

การใช้เศษแก้วจากโรงงาน เป่าแก้วเพื่อการสร้างสรรค์ งานศิลปะแก้ว¹

จักรพันธ์ วิชาสินีกุล²
สวรรยา จันทรสมัย³

รับบทความ: 11 พฤษภาคม 2567 / แก้ไข: 17 มิถุนายน 2567 / ตอรับตีพิมพ์: 24 มิถุนายน 2567

<https://doi.org/10.14456/sbjfa.2024.6>

¹ บทความนี้มาจากโครงการวิจัยเรื่อง “การนำเศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วกลับมาใช้สร้างสรรค์งานออกแบบและศิลปะแก้ว”
สนับสนุนทุนวิจัยโดย สำนักคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2562

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาประติมากรรม คณะจิตรกรรม ประติมากรรมและภาพพิมพ์ มหาวิทยาลัยศิลปากร,
e-mail: jakapanvilasineekul@gmail.com

³ อาจารย์ ภาควิชาประติมากรรม คณะจิตรกรรม ประติมากรรมและภาพพิมพ์ มหาวิทยาลัยศิลปากร,
e-mail: sawanyasai19@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ศึกษาวิธีการนำเศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วมาใช้ในการสร้างสรรค์ โดยมีวัตถุประสงค์สามด้าน 1. ศึกษาแนวทางนำเศษแก้วมาใช้ในการสร้างคุณค่าด้านสร้างสรรค์ 2. ศึกษาสมบัติของเศษแก้วและการใช้งานที่เหมาะสม และ 3. ศึกษาวิธีการทางศิลปะแก้วเพื่อใช้ในการศึกษาและการพัฒนาเชิงพาณิชย์ ขั้นตอนวิจัยมีการสำรวจโรงงานและเก็บรวบรวมตัวอย่าง มีการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนและองค์ประกอบทางเคมี มีการทดสอบอบแก้วเพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับใช้ในกระบวนการอบแก้ว ผลการวิจัยพบว่าแก้วจากโรงงานส่วนใหญ่มีปริมาณเฉลี่ยซิลิกาต่ำกว่าและโซเดียมออกไซด์สูงกว่าแก้วโซดาโลมทั่วไป แก้วจากแต่ละโรงงานมีส่วนประกอบทางเคมีไม่คงที่ จึงมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่างกัน เป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้ การเตรียมวัสดุด้วยการบด ยัดเป็นเส้น อบแผ่เป็นแผ่น มีความสำคัญก่อนการสร้างสรรค์ แก้วสีต่าง ๆ ที่ตรวจสอบแล้วว่ามีสมบัติใกล้เคียงกัน นำมาอบผสมกันได้ดีในเทคนิคหลากหลาย การอบแก้วประสานสีกันหรือซ้อนทับกันทำให้เกิดลายหรือจังหวะของระนาบสีเป็นลักษณะพิเศษ เศษแก้วสีนำมาใช้ได้ดี ในเทคนิคหล่อแก้ว ความใสของแก้วเปลี่ยนความรู้สึกหนักและที่บตันในงานประติมากรรม แก้วบดละเอียดสามารถนำมาใช้ในเทคนิคการอบผงแก้วผลึก ผลงานที่ได้มีเนื้อเป็นผลึกและมีสีไหลมาผสมกันเป็นลักษณะเด่น

คำสำคัญ: การอบแก้ว / การขึ้นรูปแก้วในเตา / ศิลปะแก้ว

วิธีอ้างอิง

จักรพันธ์ วิลาสินกุล และ สวรรยา จันทรมัย. (2567). การใช้เศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วเพื่อการสร้างสรรคงานศิลปะแก้ว. *วารสารศิลป์ พีระศรี*, 12(1), 143-178. <https://doi.org/10.14456/sbjfa.2024.6>



© 2567 ลิขสิทธิ์ โดยผู้เขียน และวารสารศิลป์ พีระศรี อนุญาตให้นำบทความไปเผยแพร่ได้ภายใต้สัญญาอนุญาต
ครีเอทีฟคอมมอนส์แบบแสดงที่มา-ไม่ใช้เพื่อการค้า-ไม่แก้ไขดัดแปลง (CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

06

Reusing Glass Waste from Glass-Blowing Factories to Create Glass Art¹

Jakapan Vilasineekul²
Sawanya Chantarasamai³

Received: May 11, 2024 / Revised: June 17, 2024 / Accepted: June 24, 2024

<https://doi.org/10.14456/sbjfa.2024.6>

¹ This article is a part of research “Reusing Glass Waste of Glass-Blowing Factories to Create Product Design and Glass Art” funding by Thailand Science Research and Innovation (TSRI), fiscal year 2019.

² Associate Professor, Sculpture Department, Faculty of Painting, Sculpture and Graphic Arts, Silpakorn University, e-mail: jakapanvilasineekul@gmail.com

³ Lecturer, Sculpture Department, Faculty of Painting, Sculpture and Graphic Arts, Silpakorn University, e-mail: sawanyasai19@gmail.com

Abstract

This research examines how glass waste from glass-blowing factories can be used in creative works. There are three objectives: 1. Study the methods of reusing glass waste in creative works. 2. Study the properties of glass waste and their appropriate usage. 3. Study methods in glass art to be used in education and commercial development. The research process involves surveying the factories and collecting samples. The thermal expansion coefficient and chemical composition are examined. Samples are tested to determine the appropriate temperature for creating works of art in the kiln-formed glass process. The results showed that glass from Thai factories had lower average silica content and higher sodium oxide content than general soda-lime glass. Glass from different factories has different chemical compositions. Therefore, they have different coefficients of thermal expansion, which is a limitation for reusing in the kiln-formed glass technique. Material preparation involves grinding, stretching a cullet into strips, and fusing glass into sheets, which are needed before creating forms of art. Different colored glass, which has been verified to have similar properties, can be fused together using various techniques. Colored glass fused in overlapping or layering can create a unique pattern or rhythm of color. Glass billets are recommended for casting. The transparency of glass changes the feeling of being heavy and dense in sculpture. Frit, or finely ground glass powder, can be used in the *pâte de verre* technique. It creates a crystal texture and flowing colors as a distinctive feature.

Keywords: Warm Glass / Kiln-Formed Glass / Glass Art

Citation

Vilasineekul, J. & Chantarasamai, S. (2024). Reusing Glass Waste from Glass-Blowing Factories to Create Glass Art. *Silpa Bhirasri (Journal of Fine Arts)*, 12(1), 143-178. <https://doi.org/10.14456/sbjfa.2024.6>



© 2024 by the author(s); Silpa Bhirasri (Journal of Fine Arts). This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial-No Derivatives License (CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

บทนำ

จังหวัดนครปฐมเคยมีโรงงานเป่าแก้วอยู่เป็นจำนวนมาก โรงงานเหล่านี้ผลิตแก้วแบบหัตถกรรมด้วยแรงงานฝีมือซึ่งต่างจากอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ การเป่าแก้วเป็นวิธีการโบราณที่ใช้จนถึงปัจจุบัน ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก กระบวนการผลิตต้องใช้น้ำแก้ว จำเป็นต้องติดไฟเตาหลอมแก้วไว้ตลอดเวลา ช่วงเวลา 7-8 ปีที่ผ่านมาโรงงานเป่าแก้วประสบปัญหาเศรษฐกิจอย่างหนักจนต้องปิดตัวลงหลายแห่ง เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงที่สูงทำให้แก้วจากโรงงานของไทยแข่งขันในตลาดต่างประเทศยาก นอกจากนี้โรงงานยังประสบปัญหาในการจัดการเศษแก้วที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตทุกวัน แม้เศษแก้วเหล่านี้จะนำมาหลอมใช้ใหม่ได้ แต่ทุกโรงงานมีเศษแก้วเหลืออยู่ในปริมาณมากจึงต้องจำหน่ายออกไปในราคาถูกหรือหาทางกำจัดด้วยวิธีการอื่น การวิจัยนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วมาแปรรูปเพื่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการสร้างสรรค์โดยไม่ต้องนำกลับไปหลอมใหม่

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีการนำเศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วมาใช้ประโยชน์เพื่องานด้านการสร้างสรรค์
2. ศึกษาสมบัติของวัสดุและการใช้งานที่เหมาะสมเพื่อพัฒนางานศิลปะและการออกแบบ
3. ศึกษาวิธีการสร้างสรรค์งานแก้วเพื่อหาแนวทางส่งเสริมการศึกษาศิลปะและการพัฒนาเชิงพาณิชย์

กรอบแนวคิดของการวิจัย

แก้วเป็นวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ แก้วที่แตกแล้วสามารถนำกลับมาหลอมเพื่อทำผลิตภัณฑ์ชิ้นใหม่ได้ แต่นอกจากการนำกลับไปหลอมแล้วยังมีวิธีการอื่นที่จะนำเศษแก้วมาใช้ประโยชน์ กรอบการศึกษานี้ใช้หลักการด้านสมบัติของแก้วที่แปรรูปได้ด้วยความร้อนในกระบวนการอบแก้ว

สมบัติของแก้ว

แก้วเป็นวัสดุที่เกิดจากการหลอมสารประกอบเคมีเข้าด้วยกัน มีองค์ประกอบหลัก 3 ชนิดได้แก่ ซิลิกา (silica) ได้จากควอตซ์ในทราย โซดาแอส (soda ash) หรือโซเดียมคาร์บอเนต และหินปูน (lime stone) หรือแคลเซียมคาร์บอเนต การหลอมทรายซิลิกาให้เป็นแก้วต้องใช้ความร้อนสูงราว 1700 องศาเซลเซียส โซดาแอสเป็นตัวช่วยในการหลอมเหลว (flux) ทำให้ซิลิกาหลอมในอุณหภูมิที่ต่ำลงราว 1150 องศาเซลเซียส แต่การเติมโซดาแอสในปริมาณมากมีผลเสียทำให้แก้วขาดความคงทน จึงต้องเติมหินปูนเพื่อปรับสมดุลในโครงสร้างของแก้วให้มีความแข็งแรงขึ้น (stabilizer) แก้วประเภทนี้มีชื่อเรียกว่าแก้วโซดาไลม์ (soda-lime glass) ส่วนผสมขององค์ประกอบเคมีสามชนิดนี้ถูกใช้หลอมแก้วมายาวนานกว่า 4,000 ปีแล้ว ปัจจุบันแก้วอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นแก้วประเภทโซดาไลม์ ผู้ประกอบการอาจเติมสาร

เคมีบางชนิดเพื่อให้ได้แก้วที่มีสมบัติตามความต้องการเช่น กระຈกกับขวดแก้วเป็นแก้วโซดาไลม์ทั้งคู่ แต่มี ส่วนประกอบเคมีบางส่วนต่างกันบ้าง แก้วแต่ละชนิดต่างแหล่งที่มาองค์ประกอบเคมีแตกต่างกัน จะขยาย ตัวเมื่อได้รับความร้อนและหดตัวเมื่อเย็นลงในอัตราที่ไม่เท่ากัน ทำให้อบผสานเป็นเนื้อเดียวกันไม่ได้ (Cummings, 2007) อัตราการขยายตัวดังกล่าวเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน coefficient of thermal expansion (COE) การวิจัยนี้จะเก็บตัวอย่างแก้วและนำไปตรวจสอบสาร ประกอบเคมีและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน และทดสอบความเข้ากันได้โดยนำมาอบผสาน

กระบวนการทางเทคนิค

กระบวนการงานแก้วแบ่งออกเป็น 3 เทคนิคตามหลักการขึ้นรูปแก้วที่สัมพันธ์กับความร้อน งานแก้วมีจุดตั้งต้นจากการหลอมแก้วโดยหลอมซิลิกาให้เป็นแก้ว แล้วนำน้ำแก้วหลอมเหลวมาขึ้นรูป ด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การใช้ท่อจุ่มน้ำแก้วแล้วเป่าอากาศเข้าไป ซึ่งเป็นที่มาของชื่อเทคนิคการเป่าแก้ว (glass-blowing) และวิธีการจุ่มน้ำแก้วขึ้นม้วน ขั้นตอนทำงานในวิธีการนี้ใช้ความร้อนในระดับ 1250 องศาเซลเซียส ผู้ปฏิบัติงานต้องใช้ทักษะสูงในการขึ้นรูปแก้วขณะร้อนจัด เรียกกระบวนการนี้ว่า hot glass process วิธีการนี้เป็นเทคนิคการผลิตเครื่องแก้วมาตั้งแต่สมัยโรมัน ปัจจุบันโรงงานเป่าแก้ว ของไทยยังคงใช้วิธีการนี้ในการผลิต

