



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากแก้วอุณหภูมิต่ำที่
ปราศจากตะกั่ว

ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุ
ดร.ภูวดล วรรณนะชัยแสง

โครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี (ปีที่ 1)

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 177428
สัญญาเลขที่ 145/2558

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากแก้วอุณหภูมิต่ำที่
ปราศจากตะกั่ว

ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุ
ดร.ภูวตล วรรณชะชัยแสง
คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

โครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี (ปีที่ 1)
31 สิงหาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ
(Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล
(งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงาน
คณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา145/2558

คณะผู้วิจัย

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร (Executive Summary)

ข้าพเจ้า ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สายสมร นิยมสรวนุญ ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา โครงการวิจัยประเภทโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี ระยะการวิจัยปีที่ 1 ในหัวข้อเรื่อง (ภาษาไทย) การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากแก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว (ภาษาอังกฤษ) Development of Green Jewelry from Low-Temperature Lead-Free Glass

รหัสโครงการ 177428 /สัญญาเลขที่ 145/2558 ได้รับงบประมาณรวมทั้งสิ้น 680,000 บาท (หกแสนแปดหมื่นบาทถ้วน)

ระยะเวลาการดำเนินงาน 2 ปี 10 เดือน (ระหว่างวันที่ 1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ 31 สิงหาคม 2560)

บทคัดย่อ

เศษอัญมณีที่เหลือจากกระบวนการผลิต ได้ถูกนำมาพัฒนาให้มีมูลค่าเพิ่มอย่างหลากหลาย เช่น การนำมาทำเป็นของที่ระลึกโดยการขึ้นรูปร่วมกับวัสดุชนิดต่างๆ แก้วเชื่อมอุณหภูมิต่ำเป็นวัสดุประเภทแก้วที่ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในการเชื่อมประสานวัสดุประเภทเซรามิกส์ เพื่อให้ทนทานต่อการใช้งานที่มีการคายความร้อน แต่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก แก้วเชื่อมมีอุณหภูมิในการทำงานที่ต่ำเพื่อให้ง่ายต่อการยึดติดกันระหว่างวัสดุสองชิ้น แต่สามารถทนทานต่อการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีการคายความร้อนไม่สูง

ในโครงการวิจัยนี้มีการศึกษาและพัฒนาแก้วอุณหภูมิต่ำเพื่อช่วยในการเชื่อมประสานเศษอัญมณี โดยการผสมแก้วที่ประกอบด้วยส่วนผสมหลัก คือ CaO_2 B_2O_3 และ SiO_2 โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1100°C และคงอุณหภูมิไว้ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และมีการศึกษาลักษณะของแก้วเมื่อทำการผสมด้วย ZnO และ MgO และ ผสมด้วย Na_2O และ ผสมแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม และทำการศึกษาการเกาะติดของแก้วกับพลอยชนิดต่างๆ และทำการทดสอบโดยการตกกระแทกจากระยะความสูง 1.50 เมตร ลงบนพื้นกระเบื้อง จากผลการทดลองสามารถเลือกแก้ว 2 สูตรมาทำการขึ้นรูปเครื่องประดับจากแก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่วร่วมกับเศษอัญมณีเพื่อเป็นเครื่องประดับที่จำนวน 2 ชิ้นได้อย่างประสบความสำเร็จ อย่างไรก็ตาม แก้วสูตรที่นำมาทำการขึ้นรูปยังขาดความเหนียวและมีการแตกร้าวได้ง่าย จึงต้องมีการพัฒนาในโครงการวิจัยต่อเนื่องปีที่ 2 ต่อไป

Output/Outcome

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากแก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี และในการดำเนินการวิจัยในรายงานฉบับนี้เป็นการวิจัยในปีที่ 1 ซึ่งผลลัพธ์ของการวิจัยได้พัฒนาสูตรแก้วที่อุณหภูมิต่ำและปราศจากตะกั่ว โดยได้ทดลองการขึ้นรูปร่วมกับอัญมณี เพื่อประโยชน์ในการใช้งานต่อไป โดยในการวิจัยในปีที่ 1 นี้ได้พัฒนาแก้ว 2 สูตร

และได้ทดลองขึ้นรูปร่วมกับเศษอัญมณีเพื่อเป็นเครื่องประดับ จำนวน 2 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ ก-1 ได้แก่วัสดุจากการผสมส่วนผสมทางเคมี 6 ชนิดได้แก่ สูตร 3-1 และ แก้วที่มีส่วนผสมของแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมได้แก่ สูตร 4-4-12-C2



แก้วสูตร 3-1



แก้วสูตร 4-4-12-C2

รูปที่ ก-1 เครื่องประดับแก้วร่วมกับพลอยด้วยแก้วสูตร 3-1 และ แก้วสูตร 4-4-12-C2

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดลองหลังให้ความร้อนแก้วสูตรที่พัฒนามาทำเครื่องประดับที่มีความใสเกิดการขุ่นขาวขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการปัจจัยต่างๆ ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นส่วนผสมหรือความร้อนที่ให้ และแก้วยังเปราะแตกร้าวภายใน ดังนั้นข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษารั้งต่อไปในโครงการวิจัยต่อเนื่องปีที่ 2

1. ต้องมีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมและเติมสารตัวอื่นๆเข้าไปให้แก้วให้มีความเหนียวมากขึ้น
2. ควรมีการหาวัสดุที่ทำให้การขึ้นรูปแก้วร่วมกับพลอยเป็นไปได้ง่ายขึ้นและทำให้ฝุ่นผงติดเนื้อแก้วน้อยลง

บทคัดย่อ

เศษอัญมณีที่เหลือจากกระบวนการผลิต ได้ถูกนำมาพัฒนาให้มีมูลค่าเพิ่มอย่างหลากหลาย เช่น การนำมาทำเป็นของที่ระลึกโดยการขึ้นรูปร่วมกับวัสดุชนิดต่างๆ แก้วเชื่อมอัญมณีต่ำเป็นวัสดุประเภทแก้วที่ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในการเชื่อมประสานวัสดุประเภทเซรามิกส์ เพื่อให้ทนทานต่อการใช้งานที่มีการคายความร้อน แต่อยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก แก้วเชื่อมมีอัญมณีในการทำงานที่ต่ำเพื่อให้ง่ายต่อการยึดติดกันระหว่างวัสดุสองชิ้น แต่สามารถทนทานต่อการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่มีการคายความร้อนไม่สูง

ในโครงการวิจัยนี้มีการศึกษาและพัฒนาแก้วอัญมณีต่ำเพื่อช่วยในการเชื่อมประสานเศษอัญมณี โดยการผสมแก้วที่ประกอบด้วยส่วนผสมหลัก คือ CaO_2 B_2O_3 และ SiO_2 โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1100°C และคงอุณหภูมิไว้ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และมีการศึกษาลักษณะของแก้วเมื่อทำการผสมด้วย ZnO และ MgO และ ผสมด้วย Na_2O และ ผสมแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม และทำการศึกษาการเกาะติดของแก้วกับพลอยชนิดต่างๆ และทำการทดสอบโดยการตกกระแทกจากระยะความสูง 1.50 เมตร ลงบนพื้นกระเบื้อง จากผลการทดลองสามารถเลือกแก้ว 2 สูตรมาทำการขึ้นรูปพร้อมเครื่องประดับ จากแก้วอัญมณีต่ำที่ปราศจากตะกั่วร่วมกับเศษอัญมณีเพื่อเป็นเครื่องประดับที่จำนวน 2 ชิ้นได้อย่างประสบความสำเร็จ อย่างไรก็ตาม แก้วสูตรที่นำมาทำการขึ้นรูปยังขาดความเหนียวและมีการแตกร้าวได้ง่าย จึงต้องมีการพัฒนาในโครงการวิจัยต่อเนื่องปีที่ 2 ต่อไป

ABSTRACT

Gemstone fragments are left over from the cutting process. They are developed to gain their value by shaping with other materials and sale them as a souvenir, for example. Low temperature sealing glass is used in the electronic industry to connect two pieces of ceramic materials. Application of the glass is specifically suitable in an environment with heating where the temperature is not too high. The glass has medium working temperature so it is easy to work with.

In this research, the low temperature glass was studied starting with three chemical composition; CaO_2 , B_2O_3 and SiO_2 . The chemical powders were heated to 1100°C and stay at this temperature for 2 hours. Then the glass recipes were developed by adding ZnO and MgO . Their working temperature was further decreased by adding Na_2O . Moreover, some recipe was mixed with 4 types of used glasses left-over from the industry. The studied glasses were heated to bond with gemstone fragments. Drop test from 1.50 m high was performed to ensure the bonding ability between the glass and the stone.

The result showed two glass recipes that was suitable to further shaped with gemstone fragment to produce a jewelry. Two pieces of jewelry were successfully made to show the creativity of low temperature glass with gemstone fragment. However, the research is in the first year progress. More development is needed for the glass to gain more viscosity which will strengthen the glass and provide higher shape-ability. Further study will be continue in the second year of the research.

สารบัญ

(Table of Contents)

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	iii
บทสรุปผู้บริหาร	iv
บทคัดย่อ	vi
Abstract	vii
สารบัญ	viii
สารบัญตาราง	x
สารบัญรูป	xi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	3
1.6 แผนงานโครงการวิจัย	6
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ชนิดของแก้ว	7
2.2 แก้วอุนหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว	9
2.3 การใช้วัตถุดิบจากวัสดุเหลือทิ้ง	9
2.4 การขึ้นรูปวัสดุแก้ว	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ	13
3.1 สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ	13
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	16
บทที่ 4 ผลการวิจัย	22
4.1 ลักษณะของแก้วที่ผ่านการหลอม	22
4.2 เครื่องประดับ	35

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	37
5.1 สรุปผลการวิจัย	37
5.2 ข้อเสนอแนะ	38
บทที่ 6 ผลผลิต (Output)	39
บรรณานุกรม (Bibliography)	40
ประวัตินักวิจัยและคณะ	41

สารบัญตาราง (List of Tables)

ตารางที่		หน้า
1.1	แหล่งวัตถุดิบที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้ง	3
1.2	ประสิทธิภาพการปกปิดที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	4
1.3	แผนการดำเนินงาน	6
2.1	ส่วนประกอบของแก้วชนิดต่างๆ และการใช้งาน	7
2.2	แก้วเชื่อมอุณหภูมิต่ำ	8
2.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่	11
2.4	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีวัสดุเหลือทิ้ง	11
3.1	ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 1 (3 องค์ประกอบ)	17
3.2	ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 2 (5 องค์ประกอบ)	19
3.3	ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 3 (6 องค์ประกอบ)	19
3.4	ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 4 (ผสมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม)	21
4.1	ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 1 (3 องค์ประกอบ)	23
4.2	ลักษณะของแก้วในกลุ่มสูตรแก้ว ชุด ก	24
4.3	ลักษณะของแก้วในกลุ่มสูตรแก้ว ชุด ข	25
4.4	ลักษณะของแก้วในกลุ่ม ส่วนผสม B_2O_3 เท่ากับ 40.0 %โดยน้ำหนัก	25
4.5	ผลการปรับปรุงสูตรแก้วโดยการเติม MgO และ ZnO	26
4.6	ภาพตัวอย่างแก้วก่อนและหลังได้รับความร้อนของสูตรแก้วกลุ่ม 2 (5 องค์ประกอบ)	27
4.7	ลักษณะของแก้วสูตรแก้วกลุ่ม 2 (5 องค์ประกอบ)	27
4.8	ผลการทดลองการเกาะติดด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้วกลุ่ม 2	28
4.9	ภาพถ่ายจากผลทดลองการเกาะติดด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้วกลุ่ม ข	28
4.10	ภาพตัวอย่างแก้วกลุ่ม 3 (6 องค์ประกอบ) ก่อนและหลังการได้รับความร้อน	29
4.11	ลักษณะของแก้วสูตรแก้วกลุ่ม 3 (6 องค์ประกอบ)	29
4.12	ผลการทดลองการเกาะติดด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้วกลุ่ม 3	30
4.13	ภาพถ่ายจากผลทดลองการเกาะติดด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้ว ค	30
4.14	ภาพถ่ายของแก้วที่ผสมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเมื่อที่ติดกับพลอย 3 ชนิด	34
4.15	ผลการทดลองการเกาะติดกับพลอยด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้วกลุ่ม 4	35
4.16	พลอยก่อนและหลังได้รับความร้อนด้วยเทอร์ซ	35

สารบัญรูป (List of Illustrations)

รูปที่		หน้า
1.1	กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของ solder glass และ work piece	4
1.2	ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัส (θ) และปรากฏการณ์การเปียกผิว	5
2.1	กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของแก้วชนิดต่างๆ	8
2.2	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ liquid phase sintering	11
3.1	วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	12
3.2	แก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม 4 ชนิด	13
3.3	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	13
3.4	อุปกรณ์ที่ใช้ผสมสารเคมี	14
3.5	อุปกรณ์การเผาชิ้นงานและให้ความร้อน	14
3.6	อุปกรณ์กันความร้อน	15
3.7	เตาไฟฟ้า	16
3.8	กล้องจุลทรรศน์แสง	16
3.9	กราฟแสดงแผนของส่วนผสมแก้ว $\text{CaO B}_2\text{O}_3 \text{ SiO}_2$	18
3.10	ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีก่อนเข้าเตาไฟฟ้า	18
3.11	กราฟสูตรแก้วกลุ่ม 1 ที่มีการพัฒนาส่วนผสมในแก้วกลุ่ม 2 และกลุ่ม 3	20
3.12	แก้วที่ได้จากการหลอม	21
3.13	การขึ้นรูปแก้วร่วมกับพลอย	22
4.1	กราฟแสดงความใสของสูตรแก้วระบบ $\text{CaO B}_2\text{O}_3 \text{ SiO}_2$	24
4.2	ภาพลักษณะใส-ขุ่นของสูตรแก้วชุด ข ก่อนและหลังการเติม MgO และ ZnO	26
4.3	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงของแก้วกลุ่ม 4 ที่เติม MgO และ ZnO	31
4.4	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงของแก้ว กลุ่ม 4 ที่ติดกับพลอย 3 ชนิด	32
4.5	ภาพถ่ายของแก้วสูตร 1-4 เมื่อมีการเติมแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม	33
4.6	เครื่องประดับแก้วร่วมกับพลอยด้วยแก้วสูตร 3-1	36
4.7	เครื่องประดับแก้วร่วมกับพลอยด้วยแก้วสูตร 4-4-12-C2	36
5.1	กราฟแสดงลักษณะของสูตรแก้วชุด ก และชุด ข ที่พัฒนามาทำเครื่องประดับ	37
6-1	เครื่องประดับแก้วร่วมกับพลอยด้วยแก้วสูตร 3-1 และ แก้วสูตร 4-4-12-C2	39

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมเครื่องประดับของประเทศไทย จัดเป็นสินค้าส่งออกที่สร้างมูลค่าให้กับเศรษฐกิจของประเทศไทยที่สำคัญอันดับ 1 ใน 5 ของสินค้าส่งออก และประเทศไทยจัดเป็นแหล่งอัญมณีที่สำคัญแหล่งหนึ่งในจำนวน 5 แหล่งใหญ่ของโลก คือ แอฟริกาใต้ อเมริกาใต้ เมียนมาร์ ศรีลังกา และไทย โดยอัญมณีเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ใช้ประกอบเป็นเครื่องประดับและตกแต่ง และจังหวัดจันทบุรีเป็นตลาดที่มีการค้าขายอัญมณีที่สำคัญของประเทศ รวมทั้งเป็นศูนย์รวมของการเจียรไนอัญมณี

ในการเจียรไนอัญมณีก่อนเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างต่างๆ ตามที่ต้องการ ต้องผ่านกระบวนการในการ ตัด โกลน ก้อนอัญมณีหลายครั้ง ทำให้เกิดเศษอัญมณี ซึ่งมีขนาดเล็กและไม่คุ้มค่าในการนำไปผลิตเป็นเครื่องประดับ ในสมัยก่อนจนถึงปัจจุบัน นิยมนำเศษอัญมณีที่เหลือจากกระบวนการผลิตเครื่องประดับนี้ไปใช้ในลักษณะต่างๆ เช่น ใช้ประกอบพิธีกรรมทางศาสนา เช่น ใส่ที่ก้นหลุมเพื่อฝังลูกนิมิตและใส่กระถางรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาตกแต่งตู้กระจกที่เลี้ยงปลา หรือประดิษฐ์ของใช้และของที่ระลึก เพื่อเกิดประโยชน์และมูลค่าที่สูงขึ้น เช่น พวงกุญแจ ตุ๊กตา พระพุทธรูปและรูปเคารพอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นการขึ้นรูปโดยการหล่อร่วมกับเรซิน (สถาบันพัฒนาการศึกษานอกระบบภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, 2549) ซึ่งมีมูลค่าที่น้อย มีลักษณะของรูปแบบและกระบวนการผลิตที่ดั้งเดิม จึงยังไม่เป็นที่นิยม

