



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
จากแก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว

Development of Green Jewelry from
Low-Temperature Lead-Free Glass

ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุ

โครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี (ปีที่ 2)

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้
จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559
มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 103293
สัญญาเลขที่ 158/2559

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
จากแก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว

Development of Green Jewelry from
Low-Temperature Lead-Free Glass

ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุ
คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

โครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี (ปีที่ 2)
ตุลาคม 2558

กิตติกรรมประกาศ
(Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 158/2559

คณะผู้วิจัย

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณสมบัติของแก้วสีเพื่อการขึ้นรูปร่วมกับพอลยคอร์นดัม โดยการผสมพอลยการ์เนต พอลยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้เกิดสีในแก้ว ทำการหลอมแก้วด้วยเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส ศึกษาแก้วหลังการหลอมโดยนำแก้วที่ได้ในแต่ละส่วนผสมไปตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเครื่องยูวี วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ ตรวจวัดปริมาณองค์ประกอบธาตุในแก้วด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ศึกษาคุณสมบัติความอ่อนตัวของแก้วสี เมื่ออบด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600, 650 และ 700 องศาเซลเซียส ทดสอบอุณหภูมิการขึ้นรูปร่วมกับพอลยด้วยเตาอบไฟฟ้าสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแก้วที่ติดกับเศษพอลย และทดสอบการเกาะติดด้วยวิธีการตกกระแทกในระยสูงจากพื้น 1.5 เมตร ผลการทดลอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงสีของแก้วหลังการหลอม แก้วที่เติมพอลยการ์เนต พอลยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ มีสีต่างกัน เนื่องจากธาตุให้สีของพอลยแต่ละชนิดต่างกัน แก้วหลังการหลอมทุกสูตรจะมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของธาตุให้สีที่อยู่ในพอลยที่เติมลงไป คุณสมบัติความอ่อนตัวพบว่า แก้วที่เติมพอลยเพอริดอต และเติมเหล็กออกไซด์ มีความอ่อนตัวมาก ส่วนแก้วที่เติมพอลยการ์เนต ต้องเติมมากถึง 15 เปอร์เซ็นต์ตามน้ำหนัก จึงจะมีความอ่อนตัวใกล้เคียงกับแก้วสูตรอื่นๆ อุณหภูมิการขึ้นรูปร่วมกับพอลย

คอร์นดัมพบว่า แก้วมีอุณหภูมิการทำงานได้ดีที่ 700 องศาเซลเซียส ได้แก่แก้วที่ผสมพอลยเพอริดอต และแก้วที่ผสมเหล็กออกไซด์ ผลการการเกาะติด พบว่าแก้วที่สามารถทนการกระแทกได้ดีคือ แก้วที่เติมพอลยเพอริดอตและแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ การศึกษาครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าแก้วที่ผสมพอลยต่างชนิดกันในอัตราส่วนที่ต่างกันมีผลต่อการขึ้นรูปร่วมกับพอลยคอร์นดัม

ABSTRACT

The study focuses on the properties of colored glass for forming with gemstone by mixing with garnet peridot and iron oxide in different ratios. The glass was melt in furnace at 1,100oC. After melting, color of the glass with different mixtures was measured with UV/Visible Spectrometer. Measurement of elemental composition in the glass was done by X-ray Fluorescence Spectrometer. Softening behavior of the glass was observed after the glass being heated at 600°C, 650°C and 700°C. Forming temperature of the colored glass with corundum by electric oven was also observed. Adhesion of the glass with corundum after heated at 600oC, 650oC and 700oC was investigated by drop test from a height at 1.5 meters. The results showed that color change of the glass after mixing with different mixtures. The glass that contained garnet peridot and iron oxide had different colors, because the color elements were different. The elemental composition of the glass after melting decreased slightly. Softening behavior of the glass with garnet was less than that with peridot and iron oxide. The glass obtained a good working temperature at 700oC. All glass could withstand the impact from drop test except the glass that mixed with garnet. The glass mixed with different gemstones exhibited different effects on forming with corundum.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	li
บทคัดย่อ	iii
Abstract	iv
สารบัญ	v
สารบัญตาราง	vii
สารบัญรูป	ix
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์	2
1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย	2
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล	4
1.7 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย	5
	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ชนิดของแก้ว	6
2.2 คุณสมบัติของแก้ว	9
2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว	10
2.4 แก้วอุณหภูมิต่ำปราศจากตะกั่ว	12
2.5 อัญมณีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการงาน	19
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ	19
3.2 ขั้นตอนการวิจัยส่วนที่ 1 การผสมแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษพลอยสี	25
3.3 ขั้นตอนการวิจัย ส่วนที่ 2 การผสมแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษแก้วสี	29

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย ส่วนที่ 1	33
การผสมแก้วอุณหภูมิตำร่วมกับเศษพลอยสี	
4.1 การหลอมแก้วสี	33
4.2 การตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้วด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer	34
4.3 การตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของแก้วสี	39
4.4 การศึกษาคุณสมบัติของแก้วสี	41
4.5 การทดสอบอุณหภูมิใช้งานของแก้วสี	46
4.6 การทดสอบการเกาะติด	47
บทที่ 5 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย ส่วนที่ 2	50
การผสมแก้วอุณหภูมิตำร่วมกับเศษแก้วสี	
5.1 การหลอมแก้ว CBS	50
5.2 การส่องตำหนิภายในแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	52
5.3 การทดสอบการละลายน้ำโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง	57
5.4 การตรวจสอบอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้วและแก้วสี	58
5.5 การตรวจวัดความแข็งด้วยเครื่อง Vickers Hardness	60
5.6 การตรวจวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/Visible Spectrophotometer	64
5.7 การตรวจวัดองค์ประกอบภายในของแก้วสีด้วยเครื่อง X-ray fluorescence	68
5.8 การทำชิ้นงานเครื่องประดับ	70
บทที่ 6 สรุปผล และผลผลิต	73
6.1 สรุปผลการวิจัย ส่วนที่ 1 การผสมแก้วอุณหภูมิตำร่วมกับเศษพลอยสี	73
6.2 สรุปผลการวิจัย ส่วนที่ 2 การผสมแก้วอุณหภูมิตำร่วมกับเศษแก้วสี	74
6.3 ข้อเสนอแนะ	75
6.4 ผลผลิต (Output)	76
บทสรุปทางการเงิน	77
บรรณานุกรม (Bibliography)	78
ประวัตินักวิจัย	80

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
1.1	แผนการดำเนินงาน	5
2.1	องค์ประกอบและคุณลักษณะของแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรม	8
2.2	คุณลักษณะของทรายแก้วตามมาตรฐานของประเทศอังกฤษสำหรับทำแก้วไม่มีสี	10
2.3	คุณลักษณะของทรายแก้วตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา	10
2.4	ออกไซด์ที่ช่วยให้แก้วเกิดสีและทึบแสง	11
2.5	ประสิทธิภาพการปกปิด (sealing efficiency) ที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	14
3.1	ผลการตรวจวัดค่าดัชนีหักเหของพลอยการ์เนตและพลอยเพอริดอต	25
3.2	ผลการตรวจวัดค่าความถ่วงจำเพาะของพลอยการ์เนตและพลอยเพอริดอต	25
3.3	ผลการตรวจวัดปริมาณธาตุโดยเฉลี่ยในพลอยการ์เนต	26
3.4	ผลการตรวจวัดปริมาณธาตุโดยเฉลี่ยในพลอยเพอริดอต	26
3.5	ส่วนผสมแก้วใสในอัตราส่วนต่างๆ	27
3.6	ส่วนผสมแก้วที่เติมพลอยการ์เนตในอัตราส่วนต่างๆ	27
3.7	ส่วนผสมแก้วที่เติมพลอยเพอริดอตในอัตราส่วนต่างๆ	27
3.8	ส่วนผสมแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ	27
3.9	ส่วนผสมแก้วในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อคิดเทียบส่วนผสมทั้งหมดเป็น 100% โดยน้ำหนัก	28
3.10	ส่วนผสมแก้วในอัตราส่วนต่างๆ	29
4.1	ผลการทดลองหลอมแก้วสี โดยการเติมพลอยและเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ	33
4.2	ผลการตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต พลอยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ	34
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วใส ก่อนและหลังการหลอม	40
4.4	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต ก่อนและหลังการหลอม	40
4.5	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่เติมพลอยเพอริดอต ก่อนและหลังการหลอม	40
4.6	องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ ก่อนและหลังการหลอม	41
4.7	การศึกษาคุณสมบัติด้านความอ่อนตัวของแก้วสีที่ 600°C, 650°C และ 700°C	42
4.8	การศึกษาคุณสมบัติด้านความอ่อนตัวของแก้วสีที่ 600°C, 650°C และ 700°C (ต่อ)	43
4.9	การศึกษาคุณสมบัติด้านความเปราะของแก้วสีที่ 600°C, 650°C และ 700°C	44
4.10	การศึกษาคุณสมบัติด้านความเปราะของแก้วสีที่ 600°C, 650°C และ 700°C (ต่อ)	45
4.11	การทดลองหาอุณหภูมิใช้งานของแก้วสีกับพลอยที่ 600°C, 650°C และ 700°C	46
4.12	การทดสอบการเกาะติดของแก้วสีกับพลอยคอร์รันดัม	48
4.13	การทดสอบการเกาะติดของแก้วสีกับพลอยคอร์รันดัม (ต่อ)	49
5.1	ผลการทดลองการหลอมของแก้วสี	51
5.2	ผลการหลอมแก้วสี (ต่อ)	52

