



การนำของเหลือทิ้งจากการเกษตรและฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ของเตาหลอม
แก้วมาใช้ในการกระบวนการหลอมแก้ว

โดย

จิตรลดา คำภา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

UTILIZATION OF AGRICULTURAL WASTE AND CONDENSATE FROM
REGENERATOR OF GLASS FURNACE IN GLASS BATCH MELTING

BY

JITLADA KUMPA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
(MATERAILS INNOVATION AND TECHNOLOGY)
DEPARTMENT OF MATERAILS AND TEXTILE TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2021
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

จิตรลดา คำภา

เรื่อง

การนำของเหลือทิ้งจากการเกษตรและฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ของเตาหลอมแก้วมาใช้ในกระบวนการ
หลอมแก้ว

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)

เมื่อ วันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2565

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมยศ คงคารัตน์)

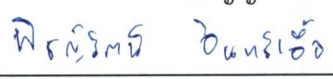
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


(รองศาสตราจารย์ ดร.นันทพร คงคะจันทร์)

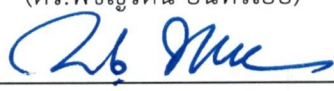
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญญา เชิดหิรัญกร)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ดร.พิชญ์รัตน์ อินทร์เอื้อ)

คณบดี


(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐนันท์ หงส์วรสิทธิ์ธร)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำของเหลือทิ้งจากการเกษตรและฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ของเตาหลอมแก้วมาใช้ในการบวนการหลอมแก้ว
ชื่อผู้เขียน	จิตรลดา คำภา
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุและสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.นันทพร คงคะจันทร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญญา เชิดศิริบุญกร
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

ในการผลิตแก้วโซดาไลม์ การระเหยของสารระเหยจากการหลอมแก้วเป็นสาเหตุของการปล่อยฝุ่นจากเตาหลอมแก้ว ฝุ่นที่เกิดขึ้นนี้จะสะสมอยู่บนเครื่องรีเจนเนอเรเตอร์และจำเป็นที่จะต้องกำจัดออก ดังนั้น งานวิจัยนี้ในส่วนของ การทดลองส่วนแรกจึงเน้นที่การใช้ฝุ่นที่เหลือจากการหลอมแก้วมาใช้ใหม่ในการผลิตแก้ว สูตรแก้วถูกเตรียมตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 5 และ 10 โดยน้ำหนักของฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์เพื่อทดแทนในวัตถุดิบทั้งหมดของสูตรมาตรฐาน การวิเคราะห์เฟสและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) ระบุว่าฝุ่นประกอบด้วยโซเดียมซิลเฟตเป็นองค์ประกอบหลัก การวิเคราะห์เชิงความร้อน (TG/DSC) เปิดเผยว่าการเติมฝุ่นเหลือทิ้งจากกรีเจนเนอเรเตอร์จะช่วยลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาการหลอมเหลวของสูตรแก้ว โดยปริมาณฝุ่นที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก้วที่มีจำนวนฟองอากาศเหลือน้อยที่สุดคือร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (D2) จากผลการวัดค่าสีตามระบบ CIE และการวัดไดลาโตเมทรีพบว่า การแทนที่วัตถุดิบทั้งหมดด้วยฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ในสูตรแก้วมากถึงร้อยละ 2 โดยน้ำหนักไม่ส่งผลต่อสีแก้ว ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน และจุดอ่อนตัวของไดลาโตเมทริกของผลิตภัณฑ์แก้ว ในส่วนของ การทดลองส่วนที่สองจึงเน้นที่การใช้เถ้าขานอ้อยมาใช้ใหม่ในการผลิตแก้ว สูตรแก้วถูกเตรียมตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนักของเถ้าขานอ้อย เพื่อทดแทนในวัตถุดิบทั้งหมดของสูตรมาตรฐาน การวิเคราะห์เฟสและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF) ระบุว่าเถ้าขานอ้อยประกอบด้วยซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก จากการทดลองพบว่า ปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก้วที่มีจำนวนฟองอากาศเหลือน้อยที่สุดคือร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก (B1.5) จากผลการวัดค่าสีตามระบบ

CIE และการวัดไดลาโตเมทรีพบว่า การแทนที่วัตถุดิบทั้งหมดด้วยเถาขานอ้อยในสูตรแก้มากถึงร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อสีแก้ม และค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน อุณหภูมิกลาสทราน - สีชัน และจุดอ่อนตัวของไดลาโตเมทริกของผลิตภัณฑ์แก้มนั้นใกล้เคียงกับของตัวอย่างมาตรฐาน (STD) ในการทดลองส่วนสุดท้ายนี้จะเน้นที่การใช้ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์และเถาขานอ้อยมาใช้ในการผลิตแก้ม โดยสูตรแก้มถูกเตรียมตั้งแต่ร้อยละ 0.5 ถึง 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนักของเถาขานอ้อยเพื่อทดแทน ในวัตถุดิบทั้งหมดของสูตร D2 (สูตรที่แทนที่ฝุ่นปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักลงในสูตรมาตรฐาน) จากผลการวัดค่าสีตามระบบ CIE เมื่อเติมเถาขานอ้อยลงไปในสูตร D2 ทำให้แก้มเปลี่ยนจากสีใสเป็นสีเขียว และการวัดไดลาโตเมทรีพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน อุณหภูมิกลาสทรานสีชัน และจุดอ่อนตัวของไดลาโตเมทริกของผลิตภัณฑ์แก้มนั้นใกล้เคียงกับของตัวอย่างมาตรฐาน (STD)

คำสำคัญ: ฝุ่นเหลือทิ้ง, รีเจนเนอเรเตอร์, เถาขานอ้อย, สูตรหลอมแก้ม, สมบัติทางความร้อน

Thesis Title	Utilization of Agricultural Waste and Condensate from Regenerator of Glass Furnace in Glass Batch Melting
Author	Jitlada Kumpa
Degree	Master of Science (Materials Innovation and Technology)
Department/Faculty/University	Materials and Textile Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University
Thesis Advisor	Associate Professor Nuntaporn Kongkajun, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Associate Professor Benya Cherdhirunkorn, Ph.D.
Academic Year	2021

ABSTRACT

In soda-lime glass manufacturing, evaporation of volatile compounds from glass melt is the origin of the dust emission from glass tank furnace. The exhausted dust then is deposited on the regenerator and is needed to be removed. Thus, this study, the first part of the experiment focuses on using the dust from melting glass in glass production. The glass batches were prepared from 0 to 10 wt% of the exhausted dust from soda-lime glass production as a substitution of the total raw materials. The analysis of phase and chemical composition of the dust by x-ray powder diffraction (XRD) and x-ray fluorescence technique (XRF) indicated that it consisted mainly sodium sulphate. Thermal analysis (TG/DSC) revealed that the addition of exhausted dust reduced the temperature of the melting reaction of the glass batches. The optimum amount of the exhausted dust, which made it possible to obtain the glass with the lowest number of remaining bubbles, was 2 wt%. From CIE lab and dilatometry results revealed that up to 2 wt% replacement of total raw materials by the exhausted dust in the glass batch did not affect the glass color, thermal expansion coefficient, glass transition temperature and dilatometric softening point of glass samples. The second part of this study focuses on using the bagasse ash in glass production. The glass batches were prepared from 0.5

to 4.0 wt% of the bagasse ash as a substitution of the total raw materials. The analysis of phase and chemical composition of the bagasse ash by x-ray powder diffraction (XRD) and x-ray fluorescence technique (XRF) indicated that it consisted mainly silica. The optimum amount of the bagasse ash, which made it possible to obtain the glass with the lowest number of remaining bubbles, was 1.5 wt%. From CIE lab and dilatometry results revealed that up to 1.5 wt% replacement of total raw materials by the bagasse ash in the glass batch did not affect the glass color and resulting in the value of thermal expansion coefficient, glass transition temperature and dilatometric softening point of glass samples close to the standard batches (STD). The results of glass batches prepared from 0.5 to 4.0 wt% of the bagasse ash as a substitution of the total raw materials in D2 batches revealed that the glass color changes from colorless to green. The value of thermal expansion coefficient, glass transition temperature and dilatometric softening point of glass samples was close to STD samples.

Keywords: Exhausted dust, Regenerator, Bagasse ash, Glass batch melting, Thermal properties

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้โดยได้รับความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคลากรและหน่วยงานต่าง ๆ ในฐานะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นันทพร คงคะจันทร์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญญา เชิดศิริณกร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและชี้แนวทางในการวิเคราะห์ การดำเนินการค้นคว้าวิจัย ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติร่วมกับบริษัท กลาสบริดจ์ จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนานักวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ตามสัญญาเลขที่ วช.อว.(อ)(กบง)/352/2563 รหัสรายโครงการ NRCT5-RR163009-M20 ขอขอบคุณ ดร.พิชญ์รัตน์ อินทร์เอื้อ ผู้ให้การสนับสนุน วัสดุและการใช้เครื่องมือด้านการผลิตและวิเคราะห์แก้ว สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่เอื้อเพื่อให้ใช้สถานที่ปฏิบัติงานและให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการศึกษาวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครูบาอาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชารวมทั้งครอบครัวและเพื่อนทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุน ตลอดจนผู้มีพระคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิชาเทคโนโลยี วัสดุและสิ่งทอทุกท่านที่มีส่วนให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จิตรลดา คำภา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการดำเนินโครงการวิจัย	2
1.3.1 ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการหลอมแก้ว	2
1.3.2 หลอมแก้วโดยมีวัตถุดิบในการหลอม	3
1.3.3 แบ่งส่วนผสมวัตถุดิบแต่ละสูตรมาวิเคราะห์เชิงความร้อน	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 สมมติฐาน	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 นิยามของแก้ว	5
2.2 วัตถุดิบในการผลิตแก้ว	6
2.2.1 ททราย (Sand)	7
2.2.2 โซดาแอช (Soda ash)	7
2.2.3 โดโลไมต์ (Dolomite)	8

2.2.4 โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate)	8
2.2.5 เศษแก้ว (Cullet)	9
2.3 การผลิตแก้ว	9
2.3.1 การหลอมแก้ว (Melting) ช่วงอุณหภูมิ 100-1400 °C	10
2.3.2 การไล่ฟองอากาศ (Fining) โดยการไล่ฟองอากาศในน้ำแก้ว	10
2.4 ประเภทของเตาหลอมแก้ว	12
2.4.1 Discontinuous Furnace	12
2.4.2 Continuous Furnace	13
2.5 ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	15
2.6 เถ้าขาน้อย	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
 บทที่ 3 วิธีการวิจัย	 19
3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลอง	19
3.1.1 ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	19
3.1.2 เถ้าขาน้อย	19
3.2 การเตรียมตัวอย่าง	19
3.3 การหลอมแก้ว	21
3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง	22
3.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)	22
3.4.2 การวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	22
3.4.3 นับฟองก๊าซในแก้วหลอม	23
3.4.4 การวิเคราะห์จากเครื่อง DSC	23
3.4.5 การวิเคราะห์สีแก้วจากเทคนิค UV-Visible spectrophotometer	24
3.4.6 การวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหแสง Refractive index	26
3.4.7 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วเมื่อได้รับความร้อน (Thermal expansion coefficient or COE)	27
 บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	 29

4.1 ผลการวิจัยส่วนของการนำฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มาแทนในวัตถุดิบหลัก	29
4.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	29
4.1.2 ปฏิกริยาเมื่อแทนที่ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงในวัตถุดิบหลัก	30
4.1.3 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างแก้วจากสูตรที่แทนฝุ่นจากรีเจนเนอเร - เตอร์ลงไปในวัตถุดิบหลัก	34
4.2 ผลการวิจัยส่วนของการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในวัตถุดิบหลัก	39
4.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย	39
4.2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยที่ทำการ calcine	40
4.2.3 ปฏิกริยาเมื่อแทนที่เถ้าขานอ้อยลงในวัตถุดิบหลัก	42
4.2.4 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างแก้วจากสูตรที่แทนเถ้าขานอ้อยลงไปใน วัตถุดิบหลัก	44
4.3 ผลการวิจัยส่วนของการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในสูตร D2	48
4.3.1 ปฏิกริยาเมื่อแทนที่เถ้าขานอ้อยลงในสูตร D2	48
4.3.2 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างแก้วจากสูตรที่แทนเถ้าขานอ้อยลงไปใน สูตร D2	49
4.4 การประเมินต้นทุนการหลอมแก้วจากการเติมฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์และ เถ้าขานอ้อย	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
5.1 สรุปผลการวิจัยส่วนของการนำ ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มาแทนในวัตถุดิบ หลัก	56
5.1.1 การวิเคราะห์เฟสและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	56
5.1.2. สูตรที่เหมาะสมที่สุดในการหลอมแก้ว	56
5.2 สรุปผลการวิจัยส่วนของการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในวัตถุดิบหลัก	56
5.2.1 การวิเคราะห์เฟสและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย	56
5.2.2. สูตรที่เหมาะสมที่สุดในการหลอมแก้ว จากการนำเถ้าขานอ้อยมาแทน ในวัตถุดิบหลัก	57
5.3 สรุปผลการวิจัยส่วนของการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในสูตร D2	57
5.3.1. สูตรที่เหมาะสมที่สุดในการหลอมแก้ว จากการนำเถ้าขานอ้อยมาแทน ในสูตร D2	57
5.4 สรุปผลการวิจัยส่วนของการคำนวณการลดลงของต้นทุนในการผลิตแก้ว	57

5.5 ข้อเสนอแนะ	57
รายการอ้างอิง	58
ประวัติผู้เขียน	60



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้หลอมแก้วโดยมีส่วนผสมของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	20
3.2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้หลอมแก้วโดยมีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อย	20
3.3 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้หลอมแก้วโดยมีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยโดยปรับจากสูตร 2D	20
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	29
4.2 ผลการวิเคราะห์สีตามระบบ CIE, อัตราส่วน Fe^{2+}/Fe total และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงไปในวัตถุดิบหลัก	36
4.3 ตารางผลการทดสอบการขยายตัวทางความร้อนและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีส่วนผสมของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	38
4.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย	39
4.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการ Calcine	40
4.6 ผลการวิเคราะห์สีตามระบบ CIE, อัตราส่วน Fe^{2+}/Fe total และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนเถ้าขานอ้อยลงไปในวัตถุดิบหลัก	45
4.7 ตารางผลการทดสอบการขยายตัวทางความร้อนและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีส่วนผสมของเถ้าขานอ้อย	47
4.8 ผลการวิเคราะห์สีตามระบบ CIE, อัตราส่วน Fe^{2+}/Fe total และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนเถ้าขานอ้อยลงไปในสูตร D2	51
4.9 ตารางผลการทดสอบการขยายตัวทางความร้อนและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วที่แทนเถ้าขานอ้อยลงในสูตร D2	54
4.10 การประเมินต้นทุนวัตถุดิบ	54

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ลักษณะของโครงข่าย SiO_2 แบบ (ก) อสัณฐาน (Amorphous) (ข) ผลึก (Crystalline) และ (ค) หน่วยย่อยของ $(\text{SiO}_4)^{4-}$	5
2.2 ทราายและโครงสร้างซิลิกา	7
2.3 โซดาแอชและโครงสร้างโซเดียมคาร์บอเนต	8
2.4 โดโลไมต์	8
2.5 โซเดียมซิลเฟต	9
2.6 เศษแก้ว	9
2.7 ภาพแสดงเตาหลอมแก้วที่มีส่วนของรีเจนเนอเรเตอร์ด้านหลัง (End-port regenerative furnace)	12
2.8 เตาหลอมแบบหม้อ (Pot Furnace)	12
2.9 ตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์แบบ Side-port-fired furnace	13
2.10 ตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์แบบ End-port-fired furnace	14
2.11 เตาหลอมแบบรีคิวเพอร์เรทีฟ	15
2.12 ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่ได้จากการผลิตแก้วโซดาไลน์	16
2.13 เถ้าขานอ้อย (Bagasse ash)	17
3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน	21
3.2 เครื่อง X-ray Fluorescence ยี่ห้อ BRUKER รุ่น S2 RANGER	22
3.3 เครื่อง Powder X-ray Diffractometer (XRD)	23
3.4 พื้นที่แสดงการนับฟองอากาศในแก้วหลอม	23
3.5 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)	24
3.6 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ยี่ห้อ Analytik jena รุ่น SPECORD 250	25
3.7 Color space diagram	25
3.8 ตัวอย่างการวัดสีแก้วตาม Color space diagram	26
3.9 เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสง Abbe refractometer ยี่ห้อ Atago รุ่น T1	27
3.10 เครื่องวัดค่า Dilatometry ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DIL 402 Expedit	28
4.1 XRD pattern ของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	30
4.2 จำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว เมื่อแทนที่วัตถุดิบหลักด้วยฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	31

4.3 ภาพฟองอากาศบนพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งเตรียมจากปริมาณฝุ่นตามสูตรต่างๆ (ก) มาตรฐาน (ข) D2 (ค) D3 และ (ง) D5	32
4.4 กราฟ TG/DSC ของสูตรแก้วที่แทนที่ด้วยฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ (ก) STD และ (ข) D2	34
4.5 สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนที่ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงไปในวัตถุดิบหลัก	35
4.6 (ก) ผลการวิเคราะห์ CIE Lab ของผลิตภัณฑ์แก้วและ (ข) ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนที่ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงไปในวัตถุดิบหลัก	37
4.7 กราฟแสดงผลการขยายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีส่วนผสมของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์	38
4.8 XRD pattern ของเถ้าขาน้อย	39
4.9 XRD pattern ของเถ้าขาน้อยที่ผ่านการแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง	41
4.10 จำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว เมื่อแทนที่วัตถุดิบหลักด้วยเถ้าขาน้อย	42
4.11 ภาพฟองอากาศบนพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งเตรียมจากปริมาณเถ้าขาน้อยตามสูตรต่าง ๆ (ก) มาตรฐาน (ข) B1.5 (ค) B2.0 และ (ง) B4.0	43
4.12 สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนที่เถ้าขาน้อยลงไปในวัตถุดิบหลัก	44
4.13 (ก) ผลการวิเคราะห์ CIE Lab และ (ข) ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์แก้วที่แทนที่เถ้าขาน้อยลงในวัตถุดิบหลัก	46
4.14 กราฟแสดงผลการขยายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีส่วนผสมของเถ้าขาน้อย	47
4.15 จำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว เมื่อแทนที่วัตถุดิบในสูตร D2 ด้วยเถ้าขาน้อย	48
4.16 ภาพฟองอากาศบนพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งเตรียมจากปริมาณเถ้าขาน้อยตามสูตรต่าง ๆ (ก) D2 (ข) DB1.5 (ค) DB2.0 และ (ง) DB4.0	49
4.17 สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนที่เถ้าขาน้อยลงในสูตร D2	50
4.18 (ก) ผลการวิเคราะห์ CIE Lab และ (ข) ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์แก้วที่แทนที่เถ้าขาน้อยลงในสูตร D2	52
4.19 กราฟแสดงผลการขยายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้วที่แทนที่เถ้าขาน้อยลงในสูตร D2	53

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมแก้วเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อประเทศไทย โดยมีมูลค่ารวมทั้งหมดมากกว่า 35,000 ล้านบาท ในแต่ละปีมีกำลังการผลิตมากกว่า 3.5 ล้านตัน แก้วในกลุ่มแก้วบรรจุภัณฑ์ (Container glass) เป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์แก้วที่มีปริมาณการผลิตสูงสุด แก้วบรรจุภัณฑ์ถูกผลิตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร น้ำหอม เครื่องสำอาง และยา เป็นต้น ซึ่งแก้วบรรจุภัณฑ์เฉพาะในส่วนของการบรรจุภัณฑ์แก้วสำหรับอาหาร มีมูลค่าตลาดสูงถึง 16,000 ล้านบาท โดยร้อยละ 90 ของบรรจุภัณฑ์แก้วที่ผลิตขึ้น คือ ขวดแก้ว ประกอบด้วยขวดแก้วใส สีเขียว หรือสีน้ำตาล ซึ่งแต่ละปีประเทศไทยสามารถผลิตขวดแก้วได้ประมาณ 2.4 ล้านตัน หรือประมาณ 10,000 ล้านขวดต่อปี

วัตถุดิบหลักของการผลิตแก้วได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) จากทรายแก้ว โดโลไมต์ ($(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$) โซดาแอช (Na_2CO_3) หินปูน (CaCO_3) หินฟืนม้า และเศษแก้ว นอกจากนี้มีการเติมสารอื่น เช่น สารลดฟองในน้ำแก้ว ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) วัตถุดิบเหล่านี้ถูกผสมและหลอมในเตาหลอมแก้วที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ในกระบวนการผลิตแก้ว เตาหลอมแก้วทำหน้าที่หลอมวัตถุดิบ เพื่อให้ได้น้ำแก้วที่มีความหนืดที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ ในช่วงการหลอมวัตถุดิบนั้น วัตถุดิบที่เป็นสารประกอบอัลคาไลน์สามารถระเหยออกมาได้ง่ายที่สุด เช่น กลุ่มสารประกอบโซเดียม ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในเตาเผา จะเกิดเป็นฝุ่นโซเดียมซัลเฟตซึ่งพบมากบริเวณรีเจนเนอเรเตอร์ (Regenerator) โดยรีเจนเนอเรเตอร์เป็นส่วนของเตาเผาที่ภายในประกอบด้วยวัสดุทนไฟและใช้ประโยชน์จากความร้อนที่ออกจากเตาหลอมแก้วในการอุ่นอากาศที่จะทำปฏิกิริยาสันดาปกับเชื้อเพลิงในเตาหลอมแก้ว โดยฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่พบในบริเวณดังกล่าว ทำให้ประสิทธิภาพของเตาหลอมลดลง โดยแต่ละปีมีฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมแก้วทั่วประเทศประมาณ 6,000 ตันต่อปี ทำให้อุตสาหกรรมต้องใช้ค่าใช้จ่ายไม่ต่ำกว่า 10 ล้านบาทต่อปี ในการกำจัด

ตามปกติสารโซเดียมซัลเฟตใช้เป็นสารลดฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในกระบวนการหลอมแก้ว โดยใช้ในปริมาณร้อยละ 1 ถึง 1.5 โดยน้ำหนักของวัตถุดิบแก้วทั้งหมด ปัจจุบันยังต้องมีการนำเข้าสารดังกล่าวจากต่างประเทศ ในราคาไม่ต่ำกว่า 4,200 บาท ต่อดัน ดังนั้นการนำฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่พบในกระบวนการหลอมแก้วกลับมาใช้ใหม่เป็นสารลดฟองก๊าซ ทดแทนสารโซเดียมซัลเฟตที่ใช้ตามปกตินั้น นอกจากช่วยลดต้นทุนการผลิตแก้วทั้งด้านวัตถุดิบและพลังงานได้ถึงร้อยละ 2 แล้ว ยังเป็นการส่งเสริมการใช้วัตถุดิบภายในประเทศและลดการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศอีกด้วย