กระบวนการงานแก้วแบบที่สองใช้ความร้อนน้อยกว่าวิธีการแรก อุณหภูมิที่ใช้สูงสุดไม่เกิน 950 องศาเซลเซียส เรียกกระบวนการนี้ว่า warm glass process หลักการทางเทคนิคเกี่ยวข้องกับการใช้ ความร้อนอบแก้วเพื่อแปรรูป หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การอบขึ้นรูปแก้วในเตา (kiln-form glass) กระบวนการ งานแก้วแบบนี้มีประวัติความเป็นมายาวนานตั้งแต่ยุคเฮเลนีสติกแต่ไม่แพร่หลาย ต่อมาถูกรื้อฟื้นขึ้นอีกครั้ง ในศตวรรษที่ 19 และพัฒนาเทคนิคหลายแบบขึ้นจนได้รับความนิยมมาจนถึงปัจจุบัน (Tait, 2004: 219 -221) หลักการทางเทคนิคคือการให้ความร้อนเพื่อทำให้แก้วเปลี่ยนสถานะจากของแข็งหลอมติดกัน ขั้นตอนทางเทคนิคเกี่ยวข้องกับการเตรียมแก้ว แม่พิมพ์ และการอบแก้ว

กระบวนการงานแก้วแบบสุดท้ายไม่เกี่ยวข้องกับความร้อน เรียกว่า cold working process วิธีการขึ้นรูปใช้เทคนิคการตัด เจาะ ขัด หรือเจียรระโนแก้วจนได้ลวดลายและรูปทรงที่ต้องการ ในปัจจุบันมี การใช้แก้วทำจากพลาสติกโพลีเมอร์ชนิดพิเศษใช้ติดขึ้นรูปทรงแก้ว ก็จัดเป็นเทคนิคหนึ่งในกระบวนการนี้

การวิจัยนี้จะใช้กระบวนการอบแก้ว เนื่องจากประหยัดพลังงานกว่าการนำแก้วไปหลอม สามารถ ทำการทดลองในปริมาณน้อยได้ มีวิธีการทางเทคนิคที่หลากหลายลักษณะ ผู้ปฏิบัติงานไม่ต้องสัมผัสกับ ความร้อนสูง และมีเอกสารวิชาการด้านเทคนิคที่ใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งการวิจัยนี้จะนำแนวทางดังกล่าวมาท ดลองกับเศษแก้วของไทยเพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้สร้างสรรค์

การดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้มีการดำเนินการแยกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้ 1. ทบทวนวรรณกรรม 2. การสำรวจโรงงาน 3. การตรวจสอบสมบัติแก้ว 4. การทดลองทางเทคนิคและการสร้างสรรค์ 5. การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ทบทวนวรรณกรรม

จากการสำรวจเอกสารและงานวิจัยของไทยที่เกี่ยวข้องกับแก้ว อาจแยกงานวิจัยได้เป็น 4 แนวทางดังนี้ แนวทางแรกเป็นการศึกษาด้านวัสดุศาสตร์มากที่สุด งานวิจัยกลุ่มนี้ส่วนใหญ่ศึกษาวิธีการแปรรูปขยะแก้วเป็นวัสดุก่อสร้าง แนวทางที่สองเป็นการศึกษาในกรอบการวิจัยด้านเซรามิกโดยนำแก้วมาผสมเพื่อปรับปรุงผลิตภัณฑ์ดินเผาและเครื่องเคลือบ แนวทางวิจัยแบบที่สามเป็นงานวิจัยวิทยาศาสตร์มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาสูตรแก้ว มีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว โดยเฉพาะงานวิจัยของกรมวิทยาศาสตร์บริการ (เอกรัฐ มีชูวาศ และคณะ, 2558: 29-35) ซึ่งการวิจัยนี้ใช้เป็นแนวทางวิเคราะห์ตัวอย่างแก้วด้วย แนวทางที่สี่เป็นงานที่ศึกษาวิธีการใช้แก้วเป็นวัสดุทางศิลปะ เช่น การศึกษาวิธีการขึ้นรูปงานแก้วด้วยเศษแก้วจากขวดบรรจุภัณฑ์ การศึกษาวิธีการใช้สีในงานเซรามิกมาผสมในแก้ว หรือการใช้แก้วประกอบกับงานเซรามิก การวิจัยในแนวทางนี้ศึกษาวิธีการนำแก้วมาเป็นวัสดุเพื่องานสร้างสรรค์ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับการวิจัยนี้ แต่มีกรณีศึกษาแตกต่างกันออกไป แนวทางการทดลองที่สอดคล้องกันได้แก่เทคนิคการอบแก้ว น่าสังเกตว่า การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแปรรูปแก้วทั้งหมดใช้กระบวนการอบแก้วในการทดลอง เนื่องจากการอบแปรรูปแก้วให้หดตัวกันใช้ความร้อนราว 800 องศาเซลเซียส เป็นทางเลือกที่ประหยัดพลังงานกว่าการนำแก้วไปหลอมใหม่ซึ่งใช้ความร้อนเกินกว่า 1400 องศาเซลเซียส ประการที่สอง งานวิจัยหลายรายการชี้ให้เห็นว่า กระบวนการอบแก้วมีเทคนิคแยกย่อย สามารถนำมาใช้สร้างงานได้หลากหลาย การทบทวนวรรณกรรมนี้ทำให้เห็นว่า แผนดำเนินงานของการวิจัยนี้สอดคล้องกับหลักการวิชาการ ทั้งการคัดกรองตัวอย่าง การตรวจสอบสมบัติ การเตรียมการวัตถุดิบ และการสร้างสรรค์ด้วยเทคนิคการอบแปรรูปแก้ว

นักวิชาการด้านศิลปะแก้วให้หลักการสำคัญของกระบวนการอบแก้ว (warm glass) หรือการอบขึ้นรูปแก้วในเตา (kiln-form glass) สามประการ 1. แก้วที่ใช้มีลักษณะเป็นของแข็งในรูปก้อน แท่ง แผ่น หรือผอง 2. สถานะและการแปรสภาพของแก้วในแต่ละระดับอันเนื่องมาจากความร้อน และ 3. แม่พิมพ์ กรอบ หรือพื้นที่รองรับแก้วที่แปรสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน นักวิชาการยังอธิบายลักษณะการแปรสภาพของแก้วโซดาโลมในแต่ละระดับความร้อนไว้ดังนี้ ระยะที่หนึ่ง อุณหภูมิระหว่าง 450-580 องศาเซลเซียสแก้วจะเริ่มเปลี่ยนสถานะเป็นกึ่งของแข็งของเหลว ระยะที่สอง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นระหว่าง 580-680 องศาเซลเซียสแก้วจะเริ่มอ่อนตัว ระยะที่สาม ในระดับอุณหภูมิระหว่าง 680-780 องศาเซลเซียสแก้วจะยึดไม่สามารถรักษาทรงเดิมและจะเปลี่ยนทรงไปตามแรงโน้มถ่วง ระยะที่สี่ ที่อุณหภูมิระหว่าง 780-850 องศาเซลเซียสแก้วที่เกาะติดกันอยู่จะผสานเข้าหากัน ระยะที่ห้า อุณหภูมิ 850-900 องศาเซลเซียสแก้วจะเริ่มเหลว ระยะที่หก ตั้งแต่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสขึ้นไปแก้วจะเหลวมากขึ้นจนไหล (Cummings, 2007) อุณหภูมิที่

ใช้สำหรับการแปรรูปแก้วในเทคนิคต่าง ๆ อยู่ระหว่าง 680-900 องศาเซลเซียส เช่น อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียสสำหรับเทคนิคการอบผสานแก้ว (fusing) อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียสสำหรับเทคนิคอบยุบแก้วบนแม่พิมพ์ (slumping) และ 800-850 องศาเซลเซียส สำหรับเทคนิคการอบผงแก้วผลึก (pâte de verre) ระดับอุณหภูมิ 900-950 องศาเซลเซียสสำหรับเทคนิคการหล่อแก้ว (casting) อย่างไรก็ดี หลักการสามข้อนี้ต้องนำมาใช้โดยคำนึงถึงความสัมพันธ์กัน เช่น แก้วชนิดเดียวกันที่มีขนาดต่างกันจะแปรสภาพด้วยความร้อนในระยะเวลาไม่เท่ากัน เป็นต้น ประการสำคัญ ข้อเสนอแนะระดับอุณหภูมิข้างต้นอ้างอิงสมบัติของแก้วโซดาโลม์ที่ผลิตขึ้นเฉพาะเพื่อใช้ในงานศิลปะแก้ว ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วของไทยมาทดลองซึ่งสมบัติอาจแตกต่างกันไป จึงต้องศึกษาสมบัติและทำการทดลอง เทคนิคการขึ้นรูปแก้วในกระบวนการนี้ที่นำมาทดลองจะใช้ 4 เทคนิคได้แก่ การอบผสานแก้ว (fusing) การอบผงแก้วผลึก (pâte de verre) การอบยุบแก้วบนแม่พิมพ์ (slumping) และการหล่อแก้ว (casting) เพื่อให้เห็นความเป็นไปได้ในการนำเศษแก้วไทยมาใช้ต่อไป

การสำรวจโรงงานเป่าแก้วและการเก็บตัวอย่าง

การสำรวจโรงงานเป่าแก้ว 3 แห่งในจังหวัดนครปฐม (ในช่วงเวลาของการศึกษานี้โรงงานบางแห่งยังดำเนินการอยู่ ปัจจุบันหลายโรงงานยุติการดำเนินธุรกิจแล้ว) ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ให้ข้อมูลในการตรงกันว่า ในกระบวนการผลิตของโรงงานจะได้ผลผลิตประมาณร้อยละ 60 ของปริมาณแก้วที่หลอมใช้ต่อวัน (ธีระ คุณากรไพบุลย์ศิริ, สัมภาษณ์, 12 กุมภาพันธ์ 2563; สุธัมมา เจริญไกรกมล, สัมภาษณ์, 4 ธันวาคม 2563) แก้วที่สูญเสียร้อยละ 15-20 มีฟองอากาศหรือมีสิ่งปนเปื้อนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการหลอม ซึ่งจะถูกตัดทิ้ง ในขั้นตอนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยการเป่าแก้วจะมีแก้วติดปลายท่อถูกตัดทิ้งไปหรือแก้วอาจจะแตก ในขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพก็อาจมีสินค้าที่ไม่ได้คุณภาพถูกคัดออกด้วยการผลิตของโรงงานในแต่ละวันอาจสูญเสียแก้วมากถึงร้อยละ 30-40 และหากเกิดความผิดพลาดในการผลิตก็จะสูญเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นโรงงานเป่าแก้วจะมีปริมาณเศษแก้วค่อนข้างมาก (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1

เศษแก้วในโรงงานมักถูกจัดเก็บไว้ในกระสอบแล้วนำไปกองที่บริเวณกัน



ภาพที่ 2

เศษแก้วลักษณะต่าง ๆ ที่รวบรวมได้จากโรงงานเป่าแก้วในจังหวัดนครปฐม

เศษแก้วที่พบในโรงงานมีหลายลักษณะทั้งขนาด รูปทรง สีทึบและใส ที่พบมากที่สุดเป็นเศษแก้วแตกจากภาชนะโคมไฟหรือเป็นชิ้นส่วนที่ต้องตัดออกในขั้นตอนการผลิต เศษแก้วชนิดนี้มีขนาดเล็ก มีลักษณะโค้งตามรูปทรงภาชนะ บางโรงงานพบแก้วที่ลวดลายนูนจากการผลิตด้วยวิธีการอัดลงแม่พิมพ์ แก้วที่พบปริมาณมากอีกแบบหนึ่งคือ ก้อนแก้วขนาดใหญ่ที่ได้จากแก้วเหลือก้นเบ้า มักพบสิ่งปนเปื้อนในเศษแก้วประเภทนี้ นอกจากนี้ ยังพบสินค้าที่ไม่มีความต้องการในตลาดแล้ว เช่น กระเบื้องมุงหลังคาแก้ว แก้วครอบหลอดไฟรถยนต์หลายรูปแบบ เป็นต้น (ภาพที่ 2) ในการสำรวจโรงงานมีการเก็บรวบรวมเศษแก้วประเภทต่าง ๆ เพื่อนำมาคัดกรอง ทำความสะอาด จัดแยกเป็นกลุ่มตามที่มาและลักษณะเพื่อทำการศึกษาต่อไป