	หน้า
5.3 การส่องดูมลทินภายในแก้ว CBS ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 10X	53
5.4 การส่องดูมลทินภายในแก้ว CBS ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 10X (ต่อ)	54
5.5 การส่องดูมลทินภายในแก้วสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง	55
5.6 การส่องดูมลทินภายในแก้วสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (ต่อ)	56
5.7 ตัวอย่างลักษณะการละลายน้ำ	57
5.8 การทดสอบการแช่แก้วในน้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง	58
5.9 ตัวอย่างลักษณะการขึ้นรูปของแก้วและแก้วสี	58
5.10 ตัวอย่างลักษณะการขึ้นรูปของแก้วและแก้วสี (ต่อ)	59
5.11 การทดลองหาอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้ว CBS	59
5.12 การทดลองหาอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้ว CBS เติมแก้วสีเขียว	59
5.13 การทดลองหาอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้ว CBS เติมแก้วสีชา	60
5.14 ผลการตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้ว CBS	64
5.15 ผลการตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้ว CBS เติมขวดแก้วสีเขียว	65
5.16 ผลการตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้ว CBS เติมขวดแก้วสีชา	67
5.17 องค์ประกอบภายในขวดเบียร์ตราช้าง	68
5.18 องค์ประกอบภายในขวดเบียร์ตราสิงห์	69
5.19 องค์ประกอบภายในของแก้วสีที่ได้จากการเติมขวดสีเขียว	69
5.20 องค์ประกอบภายในของแก้วสีที่ได้จากการเติมขวดสีชา	69
5.21 การเลือกแก้วมาทำเครื่องประดับ	70

สารบัญรูป

รูป		หน้า
1.1	กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของ solder glass และ work piece	3
1.2	ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัส (θ) และปรากฏการณ์การเปียกผิว (wetting)	4
2.1	โครงสร้างของซิลิกา ในลักษณะผลึกและไม่เป็นผลึก	9
2.2	กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของ solder glass และ work piece	13
2.3	ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัส(θ) และปรากฏการณ์การเปียกผิว(wetting)	14
2.4	การ์เนต (Garnet)	15
2.5	เพอริโดท (Peridot)	16
2.6	คอร์ันดัม (Corundum)	17
2.7	การดูดกลืนแสงของ Mn-doped แก้ว	17
2.8	การเปรียบเทียบสเปกตรัม ESR ของแก้วเจือปน Mn(II)	18
3.1	สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง	19
3.2	สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)	20
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการผสมชิ้นงานในการทดลอง	21
3.4	อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการหลอมชิ้นงานในการทดลอง	22
3.5	อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการป้องกันความปลอดภัยในการทดลอง	23
3.6	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	24
3.7	ตัวอย่างพลอยการ์เนต (ก) และพลอยเพอริโดท (ข)	25
3.8	การวัดปริมาณธาตุด้วยเครื่อง XRF พลอยการ์เนต (ก) และพลอยเพอริโดท (ข)	26
3.9	การเตรียมส่วนผสมแก้วก่อนนำเข้าเตาหลอมไฟฟ้า	28
3.10	การเตรียมส่วนผสมแก้ว	30
3.11	การบดส่วนผสมแก้วสี	30
3.12	การผสมแก้วกับแก้วสี	31
3.13	การหลอมส่วนผสมแก้ว	31
3.14	การหลอมส่วนผสมแก้ว	32
3.15	การหลอมแก้วสี	32
4.1	กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วสูตรต่างๆ	34
4.2	กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต ในอัตราส่วนต่างๆ	35
4.3	กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วที่เติมพลอยเพอริโดท ในอัตราส่วนต่างๆ	35
4.4	กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ	36
4.5	กราฟเปรียบเทียบค่า L^* ของแก้วสูตรต่างๆ	36
4.6	กราฟเปรียบเทียบค่า L^* ของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต ในอัตราส่วนต่างๆ	37

	หน้า	
4.7	กราฟเปรียบเทียบค่า L^* ของแก้วที่เติมพลอยเพอริดอต ในอัตราส่วนต่างๆ	37
4.8	กราฟเปรียบเทียบค่า L^* ของแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ	37
4.9	กราฟค่า ΔE ของแก้วสูตรต่างๆ	38
4.10	กราฟค่า ΔE ของแก้วที่เติมพลอยการ์เน็ต ในอัตราส่วนต่างๆ	38
4.11	กราฟค่า ΔE ของแก้วที่เติมพลอยเพอริดอต ในอัตราส่วนต่างๆ	39
4.12	กราฟค่า ΔE ของแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ	39
4.13	ลักษณะการเกาะติดกันของแก้วสีกับพลอยคอร์ันดัม	47
5.1	อัตราส่วนผสมของแก้วCBS	50
5.2	อัตราส่วนผสมของแก้ว CBS (ต่อ)	51
5.3	กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสูตรแก้ว CBS ก่อนเติมสี	61
5.4	กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสูตรแก้ว CBS หลังเติมแก้วสีเขียว	62
5.5	กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสูตรแก้ว CBS หลังเติมแก้วสีชา	63
5.6	กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$	64
5.7	กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$ (ต่อ)	65
5.8	กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS เติมแก้วสีเขียว ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$	66
5.9	กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS เติมแก้วสีชา ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$	67
5.10	กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS เติมแก้วสีชา ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$	68
5.11	การนำแก้วเข้าตัวเรือนเครื่องประดับ	71
5.12	เครื่องประดับที่เสร็จสมบูรณ์	71
5.13	เครื่องประดับจากแก้วสี	72
6.1	เครื่องประดับจากแก้วสี	76

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

อุตสาหกรรมเครื่องประดับของประเทศไทย จัดเป็นสินค้าส่งออกที่สร้างมูลค่าให้กับเศรษฐกิจของประเทศที่สำคัญอันดับ 1 ใน 5 ของสินค้าส่งออก และประเทศไทยจัดเป็นแหล่งอัญมณีที่สำคัญแหล่งหนึ่ง ในจำนวน 5 แหล่งใหญ่ของโลก คือ แอฟริกาใต้ อเมริกาใต้ เมียนมาร์ ศรีลังกา และไทย โดยอัญมณีเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ใช้ประกอบเป็นเครื่องประดับและตกแต่ง และจังหวัดจันทบุรีเป็นตลาดที่มีการค้าขายอัญมณีที่สำคัญของประเทศ รวมทั้งเป็นศูนย์รวมของการเจียรไนอัญมณี