จุดเริ่มต้นของแนวคิดในงานวิจัย เป็นไปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเศษอัญมณีที่เหลือจากกระบวนการผลิต โดยกระบวนการทางเลือกใหม่ที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษอัญมณีและเพื่อนำเสนอกระบวนการขึ้นรูปเครื่องประดับและตกแต่งเพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับผู้ผลิตเครื่องประดับและตกแต่งในอุตสาหกรรมขนาดย่อมจนถึงขนาดใหญ่ และเพื่อมุ่งส่งเสริมการค้าในอุตสาหกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้งานเพื่อให้เกิดการลดภาระในการกำจัดทิ้งของวัสดุที่เหลือจากการบริโภคและจากอุตสาหกรรม

ในเบื้องต้น การเลือกใช้แก้วเชื่อม หรือแก้วอุนหมิต้าเพื่อช่วยในการเชื่อมประสานเศษอัญมณี ให้สามารถสร้างสรรค์งานเครื่องประดับและตกแต่งได้หลายรูปแบบ แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแก้วเชื่อมหรือแก้วอุนหมิต้ามักมีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งมีผลกระทบต่อสุขภาพผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต จนอาจเป็นอันตรายขั้นร้ายแรงได้ ในงานวิจัยเรื่องแก้วอุนหมิต้าในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาส่วนผสมที่ปราศจากตะกั่วอย่างแพร่หลาย และมีศักยภาพในการนำมาใช้งานในการขึ้นรูปร่วมกับเศษอัญมณี

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 3 ด้านคือ การพัฒนาแก้วอุนหมิต้าที่ปราศจากตะกั่วจากวัตถุดิบเหลือทิ้ง เพื่อเป็นการส่งเสริมกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หลังจากนั้น ทำการประยุกต์แก้วฯ ที่พัฒนาได้มาขึ้นรูปร่วมกับเศษอัญมณี เพื่อเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษอัญมณีที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต เป็นการสร้างสรรค์เครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (green jewelry) และเป็นทางเลือกในการสร้างสรรค์งานเครื่องประดับที่ใช้อุนหมิต้าในการทำงานที่ไม่สูงให้กับผู้ผลิตในอุตสาหกรรมขนาดย่อมจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่มีต้นทุนในการผลิตที่ค่อนข้างน้อย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อปรับปรุงคุณภาพแก้วอัญมณีตำที่ปราศจากตะกั่วและใช้วัตถุดิบจากการนำวัสดุเหลือทิ้ง
- 1.2.2 เพื่อพัฒนากระบวนการขึ้นรูปแก้วอัญมณีตำที่ได้จากข้อ 1.2.1 ร่วมกับเศษอัญมณี
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและผลิตงานสร้างสรรค์เครื่องประดับและตกแต่งจากแก้วอัญมณีตำร่วมกับเศษอัญมณี ให้สอดคล้องกับข้อ 1.2.2

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยเป็นโครงการประเภทโครงการต่อเนื่อง 2 ปี ขอบเขตของโครงการวิจัยครอบคลุมระยะเวลาการดำเนินการวิจัย 2 ปีต่อเนื่อง ประกอบด้วย

- 1.3.1 ใช้วัตถุดิบที่เหลือทิ้งจากการบริโภค หรือ จากอุตสาหกรรม เช่น เศษแก้ว เปลือกไข่ และขี้เถ้าจากเปลือกผลไม้ เป็นต้น
- 1.3.2 เตรียมแก้วอัญมณีตำที่ปราศจากตะกั่ว ที่มีอุณหภูมิการทำงานไม่เกิน 800 °C
- 1.3.3 ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของแก้ว ๆ ด้วยเครื่องมือต่อไปนี้
 - เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วย EDXRF
 - เครื่อง Vicker's microhardness tester
 - กล้องจุลทรรศน์แสง (Optical Microscope) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบด้วย EDS
 - ตรวจสอบลักษณะเชิงความร้อน ด้วยเครื่อง Differential Thermal Analyzer (DTA)
 - ตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffractometer (XRD)
- 1.3.4 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับแก้วอัญมณีตำ ร่วมกับเศษอัญมณี 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มพลอยเนื้อแข็ง และกลุ่มพลอยเนื้ออ่อน
- 1.3.5 ศึกษากระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับแก้วอัญมณีตำ ร่วมกับเศษอัญมณี 2 กระบวนการ ได้แก่ การขึ้นรูปจากแก้วๆ ที่หลอมเหลว และ การขึ้นรูปจากผงแก้วๆ เป็นต้น
- 1.3.6 ออกแบบและผลิตงานสร้างสรรค์เครื่องประดับและตกแต่ง สำหรับผลิตภัณฑ์ 2 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะแบบอนุรักษ์นิยม และ ลักษณะที่ทันสมัย
- 1.3.8 การเผยแพร่ความรู้นำความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเผยแพร่แก่นิสิตและนักวิจัย รวมถึงเผยแพร่ความรู้ในรูปแบบงานสร้างสรรค์ที่ได้จากงานวิจัยเผยแพร่แก่ผู้สนใจและผู้เกี่ยวข้องในการผลิตเครื่องประดับ เช่น “งานเปิดโลกอัญมณี” จังหวัดจันทบุรี หรือ “Bangkok Gems and Jewelry Fair” เมืองทองธานี เป็นต้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

- ก. ส่งเสริมกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งหรือหรือใช้กลับมาใช้ใหม่
- ข. สร้างทางเลือกใหม่ให้กับการขึ้นรูปเครื่องประดับ เพื่อส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนของอุตสาหกรรมเครื่องประดับขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่
- ค. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษอัญมณี
- ง. ความรู้ที่ได้จากการวิจัยจะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อผู้ผลิตเครื่องประดับในอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์

จ. เผยแพร่ในวารสารทางวิชาการทั้งภายในและภายนอกประเทศ

ฉ. เป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานในการเรียนการสอนของนิสิต และเป็นองค์ความรู้ในการวิจัย

หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ กลุ่มนักวิจัยองค์ความรู้เรื่องการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผู้ผลิตเครื่องประดับในอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ และเป็นประโยชน์โดยตรงต่อหน่วยงานที่ทำการวิจัยได้แก่ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยเรื่อง “การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากแก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว” นี้ได้แบ่งกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัยเป็น 3 ส่วน ได้แก่

ส่วนที่ 1 การพัฒนาแก้วอุณหภูมิต่ำปราศจากตะกั่วโดยอาศัยวัตถุดิบจากวัสดุเหลือทิ้ง

ส่วนที่ 2 การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษอัญมณี

ส่วนที่ 3 การออกแบบและผลิตงานสร้างสรรค์เครื่องประดับจากแก้วฯ ร่วมกับเศษอัญมณี

โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.5.1 การพัฒนาแก้วอุณหภูมิต่ำปราศจากตะกั่วโดยอาศัยวัตถุดิบจากวัสดุเหลือทิ้ง

จากข้อมูลของการศึกษาและพัฒนาวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ที่มีกรนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เป็นวัตถุดิบ ได้แก่ เปลือกไข่ เศษแก้ว ขี้เถ้าเปลือกไม้หรือผลไม้ เศษเปลือกหอย และเศษบิสกิตเซรามิกส์ เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้เป็นแหล่งวัตถุดิบชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 การผลิตแก้วอุณหภูมิต่ำปราศจากตะกั่วสามารถใช้วัตถุดิบจากแหล่งต่างๆ เหล่านี้ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของส่วนผสม และทำให้ลดงบประมาณในการผลิต

ตารางที่ 1.1 แหล่งวัตถุดิบที่ได้จากวัสดุเหลือทิ้ง

(วรรณก้อน และคณะ. 2012)

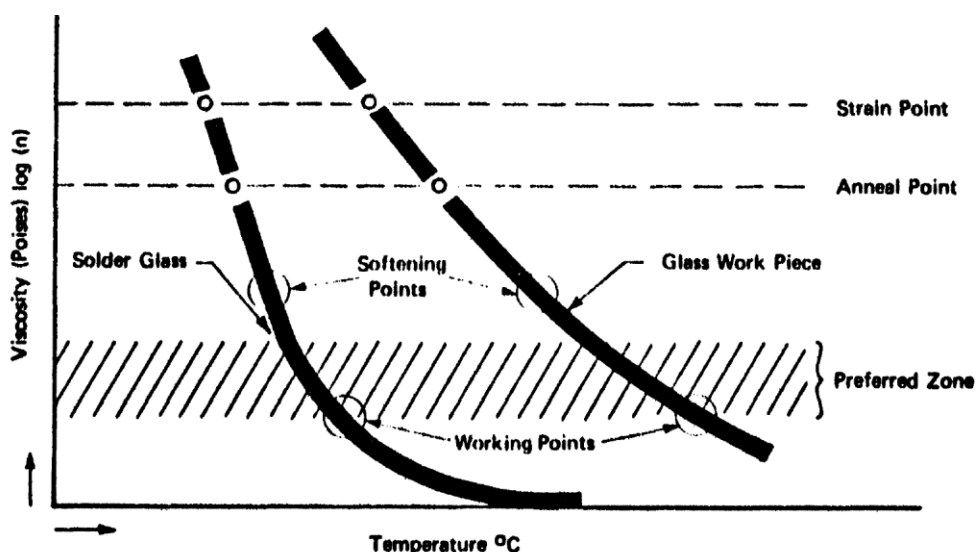
วัสดุเหลือทิ้ง	แหล่งวัตถุดิบ
เศษแก้วโบโรซิลิเกต	SiO ₂ B ₂ O ₃ Na ₂ O
เศษบิสกิตเซรามิก	SiO ₂ Al ₂ O ₃
เปลือกไข่ไก่ที่ผ่านการแคลไซน์	CaO
ขี้เถ้าไม้รวม	SiO ₂ CaO MgO K ₂ O
เปลือกหอยแครงแคลไซน์	CaO

1.5.2 การพัฒนากระบวนการขึ้นรูปแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษอัญมณี

แก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว มีอุณหภูมิในการทำงานที่ไม่สูงและสามารถนำมาใช้ในการเชื่อมกับวัสดุจริงเรียกว่า แก้วเชื่อม (solder glass) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเชื่อมกับเศษอัญมณีชนิดต่างๆ ได้ โดยแก้วเชื่อมต้องมีสมบัติที่สำคัญ ได้แก่ ความหนืดต่ำ (low viscosity) มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่เข้ากับวัสดุที่จะใช้ร่วมด้วย (Thermal expansion matching) การยึดเกาะที่ดี (good adhesion) มีความทนทานต่อสารเคมี (high chemical resistivity) สามารถควบคุมการตกผลึกได้ (controllable devitrification)

Solder glass ควรมีความหนืดต่ำ หรือมีการไหลตัวสูง (high fluidity) ที่อุณหภูมิในการทำงาน (working point) ที่ไม่กระทบต่อสมบัติของวัสดุที่ถูกเชื่อมต่อ (work piece) ดังนั้น working point ควรจะต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิในการอบอ่อน (annealing point) ของ

work piece โดยความหนืดของ solder glass มีค่าระหว่าง 10^5 - 10^6 poises ในขณะที่ความหนืดของ work piece มีค่าไม่ต่ำกว่า 10^{13} poises ดังแสดงในรูปที่ 1.1 แสดงช่วงที่เหมาะสมในการทำงานคือ preferred zone นอกจากนี้ solder glass ควรจะมีการแข็งตัวเร็วคือใช้เวลาในการสร้างการยึดเกาะ (sealing time) ที่ต่ำ



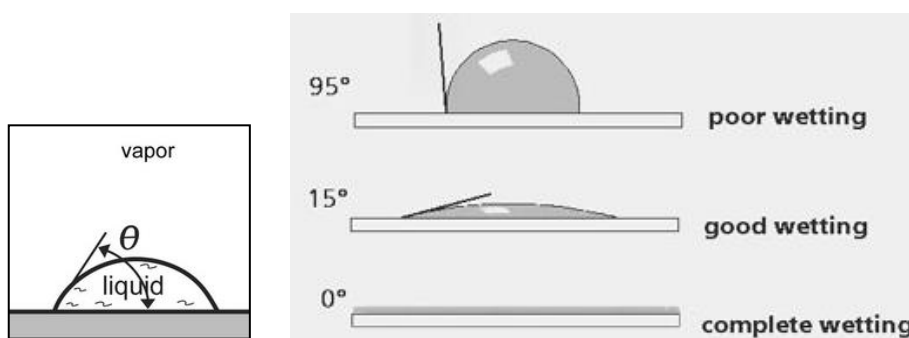
รูปที่ 1.1 กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของ solder glass และ work piece (Frieser, 1975)

เนื่องจากการทำงานมีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อชิ้นงานมีการเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ประสิทธิภาพการยึดเกาะของ solder glass จะเป็นที่ยอมรับได้ ถ้าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient of thermal expansion, CTE) อยู่ระหว่าง $1-6 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ทั้งนี้ ค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนกับประสิทธิภาพการปกปิด (sealing efficiency) แสดงดังตารางที่ 1.2 ในกรณีที่แตกต่างกันของค่า CTE มีมาก จะสามารถแก้ไขได้โดยการเลือก solder glass ที่มีค่า CTE มากกว่าของ work piece

ตารางที่ 1.2 ประสิทธิภาพการปกปิด (sealing efficiency) ที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) (Frieser, 1975)

ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อน ($\times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	ประสิทธิภาพการปกปิด (sealing efficiency)
1	ดีเยี่ยม
1-5	เป็นที่น่าพอใจ
5-10	ยึดเกาะแบบมีความเค้นวิกฤติ (critical stress)
10	ไม่ยึดเกาะ

การยึดเกาะ (adhesion) เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ solder glass สามารถเกิดปรากฏการณ์เปียกผิว (wetting) แก้วเชื่อมจึงสามารถแผ่ตัว (spreading) บนผิวของ work piece ได้ โดยความสามารถในการเปียกผิวขึ้นอยู่กับค่ามุมสัมผัส (contact angle, θ) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ของมุมสัมผัส (θ) และปรากฏการณ์การเปียกผิว (wetting) ถ้ามีมุมสัมผัสที่น้อย การเปียกผิวจะเกิดได้ดีและทำให้แก้วเชื่อมแผ่ไปบนผิวของ work piece ได้ง่าย (complete wetting) ในขณะที่ถ้ามุมสัมผัสมีค่าสูงมากถึง 90° solder glass จะยังคงรูปของหยดของเหลวและจะเคลื่อนที่ไปบนผิว work piece โดยไม่เกิดการเกาะติด (poor wetting) ในข้อมูลของการพัฒนาแก้วอุณหภูมิต่ำปราศจากตะกั่ว จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาเป็นแก้วที่สามารถขึ้นรูปร่วมกับเศษอัญมณีโดยคำนึงถึงสมบัติต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 1.2 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัส (θ) และปรากฏการณ์การเปียกผิว (wetting) (Kruss, 2012)

1.5.3 การออกแบบและผลิตงานสร้างสรรค์เครื่องประดับจากแก้วฯ ร่วมกับเศษอัญมณี

การออกแบบรูปแบบของเครื่องประดับจากแก้วอุณหภูมิต่ำฯ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจวิธีการในการขึ้นรูป ตลอดจนข้อจำกัดของกระบวนการผลิตและข้อจำกัดของสมบัติของวัสดุ ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาศักยภาพในการขึ้นรูปร่วมกันของแก้วฯ และเศษอัญมณี เพื่อให้สามารถออกแบบเครื่องประดับให้แสดงจุดเด่นให้กับวัสดุ ภายใต้ข้อจำกัดทั้งหมด โดยงานสร้างสรรค์เครื่องประดับที่เป็นผลลัพธ์จะต้องสร้างแนวความคิดใหม่ให้กับเศษอัญมณีทั้งในรูปแบบอนุรักษ์นิยม และรูปแบบที่ทันสมัย

1.6 แผนงานโครงการวิจัย

โครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี มีแผนการดำเนินงานตลอดโครงการแต่ละปี แสดงดังตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ปีที่ 1				ปีที่ 2			
	2557	2558			2559			
	10-12	1-3	4-6	5-9	10-12	1-3	4-6	5-9
1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง								
2. จัดทำ วัตถุประสงค์ วัตถุประสงค์ และอุปกรณ์								
3. เตรียมวัตถุประสงค์และตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัตถุประสงค์ที่เหลือทั้ง								
4. การเตรียมแก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่วจากวัตถุประสงค์ที่ได้จากการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่								
5. ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่ออุณหภูมิในการทำงาน								
6. ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่อสมบัติเชิงกายภาพและสมบัติเชิงเคมี								
7. ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีของแก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่วกับสมบัติการเกาะติดกับอัญมณี 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มคอร์นดัม และ กลุ่มควอร์ซ								
8. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับแก้วอุณหภูมิต่ำ ร่วมกับเศษอัญมณี ได้แก่ การขึ้นรูปจากแก้วที่หลอมเหลว การขึ้นรูปจากผงแก้ว								
9. ออกแบบและผลิตงานสร้างสรรค์เครื่องประดับและตกแต่ง 2 ลักษณะ ได้แก่ ลักษณะแบบอนุรักษ์นิยม และลักษณะที่ทันสมัย								
10. วิเคราะห์ สรุปผล และนำเสนอผลงาน								
11. การเผยแพร่ความรู้								