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางความร้อน

การวิจัยนี้ใช้เศษแก้วจากหลายแหล่งที่มา จึงต้องตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วและส่วนประกอบทางเคมี การตรวจสอบนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองวัสดุวิศวกรรมกรรมวิทยาศาสตร์บริการ โดยได้ส่งตัวอย่างแก้วไปตรวจสอบสองครั้ง ซึ่งได้ผลการตรวจสอบดังรายงานในตารางที่ 1-4

แก้วชุดแรกตรวจสอบแก้วใส แก้วทึบสีชาว แก้วใสสีเขียวของไทย เป็นตัวอย่าง SU 1-3 ตามลำดับ และมีแก้วใสจากต่างประเทศที่นิยมใช้ในงานเป่าแก้ว จากบริษัท Spectrum Glass Company, Inc. สหรัฐอเมริกา ชื่อแก้ว Spectrum Premium 2.0 Nuggets* เป็นตัวอย่างแก้ว SU 4 ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 1) พบว่า แก้วใสของไทย ตัวอย่าง SU 1 มีปริมาณซิลิกา (SiO_2) โดยน้ำหนักร้อยละ 66 ซึ่งจัดอยู่ในระดับค่อนข้างต่ำ และมีตัวช่วยหลอมโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) กับโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ในปริมาณสูงร้อยละ 25 เมื่อเทียบกับแก้วใสจากต่างประเทศ ตัวอย่าง SU 4 และเห็นความแตกต่างชัดเจนขึ้นอีกเมื่อเทียบกับสูตรแก้วที่ได้รับการปรับปรุงจากการวิจัยก่อนหน้านี้ของกรรมวิทยาศาสตร์บริการ ซึ่งมีปริมาณซิลิการ้อยละ 67-72 และมีโซเดียมออกไซด์กับโพแทสเซียมออกไซด์ร้อยละ 15-19 (เอกรัฐ มีชูวาศ และคณะ, 2558: 29-35) ผลตรวจสอบนี้แสดงว่า แก้วใสของโรงงานไทยจะหลอมในอุณหภูมิต่ำแต่จะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (COE) สูงกว่าแก้วจากต่างประเทศ ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของตัวอย่างแก้ว SU 1-4 (ตารางที่ 2) ผลการตรวจสอบนี้ยังแสดงว่า แก้วที่มี COE มากที่สุดคือ ตัวอย่าง SU 2 แก้วสีชาวทึบจากโรงงานของไทย พิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วทึบสีชาวพบว่า มีซิลิกาผสมอยู่น้อยที่สุดเพียงร้อยละ 61 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้มีเนื้อแก้วน้อยกว่าตัวอย่างอื่น และมีโซเดียมออกไซด์กับโพแทสเซียมออกไซด์เป็นส่วนผสมอยู่มากถึงร้อยละ 22.26 และมีฟลูออรีนมากถึงร้อยละ 5.67 ของสัดส่วนทั้งหมด ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูง ดังนั้นหากใช้แก้วใสและแก้วทึบสีชาวชนิดก่อนมาอบรวมกันก็มีความเป็นไปได้สูงว่าแก้วก็จะแตก ผลการตรวจตัวอย่างทั้ง 4 ชิ้น แก้วที่มีโอกาสอบผานเข้ากันได้มากที่สุดคือ แก้วใสและแก้วใสสีเขียวของโรงงานในประเทศไทย เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกันที่สุด

* บริษัทได้ปิดตัวลงในปีพ.ศ.2559 แต่สามารถดูสมบัติของแก้วได้ใน <https://msdsdigital.com/glass-spectrum-premium-20-nuggets-msds>

ตารางที่ 1

องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว SU 1-4

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ตัวอย่างแก้ว			
	SU 1 (Clear glass)	SU 2 (White)	SU 3 (Green)	SU 4 (Clear glass)
Na ₂ O	24.36%	17.92%	22.67%	17.95%
MgO	0.12%	0.10%	0.09%	0.10%
Al ₂ O ₃	1.97%	7.01%	1.85%	1.88%
SiO ₂	65.59%	61.99%	67.33%	69.74%
SO ₃	0.06%	0.03%	0.03%	0.13%
Cl	0.38%	0.05%	0.06%	0.07%
K ₂ O	0.55%	4.34%	0.48%	0.42%
CaO	5.79%	0.59%	6.08%	7.90%
TiO ₂	0.06%	0.05%	0.04%	-
Cr ₂ O ₃	-	-	0.11%	-
Fe ₂ O ₃	0.06%	0.06%	0.09%	0.05%
ZnO	0.51%	1.79%	0.52%	1.03%
NiO	-	-	-	0.04%
As ₂ O ₃	0.45%	0.36%	0.64%	-
ZrO ₂	0.04%	0.04%	0.03%	0.02%
Sb ₂ O ₃	0.07%	-	-	0.17%
BaO	-	-	-	0.51%
F	-	5.67%	-	-

หมายเหตุ. ผลการวิเคราะห์จาก ดร.เอกรัฐ มีชูวาศ กลุ่มวัสดุอัจฉริยะและเทคโนโลยีเคลือบผิว กองวัสดุวิศวกรรม
กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ตารางที่ 2

ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้ว SU 1-4

ตัวอย่างแก้ว	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ช่วงอุณหภูมิ 50-300 °C ($\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)
SU 1 (Clear glass)	11.03×10^{-6}
SU 2 (White)	12.56×10^{-6}
SU 3 (Green)	11.09×10^{-6}
SU 4 (Clear glass)	10.21×10^{-6}

หมายเหตุ. ตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ dilatometric method NETZSCH DIL 402 PC.; ผลการวิเคราะห์จาก ดร.เอกรัฐ มีชูวาศ กลุ่มวัสดุอัจฉริยะและเทคโนโลยีเคลือบผิว กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ตัวอย่างแก้วชุดสองที่ส่งให้กรมวิทยาศาสตร์บริการตรวจสอบ ได้มาจากโรงงานอีกแห่งหนึ่งในประเทศไทยซึ่งผลิตแก้วสี แยกเป็นตัวอย่างแก้ว 18 สี ใช้รหัสแก้ว SU 5-22 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (ตารางที่ 3) พบว่า ตัวอย่างแก้ว Black SU 10 มีค่าการขยายตัว COE ที่ 12.59×10^{-6} ซึ่งสูงมากอย่างเด่นชัดที่เมื่อเทียบกับแก้วสีอื่น จึงมีความเป็นไปได้ไม่น้อยที่จะนำมาใช้อบผสานหลอมกับสีอื่น ส่วนตัวอย่างแก้วที่มีค่า COE สูงรองลงมาจะระหว่าง $11.01 \times 10^{-6} - 11.67 \times 10^{-6}$ ได้แก่ แก้วในกลุ่มสีแดง แดงเข้ม และส้ม SU 8 SU 9 และ SU 15 แก้วในกลุ่มนี้มีส่วนประกอบเคมีที่ใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะส่วนผสมของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีปริมาณมากเห็นได้เด่นชัดจึงอบผสานกับสีอื่นไม่ได้

แก้วอีกกลุ่มหนึ่งที่มีธาตุใกล้เคียงกัน ได้แก่ กลุ่มสีม่วง SU 19 และ SU 20 โดยมีซิลิกา (SiO₂) ผสมอยู่มากที่สุดถึงร้อยละ 73.18 และมีโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) ในสัดส่วนน้อยที่สุดที่ 11.03-11.53 และส่วนผสมของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ก็มีน้อยเพียง 0.91-1 % ผลการตรวจสอบธาตุของแก้วสองตัวอย่างนี้ สอดคล้องกับค่า COE ซึ่งมีค่าต่ำ 9.06×10^{-6} และอุณหภูมิที่แก้วสองตัวอย่างนี้เริ่มหลอมจะสูงกว่าตัวอย่างอื่น (ดูตารางที่ 3 และ 4) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า แก้วสองตัวอย่างนี้มีความแข็งตัวสูงและจะต้องใช้ความร้อนในการหลอมมากกว่าแก้วสีอื่น เนื่องจากมีซิลิกาสูงและโซเดียมออกไซด์ต่ำ ความเป็นไปได้ในการนำแก้วสองตัวอย่างนี้มาอบรวมกับแก้วสีกลุ่มอื่นมีน้อย แต่สามารถนำกลุ่มสีเดียวกันอบผสานกันได้

ตารางที่ 3

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วสี SU 5-22

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ตัวอย่างแก้ว																	
	SU 5	SU 6	SU 7	SU 8	SU 9	SU 10	SU 11	SU 12	SU 13	SU 14	SU 15	SU 16	SU 17	SU 18	SU 19	SU 20	SU 21	SU 22
Na ₂ O	16.99	17.44	18.14	18.56	19.36	23.39	18.78	12.76	23.35	18.58	17.59	18.47	17.87	17.94	11.03	11.53	17.13	16.47
MgO	1.32	0.97	1.00	0.11	-	0.12	-	2.36	-	-	0.09	-	1.00	1.01	-	-	1.29	2.30
Al ₂ O ₃	1.77	0.96	1.22	3.03	2.52	0.56	6.06	2.68	0.27	4.26	1.61	3.26	0.92	1.18	2.12	2.39	2.49	1.35
SiO ₂	68.33	72.61	71.36	66.11	64.91	67.79	70.72	61.89	71.15	69.29	66.97	69.06	72.31	71.55	73.18	73.18	74.31	69.85
SO ₃	0.05	0.03	0.05	0.12	0.22	-	0.32	0.38	0.09	0.11	0.23	0.13	0.03	0.07	-	-	0.10	0.06
Cl	0.12	0.07	0.07	0.08	0.08	0.65	0.29	0.74	0.07	0.19	0.08	0.08	0.06	0.06	0.06	0.05	0.10	0.08
K ₂ O	1.41	0.27	0.43	5.61	5.79	2.89	1.02	2.69	0.02	3.64	6.13	3.41	0.24	0.44	10.31	9.69	0.18	0.39
CaO	4.17	7.04	6.18	2.55	2.66	4.44	1.18	6.75	4.94	2.30	1.70	2.19	6.95	6.19	1.00	0.91	3.22	7.01
TiO ₂	0.04	0.04	0.04	-	0.03	0.03	0.05	4.10	0.04	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05
MnO	1.68	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.26	-	0.24	0.17	-	-
Fe ₂ O ₃	2.58	0.04	0.08	0.06	0.07	0.09	0.05	0.32	0.07	0.05	0.06	0.06	0.05	0.09	0.05	0.03	0.06	0.05
ZnO	0.07	-	-	3.42	3.79	-	0.02	1.86	-	1.33	5.15	2.91	-	-	1.78	1.84	-	0.04
SeO ₂	0.03	-	-	0.04	0.04	0.04	-	-	-	0.02	0.08	-	-	-	-	-	-	-
SrO	0.02	-	-	-	-	-	0.02	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03
ZrO ₂	0.02	-	-	-	-	-	0.03	-	-	0.03	0.04	0.03	-	-	0.02	0.02	0.02	0.02
Sb ₂ O ₃	0.19	0.22	-	0.19	0.17	-	0.18	-	-	0.12	0.22	0.20	0.21	-	-	-	-	-
BaO	1.22	-	0.06	-	-	-	1.21	3.11	-	-	-	0.09	-	0.06	-	-	-	1.60
Cr ₂ O ₃	-	0.06	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07	0.03	-	-	0.24	0.28
CuO	-	-	0.32	-	-	-	-	0.14	-	-	-	-	-	0.32	-	-	0.44	0.13
As ₂ O ₃	-	-	0.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29	0.12	0.11	0.38	0.29
PbO	-	-	0.74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.73	-	-	-	-
CdO	-	-	-	0.12	0.32	-	0.07	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-
SeO ₂	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ. ตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุในตัวอย่างด้วยเทคนิค Wavelength-dispersive XRF spectrometry technique, S8 Tiger, Bruker AXS.; ผลการวิเคราะห์จาก ดร.เอกรัฐ มีชูวาศ กลุ่มวัสดุอัจฉริยะและเทคโนโลยีเคลือบผิว กองวัสดุวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ; รายการแก้วสีตัวอย่าง: Raw Sienna (SU 5), Cobalt Blue (SU 6), Ultramarine Blue (SU 7), Red Rose (SU 8), Dark Crimson (SU 9), Black (SU 10), White (SU 11), Naples Yellow (SU 12), Light Yellow Ochre (SU 13), Cadmium Yellow (SU 14), Scarlet red (SU15), Topaz (SU 16), Cerulean Blue (SU 17), Passion Blue (SU 18), Purple (SU 19), Light Purple (SU 20), Emerald Green (SU 21), Sap Green (SU 22)