ในการเจียรไนอัญมณีก่อนเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างต่างๆ ตามที่ต้องการ ต้องผ่านกระบวนการในการ ตัด โกลน ก้อนอัญมณีหลายครั้ง ทำให้เกิดเศษอัญมณี ซึ่งมีขนาดเล็กและไม่คุ้มค่าในการนำไปผลิตเป็นเครื่องประดับ ในสมัยก่อนจนถึงปัจจุบัน นิยมนำเศษอัญมณีที่เหลือจากกระบวนการผลิตเครื่องประดับนี้ไปใช้ในลักษณะต่างๆ เช่น ใช้ประกอบพิธีกรรมทางศาสนา เช่น ใส่ที่ก้นหลุมเพื่อฝังลูกนิมิต และใส่กระถางรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาตกแต่งตู้กระจกที่เลี้ยงปลา หรือประดิษฐ์ของใช้ และของที่ระลึก เพื่อเกิดประโยชน์และมูลค่าที่สูงขึ้น เช่น พวงกุญแจ ตุ๊กตา พระพุทธรูปและรูปเคารพ อื่นๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นการขึ้นรูปโดยการหล่อร่วมกับเรซิน (สถาบันพัฒนาการศึกษานอกกระบวนภาคตะวันออก, 2549) ซึ่งมีมูลค่าที่น้อย มีลักษณะของรูปแบบและกระบวนการผลิตที่ดั้งเดิม จึงยังไม่เป็นที่นิยม

จุดเริ่มต้นของแนวคิดในงานวิจัย เป็นไปเพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับเศษอัญมณีที่เหลือจากกระบวนการผลิต โดยกระบวนการทางเลือกใหม่ที่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษอัญมณีและเพื่อนำเสนอกระบวนการขึ้นรูปเครื่องประดับและตกแต่งเพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับผู้ผลิตเครื่องประดับและตกแต่งในอุตสาหกรรมขนาดย่อมจนถึงขนาดใหญ่ และเพื่อมุ่งส่งเสริมการค้าเงินอุตสาหกรรมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้งานเพื่อให้เกิดการลดภาระในการกำจัดทิ้งของวัสดุที่เหลือจากการบริโภคและจากอุตสาหกรรมต่างๆ

ในเบื้องต้น การเลือกใช้แก้วเชื่อม หรือแก้วอุนหมิต้าเพื่อช่วยในการเชื่อมประสานเศษอัญมณีให้สามารถสร้างสรรค์งานเครื่องประดับและตกแต่งได้หลายรูปแบบ แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแก้วเชื่อมหรือแก้วอุนหมิต้ามักมีส่วนผสมของตะกั่วซึ่งมีผลกระทบต่อสุขภาพผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตจนอาจเป็นอันตรายร้ายแรงได้ ในงานวิจัยเรื่องแก้วอุนหมิต้าในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาส่วนผสมที่ปราศจากตะกั่วอย่างแพร่หลาย และมีศักยภาพในการนำมาใช้งานในการขึ้นรูปร่วมกับเศษอัญมณี

โครงการวิจัย “การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากแก้วอุนหมิต้าที่ปราศจากตะกั่ว” โครงการต่อเนื่อง ปีที่ 2 เป็นการพัฒนาแก้วอุนหมิต้าที่ปราศจากตะกั่วจากวัตถุดิบเหลือใช้ ได้แก่ ฟลอยสี และแก้วสี เพื่อเป็นการส่งเสริมกระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หลังจากนั้น ทำการประยุกต์แก้วฯ ที่พัฒนาได้มาขึ้นรูปเครื่องประดับ เพื่อเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเศษอัญมณีที่เหลือ

จากกระบวนการผลิต เป็นการสร้างสรรค์เครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (green jewelry) และเป็นทางเลือกในการสร้างสรรค์งานเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาสูตรแก้วอณูหมิต่ำที่ปราศจากตะกั่วร่วมกับการใช้วัตถุดิบจากวัสดุเหลือใช้
2. เพื่อสร้างสรรค์เครื่องประดับจากแก้วอณูหมิต่ำร่วมกับเศษอัญมณี

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การใช้วัตถุดิบเหลือใช้ ได้แก่ พลอยสี และแก้วสี
2. เตรียมแก้วอณูหมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว ที่มีอณูหมิตำทำงานไม่เกิน 800 °C
3. ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของแก้ว ๆ
4. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับแก้วอณูหมิต่ำๆ ร่วมกับเศษอัญมณี
5. ผลิตงานสร้างสรรค์เครื่องประดับ 1 ชุด
6. เผยแพร่ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยแก่ผู้สนใจ รวมถึงเผยแพร่ความรู้ในรูปแบบงานสร้างสรรค์ที่ได้จากงานวิจัยเผยแพร่แก่ผู้สนใจและผู้เกี่ยวข้องในการผลิตเครื่องประดับ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับและหน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

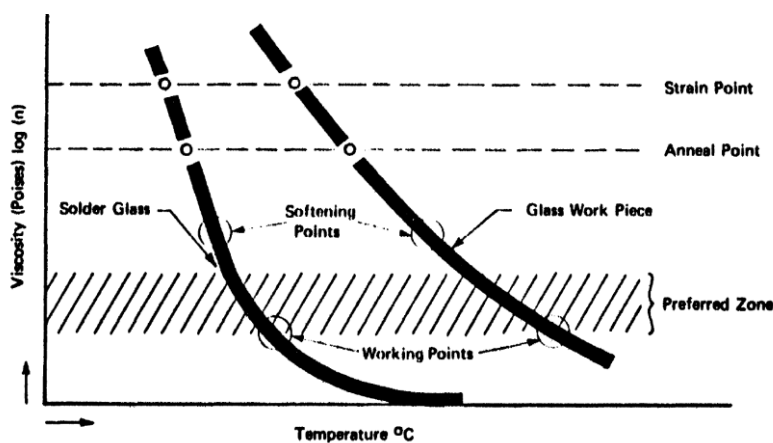
1. ส่งเสริมกระบวนการผลิตเครื่องประดับที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการนำวัสดุเหลือใช้หรือใช้กลับมาใช้ใหม่
2. สร้างทางเลือกใหม่ให้การขึ้นรูปเครื่องประดับ เพื่อส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนของอุตสาหกรรมเครื่องประดับขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่
3. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษอัญมณี
4. ความรู้ที่ได้จากการวิจัยจะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อผู้ผลิตเครื่องประดับในอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ และนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์
5. เผยแพร่ในวารสารทางวิชาการทั้งภายในและภายนอกประเทศ
6. เป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานในการเรียนการสอนของนิสิต และเป็นองค์ความรู้ในการวิจัย หน่วยงานที่จะนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ กลุ่มนักวิจัยองค์ความรู้เรื่องการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผู้ผลิตเครื่องประดับในอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ และเป็นประโยชน์โดยตรงต่อหน่วยงานที่ทำกรวิจัยได้แก่ คณะอัญมณี มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตจันทบุรี

1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

แก้วอณูหมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว มีอณูหมิตำในการทำงานที่ไม่สูงและสามารถนำมาใช้ในการเชื่อมกับวัสดุจึงเรียกว่า แก้วเชื่อม (solder glass) ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถเชื่อมกับเศษอัญ

ชนิดต่างๆ 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 ควรมีการแข็งตัวเร็วคือใช้เวลาในการสร้างการยึดเกาะ (sealing time) ที่ต่ำ

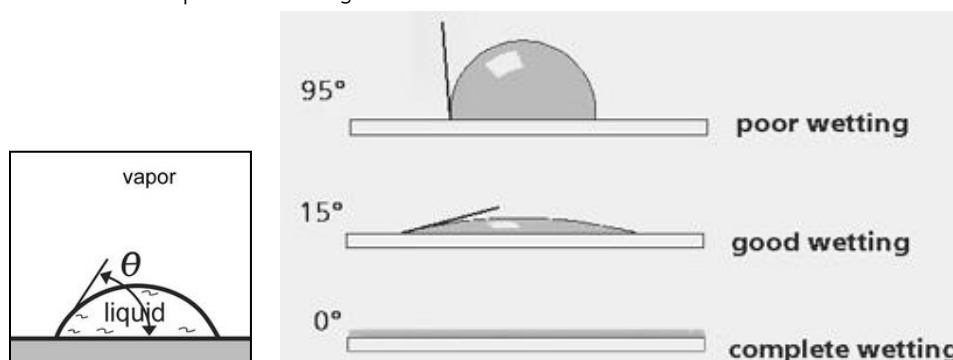


รูปที่ 1.1 กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของ solder glass และ work piece (Frieser, 1975)

เนื่องจากในการทำงานมีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง 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) ในกรณีที่แตกต่างกันของค่า CTE มีมาก จะสามารถแก้ไขได้โดยการเลือก solder glass ที่มีค่า CTE มากกว่าของ work piece