นอกจากนี้ในด้านเกษตรกรรม แถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้ง ซึ่งเกิดจากกากชานอ้อยที่เหลือทิ้งจากการหีบอ้อยผลิตน้ำตาลจากโรงงานผลิตน้ำตาล ที่นำมาเผาเป็นเชื้อเพลิงในผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในปีที่ผ่านมา มีปริมาณอ้อยที่ออกสู่ตลาดทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 100 ล้านตัน (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย) คิดเป็นชานอ้อยประมาณ ร้อยละ 25 ซึ่งชานอ้อยที่ถูกเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะก่อให้เกิดแถ้าชานอ้อยประมาณร้อยละ 0.6 ของน้ำหนักอ้อย หรือประมาณ 600,000 ตันต่อปี ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลักของแถ้าชานอ้อย พบว่า ซิลิกา เป็นองค์ประกอบหลักของแถ้าชานอ้อย จึงมีงานวิจัยที่นำแถ้าชานอ้อยไปใช้เป็นวัตถุดิบอย่างมากในด้านเซรามิก เคลือบเซรามิก ปูนซีเมนต์ คอนกรีต จีโพลิเมอร์ แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาในการนำไปใช้งานเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก้วอย่างกว้างขวาง อีกทั้งในปัจจุบัน มีความสนใจเกี่ยวกับปัญหามลพิษที่เกิดจากฝุ่นละออง จึงนำมาสู่งานวิจัยนี้ในการใช้ประโยชน์จากของเสียจากอุตสาหกรรมโดยใช้ฝุ่นจากรีเจเนอเรเตอร์จากอุตสาหกรรมแก้ว และแถ้าชานอ้อยมาเป็นวัตถุดิบมาพัฒนาสูตรส่วนผสมในการหลอมแก้ว เพื่อเป็นลดปัญหาสิ่งแวดล้อม สามารถผลิตภัณฑ์แก้วที่มีสมบัติเทียบเท่ามาตรฐานโรงงาน และสามารถลดต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมแก้วได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะนำฝุ่นจากรีเจเนอเรเตอร์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางอุตสาหกรรม และแถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งด้านเกษตรกรรมมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยจะผสมฝุ่นและแถ้าชานอ้อยลงในสูตรแก้วในอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วนำไปหลอมที่ 1450 องศาเซลเซียส ทั้งนี้โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

- 1.2.1 ศึกษาการนำฝุ่นจากรีเจเนอเรเตอร์จากโรงงานอุตสาหกรรมแก้วและแถ้าชานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาลมาใช้เป็นส่วนผสมวัตถุดิบในการหลอมแก้ว
- 1.2.2 ศึกษาพฤติกรรมการหลอมแก้วที่มีส่วนผสมวัตถุดิบของฝุ่นรีเจเนอเรเตอร์และแถ้าชานอ้อยในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาสูตรแก้วที่ผลิตได้ให้มีมาตรฐานเทียบเท่ามาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรมแก้ว

1.3 ขอบเขตของการดำเนินโครงการวิจัย

- 1.3.1 ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษากระบวนการหลอมแก้ว โดยการใช้แถ้าชานอ้อยที่เป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตรและผงฝุ่นจากรีเจเนอเรเตอร์ในเตาหลอมแก้ว โดยนำแถ้าชานอ้อยและฝุ่นจากรีเจเนอเรเตอร์ จากโรงงานอุตสาหกรรมแก้ว จังหวัดระยอง นำมาวิเคราะห์เฟส และองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ ในการทดลองนี้จะใช้ฝุ่นจากรีเจเนอเรเตอร์และแถ้าชานอ้อย

ที่มาจาก Lot เดียวกันทั้งหมด เพื่อควบคุมความแปรปรวนด้านองค์ประกอบทางเคมีของของเหลือทิ้ง

1.3.2 หลอมแก้วโดยมีวัตถุดิบในการหลอม ได้แก่ ทราย โดโลไมต์ โซดาแอช และ โซเดียมซิลเฟต นำวัตถุดิบที่กล่าวมาข้างต้นมาซึ่งน้ำหนักและบดผสมกันในอัตราส่วนเดียวกับสูตร แก้วโซดาไลม์มาตรฐานที่ใช้ในโรงงาน ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็นสามส่วน

- ส่วนแรกเป็นการศึกษาการแทนที่ฟลูนจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงในวัตถุดิบทั้งหมดของสูตรแก้วมาตรฐานโรงงานตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 5 และร้อยละ 10
- ส่วนที่สองเป็นการศึกษาการแทนที่เถ้าขานอ้อยลงในวัตถุดิบทั้งหมดของสูตรแก้วมาตรฐานโรงงานตั้งแต่ร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และร้อยละ 4.0
- ส่วนที่สามเป็นการเลือกสูตรที่มีการเติมฟลูนจากรีเจนเนอเรเตอร์ในปริมาณที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนแรกมาศึกษาการเติมเถ้าขานอ้อยลงไปแทนที่ลงในวัตถุดิบทั้งหมด ตั้งแต่ร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และร้อยละ 4.0

1.3.3 แบ่งส่วนผสมวัตถุดิบแต่ละสูตรมาวิเคราะห์เชิงความร้อน โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอุณหภูมิ ปฏิกริยา และพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงการหลอมวัตถุดิบ หลังจากนั้นชิ้นงานแก้วที่เย็นตัวลงแล้วจะถูกตัดมาทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่

- การวัดปริมาณฟองอากาศที่คงเหลือในชิ้นงาน ถ้ามีปริมาณฟองก๊าซน้อยแสดงถึงประสิทธิภาพในการหลอมแก้วที่ดี
- ทดสอบตามสมบัติของแก้วโซดาไลม์ทางการค้า (Commercial container glass) ได้แก่ การวัดสีของแก้ว การวัดดัชนีหักเหของแก้ว การวัดสมบัติทางความร้อนของแก้ว เช่น สมบัติการขยายตัวของแก้ว อุณหภูมิจุดอ่อนตัวของแก้ว (Softening point temperature) และ อุณหภูมิการเปลี่ยนเป็นแก้ว (Glass transition temperature, T_g)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 งานวิจัยนี้เป็นการนำขยะอุตสาหกรรมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมแก้ว คาดว่าช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจ้างกำจัดทิ้ง ลดต้นทุนด้านการใช้วัตถุดิบ

1.4.2 การสร้างองค์ความรู้ในการนำเศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

1.5 สมมติฐาน

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์มีองค์ประกอบทางเคมีของ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ซึ่งสารโซเดียมซัลเฟตถูกใช้เป็นสารลดฟองอากาศที่เกิดขึ้นในกระบวนการหลอม แก้ว นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทำให้ทราบว่าเถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุเหลือทิ้งทาง เกษตรกรรมที่มีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) และเนื่องจากโซเดียม - ซัลเฟต (Na_2SO_4) และซิลิกา (SiO_2) เป็นวัตถุดิบในการหลอมแก้ว จึงคาดว่าฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์และ เถ้าขานอ้อยสามารถทดแทนวัตถุดิบหลักในการหลอมแก้วและทำให้ผลิตภัณฑ์แก้วโซดาโลว์ที่มีมาตรฐาน ทางการค้าได้



บทที่ 2

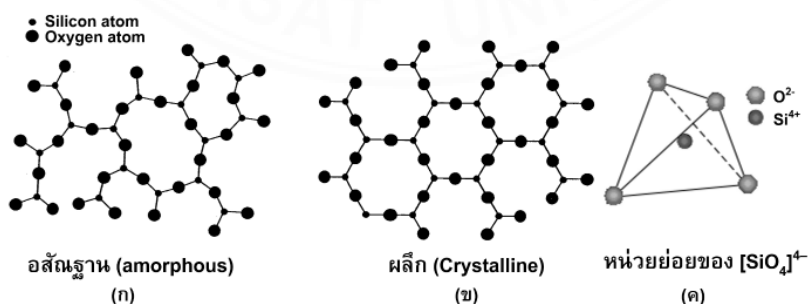
วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการจัดทำงานวิจัยเรื่อง การนำของเหลือทิ้งจากการเกษตรและฝุ่นจากกรีเ็นเนอเรเตอร์ของเตาหลอมแก้วมาใช้ในกระบวนการหลอมแก้ว ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากเอกสารและงานวิจัยต่าง ๆ เพื่อประกอบในการดำเนินงานวิจัย ซึ่งได้แก่เอกสารและงานวิจัยที่จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

2.1 นิยามของแก้ว

คำจำกัดความของแก้ว คือ ของแข็งที่ประกอบด้วยอะตอมหรือโมเลกุลที่จัดเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบมีลักษณะแบบ short – range disorder atomic arrangement เป็นวัสดุโปร่งใสที่ไม่มีรูปผลึก (Amorphous material) ซึ่งเตรียมได้จากการหลอมสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงจนวัสดุดิบหลอมเป็นน้ำแก้วอยู่ในสถานะของเหลว จากนั้นถูกขึ้นรูปโดยทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจนองค์ประกอบของโครงสร้างแก้วไม่มีเวลาเพียงพอที่จะเรียงตัวให้เป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบ

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.1 เป็นการแสดงลักษณะความแตกต่างของโครงสร้างของ SiO_2 ที่เป็น แบบอสัณฐาน (รูป ก.) และแบบผลึก (รูป ข.) จะได้ว่าลักษณะการจัดเรียงตัวแบบอสัณฐานมีการจัดเรียงของ Si และ O ที่ไม่เป็นระเบียบของหน่วยย่อยซิลิกอนเตตระไฮดรอนเมื่อเทียบกับการจัดเรียงตัวแบบผลึกที่มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบหน่วยย่อยพื้นฐานของแก้วซิลิกา คือ $(\text{SiO}_4)^{4-}$ ซึ่งมีไอออนของซิลิกอน (Si^{4+}) อยู่ตรงกลางของรูปทรงพีระมิดทรงสี่หน้า (Tetrahedron) เกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างซิลิกอนไอออนกับออกซิเจนไอออนอีก 4 ไอออน (รูป ค.)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของโครงข่าย SiO_2 แบบ (ก) ออสัณฐาน (Amorphous)

(ข) ผลึก (Crystalline) และ (ค) หน่วยย่อยของ $(\text{SiO}_4)^{4-}$

ที่มา : <http://www.benbest.com/cryonics/lessons.html>

ส่วนใหญ่แก้วมีองค์ประกอบของซิลิกา (SiO_2) เป็นหลัก ซิลิกาบริสุทธิ์ต้องใช้พลังงานในการหลอมมาก เพราะหลอมได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 1700°C เพื่อให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วเกิดเป็นแก้ว แก้วที่ใช้งานโดยทั่วไปจึงมีการเติมวัตถุดิบอื่น ๆ ลงไปเพื่อลดอุณหภูมิในการหลอมแก้ว ดังนั้นวัตถุดิบที่เป็นองค์ประกอบแก้วประกอบด้วย 3 ส่วน คือ (1) วัตถุดิบกลุ่มที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแก้ว สามารถเกิดแก้วได้เอง (2) วัตถุดิบกลุ่มที่ทำหน้าที่เป็นตัวปรับโครงสร้างแก้ว ลดจุดหลอมเหลวของแก้ว และ (3) วัตถุดิบกลุ่มที่ไม่สามารถเกิดเป็นแก้วได้เอง แต่เข้าไปอยู่ในโครงสร้างของแก้วและปรับสมบัติของแก้วให้เสถียรได้

กลุ่มวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของแก้วหรือ (Network former) วัตถุดิบกลุ่มนี้สามารถเกิดโครงสร้างแก้วได้เอง โดยไม่ต้องเติมวัตถุดิบอื่น เช่น ซิลิกา (SiO_2) เป็นวัตถุดิบหลักของแก้วทางการค้าที่ใช้ทั่วไป (commercial glass) แหล่งของซิลิกา ได้แก่ หินทรายแก้ว ซึ่งต้องมียังมีองค์ประกอบของ $\text{SiO}_2 > 99.5\%$, $\text{\%Fe}_2\text{O}_3 < 0.04\%$ สำหรับใช้ในการผลิตแก้วทั่วไป ($\text{\%Fe}_2\text{O}_3 < 0.01\%$ สำหรับใช้ในแก้วทางด้านแสง)

กลุ่มวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวปรับโครงสร้างแก้ว (Network modifier) หรือเป็นวัตถุดิบรองที่ช่วยลดอุณหภูมิหลอมเหลว (Fluxing agent) ทำให้ทรายแก้วหลอมตัวได้ง่ายขึ้นหรือลดความหนืดในน้ำแก้ว เนื่องจากพันธะโคเวเลนต์ (Bridging Oxygen) ระหว่างซิลิกากับออกซิเจนซึ่งต้องใช้พลังงานในการหลอมมาก จึงมีการใส่ Network modifier ซึ่งไอออนของวัตถุดิบเหล่านี้จะเข้าไปแทรกในโครงสร้างซิลิกาทำให้เกิดการตัดโครงสร้างของซิลิกาบางส่วน จึงทำให้สามารถหลอมได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

กลุ่มวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็น Intermediate oxides เป็นวัตถุดิบรองที่ช่วยเพิ่มความเสถียรแก่แก้ว ไม่สามารถเกิดเป็นแก้วได้เองแต่สามารถเข้าไปแทรกตัว ร่วมเป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างแก้วได้โดยการเชื่อมต่อกับโครงข่ายหลักของแก้ว ทำให้แก้วมีความแข็งแรงมากขึ้น และเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี สามารถปรับสมบัติของแก้วได้ วัตถุดิบในกลุ่มนี้ได้แก่ Al_2O_3 แร่กาอลิน (Kaolin) กลุ่มแร่ Feldspar ($\text{R}_2\text{OAl}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2$) R = Na, K, Ca แร่ Nepheline syenite TiO_2 และ ZrO_2

นอกจากนี้มีการเติมสารช่วยกำจัดฟองอากาศในน้ำแก้ว (Fining agents) ทำหน้าที่กำจัดฟองอากาศในน้ำแก้วที่ได้จากวัตถุดิบเนื่องจากสารพวกคาร์บอเนต (carbonate) ในวัตถุดิบจะสลายตัวได้เป็นออกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide, CO_2) ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดฟองในเนื้อแก้วขณะหลอมแก้วเติมลงในวัตถุดิบเพียงประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ได้แก่ Sodium sulphate (Na_2SO_4), Sb_2O_5 , As_2O_5 , CaSO_4 , CeO_2 สำหรับสารให้สีในแก้ว (Coloring elements) ได้แก่ ออกไซด์ของทรานซิชัน (metallic oxide) เช่น ออกไซด์ที่ให้สีเขียว เขียวเหลือง เช่น Cr_2O_3 และ Fe_2O_3 ออกไซด์ที่ให้สีฟ้า สีนํ้าเงิน เช่น CuO และ Co_3O_4 ออกไซด์ที่ให้สีน้ำตาล เช่น NiO ออกไซด์ที่ให้สีม่วง เช่น MnO_2

2.2 วัตถุดิบในการผลิตแก้ว

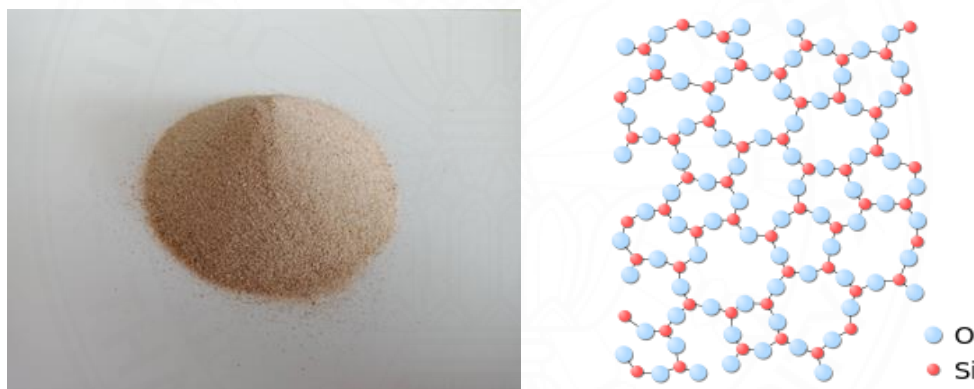
ในกระบวนการผลิตแก้วประกอบด้วยวัตถุดิบ ซึ่งทำหน้าที่แต่ละด้านตามองค์ประกอบทางเคมี การวัดความชื้น การวัดค่าความสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ปริมาณเหล็กออกไซด์และขนาด

อนุภาคของวัตถุดิบ จากนั้นคำนวณวัตถุดิบ ซึ่งนำน้ำหนักวัตถุดิบที่ได้จากการคำนวณ เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการผสมให้วัตถุดิบมีความเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อสู่กระบวนการหลอม วัตถุดิบหลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว ได้แก่

2.2.1 ทราย (Sand)

ทรายแก้วที่นำมาใช้ควรมีซิลิกามากกว่า 95.5% ซิลิกามีสูตรทางเคมีคือ SiO_2 ทำหน้าที่ทำให้เกิดเนื้อแก้วเป็นโครงสร้างหลักในแก้ว (Network forming) แสดงดังรูปที่ 2.2 Network forming อื่นๆ ได้แก่ boric oxide (B_2O_3), phosphoric oxide (P_2O_5), B_2O_3 สำหรับ high resistance thermal shock (Perex) แหล่งของ B_2O_3 ได้แก่ Boric acid (H_3BO_3) Colemanite ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) Borax ($\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

นอกจากนี้ ออกไซด์เหล่านี้สามารถเป็นโครงสร้างแก้วได้ GeO_2 , Bi_2O_3 , As_2O_3 , Sb_2O_3 , TeO_2 , Ga_2O_3 , V_2O_5 . ส่วนธาตุ S, Se, Te สำหรับผลิต chalcogenide glasses



รูปที่ 2.2 ทรายและโครงสร้างซิลิกา

ที่มา : <http://www.koppglass.com/blog/3-common-glass-types-properties-applications/>

2.2.2 โซดาแอส (Soda ash)

มีสูตรทางเคมีคือ Na_2CO_3 เป็นวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของโซเดียมไดออกไซด์ (Na_2O) ทำหน้าที่เป็นตัวปรับโครงสร้างแก้ว (Network modifier) ช่วยลดอุณหภูมิในการหลอม (Fluxing agent) ทำให้ทรายแก้วหลอมตัวได้ง่ายขึ้นหรือลดความหนืดในน้ำแก้วโดยปกติซิลิกามีจุดหลอมเหลวที่ 1710 องศาเซลเซียส และมีลักษณะเป็น Covalent bond (Bridging Oxygen) ระหว่างซิลิเกตกับออกซิเจนซึ่งต้องใช้พลังงานในการหลอมมาก จึงมีการใส่โซดาแอสเพื่อตัดโครงสร้างของซิลิกา (Non-Bridging Oxygen) แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โซดาแอสและโครงสร้างโซเดียมคาร์บอเนต

ที่มา : <http://www.koppglass.com/blog/3-common-glass-types-properties-applications/>

2.2.3 โดโลไมต์ (Dolomite)

มีสูตรทางเคมี $\text{MgCO}_3\text{CaCO}_3$ เป็นวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โดโลไมต์ทำหน้าที่ให้แก้วคงรูปโดยการควบคุมความหนืดของแก้วและช่วยลดอุณหภูมิในการหลอม แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โดโลไมต์

2.2.4 โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate)

มีสูตรทางเคมี Na_2SO_4 ทำหน้าที่เป็นสารกำจัดฟองก๊าซในน้ำแก้วที่ได้จากวัตถุดิบ (Fining agent) เนื่องจากสารพวกคาร์บอเนต (carbonate) ในวัตถุดิบจะสลายตัวได้เป็นออกไซด์กับคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide, CO_2) ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดฟองในเนื้อแก้วขณะหลอมแก้ว แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โซเดียมซัลเฟต

2.2.5 เศษแก้ว (Cullet)

เป็นเศษแก้วที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่การใช้เศษแก้วเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบจะทำให้หน้าที่ช่วยลดพลังงานในการหลอมเนื่องจากการหลอมเศษแก้วจะใช้พลังงานต่อหน่วยในการหลอมน้อยกว่าการหลอมวัตถุดิบหลัก โดยใช้เศษแก้วประมาณ 40-70 % แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เศษแก้ว

ที่มา : <http://www.macoglass.it/en/services/supply-of-furnace-ready-cullet>

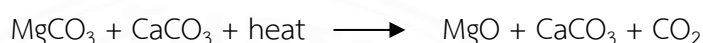
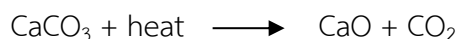
2.3 การผลิตแก้ว

ในกระบวนการผลิตแก้วโซดาไลน์มีองค์ประกอบทางเคมีคิดเป็นร้อยละของสารประกอบออกไซด์โดยน้ำหนัก คือ SiO_2 ร้อยละ 70-73.5, Na_2O ร้อยละ 13-15, CaO ร้อยละ 6-11, MgO ร้อยละ 1.5-4.5 และ Al_2O_3 ร้อยละ 0.6-2.0 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วโซดาไลน์จึงประกอบด้วย ททรายแก้ว (SiO_2) โดโลไมต์ ($(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$) โซดาแอช (Na_2CO_3) หินปูน (CaCO_3) หินฟืนม้า ($\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-6\text{SiO}_2$) และ เศษแก้ว นอกจากนี้มีการเติมสารลดฟอง (Fining Agent) เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) วัตถุดิบที่ผสมเข้ากันแล้วจะเรียกว่าส่วนผสม (Batch) เพื่อถูกป้อนเข้าเตาหลอมทำให้กลายเป็นน้ำแก้วที่สมบูรณ์ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังนี้

2.3.1 การหลอมแก้ว (Melting) ช่วงอุณหภูมิ 100-1400 องศาเซลเซียส ซึ่งมีปฏิกิริยาหลายขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.กำจัดน้ำออกจากวัตถุดิบ (Dehydration) และเกิดการระเหยของไอน้ำ (Water evaporation)

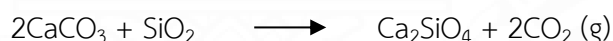
2.เกิดการสลายตัวของกลุ่ม Carbonate, Sulfate และ Nitrate ในวัตถุดิบทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากในน้ำแก้ว



3.เกิดการรวมกันของโซดาแอชและหินปูน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Double salt reaction



4.ทราย (SiO_2) หลอมละลายเข้ากับ fluxing agent



5.การหลอมของซิลิกา (Dissolving of the SiO_2) เริ่มละลายเข้าไปในสารประกอบคาร์บอเนตและเกิดการรวมตัวอยู่ในรูปโซเดียมซิลิเกต



2.3.2 การไล่ฟองอากาศ (Fining) โดยการไล่ฟองอากาศในน้ำแก้วอาศัยหลักการดังนี้

1.อาศัยการเติมสารลดฟองอากาศในน้ำแก้ว (Fining agent)

ได้แก่ Na_2SO_4 เพื่อกำจัดฟองอากาศที่เกิดขึ้น โดยสารลดฟองอากาศสลายตัวทำให้เกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ลอยตัวขึ้นไปรวมกับฟองอากาศขนาดเล็กในน้ำแก้วให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำแก้วได้เร็วขึ้น

2.อาศัยแรงทางกายภาพ

คือ แรงลอยตัวเนื่องจากฟองอากาศมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำแก้วทำให้ฟองอากาศสามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำของน้ำแก้วได้ โดยการเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 1450 องศาเซลเซียส ทำให้น้ำแก้วมีความหนืดต่ำ ฟองอากาศสามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวน้ำแก้วได้ง่าย หลังจากนั้นจะมีการดึงน้ำแก้วไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า เรียกขั้นตอนนี้ว่า Refining เป็นขั้นตอนการกำจัดฟองอากาศในน้ำแก้วที่มีขนาดเล็กที่ยังหลงเหลืออยู่ ให้ละลายกลับเข้าไปในน้ำแก้ว

3.การทำให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous)

ฟองอากาศที่เกิดจากการสลายตัวของวัตถุดิบเกิดการเคลื่อนที่เสมือนเป็นการกวนน้ำแก้วให้เป็นเนื้อเดียวกัน