ตารางที่ 4

ผลการตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วสี SU 5-22

ตัวอย่างแก้ว	COE 50-300 °C ($\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Tg (°C)	Tm (°C)
SU 5 (Raw Sienna)	9.56×10^{-6}	513.2	579.9
SU 6 (Cobalt Blue)	9.30×10^{-6}	529.1	580.5
SU 7 (Ultramarine Blue)	9.02×10^{-6}	536.2	597.7
SU 8 (Red Rose)	11.11×10^{-6}	495.0	555.9
SU 9 (Dark Crimson)	11.01×10^{-6}	487.5	564.5
SU 10 (Black)	12.59×10^{-6}	482.9	544.8
SU 11 (White)	9.19×10^{-6}	511.3	571.3
SU 12 (Naples Yellow)	9.37×10^{-6}	525.5	592.0
SU 13 (Light Yellow Ochre)	11.18×10^{-6}	495.5	553.5
SU 14 (Cadmium Yellow)	9.70×10^{-6}	513.4	574.5
SU 15 (Scarlet red)	11.67×10^{-6}	506.6	565.5
SU 16 (Topaz)	9.52×10^{-6}	522.1	592.2
SU 17 (Cerulean Blue)	9.07×10^{-6}	535.7	597.2
SU 18 (Passion Blue)	9.2×10^{-6}	531.0	592.9
SU 19 (Purple)	8.98×10^{-6}	544.1	612.3
SU 20 (Light Purple)	9.06×10^{-6}	548.5	615.3
SU 21 (Emerald Green)	8.21×10^{-6}	536.1	586.0
SU 22 (Sap Green)	9.17×10^{-6}	513.9	581.2

หมายเหตุ. COE: ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน, Tg: อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแก้ว, Tm: อุณหภูมิที่แก้วเริ่มหลอม ตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแก้วด้วยเครื่องไดลาโตมิเตอร์ dilatometric method NETZSCH DIL 402 PC.; ผลการวิเคราะห์จาก ดร.เอกรัฐ มีชูวาศ กลุ่มวัสดุอัจฉริยะและเทคโนโลยีเคลือบผิว กองวัสดุวิศวกรรม ภาควิทยาศาสตร์บริการ

การทดลอง

การทดลองในการวิจัยนี้มี 2 ขั้นตอนดังนี้ 1. การทดสอบอบแก้ว 2. การทดลองสร้างสรรค์

การทดสอบอบแก้ว

การทดสอบอบแก้วเพื่อหาระดับอุณหภูมิที่แก้วอ่อนตัวใช้แก้วจากโรงงาน 3 แห่ง ทั้งประเภทกอนแผ่น และผง โดยนำมาอบที่อุณหภูมิสูงสุด 700 - 750 องศาเซลเซียส มีการทดสอบอบผาน fusing โดยใช้อุณหภูมิ 800-850 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 3 และ 4) และการหล่อแก้วในแม่พิมพ์ casting โดยใช้อุณหภูมิ 870-900 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับเทคนิคอบแก้วโซดาไลม์ (Cumming, 2007) ส่วนการอบคลายความเครียดจากการขยายตัวด้วยความร้อน annealing ใช้อุณหภูมิ 516 องศาเซลเซียส

ผลจากการทดสอบพบว่า แก้วใสที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกันตามตัวอย่างแก้ว SU 1 และ SU 3 อ่อนตัวแผ่ออกเป็นแผ่นได้ดีในอุณหภูมิ 710 องศาเซลเซียส และอบผานรวมเข้ากันได้ ในอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งจัดว่าใช้อุณหภูมิตามหลักการทางเทคนิค สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีที่พบว่ามีโซเดียมออกไซด์สูงทำให้แก้วอ่อนตัวได้เร็ว (ดูผลวิเคราะห์สมบัติ) ส่วนแก้วสีตามตัวอย่างแก้ว SU 5 ถึง SU 22 จากโรงงานอีกแห่งหนึ่ง ผลการทดลองพบว่า แก้วจากโรงงานนี้มีความหนืดสูง ผนึกอุณหภูมิเดียวกันกว่าแก้วจากสองโรงงานแรก อบผานได้ในอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ซึ่งจัดว่าใช้อุณหภูมิสูงสำหรับแก้วโซดาไลม์ นำมาอบผานเข้ากันได้เป็นบางกลุ่มสีเท่านั้น เช่น แดง Red Rose แดงเข้ม Crimson Red ส้มแสด Scarlet Red หรือ ม่วงเข้ม Purple กับม่วงอ่อน Light Purple เป็นต้น (ดูตารางที่ 3 และ 4) แต่แก้วต่างกลุ่มสีส่วนใหญ่ไม่สามารถอบผานเข้ากันได้ เมื่อนำมาอบจะเกิดการแตกร้าวบริเวณจุดเชื่อมเป็นแนวยาว (ภาพที่ 5)

จากการทดสอบสมบัติยังพบข้อสังเกตว่า เศษแก้วจากโรงงานมีรูปทรง สี และขนาดเศษแก้วไม่เท่ากัน เศษแก้วภาชนะแตกมีขนาดและความหนาไม่เท่ากัน เมื่อนำมาอบแผ่หรืออบผานเป็นแผ่นเดียวกันจะได้แก้วที่มีผิวหน้าไม่สม่ำเสมอ ก่อนนำแก้วที่อบแล้วมาใช้งานอาจต้องนำไปอบแปรรูปอีกรอบ ทำให้ต้องสูญเสียพลังงานหลายครั้ง นอกจากนี้เศษแก้วจากโรงงานมีความบริสุทธิ์น้อยแม้จะผ่านการคัดกรองแล้วก็ตาม กล่าวคืออาจมีสิ่งปนเปื้อนอยู่ในเนื้อแก้วหรือเป็นภาชนะแตกที่มีแก้วสีเป็นลายบนแก้วใส หากนำมาอบผานก็จะเห็นสิ่งปนเปื้อนหรือลายสีแทรกอยู่ในเนื้อแก้ว ดังนั้น การนำเศษแก้วมาใช้งานจึงต้องมีการเตรียมวัสดุ หรือต้องนำไปอบแปรรูปก่อนครั้งหนึ่งเพื่อให้พร้อมใช้งานต่อไป

ระหว่างการวิจัยนี้มีช่วงเวลากักตัวเนื่องจากการระบาดของไวรัสโควิด-19 ทำให้ไม่สามารถดำเนินการทดลองในสตูดิโอได้ การศึกษาพบว่า มีเตาขนาดเล็กทำจากวัสดุฉนวนเคลือบซิลิกอนคาร์ไบด์ สามารถทำความร้อนถึง 900 องศาเซลเซียสภายในเวลา 5-10 นาทีโดยใช้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเตาไมโครเวฟกำลังไฟฟ้า 1100 วัตต์ ที่ใช้ในครัวเรือน (Cheng et al., 2024: 168) จึงนำมาใช้ทดลองอบแก้ว

ผลการทดลองพบว่า เศษแก้วจากโรงงานเดียวกันอบผสมรวมกันได้ดี และเศษแก้วประเภทขวดน้ำที่มีความแข็งแรงกว่าเศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วก็สามารถหลอมตัวได้ดีเช่นกัน แก้วที่ได้มีทรงมนผิวเงางาม ผลการทดลองยังพบว่า แก้วที่ผ่านการอบแล้วครั้งที่หนึ่งสามารถนำมาอบผสมรวมกับแก้วอีกชิ้นหนึ่งได้ เมื่อทดลองอบแก้วทับซ้อนกันสามครั้ง พบว่าแก้วยังคงสมบัติเดิม ผลการทดลองทำให้เห็นว่า เตาประเภทนี้ นำมาใช้สร้างงานแก้วขนาดเล็กได้ดี สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นงานแก้วประเภทเครื่องประดับได้ (ภาพที่ 6)



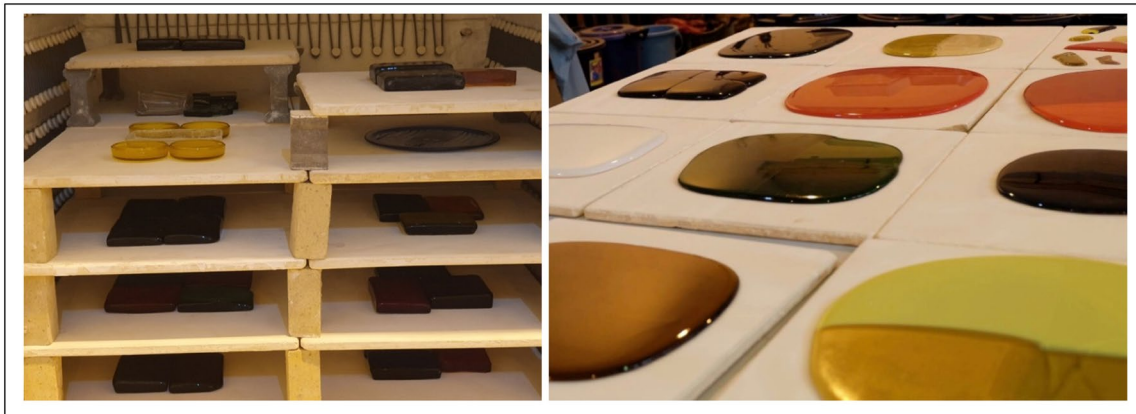
ภาพที่ 3

แก้วใสจากชิ้นส่วนภาชนะก่อนและหลังนำเข้าเตาอบในอุณหภูมิ 710 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 5

โปรแกรมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองแผ่แก้วใสจากชิ้นส่วนภาชนะ

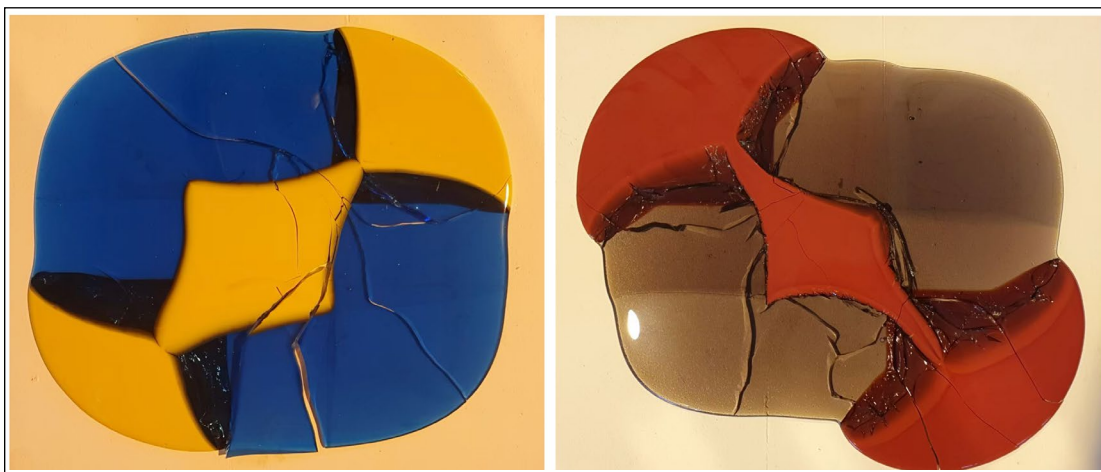
โปรแกรม	1	2	3	4	5	6	7
อุณหภูมิ (°C)	200	400	600	710	710	516	516
เวลา (ชั่วโมง/นาที)	1.00	1.30	1.30	1.00	00.10	00.05	00.30



ภาพที่ 4
แก้วหลากสีก่อนและหลังนำเข้าเตาอบในอุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 6
โปรแกรมอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองแผ่แก้วหลากสี