การยึดเกาะ (adhesion) เกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ solder glass สามารถเกิดปรากฏการณ์เปียกผิว (wetting) แก้วเชื่อมจึงสามารถแผ่ตัว (spreading) บนผิวของ work piece ได้ โดยความสามารถในการเปียกผิวขึ้นอยู่กับค่ามุมสัมผัส (contact angle, θ) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 แสดงความสัมพันธ์ของ

มุมสัมผัส (θ) และปรากฏการณ์การเปียกผิว (wetting) ถ้ามีมุมสัมผัสที่น้อย การเปียกผิวจะเกิดได้ดี และทำให้แก้วเชื่อมแผ่นไปบนผิวของ work piece ได้ง่าย (complete wetting) ในขณะที่ถ้ามุมสัมผัสมีค่าสูงมากถึง 90° solder glass จะยังคงรูปของหยดของเหลวและจะเคลื่อนที่ไปบนผิว work piece โดยไม่เกิดการเกาะติด (poor wetting)



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

1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย และสถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1. จัดหา วัสดุ อุปกรณ์
2. เตรียมวัสดุที่เหลือทิ้งหรือนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น เศษพลอย เศษแก้ว
3. การผสมแก้วกับเศษพลอย และวัสดุที่ได้จากการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่
4. ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่ออุณหภูมิในการทำงาน และ ต่อสมบัติเชิงกายภาพ
5. ศึกษากระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับแก้วอุณหภูมิต่ำ ร่วมกับเศษอัญมณี
6. ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุด้วย EDXRF
7. ตรวจสอบสมบัติเชิงกล ด้วยการทดสอบการละลายน้ำ การดูลมทินภายในแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope) วัดค่าความแข็งของแก้วและแก้วสีด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบ Vickers
8. ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีของแก้วและแก้วสีด้วยเครื่อง UV/visible –spectrophotometer
9. ผลิตงานสร้างสรรค์เครื่องประดับ
10. สรุปผล และเผยแพร่ผลงาน

1.7. แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัยเริ่มต้นทำการวิจัยวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2558 ถึงวันที่ 31 สิงหาคม พ.ศ. 2562 แสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

	กิจกรรม	2558-2560			2561					2562			
		ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค. ก.พ.	มี.ค. เม.ย.	พ.ค. มี.ย.	ก.ค. ส.ค.	ก.ย. ต.ค.	พ.ย. ธ.ค.	ม.ค. มี.ค.	เม.ย. มี.ย.	ก.ค. ส.ค.
1.	จัดหา วัสดุดิบ วัสดุและอุปกรณ์	←→											
2.	เตรียมวัสดุดิบที่เหลือทิ้งหรือนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น เศษพลอย เศษแก้ว		←→										
3.	ผสมแก้วกับเศษพลอย และวัสดุดิบที่ได้จากการนำวัสดุกลับมาใช้ใหม่			←→									
4.	ศึกษาอิทธิพลของส่วนผสมทางเคมีต่ออุณหภูมิในการทำงาน			←→									
5.	ศึกษากระบวนการขึ้นรูปที่เหมาะสมกับแก้วอุณหภูมิต่ำ ร่วมกับเศษอัญมณี			←→									
6.	ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี			←→									
7.	ตรวจสอบสมบัติเชิงกล			←→									
8.	ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีของแก้วและแก้วสี						←→						
9.	ผลิตงานสร้างสรรค์เครื่องประดับ						←→						
10.	วิเคราะห์ สรุปผล และ เผยแพร่ความรู้										←→		

หมายเหตุ สาเหตุที่ล่าช้าเนื่องจาก เต้าเผาแก้ว มีปัญหาปิดซ่อมแซม

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชนิดของแก้ว

แก้วจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2527)

1. แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติ คือ เกิดจากการหลอมตัวของทรายหรือทรายแก้ว ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ นอกจากนี้แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติยังเกิดจากการหลอมตัวของซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในลักษณะของหินหรือแร่ เช่น หินเขียวหนุมาน (quartz) ซึ่งมีจุดหลอมสูงกว่าทรายแก้ว หากเกิดการหลอมละลายจะเรียกว่า ซิลิกาหลอม (fused silica)

2. แก้วที่มนุษย์สร้างขึ้น แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามองค์ประกอบทางเคมีและตามลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้

2.1 ประเภทของแก้วที่แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี แบ่งได้เป็น 7 ชนิด คือ

2.1.1 แก้วซิลิกาหลอมเหลว (silica glass หรือ fused silica หรือ vitreous silica) หรือแก้วควอตซ์ (quartz) ได้จากการหลอมเศษแก้ว ทรายแก้วหรือพวกหินควอตซ์ โดยไม่เติมสารประกอบอื่น มีอุณหภูมิการหลอมสูง 1,710 องศาเซลเซียส นิยมใช้ทำเครื่องใช้ในห้องปฏิบัติการ (laboratory) ใช้งานทางด้านไฟฟ้าและใช้งานเกี่ยวกับด้านแสง

2.1.2 แก้วซิลิกาหลอมเหลวร้อยละ 96 (96% silica glass) มีสมบัติคล้ายแก้วประเภทซิลิกาหลอม แต่มีจุดหลอมต่ำกว่า แก้วชนิดนี้อาจเรียกว่า ไวคอร์ (vycor) นิยมใช้ทำเครื่องใช้ในห้องทดลองพวกหลอดแก้ว (tubes) หรือถ้วยแก้ว (rod)

2.1.3 แก้วโซดาไลม์ (soda lime glass) แก้วชนิดนี้นิยมใช้มากที่สุด เป็นแก้วที่ทำมาจากไลม์ (lime) โซดา (soda) และทราย เป็นส่วนผสมหลัก นิยมใช้ทำขวด กระจกหน้าต่าง กระจกแผ่น ถ้วยแก้ว แก้วกันกระสุน (bullet proof glass) แก้วกระจกรถยนต์ เป็นต้น

2.1.4 แก้วเลดซิลิเกต (lead alkali silicate glass) แก้วชนิดนี้ได้จากการแทนแคลเซียมออกไซด์ด้วยตะกั่ว (lead oxide, PbO) นิยมนำไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทงานศิลปะ (art ware) และแก้วเจียรไน ใช้ผลิตอุปกรณ์วิทยุ เรดาร์ (radar) เครื่องหลอดโทรทัศน์ และหลอดวิทยุต่างๆ เป็นต้น เนื่องจากมีความต้านทานทางไฟฟ้าดี

2.1.5 แก้วโบโรซิลิเกต (borosilicate glass) เป็นแก้วที่มีโบรอนไตรออกไซด์ (boron trioxide, B₂O₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือนิยมเรียกว่า แก้วไพเรก (pyrex) ได้แก่ แก้วทนไฟ นิยมใช้ทำภาชนะหุงต้ม (cooking ware) ชนิดที่สัมผัสความร้อนโดยตรง ใช้ทำภาชนะที่ใช้ในห้องทดลอง และทำเลนส์ของกล้องดูดาว

2.1.6 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (alumino silicate glass) แก้วที่มีอะลูมิเนียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 20 อุณหภูมิการหลอมสูงและการขยายตัวต่ำเมื่อได้รับความร้อน จึงเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์ประเภทที่ต้องสัมผัสกับอุณหภูมิสูง (high temperature ware) เช่น ภาชนะหุงต้ม

2.1.7 แก้วสี (color glass) แก้วที่มีสีในเนื้อแก้ว ทำได้โดยผสมสารให้สี ที่เป็นออกไซด์ของโลหะลงไปประมาณร้อยละ 1-4 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสีที่ต้องการ

2.2 ประเภทของแก้วที่แบ่งตามลักษณะการใช้งาน

2.2.1 แก้วที่ใช้ในวงการวิทยาศาสตร์ ได้แก่ หลอดแก้วทดลองต่างๆ (tubes) ปริซึม (prism) และบีกเกอร์ (beaker) เป็นต้น

2.2.2 แก้วที่ใช้ในการให้แสงสว่าง ใช้ทำหลอดไฟที่ให้แสงสว่าง เช่น หลอดฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent) แก้วประเภทนี้ยังใช้ทำเลนส์ของแว่นตา แว่นขยาย กล้องถ่ายรูป กล้องจุลทรรศน์ กล้องส่องทางไกล เป็นต้น