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของแก้ว

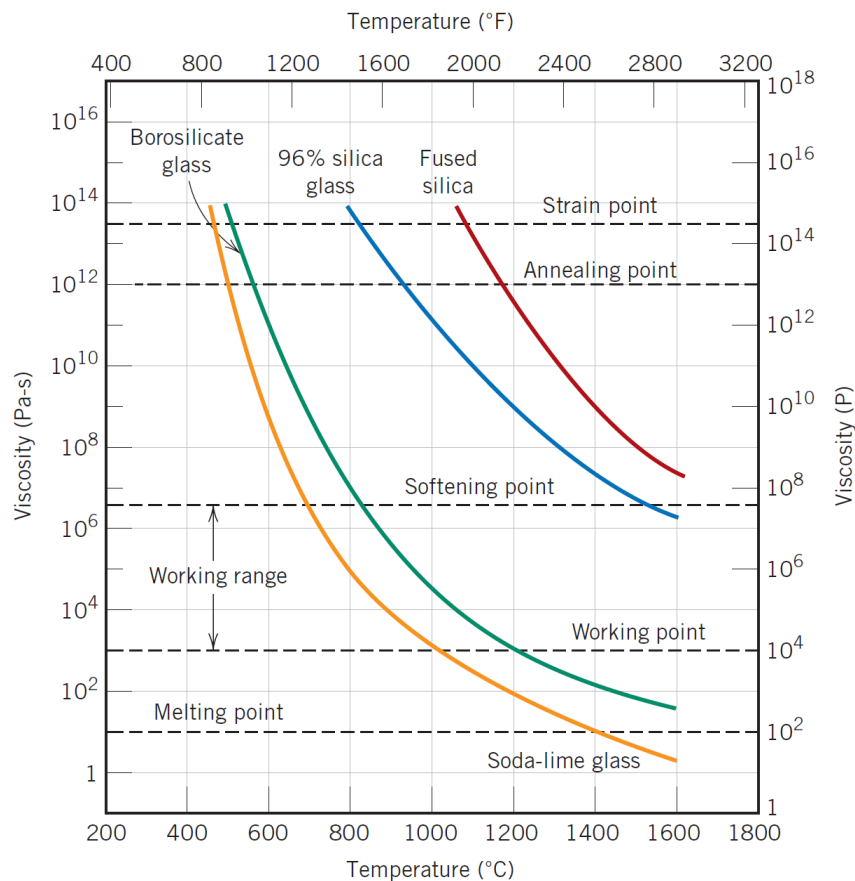
แก้วโดยทั่วไปประกอบด้วย ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ไม่มีโครงสร้างผลึกเป็นโครงสร้างตาข่ายของแก้ว และมีสารประกอบออกไซด์อื่นๆ ได้แก่ CaO Na_2O K_2O และ Al_2O_3 เป็นต้น ในการกำหนดสมบัติของแก้วให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ทำให้ได้แก้วชนิดต่างๆ ตามส่วนประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 2.1

แก้วแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิในการทำงานที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิที่สำคัญในกระบวนการผลิตของแก้ว แบ่งได้เป็น 5 ช่วง ได้แก่ melting point, working point, softening point, annealing point และ strain point ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืด ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของแก้วชนิดต่างๆ โดยค่าความหนืดในการทำงาน (working point) อยู่ในช่วง 10^3 Pa-s หรือ 10^4 Poises (P) ซึ่งเป็นความหนืดที่เหมาะสมในการขึ้นรูปและทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแก้ว โดยสำหรับแก้วชนิด Soda-lime จะมีอุณหภูมิในการทำงานอยู่ระหว่าง $700 - 1000$ °C

แก้วที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับโลหะหรือกับเซรามิกส์ เรียกว่า แก้วเชื่อม (solder glass หรือ sealing glass) ซึ่งมีสมบัติหลักคือ การยึดเกาะ (adhesive bonding) ระหว่างวัสดุทั้งสองชนิด ตัวอย่างของแก้วเชื่อมอุณหภูมิต่ำ ได้แก่ แก้วในกลุ่ม เช่น tellurite (TeO_2), borate (B_2O_3), borosilicate ($\text{B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) และ aluminoborate ($\text{B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$) เป็นต้น โดยประเภทของกลุ่มแก้วรวมถึง ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (CTE) ช่วงอุณหภูมิในการเปลี่ยนรูปร่าง (Deformation temp.) และช่วงอุณหภูมิในการเชื่อม (solder temp.) แต่ตามชนิดของกลุ่มแก้วในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของแก้วชนิดต่างๆ และการใช้งาน
(Callister, 2007)

Glass Type	Composition (wt%)						Characteristics and Applications
	SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	B_2O_3	Other	
Fused silica	>99.5						High melting temperature, very low coefficient of expansion (thermally shock resistant)
96% Silica (Vycor™)	96				4		Thermally shock and chemically resistant—laboratory ware
Borosilicate (Pyrex™)	81	3.5		2.5	13		Thermally shock and chemically resistant—ovenware
Container (soda-lime)	74	16	5	1		4MgO	Low melting temperature, easily worked, also durable
Fiberglass	55		16	15	10	4MgO	Easily drawn into fibers—glass-resin composites
Optical flint	54	1				37PbO, 8K ₂ O	High density and high index of refraction—optical lenses
Glass-ceramic (Pyroceram™)	43.5	14		30	5.5	6.5TiO ₂ , 0.5As ₂ O ₃	Easily fabricated; strong; resists thermal shock—ovenware



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของแก้วชนิดต่างๆ

(Callister, 2007)

ตารางที่ 2.2 แก้วเชื่อมอุณหภูมิต่ำ

(Frieser, 1975)

Glass Type	CTE X 10^7	Deformation Temp °C	Solder Temp °C
Pb – Tellurite	170–180	260–300	400–450
Pb – Borate	75–120	280–430	425–559
PbZn – Borate	70–110	320–450	450–570
PbCd – Borate	80–90		500–550
Pb – Borosilicate	40–120	370–700	500–900
PbZn – Borosilicate	75–80	370–100	500–550
Pb – Aluminoborate	60–85	440–485	550–650
Li – Aluminoborate	60–100	370–515	500–650
Pb – Aluminoborosilicate	80–95	390–440	520–600
NaZn – Borophosphate	50–150	300–450	450–600
CdZn – Borofluorophosphate		500–550	620–680
Zn – Borovanadate	~ 50	500	620
As–Te–S	170–420	25–200	
As–S–J	300–490	48–160	177–400

2.2 แก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว

ด้วยความตื่นตัวในเรื่องของการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนากระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมุ่งเน้นการพัฒนาแก้วที่ปราศจากตะกั่ว แต่ยังคงรักษาสมบัติที่ดีที่เกิดจากตะกั่ว เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่สูง (refractive index) และตะกั่วยังช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวของแก้วทำให้ทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

การพัฒนาแก้วปราศจากตะกั่วทำได้โดยการเติมสารประกอบออกไซด์ของธาตุทรานซิชัน เช่น Ta₂O₃, ZrO₂, TiO₂ หรือ Nb₂O₅ จากการศึกษาผลของการเติมธาตุ TiO₂ หรือ Nb₂O₅ ในแก้วกลุ่ม silicate ที่มีส่วนผสมของ BaO-SiO₂-NaO พบว่า การเติมธาตุ TiO₂ และ Nb₂O₅ ช่วยทำให้ค่า refractive index (RI) และ ความแข็งเพิ่มขึ้น โดยมีค่า RI ประมาณ 1.89-2.00 เนื่องจากการสร้างโครงสร้างตาข่ายของแก้วที่มีความหนาแน่นมากขึ้นด้วยการเชื่อมโยงของ TiO₆ และ NbO₆ octahedra (Nowak , et al., 2013)

แก้วในกลุ่ม Borosilicate ที่มีการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเติม BaO ทำให้สมบัติต่อความแข็ง ความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยปริมาณ BaO 35 mol% ทำให้มีความแข็งสูงกว่า 3 GPa (Vicker's hardness) โดยมีค่า glass transition temperature ที่ 590 °C ซึ่งแก้วในส่วนผสมนี้ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปในแบบผง โดยการอัดขึ้นรูปด้วยความดัน 100 MPa (Lim, et al., 2007)

แก้วในกลุ่ม tellurite มีค่า refractive index (RI) ที่สูง โดยจากการศึกษาเปรียบเทียบแก้ว 2 ส่วนผสม ได้แก่ ส่วนผสมที่มีตะกั่ว (TeO₂- ZnO-PbO-Nb₂O₅ และที่ไม่มีตะกั่ว (TeO₂- ZnO-Na₂O) ที่มีอุณหภูมิในการทำงาน (working point) ประมาณ 370 - 380 °C พบว่าในกลุ่มที่ไม่มีตะกั่ว มีค่า RI ประมาณ 2.0 ซึ่งสูงใกล้เคียงกับกลุ่มที่มีตะกั่วที่มีค่าประมาณ 2.1 นอกจากนี้กลุ่มที่ไม่มีตะกั่วยังมีช่วงของอุณหภูมิในการทำงานก่อนที่แก้วจะเกิดการตกผลึกที่กว้างกว่าเกือบ 100 °C มีผลให้แก้วมีความเสถียรต่อความร้อน (Gebavi , et al., 2013)

สำหรับแก้วในกลุ่ม tellurite borate ที่มีส่วนผสมของ TeO₂-B₂O₃-SiO₂ ถ้ามีปริมาณ SiO₂ ที่เพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 20 mol% ทำให้ค่า glass transition temperature (T_g) เพิ่มขึ้นจาก 398 °C ไปเป็น 419 °C และยังมีช่วงอุณหภูมิก่อนที่จะเกิดการตกผลึกที่กว้างขึ้น แสดงให้เห็นว่าปริมาณ SiO₂ ที่เพิ่มขึ้นทำให้แก้วมีความเสถียรทางความร้อนมากขึ้น (Xu, TF, et al., 2007)

แก้วอุณหภูมิต่ำที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเติมธาตุตะกั่วอีกชนิดคือ แก้วในกลุ่ม Boro-vanadate ซึ่งสามารถทำการขึ้นรูปได้ด้วยการหลอมเหลวด้วยวิธีการแบบดั้งเดิม แก้วในกลุ่มนี้มีอุณหภูมิลอมเหลวที่ต่ำโดยมีอุณหภูมิของ sealing temperature ที่ 335 oC และมีค่า CTE ที่ 106 x10⁻⁷ °C⁻¹ ซึ่งจัดเป็นค่าที่ต่ำ ซึ่งมีศักยภาพในการนำมาใช้ในงานต่อไป (Wang, et al., 2012)

2.3 การใช้วัสดุบิจากวัสดุเหลือทิ้ง

การวิจัยและพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มุ่งเน้นการพัฒนาวัสดุที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมและการบริโภคมาเพิ่มมูลค่าในกระบวนการผลิต เพื่อเป็นการลดของเสียที่เหลือทิ้ง และเป็นการนำวัสดุกลับมาใช้ซ้ำ ช่วยลดต้นทุนการผลิตวัสดุบิ ตัวอย่างเช่น การผลิตไบโอดีเซลจากเปลือกไข่เหลือทิ้ง ซึ่งมีการกำจัดทิ้งปีละกว่า 60,000 ตัน นักวิจัยห้องปฏิบัติการวัสดุนาโน ได้มีการนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งช่วยร่นระยะเวลาในการผลิตไบโอดีเซล และ ที่มีศักยภาพพร้อมลงทุนในเชิงพาณิชย์ (Nanotec, 2556)

น้อยอร่าม และคณะ (2555) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ด้วยเครื่อง XRF แสดงดังตารางที่ 2.3 โดยวัดปริมาณของธาตุองค์ประกอบจากเปลือกไข่ดิบ และเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษวัสดุเหลือทิ้งอื่นๆ อีกดังแสดงในตารางที่ 2.4 และจากการทดลองนี้ ได้มีการนำวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ เหล่านี้ ไปพัฒนาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตยาสีร่อน หรือ enamel

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่

(น้อยอร่าม , et al., 2555)

วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางเคมี (wt.%)								
	Ca	Mn	Fe	Al	Si	P	Cl	Na	Mg
ไข่ดิบ	94.52	0.01	0.04	0.6	3.76	0.03	0.31	0.01	0.72
ไข่ 900°C	98.35	0	0.02	0.27	0.84	0	0.08	0.02	0.19
ไข่ 1000°C	97.65	0	0.06	0.35	0.88	0.004	0.29	0.08	0.74
ไข่ 1100°C	98.73	0.01	0.03	0.28	0	0	0.31	0.01	0.63

ตารางที่ 2.4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีวัสดุเหลือทิ้ง

(น้อยอร่าม , et al., 2555)

วัสดุเหลือทิ้ง	องค์ประกอบทางเคมี (wt.%)										
	Si	Na	Ca	Al	K	S	Mg	Ti	P	Cl	Fe
เศษแก้ว	74	13	10.5	1.3	0.3	0.2	0.2	0.01	-	-	0.04
เศษ Biscuit	66.47	0.02	-	16.9	0.13	0.16	1.02	1.92	4.74	-	1.69
เปลือกไข่ผ่านการแคลไซน์	0.84	0.02	98.4	0.3	-	-	0.19	-	-	0.08	0.02
ซีเถ้าจากเปลือกตันกล้วย	28.6	0.67	17.25	1.5	25.3	2.23	17.5	0.19	4.08	-	1.61

การผลิตยาสีร่อน (vitreous enamel) ที่ปราศจากตะกั่วโดยใช้เปลือกไข่และวัสดุเหลือทิ้งมาเป็นวัตถุดิบ ซึ่งสามารถพัฒนาเป็นยาสีร่อนที่มีลักษณะทางกายภาพที่ใสแวววาวและมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 800 – 900 องศาเซลเซียส มีความแข็งประมาณ 480 HV หรือเทียบเท่ากับความแข็งที่ 7 Moh's Scale และสามารถนำมาตกแต่งบนตัวเรือนเครื่องประดับได้อย่างสวยงาม และมีค่าดัชนีหักเหอยู่ในช่วง 1.57-1.58 ซึ่งมีความแวววาวเพียงพอที่จะนำมาทำอัญมณีเลียนแบบ เป็นทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาและปรับปรุงอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ (น้อยอร่าม , et al., 2555)

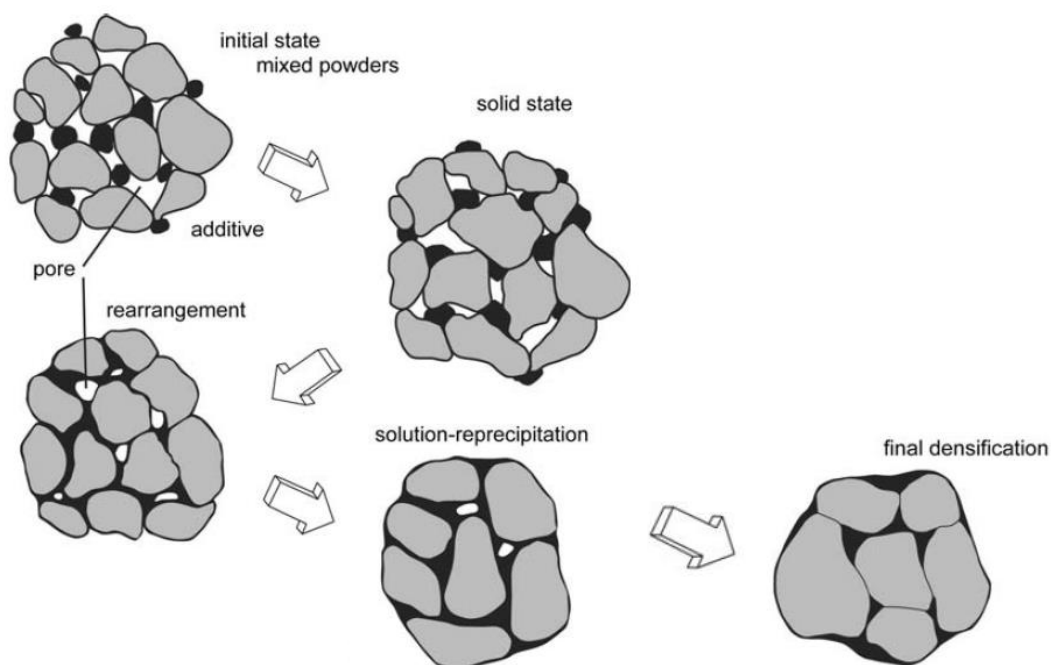
ซีเถ้ากลายเป็นอีกหนึ่งวัสดุเหลือทิ้งที่ได้รับความสนใจในการนำมาเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตวัสดุหลายชนิด รวมถึงการนำมาผสมเพื่อทำสีเซรามิกส์ โดยซีเถ้ากลายเป็นแหล่งวัตถุดิบของ

silica ทำให้ได้สีแดง ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับสีในท้องตลาด (Andreola, et al., 2012)