โปรแกรม	1	2	3	4	5	6	7	8	9
อุณหภูมิ (°C)	200	400	600	800	850	850	516	516	-
เวลา	1.00	1.30	1.30	1.00	00.10	00.05	00.30		



ภาพที่ 5
ผลการทดสอบอบผลานแก้วสีบางกลุ่มไม่สามารถหลอมเข้ากันได้



ภาพที่ 6

การทดลองอบในเตาอบไมโครเวฟ

การทดลองสร้างสรรค์

การทดสอบอบแก้วแสดงให้เห็นว่าแม้จะมีข้อจำกัดในการใช้แก้วสี แต่โดยรวมเศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วมีสมบัติดีพอสำหรับนำมาใช้สร้างสรรค์งาน เพื่อให้เห็นความเป็นไปได้ของการนำเศษแก้วมาใช้งานทั้งด้านศิลปะและการออกแบบ การศึกษานี้จึงทดลองสร้างสรรค์ในขั้นต่อไปโดยคำนึงถึงหลักการ 3 ข้อ ได้แก่ 1.คุณลักษณะของแก้วที่โดดเด่นเช่น สี ความใสหรือทึบที่เหมาะสมกับรูปแบบของผลงาน 2.สมบัติของแก้วที่สามารถใช้ในเทคนิควิธีการ warm glass และ 3. เนื่องจากเศษแก้วจากโรงงานไม่ใช่วัสดุพร้อมใช้งานสร้างสรรค์ต่างจากแก้วที่ผลิตขึ้นในต่างประเทศเพื่อเทคนิคการอบโดยเฉพาะ จึงต้องมีการการแปรรูปเศษแก้วในอีกขั้นตอนหนึ่ง ซึ่งวิธีการส่วนใหญ่ใช้ความร้อน เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าที่จะนำเศษแก้วเหล่านี้ไปใช้ในด้านศึกษาศิลปะหรือการพัฒนาเชิงพาณิชย์ต่อไป การศึกษานี้จะทำการทดลองที่ต้องแปรรูปแก้วหนึ่งหรือสองขั้นตอนเท่านั้น

การทดลองสร้างสรรค์ของการวิจัยนี้มี 2 ขั้นตอนดังนี้ 1. การแปรรูปเศษแก้วเพื่อใช้สร้างสรรค์ 2. การทดลองสร้างสรรค์ด้วยกระบวนการอบแก้ว warm glass ใช้วิธีการ 4 เทคนิคได้แก่ การอบผสานแก้ว (fusing) การอบผงแก้วผลึก (pâte de verre) การอบยุบแก้วบนแม่พิมพ์ (slumping) และการหล่อแก้ว (casting)

การแปรรูปเศษแก้วเพื่อใช้สร้างสรรค์

เศษแก้วที่รวบรวมได้จากโรงงานมีรูปลักษณะแตกต่างกันมาก เพื่อนำเศษแก้วมาใช้ในการสร้างสรรค์ได้สะดวกจำเป็นต้องแปรรูปก่อนใช้งาน ในขั้นตอนนี้เป็นการเตรียมวัสดุ ซึ่งนอกจากเป็นการคัดกรองคุณภาพและสมบัติของเศษแก้วที่จะนำมาใช้งานต่อไปแล้ว ยังเป็นขั้นตอนช่วยในการสร้างสรรค์ขั้นต่อไปด้วย โดยจะเริ่มจากการแปรรูปเศษแก้วให้กลายเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นหน่วยที่เหมือนกัน uniform เช่น เป็นแผ่น เป็นก้อน หรือเป็นเส้น การอบผสานแก้วด้วยการทดลองข้างต้นเป็นวิธีการพื้นฐานที่นำมาใช้แปรรูปเศษแก้วเพื่อทำให้เป็นแผ่นหรือเป็นก้อนที่มีความหนาตามต้องการ ซึ่งทำได้โดยการสร้างกรอบในเตาให้แก้วที่อ่อนตัวไหลแผ่ออกอยู่ในพื้นที่จำกัด วิธีการนี้สามารถแปรรูปแก้วหลายลักษณะทั้งก้อนขนาดใหญ่ ชิ้นส่วนภาชนะแตก หรือผองแก้ว แก้วที่ได้จากการอบขึ้นเตรียมการนี้ สามารถนำไปใช้สร้างสรรค์งานในเทคนิคต่อไปได้หลากหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตาม การเลือกเศษแก้วนำมาแปรรูปด้วยการอบควรคำนึงถึงการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าด้วย เช่น แก้วสีเป็นก้อนขนาดใหญ่มากหากนำมาอบแผ่เป็นแผ่นอาจไม่คุ้มค่าในการนำมาแปรรูปเพราะต้องใช้พลังงานมาก แต่เหมาะที่จะนำไปใช้ในเทคนิคการหล่อเพราะนำเศษแก้วไปใช้ครั้งเดียวก็ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ เป็นต้น

การอบแปรรูปก้อนแก้วให้เป็นผองเป็นขั้นตอนหนึ่งที่น่าสนใจกับเศษแก้วภาชนะใสที่มีแก้วสีเป็นลายแทรกได้ดี ทำให้ได้ผองแก้วที่มีสีเท่ากันสม่ำเสมอ ผองแก้วแบบนี้เรียกว่า frit วิธีการขั้นแรกต้องนำเศษแก้วไปย่อยด้วยการอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แล้วนำออกจากเตาเทลงในน้ำเย็นให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ทำให้แก้วแตกราน เมื่อนำมาเคาะก็จะได้แก้วเกล็ดขนาดเล็ก จากนั้นนำไปอบคลายความเค้นที่อุณหภูมิ 516 องศาเซลเซียส จึงค่อยนำไปกลิ้งใส่ในหม้อบดสาร (ภาพที่ 7 บนขวา) จะได้ผองแก้ว จากนั้นนำมาร่อนแยกขนาดด้วยตะแกรงที่มีระดับความละเอียดจาก 10-200 เมช จะได้ผองแก้วขนาดเล็กเรียงกันลงไป (ภาพที่ 7 กลางซ้ายและขวา) ผองแก้วทั้งขนาดเม็ดใหญ่และแบบละเอียดนำไปใช้ในการสร้างสรรค์ได้หลายเทคนิค

การแปรรูปแก้วโดยใช้ความร้อนยังมีอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ทำให้เศษแก้วเป็นแท่งหรือเป็นเส้นเรียกว่า rod glass โดยใช้ความร้อนจากหัวพันไฟซึ่งต้องใช้ความชำนาญ เพราะแก้วโซดาโล่มเปราะแตกง่ายเมื่อได้รับความร้อน ในขั้นตอนแรกจะต้องอุ่นแก้วและเผาปลายแท่งเหล็กให้ร้อน แล้วเชื่อมติดกัน จากนั้นนำแก้วไปลงไฟจนแก้วหลอม ในจังหวะที่แก้วอ่อนตัวจึงใช้คีมดึงแก้วเป็นเส้น เส้นแก้วที่ได้สามารถนำไปใช้หลอมเป็นลวดลายในหลายเทคนิค เช่น นำมาเป็นลูกบิดทำเครื่องประดับด้วยวิธีการ lampworking (ภาพที่ 7 ล่างซ้ายและขวา)

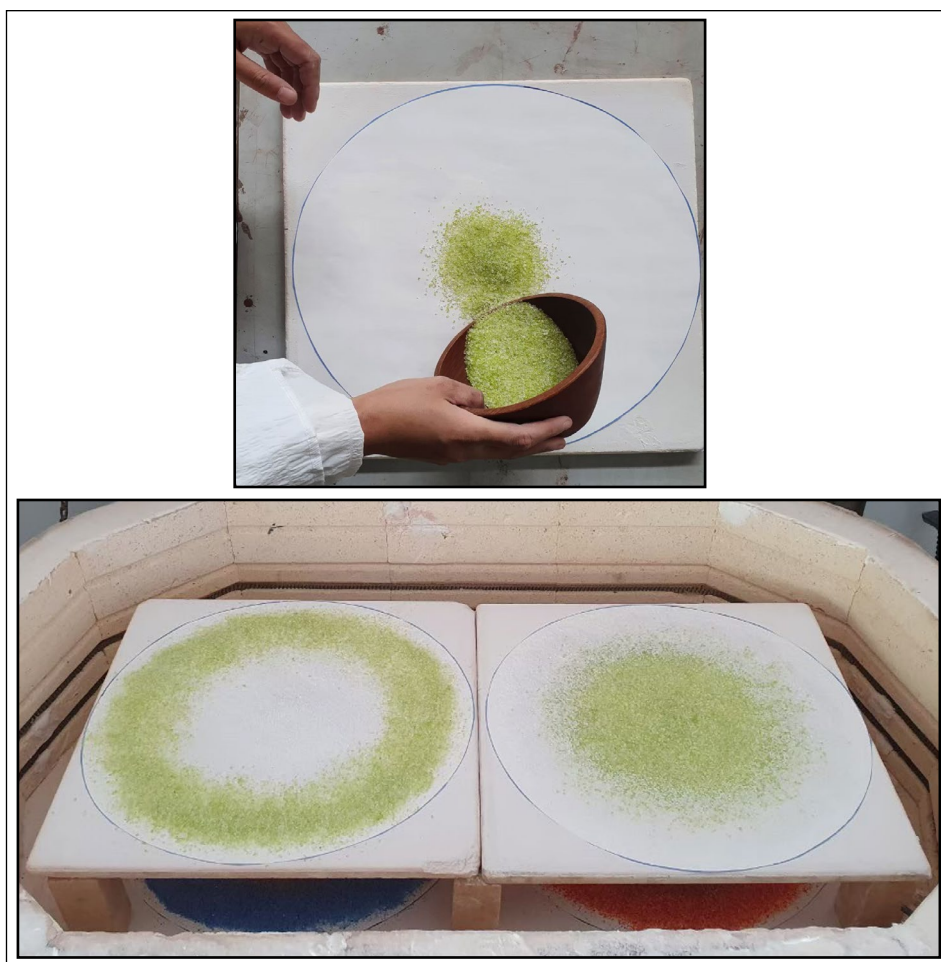


ภาพที่ 7

ขั้นตอนการแปรรูปเศษแก้ว

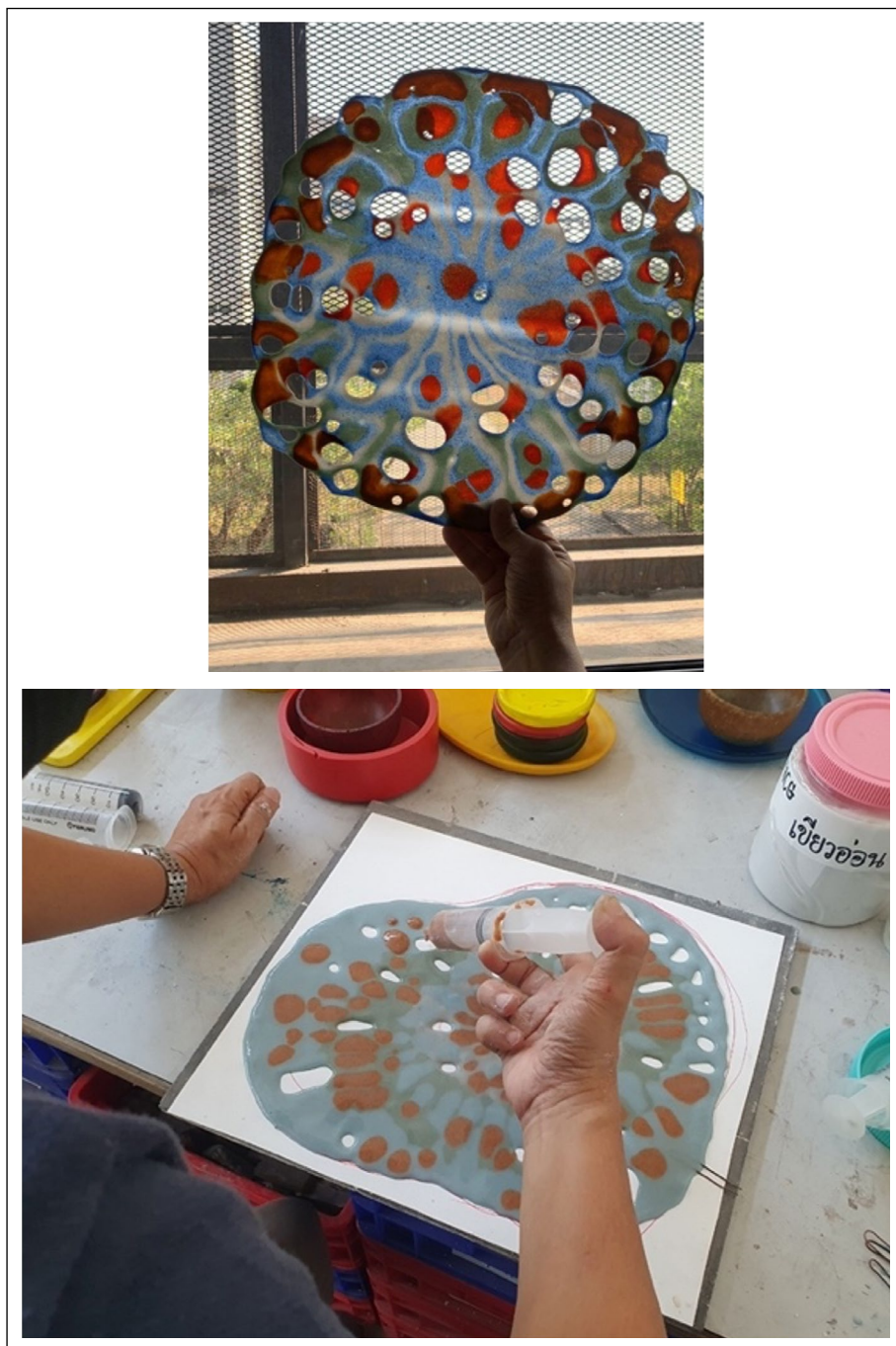
หมายเหตุ. การย่อยเศษแก้วโดยการอบและแช่น้ำเย็น (บนซ้าย) การบดแก้วด้วยการใช้หม้อบดสาร (บนขวา) การร่อนแยกผงแก้วด้วยตะแกรง (กลางซ้าย) ผงแก้วขนาดต่างๆที่ได้จากการร่อน (กลางขวา) การแปรรูปแก้วเป็นเส้นด้วยวิธีการหลอมแล้วยืด (ล่างซ้ายและล่างขวา)