2.2.3 แก้วที่ใช้ในวงการก่อสร้าง เช่น แก้วบุเพดาน (เนื่องจากสมบัติด้านการเป็นฉนวนกันความร้อน) เส้นใยแก้ว (fiber glass) เสื่อกันความร้อนและเสื่อกันไฟ

2.2.4 แก้วสะเทิน (neutral glass) หมายถึงแก้วที่ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดหรือด่าง แก้วพวกนี้ได้แก่ ขวดใส่ยา ขวดใส่น้ำเกลือ เป็นต้น

2.2.5 แก้วกระจกรถยนต์ (safety glass) หรือเรียกว่าแก้วนิรภัย มีสมบัติเด่นคือเมื่อแตกจะไม่มีลักษณะแหลมคม (angular fragment) เพราะ ขณะขึ้นรูปใช้ลมเป่าให้ผิวด้านนอกของแผ่นแก้วเย็นและหดตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการกระทบที่ผิวจึงเกิดการแตกช้าเป็นฝอย

2.2.6 แก้วกันกระสุน (bullet proof glass) เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์ โดยการขึ้นรูปให้เป็นแผ่นบางๆ (sheet) หลายๆ แผ่นแล้วใช้แผ่นพลาสติก (laminare) แทรกใส่ระหว่างชั้นหรือแผ่นแก้วและประกบกันจนกระทั่งได้ความหนาตามความต้องการ แก้วชนิดนี้จะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจนสามารถกันกระสุนปืนทะลุผ่านได้

2.2.7 ใยแก้ว ทำได้โดยการดึงแก้วเป็นเส้นใยแล้วนำมาอัดขึ้นรูป ใยแก้วจะมีความแข็งแรงสูงแต่มีความเบาและอ่อนนุ่ม สามารถโค้งงอและดึงให้เป็นเส้นเล็กได้ถึง 1/300 ของความหนาของเส้นผม ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ สมบัติของใยแก้วคือเก็บเสียงและกันความร้อนได้ดี นิยมนำแผ่นใยแก้วไปต่อเป็นโครงเรือได้ เพราะมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง

2.2.8 แก้วในวงการศิลปะ ได้แก่ แก้วที่มีความไวต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) โดยสามารถถ่ายภาพถ่ายลงไปบนพื้นผิวของแก้วได้ และรวมถึงแก้วสี ตลอดจนเครื่องประดับต่างๆ

2.2.9 แก้วที่เป็นเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ โคมไฟและภาชนะเครื่องแก้วต่าง ๆ เพราะสมบัติของแก้วสามารถดูดความร้อนได้ดี ฉะนั้นหม้อแก้วจึงสามารถดูดและกักเก็บความร้อนไว้ได้นานกว่าหม้อโลหะ

2.2.10 แก้วในงานอิเล็กทรอนิกส์และงานด้านการโทรคมนาคม แก้วประเภทนี้ได้แก่หลอดโทรทัศน์ หลอดสุญญากาศ เป็นต้น (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2527)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและคุณลักษณะของแก้วที่ใช้ในอุตสาหกรรม
(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2527)

ชนิดของแก้ว	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						คุณลักษณะ และ การใช้งาน
	SiO ₂	NaO ₂	CaO ₂	AlO ₂	B ₂ O ₃	อื่นๆ	
แก้วซิลิกา หลอมเหลว	> 99.5	-	-	-	-	-	อุณหภูมิการ หลอมสูง ค่า สัมประสิทธิ์การ ขยายตัวต่ำ
แก้วซิลิกา หลอมเหลว ร้อย ละ 96	96	-	-	-	4	-	ต้านทานการ เปลี่ยน-แปลง อุณหภูมิและการ กัดกร่อนของ สารเคมี ได้ดี ใช้ ทำอุปกรณ์ใน ห้องทดลอง
แก้วโบโรซิลิเกต	81	3.5	-	2.5	13	-	ต้านทานการ เปลี่ยน-แปลง อุณหภูมิและการ กัดกร่อนของ สารเคมี ได้ดี
แก้วโซดาไลม์	74	16	5	1	-	4 MgO	อุณหภูมิการ หลอมต่ำ
แก้วเลดซิลิเกต	54	1	-	-	-	37PbO 8 K ₂ O	ความหนาแน่น สูง ความมันวาว สูง ใช้ทำเลนส์
แก้วอะลูมิโน ซิลิเกต	70	-	-	18	-	4.5TiO ₂ 2.5Li ₂ O	ขึ้นรูปง่าย แข็งแรงและ ทนทานต่อการ เปลี่ยน-แปลง อุณหภูมิตี ใช้ทำ ผลิตภัณฑ์ใช้ใน เตาอบ

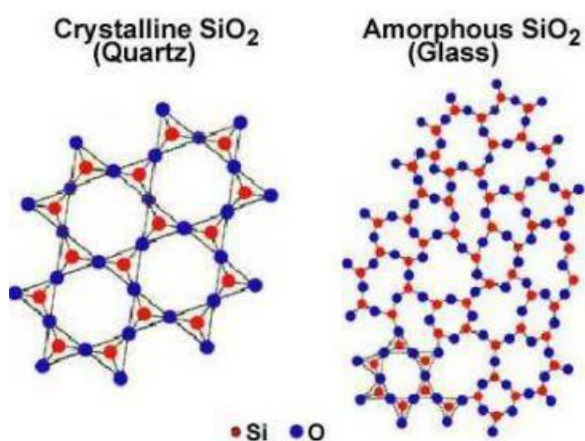
2.2 คุณสมบัติของแก้ว

แก้ว เป็นของผสมที่เกิดจากการรวมตัวของออกไซด์และสารอนินทรีย์ ที่ได้จากการหลอม มีโครงสร้างแบบไร้ระเบียบ หรืออาจมีโครงสร้างบางส่วนที่เป็นระเบียบแบบผลึก แต่มีอยู่น้อยมาก หากทิ้งไว้เป็นระยะเวลาานานมากๆ (อาจเป็นเวลาหลายล้านปี) โครงสร้างภายในของแก้วจะค่อยๆ เปลี่ยนจนมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบแบบผลึกและจะไม่มีสมบัติที่เรียกว่า แก้ว สสารประเภทนี้จะอยู่ในสถานะคล้ายแก้ว (Glassy state)

แก้ว เป็นของเหลวที่ถูกทำให้เย็นตัวลงต่ำกว่าอุณหภูมิที่จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งได้โดยที่แก้วไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นผลึก ของเหลวนี้จึงมีความแข็ง ความหนืดสูงมาก จนโมเลกุลหรืออออนไม่สามารถจัดเรียงตัวแบบผลึกได้ และแก้วมีจุดหลอมเหลวที่ไม่แน่นอน เนื่องจากส่วนประกอบในเนื้อแก้ว

แก้ว เป็นของเหลวที่เกิดการเย็นตัวอย่างยิ่งยวด โดยมีความหนืดสูง มีลักษณะภายนอกคล้ายของแข็ง และสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นผลึกได้ในระยะเวลาที่ยาวนานมากๆ แก้วที่มีโครงสร้างภายในแบบไร้ระเบียบ จะมีพลังงานพันธะไม่เท่ากัน จึงมีจุดหลอมเหลวที่ไม่แน่นอน เมื่อได้รับความร้อนสูงพอจะค่อยๆ อ่อนตัวลงและเปลี่ยนเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นไป ปรากฏการณ์นี้ต่างจากของแข็งที่เป็นผลึกซึ่งการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวเกิดที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งเรียกว่า จุดหลอมเหลว

เมื่อแก้วเหลวถูกทำให้เย็นตัวลง จะมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้นจนโมเลกุลหรืออออน เคลื่อนที่ได้ยาก จึงมีลักษณะที่เป็นของแข็ง ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิกว้างจากกล่าวได้ว่า แก้วมีจุดหลอมเหลวที่ไม่แน่นอน แก้วทุกชนิดสามารถทำให้เกิดผลึกได้ หากควบคุมอัตราเร็วในการลดอุณหภูมิของแก้วเหลวอย่างช้าๆ จนถึงจุดหลอมเหลว ปกติจุดที่มีอัตราการเจริญของผลึกสูงสุด (Maximum crystal growth rate) จะอยู่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย การลดอุณหภูมิลงเร็วจึงทำให้แก้วจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบหรือเกิดผลึก (ประสิทธิ์ ประชาติ, 2549)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซิลิกา ในลักษณะผลึกและไม่เป็นผลึก (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2556)