4.กระบวนการขึ้นรูป (Forming)

น้ำแก้วถูกกดอุณหภูมิลงจนมีความหนืดที่เหมาะสมสำหรับขึ้นรูป เช่น กระบวนการขึ้นรูปขวด กระบวนการขึ้นรูปกระจก เป็นต้น

5.การอบ (Annealing)

แก้วที่ผ่านกระบวนการหลอมและผ่านการขึ้นรูปจะถูกอบที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียสโดยปรับอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ ให้อยู่ที่ค่าที่เหมาะสม (Stress) ที่ตกค้างในแก้วจากขั้นตอนการขึ้นรูป เนื่องจากในขั้นตอนการขึ้นรูปแก้วที่เย็นตัวลงทำให้เกิดความเค้นภายในเนื้อแก้วโดยด้านในของแก้วจะเย็นตัวช้ากว่าด้านนอกของแก้วก่อให้เกิดความเค้นที่ผนังของแก้ว

สารช่วยกำจัดฟองในน้ำแก้ว (Fining agents) โซเดียมซัลเฟตจะสลายตัวให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ในช่วงที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) จากนั้นก๊าซที่เกิดขึ้นจะสลายตัวให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และก๊าซออกซิเจน ดังสมการ (2.1) และ (2.2) ตามลำดับ

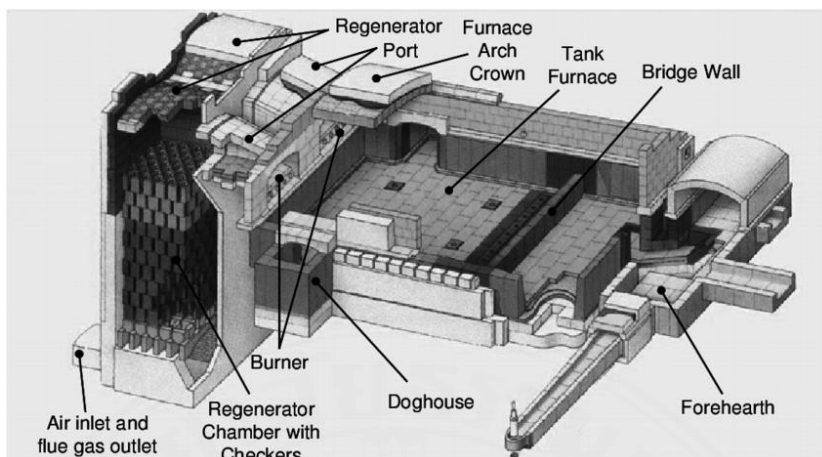


ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะรวมตัวกับฟองอากาศอื่น ๆ กลายเป็นฟองขนาดใหญ่ลอยขึ้นสู่ผิวแก้ว หรือ ฟองอากาศขนาดเล็ก ๆ รวมตัวกลายเป็นสารประกอบซัลเฟตละลายอยู่ในแก้วหากอุณหภูมิต่ำลง และหายไปที่สุด

ขั้นตอนการหลอมแก้ว (Melting) วัตถุดิบทั้งหมดที่ผ่านการชั่งน้ำหนักตามสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่ต้องการแล้ว เข้าสู่เตาหลอมซึ่งที่ใช้พลังงานความร้อนจากน้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติ หรือไฟฟ้า ทำให้ส่วนผสมวัตถุดิบกลายเป็นน้ำแก้ว (Molten liquid) ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ความหนืดประมาณ 102 พอยส์ จากนั้นลดอุณหภูมิลงเพื่อการกำจัดฟองอากาศ (Fining) เนื่องจากในกระบวนการหลอมมีการสลายตัวของวัตถุดิบ เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต โซดาแอช โดโลไมต์ ได้เป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน สารลดฟองหรือกำจัดฟองในน้ำแก้ว ได้แก่ สารประกอบซัลเฟต เดิมลงไปประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในระหว่างขั้นตอนการกำจัดฟองจะเกิดการทำให้ส่วนผสมวัตถุดิบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) เนื่องจากฟองอากาศขนาดใหญ่ช่วยกวนน้ำแก้วให้เข้ากัน แสดงให้เห็นว่าในอุตสาหกรรมแก้วจะใช้พลังงานในด้านการผลิตที่อุณหภูมิสูงตลอด 24 ชั่วโมงพลังงานที่ใช้ในการหลอมแก้วคิดเป็นร้อยละ 80 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด ถ้าสามารถจัดการด้านการลดพลังงานในเตาหลอมแก้วได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก็สามารถลดต้นทุนด้านพลังงานได้ เช่น การปรับปรุงสูตรแก้วให้ใช้พลังงานในการหลอมลดลง และการใช้รีเจนเนอเรเตอร์ เป็นต้น

เตาที่ใช้หลอมแก้วมักมีส่วนของรีเจนเนอเรเตอร์ เพื่อประหยัดเชื้อเพลิงโดยเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศเย็นที่จะใช้เผาไหม้ใหม่ หน้าที่ของรีเจนเนอเรเตอร์คือนำความร้อนจากก๊าซที่ออกจากภายใน

เตาหลอม แทนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศ แต่นำกลับมาเก็บไว้ภายในรีเจนเนอเรเตอร์ที่ประกอบด้วยชั้นของวัสดุทนไฟมาใช้ใหม่เพื่อสันดาปเชื้อเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงเตาหลอมแก้วที่มีส่วนของรีเจนเนอเรเตอร์ด้านหลัง (End-port regenerative furnace)

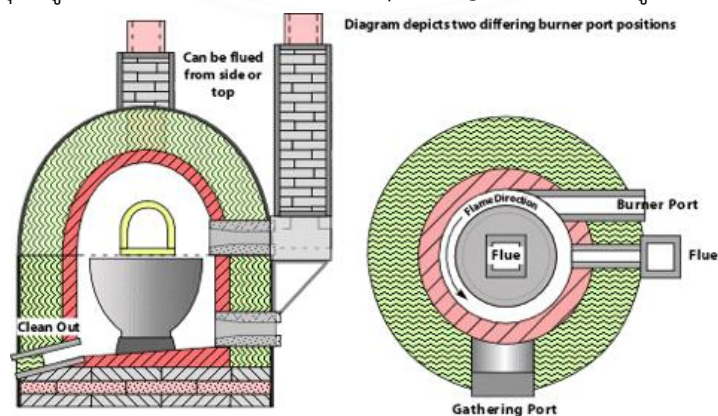
ที่มา : www.glassglobal.com/consulting/reports/technology

2.4 ประเภทของเตาหลอมแก้ว

ในอุตสาหกรรมแก้วมีประเภทของเตาหลอมอยู่ 2 ชนิด ดังนี้

2.4.1 Discontinuous Furnace

เตาหลอมแบบหม้อ (Pot Furnace) ใช้ในกับอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ผลิตแบบไม่ต่อเนื่องและผลิตแก้วในปริมาณน้อย โดยหลอมและใส่ฟองอยู่ในหม้อไฟฟ้าเดียวกันทำให้ควบคุมบรรยากาศภายในได้แต่ได้ง่ายเนื่องจากไม่เกิดแก๊สจากการสันดาปของเชื้อเพลิง เหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความบริสุทธิ์สูงและแก้วที่ใช้งานทางแสง (Optical glass) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เตาหลอมแบบหม้อ (Pot Furnace)

ที่มา : <https://www.glassnotes.com/notes.html>

2.4.2 Continuous Furnace

เตาประเภทนี้ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีการผลิตแก้วอยู่ตลอดเวลา มักใช้ร่วมกับเครื่องขึ้นรูปอัตโนมัติ เช่น container glass, fiber glass, glass wool เป็นต้น โดยเตาหลอมประเภทนี้มีพื้นที่สำหรับกระบวนการหลอมเป็นสัดส่วนแน่นอน ใช้ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในการหลอมวัตถุดิบให้เป็นน้ำแก้วแล้วไล่ฟองอากาศเนื่องจากการสลายตัวของวัตถุดิบเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นน้ำแก้วจะถูกดึงไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวเพื่อให้ น้ำแก้วมีความหนืดเหมาะสมสำหรับกระบวนการขึ้นรูปต่อไป

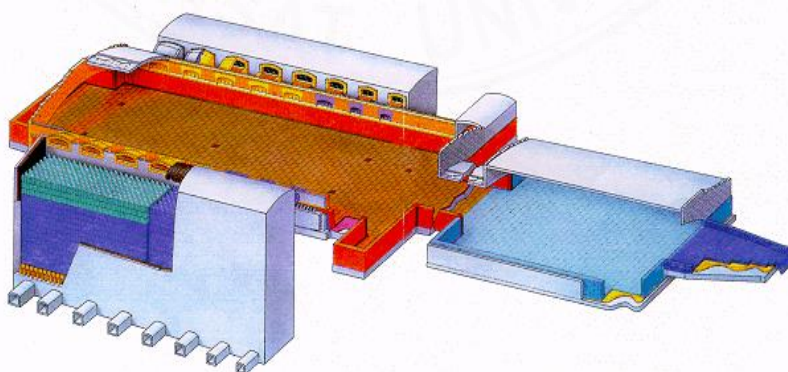
ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่แม้มีการถ่ายเทความร้อนให้กับน้ำแก้วแล้ว จึงได้มีการนำกลับมาใช้ใหม่โดยนำไปอุ่นอากาศสำหรับการสันดาปต่อไป ซึ่งสามารถแบ่งประเภทเตาหลอมแบบนี้ได้เป็น 2 แบบ ขึ้นกับชนิดตัวอุ่นอากาศ ได้แก่

1. รีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative)

รีเจนเนอเรทีฟ คือ ระบบที่มีตัวอุ่นอากาศ (regenerator) ต่อเข้ากับเตาหลอม โดยภายในตัวอุ่นอากาศ (regenerator) ประกอบด้วยอิฐทนไฟ (checker) ที่วางต่อกันเป็นชั้น ๆ โดยข้างหนึ่งของตัวอุ่นอากาศจะให้ความร้อนเพื่อหลอมวัตถุดิบให้กลายเป็นน้ำแก้ว และตัวอุ่นอากาศ (regenerator) อีกข้างหนึ่งจะกักเก็บความร้อนจากการหลอมวัตถุดิบไว้ เมื่อมีความร้อนสูงมากพอจะมีการสลับหัวเผาเชื้อเพลิง (burner) เพื่อสันดาปต่อไปทันที จะทำการสลับหัวเผาเชื้อเพลิง (burner) เช่นนี้ทุก ๆ 20-30 นาทีไปเรื่อย ๆ แบบรีเจนเนอเรทีฟ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ แบ่งตามตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์

(1) Side-port-fired furnace

คือตัวอุ่นอากาศ (Regenerator) ต่อเข้าด้านข้างของเตาหลอมทั้ง 2 ข้าง แสดงดังรูปที่ 2.9

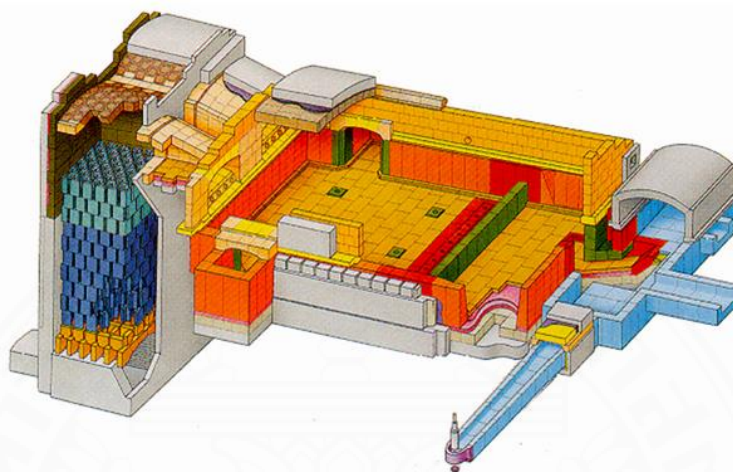


รูปที่ 2.9 ตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์แบบ Side-port-fired furnace

ที่มา : <https://www.glassglobal.com/consulting/reports/technology/>

(2) End-port-fired furnace

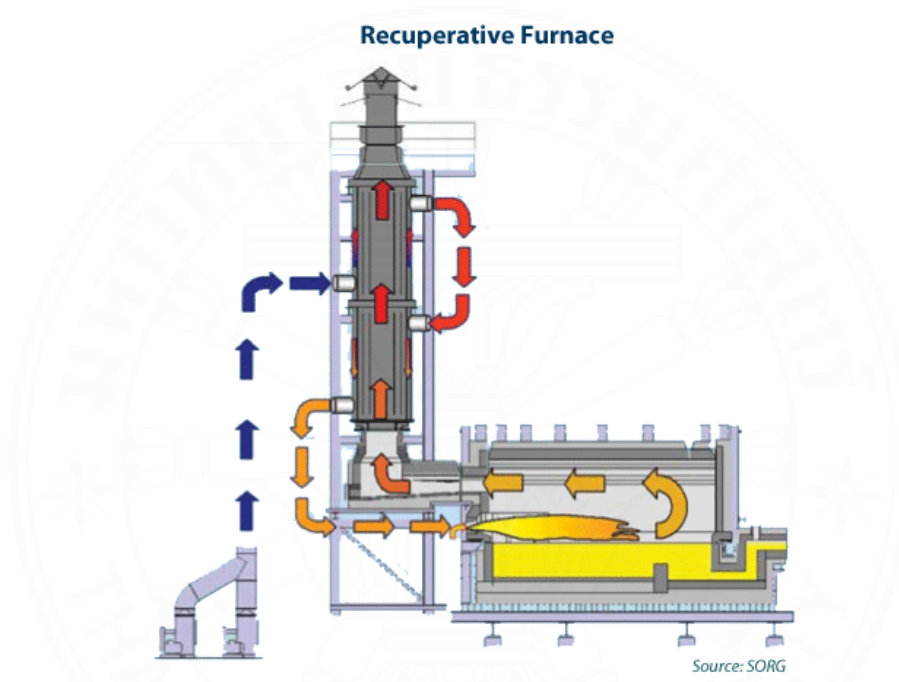
คือตัวอุ่นอากาศ (Regenerator) ต่อเข้าทางด้านหลังของเตาหลอม ทำให้มีการหมุนเวียนของความร้อนเป็นรูปตัว U และเป็นประเภทของเตาที่ใช้ในการทดลองนี้ด้วย แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งของรีเจนเนอเรเตอร์แบบ End-port-fired furnace
ที่มา : <https://www.glassglobal.com/consulting/reports/technology/>

2.รีคิวเพอเรทีฟ (Recuperative)

เตาหลอมแบบนี้จะมีหัวเผาเชื้อเพลิง (Burner) ด้านเดียว มีตัวอุ่นอากาศที่เรียกว่า Recuperator เป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศเย็นสำหรับการสันดาปให้เกิดความร้อนสูงในการหลอมวัตถุดิบ จากนั้นแก๊สที่ผ่านการสันดาปแล้วจะไหลออกทางปล่องระบายอากาศที่มีอากาศเย็นไหลผ่านปล่องระบายอากาศเมื่อได้รับความร้อนจากแก๊สที่ผ่านการสันดาปแล้วจะถ่ายเทความร้อนต่อให้กับอากาศที่เย็นเป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างต่อเนื่องไม่มีการกลับทิศแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative) แสดงดังรูปที่ 2.11

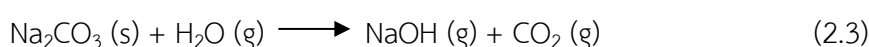


รูปที่ 2.11 เตาหลอมแบบรีคิวเพอเรทีฟ

ที่มา : <http://ietd.iipnetwork.org/content/recuperative-furnaces>

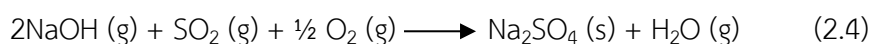
2.5 ฟุ้งจากรีเจนเนอเรเตอร์

ในช่วงการหลอมวัตถุดิบ องค์ประกอบของทางเคมีของวัตถุดิบที่ระเหยออกมาได้ง่ายจากน้ำ แก้วโซดาไลม์ ได้แก่ สารประกอบที่มีอัลคาไลน์ ยกตัวอย่างเช่น การเกิดโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากการสลายตัวของโซเดียมคาร์บอเนตทำปฏิกิริยากับไอน้ำ ดังสมการ (2.3)



โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กลายเป็นไอแล้วทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจน ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของวัตถุดิบที่มีซัลเฟต เมื่อก๊าซเหล่านี้ถูกพามาด้วยบริเวณรีเจนเนอเรเตอร์

เรเตอร์ของเตาซึ่งอุณหภูมิต่ำ จะเกิดเป็นฝุ่นที่มีองค์ประกอบทางเคมีเป็นโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ดังสมการ (2.4)



การเกิดฝุ่นเหล่านี้บริเวณรีเจนเนอเรเตอร์ของเตาปริมาณมากจะทำให้ประสิทธิภาพของเตาหลอมลดลง จึงต้องมีการกำจัดโดยการตักออกจากรีเจนเนอเรเตอร์และเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและค่าเช่าถังเก็บฝุ่นก่อนขนย้าย รวมแล้วคิดเป็นค่าใช้จ่าย 1,500-2,000 บาท ต่อตัน คิดจากอุตสาหกรรมแก้วทั้งประเทศประมาณ 6 ล้านตันต่อปี ฝุ่นที่เกิดขึ้นจะมีประมาณ 6,000 ตันต่อปี ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการกำจัดฝุ่นประมาณ 10 ล้านตันต่อปี หากนำฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายสารลดฟองชนิดโซเดียมซัลเฟตที่เติมอยู่ในวัตถุดิบแก้วอยู่แล้วและสามารถทำหน้าที่เป็นฟลักซ์หรือตัวลดอุณหภูมิในการหลอมวัตถุดิบแก้วได้ เนื่องจากปฏิกิริยาอุทกวิเคราะห์ซิลิกากับโซเดียมซัลเฟตเกิดที่อุณหภูมิต่ำ ถ้านำฝุ่นเหล่านี้นำกลับมาใช้ใหม่เป็นวัตถุดิบในการหลอมแก้ว จะเป็นการช่วยลดมลพิษ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดได้ และการลดต้นทุนค่าพลังงานขั้นต่ำได้ประมาณร้อยละ 2 ตัวอย่างฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่ได้จากการผลิตแก้วโซดาโลม

2.6 เถ้าขานอ้อย

เถ้าขานอ้อย (Bagasse ash) เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตน้ำตาลจากกากขานอ้อยที่เหลือทิ้งจากการหีบอ้อยผลิตน้ำตาล นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้า โดยปริมาณผลผลิตอ้อยที่เป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศที่ปลูกกันมาก มีปริมาณทั้งหมดกว่า 100 ล้านตันต่อปี ผ่านการเผาขานอ้อยเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าจะเหลือเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0.6 ของน้ำหนักอ้อย หรือประมาณ 600,000 ตันต่อปี ส่วนที่

เป็นเถ้าขานอ้อยเหลือจัดเป็นวัสดุเหลือทิ้ง มีลักษณะเป็นฝุ่นขนาดเล็ก ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้ ถ้าไม่มีการกำจัดของเสียหรือนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีหลักของเถ้าขานอ้อย คือ ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) รวมกันมากกว่ากึ่งหนึ่ง โดยซิลิกาอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ที่เหลือเป็น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) จึงมีการนำเถ้าขานอ้อยไปใช้เป็นวัสดุพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรมซีเมนต์อย่างกว้างขวาง ในประเทศมีปริมาณเถ้าขานอ้อยมากพอสำหรับการพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไป ตัวอย่างเถ้าขานอ้อยแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 เถ้าขานอ้อย (Bagasse ash)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผ่านมาที่นำของเสียจากฝุ่นซึ่งผ่านการดักจับด้วยระบบ filter dust ในเตาหลอมแก้ว ได้แก่ งานวิจัยของ Schaeffer^[1] และงานวิจัยของ Jakubikova และคณะ^[2] ได้นำเอาฝุ่นในเตาหลอมแก้วชนิดกลุ่มขวดแก้ว มาใช้เป็นวัตถุดิบในการหลอมแก้ว โดยมีการศึกษาการแทนที่ของฝุ่นในวัตถุดิบโซเดียมซิลเฟตที่ปริมาณร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าการแทนที่โซเดียมซิลเฟตด้วยฝุ่นนี้ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติด้านความร้อนของส่วนผสมแก้วและการหลอมแก้ว

นอกจากนี้ม้งานวิจัยที่นำของเสียจากอุตสาหกรรมจากการเกษตรจากอ้อยไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วและแก้วเซรามิก ได้แก่

งานวิจัยของ Sharma และคณะ^[3] ได้ศึกษาการนำเถ้ากลบและเถ้าจากใบอ้อย (Sugarcane leaves ash) ในสัดส่วน 50 ต่อ 50 มาผลิตแก้วและแก้วเซรามิกที่มีเฟสไทรไดไมต์ (Tridymite) และคริสโตบาลิต (Cristobalite) สำหรับการใช้งานด้าน Light Emitting diodes (LEDs) และแก้วใช้งานที่อุณหภูมิสูง

งานวิจัยของ Souza และคณะ^[4] ได้ศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยมาผลิตเซรามิก โดยใช้แทนที่ในส่วนวัตถุดิบที่ไม่ให้ความเหนียว เช่น เฟลด์สปาร์ และควอตซ์ และนำมาขึ้นรูปด้วยการให้แรงอัด พบว่าการเติมเถ้าขานอ้อยช่วยลดเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานก่อนและหลังเผาได้

งานวิจัยของ Teixeira และคณะ^[5] ได้ศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยมาผลิตกลาสเซรามิก ชนิดเฟสวอลลาสโตไนต์ (Wollastonite) โดยนำเถ้าขานอ้อยประมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักผสมกับ แมกนีเซียมออกไซด์กับโซเดียมออกไซด์ สามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะคล้ายหินอ่อน สีน้ำตาลอมเขียว และวาวแบบแก้ว มีความแข็งในระดับ 6 ของ Mors' scale สามารถนำมาใช้งานเป็นเคลือบเซรามิกและเซรามิกสำหรับงานก่อสร้างได้

งานวิจัยของ Teixeira และคณะ^[6] ได้ศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยมาผลิตกลาสเซรามิก ชนิดเฟสมัลไลต์และวอลลาสโตไนต์ โดยเตรียมแก้วพริตจากส่วนผสมเถ้าขานอ้อยประมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักร่วมกับหินปูนและโปแตสเซียมคาร์บอเนต ผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตแก้วเซรามิกได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 900 องศาเซลเซียส

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะนำฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์และเถ้าขานอ้อยมาทดแทนวัตถุดิบหลักในการหลอมแก้ว ทำการศึกษาและทดสอบเพื่อหาสูตรแก้วที่ได้มาตรฐานทางการค้า ในบทนี้จะอธิบายถึงวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง ขั้นตอนการหลอมแก้ว และขั้นตอนการวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

ฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์และเถ้าขานอ้อยถูกนำมาทดแทนบางส่วนในวัตถุดิบหลักของแก้วซึ่งได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) จากทรายแก้ว โซดาแอช (Na_2CO_3) โดโลไมต์ ($(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$) และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

3.1.1 ฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์

นำเถ้าขานอ้อยและฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ จากโรงงานอุตสาหกรรมแก้ว จังหวัดระยอง นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยนำฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์มาร่อนตะแกรงคัดขนาด เพื่อแยกเอาส่วนที่เป็นเศษวัสดุหินไฟออกไป จากนั้นนำเข้าตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีเป็นออกไซด์ของธาตุชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence, XRF) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction, XRD)