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเป็นขั้นตอนตั้งต้นของการสร้างสรรค์ด้วย โดยการอบผสานแก้วเป็นแผ่นหรือเป็นก้อนให้มีสีหรือลายตามการออกแบบ ในการวิจัยนี้มีการเตรียมการวัสดุหลายวิธีการเช่น ใช้ผงแก้วเม็ดโตขนาด 10-20 เมช มาโรยบางแล้วอบผสานได้แผ่นแก้วเนื้อผลึกเป็นลักษณะเด่น ซึ่งนำมาใช้สร้างสรรค์งานรูปทรงอิสระได้ดี (ภาพที่ 8) ส่วนผงแก้วที่มีความละเอียดมากนำมาผสมกับสารเพิ่มความหนืด คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxy methyl cellulose) หรือเรียกว่าสารซีเอ็มซี (CMC) ซึ่งใช้ช่วยเพิ่มการคงตัวในอาหาร สารซีเอ็มซีสลายไปได้ด้วยความร้อนในเตาอบ วิธีการใช้คือการนำมาผสมน้ำในอัตราส่วน 1:10 จากนั้นนำน้ำกาวมาผสมกับผงแก้ว แล้วบรรจุลงในกระบอกฉีดยา แล้วนำไปฉีดเป็นลวดลายผสมสีลงบนแผ่นรองอบ ผลลัพธ์จากอบแล้วได้แผ่นแก้วที่มีความบางและมีสีผสมกัน ลักษณะไหลซึมเข้าหากันคล้ายผ้าม้าย้อม (ภาพที่ 9) นอกจากนี้ มีการนำแก้วสีทั้งใสและทึบแสงที่อบผสานเข้ากันได้มาจัดกลุ่มและนำไปอบแยกเป็นชุดสีต่าง ๆ ซึ่งนำไปใช้สร้างสรรค์ผลงานในเทคนิคอบผสาน fusing ชุดหนึ่ง (ภาพที่ 10)



ภาพที่ 8

การเตรียมแผ่นแก้วผิวหยาบด้วยการโรยผงแก้วแล้วนำไปอบ



ภาพที่ 9

การเตรียมแผ่นแก้วแบบสีไหลประสานด้วยการใช้ผงแก้วผสมกาวแล้วนำไปอบ

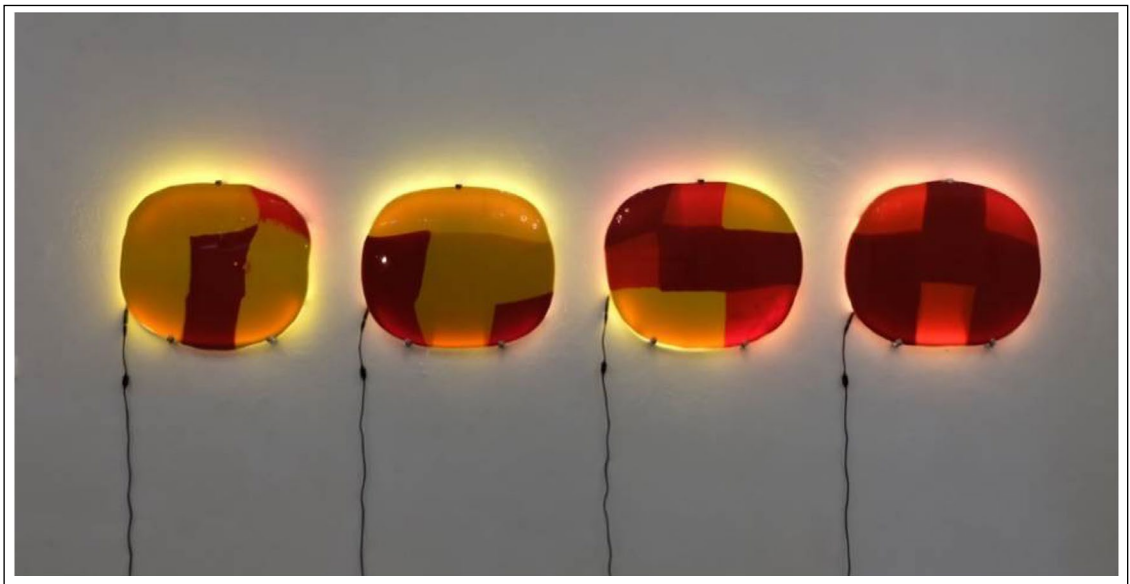


ภาพที่ 10

แผ่นแก้วลักษณะต่างๆ ที่ได้จากการใช้เศษแก้วจากโรงงานมาอบผสานเข้ากัน

การสร้างสรรค์ผลงาน

ขั้นตอนการออกแบบและการสร้างสร้งงานของการศึกษานี้คำนึงถึงคุณลักษณะของแก้วที่มีความเด่นชัดเป็นสำคัญ ประการแรก สีของแก้วที่มีสีจัดมากโดยเฉพาะแก้วทึบแสงกลุ่มโทนสีแดง แดงส้ม และเหลือง แก้วกลุ่มนี้เหมาะสำหรับผลงานสร้างสรรค์ที่เน้นความสดจัดของสี โดยจัดวางคู่สีเป็นระนาบในสัดส่วนที่เหมาะสมและใช้เทคนิคคอบผสานแก้ว (fusing glass) (ภาพที่ 11) สำหรับงานออกแบบแก้วสีทึบนี้เหมาะกับภาชนะรูปทรงเรียบง่ายที่มีสีเด่นชัด ซึ่งอาจทำในสองขั้นตอนคือนำไปอบเป็นแผ่น (fusing glass) ก่อนนำไปอบยวบแก้วบนแม่พิมพ์ (slumping) อีกครั้งหนึ่ง (ภาพที่ 12) หรืออาจใช้ในเทคนิคการหล่อแก้ว (casting glass) ขั้นตอนเดียว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นภาชนะที่มีความหนาสีทึบสดจัด (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 11

ชุดผลงานสร้างสรรค์ศิลปะแก้วสีทึบในเทคนิคคอบผสานแก้ว (fusing glass)



ภาพที่ 12

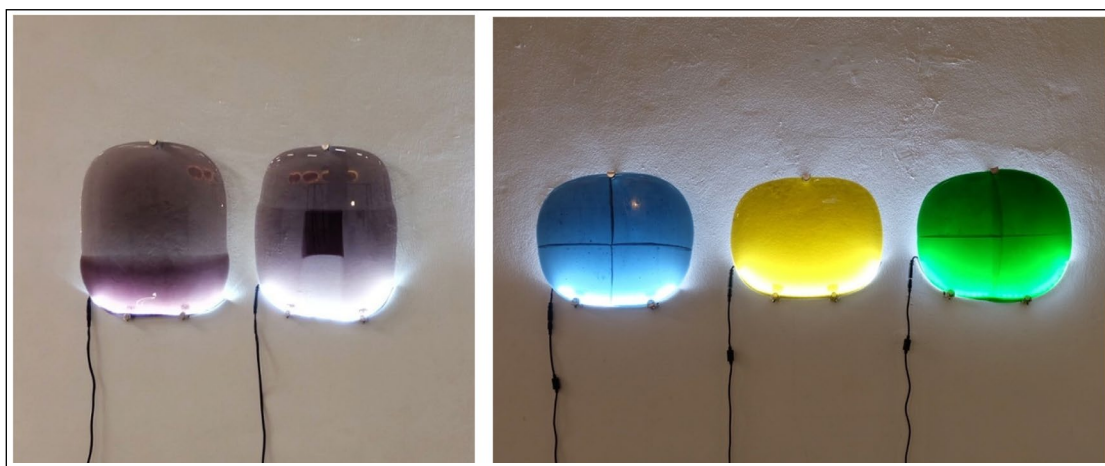
ผลงานออกแบบโดยใช้แก้วสีทึบ อบสองขั้นตอนในเทคนิคอบผสานแก้ว (fusing glass) และการอบยุบแก้วบนแม่พิมพ์ (slumping glass)



ภาพที่ 13

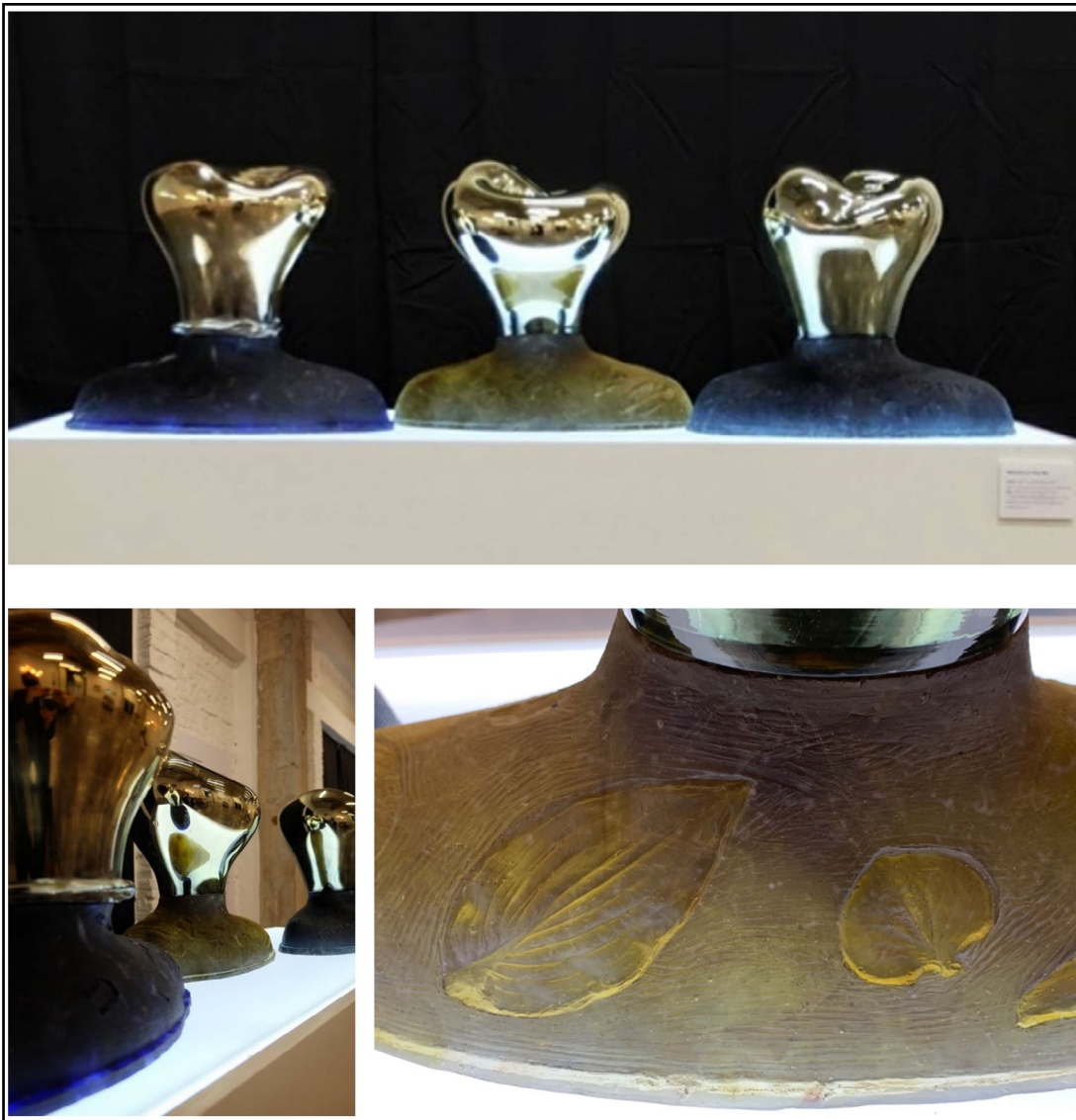
ชุดผลงานออกแบบโดยใช้แก้วสีทึบในเทคนิคหล่อแก้ว (casting glass)