2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว

การผลิตแก้ว วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วสามารถจำแนกได้เป็น 6 กลุ่มตามสมบัติของวัตถุดิบที่มีผลทำให้แก้วเกิดสมบัติต่างๆ กันดังนี้ (สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, 2534)

1. วัสดุที่ทำให้เกิดเนื้อแก้ว วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว เพื่อทำให้เกิดเนื้อแก้ว ได้แก่ ททรายแก้ว โดยทรายแก้วจะต้องมีปริมาณของเหล็กต่ำและสารประกอบอินทรีย์ปนอยู่เล็กน้อย มิฉะนั้นจะได้เนื้อแก้วที่ไม่ใส และยากต่อการหลอมละลาย ในประเทศไทยมีทรายแก้วที่มีคุณภาพดีและนิยมใช้มาก 2 แหล่งคือ ทรายแก้วจากจังหวัดระยอง และทรายแก้วจากจังหวัดสงขลา โดยทั่วไปควรมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 95 ขนาดของเม็ดทรายแก้วควรใกล้เคียงกันไม่ใหญ่กว่า 20 เมช (0.84 มิลลิเมตร) และไม่ควรถือเล็กกว่า 100 – 200 เมช (ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และคณะ (ม.ป.ป.)

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของทรายแก้วตามมาตรฐานของประเทศอังกฤษสำหรับทำแก้วไม่มีสี (ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และอนุรักษ ปิติรักษ์สกุล, (ม.ป.ป.))

องค์ประกอบทางเคมี	เกรด A (%)	เกรด B (%)	เกรด C (%)
ซิลิกอนไดออกไซด์ ต่ำสุด	99.5	99.5	98.5
เฟอร์ริกออกไซด์ สูงสุด	0.008	0.013	0.03
ไทเทเนียมไดออกไซด์ สูงสุด	0.03	-	-
โครเมียมออกไซด์ สูงสุด	0.0002	0.0002	0.006
อะลูมิเนียมออกไซด์ สูงสุด	-	-	-

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของทรายแก้วตามมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา (ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และอนุรักษ ปิติรักษ์สกุล, (ม.ป.ป.))

ระดับคุณภาพ	SiO ₂ สูงสุด (%)	Al ₂ O ₃ สูงสุด (%)	Fe ₂ O ₃ สูงสุด (%)	CaO , MgO สูงสุด (%)	ประโยชน์
เกรดหนึ่ง	99.8	0.1	0.02	0.1	ทำแว่นตา
เกรดสอง	98.5	0.5	0.035	0.2	แก้วทนไฟ เครื่องถ้วยชาม
เกรดสาม	95.0	4.0	0.035	0.5	แก้วชนิดดี
เกรดสี่	98.5	0.5	0.06	0.5	แผ่นแก้วบาง แท่งแก้วกลม
เกรดห้า	95.0	4.0	0.06	0.5	-
เกรดหก	98.0	0.5	0.3	0.5	กระจก หน้าต่าง

2. ตัวช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมแก้ว

วัตถุดิบ ที่นิยมใช้เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการหลอมแก้ว ได้แก่ โซดาแอส (soda ash หรือ sodium carbonate, Na₂CO₃) สารนี้เมื่อนำไปผสมกับทรายแก้วในอัตราส่วนผสมร้อยละ 10 – 16 จะช่วยลดอุณหภูมิการหลอมลงมาได้ 700 – 800 องศาเซลเซียสช่วยให้ทรายแก้วหลอมตัวง่ายขึ้น นอกจากโซดาแอส ทรายแก้ว และหินปูนแล้ว อาจใส่อัลคาไลเอิร์ธ (alkalis earth) อื่นๆ ได้อีก เช่น แมกนีเซียมและแบเรียม เป็นต้น ตัวลดอุณหภูมิอื่นที่นิยมใช้ได้แก่ หินฟันม้า (feldspar) ตะกั่ว

ออกไซด์และบอริกออกไซด์ที่ใช้ในรูปของสารบอริกแรกซ์ (borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ที่นิยมใช้ทำ แก้วโบโรซิลิเกต ซึ่งหลักเกณฑ์โดยทั่วไปพบว่า แก้วประเภทใดที่มีส่วนผสมของวัตถุดิบ ที่มีสมบัติในการลดอุณหภูมิปริมาณมาก จะใช้อุณหภูมิในการหลอมต่ำ ราคาถูก แต่ถ้าใส่วัตถุดิบเพื่อการลดอุณหภูมิปริมาณน้อยจะได้เนื้อแก้วคุณภาพดีราคาแพงขึ้น แต่การหลอมละลายของเนื้อแก้วจะต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากวัตถุดิบที่ใช้ในการลดอุณหภูมิที่กล่าวข้างต้นแล้ว เศษแก้ว (cullet) เป็นวัตถุดิบที่ทำหน้าที่เป็นตัวลดอุณหภูมิเช่นเดียวกัน และนิยมใช้มาก ซึ่งจะใช้ประมาณร้อยละ 10 – 75 ในอัตราส่วนผสมของวัตถุดิบ นอกจากนี้ยังมีหินโดโลไมท์ (dolomite) ที่ให้แคลเซียมและแมกนีเซียม

3. ตัวฟอกสี

วัตถุดิบ ที่นิยมนำมาใช้เพื่อฟอกสีของแก้วได้แก่ซีลีเนียม และโคบอลต์ ใช้ในปริมาณน้อย เพราะเป็นสารที่มีราคาแพง โดยใช้สำหรับฟอกสีเขียวที่เกิดจากออกไซด์ของเหล็ก ตัวฟอกสีไม่สามารถกำจัดสีได้ จึงต้องควบคุมปริมาณของตัวที่ทำให้เกิดสีควบคู่กัน การใช้ซีลีเนียมมีข้อเสีย คือ หากใช้ปริมาณมากเกินไปจะทำให้ความแวววาวของเนื้อแก้วลดลง และถ้าใช้ตัวไลฟอง (อาร์ซีนิกออกไซด์, arsenic oxide, As_2O_3) มากจะมีผลต่อสมบัติในการฟอกสีของซีลีเนียม

4. ตัวไลฟอง

วัตถุดิบ ที่มีสมบัติช่วยในการไลฟองอากาศในเนื้อแก้วที่หลอมเป็นแก้ว ได้แก่ อาร์ซีนิกออกไซด์ และโซเดียมไนเตรท (sodium nitrate, NaNO_3) การหลอมแก้วแต่ละครั้งจะเกิดฟองแก๊สขึ้นมาก เนื่องจากสารพวกคาร์บอนเนต ในวัตถุดิบที่ทำปฏิกิริยาในขณะการหลอมเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide, CO_2) ซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดฟองในเนื้อแก้ว ฟองนี้สามารถกำจัดได้โดยการเติมสารพวกอาร์ซีนิกออกไซด์หรือโซเดียมไนเตรท

5. ตัวช่วยทำให้เกิดสีและทึบแสง

วัตถุดิบ ที่ใช้เพื่อให้เกิดสีและทึบแสงจะใช้ในการทำแก้วสีและแก้วทึบแสง ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้แสดงไว้ตามตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ออกไซด์ที่ช่วยให้แก้วเกิดสีและทึบแสง (สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, 2534)

สีและสมบัติที่ต้องการ	ออกไซด์ที่ใช้
สีน้ำเงิน	Co_2O_3
สีฟ้า	CuSO_4
สีเหลือง	CdSF หรือ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C}$
สีเขียว	$\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ หรือ Cr_2O_3
สีชา	$\text{C} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{S}$
สีม่วง	NiO หรือ MnO
สีเหลืองเขียว	U
สีแดง	$\text{SeO}_2 + \text{CdSF}$ หรือ $\text{SeO}_2 + \text{C}, \text{Au}$
สีดำ	MnO ใช้ปริมาณมาก
ทึบแสง	Fluorite (F) และ Phosphate (P)

6. ตัวควบคุมความหนืดหรือควบคุมการไหลตัวของแก้ว

วัตถุดิบ ที่นิยมใช้เพื่อควบคุมการไหลตัวของน้ำแก้วได้แก่ อะลูมินาและหินฟีนมาทั้งชนิดโซดา (soda feldspar) และชนิดโพแทส (potash feldspar) ที่มีสมบัติช่วยลดอุณหภูมิการหลอม (สุรศักดิ์ โกสิยพันธ์, 2534)