3.1.2 เถ้าขานอ้อย

เถ้าขานอ้อยนำมาวิเคราะห์วัดน้ำหนักปริมาณสารอินทรีย์ที่หายไปจากการเผาไหม้ (Loss of Ignition, LOI) จากนั้นนำเข้าตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีเป็นออกไซด์ของธาตุชนิดต่าง ๆ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (x-ray fluorescence, XRF) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (x-ray diffraction, XRD) เช่นเดียวกับฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์

3.2 การเตรียมตัวอย่าง

ในการเตรียมตัวอย่างจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกที่เป็นทดลองนำฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์มาแทนในวัตถุดิบหลักในอัตราส่วนร้อยละ 1 2 3 4 5 และ 10 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 3.1 ในการทดลองส่วนที่สองจะทำการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในวัตถุดิบหลักในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 3.2 และในส่วนการทดลองสุดท้ายจะทำการ

เลือกสูตรที่ดีที่สุดในการทดลองส่วนแรกมาทำการแทนที่ด้วยเก้าชานอ้อยในอัตราส่วนร้อยละ 0.5 0.1 1.5 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้หลอมแก้วโดยมีส่วนผสมของฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์

วัตถุดิบ สูตร	ทราย (กรัม)	โซดาแอช (กรัม)	โดโลไมต์ (กรัม)	โซเดียมซัลเฟต (กรัม)	ฝุ่นจากกรีเจนฯ (กรัม)	รวม (กรัม)
STD	61.74	18.11	19.08	1.08	-	100.00
D1	61.12	17.93	18.88	1.06	1.00	100.00
D2	60.50	17.75	18.69	1.05	2.00	100.00
D3	59.89	17.57	18.50	1.04	3.00	100.00
D4	59.27	17.39	18.31	1.03	4.00	100.00
D5	58.65	17.21	18.12	1.02	5.00	100.00
D10	55.56	16.30	17.17	0.97	10.00	100.00

ตารางที่ 3.2 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้หลอมแก้วโดยมีส่วนผสมของเก้าชานอ้อย

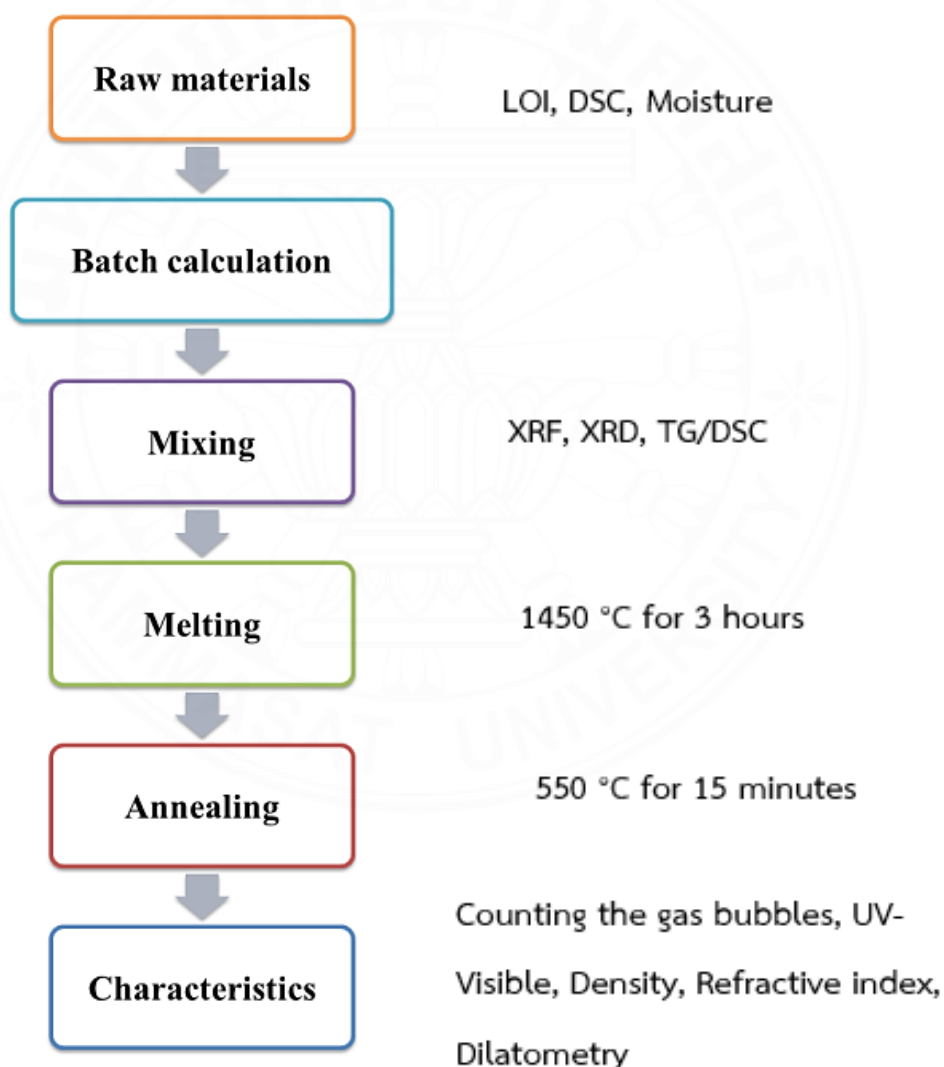
วัตถุดิบ สูตร	ทราย (กรัม)	โซดาแอช (กรัม)	โดโลไมต์ (กรัม)	โซเดียมซัลเฟต (กรัม)	เก้าชานอ้อย (กรัม)	รวม (กรัม)
B0.5	61.43	18.03	18.97	1.06	0.5	100.00
B1.0	61.12	17.94	18.88	1.06	1.0	100.00
B1.5	60.81	17.85	18.78	1.05	1.5	100.00
B2.0	60.51	17.76	18.69	1.05	2.0	100.00
B4.0	59.27	17.40	18.31	1.03	4.0	100.00

ตารางที่ 3.3 ปริมาณส่วนผสมที่ใช้หลอมแก้วโดยมีส่วนผสมของเก้าชานอ้อยโดยปรับจากสูตร 2D

วัตถุดิบ สูตร	ทราย (กรัม)	โซดาแอช (กรัม)	โดโลไมต์ (กรัม)	โซเดียมซัลเฟต (กรัม)	ฝุ่นจากกรีเจนฯ (กรัม)	เก้าชานอ้อย (กรัม)	รวม (กรัม)
DB0.5	60.20	17.67	18.60	1.04	1.99	0.5	100.00
DB1.0	59.90	17.58	18.50	1.04	1.98	1.0	100.00
DB1.5	59.60	17.49	18.41	1.03	1.97	1.5	100.00
DB2.0	59.30	17.40	18.31	1.03	1.96	2.0	100.00
DB4.0	58.09	17.05	17.94	1.01	1.92	4.0	100.00

3.3 การหลอมแก้ว

ผสมวัตถุดิบตามอัตราส่วนต่าง ๆ แล้วผสมวัตถุดิบให้เข้ากันและเทใส่เบ้าหลอม (crucible) วัตถุดิบที่ผ่านการผสมจะถูกใส่ในเบ้าหลอม (Crucible) ที่ทำจากอลูมินา อบให้ความร้อนกับวัตถุดิบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 15 นาที เพื่อป้องกันเบ้าหลอม (Crucible) แตกร้าว จากนั้นนำเข้าเตาหลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเมื่อหลอมแล้วจะทำการอบอ่อน (Annealing) ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 15 นาทีขึ้นไปหรือจนกว่าแก้วจะเย็นตัว เพื่อลดความเค้นภายในแก้ว แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพขั้นตอนการดำเนินงาน

3.4 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

3.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง โดยยิงรังสีเอกซ์เข้าไปในตัวอย่าง ธาตุต่าง ๆ ที่อยู่ในตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วคายพลังงานออกมา โดยพลังงานที่คาย หรือ Fluorescence ที่ออกมานั้นจะมีค่าพลังงานขึ้นกับชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั้น ๆ ทำให้สามารถทราบได้ว่าในตัวอย่างที่ทดสอบนั้นมีธาตุอะไรอยู่บ้าง โดยใช้ Detector วัดค่าพลังงานออกมา



รูปที่ 3.2 เครื่อง X-ray Fluorescence ยี่ห้อ BRUKER รุ่น S2 RANGER

3.4.2 การวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer, XRD)

เทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง เมื่อลำรังสีตกกระทบชิ้นงานตัวอย่างหรืออนุภาค จะเกิดการเลี้ยวเบนของลำรังสีที่มุมต่าง ๆ สะท้อนออกมาทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่าง ๆ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและนำมาศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง โดยในงานวิจัยนี้ใช้ Ceramic Cu X-ray tube , Voltage ที่ 30 kV และ Current ที่ 10 mA โดยมี 2Theta ตั้งแต่ 10 – 70 องศา

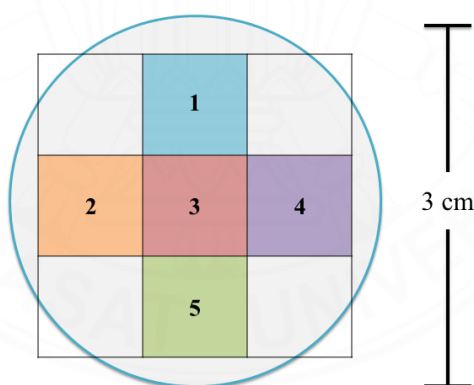


รูปที่ 3.3 เครื่อง Powder X-ray Diffractometer (XRD)

ที่มา : <http://cste.sut.ac.th/2014/?p=1941>

3.4.3 นับฟองอากาศในเบ้าหลอม

การนับฟองก๊าซ ทำเพื่อดูจำนวนฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหลอม หากมีจำนวนฟองก๊าซจากการหลอมน้อย แสดงถึงการหลอมแก้วที่ทำดีกว่าปริมาณฟองจำนวนมาก สำหรับการนับฟองนั้นทำได้โดยการตัดกันเบ้าหลอมออก นำไปส่องด้วยกล้อง Dino-lite และเทียบเป็นพื้นที่ 3x3 ตารางเซนติเมตร เลื่อนนับฟองจาก 5 พื้นที่ และทำการหาค่าเฉลี่ย แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 พื้นที่แสดงการนับฟองอากาศในเบ้าหลอม

3.4.4 การวิเคราะห์จากเครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimetry)

Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดการเปลี่ยนแปลงของ Heat Flow ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน เทียบกับตัวอย่างอ้างอิง โดยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และทางเคมีของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูด

หรือคายความร้อน (endothermic or exothermic processes) โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องยี่ห้อ NETZSCH รุ่น STA 449 F5 อัตราการให้ความร้อน 10 องศาต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



รูปที่ 3.5 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ที่มา : <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/products/simultaneous-thermogravimetry-differential-scanning-calorimetry-sta-tg-dsc/sta-449-f5-jupiter>

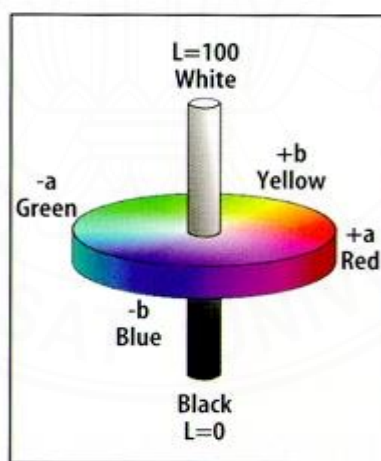
3.4.5 การวิเคราะห์สีแก้วจากเทคนิค UV-Visible spectrophotometer

Ultra violet -Visible Spectrophotometer (UV-VIS) เป็นเทคนิคที่วัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 800 นาโนเมตร ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ ทั้งที่มีสีและไม่มีสี เนื่องจากสารแต่ละชนิดจะดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกันและปริมาณการดูดกลืนรังสีก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสาร การเตรียมตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยส่วนใหญ่จะในรูปของสารละลายบรรจุในภาชนะใส่สารตัวอย่าง (cuvette) และนำเข้าเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง(Absorbance) ในการทดลองนี้ใช้ UV-Visible spectrophotometer ยี่ห้อ Analytik jena รุ่น SPECORD 250 ในช่วงความยาวคลื่น 220 – 800 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่อง UV-Visible spectrophotometer ยี่ห้อ Analytik jena รุ่น SPECORD 250
ที่มา : https://www.labshopthailand.com/product/UV_Vis_Spectrophotometer_-_SPECORD_PLUS

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อวัดคุณภาพสีแก้วในระบบ CIE Lab โดยแก้วใช้ความเข้มของแสงที่ส่องผ่าน (Transmission) หรือ การดูดกลืน (Absorption) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนไปตามความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็น นำมาคำนวณค่าคุณภาพของสี ตัวอย่างการวัดสีแก้วตาม Color space diagram แสดงดังรูปที่ 3.8 และรูปที่ 3.9



Lab model

รูปที่ 3.7 Color space diagram

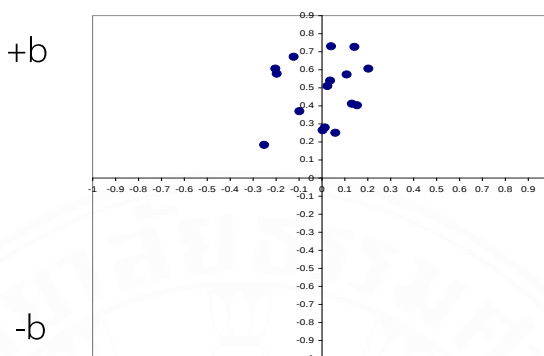
ที่มา : <http://www.glass.dss.go.th/publication/country/ArtC-8.pdf>

L คือ ค่าความสว่าง ค่ายิ่งมากความสว่างจะสูง

a^* คือ ค่าที่บ่งบอกความเขียว - แดง โดย $+a$ คือแดง และ $-a$ คือเขียว

b^* คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความเหลือง - น้ำเงิน โดย $+b$ คือสีเหลือง และ $-b$ คือสีน้ำเงิน

แก้วที่ใส ต้องมีค่า a^* และ b^* เข้าใกล้ศูนย์มากที่สุด นั่นคือไม่มีสีใดปน



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างการวัดสีแก้วตาม Color space diagram

ที่มา : <http://www.glass.dss.go.th/publication/country/ArtC-8.pdf>

3.4.6 การวิเคราะห์ค่าดัชนีหักเหแสง Refractive index

เทคนิคการวัดค่าดัชนีหักเหแสงสามารถวิเคราะห์ได้จากการให้ลำแสงเดินทางผ่านระหว่างชิ้นงานตัวอย่างกับปริซึมที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าชิ้นงานตัวอย่าง จะทำให้เกิดการหักเหขึ้นเนื่องจากความต่างของดัชนีหักเหของตัวอย่างกับปริซึม โดยถ้ามุมของลำแสงที่หักเหออกจากปริซึมมีขนาดใหญ่แสดงว่าตัวอย่างที่วัดมีค่าดัชนีหักเหน้อย ในทางกลับกันถ้ามุมของลำแสงที่หักเหออกจากปริซึมมีขนาดเล็กแสดงว่าตัวอย่างมีค่าดัชนีหักเหมาก ซึ่งเกิดจากการที่ค่าดัชนีหักเหระหว่างตัวอย่างกับปริซึมถ้าต่างกันมากจะทำให้แสงส่งผ่านไปยังสเกลได้น้อยและเกิดแถบสว่างบนสเกลน้อย จึงอ่านค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างได้น้อยไปด้วย ในทางตรงกันข้ามถ้าค่าดัชนีหักเหระหว่างตัวอย่างกับปริซึมถ้าต่างกันน้อยจะทำให้แสงส่งผ่านไปยังสเกลได้มากและเกิดแถบสว่างบนสเกลมากขึ้น จึงอ่านค่าดัชนีหักเหของตัวอย่างได้มากขึ้นตามไปด้วย^[14] ในการทดลองนี้ใช้ เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสง Abbe refractometer ยี่ห้อ Atago รุ่น T1 แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหแสง Abbe refractometer ยี่ห้อ Atago รุ่น T1
ที่มา : <https://www.fishersci.se/shop/products/abbe-nar-1t-liquid-refractometer/10719200>

3.4.7 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วเมื่อได้รับความร้อน (Thermal expansion coefficient or COE)

นำชิ้นงานแก้วที่ผ่านการหลอมและเทน้ำแก้วเป็นชิ้นงานในแม่แบบ จากนั้นอบอ่อนแล้วตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดหน้าตัด 5 mm x 5 mm ความยาว 30-50 mm ในการทดลองนี้ทำการทดลองวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของชิ้นงานแก้วเมื่อได้รับความร้อน (α) ค่า glass transition temperature (T_g) และ ค่า dilatometric softening point (T_d) ด้วยเทคนิค Dilatometry ยี่ห้อ Netzsch DIL 402 Expedit ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความยาวชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับความยาวเริ่มต้น ($\Delta L/L_0$) เทียบกับอุณหภูมิ โดยค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของชิ้นงานแก้วจากความชันของกราฟ สำหรับค่า T_g หาได้โดยจุดเปลี่ยนของความชันของกราฟ และค่า T_d หาจากจุดที่ความยาวชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปลดลงเนื่องจากการอ่อนตัวของแก้ว ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดค่า Dilatometry ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DIL 402 Expedit แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดค่า Dilatometry ยี่ห้อ Netzsch รุ่น DIL 402 Expedit
ที่มา : <https://analyzing-testing.netzsch.com/pl/produkty/dilatometry-dil/dil-402-expedit-select-supreme>

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิจัยส่วนของการนำฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มาแทนในวัตถุดิบหลัก

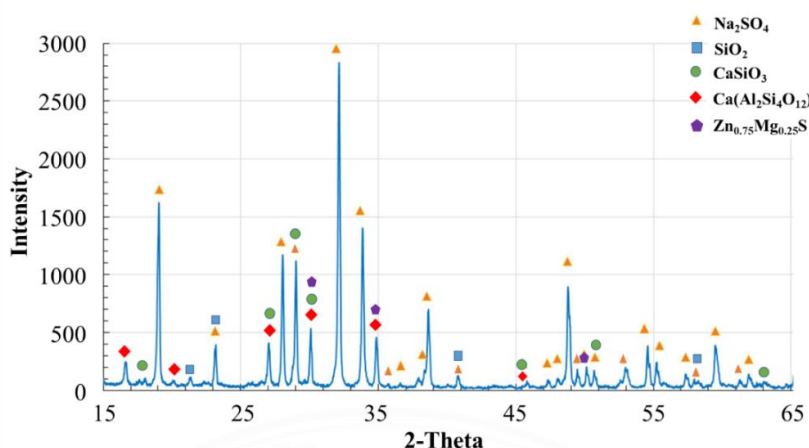
4.1.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์

ผลจากการวิเคราะห์ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย SO_3 และ Na_2O ปริมาณ 37.6% และ 32.7% ตามลำดับ องค์ประกอบออกไซด์รองถัดมา คือ CaO Al_2O_3 MgO SiO_2 Fe_2O_3 Cr_2O_3 และ Sb_2O_3 มีปริมาณ 8.7% 6.0% 4.9% 4.4% 0.61% 0.26% และ 0.64% ตามลำดับ ซึ่งคาดว่ามาจากอนุภาควัตถุดิบอื่น ๆ ขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในเตา หรือ อาจจะมาจกเศษวัสดุทนไฟขนาดเล็กที่อยู่ในรีเจนเนอเรเตอร์

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์

Oxide	SiO_2	Al_2O_3	ZrO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
wt%	4.43	6.02	0.21	8.77	4.94	32.72	1.37
Oxide	Fe_2O_3	SO_3	Cr_2O_3	P_2O_5	ZnO	Sb_2O_3	PbO
wt%	0.61	37.61	0.26	0.28	1.80	0.64	0.07

องค์ประกอบเฟสหลักของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ได้ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค X-ray diffraction ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.1 พบว่าเฟสหลักของฝุ่นคือโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และเฟสรองคือแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3), ซิลิกา (SiO_2) และ ZnS จากงานก่อนหน้านี้นอกจาก Na_2SO_4 แล้ว ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์อาจประกอบด้วยส่วนประกอบอื่น ๆ ที่มีความเข้มข้นต่ำที่ความดันไอสูง เช่น Zn , Pb ^[7]



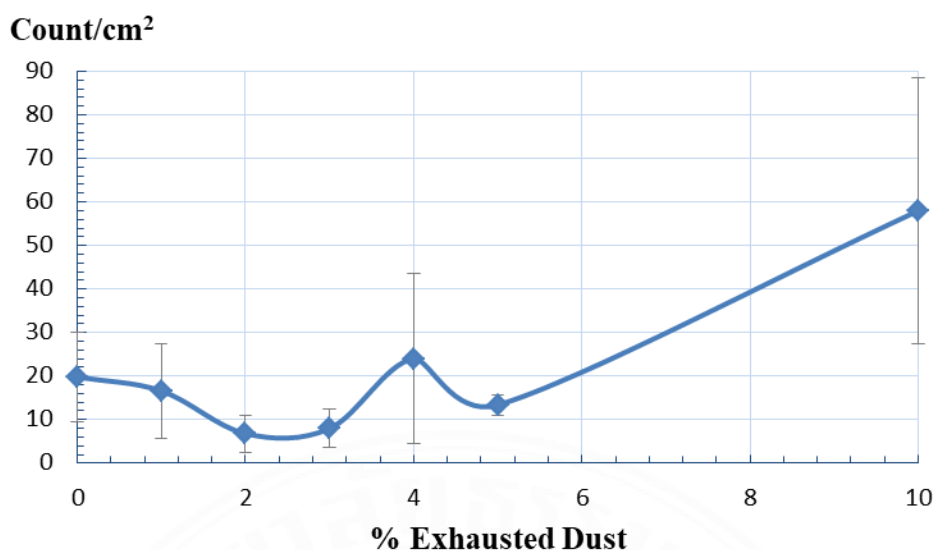
รูปที่ 4.1 XRD pattern ของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์

4.1.2 ปฏิกริยาเมื่อแทนที่ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงในวัตถุดิบหลัก

จากการนำฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มาแทนที่ในวัตถุดิบหลักที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก หลังทำการหลอมให้ความร้อนที่ 1,450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าปริมาณฝุ่นที่เติมเข้าไปมีผลต่อจำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยฟองอากาศที่เหลือนี้นั้นส่วนใหญ่มาจากการสลายตัวของวัตถุดิบ เช่นการสลายตัวของคาร์บอนเนต ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าเมื่อเติมฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงไปร้อยละ 2 ถึง 3 โดยน้ำหนัก จำนวนฟองอากาศที่เหลือนั้นในผลิตภัณฑ์แก้วจะลดลง และเมื่อปริมาณของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มากกว่าร้อยละ 3 จำนวนฟองอากาศที่เหลือนั้นในผลิตภัณฑ์แก้วจะเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สิ่งนี้บ่งชี้ว่าการเติมฝุ่นที่ระบายออกจำนวนเล็กน้อยจะช่วยให้หลอมได้เป็นเนื้อเดียวกัน