2.4 การขึ้นรูปวัสดุแก้ว

การขึ้นรูปวัสดุประเภทแก้วทำด้วยกระบวนการหลอมเหลวแก้วแล้วจึงทำการขึ้นรูป มีได้ 4 ลักษณะคือ pressing , blowing, drawing และ fiber forming (Callister, 2007) นอกจากนี้สำหรับแก้วอุณหภูมิต่ำ ยังสามารถทำการขึ้นรูปได้โดยอาศัยกระบวนการเผาพูนิก ซึ่งมีกระบวนการแสดงดังรูปที่ 2.2 ดังเช่น แก้วในกลุ่ม Borosilicate ที่มีส่วนผสมของ BaO มีค่า T_g ที่ $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถูกพัฒนาเพื่อให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปในแบบผง โดยการอัดขึ้นรูปด้วยความดัน 100 MPa (Lim, et al., 2007)

การขึ้นรูปโดยอาศัยกระบวนการ Liquid phase sintering สำหรับวัสดุของแข็งที่เชื่อมกันด้วย additive ที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานโดยการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว และอาศัยปรากฏการณ์การเปียกผิว (wetting) บนผิวผนังของแข็ง ดังอธิบายด้วยไดอะแกรมในรูปที่ 1.2 เริ่มจากการผสมของผงวัสดุเข้ากับ additive เมื่อให้ความร้อน additive เกิดการหลอมเหลวและเกาะผงวัสดุของแข็งให้เชื่อมกัน และลดช่องว่างระหว่างผงวัสดุ เป็นทางเลือกในการขึ้นรูปวัสดุของแข็งที่มีอุณหภูมิการหลอมเหลวสูง (German, et al., 2009)



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ liquid phase sintering (German, et al., 2009)

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ

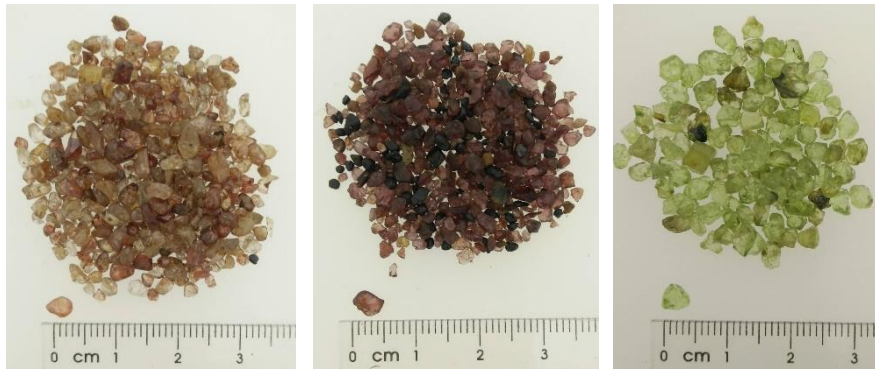
3.1 สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

สารเคมี วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองสามารถจำแนกได้ ดังนี้

3.1.1. วัสดุ และสารเคมี

ก. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ พลอยประเภทต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 3.1 ตามหมายเลข ดังนี้

- (1) เพทาย (Zircon) (2) โรโดไลท์ (Rhodolite) (3) เพอริดอท (Peridot)
(4) แซปไฟร์ (Sapphire) (5) นิล (Black Spinel)



(1)

(2)

(3)



(5)

(6)

รูปที่ 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ข. แก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม 4 ชนิด ได้แก่ Cullet 01 Cullet 02 Cullet 03 และ Cullet 04 ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม 4 ชนิด

ค. สารเคมีที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ผงสารเคมีต่างๆ ดังในรูปที่ 3.3 ตามหมายเลข ดังนี้

1. ผงสารเคมี SiO_2 หรือ Silicon oxide (Silica)
2. ผงสารเคมี H_2BO_3 หรือ Boric acid
3. ผงสารเคมี CaO หรือ Calcium Oxide
4. ผงสารเคมี ZnO หรือ Zinc Oxide
5. ผงสารเคมี MgO หรือ Magnesium Oxide
6. ผงสารเคมี $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ หรือ Tri-Sodium Orthophosphate



รูปที่ 3.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองสามารถจำแนกเป็นประกอบต่างๆ ดังนี้

3.1.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมสารเคมี

อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมสารเคมี แสดงดังในรูปที่ 3.4 ตามหมายเลขดังนี้

1. โกร่งบดสาร ใช้สำหรับผสมสารเคมีให้เข้ากันดี

2. ซ้อนตักสาร ใช้สำหรับตวงสารที่ใช้ในการทดลอง
3. เบ้าอะลูมินา ใช้สำหรับบรรจุสารต่างๆที่เตรียมไว้ ใส่เตาไฟฟ้า



(1)

(2)

(3)

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ผสมสารเคมี

3.1.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการให้ความร้อน แสดงดังในรูปที่ 3.5 ตามหมายเลขดังนี้

1. ทอร์ช ให้ความร้อนในการติดแก้วกับฟลอย และทดสอบการเปลี่ยนสีของฟลอย และการขึ้นรูปชิ้นงาน
2. โต๊ะพร้อมอุปกรณ์สำหรับการใช้ความร้อนด้วยทอร์ช ใช้ให้ความร้อนในการติดแก้วกับฟลอย และทดสอบการเปลี่ยนสีของฟลอย



(1)



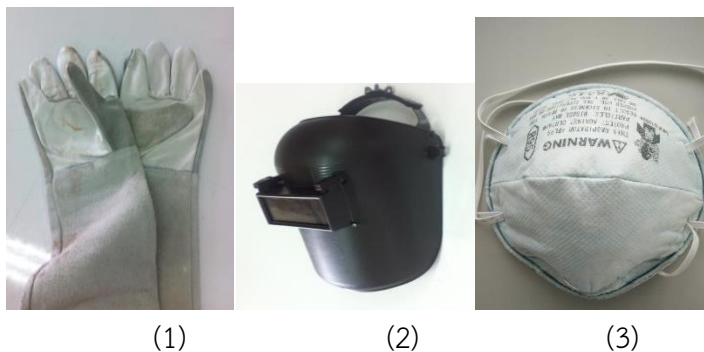
(2)

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์การเผาชิ้นงานและให้ความร้อน

3.1.2.3 อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย

อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัย แสดงดังรูปที่ 3.6 ตามหมายเลข ดังนี้

1. ถุงมือกันความร้อน ใช้สวมใส่เพื่อกันความร้อน
2. หมวกกันความร้อน ใช้กันความร้อนที่มาสู่ผิวหนัง
3. หน้ากากกันสารเคมี ใช้ป้องกันฝุ่นขณะผสมสารเคมี
4. แผ่นเซรามิกส์ทนไฟ ใช้รองพื้นเพื่อวางครุชชีเบลในเตาไฟฟ้า
5. เหล็กหนีบ ใช้คีบครุชชีเบลออกจากเตาไฟฟ้า
6. ทวิสเซอร์ ใช้สำหรับคريبพลอยขณะขึ้นรูปกับแก้ว

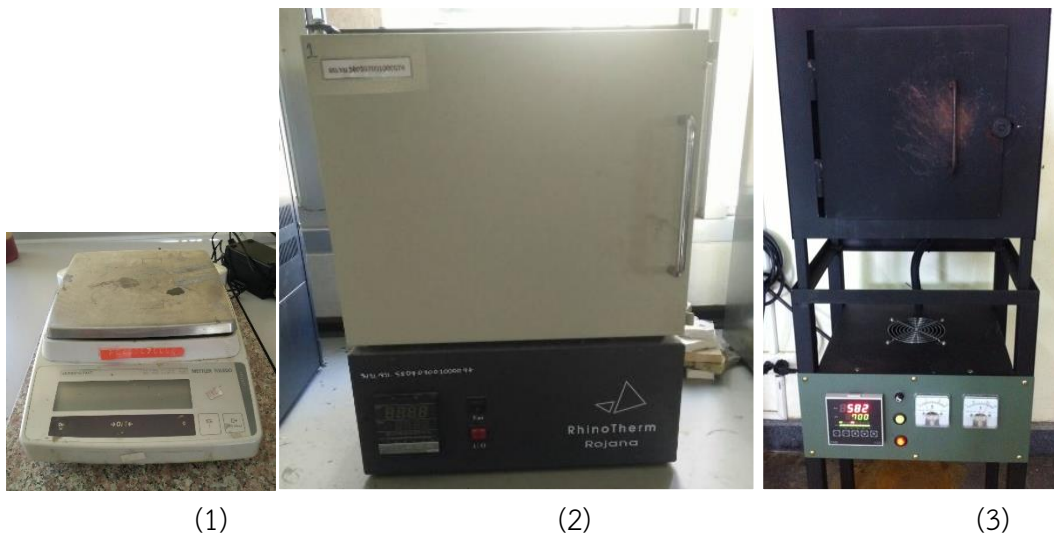


รูปที่ 3.6 อุปกรณ์กันความร้อน

3.1.3 เครื่องมือ

เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วย

1. เครื่องชั่งดิจิตอล ใช้สำหรับวัดปริมาณของสารที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.7 (1)
2. เตอบไฟฟ้า ยี่ห้อ RhinoTherm Rojana รุ่น PFY-700 ใช้ในการหลอมแก้วที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.7 (2)
3. เตาลอมไฟฟ้า ยี่ห้อ TAIE รุ่น FU96 เตาลอมอุณหภูมิ ใช้ในการหลอมแก้วที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 3.7 (3)



รูปที่ 3.7 เตาไฟฟ้า

4. กล้องจุลทรรศน์แสง (Olympus Microscope) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น SZX7 ใช้ศึกษาลักษณะพื้นผิวหรือลักษณะมลทินภายในของแก้วที่กำลังขยาย 20x ของเลนส์วัตถุ และลักษณะการเกาะติดบริเวณพื้นผิวของแก้ว กับพลอยที่กำลังขยาย 0.8x ของเลนส์วัตถุ แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์แสง (Microscope Olympus)

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 แผนการผสมแก้ว

กลุ่มที่ 1 การผสมสารเคมี 3 ส่วนผสม คือ สารเคมี SiO_2 สารเคมี CaO_2 และ สารเคมี B_2O_3 (จากสารประกอบ H_2BO_3)

กลุ่มที่ 2 การผสมสารเคมี 5 ส่วนผสมคือ สารเคมี SiO_2 สารเคมี CaO_2 และ สารเคมี B_2O_3 (จากสารประกอบ H_2BO_3) โดยเติมสารเคมี ZnO และ MgO

กลุ่มที่ 3 การผสมสารเคมี 6 ส่วนผสม คือ สารเคมี SiO_2 สารเคมี CaO_2 และ สารเคมี B_2O_3 (จากสารประกอบ H_2BO_3) โดยการเติมสารเคมี ZnO MgO และ Na_2O (จากสารประกอบ $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)

กลุ่มที่ 4 การผสมสารเคมี 5 ส่วนผสม คือ สารเคมี SiO_2 สารเคมี CaO_2 และ สารเคมี B_2O_3 (จากสารประกอบ H_2BO_3) สารเคมี ZnO และ MgO และเพิ่มการผสมแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม 4 ชนิด ได้แก่ Cullet 01 Cullet 02 Cullet 03 และ Cullet 04

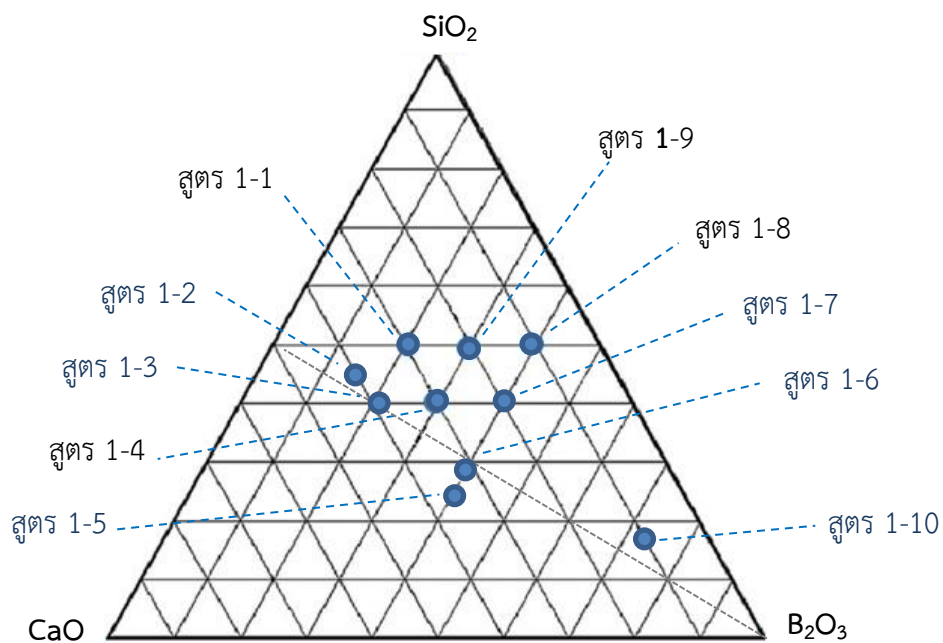
3.2.2 การผสมแก้วกลุ่มที่ 1

- การผสมแก้วเริ่มจากผสมสารเคมี 3 ชนิด คือ สาร CaO สาร B_2O_3 (จากสารประกอบ H_3BO_3) และ สาร SiO_2 ตามส่วนผสมในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.9

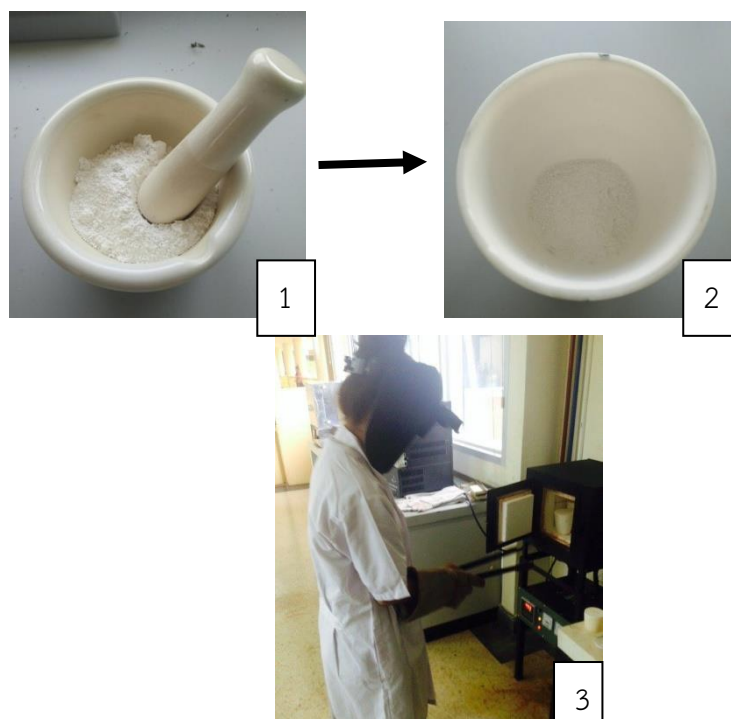
- ทำการผสมส่วนผสมแต่ละสูตรในโถรง ทำการบดผสมแล้วจึงใส่ในครุชชีเบลเพื่อนำเข้าเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและให้ความร้อนด้วยอัตราเร่ง 10°C ต่อนาที จนหลอมเหลวที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ โดยคงอุณหภูมินี้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวในเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 1 (3 องค์ประกอบ)

สูตร	ส่วนผสมแก้ว (wt.%)		
	CaO	B_2O_3	SiO_2
1-1	30.0	20.0	50.0
1-2	41.2	14.4	44.4
1-3	37.0	23.0	40.0
1-4	30.0	30.0	40.0
1-5	36.3	40.5	23.2
1-6	32.0	40.0	28.0
1-7	20.0	40.0	40.0
1-8	10.0	40.0	50.0
1-9	20.0	30.0	50.0
1-10	12.6	73.7	13.7



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงแผนของส่วนผสมแก้ว CaO B₂O₃ SiO₂



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีก่อนเข้าเตาไฟฟ้า

(1) การบดส่วนผสมในโกร่ง (2) นำใส่ในครุชชีเบิลอลูมิน่า และ (3) การนำครุชชีเบิลออกจากเตาไฟฟ้า

3.2.3 การผสมแก้วกลุ่มที่ 2 (5 องค์ประกอบ)

คัดเลือกสูตรแก้วที่มีความใสจากแก้วผสมกลุ่มที่ 1 ได้แก่ สูตร 1-2 สูตร 1-3 สูตร 1-5 และ สูตร 1-10 ทำการ เติม MgO กับ ZnO อย่างละ 6.0 wt.% และเรียกชื่อสูตร เป็น 2-2 สูตร 2-3 สูตร 2-5 และ สูตร 2-10 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ผสมสูตรแก้วที่มีความใสปนุ่นจากแก้วผสมกลุ่มที่ 1 ได้แก่ สูตร 1-1 สูตร 1-4 สูตร 1-8 และ สูตร 1-9 ทำการ เติม MgO กับ ZnO อย่างละ 6.0 wt.% และเรียกชื่อสูตร เป็น 2-1 สูตร 2-4 สูตร 2-8 และ สูตร 2-9 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