การเกิดสีของแก้ว สามารถอธิบายได้ 2 ลักษณะดังนี้

1. สีเกิดจากการดูดกลืนแสงของสารที่ทำให้เกิดสี (Coloring agent) ที่อยู่ในเนื้อแก้ว การดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นใดช่วงคลื่นหนึ่งของแก้วขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีสารที่ทำให้เกิดสี ซึ่งเป็นออกไซด์ของโลหะทรานซิชันแถวแรก เช่น Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni และ Cu สีของออกไซด์ของโลหะเหล่านี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

การเกิดสีเนื่องจากสิ่งแวดล้อมทางเคมีของโครงสร้างของเนื้อแก้ว เช่น NiO ในแก้วโซเดียม-ตะกั่วจะให้สีน้ำตาล แต่ในแก้วโปแตสเซียม-ตะกั่วจะให้สีม่วงแดง (Reddish-purple)

การเกิดสีเนื่องจากออกซิเดชันสเตรตของโลหะอ็อกไซด์ เช่น ออกไซด์ของโครเมียมจะมีสีต่างๆ กัน จากสีเขียวถึงสีส้มเมื่อ Cr มีออกซิเดชันสเตต +3 ถึง +6 การที่โลหะจะมีออกซิเดชันสเตตเท่าใดขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของออกไซด์เบส (Cr_2O_3) ต่อออกไซด์กรดในเนื้อแก้วและขึ้นอยู่กับธรรมชาติของเนื้อแก้วว่าจะมีฤทธิ์เป็นกรดหรือเบส

2. สีเกิดจากอนุภาคคอลลอยด์ที่ตกค้างอยู่ในเนื้อแก้ว

แก้วที่ไม่มีสี เมื่อผ่านขั้นตอนการทางความร้อนอาจทำให้เกิดสีขึ้นได้ เช่น คอลลอยด์ของทองคำ ทำให้แก้วมีสีแดงทับทิม เรียกว่า Gold ruby glass (ประสิทธิ์ ประชาติ, 2549)

2.4 แก้วอุณหภูมิต่ำปราศจากตะกั่ว

ด้วยความตื่นตัวในเรื่องของการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนากระบวนการผลิตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมุ่งเน้นการพัฒนาแก้วที่ปราศจากตะกั่ว แต่ยังคงรักษาสมบัติที่ดีที่เกิดจากตะกั่ว เช่น ค่าดัชนีการหักเหของแสงที่สูง (refractive index) และตะกั่วยังช่วยลดอุณหภูมิในการหลอมเหลวของแก้วทำให้ทำงานได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

การพัฒนาแก้วปราศจากตะกั่วทำโดยการเติมสารประกอบออกไซด์ของธาตุทรานซิชัน เช่น Ta_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 หรือ Nb_2O_5 จากการศึกษาผลของการเติมธาตุ TiO_2 หรือ Nb_2O_5 ในแก้วกลุ่ม silicate ที่มีส่วนผสมของ $BaO-SiO_2-NaO$ พบว่า การเติมธาตุ TiO_2 และ Nb_2O_5 ช่วยทำให้ค่า refractive index (RI) และ ความแข็งเพิ่มขึ้น โดยมีค่า RI ประมาณ 1.89-2.00 เนื่องจากการสร้างโครงสร้างตาข่ายของแก้วที่มีความหนาแน่นมากขึ้นด้วยการเชื่อมโยงของ TiO_6 และ NbO_6 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 โดยจากการศึกษาเปรียบเทียบกับแก้ว 2 ส่วนผสม ได้แก่ ส่วนผสมที่มีตะกั่ว ($TeO_2-ZnO-PbO-Nb_2O_5$) และที่ไม่มีตะกั่ว (TeO_2-

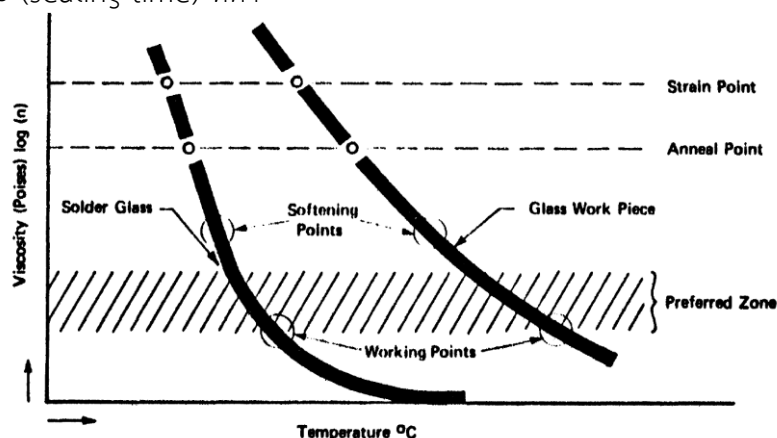
ZnO–Na₂O) ที่มีอุณหภูมิในการทำงาน (working point) ประมาณ 370 - 380 °C พบว่าในกลุ่มที่ไม่มีตะกั่ว มีค่า RI ประมาณ 2.0 ซึ่งสูงใกล้เคียงกับกลุ่มที่มีตะกั่วที่มีค่าประมาณ 2.1 นอกจากนี้กลุ่มที่ไม่มีตะกัวยังมีช่วงของอุณหภูมิในการทำงานก่อนที่แก้วจะเกิดการตกผลึกที่กว้างกว่าเกือบ 100 °C มีผลให้แก้วมีความเสถียรต่อความร้อน (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 แก้วในกลุ่มนี้มีอุณหภูมิหลอมเหลวที่ต่ำโดยมีอุณหภูมิของ sealing temperature ที่ 335 oC และมีค่า CTE ที่ $106 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ซึ่งจัดเป็นค่าที่ต่ำ ซึ่งมีศักยภาพในการนำมาใช้ในงานต่อไป (Wang, et al., 2012)

แก้วอุณหภูมิต่ำที่ปราศจากตะกั่ว มีอุณหภูมิในการทำงานที่ไม่สูงและสามารถนำมาใช้ในการเชื่อมกับวัสดุจึงเรียกว่า 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 2.2 แสดงช่วงที่เหมาะสมในการทำงานคือ preferred zone นอกจากนี้ solder glass ควรมีการแข็งตัวเร็วคือใช้เวลาในการสร้างการยึดเกาะ (sealing time) ที่ต่ำ



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของ solder glass และ work piece (Frieser, 1975)

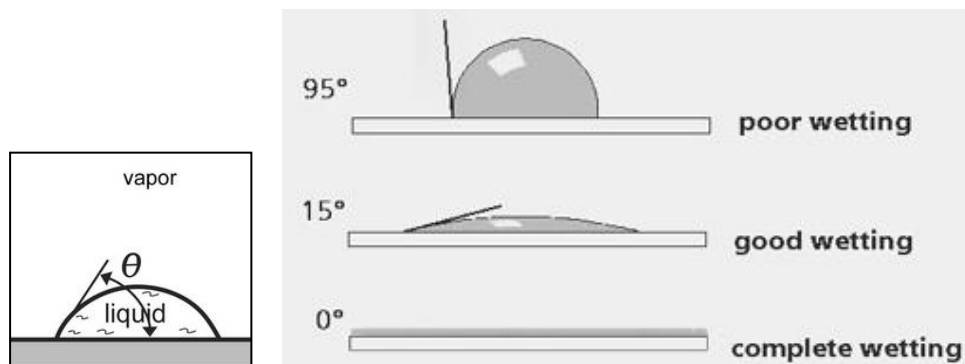
เนื่องจากในการทำงานมีอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อขึ้นงานมีการเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ประสิทธิภาพการยึดเกาะของ solder glass จะเป็นที่ยอมรับได้ ถ้าความแตกต่าง

ของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (coefficient of thermal expansion, CTE) อยู่ระหว่าง $1-6 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ทั้งนี้ ค่าความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนกับประสิทธิภาพการปกปิด)sealing efficiency (แสดงดังตารางที่ 2.5 ในกรณีที่แตกต่างของค่า CTE มีมาก จะสามารถแก้ไขได้โดยการเลือก solder glass ที่มีค่า CTE มากกว่าของ work piece