ประการที่สองคือแก้วสียังคงความใสหลังจากการนำไปอบ สีในแก้วจะเด่นชัดมากขึ้นเมื่อมีความหนาและมีน้ำหนักสีเข้มอ่อนในชั้นเดียว เช่น แก้วสีม่วงอ่อนกับม่วงเข้ม เป็นต้น สีม่วงเป็นสีที่มีค่าน้ำหนักเข้มที่สุดในวงจรสี แต่เมื่ออยู่ในเนื้อแก้วความใสของแก้วช่วยให้สีม่วงประสานน้ำหนักอ่อนแก่ได้สวยงามขึ้น การนำแก้วกลุ่มสีเดียวกันต่างความเข้มของสีมาอบประสานให้ได้น้ำหนักอ่อนแก่ในงานชิ้นเดียวใช้เทคนิคอบผสานแก้ว (fusing glass) การนำแก้วใสสีเดียวที่เป็นก้อนมาอบผสานกันยังสร้างลักษณะพิเศษขึ้นด้วย การผสมผสานกันของแก้วแต่ละก้อนจะทำให้เกิดเส้นบาง ๆ รอยต่อระหว่างในแผ่นแก้ว การออกแบบจังหวะรอยต่อที่เหมาะสมจะช่วยให้งานแก้วสีเดียวเรียบง่ายเพิ่มมิติความลึกขึ้น (ภาพที่ 14) แก้วสีใสกลุ่มนี้ยังเหมาะสำหรับเทคนิคหล่อแก้ว (casting glass) งานประติมากรรมที่ต้องการความลึกของสีในเนื้อแก้ว และงานที่มีผิวหน้าเป็นลายนูนสูงต่ำ ซึ่งมองเห็นได้ผ่านแสงไฟ ในการศึกษาทดลองนำแก้วใส 3 สีมาหล่อเป็นงานประติมากรรมขนาดเท่าคนระดับอก แม้จะใช้ความร้อนสูงเกือบ 900 องศาเซลเซียสและผลงานมีความหนา แต่ก็ได้ผลลัพธ์ที่ดี (ภาพที่ 15) แก้วกลุ่มนี้มีสีเข้มอ่อนหลายน้ำหนัก เมื่ออบผสานเป็นแผ่นยังเหมาะสำหรับงานออกแบบด้วย โดยทำเป็นภาชนะรูปทรงยาวเพื่อให้เห็นการประสานน้ำหนักสีเข้มอ่อน อาจใช้การอบยุบแผ่นแก้วบนแม่พิมพ์วงแหวนที่มีช่องตรงกลางให้แก้วอ่อนตัวยืดออก ซึ่งจะทำให้เห็นสีเข้มอ่อนประสานกันเนื้อแก้วเด่นชัดขึ้น เรียกวิธีการนี้ว่า ring drop ซึ่งเป็นเทคนิคการอบยุบแก้วบนแม่พิมพ์ (slumping) แบบหนึ่ง (ภาพที่ 16)



ภาพที่ 14

ชุดผลงานสร้างสรรค์ศิลปะแก้วใช้แก้วสีใสในเทคนิคการอบผสาน (fusing glass)



ภาพที่ 15

ผลงานประติมากรรมหล่อแก้ว (casting glass) ด้วยแก้วสีใส 3 สี ชื่อ *Reflections of Three Men*



ภาพที่ 16

ผลงานออกแบบโดยใช้แก้วสีใส อบสองขั้นตอนในเทคนิคการอบผสานแก้ว (fusing glass) และการอบยุบทรงแก้วในแม่พิมพ์ (slumping glass)

คุณลักษณะประการที่สามคือการประสานสีในเนื้อแก้ว แก้วใสบางกลุ่มสีนำมาอบประสานกันได้ เช่น แก้วสีม่วงประสานได้ดีกับสีฟ้า กลุ่มโทนสีเขียวผสมเข้าได้ดีกับสีน้ำเงิน และกลุ่มสีอำพันเข้าได้ดีกับน้ำตาล เป็นต้น การนำแก้วกลุ่มนี้มาใช้ในการสร้างสรรค์ทำได้เช่นเดียวกับกลุ่มแก้วทึบแสง โดยจัดวางคู่สีเป็นระนาบในสัดส่วนที่เหมาะสมและใช้เทคนิคอบผสานแก้ว (fusing glass) ความใสของแก้วกลุ่มนี้ยังเหมาะที่จะใช้กับไฟส่องใต้แผ่นแก้วช่วยให้แก้วสีของแก้วสว่างมากขึ้น (ภาพที่ 17) นอกจากนี้ มักพบว่าเศษแก้วที่มาจากภาชนะและโคมไฟมักมีชิ้นแก้วสีซ่อนอยู่ในเนื้อแก้วใส เมื่อนำเศษแก้วชนิดนี้มาอบผสานเป็นชิ้นเดียว solid glass จะได้แก้วที่มีสีผสมแทรกในเนื้อแก้วเป็นลักษณะพิเศษแบบหนึ่ง ซึ่งเหมาะจะใช้ทำภาชนะที่โชว์ลายของเนื้อแก้วเช่น ถาดรูปทรงแบน (ภาพที่ 13 ล่างซ้าย) หรืออาจตัดเศษแก้วชิ้นเล็กมาอบผสาน (fusing glass) โดยใช้เตาอบไมโครเวฟ ใช้ทำเครื่องประดับแก้วชิ้นเล็กได้ดี (ภาพที่ 6)

ลักษณะเด่นชัดประการที่สี่ได้แก่ความเป็นผลึกในเนื้อแก้ว ดังกล่าวแล้วข้างต้นว่า ผิวแก้วที่ได้จากการอบจะมีลักษณะเป็นผลึกไม่ใช่เป็นเนื้อเดียว แตกต่างออกไปจากการใช้ก้อนแก้วมาหลอม คุณลักษณะดังกล่าวอาจต่างไปจากความคาดหวังทั่วไปว่าแก้วจะต้องใส แต่คุณลักษณะดังกล่าวเหมาะจะนำมาใช้ในงานสร้างสรรค์ศิลปะ การศึกษานี้มีการทดลองสร้างสรรค์โดยใช้ผงแก้วทั้งเม็ดละเอียดและหยาบนำมาใช้ในการสร้างสรรคงานในหลายรูปแบบเช่น ผงแก้วเม็ดหยาบนำมาอบเป็นแผ่น (ภาพที่ 10 ล่างซ้าย) ก่อนนำไปอบยุบบนแม่พิมพ์ (slumping) อีกขั้นตอนหนึ่ง ทำให้ได้ผลงานรูปทรงพับลงที่มีความอิสระ folding form (ภาพที่ 17) นอกจากนี้ผงแก้วละเอียดผสมกาวยังนำไปใช้งานโดยนำไปอัดลงในแม่พิมพ์พลาสติก ผสมซิลิกาแล้วนำไปอบในเทคนิคการอบผงแก้ว *pâte de verre* สามารถสร้างผลงานได้ตามที่ออกแบบทั้งรูปทรงภาชนะ (ภาพที่ 18) และรูปทรงใบไม้ (ภาพที่ 19) ส่วนผงแก้วละเอียดนำไปผสมกับกาวแบบเหลวแล้วนำไปอบผสาน ได้แผ่นแก้วเนื้อเป็นผลึก มีสีไหลประสานลักษณะคล้ายสีย้อมบนผ้าหรือกระดาษเป็นลักษณะพิเศษดังกล่าวข้างต้น สามารถนำไปใช้ในงานสร้างสรรค์ได้อีกชุดหนึ่ง (ภาพที่ 20)



ภาพที่ 17

ผลงานสร้างสรรค์ชุด *folding form* โดยใช้ผงแก้ว อบสองขั้นตอนในเทคนิคการอบผสาน (*fusing glass*)



ภาพที่ 18

ผลงานออกแบบโดยใช้ผงแก้วในเทคนิคการอบผงแก้วผลึก (pâte de verre)



ภาพที่ 19

ผลงานสร้างสรรค์จากผงแก้วด้วยเทคนิคการอบผงแก้วผลึก (pâte de verre)



ภาพที่ 20

ผลงานสร้างสรรค์ชุด Illumina จากผงแก้วในเทคนิคการอบผสาน (fusing glass)

อภิปรายผลและบทสรุป

ผลการศึกษาสมบัติแสดงให้เห็นว่า แก้วจากโรงงานเป่าแก้วในจังหวัดนครปฐมเป็นสูตรผสมที่ทำให้แก้วมีสมบัติหลอมตัวเร็วเพื่อประหยัดพลังงาน และเย็นตัวช้าเพื่อยืดเวลาขณะเป่าแก้วให้ทำงานได้นาน แก้วดังกล่าวเป็นแก้วโซดาโลมที่นำมาอบแปรรูปได้ แต่สมบัติดังกล่าวเป็นข้อจำกัดสำหรับนำมาใช้สร้างสรรค์ในเทคนิค warm glass ในบางกรณี ผลการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเคมีทำให้เห็นว่า แก้วใสไม่มีสีจากโรงงานผลิตภาชนะมีโซเดียมออกไซด์ในปริมาณสูงมากถึงร้อยละ 24 ของส่วนผสมทั้งหมด เทียบกับ แก้วจากต่างประเทศมีโซเดียมออกไซด์ราวร้อยละ 17 เท่านั้น แม้จะทำให้แก้วอ่อนตัวเร็วและผสานตัวได้ดีในอุณหภูมิไม่สูงตามเกณฑ์มาตรฐานดังที่ปรากฏผลในการทดลองอบ แต่ก็นำไปใช้ได้อย่างมีข้อจำกัด เนื่องจากโซเดียมออกไซด์ปริมาณสูงมีผลทำให้ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วสูงตามไปด้วย อัตราการขยายตัวยิ่งสูงแก้วก็ยิ่งมีความเสี่ยงที่จะแตกเมื่อเย็นตัวลงเร็ว ส่วนผลการตรวจสอบประเภทแก้วสีพบว่า แก้วแต่ละกลุ่มสีมีสารประกอบออกไซด์ของโลหะต่างกันหลายชนิดและมีสัดส่วนของซิลิกาโซดาแอชและโลมต่างกันด้วย ทำให้มีค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนสูงต่ำไม่คงที่และไม่ตรงกับแก้วใส่นัก ดังนั้น ผลการทดสอบด้วยการนำมาอบจึงปรากฏว่า แก้วใสกับแก้วสีอบรวมกันได้บางสีเท่านั้น เช่นเดียวกับการอบผสานข้ามกลุ่มสีก็ทำได้จำกัด