- ผสมในคลุชชีเบลและหลอมในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ยืนอุณหภูมิเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยอัตราเร่ง 10°C ต่อนาที

- ทดสอบอุณหภูมิการใช้งาน (Working Temperature) โดยการนำแก้วที่ผ่านการหลอมแล้วมาให้ความร้อนในเตาอบไฟฟ้าจนถึงอุณหภูมิ 700°C 750°C 800°C และ 850°C สังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

- ทดสอบการเกาะติดระหว่างแก้วกับพลอย โดยปล่อยตกกระแทกลงพื้นกระเบื้อง 3 ครั้ง ที่ความสูง 150 เซนติเมตร

- นำแก้วไปทำการขึ้นรูปด้วยทอร์ช และสังเกตสภาพแก้วหลังได้รับความร้อน

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 2 (5 องค์ประกอบ)

สูตร	ส่วนผสมแก้ว (wt.%)				
	CaO	B ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	ZnO
2-2	41.2	14.4	44.4	6.0	6.0
2-3	37.0	23.0	40.0	6.0	6.0
2-5	36.3	40.5	23.2	6.0	6.0
2-10	12.6	73.7	13.7	6.0	6.0
2-1	30.0	20.0	50.0	6.0	6.0
2-4	30.0	30.0	40.0	6.0	6.0
2-8	10.0	40.0	50.0	6.0	6.0
2-9	20.0	30.0	50.0	6.0	6.0

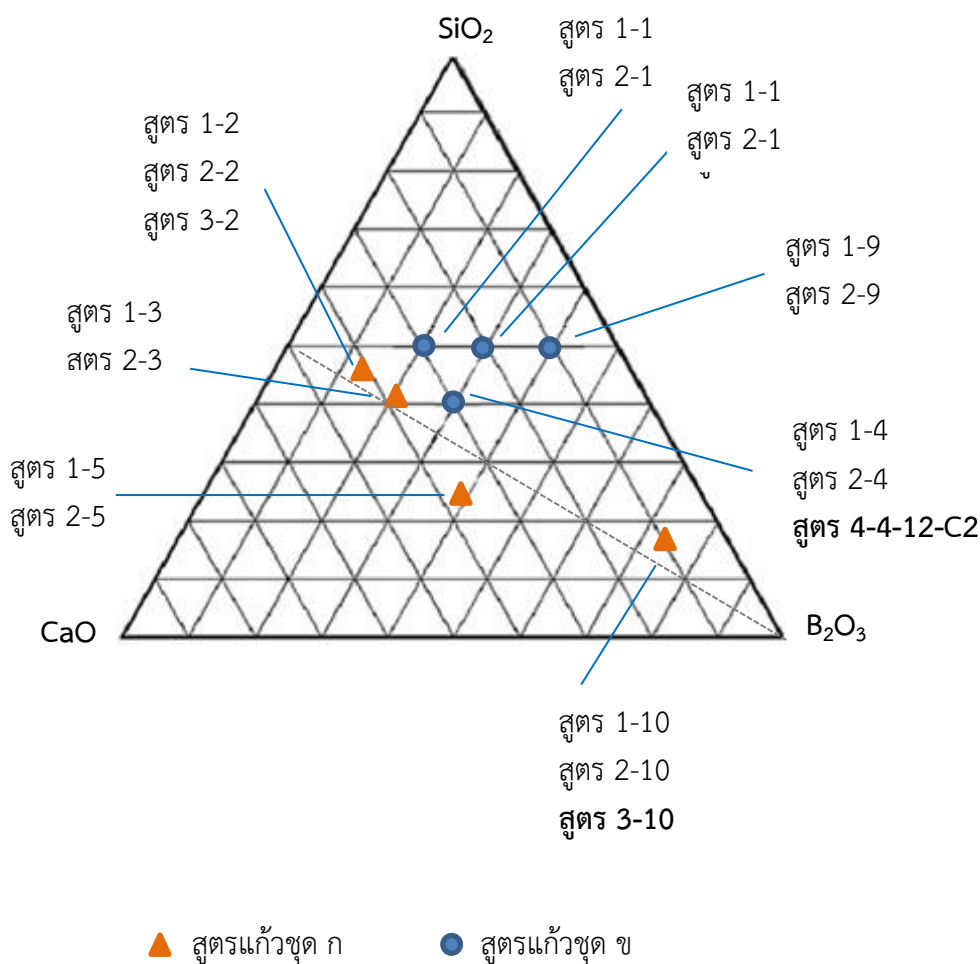
3.2.4 การผสมแก้วกลุ่มที่ 3 (6 องค์ประกอบ)

- คัดเลือกแก้วที่ใสหลังจากได้รับความร้อน และเกาะติดดี ได้แก่ สูตร 2-2 และสูตร 2-10 ที่มีอุณหภูมิในการทำงานที่ต่ำที่สุด มาเติม Na₃PO₄·12H₂O 10wt.% เพื่อให้อุณหภูมิในการทำงานต่ำลง และตั้งชื่อสูตรเป็น สูตร 3-2 และสูตร 3-10 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.3

การพัฒนาแก้วสูตรต่างๆ จากแก้วกลุ่มที่ 1 มีการเติมสารเพิ่มเติมเป็นแก้วกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 รวมถึงแก้วกลุ่มที่ 4 แสดงการสรุปการพัฒนาสูตรแก้ว ดังรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.3 ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 3 (6 องค์ประกอบ)

สูตร	ส่วนผสมแก้ว (wt.%)					
	CaO	B ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	ZnO	Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O
3-2	41.2	14.4	44.4	6.0	6.0	10.0
3-10	12.6	73.7	13.7	6.0	6.0	10.0



รูปที่ 3.11 กราฟสูตรแก้วกลุ่ม 1 ที่มีการพัฒนาส่วนผสมในแก้วกลุ่ม 2 และกลุ่ม 3

3.2.5 การผสมแก้วกลุ่มที่ 4 (ผสมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม)

- คัดเลือกแก้วที่จากการทดลองการผสมแก้วกลุ่มที่ 2 ในข้อ 3.2.3 เพื่อนำมาทดลองการผสมกับแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม เพื่อทดสอบลักษณะแก้วกับการเกาะติดกับฟลอย โดยเลือกสูตร 2-4 ซึ่งประกอบด้วย - CaO₂ และ B₂O₃ 30 wt.% และ SiO₂ 40 wt.% และ MgO กับ ZnO อย่างละ 6.0 wt.% โดยทำการเติม MgO กับ ZnO เพิ่มอีกอย่างละ 6.0 wt.% มาทำการศึกษาการผสมกับแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม 4 ชนิด ได้แก่ Cullet 01 Cullet 02 Cullet 03 และ Cullet 04 โดยมีแผนการทดลองส่วนผสมดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 4 (ผสมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม)

สูตร	ส่วนผสมแก้ว (wt.%)					
	CaO	B ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	ZnO	CulletX
4-4-0-C1	30.0	30.0	40.0	-	-	12.0
4-4-0-C2	30.0	30.0	40.0	-	-	12.0
4-4-0-C3	30.0	30.0	40.0	-	-	12.0
4-4-0-C4	30.0	30.0	40.0	-	-	12.0
4-4-12-0	30.0	30.0	40.0	12.0	12.0	-
4-4-12-C1	30.0	30.0	40.0	12.0	12.0	12.0
4-4-12-C2	30.0	30.0	40.0	12.0	12.0	12.0
4-4-12-C3	30.0	30.0	40.0	12.0	12.0	12.0
4-4-12-C4	30.0	30.0	40.0	12.0	12.0	12.0

3.2.4 การศึกษาแก้วหลังเผา

- นำแก้วที่หลอมได้ออกจากเบ้าอะลูมินา ซึ่งแก้วจะติดกับเบ้าอะลูมินาทำให้ต้องทุบเบ้าอะลูมินาออก จะได้เศษแก้วที่แตกออกเป็นชิ้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 แล้วเลือกแก้วที่ไม่ติดเบ้านำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง เพื่อสังเกตลักษณะภายในเนื้อแก้ว



รูปที่ 3.12 แก้วที่ได้จากการหลอม

- ทดสอบอุณหภูมิการใช้งานของแก้ว (working temperature) โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแก้วที่อุณหภูมิ 700°C 750°C 800°C และ 850°C

- นำแก้วติดกับเศษพลอยด้วยการให้ความร้อนด้วยเทอร์ช และทดสอบการเกาะติดแก้วกับพลอยแต่ละสูตร โดยการปล่อยตกกระแทกที่ความสูง 150 เซนติเมตร ลงมาบนพื้นปูน จำนวน 3 ครั้ง

3.2.5 การติดตามการเปลี่ยนแปลงของสีพลอย

- ถ่ายภาพสีพลอยก่อนทดสอบ

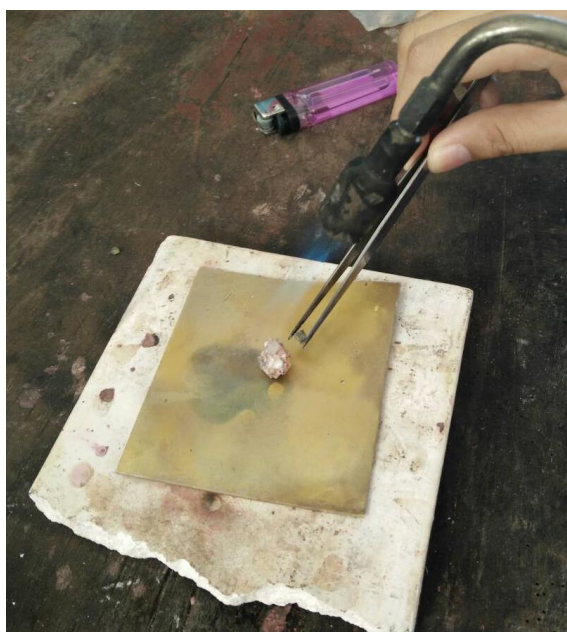
- นำพลอยให้ความร้อนด้วยเทอร์ชเป็นเวลา 3 นาที

- สังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีพลอยหลังได้รับความร้อน แล้วถ่ายรูปพลอยหลังได้รับความร้อน

3.2.6 การผลิตเครื่องประดับ

- เลือกสูตรแก้วจากที่มีลักษณะใส ไม่แตก อุณหภูมิการทำงานของแก้ว (working temperature) ไม่เกิน 850°C และสามารถติดกับพลอยแต่ละชนิดได้ดีและผ่านการทดสอบการตกกระแทก ได้แก่ แก้วสูตร 3-10 และแก้วสูตร 4-4-12-C2

- ใช้ทอร์ชเป่าให้ความร้อนแก้วในการขึ้นรูปร่วมกับพลอย ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 การขึ้นรูปแก้วร่วมกับพลอย

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะของแก้วที่ผ่านการหลอม

4.1.1 สูตรแก้วกลุ่ม 1 (3 องค์ประกอบ)

การศึกษาแก้วที่ประกอบด้วยส่วนผสมของ CaO B₂O₃ และ SiO₂ ทั้ง 9 สูตร พบว่าลักษณะของแก้วสูตรต่างๆ ที่ผ่านการหลอม แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1

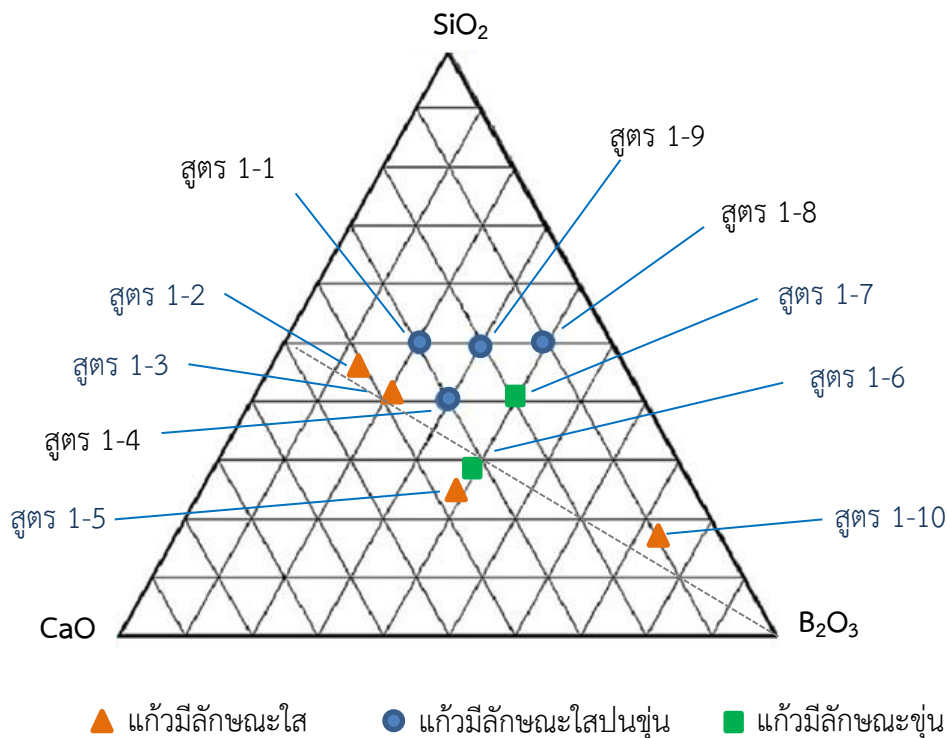
ตารางที่ 4.1 ส่วนผสมของแก้วแบบที่ 1 (3 องค์ประกอบ)

สูตร	ส่วนผสมแก้ว (wt%)			CaO/SiO ₂	ความใส-ขุ่น	อุณหภูมิในการใช้งาน
	CaO	B ₂ O ₃	SiO ₂			
1-1	30.0	20.0	50.0	0.60	ใสปนขุ่น	>850°C
1-2	41.2	14.4	44.4	0.93	ใส	>850°C
1-3	37.0	23.0	40.0	0.93	ใส	800°C
1-4	30.0	30.0	40.0	0.75	ใสปนขุ่น	>850°C
1-5	36.3	40.5	23.2	1.56	ใส	>850°C
1-6	32.0	40.0	28.0	1.14	ขุ่น	>850°C
1-7	20.0	40.0	40.0	0.50	ขุ่น	>850°C
1-8	10.0	40.0	50.0	0.20	ใสปนขุ่น	>850°C
1-9	20.0	30.0	50.0	0.40	ใสปนขุ่น	>850°C
1-10	12.6	73.7	13.7	0.92	ใส	750°C

จากผลของความใสของแก้วสัมพันธ์กับส่วนผสมของแก้วในสูตรต่างๆ ตามรูปที่ 4.1 สามารถแบ่ง

ลักษณะของแก้วแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่

- ชุด ก. แก้วที่มีลักษณะใส ได้แก่ สูตร 1-2 สูตร 1-3 สูตร 1-5 และ สูตร 1-10
- ชุด ข. แก้วที่มีลักษณะใสปนขุ่น ได้แก่ สูตร 1-1 สูตร 1-4 สูตร 1-8 และ สูตร 1-9
- ชุด ค. แก้วที่มีลักษณะขุ่น ได้แก่ สูตร 1-6 และ สูตร 1-7



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความใสของสูตรแก้วระบบ CaO B₂O₃ SiO₂

กลุ่มสูตรแก้ว ชุด ก

กลุ่มสูตรแก้ว ชุด ก พิจารณาส่วนผสมของแก้วตามแนวเส้นปะในรูปที่ 4.1 แสดงถึงส่วนผสมที่มี สัดส่วนระหว่าง CaO และ SiO₂ ระหว่าง 1.00 ± 0.80 และมีการเปลี่ยนแปลงของ B₂O₃ ในทิศทางที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจาก สูตร 1-2 สูตร 1-3 สูตร 1-5 และ สูตร 1-10 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาลักษณะของแก้วที่มีความใส อุณหภูมิในการใช้งานของแก้ว (working temperature) มีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วน B₂O₃ ที่เพิ่มขึ้น จาก อุณหภูมิที่สูงกว่า 850 °C (สูตร 1-2) มาถึง 750 °C (สูตร 1-10) อย่างไรก็ตาม สูตร 1-5 มีอุณหภูมิในการทำงานที่สูงกว่า 850 °C

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของแก้วในกลุ่มสูตรแก้ว ชุด ก

สูตร	สัดส่วน CaO/SiO ₂	B ₂ O ₃ (wt.%)	ความใส	อุณหภูมิในการใช้งาน (working temperature)
1-2	0.93	14.4	ใส	>850 °C
1-3	0.93	23.0	ใส	800 °C
1-5	1.56	40.5	ใส	>850 °C
1-10	0.92	73.7	ใส	750 °C

กลุ่มสูตรแก้ว ชุด ข

กลุ่มสูตรแก้ว ชุด ข ได้แก่ สูตร 1-1 สูตร 1-4 สูตร 1-8 และ สูตร 1-9 พิจารณาส่วนผสมของแก้วตามแนวเส้น SiO_2 คงที่เท่ากับ 50.0 %โดยน้ำหนัก ยกเว้น สูตร 1-4 ที่มี SiO_2 คงที่เท่ากับ 40.0 %โดยน้ำหนัก แก้วที่มีลักษณะใสปนขุ่น และมีอุณหภูมิในการใช้งานมากกว่า 850°C