จำนวนฟองอากาศที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญในผลิตภัณฑ์แก้ว เนื่องจากการเพิ่มฝุ่นที่ร้อยละ 2 ถึง 3 โดยฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์นี้มีโซเดียมซิลิเกตเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นตัวทำปฏิกิริยาปล่อยฟองอากาศของ SO_2 และ O_2 ที่อุณหภูมิสูง และฟองอากาศที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 นี้จะทำให้หน้าในการขยายขนาดของฟองอากาศที่มีอยู่เดิมให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยตัวเคลื่อนออกจากผิวแก้วได้ง่ายขึ้น สารลดฟองก๊าซทำหน้าที่สลายตัวทำให้เกิดฟองก๊าซเหล่านี้รวมกับฟองก๊าซขนาดเล็กในน้ำแก้วกลายเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ (ค่า d มาก) สามารถลอยขึ้นสู่ผิวน้ำแก้วได้เร็วขึ้น (ค่า v มาก) ตามสมการของ Stokes

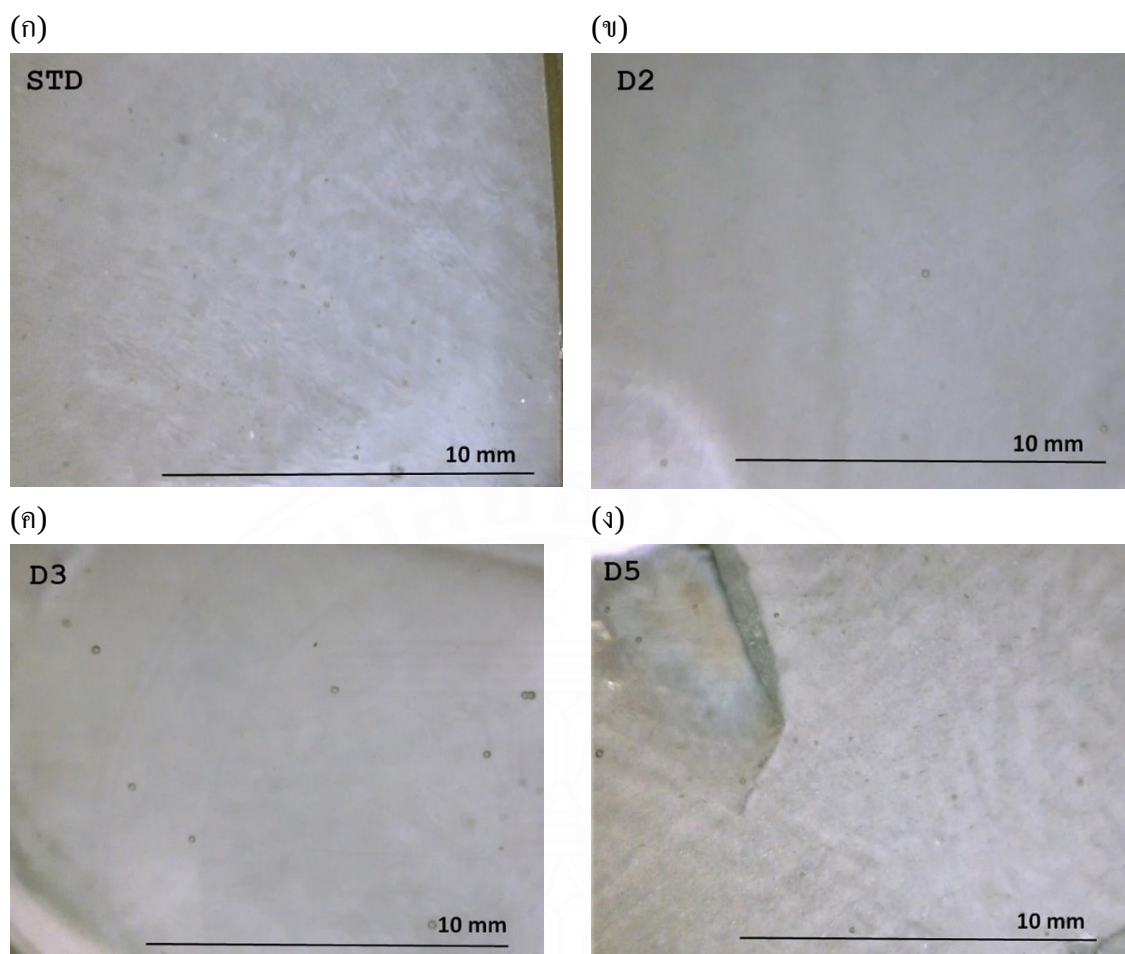
$$v = \frac{2g\rho d^2}{9\eta} \quad (4.1)$$



รูปที่ 4.2 จำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว เมื่อแทนที่วัตถุดิบหลักด้วยฝุ่นจากรีเจน -
เนอเรเตอร์ร้อยละ 0, 1, 2, 3, 4, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก

ส่วนผสมที่มีการเติมฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ซึ่งมี Na_2SO_4 จะเป็นการเพิ่มปริมาณ Na_2O ในส่วนผสมวัตถุดิบ ทำให้น้ำแก้วมีแนวโน้มที่มีความหนืด (η) ต่ำลงจากปริมาณโซเดียมที่เพิ่มขึ้นในส่วนผสมวัตถุดิบ ฟองอากาศในน้ำแก้วจึงสามารถเคลื่อนที่ไปที่ผิวหน้าแก้วได้ง่ายขึ้นดังสมการของ Stokes เพราะความหนืดของแก้วส่งผลต่ออัตราเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศ เมื่อความหนืดของน้ำแก้วต่ำ อัตราเร็วในการลอยตัวของฟองอากาศออกไปที่ผิวแก้วได้เร็วขึ้น จำนวนฟองอากาศในชิ้นงานตัวอย่างจึงมีปริมาณลดลง และพบฟองอากาศขนาดใหญ่กว่าฟองอากาศที่พบในชิ้นงานแก้วสูตรมาตรฐาน

นอกจากนี้ จากงานวิจัยของ Laimbock และ Hujova et al. กล่าวว่าโซเดียมซิลเฟตที่เติมลงไปในวัตถุดิบ ซิลเฟตที่หลอมละลายยังสามารถก่อตัวเป็นฟิล์มหลอมเหลวบนพื้นผิวแก้วหลอมเหลวได้ ฟิล์มนี้อาจช่วยละลายเกรนของควอตซ์และปล่อยฟองออกจากพื้นผิวหลอมเหลว อย่างไรก็ตามการเติมฝุ่นที่มีโซเดียมซิลเฟตในปริมาณมากอาจทับซ้อนกันเป็นชั้นหนาขึ้นบนพื้นผิวแก้วหลอมเหลวซึ่งอาจยับยั้งการปลดปล่อยฟองอากาศในระหว่างการหลอม^[8-9] ดังนั้นเมื่อยังใส่ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ในปริมาณที่มากขึ้นโดยแทนที่ส่วนผสมวัตถุดิบจนเกินขีดจำกัดด้านประสิทธิภาพการไล่ฟองของโซเดียมซิลเฟต ทำให้ฟองก๊าซขนาดเล็กมีปริมาณมากเกินไป ส่งผลให้ยังคงเหลือฟองอากาศที่กำจัดออกไปไม่หมด



รูปที่ 4.3 ภาพฟองอากาศบนพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งเตรียมจากปริมาณฝุ่นตามสูตรต่าง ๆ (ก) มาตรฐาน (ข) D2 (ค) D3 และ (ง) D5

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในการเกิดปฏิกิริยาทางความร้อนของสูตรวัตถุดิบที่แทนที่ด้วยฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) แสดงเทอร์โมแกรมของชุดแก้วโดยเติมฝุ่นร้อยละ 0 และ 2 โดยน้ำหนัก ผลลัพธ์ถูกบันทึกในรูปแบบของเส้นโค้ง DSC/TG ในฟังก์ชันของอุณหภูมิเพื่อศึกษาพฤติกรรมของสูตรวัตถุดิบในระหว่างการให้ความร้อน พิกัดจุดความร้อนตัวแรกที่ 90 องศาเซลเซียส เกิดจากการระเหยของความชื้นที่มีอยู่ในวัตถุดิบพบทั้งในของผสม STD และ D2 ปริมาณความชื้นประมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของการสูญเสียมวล ต่อมาที่อุณหภูมิประมาณ 424 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาดูดความร้อนระหว่างโซเดียมคาร์บอเนต (โซดาแอช) และโดโลไมต์ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ที่ก่อให้เกิดการก่อรูปของคาร์บอเนตได้แก่ $\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2$ และ $\text{MgNa}_2(\text{CO}_3)_2$ ซึ่งถูกสังเกตพบในทั้ง STD และ D2 จากพบพิกัดจุดความร้อนที่อุณหภูมิ 574 องศาเซลเซียส สำหรับของผสม STD และ D2 เกิดการสูญเสียมวลเล็กน้อยเป็นผลมาจากปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอเนตกับควอตซ์และการปล่อย CO_2 โดยเกิดการเปลี่ยนแปลงจาก β -ควอตซ์ เป็น α -ควอตซ์ โดยปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิ 650-660 องศาเซลเซียส ของการ

เกิดปฏิกิริยาระหว่าง ททราย (SiO_2) กับโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) แล้วจึงรวมตัวอยู่ในรูปของ Na_2SiO_3 และ CO_2 ผลลัพธ์สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้โดย Kusnierz et al.^[10]

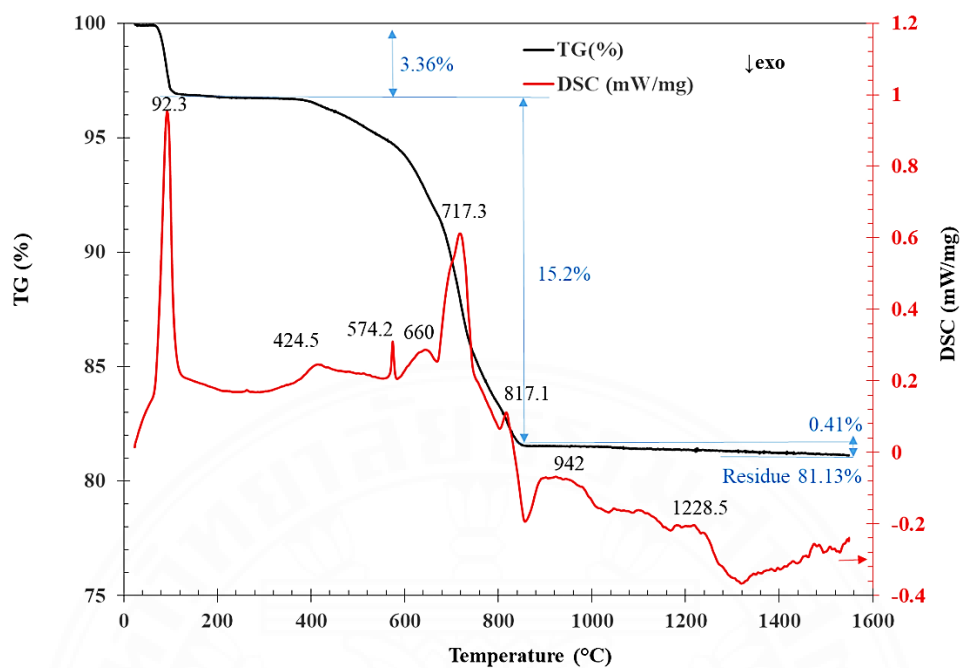
ต่อมาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะพบการสลายตัวของซิลิกาของโดโลไมต์บนพิกัดความร้อนสำหรับทั้งสูตรวัตถุดิบ STD และ D2 ที่ 717 และ 817 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ปริมาณทั้งหมดขององค์ประกอบก๊าซที่ปล่อยออกมาจาก 100 ถึง 850 องศาเซลเซียส เท่ากับร้อยละ 15.2 โดยน้ำหนักในสูตร STD และร้อยละ 14 โดยน้ำหนักในสูตร D2 จากนั้นที่อุณหภูมิประมาณ 950-1,250 องศาเซลเซียส จะเป็นจุดยูเทคติกหลอมละลายร่วมกันของ Na, Ca และ Mg ซิลิเกต สังเกตจากการละลายของ SiO_2 , CaO และ MgO ในการหลอมยูเทคติกจะเป็นปฏิกิริยาคัดความร้อน จากการเพิ่มฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์จำนวนเล็กน้อยในสูตร D2 พิกัดความร้อนของกราฟ DSC บ่งชี้ว่ามีการเลื่อนพิกัดความร้อนไปทางซ้าย สังเกตการเปลี่ยนแปลงจลนศาสตร์ของกระบวนการและอุณหภูมิปฏิกิริยาที่เปลี่ยนจาก 1,228 องศาเซลเซียสในสูตร STD เป็น 1,111 องศาเซลเซียสในสูตร D2

จากงานวิจัยของ Merkerji^[11] โซเดียมซิลเฟตทำปฏิกิริยากับเม็ดซิลิกาหยาบที่เหลืออยู่โดยปฏิกิริยาต่อไปที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส

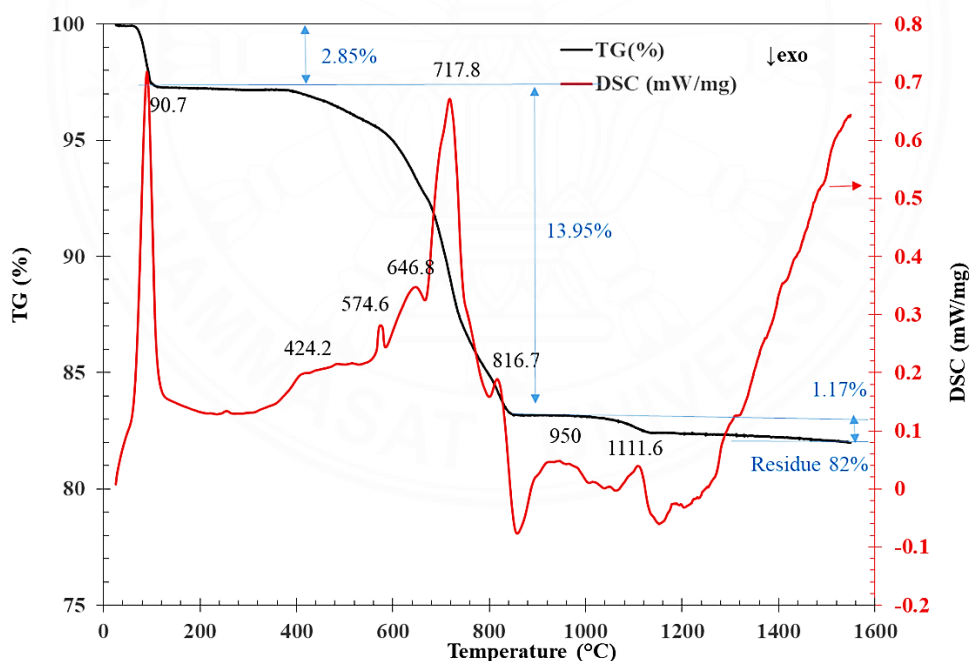


ในขั้นตอนของการหลอมเหลวและการรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันของการหลอมที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ผลลัพธ์ของ TG เผยให้เห็นปริมาณการเพิ่มของก๊าซที่สูงขึ้นร้อยละ 1.17 ในสูตรที่มีฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ D2 เมื่อเทียบกับสูตร STD ที่มีร้อยละ 0.41 จากสมการ (4.2) การเพิ่มขึ้นของก๊าซทำให้เกิดการกวนละลายเพิ่มเติมและอำนวยความสะดวกในการผสมทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งยังช่วยในการละลายของอนุภาคทราย^[9] ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่าการเติมฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์จำนวนเล็กน้อยจะลดอุณหภูมิของปฏิกิริยาการหลอมเหลวของกระบวนการหลอมแก้ว ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนฟองอากาศที่ลดลงซึ่งพบเมื่อมีฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ในปริมาณเล็กน้อยในสูตรและยังส่งผลให้ใช้พลังงานลดลงระหว่างการหลอม

(ก)



(ข)

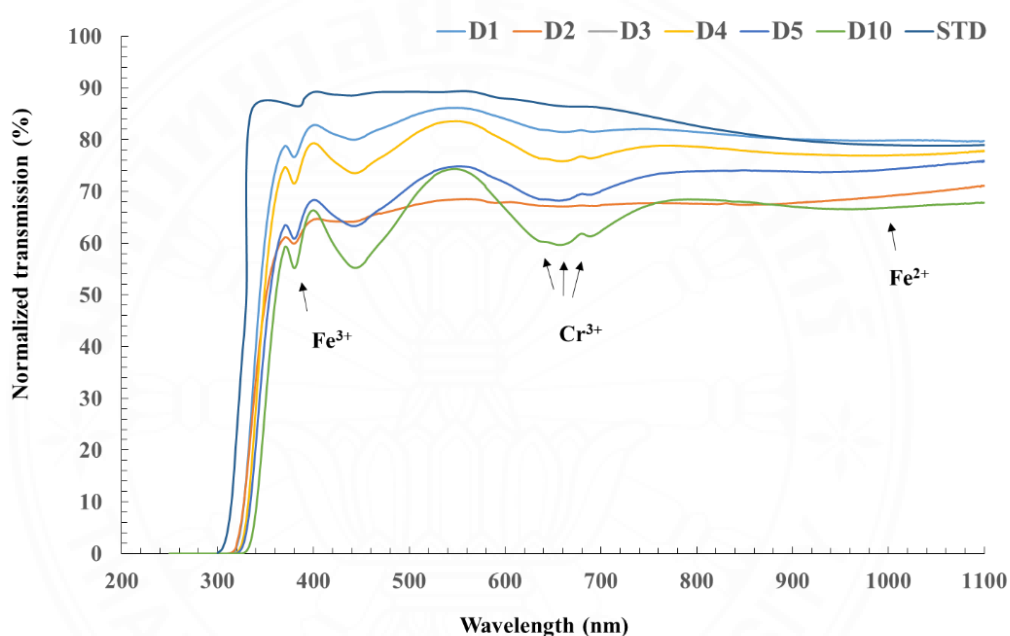


รูปที่ 4.4 กราฟ TG/DSC ของสูตรแก้วที่แทนที่ด้วยฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ (ก) STD และ (ข) D2

4.1.3 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างแก้วจากสูตรที่แทนฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงในวัตถุดิบหลัก

จากการวิเคราะห์สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.5 อธิบายได้ว่าสเปกตรัมแสงของตัวอย่างแก้วที่มีการแทนฝุ่นลงไป แสดงการดูดกลืนสูงสุดที่ 380 นาโนเมตรซึ่งเป็น

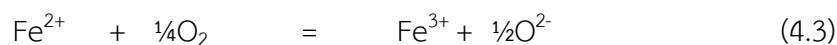
ช่วงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ช่วงการดูดกลืนที่ประมาณ 650 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของ Cr^{3+} และช่วงการดูดกลืนช่วงกว้างที่เห็นได้ไม่ชัดเจนนักในช่วงประมาณ 1,100 นาโนเมตรเป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มีเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 0.61 และ 0.26 ตามลำดับ จึงส่งผลให้ปริมาณฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่เพิ่มขึ้นในสูตรแก้วทำให้ปริมาณเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ในตัวอย่างแก้วที่สูงขึ้น ซึ่งเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ในสูตรแก้วส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์แก้วตามปฏิกิริยารีดอกซ์^[12]



รูปที่ 4.5 สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงไปในวัตถุดิบหลัก

จากการนำผลิตภัณฑ์แก้วที่ได้จากการหลอมจากสูตรในตารางที่ 3.1 มาทำการวิเคราะห์ค่า CIE Lab ตามระบบ CIE แกน $+a^*$ จะสัมพันธ์กับสีแดง และ $-a^*$ สอดคล้องกับสีเขียว แกน $+b^*$ สัมพันธ์กับสีเหลือง และ $-b^*$ สัมพันธ์กับสีน้ำเงิน ความสว่าง L^* มีตั้งแต่ 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว) ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าค่าของสีเหลือง ($+b^*$) และสีเขียว ($-a^*$) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ โดยเมื่อปริมาณฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์เพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก สีแก้วจะเปลี่ยนจากไม่มีสีไปเป็นโทนสีเขียวเหลือง ซึ่งสอดคล้องกับค่า CIE Lab ดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากผลลัพธ์ของ XRF ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มีไอรอนออกไซด์ร้อยละ 0.61 ตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 นั้นหมายถึงปริมาณฝุ่นที่เพิ่มขึ้นในสูตรแก้วส่งผลให้มีปริมาณธาตุเหล็กออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก้วที่สูงขึ้น เหล็กออกไซด์ในสูตรแก้วมีบทบาทในสีแก้วตามปฏิกิริยารีดอกซ์^[12] นอกจากนี้การสลายตัวเฟส Na_2SO_4 ที่พบอยู่ในฝุ่น

รีเจนเนอเรเตอร์ดังสมการ (4.2) เกิดเป็นก๊าซ O_2 ที่มากขึ้น ทำให้สมการรีดอกซ์ของเหล็กในสมการ (4.3) ไปทางด้านขวามือ โดยเปลี่ยนเหล็ก Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} แก้วตัวอย่างจึงมีสีเขียวอ่อนอมเหลืองมากขึ้น

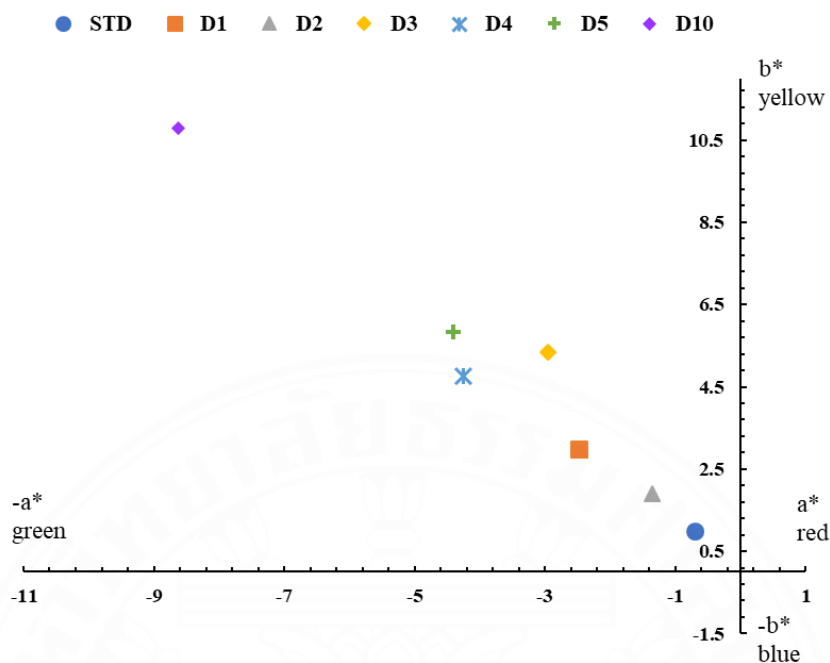


นอกจากนี้ตารางที่ 4.2 ยังแสดงค่าอัตราส่วน Fe^{2+}/Fe total, และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้ว จากผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าของอัตราส่วน Fe^{2+}/Fe total จะลดลงตามปริมาณฝุ่นที่เพิ่มขึ้นตามสมการ (4.1) และปริมาณก๊าซออกซิเจนที่เพิ่มขึ้นอาจมาจากฝุ่นที่เดิมเข้าไป ดังนั้น Fe^{3+} จึงเสถียรมากกว่าและจากผลสเปกตรัม UV-VIS ที่ช่วงการดูดกลืนประมาณ 385 นาโนเมตร เป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ซึ่งส่งผลทำให้เกิดสีเหลือง-เขียว ดังที่แสดงโดยตัวอย่างในรูปที่ 4.5 ทั้งนี้ค่าดัชนีการหักเหของแสงของผลิตภัณฑ์แก้วอยู่ในช่วง 1.516 – 1.519 ซึ่งไม่ได้แตกต่างกันมากนักจึงทำให้ทราบได้ว่าปริมาณของฝุ่นที่แทนเข้าไปไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีการหักเหของแสงของผลิตภัณฑ์แก้ว

