI5	609.06	12.37	12.81	11.88
FAI10	653.33	11.94	12.34	11.52
FZS1	622.27	12.26	12.51	11.94
FZS3	612.75	12.33	12.58	12.05
FZS5	635.20	12.13	12.40	11.81
FZS10	674.58	11.77	11.98	11.49

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนันทวัน ผ่องพุ่ม เกิดวันที่ 17 สิงหาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปี 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2551 และสำเร็จการศึกษาในปี 2554

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติแบบ Poster presentation เรื่อง “Effect of modifiers addition and surface treatment on hydrolytic resistance of soda-lime silicate glass” ในการประชุม The 2nd Research Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials and The 17th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers ณ ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์, วันที่ 26 เมษายน 2554 จัดโดย วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับนานาชาติแบบ Oral presentation เรื่อง “The improvement of weathering durability of container glass” ในการประชุมวิชาการ The 9<sup>th</sup> International Meeting of Pacific Rim Ceramic Society ระหว่างวันที่ 10-14 กรกฎาคม 2554 จัดโดย The Australian Ceramic Society and Materials Australia ณ เมือง Cairns ประเทศออสเตรเลีย

การนำเสนอผลงานทางวิชาการระดับชาติแบบ Oral presentation เรื่อง “Effect of chemical composition and surface treatment by SO<sub>2</sub> gas on weathering durability of commercial soda-lime-silicate glasses” ในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 37 (วทท37) โรงแรมเซนทาราแกรนด์ กรุงเทพมหานคร ระหว่างวันที่ 10-12 ตุลาคม 2554 จัดโดย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ร่วมกับคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (สวทช.)