ตารางที่ 4.3 ลักษณะของแก้วในกลุ่มสูตรแก้ว ชุด ข

สูตร	สัดส่วน CaO/SiO_2	B_2O_3 (wt.%)	ความใส	อุณหภูมิในการใช้งาน (working temperature)
1-1	0.60	20.0	ใสปนขุ่น	$>850^\circ\text{C}$
1-4	0.75	30.0	ใสปนขุ่น	$>850^\circ\text{C}$
1-8	0.20	40.0	ใสปนขุ่น	$>850^\circ\text{C}$
1-9	0.40	30.0	ใสปนขุ่น	$>850^\circ\text{C}$

กลุ่มสูตรแก้ว ชุด ค

กลุ่มสูตรแก้ว ชุด ค ได้แก่ สูตร 1-6 และ สูตร 1-7 เป็นสูตรที่มีส่วนผสม B_2O_3 คงที่เท่ากับ 40.0 %โดยน้ำหนัก ดังในรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาจากส่วนผสมที่มี B_2O_3 คงที่เท่ากับ 40.0 %โดยน้ำหนัก สามารถแสดงได้ในตารางที่ 4.4 สูตร 1-5 สูตร 1-6 สูตร 1-7 และ สูตร 1-8 จะมีสัดส่วนระหว่าง CaO และ SiO_2 ลดลงจาก 1.56 ลดลงถึง 0.20 ตามลำดับ และพบว่า แก้วมีความใสลดลงเมื่อสัดส่วนของ CaO/SiO_2 ลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อ CaO/SiO_2 เท่ากับ 0.20 แก้วมีลักษณะใสปนขุ่น ดังแสดงผลในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ลักษณะของแก้วในกลุ่ม ส่วนผสม B_2O_3 เท่ากับ 40.0 %โดยน้ำหนัก

สูตร	สัดส่วน CaO/SiO_2	B_2O_3 (wt.%)	ความใส	อุณหภูมิในการใช้งาน (working temperature)
1-5	1.56	40.5	ใส	$>850^\circ\text{C}$
1-6	1.14	40.0	ขุ่น	$>850^\circ\text{C}$
1-7	0.50	40.0	ขุ่น	$>850^\circ\text{C}$
1-8	0.20	40.0	ใสปนขุ่น	$>850^\circ\text{C}$

4.1.2 สูตรแก้วกลุ่ม 2 (5 องค์ประกอบ)

เมื่อได้ผลลักษณะของแก้วตามสูตรแก้วกลุ่ม 1 จึงเลือกสูตรแก้ว ชุด ก และ ชุด ข ซึ่งมีความใส และ ใสปนขุ่น มาทำการศึกษาโดยการเติม MgO และ ZnO อย่างละ 6 %โดยน้ำหนัก ลักษณะของแก้วหลังเติม แสดงดังตารางที่ 4.5

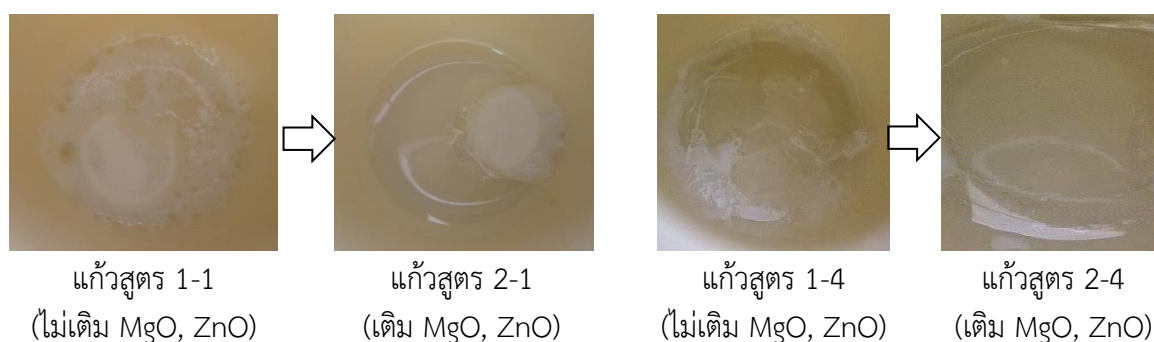
ลักษณะแก้วภายหลังการผสมด้วย MgO และ ZnO จนได้เนื้อแก้วพบว่า แก้วใสในชุด ก ยังคงความใส และมีอุณหภูมิในการทำงานลดลง ซึ่งพบได้ชัดเจนใน สูตร 2-2 และ สูตร 2-5 ซึ่งมีอุณหภูมิการทำงานก่อนเติม MgO และ ZnO ที่สูงกว่า 850°C แต่เมื่อเติม MgO และ ZnO พบว่าอุณหภูมิการทำงานลดลงเป็น 800°C อย่างไรก็ตามแก้วสูตร 2-3 และ สูตร 2-10 ยังคงมีอุณหภูมิใช้

งานในช่วงเดิม ทั้งนี้อาจมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ช่วงอุณหภูมิในการวัดค่อนข้าง จึงไม่สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้

ลักษณะของแก้วในชุด ข ที่มีลักษณะใสปนขุ่น และเมื่อเติม MgO และ ZnO พบว่าสูตร 2-1 สูตร 2-8 และ สูตร 2-9 ยังคงมีลักษณะใสปนขุ่น แต่สูตร 2-4 มีความใส ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และไม่พบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำงานของทั้งสอง อย่างไรก็ตาม อาจเนื่องจากช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการทดสอบสามารถแยกอุณหภูมิในช่วงที่แคบกว่านี้ได้จึงไม่สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงได้ และแก้วสูตร 2-4 ได้มีการศึกษาพัฒนาต่อในการผสมแก้วกลุ่ม 4 ต่อจากนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการปรับปรุงสูตรแก้วโดยการเติม MgO และ ZnO

ชุด	สูตรแก้ว	ส่วนผสมแก้ว (wt%)			ก่อนเติม MgO และ ZnO		หลังเติม MgO และ ZnO	
		CaO	B ₂ O ₃	SiO ₂	ความใส	อุณหภูมิในการทำงาน	ความใส	อุณหภูมิในการทำงาน
ก	2-2	41.2	14.4	44.4	ใส	>850°C	ใส	800°C
ก	2-3	37.0	23.0	40.0	ใส	800°C	ใส	800°C
ก	2-5	36.3	40.5	23.2	ใส	>850°C	ใส	800°C
ก	2-10	12.6	73.7	13.7	ใส	750°C	ใส	750°C
ข	2-1	30.0	20.0	50.0	ใสปนขุ่น	>850°C	ใสปนขุ่น	>850°C
ข	2-4	30.0	30.0	40.0	ใสปนขุ่น	>850°C	ใส	>850°C
ข	2-8	10.0	40.0	50.0	ใสปนขุ่น	>850°C	ใสปนขุ่น	>850°C
ข	2-9	20.0	30.0	50.0	ใสปนขุ่น	>850°C	ใสปนขุ่น	>850°C



รูปที่ 4.2 ภาพลักษณะใส-ขุ่นของสูตรแก้วชุด ข ก่อนและหลังการเติม MgO และ ZnO 6 %โดยน้ำหนัก

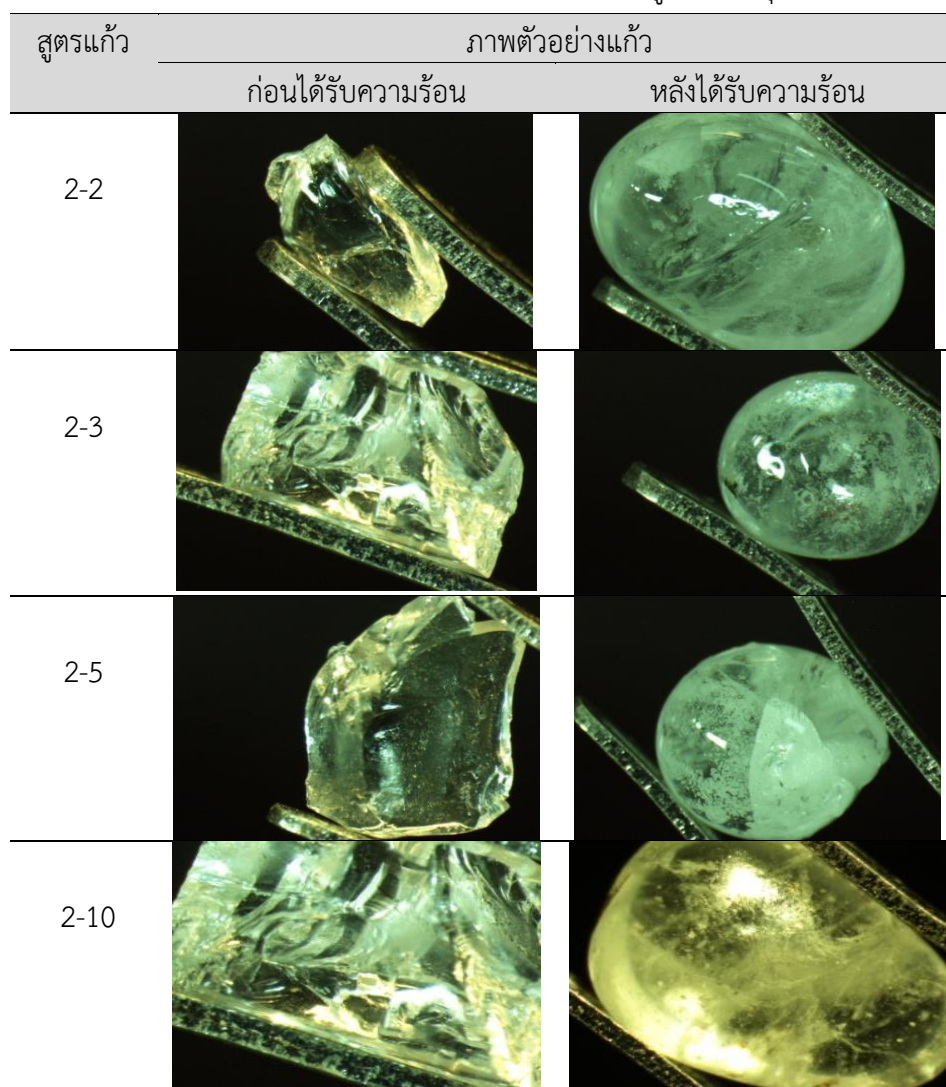
แก้วในสูตรแก้วกลุ่ม 2 ที่มาจากสูตรแก้ว ชุด ก ซึ่งมีลักษณะใสและไม่มียอยแตก เมื่อทำการสำรวจแก้วภายหลังการได้รับความร้อนด้วยเทอร์ช แสดงผลดังตารางที่ 4.6 และตารางที่ 4.7 พบว่าแก้วทุกสูตรยังคงมีความใสอยู่หลังผ่านการให้ความร้อนในกระบวนการติดพลอย ยกเว้นแก้วสูตร 2-5 พบรอยแตกภายในหลังได้รับความร้อนจากการติดกับพลอย

เมื่อทำการทดสอบการเกาะติดของแก้วกับพลอยโดยการตกกระแทกจำนวน 3 ครั้ง และทดสอบการเกาะติดกับพลอย 2 ชนิด คือ นิลและแซปไฟร์ แสดงผลดังตารางที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าแก้วสูตร 2-2 และ สูตร 2-5 สามารถติดกับพลอยได้ดีและไม่หลุดหรือแตกเมื่อทดสอบการตกกระแทก 2 ครั้ง แต่ครั้งที่ 3 พบการแตกหักสำหรับแก้วที่ติดกับแซปไฟร์สำหรับแก้วสูตร 2-2 ส่วนแก้วสูตร 2-5

พบการหลุดออกจากนิล และโดยรวมแก้วสูตร 2-5 พบรอยร้าวในเนื้อแก้ว ส่วนแก้วสูตร 2-3 มีการแตกและหลุดออกจากแซปไฟร์ตั้งแต่การทดสอบครั้งแรก แต่สามารถติดกับนิลได้ อย่างไรก็ตามก็ตามเกิดการแตกของแก้วในบริเวณที่มีการเชื่อมกับฟลอยเมื่อทดสอบการตกครั้งที่ 2

อย่างไรก็ตาม แก้วสูตร 2-10 ยังไม่ได้รับการทดสอบการติดกับฟลอยแต่มีความน่าสนใจที่มีอุณหภูมิในการทำงาน 750 °C จึงมีได้รับเลือกในการนำไปพัฒนาต่อในขั้นต่อไป

ตารางที่ 4.6 ภาพตัวอย่างแก้วก่อนและหลังได้รับความร้อนของสูตรแก้วกลุ่ม 2 (5 องค์ประกอบ)



ตารางที่ 4.7 ลักษณะของแก้วสูตรแก้วกลุ่ม 2 (5 องค์ประกอบ)

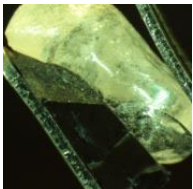
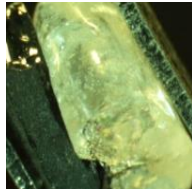
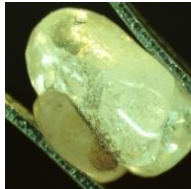
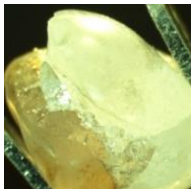
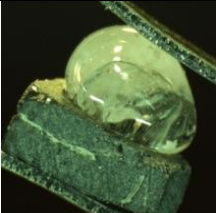

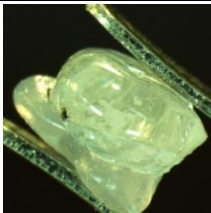

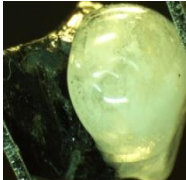

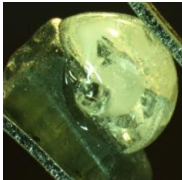
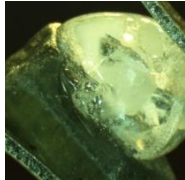
สูตรแก้ว	อุณหภูมิในการทำงาน	ความใส	สภาพแก้วหลังได้รับความร้อน		
			ใส	ขุ่น	แตก
2-2	800 °C	ใสไม่มีรอยแตก	✓	-	-
2-3	800 °C	ใสไม่มีรอยแตก	✓	-	-
2-5	800 °C	ใสไม่มีรอยแตก	✓	-	แตก
2-10	750 °C	ใสไม่มีรอยแตก	✓	-	-

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองการเกาะติดด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้วกลุ่ม 2

สูตรแก้ว	ชื่อพลอย	จำนวนครั้ง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
2-2	นิล	✓	✓	✓
	แซปไฟร์	✓	✓	หักบางส่วน
2-3	นิล	✓	✗	-
	แซปไฟร์	✗	-	-
2-5	นิล	✓	✓	✗
	แซปไฟร์	✓	✓	✓
2-10	นิล	NA	NA	NA
	แซปไฟร์	NA	NA	NA

*หมายเหตุ ✓ คือ พลอยกับแก้วไม่หลุดออกจากกัน ✗ คือ พลอยกับแก้วหลุดออกจากกัน

ตารางที่ 4.9 ภาพถ่ายจากผลทดลองการเกาะติดด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้วกลุ่ม ข

ชื่อสูตรแก้ว	รูปตัวอย่างแก้วติดกับนิล		รูปตัวอย่างแก้วติดกับแซปไฟร์	
	ก่อนกระแทก	หลังกระแทก	ก่อนกระแทก	หลังกระแทก
2-2				
2-3				
2-5				

4.1.3 สูตรแก้วกลุ่ม 3 (6 องค์ประกอบ)

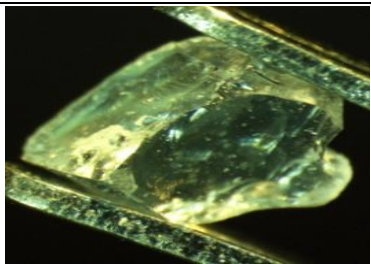
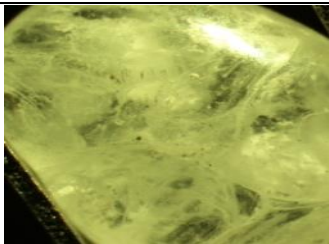
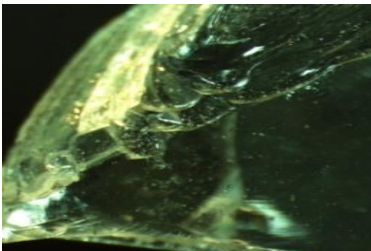
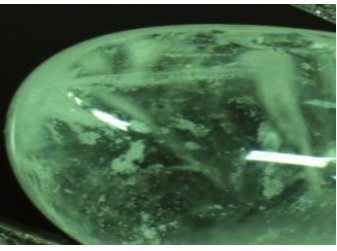
จากแก้วในสูตรแก้วกลุ่ม 2 (5 องค์ประกอบ) ได้เลือกแก้ว สูตร 2-2 ที่มีความสามารถในการติดกับพลอย และแก้วสูตร 2-10 ที่มีอุณหภูมิในการทำงาน 750 °C มาทำการพัฒนาต่อโดยการผสมด้วย $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ลักษณะของแก้วที่ได้จากการผสม แสดงดังตารางที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.11