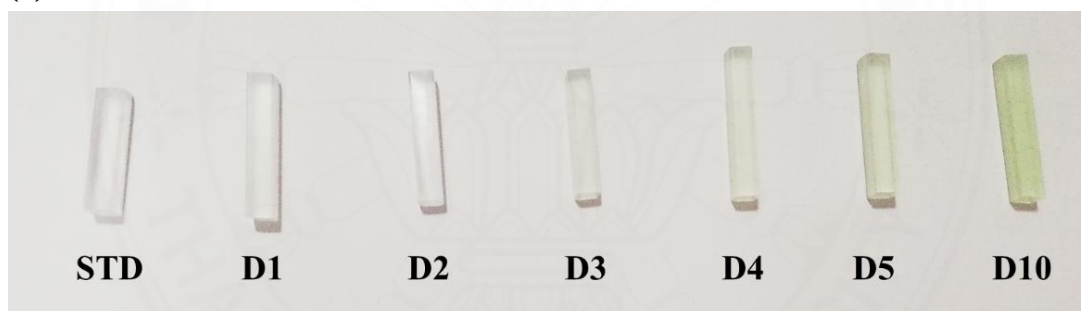
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สีตามระบบ CIE, อัตราส่วน Fe^{2+}/Fe total, และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงไปในวัตถุดิบหลัก

Sample	L*	a*	b*	Fe^{2+}/Fe Total	Refractive index
STD	93.22	-0.71	0.99	0.2150	1.516
D1	92.64	-2.48	2.99	0.0935	1.518
D2	87.36	-1.35	1.89	0.0816	1.516
D3	86.64	-2.95	5.33	0.0720	1.519
D4	91.69	-4.25	4.75	0.0864	1.518
D5	85.61	-4.40	5.85	0.0650	1.519
D10	82.25	-8.63	10.80	0.0769	1.520

(ก)



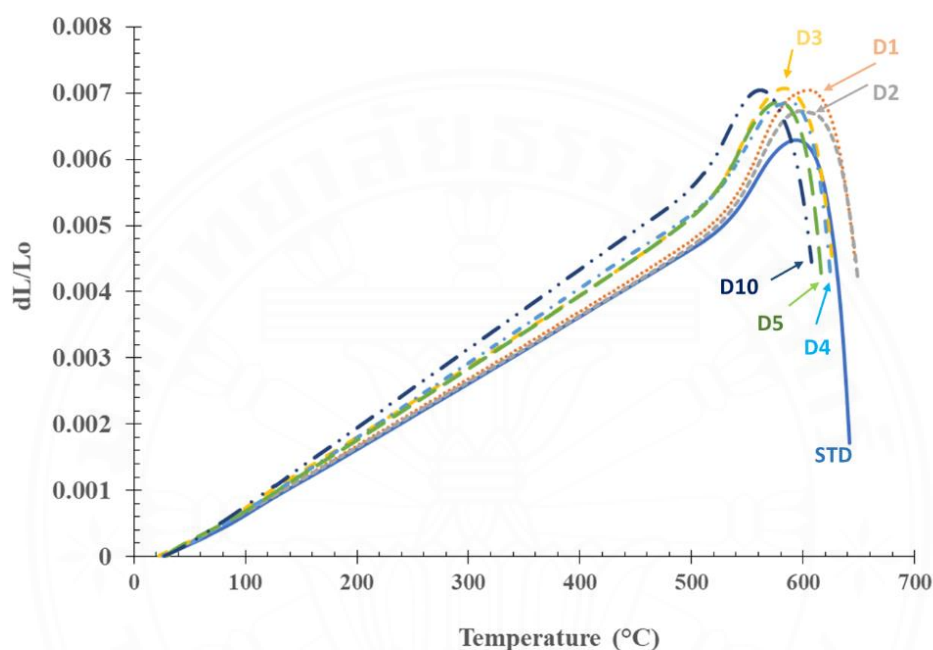
(ข)



รูปที่ 4.6 (ก) ผลการวิเคราะห์ CIE Lab ของผลิตภัณฑ์แก้วและ (ข) ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ลงไปในตัวถักหลัก

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (COE) ในช่วงอุณหภูมิ 100 – 400 องศาเซลเซียส T_g และ T_d ถูกวิเคราะห์จากกราฟการขยายตัวทางความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.7 และสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะพบว่าสำหรับตัวอย่างสูตร STD ค่า COE, T_g และ T_d คือ 9.97×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส, 531 องศาเซลเซียส และ 598 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การแทนที่วัตถุด้วยฝุ่นร้อยละ 2 โดยน้ำหนักในสูตรแก้วไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างแก้ว แต่เมื่อฝุ่นถูกใส่เข้าไปในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 2 ได้แก่สูตร D3 ถึง D10 ค่า COE ของผลิตภัณฑ์แก้ว จะมากกว่าค่า COE ของสูตร STD แต่ค่า T_d และ T_g ของสูตร D3 ถึง D10 นั้นต่ำกว่าของสูตร STD โดยค่า T_g และ T_d ของผลิตภัณฑ์แก้วจะลดลงตามปริมาณ Na_2O ที่เพิ่มขึ้นตามฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์

การลดลงที่สังเกตได้ของค่า T_g และ T_d และการเพิ่มขึ้นของค่า COE ของตัวอย่างแก้ว บ่งชี้ว่า Na_2O นำไปสู่การลดการเชื่อมโยงของโครงข่ายของแก้ว โดยปริมาณ Na_2O ในฝุ่นทำหน้าที่เป็นตัว ปรับแต่งโครงข่ายและเพิ่มจำนวนของออกซิเจนแบบไม่เชื่อม (NBO) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงร่างตาข่ายแก้ว อ่อนแอลง^[13] และปริมาณฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้ว ค่าความ หนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วอยู่ในช่วง 2.4846 ถึง 2.5028 g/cc ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการขยายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีส่วนผสมของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์

ตารางที่ 4.3 ตารางผลการทดสอบการขยายตัวทางความร้อนและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีส่วนผสมของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์

Sample	COE ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	T_g ($^\circ\text{C}$)	T_d ($^\circ\text{C}$)	Density (g/cc)
STD	9.97	530.96	598.09	2.4846
D1	10.12	533.16	607.30	2.4959
D2	9.95	529.8	601.90	2.4930
D3	10.74	517.02	586.37	2.5043
D4	11.19	515.4	590.78	2.4935
D5	11.10	518.49	580.70	2.4855
D10	12.04	505.96	564.24	2.5028

4.2 ผลการวิจัยส่วนของการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในวัตถุดิบหลัก

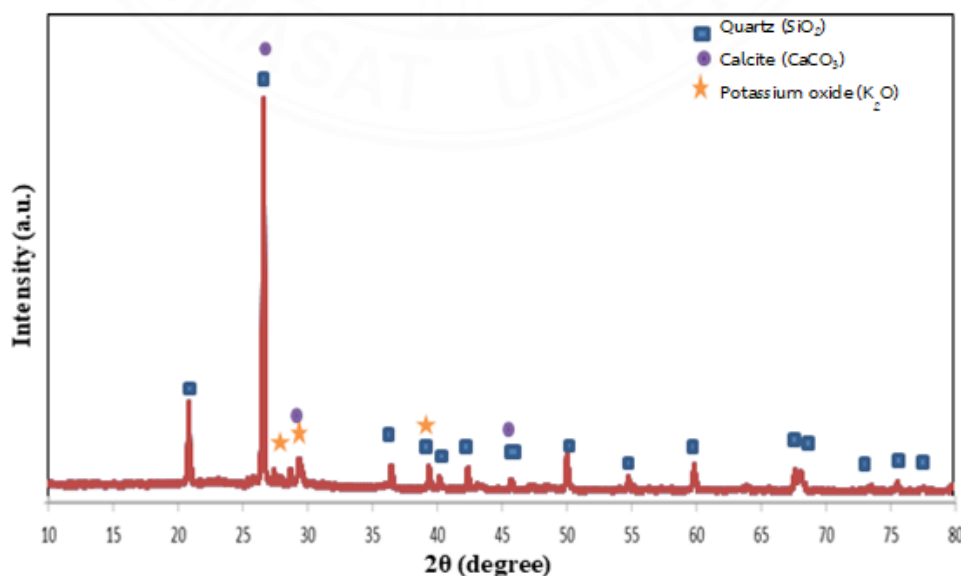
4.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย

ผลจากการวิเคราะห์เถ้าขานอ้อยด้วยเทคนิค X-ray fluorescence แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าเถ้าขานอ้อยส่วนใหญ่ประกอบด้วย SiO_2 ปริมาณ 53.6% องค์ประกอบออกไซด์รองถัดมา คือ CaO K_2O MgO Al_2O_3 Fe_2O_3 P_2O_5 และ SO_3 มีปริมาณ 13.55% 4.01% 3.29% 2.85% 2.38% 2.1% และ 1.04% ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยของ Teixeira et al. กล่าวว่าองค์ประกอบออกไซด์รองเหล่านี้จะมีปริมาณเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับดินที่ปลูกอ้อย แต่ในเถ้าขานอ้อยจากอ้อยที่ปลูกในดินที่ต่างกันก็ยังคงมีปริมาณของ SiO_2 ในปริมาณสูงเช่นเดิม^[15]

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย

Oxide	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	
wt%	0.2	3.29	2.85	53.6	2.1	1.04	0.18	
Oxide	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	ZnO	LOI
wt%	4.01	13.55	0.31	0.00	0.22	2.38	0.00	15.99

องค์ประกอบเฟสหลักของเถ้าขานอ้อยได้ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าเฟสหลักของเถ้าขานอ้อยคือซิลิกา (SiO_2) และมีเฟสรองคือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)



รูปที่ 4.8 XRD pattern ของเถ้าขานอ้อย

4.2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยที่ทำการ calcine

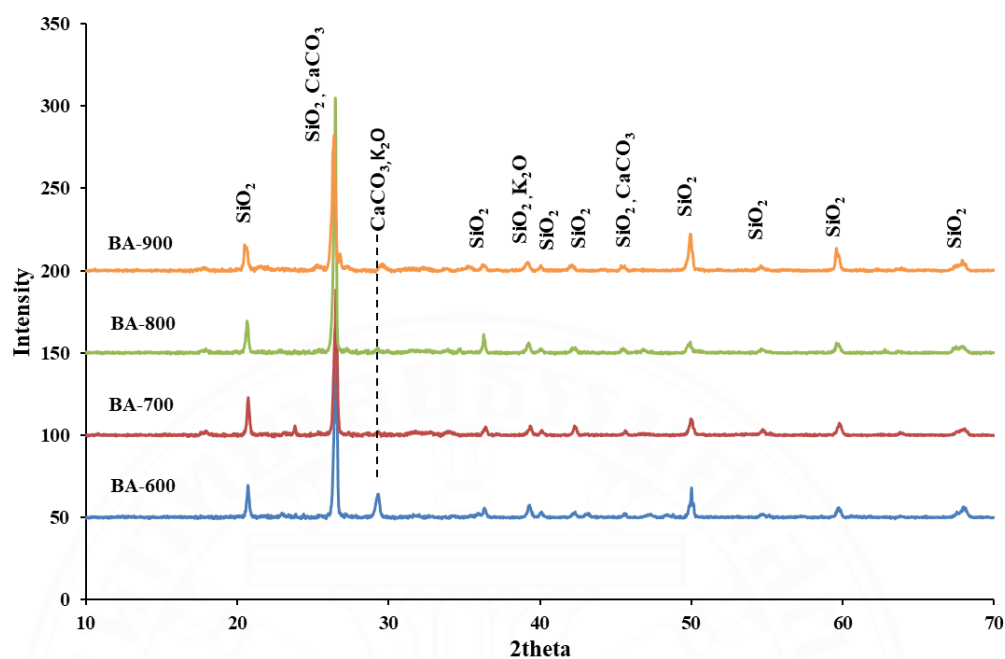
จากการนำเถ้าขานอ้อยไปผ่านการแคลไซน์โดยการให้ความร้อนที่ 600 700 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 และ 4 ชั่วโมง จะได้ผลการวิเคราะห์เถ้าขานอ้อยที่ผ่านการ Calcine ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าการแคลไซน์ เถ้าขานอ้อยที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะส่งผลให้มีปริมาณของ SiO_2 สูงที่สุดโดยมีปริมาณร้อยละ 60.774 โดยน้ำหนัก สังเกตปริมาณ SiO_2 ในเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิต่างกันพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณของ SiO_2 ลดลง แต่ที่อุณหภูมิเดียวกันเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณของ SiO_2 เพิ่มขึ้น

องค์ประกอบเฟสหลักของเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ ได้ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิค X-ray diffraction ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าเฟสหลักของเถ้าขานอ้อยคือซิลิกา (SiO_2) และมีเฟสรองคือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) เช่นเดียวกันกับในกรณีของเถ้าขาน - อ้อยที่ยังไม่ผ่านการแคลไซน์ จึงแสดงให้เห็นว่าการแคลไซน์ ไม่ได้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขององค์ประกอบที่อยู่ในเถ้าขานอ้อย

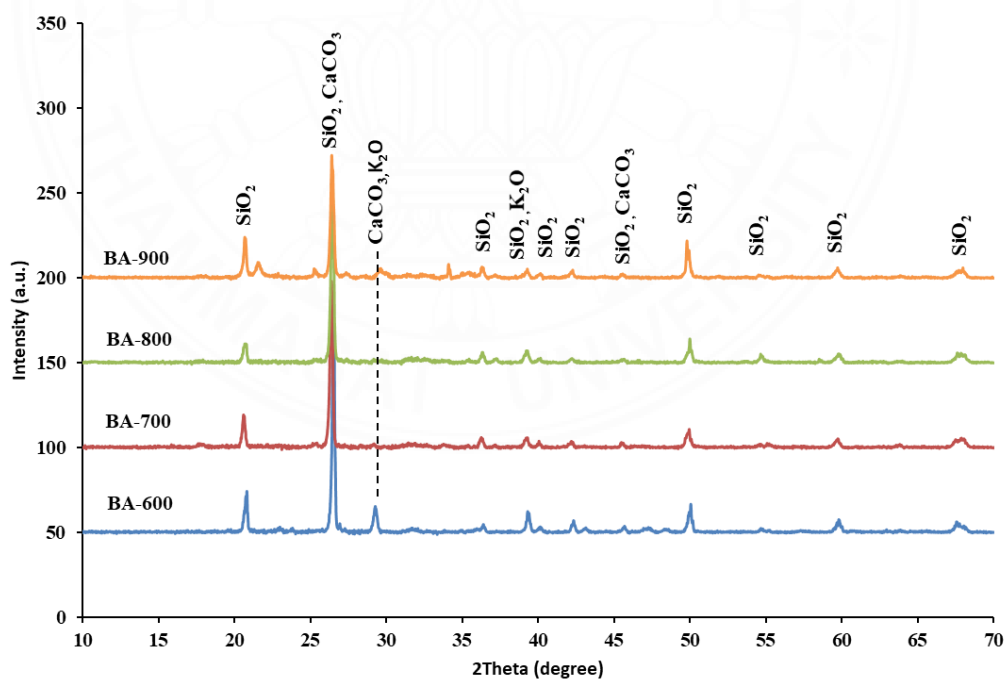
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการ Calcine

Oxides (wt%)	ตัวอย่างเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์							
	600/2hr	600/4hr	700/2hr	700/4hr	800/2hr	800/4hr	900/2hr	900/4hr
Na_2O	0.216	0.344	0.3375	3.372	0.306	0.328	0.249	0
MgO	3.772	3.596	3.938	3.787	3.149	3.211	3.403	3.413
Al_2O_3	4.204	4.223	4.08	4.277	3.965	4.073	3.869	3.931
SiO_2	60.327	60.774	58.378	59.949	58.241	58.426	55.914	55.844
P_2O_5	2.929	2.706	2.828	3.011	2.793	2.78	2.879	2.947
SO_3	1.268	1.178	1.291	1.375	1.521	1.628	1.834	2.01
Cl	0.164	0.135	0.144	0.16	0.103	0.12	0.102	0.075
K_2O	5.156	4.991	4.797	4.962	4.969	4.984	4.719	4.823
CaO	18.74	18.548	20.735	18.464	21.148	20.514	23.174	22.803
TiO_2	0.395	0.3362	0.343	0.443	0.395	0.464	0.324	0.446
Cr_2O_3	0	0	0.024	0.028	0	0.03	0	0.027
MnO	0.3	0.3	0.273	0.292	0.301	0.281	0.313	0.322
Fe_2O_3	2.731	2.674	2.6114	2.722	2.912	2.988	3.002	3.145
ZnO	0.037	0.037	0.042	0.037	0.042	0.038	0.046	0.048

(ก)



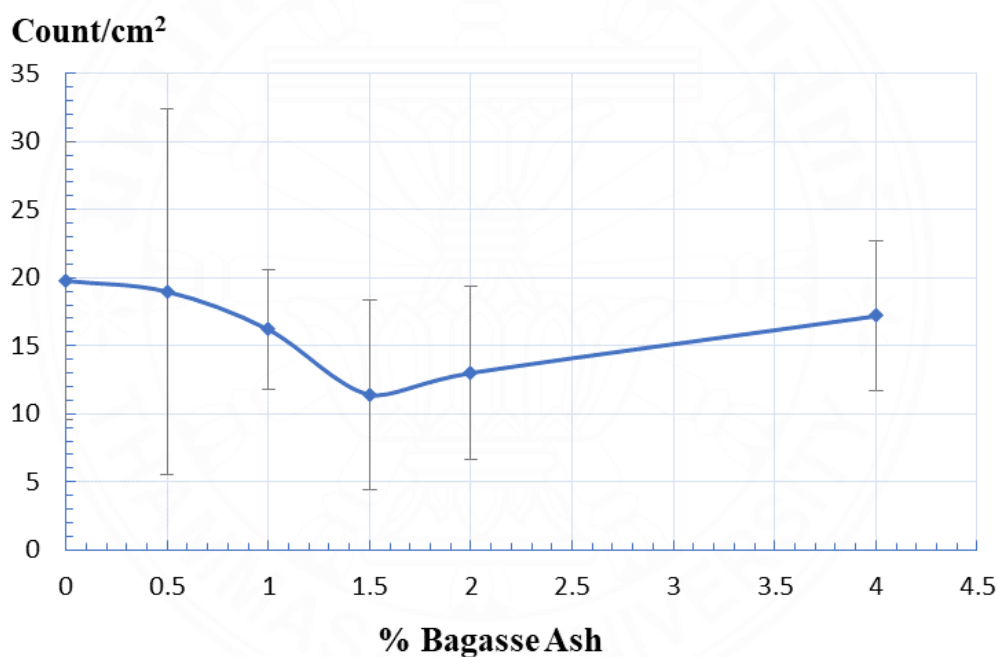
(ข)



รูปที่ 4.9 XRD pattern ของเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ ณ อุณหภูมิ 600 ถึง 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง

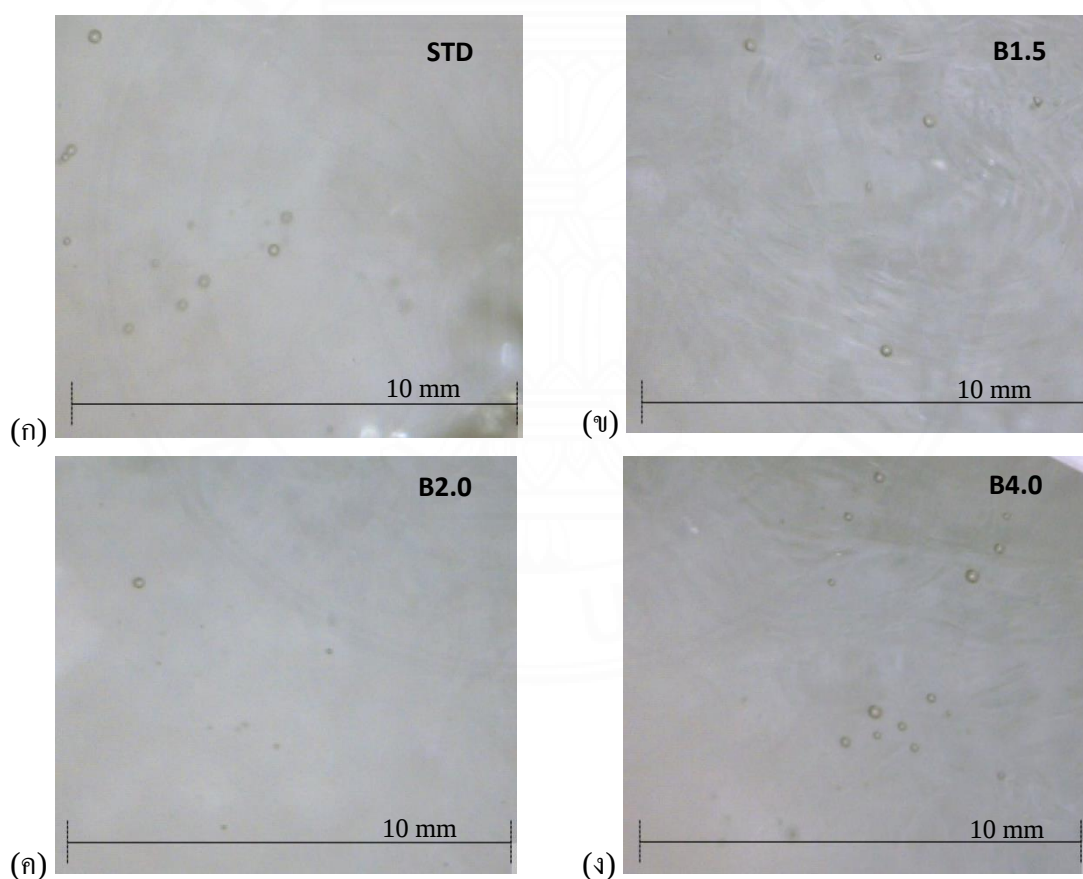
4.2.3 ปฏิกริยาเมื่อแทนที่เถ้าขานอ้อยลงในวัตถุดิบหลัก

จากการนำเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มาแทนที่ในวัตถุดิบหลักที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก หลังทำการหลอมให้ความร้อนที่ 1,450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าปริมาณเถ้าขานอ้อยที่เติมเข้าไปมีผลต่อจำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยฟองอากาศที่เหลืออยู่นี้ส่วนใหญ่มาจากการสลายตัวของวัตถุดิบ เช่นการสลายตัวของคาร์บอนเนต ซึ่งจากผลที่ได้พบว่าเมื่อเติมเถ้าขานอ้อยลงไปร้อยละ 1 ถึง 2 โดยน้ำหนัก จำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้วจะลดลงเล็กน้อย และเมื่อปริมาณของเถ้าขานอ้อยมากกว่าร้อยละ 2 จำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้วจะเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ สิ่งนี้บ่งชี้ว่าเถ้าขานอ้อยจำนวนเล็กน้อยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดฟองอากาศในชิ้นงาน



รูปที่ 4.10 จำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว เมื่อแทนที่วัตถุดิบหลักด้วยเถ้าขานอ้อย ร้อยละ 0 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก

เมื่อมีการเพิ่มเถ้าชานอ้อยที่น้อยกว่าร้อยละ 2 โดยเถ้าชานอ้อยนี้มีแคลเซียม - คาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบรอง ซึ่งเมื่อสลายตัวจะให้ฟองอากาศของ CO_2 และฟองอากาศที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.11 นี้จะทำหน้าที่ในการขยายขนาดของฟองอากาศที่มีอยู่เดิมให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและลอยตัวเคลื่อนออกจากผิวแก้วได้ง่ายขึ้น แต่เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกา ส่วนแคลเซียม - คาร์บอเนตที่ทำให้เกิดฟองนั้นเป็นเพียงองค์ประกอบรอง ฟองอากาศที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์แก้วที่ได้จึงต่างจากสูตรมาตรฐานไม่มากนัก ต่างจากกรณีที่เติมฝุ่นที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมซิลิเกตที่จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณของฟองอากาศอย่างชัดเจน และในกรณีของตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเถ้าชานอ้อยมากกว่าร้อยละ 2 พบว่าจำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้วมีจำนวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟองอากาศที่เกิดจากการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเถ้าชานอ้อยมีมากเกินไปและไม่รวมเป็นฟองอากาศขนาดใหญ่ ส่งผลให้ฟองอากาศส่วนเกินที่เกิดจากแคลเซียมคาร์บอเนตในเถ้าชานอ้อยไปเพิ่มจำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว



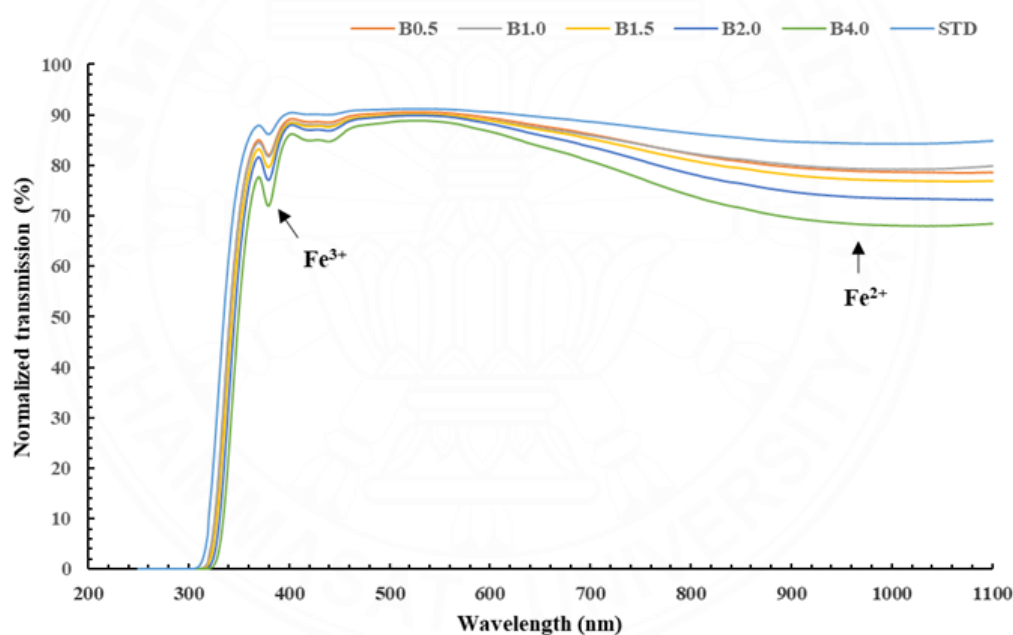
รูปที่ 4.11 ภาพฟองอากาศบนพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งเตรียมจากปริมาณเถ้าชานอ้อยตามสูตรต่าง ๆ

(ก) มาตรฐาน (ข) B1.5 (ค) B2.0 และ (ง) B4.0

4.2.4 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างแก้วจากสูตรที่แทนเก้าชานอ้อยลงไปในวัตถุดิบ

หลัก

จากการวิเคราะห์สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.12 อธิบายได้ว่าสเปกตรัมแสงของตัวอย่างแก้วที่มีการแทนเก้าชานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงลงไปในวัตถุดิบหลัก จะแสดงการดูดกลืนสูงสุดที่ 380 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{3+} และช่วงการดูดกลืนช่วงกว้างในช่วงประมาณ 1,100 นาโนเมตรเป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ของเก้าชานอ้อยที่แสดงในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเก้าชานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีเหล็กออกไซด์อยู่ร้อยละ 2.674 โดยน้ำหนัก จึงส่งผลให้ปริมาณเก้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้นในสูตรแก้วทำให้ปริมาณเหล็กออกไซด์ในตัวอย่งแก้วที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.12 สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนเก้าชานอ้อยลงไปในวัตถุดิบหลัก

จากการนำผลิตภัณฑ์แก้วที่ได้จากการหลอมจากสูตรในตารางที่ 3.2 มาทำการวิเคราะห์ค่า CIE Lab ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.13 พบว่าค่าของสีเหลือง ($+b^*$) และสีเขียว ($-a^*$) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเก้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะไม่สามารถมองเห็นถึงความแตกต่างของสีได้ สังเกตเห็นสีแก้วยังเป็นแก้วใสไม่มีสี

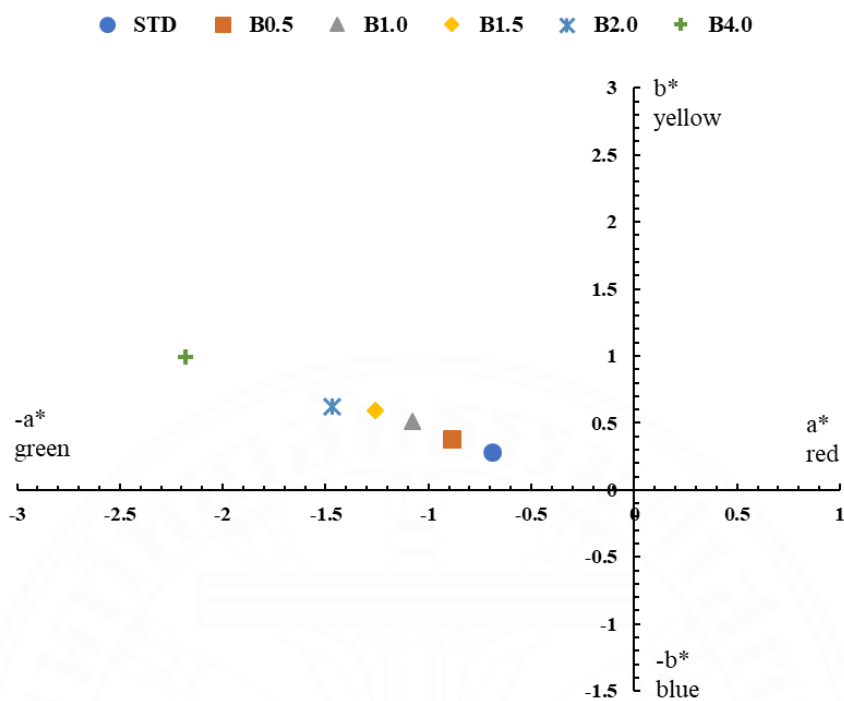
นอกจากนี้ตารางที่ 4.6 ยังแสดงค่าอัตราส่วน $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe total}$ และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้ว จากผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าของอัตราส่วน $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe total}$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.1525 – 0.1212 โดยไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก แสดงให้เห็นว่าเก้าชานอ้อยที่แทนเข้าไบนั้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยน Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} เหมือนในกรณีการแทนฝุ่นลงในวัตถุดิบหลัก ซึ่งทำให้เมื่อเทียบกับสูตร

มาตรฐานสีของตัวอย่างแก้วจึงไม่แตกต่างกันมากนัก ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 ทั้งนี้ค่าดัชนีการหักเหของแสงของผลิตภัณฑ์แก้วอยู่ในช่วง 1.516 – 1.517 ซึ่งไม่ได้แตกต่างกันมากนักจึงทำให้ทราบได้ว่าปริมาณของแก้วชานอ้อยที่แทนเข้าไปไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีการหักเหของแสงของผลิตภัณฑ์แก้ว

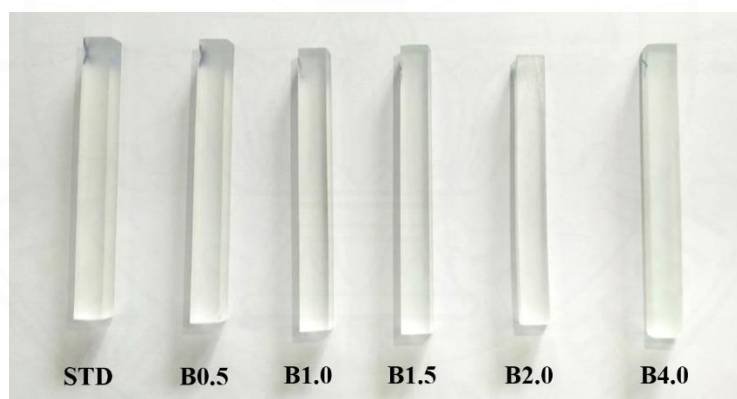
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์สีตามระบบ CIE, อัตราส่วน $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe total}$ และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนแก้วชานอ้อยลงไปในวัตถุดิบหลัก

Sample	L*	a*	b*	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe Total}$	Refractive index
STD	96.30	-0.69	0.28	0.1498	1.516
B0.5	96.18	-0.89	0.38	0.1525	1.517
B1.0	95.76	-1.08	0.51	0.1212	1.517
B1.5	95.89	-1.26	0.59	0.1409	1.516
B2.0	95.79	-1.47	0.62	0.1445	1.516
B4.0	95.12	-2.18	0.99	0.1404	1.516

(ก)



(ข)

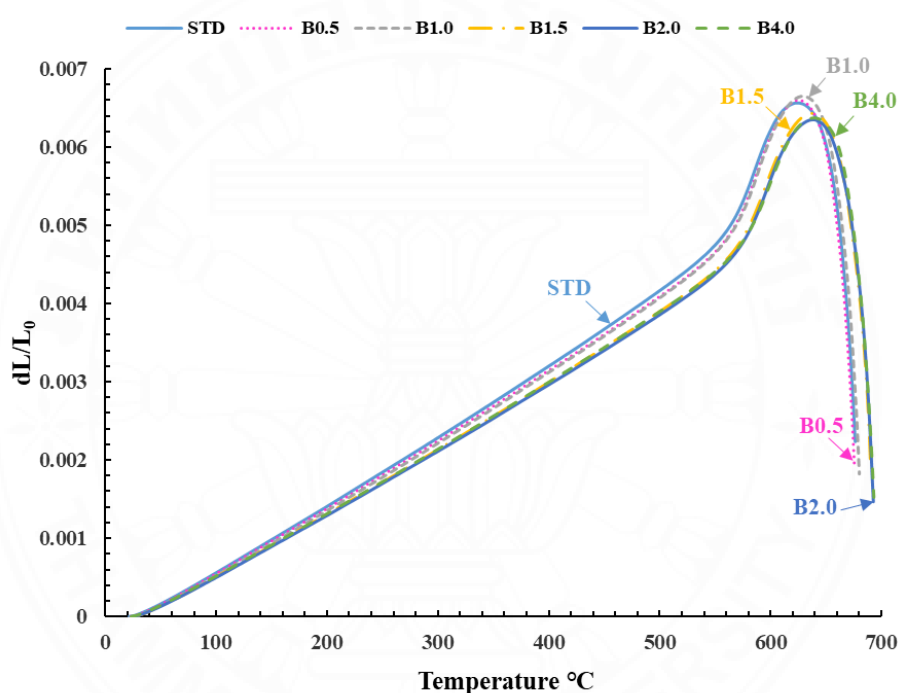


รูปที่ 4.13 (ก) ผลการวิเคราะห์ CIE Lab และ (ข) ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์แก้วที่แทนเก้าอี้ชานอ้อยลงในวัตถุหลัก

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (COE) ในช่วงอุณหภูมิ 100 – 400 องศาเซลเซียส, T_g และ T_d ถูกวิเคราะห์จากกราฟการขยายตัวทางความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.14 และสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7 จะพบว่าสำหรับตัวอย่างสูตร STD ค่า COE, T_g และ T_d คือ 8.5×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส, 566.6 องศาเซลเซียสและ 640.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การแทนที่วัตถุด้วยเก้าอี้ชานอ้อยในสูตรแก้วพบว่าส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างแก้ว ค่า COE ของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตร B0.5 ถึง B4.0 จะมีค่าน้อยกว่าค่า COE ของสูตร STD แต่ค่า T_d และ T_g ของสูตร B0.5 ถึง B4.0

นั้นสูงกว่าของสูตร STD โดยค่า T_g และ T_d ของผลิตภัณฑ์แก้วจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ SiO_2 ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณแก้วชานอ้อยที่แทนเข้าไป

การเพิ่มขึ้นที่สังเกตได้ของค่า T_g และ T_d และการลดลงของค่า COE ของตัวอย่างแก้ว บ่งชี้ว่า SiO_2 นำไปสู่การเพิ่มการเชื่อมโยงของโครงข่ายของแก้ว โดยปริมาณ SiO_2 ในแก้วชานอ้อยทำหน้าที่เป็นโครงข่ายของแก้ว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงร่างตาข่ายแก้วแข็งแรงขึ้น ทำให้มีค่า T_g และ T_d ที่สูงขึ้น และมีค่า COE ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแก้วชานอ้อยไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้ว ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วอยู่ในช่วง 2.4771 ถึง 2.5379 g/cc ดังแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลการขยายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีส่วนผสมของแก้วชานอ้อย

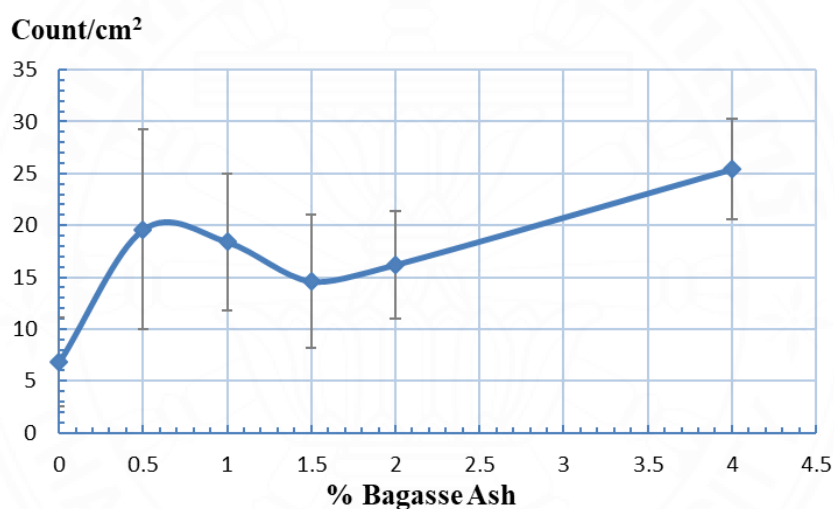
ตารางที่ 4.7 ตารางผลการทดสอบการขยายตัวทางความร้อนและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีส่วนผสมของแก้วชานอ้อย

Sample	COE ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	T_g ($^\circ\text{C}$)	T_d ($^\circ\text{C}$)	Density (g/cc)
STD	8.5	566.6	640.2	2.4846
B0.5	8.37	567.9	639.4	2.4870
B1.0	8.32	569.2	644.8	2.4869
B1.5	8.01	573.3	652.2	2.5379
B2.0	7.93	577.8	655.5	2.4777
B4.0	7.98	578.5	654.9	2.4771

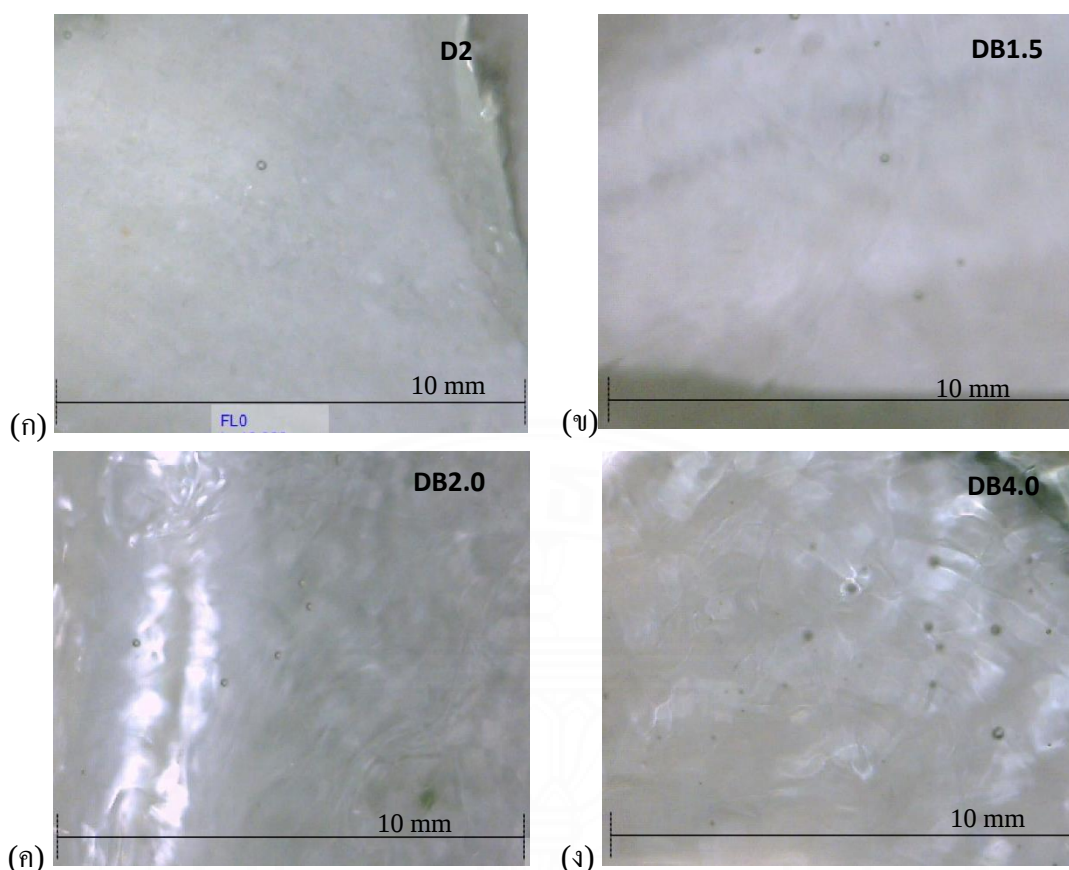
4.3 ผลการวิจัยส่วนของการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในสูตร D2

4.3.1 ปฏิกริยาเมื่อแทนที่เถ้าขานอ้อยลงในสูตร D2

จากการนำเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มาแทนที่ในสูตร D2 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก หลังทำการหลอมให้ความร้อนที่ 1,450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าปริมาณฟองอากาศมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมเถ้าขานอ้อยในแก้วสูตร D2 ดังรูปที่ 4.15 และ รูป 4.16 เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตในเถ้าขานอ้อยเกิดการสลายตัวให้ก๊าซ CO_2 ในช่วงการหลอมแก้ว ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว ดังรูป 4.16



รูปที่ 4.15 จำนวนฟองอากาศที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แก้ว เมื่อแทนที่วัตถุดิบในสูตร D2 ด้วยเถ้าขานอ้อยร้อยละ 0 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 4.0 โดยน้ำหนัก

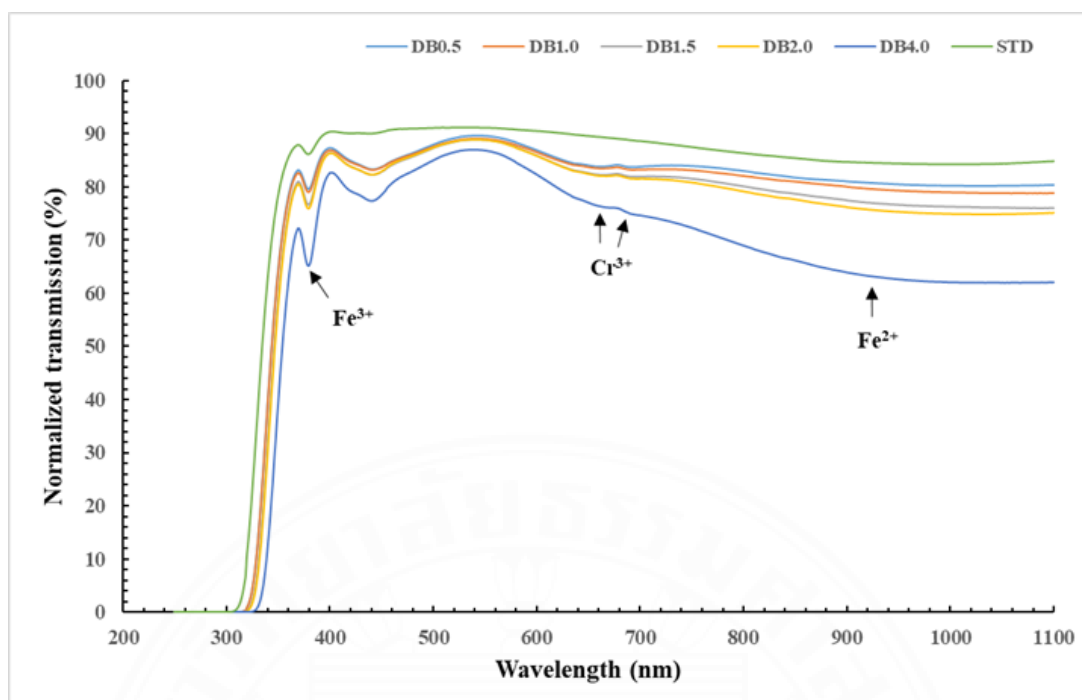


รูปที่ 4.16 ภาพฟองอากาศบนพื้นผิวของตัวอย่างซึ่งเตรียมจากปริมาณเถ้าขานอ้อยตามสูตรต่าง ๆ

(ก) D2 (ข) DB1.5 (ค) DB2.0 และ (ง) DB4.0

4.3.2 สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างแก้วจากสูตรที่แทนเถ้าขานอ้อยลงไปในสูตร D2

จากการวิเคราะห์สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.17 อธิบายได้ว่าสเปกตรัมแสงของตัวอย่างแก้วที่มีการแทนเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงลงไปในสูตร D2 จะแสดงการดูดกลืนสูงสุดที่ 380 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{3+} ช่วงการดูดกลืนที่ประมาณ 650 นาโนเมตรซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนของ Cr^{3+} และช่วงการดูดกลืนช่วงกว้างในช่วงประมาณ 1,100 นาโนเมตรเป็นช่วงการดูดกลืนของ Fe^{2+} ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มีเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 0.61 และ 0.26 ตามลำดับ และจากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF ของเถ้าขานอ้อยที่แสดงในตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการแคลไซน์ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีเหล็กออกไซด์อยู่ร้อยละ 2.674 โดยน้ำหนัก จึงส่งผลให้ปริมาณปริมาณเหล็กออกไซด์จากฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์และเถ้าขานอ้อยในสูตรแก้วที่สูงขึ้น เหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ในสูตรแก้วส่งผลต่อสีของผลิตภัณฑ์แก้วตามปฏิกิริยารีดอกซ์^[12]



รูปที่ 4.17 สเปกตรัม UV-VIS ของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนเก้าชานอ้อยลงไปในสูตร D2