ค่าการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ต่างกันของตัวอย่างแก้วใสกับแก้วสี ทำให้มีคำถามว่า โรงงานเป่าแก้วใช้แก้วเหล่านี้ทำงานได้อย่างไร คำตอบเรื่องนี้พบได้จากการตรวจสอบลักษณะเศษแก้วและวิธีการเป่าแก้ว ตัวอย่างเศษแก้วที่พบมีสองลักษณะ (ภาพที่ 1 และ 2) แบบแรกเป็นเศษภาชนะแก้วเนื้อใสที่มีแก้วสีแทรกอยู่ในผิวหน้าเป็นชั้นบาง ๆ ตัวอย่างที่พบนี้แสดงให้เห็นขั้นตอนวิธีการทำภาชนะ ซึ่งขั้นแรกช่างจะจุ่มน้ำแก้วใสหลอมเหลวมาเป่าขึ้นรูป แล้วใช้แก้วสีเติมเป็นลวดลายที่ผิวด้านนอก จากนั้นเป่าให้แก้วขยายตัวออกเป็นรูปทรง ทำให้แก้วสีที่ผิวยึดออกไม่เกาะเป็นก้อน จึงเกิดเป็นลายสีบนผิวภาชนะแก้วใส ซึ่งอธิบายได้ว่า หากค่าการขยายตัวอันเนื่องจากความร้อนของแก้วต่างกันไม่มากนัก มวลของแก้วสีซึ่งเคลือบบาง ๆ บนชั้นผิวแก้วจะมีแรงดึงไม่มากพอจะดึงแก้วใสทั้งชิ้นให้แตก ส่วนเศษแก้วที่พบอีกแบบหนึ่งเป็นเศษภาชนะหรือก้อนแก้วที่มีเนื้อสีเดียวไม่มีสีอื่นเจือปน ซึ่งแสดงว่า หากโรงงานผลิตเครื่องแก้วแบบหนึ่งด้วยแก้วสี ก็จะใช้สีใดสีหนึ่งล้วนหรือผลิตภาชนะแบบนั้นเป็นชุดโดยแยกเป็นหลายสี จะไม่นำแก้วหลายสีมาผสมกันในชิ้นเดียว ผลการตรวจสอบนี้อธิบายว่า โรงงานเป่าแก้วไม่ได้หลอมแก้วสีมาเพื่อใช้ผสมกัน และแม้ค่าการขยายตัวอันเนื่องจากความร้อนของแก้วใสกับแก้วสีไม่ตรงกันนักก็ไม่เป็นอุปสรรคในการใช้งาน แต่การนำเศษแก้วเหล่านี้มาอบรวมกันในกระบวนการ warm glass ให้ผลที่ต่างออกไป เพราะการอบด้วยความร้อนเนื้อแก้วจะเข้ากันได้ต้องมีมวลมากพอจะผนึกติดกัน ค่าการขยายตัวอันเนื่องจากความร้อนในแก้วจึงส่งผลต่องานในกระบวนการนี้

การนำเศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วกลับมาใช้สร้างสรรค์ในกระบวนการ warm glass แม้จะมีข้อจำกัด แต่ก็มีความเป็นไปได้เพราะเป็นแก้วโซดาโลมประเภทหนึ่งที่อบหลอมได้ ซึ่งมีข้อสรุปแนวทางการ

ใช้งานดังนี้ 1. ใช้แก้วชนิดเดียวกัน สีเดียวกัน หรือมาจากโรงงานเดียวกันในการทำงานเพื่อป้องกันการแตกร้าว 2. ควรตรวจสอบองค์ประกอบเคมีและสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนของแก้วก่อนนำมาใช้ 3. หากไม่สามารถตรวจสอบได้ ต้องนำแก้วมาทดสอบอบความร้อนตามมาตรฐานแก้วโซดาไลม์เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ 4. แก้วจากโรงงานเป่าแก้วส่วนใหญ่มีค่าการขยายตัวในระดับสูงกว่ามาตรฐานแก้วโซดาไลม์สำหรับงานในกระบวนการ warm glass และแก้วบางสีที่มีความเหนียวและแข็งซึ่งหลอมในอุณหภูมิสูงกว่ามาตรฐาน ก่อนนำมาใช้สร้างงานจึงต้องนำมาทดสอบเพื่อหาระดับความร้อนที่เหมาะสมในการแปรรูป 5. เศษแก้วจากโรงงานมีรูปทรง ขนาด สี และสิ่งปนเปื้อนแตกต่างกันไป จึงไม่ใช่วัสดุพร้อมใช้งาน หลังการทำความสะอาดคัดแยกสีแล้ว ต้องนำแปรรูปให้มีขนาดและลักษณะที่เหมาะสมต่อการใช้งานในเทคนิคต่าง ๆ เช่น นำไปบดให้เป็นเม็ดหรือผงขนาดเท่ากัน นำไปแก้วอบแผ่เป็นแผ่นขนาดใกล้เคียงกันหรืออบหลอมให้เป็นก้อน เป็นต้น

การออกแบบสร้างสรรค์งานควรพิจารณาจากคุณลักษณะเด่นของเศษแก้ว เช่น มีสีสด มีความใสหรือเป็นแก้วทึบแสง เป็นเศษภาชนะที่มีลายหรือสีบนผิวของแก้วใส เป็นต้น ซึ่งมีข้อสรุปเป็นแนวทางกว้าง ๆ ได้ดังนี้ 1. ประเภทแก้วใสทั้งปราศจากสีหรือเป็นแก้วสีอาจออกแบบให้ชิ้นงานมีความหนา เพื่อให้แก้วดูมีความลึก ลายบนตัวทำให้ผิวหน้างานรับแสงได้ดีเน้นให้แก้วดูลึกขึ้นด้วย แก้วที่โรงงานหลอมแต่ละรอบอาจได้สีเข้มอ่อนไม่เท่ากัน สามารถนำมาใช้ในงานออกแบบที่มีน้ำหนักอ่อนแก่ประสานกันขึ้นชิ้นเดียว แก้วประเภทนี้อาจนำมาบดเป็นผงหรือเม็ดหยาบแล้วนำมาอบจะผิวเป็นเกร็ดผลึกที่เป็นเอกลักษณ์ 2. ประเภทแก้วทึบแสงมีคุณลักษณะต่างไปจากแก้วใส การออกแบบอาจใช้รูปทรงเรียบง่ายเพื่อให้ระนาบสีเรียบแสดงตัวเด่นชัด ซึ่งออกแบบได้ทั้งผิวหน้าเงาหรืออาจขัดพ่นทรายบาง ๆ ให้ผิวด้าน ทำให้ผิวสัมผัสต่างไปจากแก้วใสชัดเจนขึ้น 3. แก้วที่ตรวจสอบแล้วว่าอบผสานกันได้ส่วนหนึ่งมักอยู่ในโทนสีเดียวกัน ซึ่งมีทั้งสีทึบแสงและสีใส สามารถนำมาใช้อบผสาน โดยจัดวางให้เกิดลายหรือจังหวะของระนาบสีได้หลากหลายรูปแบบ 4. แก้วเป็นวัสดุที่เหมาะสมกับงานออกแบบที่ใช้แสงไฟส่อง สีของแก้วจะสดจัดขึ้นและมีมิติขึ้นในแสงไฟ 5. เศษแก้วประเภทภาชนะ ที่มีลายสีบนผิวหน้า หากไม่นำไปบดเป็นผง ก็อาจคัดลายและสีที่พอใจ นำมาตัดเป็นชิ้นเล็กแล้วนำไปอบจะได้เม็ดแก้วที่มีสีผสานกันในตัว ซึ่งอาจนำไปพัฒนาเป็นเครื่องประดับ

การนำเศษแก้วจากโรงงานเป่าแก้วมาสร้างสรรค์งานกระบวนการ warm glass ในเทคนิคทั้ง 4 แบบ ได้แก่ การอบผสานแก้ว (fusing) การอบผงแก้วผลึก (pâte de verre) การอบยุบแก้วบนแม่พิมพ์ (slumping) และการหล่อแก้ว (casting) พบว่า โดยรวมแก้วที่ผ่านการตรวจสอบสมบัติและการทดสอบอบผสานสามารถใช้งานในเทคนิคต่าง ๆ ได้ดี ทั้งนี้ ผู้ใช้งานอาจต้องทดลองซ้ำเพื่อหาระดับความร้อนที่เหมาะสมในแต่ละเทคนิค และพึงระลึกว่า ค่าระดับความร้อนมาตรฐานสำหรับเทคนิคต่าง ๆ ที่นักวิชาการแนะนำนั้นอ้างอิงจากแก้วที่ผลิตขึ้นเฉพาะสำหรับกระบวนการ warm glass การนำแก้วที่หลอมสำหรับกระบวนการเป่าแก้วมาใช้ปรับใช้ในกระบวนการ warm glass จึงต้องปรับระดับอุณหภูมิตามสมบัติของแก้วแต่ละสีหรือแต่ละโรงงาน

ผลการวิจัยนี้นำไปใช้ประโยชน์ในด้านการศึกษาและพัฒนาต่อเชิงพาณิชย์ได้ เศษแก้วที่ตกค้างในโรงงานซึ่งมีปริมาณมากสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุเพื่อการศึกษาศิลปะแก้วได้เป็นอย่างดี แม้คุณภาพจะไม่เทียบเท่าแก้วที่ผลิตเพื่อกระบวนการ warm glass โดยเฉพาะ แต่ก็นับว่ามีต้นทุนถูกกว่าแก้วนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง เศษแก้วจากโรงงานมีสมบัติดีพอจะนำมาใช้เพื่อให้เกิดการเรียนรู้ในด้านเทคนิคแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นการเผยแพร่ความรู้ด้านศิลปะแก้วทางตรง การทดลองสร้างสรรค์ในเทคนิคหลายวิธีการทำให้เห็นว่า นอกจากเศษแก้วที่เป็นหัวใจสำคัญแล้ว วัสดุอื่นที่ต้องใช้ร่วมกันในกระบวนการ warm glass เช่น ทราย ปูนปลาสเตอร์ เป็นสิ่งที่หาได้ในประเทศและนำมาใช้ได้ดี เมื่อมีแก้วเป็นวัสดุที่จะทำงานก็สามารถใช้ในการศึกษาได้สะดวก ในบางเทคนิคที่มีวิธีการไม่ซับซ้อน เช่น การอบผสานแก้วด้วยเตาไมโครเวฟ สามารถนำมาใช้ในการศึกษาหรือการอบรมเผยแพร่ความรู้ด้านศิลปะแก้วได้ดี

ผลการทดลองสร้างสรรค์ยังชี้ให้เห็นว่า แก้วเป็นสื่อในงานศิลปะที่ดี แก้วเป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษซึ่งนำมาใช้เพื่อการสร้างสรรคศิลปะและงานออกแบบได้หลากหลายรูปแบบ ความใสหรือทึบแสง ความมันเงาหรือด้าน ความสัจของสีและการประสานกันของสีในแก้วเป็นคุณลักษณะที่นำมาใช้เป็นสื่อที่มีความหมายทางศิลปะได้อย่างดี ตัวอย่างผลงานสร้างสรรค์หลายรายการในการวิจัยนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเชิงพาณิชย์ได้ทั้งประเภทภาชนะเครื่องแก้ว แก้วประดับไฟ หรือแก้วเพื่องานเครื่องประดับ

เอกสารอ้างอิง (References)

- เอกรัฐ มีชูวาศ, กนิษฐ ตะปะสา, ปรีดา จำปีเรือง และ เทพวรรณ จิตรวัชรโกมล. (2558). การพัฒนาสูตรแก้วสำหรับเตาหลอมชนิดไม่ต่อเนื่อง. *วารสารวิทยาศาสตร์ประยุกต์ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 4(4), 29–35. <https://doi.org/10.60136/bas.v4.2015.290>
- Cheng, S. C., Kao, M. S., & Hwang, J. J. (2024). Advanced Integration of Microwave Kiln Technology in Enhancing the Lost-Wax Glass Casting Process: A Study on Methodological Innovations and Practical Implications. *Journal of Composites Science*, 8(5), 168. <https://doi.org/10.3390/jcs8050168>
- Cummings, K. (2007). *Technique of Kiln-formed Glass*. A&C Black.
- Meechoovas, E., Tapasa, K., Jampeeruang, P., & Jitwatcharakomol, T. (2015). Glass batch development for pot furnace. *Bulletin of Applied Sciences*, 4(4), 29–35. <https://doi.org/10.60136/bas.v4.2015.290> [in Thai]
- Tait, H. (2004). *Five Thousand Years of Glass*. University of Pennsylvania Press.