เมื่อมีการเติม $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ พบว่าเนื้อแก้วมีลักษณะใส และอุณหภูมิการทำงานของแก้ว สูตร 3-2 และสูตร 3-10 ลดลงเป็น 750°C และ 700°C ตามลำดับ และเมื่อแก้วได้รับความร้อนเพื่อทดสอบสภาพแก้วหลังการขึ้นรูปพบว่า แก้วสูตร 3-10 ยังคงมีลักษณะใส ในขณะที่แก้วสูตร 3-2 มีลักษณะขุ่นและเกิดรอยร้าว

เมื่อทำการทดสอบการเกาะติดของแก้วกับฟลอยโดยการตกกระแทกจำนวน 3 ครั้ง และทดสอบการเกาะติดกับฟลอย 2 ชนิด คือ นิลและแซปไฟร์ แสดงผลดังตารางที่ 4.12 และ 4.13 พบว่าแก้วสูตร 3-2 และ สูตร 3-10 สามารถติดกับฟลอยได้ดีและไม่หลุดหรือแตกเมื่อทดสอบการตกกระแทก 3 ครั้ง แต่สำหรับสูตร 3-2 มีการแตกและหลุดออกจากแซปไฟร์ในการทดสอบครั้งที่ 3

จากผลการทดลองทั้งหมด แก้วสูตร 3-10 มีความใสมีความใสเมื่อผ่านกระบวนการเกาะติดกับฟลอย และสามารถเกาะติดกับฟลอยได้ดีจึงนำแก้วสูตร 3-10 มาทำการขึ้นรูปพร้อมกับฟลอยต่อไป

ตารางที่ 4.10 ภาพตัวอย่างแก้วกลุ่ม 3 (6 องค์ประกอบ) ก่อนและหลังการได้รับความร้อน

สูตรแก้ว	ภาพตัวอย่างแก้ว	
	ก่อนได้รับความร้อน	หลังได้รับความร้อน
3-2		
3-10		

ตารางที่ 4.11 ลักษณะของแก้วสูตรแก้วกลุ่ม 3 (6 องค์ประกอบ)

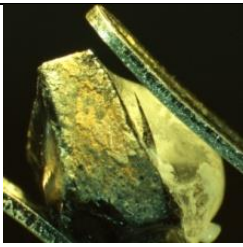
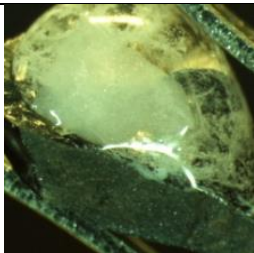

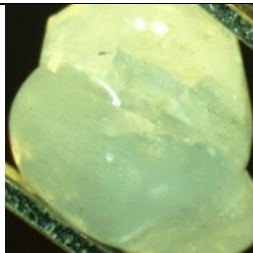
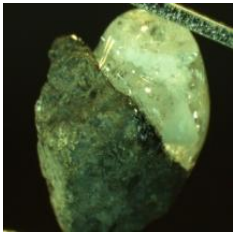
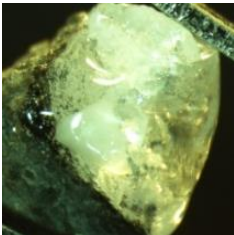
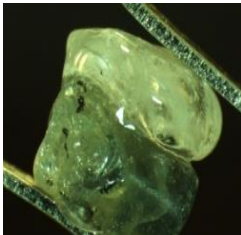
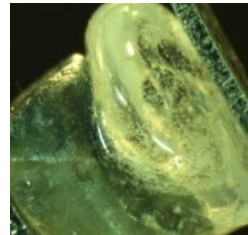
สูตรแก้ว	ส่วนผสมแก้ว (wt%)			อุณหภูมิในการทำงาน	ความใส	สภาพแก้วหลังได้รับความร้อน		
	CaO	B_2O_3	SiO_2			ใส	ขุ่น	แตก
3-2	41.2	14.4	44.4	750°C	ใสไม่มีรอยแตก	-	✓	✓
3-10	12.6	73.7	13.7	700°C	ใสไม่มีรอยแตก	✓	-	-

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองการเกาะติดกับพลอยด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้วกลุ่ม 3

สูตรแก้ว	ชื่อพลอย	จำนวนครั้ง		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
3-2	นิล	✓	✓	✓
	แซปไฟร์	✓	✓	หักบางส่วน
3-10	นิล	✓	✓	✓
	แซปไฟร์	✓	✓	✓

*หมายเหตุ ✓ คือ พลอยกับแก้วไม่หลุดออกจากกัน ✗ คือ พลอยกับแก้วหลุดออกจากกัน

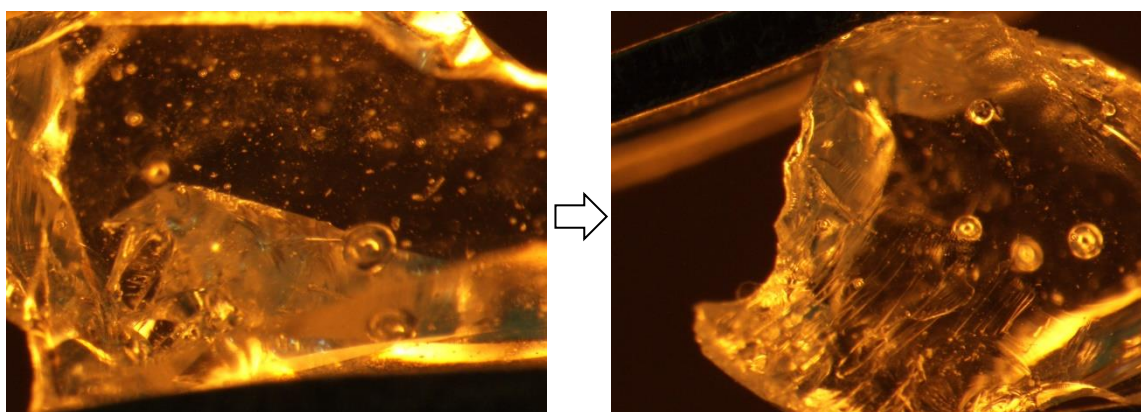
ตารางที่ 4.13 ภาพถ่ายจากผลทดลองการเกาะติดด้วยวิธีการตกกระแทกของแก้ว ค

ชื่อ สูตร แก้ว	รูปตัวอย่างแก้วติดกับนิล		รูปตัวอย่างแก้วติดกับแซปไฟร์	
	ก่อนกระแทก	หลังกระแทก	ก่อนกระแทก	หลังกระแทก
3-2				
3-10				

4.1.4 สูตรแก้วกลุ่ม 4 (ผสมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม)

4.1.4.1 ผลจากการปรับส่วนผสม MgO และ ZnO

จากส่วนผสมแก้ว CaO B_2O_3 SiO_2 สูตร 2-4 ที่พัฒนามาจากแก้วสูตร 1-4 โดยมีการเติม MgO และ ZnO 6% โดยน้ำหนัก เมื่อทำการเพิ่มปริมาณ MgO และ ZnO เป็น 12% โดยน้ำหนัก (แก้วสูตร 4-4-12-0) ผลที่ได้รับคือ แก้วซึ่งเดิมมีความใสยังคงความใสอยู่ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงพบฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พิจารณาได้ว่าแก้วที่เพิ่มปริมาณ MgO และ ZnO เป็น 12% โดยน้ำหนัก มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ลดลง



แก้วสูตร 2-4

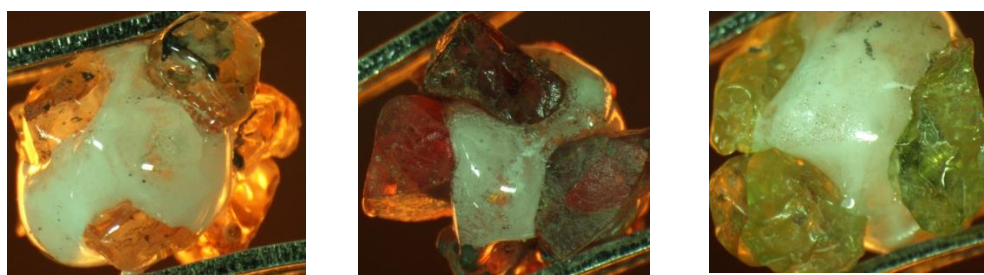
แก้วสูตร 4-4-12-0

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงของแก้วกลุ่ม 4 ที่เติม MgO และ ZnO ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก (ซ้าย) และ 12 % โดยน้ำหนัก (ขวา) (กำลังขยาย 20X)

การศึกษาคัดแก้วกับพลอย พบว่าแก้วสูตรที่มีการเติม MgO และ ZnO ที่ต่างกันที่ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก (แก้วสูตร 2-4) และ 12 % โดยน้ำหนัก (แก้วสูตร 4-4-12-0) หลังจากนำมาให้ความร้อนด้วยทอร์ชและติดกับพลอย 3 ชนิด พบว่า แก้วสูตร 2-4 (เติม MgO และ ZnO 6 % โดยน้ำหนัก) ยังคงมีความใส ในขณะที่แก้วสูตร 4-4-12-0 (เติม MgO และ ZnO 12 % โดยน้ำหนัก) แก้วมีความขุ่นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และแก้วทั้งสองสูตร มีอุณหภูมิในการใช้งาน $800\text{ }^{\circ}\text{C}$



แก้วสูตร 2-4 (เติม MgO และ ZnO 6 %โดยน้ำหนัก)



แก้วสูตร 4-4-12-0 (เติม MgO และ ZnO 12 %โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แสงของแก้ว กลุ่ม 4 ที่ติดกับพลอย 3 ชนิด ซึ่ง มีการเติม MgO และ ZnO ปริมาณ 6 %โดยน้ำหนัก (บน) และ 12 %โดยน้ำหนัก (ล่าง) (กำลังขยาย 8X)

4.1.4.2 ผลจากการเติมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม

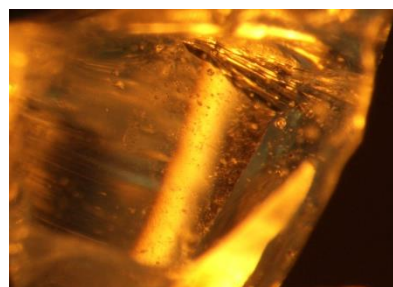
การศึกษาการเติมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรมในสูตรแก้ว 1-4 ซึ่งเดิมมีลักษณะใสปนขุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อมีการเติม แก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ จำนวน 4 ชนิด ในแก้วสูตร 1-4 มีผลให้แก้วมีความขุ่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (สูตรแก้ว 4-4-0-C1 สูตรแก้ว 4-4-0-C2 สูตรแก้ว 4-4-0-C3 และ สูตรแก้ว 4-4-0-C4) แต่เมื่อมีการเติม MgO ZnO 12 %โดยน้ำหนัก ร่วมกับสูตรแก้ว แต่ละสูตร (สูตรแก้ว 4-4-12-C1 สูตรแก้ว 4-4-12-C2 สูตรแก้ว 4-4-12-C3 และ สูตรแก้ว 4-4-12-C4) มีผลให้แก้วมีความใสดังสามารถแสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงดังในรูปที่ 4.5 แสดงความใสภายในเนื้อแก้ว และพบฟองอากาศอยู่โดยทั่วไป และแก้วทั้งสี่สูตร มีอุณหภูมิในการใช้งาน 800 °C

ไม่เติม MgO และ ZnO



แก้วสูตร 4-4-0-C1

MgO และ ZnO 12 %โดยน้ำหนัก



แก้วสูตร 4-4-12-C1



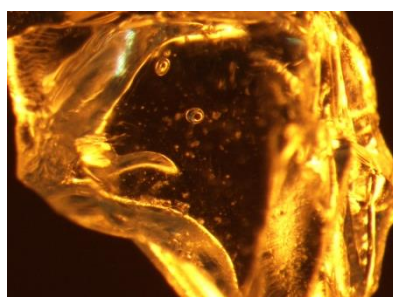
แก้วสูตร 4-4-0-C2



แก้วสูตร 4-4-12-C2



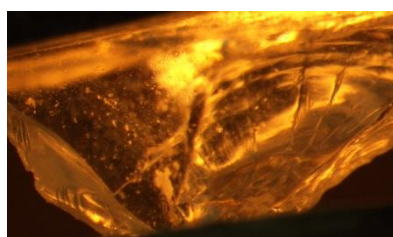
แก้วสูตร 4-4-0-C3



แก้วสูตร 4-4-12-C3



แก้วสูตร 4-4-0-C4



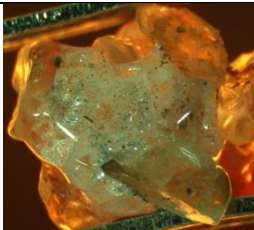
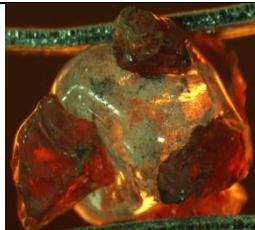
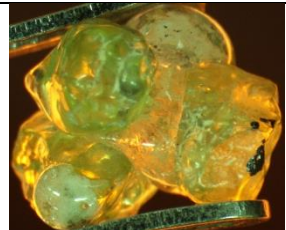
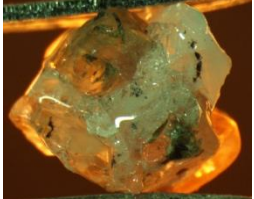



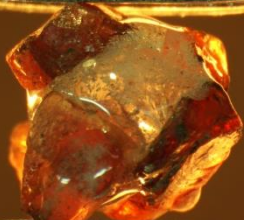


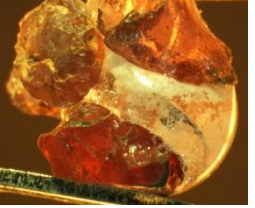

แก้วสูตร 4-4-12-C4



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายของแก้วสูตร 1-4 เมื่อมีการเติมแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม โดย ไม่มีการเติม MgO และ ZnO (ซ้าย) และ เติม MgO และ ZnO 12 %โดยน้ำหนัก (ขวา) (จาก กล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 20X)

เมื่อนำแก้วสูตร 1-4 ที่มีการเติม MgO และ ZnO 12 %โดยน้ำหนัก และผสมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรม 4 ชนิด สูตร ได้แก่ สูตรแก้ว 4-4-12-C1 สูตรแก้ว 4-4-12-C2 สูตรแก้ว 4-4-12-C3 และ สูตรแก้ว 4-4-12-C4 มาให้ความร้อนด้วยทอร์ชและติดกับพลอย 3 ชนิด พบว่า แก้วทั้งหมดยังคงความใสแต่ขุ่นเล็กน้อยหลังจากติดกับพลอย ยกเว้นแก้วสูตร 4-4-12-C2 ที่มีลักษณะขุ่นขาวอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ภาพถ่ายของแก้วที่ผสมแก้วเหลือใช้จากอุตสาหกรรมเมื่อที่ติดกับพลอย 3 ชนิด โดยแก้วมีการเติม MgO และ ZnO 12 %โดยน้ำหนัก (จากกล้องจุลทรรศน์แสงกำลังขยาย 8X)

สูตรแก้ว	เพทาย	โรโดไลต์	เพอริดอท
4-4-12-C1			
4-4-12-C2			
4-4-12-C3			
4-4-12-C4			

การศึกษาการเกาะติดของแก้วกลุ่ม 4 กับพลอย 3 ชนิด ได้แก่ เพทาย โรโดไลต์ และเพอริดอท โดยการปล่อยให้ตกจากที่สูงระยะ 1.50 เมตร พบว่า ผลของการทดสอบสามารถแยกประเภทของผลการเกาะติดทั้ง ได้ 3 แบบ คือ ก.แก้วไม่แตกและไม่หลุดจากพลอย ข.แก้วแตกแต่รอยต่อแก้วกับพลอยไม่หลุด และ ค.แก้วแตกและแก้วกับพลอยหลุดจากกันที่รอยต่อ โดยแก้วแต่ละสูตรมีความสามารถในการติดกับพลอยแต่ละชนิดไม่เท่ากันซึ่งพบผลการทดสอบทั้ง 3 แบบ ยกเว้น แก้วสูตร 4-4-12-C2 ที่มี

ผลการเกาะติดกับพลอยส่วนใหญ่ดีไม่มีการแตกและไม่มีการหลุดจากพลอยที่รอยต่อ ถึงแม้จะพบว่าแก้วมีการแตกแต่รอยต่อของแก้วยังคงติดกับพลอย ดังนั้นแก้วสูตร 4-4-12-C2 จึงถูกนำไปทำเครื่องประดับต่อไป