จากการนำผลิตภัณฑ์แก้วที่ได้จากการหลอมจากสูตรในตารางที่ 3.3 มาทำการวิเคราะห์ค่า CIE Lab ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.18 พบว่าค่าของสีเหลือง ($+b^*$) และสีเขียว ($-a^*$) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเก้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น ได้สีแก้วเป็นสีเขียว จากผลลัพธ์ของ XRF เก้าชานอ้อยมีเหล็กออกไซด์ร้อยละ 2.674 โดยน้ำหนัก ตามที่แสดงในตารางที่ 4.5 นั้นหมายถึงปริมาณเก้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้นในสูตรแก้วส่งผลให้มีปริมาณธาตุเหล็กออกไซด์ในผลิตภัณฑ์แก้วที่สูงขึ้น และจากผลลัพธ์ของ XRF ผุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 4.1 เห็นว่าผุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มีเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์อยู่ร้อยละ 0.61 และ 0.26 ตามลำดับ โดยเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ในสูตรแก้วมีบทบาทในสีแก้วตามปฏิกิริยารีดอกซ์

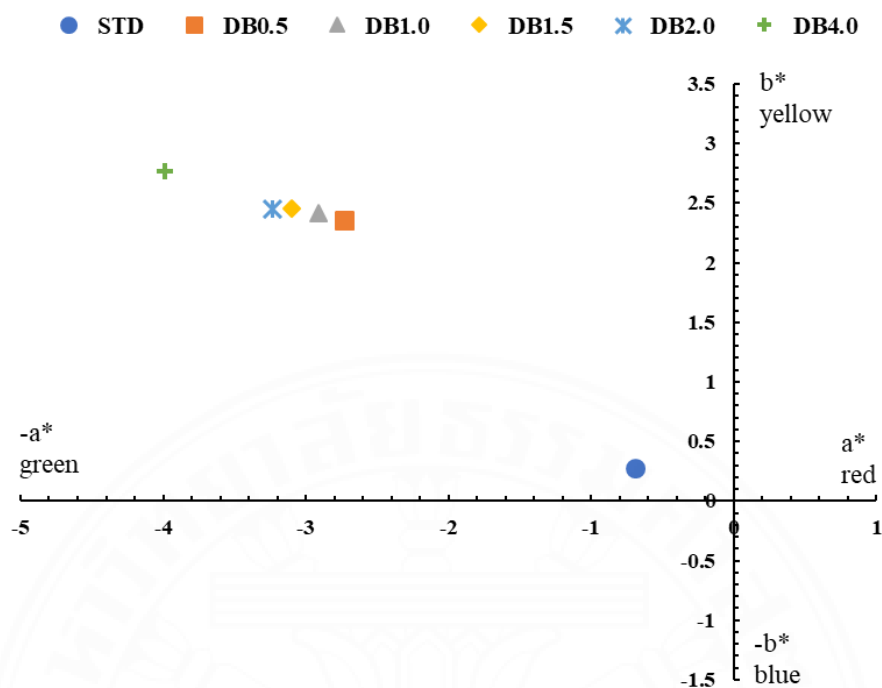
นอกจากนี้ตารางที่ 4.8 ยังแสดงค่าอัตราส่วน $Fe^{2+}/Fe\ total$ และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้ว จากผลที่ได้สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่าของอัตราส่วน $Fe^{2+}/Fe\ total$ จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.1121 – 0.1316 แสดงให้เห็นว่าเก้าชานอ้อยที่แทนเข้าไปในนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยน Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} โดยในกรณีของการเติมผุ่นเพียงอย่างเดียวจะมีการเปลี่ยน Fe^{2+} ไปเป็น Fe^{3+} ดังตารางที่ 4.2 ที่จะพบว่าค่าของอัตราส่วน $Fe^{2+}/Fe\ total$ มีค่าลดลงจากสูตรมาตรฐานอย่างชัดเจน แต่เมื่อเติมเก้าชานอ้อยลงไปในสูตร D2 พบว่าค่าของอัตราส่วน $Fe^{2+}/Fe\ total$ มีค่าใกล้เคียงกับสูตรมาตรฐาน

ทั้งนี้ค่าดัชนีการหักเหของแสงของผลิตภัณฑ์แก้วอยู่ในช่วง 1.516 – 1.518 ซึ่งไม่ได้แตกต่างกันมากนักจึงทำให้ทราบได้ว่าปริมาณของเก้าชานอ้อยที่แทนเข้าไปไม่ส่งผลต่อค่าดัชนีการหักเหของแสงของผลิตภัณฑ์แก้ว

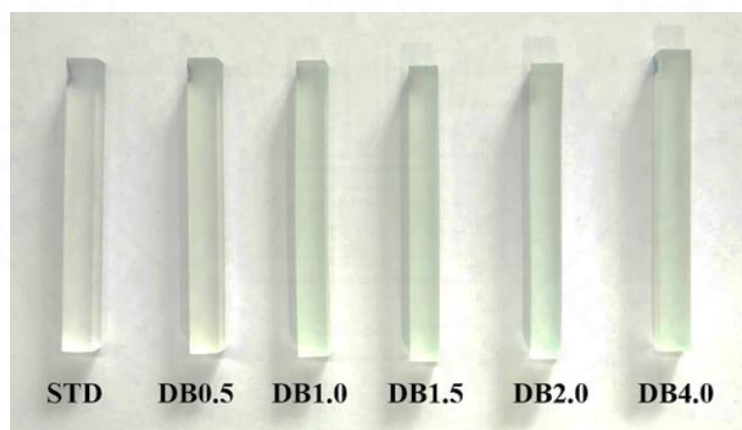
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์สีตามระบบ CIE, อัตราส่วน $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe total}$ และค่าดัชนีหักเหแสงของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตรที่แทนเก้าชานอ้อยลงไปในสูตร D2

Sample	L*	a*	b*	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe Total}$	Refractive index
STD	96.30	-0.69	0.28	0.1498	1.516
DB0.5	95.33	-2.73	2.36	0.1121	1.517
DB1.0	94.92	-2.91	2.42	0.1178	1.517
DB1.5	94.95	-3.10	2.45	0.1203	1.518
DB2.0	94.87	-3.23	2.45	0.1244	1.518
DB4.0	94.40	-3.99	2.77	0.1316	1.518

(ก)



(ข)

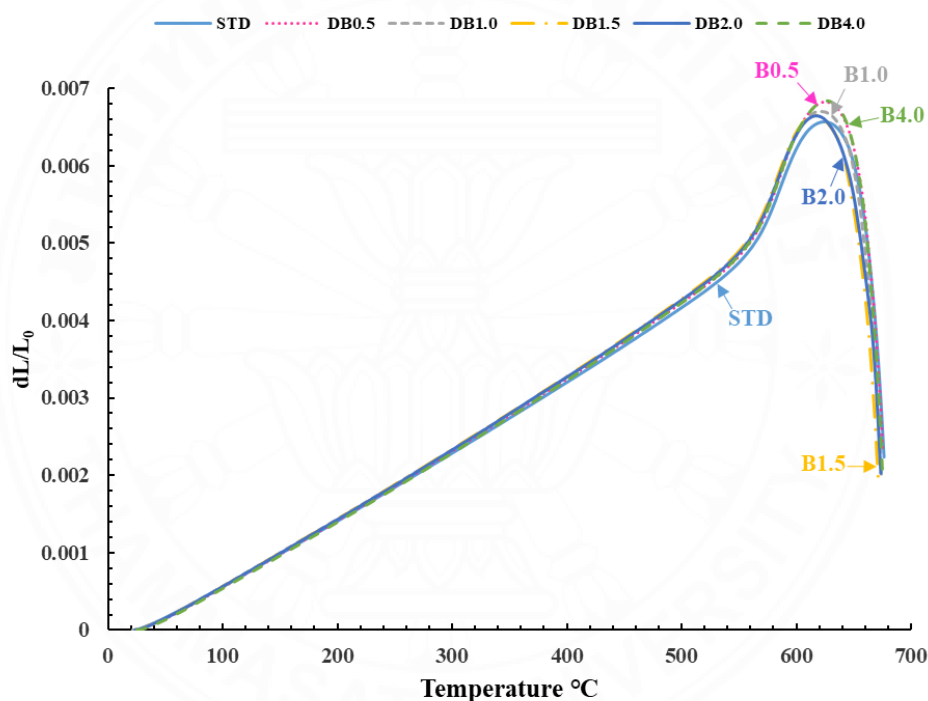


รูปที่ 4.18 (ก) ผลการวิเคราะห์ CIE Lab และ (ข) ภาพถ่ายของผลิตภัณฑ์แก้วที่แทนเก้าอี้ในสูตร D2

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (COE) ในช่วงอุณหภูมิ 100 – 400 องศาเซลเซียส, T_g และ T_d ถูกวิเคราะห์จากกราฟการขยายตัวทางความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.19 และสรุปผลได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9 จะพบว่าสำหรับตัวอย่างสูตร STD ค่า COE, T_g และ T_d คือ 8.5×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส, 566.6 องศาเซลเซียส และ 640.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การแทนที่วัสดุด้วยเก้าอี้ในสูตร D2 พบว่าส่งผลต่อคุณสมบัติทางความร้อนของตัวอย่างแก้ว โดยค่า COE ของผลิตภัณฑ์แก้วจากสูตร DB0.5 ถึง DB4.0 จะมีค่ามากกว่าค่า COE ของสูตร STD แต่ค่า T_d และ T_g ของสูตร DB นั้น

น้อยกว่าของสูตร STD เล็กน้อย โดยค่า T_g และ T_d ของผลิตภัณฑ์แก้วจะลดลงเล็กน้อยตามปริมาณเถ้าชานอ้อยที่เพิ่มขึ้น

เนื่องจากในสูตรแก้ว DB0.5-4.0 มีฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ผสมอยู่ด้วยซึ่งทำให้มี Na_2O ที่ส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายแก้วอ่อนแอลง ซึ่งอัตราส่วนระหว่างเถ้าชานอ้อยกับฝุ่นที่แทนลงในสูตรมาตรฐานนั้นจะมีการแทนโดยฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มากกว่าปริมาณของเถ้าชานอ้อย ดังนั้นแม้เถ้าชานอ้อยจะส่งผลให้มีปริมาณของ SiO_2 เพิ่มขึ้นแต่ก็จะถูกลดความแข็งแรงของโครงสร้างตาข่ายแก้วโดย Na_2O ในฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ ทั้งนี้ยังมี CaO จากเถ้าชานอ้อยที่ทำหน้าที่เป็นฟลักซ์ซึ่งส่งผลให้ค่า T_g และ T_d ลดลงอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณเถ้าชานอ้อยไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้ว ค่าความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วอยู่ในช่วง 2.4846 ถึง 2.4941 g/cc ดังแสดงในตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงผลการขยายตัวทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้วที่แทนเถ้าชานอ้อยลงในสูตร

D2

ตารางที่ 4.9 ตารางผลการทดสอบการขยายตัวทางความร้อนและความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์แก้วที่แทน
เก้าชานอ้อยลงในสูตร D2

Sample	COE ($\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)	T_g ($^\circ\text{C}$)	T_d ($^\circ\text{C}$)	Density (g/cc)
STD	8.5	566.6	640.2	2.4846
DB0.5	8.65	565.2	636.7	2.4926
DB1.0	8.68	563.0	635.5	2.4904
DB1.5	8.73	562.4	632.0	2.4926
DB2.0	8.70	563.6	631.6	2.4909
DB4.0	8.61	565.4	643.0	2.4941

4.4 การประเมินต้นทุนการหลอมแก้วจากการเติมฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์และเก้าชานอ้อย

การประมาณต้นทุนวัตถุดิบในการหลอมแก้ว แสดงดังตารางที่ 4.10 (ค่าวัตถุดิบประกอบด้วย
ทราย 700 บาทต่อตัน โซดาแอช 12,000 บาทต่อตัน โดโลไมต์ 1,000 บาทต่อตัน โซเดียมซิลเฟต 4,200
บาทต่อตัน และค่าใช้จ่ายในการกำจัดฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ คิดเป็น 2,000 บาทต่อตัน)

ตารางที่ 4.10 การประเมินต้นทุนวัตถุดิบ

สูตร	ทราย: โซดาแอช: โดโลไมต์: โซเดียมซิลเฟต: ฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์: เก้าชานอ้อย	ปริมาณ วัตถุดิบ (%)	ราคาต้นทุน วัตถุดิบ (บาทต่อตัน)	ราคาต้นทุนวัตถุดิบโรงงาน แก้วกำลังการผลิต 500 ตัน ต่อวัน ใน 1 ปี
STD	61.74: 18.12: 19.07: 1.07 : 0: 0	100	2,842.22	518,705,150 บาท/ปี
D2	60.51: 17.76: 18.69: 1.05: 2: 0	98	2,785.37	518,186,393.75 บาท/ปี *
B1.5	60.81: 17.85: 18.78: 1.05: 0: 1.5	98.5	2,799.58	510,923,350 บาท/ปี
DB1.5	59.60: 17.49: 18.41: 1.03: 1.97: 1.5	96.53	2,743.59	517,791,445.63 บาท/ปี *

*เนื่องจากปริมาณฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ไม่เพียงพอต่อการผลิตใน 1 ปี จึงคิดกำลังการผลิตส่วนของ STD
เพิ่ม

นอกจากนี้ ฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ที่เกิดจากการผลิตแก้วประมาณ 0.1% ของวัตถุดิบทั้งหมด เช่น การใช้วัตถุดิบ 500 ตันต่อวัน จะเกิดฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ 0.5 ตันต่อวัน หรือเกิด 182.5 ตันต่อปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดฝุ่น 1,000 บาทต่อวัน หรือ 365,000 บาท ต่อปี ดังนั้นใน 1 ปี โรงงานแก้วสามารถลดค่าต้นทุนในด้านต่อไปนี้ คือ

-ลดราคาต้นทุนวัตถุดิบ

เมื่อใช้สูตร D2 ลดค่าใช้จ่ายลง 518,756.25 บาทต่อปี

เมื่อใช้สูตร B1.5 ลดค่าใช้จ่ายลง 7,781,800 บาทต่อปี

เมื่อใช้สูตร DB1.5 ลดค่าใช้จ่ายลง 913,704.37 บาทต่อปี

-ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ 365,000 บาทต่อปี

-รวมค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนวัตถุดิบและการกำจัดฝุ่นจากกรีเจนเนอเรเตอร์ที่ลดลง

เมื่อใช้สูตร D2 ลดค่าใช้จ่ายลง 883,756.25 บาทต่อปี

เมื่อใช้สูตร DB1.5 ลดค่าใช้จ่ายลง 1,278,704.37 บาทต่อปี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัยส่วนของการนำฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มาแทนในวัตถุดิบหลัก

จากผลการศึกษานี้ ฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในสูตรแก้วเพื่อลดต้นทุนการผลิตและพลังงานสำหรับการหลอมแก้ว โดยสามารถอธิบายได้จากข้อสรุปต่อไปนี้

5.1.1 การวิเคราะห์เฟสและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์

ระบุว่าฝุ่นประกอบด้วยโซเดียมซิลเฟตเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็น fining agent ของการหลอมแก้วได้ และผลิตภัณฑ์แก้วที่ผลิตโดยการเติมฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ทำให้ฟองอากาศที่เหลืออยู่ลดน้อยลงอีกทั้งอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยาหลอมเหลวของแก้วยังลดลงอีกด้วย

5.1.2 สูตรที่เหมาะสมที่สุดในการหลอมแก้ว จากการนำฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์มาแทนในวัตถุดิบหลัก

สูตรที่เหมาะสมที่สุดในการหลอมแก้วที่ได้คือสูตร D2 (เติมฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก) ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า การแทนที่วัตถุดิบทั้งหมดด้วยฝุ่นสูงถึงร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลต่อค่าความหนาแน่น ดัชนีการหักเหของแสง และคุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้ว ค่าวิเคราะห์สีตามระบบ CIE ของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีฝุ่นจากรีเจนเนอเรเตอร์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก นั้นใกล้เคียงกับสีของตัวอย่างมาตรฐาน (STD) ที่เป็นสูตรอ้างอิงของโรงงานผลิตแก้ว

5.2 สรุปผลการวิจัยส่วนของการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในวัตถุดิบหลัก

จากผลการศึกษานี้ เถ้าขานอ้อยสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในสูตรแก้วเพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยสามารถอธิบายได้จากข้อสรุปต่อไปนี้

5.2.1 การวิเคราะห์เฟสและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อย

ระบุว่าเถ้าขานอ้อยประกอบด้วยซิลิกาเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบของการหลอมแก้วได้ และผลิตภัณฑ์แก้วที่ผลิตโดยการเติมเถ้าขานอ้อยทำให้ฟองอากาศที่เหลืออยู่ลดน้อยลง

5.2.2. สูตรที่เหมาะสมที่สุดในการหลอมแก้ว จากการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในวัตถุดิบ

หลัก

สูตรที่เหมาะสมที่สุดในการหลอมแก้วที่ได้คือสูตร B1.5 (เดิมเถ้าขานอ้อยร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก) ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าการแทนที่วัตถุดิบทั้งหมดด้วยเถ้าขานอ้อยสูงถึงร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาแน่น และดัชนีการหักเหของแสง คุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้วและค่าวิเคราะห์สีตามระบบ CIE ของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีเถ้าขานอ้อยร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก นั้นใกล้เคียงกับของตัวอย่างมาตรฐาน (STD) ที่เป็นสูตรอ้างอิงของโรงงานผลิตแก้ว

5.3 สรุปผลการวิจัยส่วนของการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในสูตร D2

จากผลการศึกษาครั้งนี้ เถ้าขานอ้อยสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในสูตรแก้วเพื่อลดต้นทุนการผลิต โดยสามารถอธิบายได้จากข้อสรุปต่อไปนี้

5.3.1. สูตรที่เหมาะสมที่สุดในการหลอมแก้ว จากการนำเถ้าขานอ้อยมาแทนในสูตร D2

จากผลการวิจัยพบว่าการแทนที่วัตถุดิบทั้งหมดด้วยเถ้าขานอ้อยสูงถึงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความหนาแน่น และดัชนีการหักเหของแสง ค่าวิเคราะห์สีตามระบบ CIE ของผลิตภัณฑ์แก้วที่มีเถ้าขานอ้อยในสูตร D2 ทำให้แก้วใสเป็นแก้วสีเขียว โดยคุณสมบัติทางความร้อนของผลิตภัณฑ์แก้วและนั่นใกล้เคียงกับของตัวอย่างมาตรฐาน (STD) ที่เป็นสูตรอ้างอิงของโรงงานผลิตแก้ว

5.4 สรุปผลการวิจัยส่วนของการคำนวณการลดลงของต้นทุนในการผลิตแก้ว

จากผลการศึกษาครั้งนี้ ได้สูตรในการหลอมแก้ว 3 สูตร ที่ช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้โดยที่ผลิตภัณฑ์แก้วยังคงมาตรฐานโรงงาน ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สูตร D2 ลดค่าใช้จ่ายลง 883,756.25 บาทต่อปี สูตร B1.5 ลดค่าใช้จ่ายลง 7,781,800 บาทต่อปี และสูตร DB1.5 ลดค่าใช้จ่ายลง 1,278,704.37 บาทต่อปี

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถต่อยอดงานวิจัยเพื่อศึกษาการนำเถ้าขานอ้อยมาใช้ในกระบวนการหลอมแก้วโดยไม่ผ่านการแคลไซน์ เพื่อผลิตแก้วสีอื่น ๆ ได้
2. สามารถนำเถ้าขานอ้อยมาเป็นวัตถุดิบในการหลอมแก้วแทนแร่อื่น ๆ ได้ เช่น แร่เฟลด์สปาร์ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

1. Schaeffer, H.A. , *Recycling of cullet and filter dust in the German glass industry*, Glass Sci. Technol., 69, 101-6 (1996).
2. Jakubikova, Z. and M. Liska, A. Pisko and J. Pagacova, *Study of properties of the glass batch melting filter dust*, J. Therm. Anal. Calorim. , 108, 493-496 (2012).
3. Sharma, G., S.K. Arya and K. Singh, *Optical and thermal properties of glasses and glass-ceramics derived from agricultural wastes*, Ceram. Inter. , 44, 947-952 (2016).
4. Souza, A.E., S.R. Teixeira, G.T.A. Santos, F.B. Costa and E. Longo, *Reused of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials*, J. of Environ. Management, 92, 2774-2780 (2011).
5. Teixeira, S.R., R.S. Magalhaes, A. Arenales, A.E. Souza, M. Romero and J. M. Rincon., *Valorization of sugarcane bagasse ash (SCBA) : Producting glass-ceramic materials*, J. of Environ. Management, 134, 15-19 (2014).
6. Teixeira, S.R., A.E. Souza, C.L. Carvalho, V.C.S. Reynoso, M. Romero and J. M. Rincon., *Characterization of a wollastinite glass-ceramic material prepared using sugar cane bagasse ash (SCBA) as one of the raw materials*, Material Characterization, 98, 209-214 (2014).
7. A. Kasper, E. Carduck, M. Manges and H. Stadelmann, *“Contribution to the characterization of dust emission in glass melting furnaces”*, Ceramic Engineering And Science Proceeding, vol. 27, p.203-214, 2008.
8. P. R. Laimbock, *“Foaming of Glass Melts”* Ph.D., Technical University of Eindhoven, Eindhoven, Netherlands, 1998.
9. M. Hujova', and M. Vernerova', *“Influence of fining agents on glass melting: A review, part 1”*, Ceramics-Silikáty, vol.61, pp.119-126, 2017.
10. A. Kusnierz, M. Sroda, M. Kosmal and P. Pichniarczyk, *“Thermal analysis of the glass batch with a higher content of raw materials substitution based on selected fining agents”*, Journal of Thermal Analytical Calorimetry, vol.130, pp.229-247, 2017.
11. J. Mukerji, *“Use of sodium sulphate in glass batch part I-Melting accelerator”*, Kanch, vol.3, pp.15-20, 2010.

12. M. Hubert, A. Faber, H. Sesigur and F. Akmaz, "*Impact of Redox in Industrial Glass Melting and Importance of Redox Control*", in 77th Conference on Glass Problems, Greater Columbus Convention Center, Columbus, OH, 2016, vol. 38, no. 1.
13. J. E. Shelby, *Introduction to glass science and technology*, 2nd ed. Royal Society of Chemistry, 2005.
14. สุรสิทธิ์ พลิกบัว, *Materials characterization*, MTEC ตุลาคม - ธันวาคม 2547, 58-62 (2004)
15. S.R. Teixeira, A.E. Souza, G.T.A. Santos, A.F.V. Pena, A.G. Miguel., *Sugarcane Bagasse Ash as a Potential Quartz Replacement in Red Ceramic*, The American Ceramic Society, 91[6], 1883–1887, 2008.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

จิตรลดา คำภา

วุฒิการศึกษา

ปีการศึกษา 2564: วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(นวัตกรรมและเทคโนโลยีวัสดุ)

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2562: วิทยาศาสตรบัณฑิต
(วัสดุศาสตร์)

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ทุนการศึกษา (ถ้ามี)

ปีพ.ศ.2563: ทุนสนับสนุนการวิจัยจาก
สำนักงานการวิจัยแห่งชาติร่วมกับบริษัท
กลาสบริดจ์ จำกัด ภายใต้โครงการพัฒนา
นักวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.)ตามสัญญา
เลขที่ วช.อว.(อ)(กบง)/352/2563 รหัสราย
โครงการ NRCT5-RR163009-M20

ผลงานทางวิชาการ

J. Kumpa, P. Ineure, P. Chakartnarodom, B. Cherdhirunkorn, E. A. Laitila, and N. Kongkajun. Recycling of exhausted dust from regenerator of glass furnace in glass batch melting, *J. of Metals, Materials and Minerals*, 32 [2] pp 50-55 (2022)