ตารางที่ 4.15 ผลการทดลองการเกาะติดกับพลอยด้วยวิธีการตกระแทกของแก้วกลุ่ม 4

สูตรแก้ว	การติดกับพลอย		
	เพทาย	โรโดไลท์	เพอริดอท
4-4-12-C1	✓✓	✗✓	✗✗
4-4-12-C2	✓✓	✗✓	✓✓
4-4-12-C3	✗✗	✓✓	✓✓
4-4-12-C4	✗✗	✓✓	✗✓

*หมายเหตุ ✓✓ คือ แก้วไม่แตก แก้วและพลอยไม่หลุดออกจากกัน
 ✗✓ คือ แก้วแตก รอยต่อแก้วและพลอยยังอยู่
 ✗✗ คือ รอยต่อแก้วและพลอยหลุดออกจากกัน


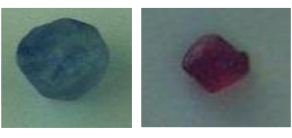






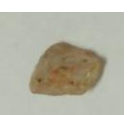

4.1.5 ลักษณะสีพลอยก่อนและหลังได้รับความร้อนด้วยเตาไฟฟ้า

ลักษณะสีพลอยก่อนและหลังจากการให้ความร้อน ทดลองดูสีพลอยโดยการนำแซปไฟร์ นิล เพอริดอท เพทาย และ โรโดไลท์ โดยการให้ความร้อนจากทอร์ช แสดงผลดังในตารางที่ 4.16 พบว่า สีของพลอยมีการเปลี่ยนแปลงจากการสังเกตด้วยตาเปล่า

พลอยเพอริดอท หลังได้รับความร้อนสีจะเปลี่ยนไปจากสีเขียวเป็นสีเขียวที่สว่างขึ้นจากเดิม
 พลอยเพทาย หลังได้รับความร้อนสีจะเปลี่ยนไปจากสีน้ำตาลส้มเป็นสีที่สว่างขึ้นจนเกือบใส
 พลอยโรโดไลท์ หลังได้รับความร้อนสีจะเปลี่ยนจากม่วงแดงเป็นสีเข้มกว่าเดิมและติดดำ

ส่วน นิลและแซปไฟร์ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงสีที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการใช้พลอยเศษที่หลากหลาย จึงไม่คำนึงถึงความคงอยู่ของสี แต่คำนึงถึงความสามารถในการขึ้นรูปร่วมกันของพลอยและแก้วเป็นหลัก

ตารางที่ 4.16 พลอยก่อนและหลังได้รับความร้อนด้วยทอร์ช

เงื่อนไข	นิล	แซปไฟร์	เพอริดอท	เพทาย	โรโดไลท์
ก่อนได้รับความร้อน					
หลังได้รับความร้อน					

4.2 เครื่องประดับ

จากการทดลองผสมแก้วตามสูตรต่างๆ ได้พิจารณาเลือกสูตรแก้วสำหรับทำเครื่องประดับ 2 สูตร ได้แก่ แก้วจากการผสมส่วนผสมทางเคมี 6 ชนิดได้แก่ สูตร 3-1 และ แก้วที่มีส่วนผสมของแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมได้แก่ สูตร 4-4-12-C2 มาทำการขึ้นรูปร่วมกับเศษพลอย 2 ชุด ดังนี้

แก้วสูตร 3-1 มีอุณหภูมิการทำงานเท่ากับ 700°C มีความใส และเมื่อผ่านกระบวนการเกาะติดกับพลอยยังคงมีความใส และสามารถเกาะติดกับพลอยได้ดีเมื่อผ่านทดสอบการตกกระแทก จึงนำมาทำการขึ้นรูปโดยการติดกับเศษพลอยและขึ้นรูปด้วยเปลวไฟจากทอร์ช เป็นตุ้มหูแก้วประดับเศษพลอย แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 เครื่องประดับแก้วร่วมกับพลอยด้วยแก้วสูตร 3-1

แก้วสูตร 4-4-12-C2 มีอุณหภูมิในการทำงาน 800°C มีความใสปนขุ่นเล็กน้อย มีผลการเกาะติดกับพลอยส่วนใหญ่ดีไม่มีการแตกและไม่มีการหลุดจากพลอยที่รอยต่อ จึงนำมาทำการขึ้นรูปโดยการติดกับเศษพลอยและขึ้นรูปด้วยเปลวไฟจากทอร์ช เป็นตุ้มหูแก้วประดับเศษพลอย แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.7 เครื่องประดับแก้วร่วมกับพลอยด้วยแก้วสูตร 4-4-12-C2

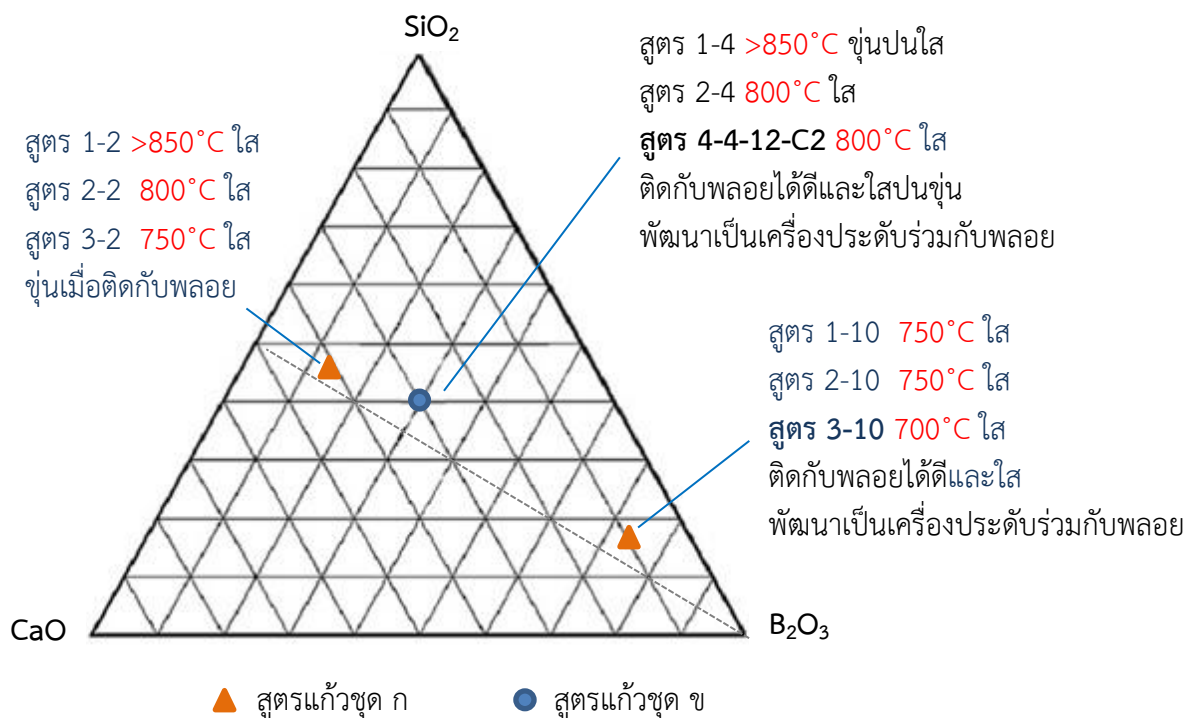
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองปรับปรุงสูตรแก้ว โดยเริ่มจากสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ CaO , B_2O_3 และ SiO_2 เผาด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ ยีนอุณหภูมิ 2 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นตัวในเตา สามารถแบ่งลักษณะของแก้วแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ได้แก่ ชุด ก. แก้วที่มีลักษณะใส ชุด ข. แก้วที่มีลักษณะใสปนขุ่น และ ชุด ค. แก้วที่มีลักษณะขุ่น

สูตรแก้วในชุด ก และ ชุด ข ได้มีการศึกษาต่อโดยการเติมผสมเป็นแก้วกลุ่ม 2 กลุ่ม 3 และ/หรือกลุ่ม 4 จนได้แก้วสูตรที่คัดเลือกไปใช้ในการขึ้นรูปเครื่องประดับร่วมกับเศษพลอย ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ดังนี้

สูตรแก้วในชุด ก. ได้มีการพัฒนาโดยการเติม MgO และ ZnO ทำให้อุณหภูมิในการทำงานของแก้วลดลง และแก้วมีลักษณะที่ใส เมื่อทำการสำรวจแก้วภายหลังการได้รับความร้อนด้วยเทอร์ชพบว่าแก้วทุกสูตรยังคงมีความใสอยู่หลังผ่านการให้ความร้อนในกระบวนการติดพลอย และไม่มีรอยแตก ยกเว้นสูตรแก้วที่เริ่มต้นพัฒนามาจากสูตร 1-5 และเมื่อทดสอบการเกาะติดโดยการตกกระแทก แก้วที่พัฒนามาจากสูตร 1-3 ไม่สามารถติดกับพลอยได้ แก้วที่พัฒนาจากสูตร 1-2 และ 1-10 จึงได้ถูกนำไปพัฒนาต่อโดยการเติม Na_2O เพื่อลดอุณหภูมิในการทำงาน แก้วทั้งสองสูตรสามารถติดกับพลอยได้ดีและทนต่อการตกกระแทก แต่แก้วที่พัฒนามาจากแก้วสูตร 1-2 มีลักษณะขุ่นหลังผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อติดกับพลอย



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงลักษณะของสูตรแก้วชุด ก และชุด ข ที่พัฒนามาทำเครื่องประดับ

การผลการทดลองจึงได้เลือกแก้วในสูตร 3-10 ซึ่งพัฒนามาจากแก้วสูตร 1-10 เนื่องจากมีความใส มีความสามารถในการเกาะติดพลอยได้ดีและทนทานต่อการทดสอบการตกกระแทก และยังคงความใสหลังผ่านกระบวนการได้รับความร้อนจากการติดกับพลอย จึงได้นำมาทำการขึ้นรูปร่วมกับพลอยเป็นเครื่องประดับ อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปแก้วร่วมกับพลอยยังต้องการความชำนาญในงานฝีมือ จึงได้ลักษณะเครื่องประดับที่ไม่ซับซ้อน

สูตรแก้วในชุด ข. ที่ประกอบด้วยส่วนผสมของ CaO_2 B_2O_3 และ SiO_2 มีลักษณะใสปนขุ่น เมื่อมีการพัฒนาโดยการเติม MgO และ ZnO ปริมาณ 6 % โดยน้ำหนัก ทำให้แก้วมีลักษณะของความขุ่นลดลง แต่ยังคงความใสปนขุ่น ยกเว้นแก้วที่พัฒนามาจากแก้วสูตร 1-4 (30 wt.% CaO_2 30 wt.% B_2O_3 และ 40 wt.% SiO_2) ที่มีลักษณะที่ใสทั้งหมด จึงได้ถูกเลือกมาทำการพัฒนาต่อโดยการเติม MgO และ ZnO ปริมาณ 12 % โดยน้ำหนัก และผสมร่วมกับแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรม 4 ชนิด

การเติมแก้วจากอุตสาหกรรมร่วมกับการเติม MgO และ ZnO ปริมาณ 12 % โดยน้ำหนัก ทำให้ได้แก้วที่มีความใสอย่างชัดเจน และเมื่อให้ความร้อนในกระบวนการติดกับพลอยจะเกิดลักษณะใส ยกเว้นแก้วสูตร 4-4-12-C2 ที่มีลักษณะใสปนขุ่น อย่างไรก็ตามเมื่อทำการเกาะติดกับพลอยและผ่านการทดสอบการตกกระแทก พบว่า แก้วสูตร 4-4-12-C2 มีความสามารถในการเกาะติดกับพลอยได้ดี โดยในการแตกเมื่อทำการทดสอบการตกกระแทก รอยต่อระหว่างแก้วกับพลอยยังคงอยู่ จึงได้เลือกนำไปทำเครื่องประดับร่วมกับพลอย และพบว่า แก้วยังขาดความเหนียว และมีลักษณะที่แตกร้าวภายใน จึงต้องมีการพัฒนาต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการทดลองหลังให้ความร้อนแก้วที่ใสเกิดการขุ่นขาวขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากการปัจจัยต่างๆที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นส่วนผสมหรือความร้อนที่ให้ และแก้วยังเปราะแตกร้าวภายในอาจจะยังไม่เหมาะกับการนำมาใช้งาน การนำแก้วมาติดกับพลอยบนพื้นโลหะอาจทำให้มีฝุ่นผงจากโลหะติดอยู่บนเนื้อแก้วเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ดังนั้นข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษารั้งต่อไป โดยต้องมีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมและเติมสารตัวอื่นๆเข้าไปให้แก้วให้มีความเหนียวมากขึ้น และควรมีการหาวัสดุที่ทำให้การขึ้นรูปแก้วร่วมกับพลอยเป็นไปได้ง่ายขึ้นและทำให้ฝุ่นผงติดเนื้อแก้วน้อยลง

บทที่ 6 ผลผลิต (Output)

โครงการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากแก้วอณูมิติต่ำที่ปราศจากตะกั่ว เป็นโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี และในการดำเนินการวิจัยในรายงานฉบับนี้เป็นการวิจัยในปีที่ 1 ซึ่งผลลัพธ์ของการวิจัยได้พัฒนาสูตรแก้วที่อณูมิติต่ำและปราศจากตะกั่ว โดยได้ทดลองการขึ้นรูปร่วมกับอัญมณี เพื่อประโยชน์ในการใช้งานต่อไป โดยในการวิจัยในปีที่ 1 นี้ได้พัฒนาแก้ว 2 สูตร และได้ทดลองขึ้นรูปร่วมกับเศษอัญมณีเพื่อเป็นเครื่องประดับ จำนวน 2 ชิ้น ดังแสดงในรูปที่ 6-1 ได้แก่ แก้วจากการผสมส่วนผสมทางเคมี 6 ชนิดได้แก่ สูตร 3-1 และ แก้วที่มีส่วนผสมของแก้วที่เหลือใช้จากอุตสาหกรรมได้แก่ สูตร 4-4-12-C2



แก้วสูตร 3-1



แก้วสูตร 4-4-12-C2

รูปที่ 6-1 เครื่องประดับแก้วร่วมกับพลอยด้วยแก้วสูตร 3-1 และ แก้วสูตร 4-4-12-C2

อย่างไรก็ตาม แก้วที่พัฒนามานี้ยังขาดความเหนียวและมีรอยร้าวภายใน ยังต้องมีการพัฒนาต่อไปเพื่อให้สามารถใช้งานได้เหมาะสม

บรรณานุกรม (Bibliography)

- Andreola, F., Barbieri, L. & Bondioli, F., 2012. Agricultural waste in the synthesis of coral ceramic pigment. *Dyes and Pigments*, Volume 94, pp. 207 - 211.
- Callister, J. W. D., 2007. *Materials Science Engineering: An Introduction (7th Ed.)*. New York: John Wiley & Sons.
- Gebavi, H., Taccheo, S. & Milan, D., 2013. The enhanced two micron emission in thulium doped tellurite glasses. *Optical Materials*, Volume 35, p. 1792–1796.
- Lim, E., Kim, B., Lee, J. & Kim, J., 2007. Characterization of the low temperature firing BaO-B₂O₃-SiO₂ glass : The effect of BaO content. *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 27, pp. 825 - 829.
- Nanotec, 2556. การผลิตไบโอดีเซลจากเปลือกไข่เหลือทิ้ง. [Online] Available at: <http://www.nanotec.or.th/th/?p=2904> [Accessed 2556].
- Nowak, N. Cardinal, T., Adamietz, F., Dussauze, M., Rodriguez, V. Durivault-Reymond, L., Deneuvilliers, C., Poirie, J-E, 2013. Influence of niobium and titanium introduction on optical and physical properties of silicate glasses. *Materials Research Bulletin*, Volume 48, p. 1376–1380.
- Wang, F. Dai, J, Shi, L., Huang, X., Zhang, C., Li, X., Wang, L., 2012. Investigation of the melting characteristic, forming regularity and thermal behavior in lead-free V₂O₅-B₂O₃-TeO₂ low temperature sealing glass. *Materials Letters*, Volume 67, pp. 196-198.
- Xu, TF, Zhang, X, Dai, S., Nie, Q., Shen, X., Zhang, X., 2007. Effect of SiO₂ content on the thermal stability and spectroscopic properties of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped tellurite borate glasses. *PHYSICA B-CONDENSED MATTER*, 389(2), pp. 242-247.
- น้อยอร่าม, ก., แซ่อึ้ง, น. & สุชีวะกุล, ล., 2555. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตยาสีร้อนที่ปราศจากตะกั่วโดยใช้เปลือกไข่และวัสดุเหลือทิ้งมาเป็นวัตถุดิบ, กรุงเทพมหานคร: โครงการงานวิทยาศาสตร์ ระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- วรรณก้อน, อ., สอนลา, ว. & เฉยเจริญ, ภ., 2012. สูตรเคลือบเซรามิกจากวัสดุเหลือทิ้ง 100%, กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- สถาบันพัฒนาการศึกษานอกระบบภาคตะวันออก, 2549. การหล่อสิ่งประดิษฐ์จากเศษพลอย. [Online] Available at: <http://eastern.nfe.go.th/nfe/8103-02-0023.htm>