ตารางที่ 2.5 ประสิทธิภาพการปกปิด)sealing efficiency (ที่สัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion , CTE) (Frieser, 1975)

ความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($\times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	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 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของมุมสัมผัส) θ และปรากฏการณ์การเปียกผิว ((wetting) ถ้ามีมุมสัมผัสที่น้อย การเปียกผิวจะเกิดได้ดีและทำให้แก้วเชื่อมแผ่ไปบนผิวของ work piece ได้ง่าย)complete wetting ในขณะที่ถ้ามุมสัมผัสมีค่าสูงมากถึง (90°) solder glass จะยังคงรูปของหยดของเหลว และจะเคลื่อนที่ไปบนผิว work piece โดยไม่เกิดการเกาะติด (poor wetting)



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของมุมสัมผัส(θ) และปรากฏการณ์การเปียกผิว(wetting) (Kruss, 2012)

2.5 อัญมณีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย

2.5.1 การ์เนต (Garnet)

การ์เนต เป็นกลุ่มแรกที่มีโครงสร้างผลึกเหมือนกัน มีสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ คล้ายคลึงกัน พลอยตระกูลนี้มีโครงสร้างทางเคมีเป็นซิลิเกต สูตรเคมีคือ $MM'(SiO_4)_3$ ในที่นี้ M อาจเป็นธาตุ Ca, Mg, Mn หรือ Fe^{2+} และ M' อาจเป็น Al, Cr หรือ Fe^{3+} บางครั้ง Ti อาจแทนที่ Si บางส่วน อัญมณีในตระกูลการ์เนตได้แก่: อัลมันมันดิน (Almandine) แอนดราไดท (Andradite) กรอสซูลาร์ (Grossular) ไพโรป (Pyrope) สเปสซาทีน (Spessatine) ยูวาโรไวท (Uvarovite) ซึ่งในการทดลองจะใช้เป็น ไพโรป และอัลมันมันดิน (การ์เนต, 2017, ออนไลน์)

คุณสมบัติ	ไพโรป (Pyrope)	อัลมันมันดิน (Almandine)
รูปผลึก	ระบบ Isometric	ระบบ Isometric
สูตรเคมี	$Mg_3Al_2Si_3O_{12}$	$Fe_3Al_2Si_3O_{12}$
ความถ่วงจำเพาะ	3.5 - 3.8	4.05
ดัชนีหักเห	1.705 - 1.749	1.790
ความแข็ง	7 - 7.5	7 - 7.5
จุดหลอมเหลว	1,300°C	1,315°C



ก. ไพโรป (Pyrope)

ข. อัลแมนดิน (Almandine)

รูปที่ 2.4 การ์เนต (Garnet) (John Betts, 2017)

2.5.2 เพอริโดท (Peridot)

เพอริโดท (Peridot) หรือ “โอลิวีน (Olivine)” เป็นคำที่มาจากภาษาฝรั่งเศส ซึ่งแปลว่า “สีเขียวมะกอก” มีหลายสี เช่น สีเขียวอมเหลือง, เหลืองอมเขียว และเขียวน้ำตาล แหล่งที่พบมากคือ พม่า, สหรัฐอเมริกา, ออสเตรเลีย, รัสเซีย, บราซิล และนอร์เวย์

องค์ประกอบทางเคมี $(Mg, Fe)_2SiO_4$ มี MgO : 42.06%, FeO : 18.75%, SiO_2 : 39.9% ธาตุแมกนีเซียมและเหล็กมีคุณสมบัติในการแทนที่กันได้โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลง ถ้าแมกนีเซียมไปแทนที่เหล็กจะได้สูตรเป็น Mg_2SiO_4 เรียกว่า ฟอรัสเตอไรต์ (forsterite) และถ้าเหล็กไปแทนที่แมกนีเซียมจะได้สูตรทางเคมีเป็น Fe_2SiO_4 เรียกว่า ฟายาลไลต์ (fayalite) โดยปกติแล้ว

โอลิวีนจะมีธาตุแมกนีเซียมมากกว่าเหล็ก เนื่องจาก ฟายาไลต์ (fayalite) เป็นโอลิวีนที่ประกอบไปด้วยเหล็ก ทำให้ดัชนีหักเหมีค่าสูง และมีสีเข้มมากกว่า ฟออสเตอไรต์ (forsterite) (แร่โอลิวีน, 2017, ออนไลน์)

คุณสมบัติ	
รูปผลึก	Orthorhombic
สูตรเคมี	(Mg, Fe) ₂ (SiO ₄)
ความถ่วงจำเพาะ	3.27 – 4.37
ดัชนีหักเห	n α = 1.630–1.650, n β = 1.650–1.670, n γ = 1.670–1.690
ความแข็ง	6.5 – 7
จุดหลอมเหลว	1,900°C



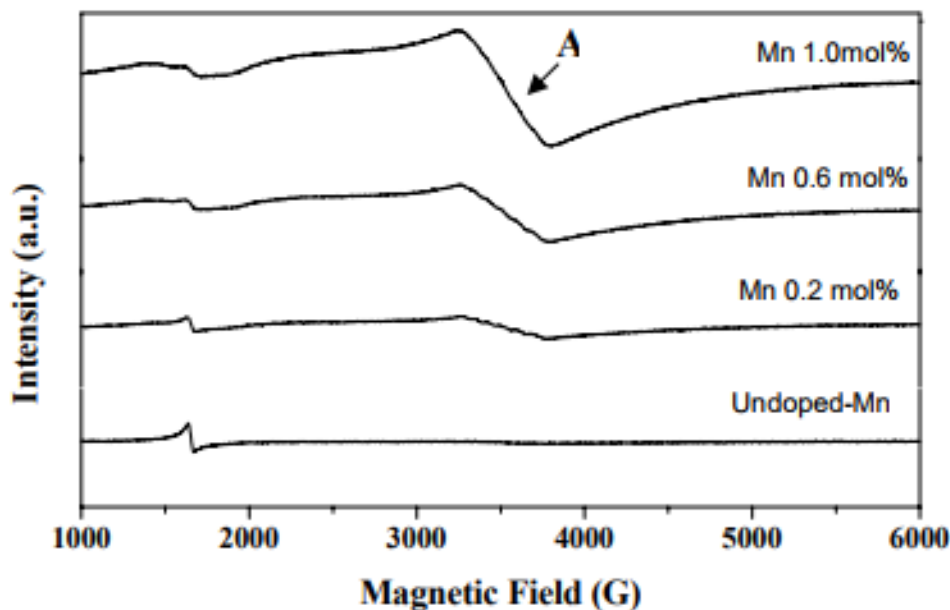
รูปที่ 2.5 เพอริโดท (Peridot) (แร่เพอริโดท, 2011, ออนไลน์)

2.5.3 คอรัันดัม (Corundum)

คอรัันดัม (Corundum) เป็นอัญมณีที่แบ่งเป็น 2 ชนิดตาม สี คือ 1.ทับทิม (Ruby Variety) เป็นคอรัันดัมสีแดง 2.แซฟไฟร์ (Sapphire) มีหลายสีเช่น สีน้ำเงิน เหลือง เขียว ม่วง ส้ม ชมพู มีการปรับปรุงคุณภาพ เช่น การเผา การฉายรังสี แหล่งที่พบ เมียนมาร์ ไทย กัมพูชา ศรีลังกา เวียดนาม มาดากัสการ์ ออสเตรเลีย อินเดีย แทนซาเนีย (ปัญจวรรณ อนุสุทธิพิทักษ์, 2549)

คุณสมบัติ

รูปผลึก	Rhombohedral ในระบบ Hexagonal
สูตรเคมี	Al ₂ O ₃
ความถ่วงจำเพาะ	4.00
ดัชนีหักเห	1.762 – 1.770
ความแข็ง	9
จุดหลอมเหลว	2044°C



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบสเปกตรัม ESR ของแก้วเจือปน Mn(II) (จิตรรา เกตุแก้ว, 2551)

ผลของสเปกตรัม ESR ไม่มีสัญญาณ ESR เกิดระดับเสียงรบกวนในแก้วที่ไม่มีการเจือจาง และสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นไมโครเวฟของแก้วทุกชนิดที่เจือด้วย Mn มีการตอบสนองที่คล้ายกันดังรูปที่ 2.6 ขนาดของแถบ ESR ทั้งหมดเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของ Mn ที่เจือในแก้ว เนื่องจากความเข้มข้น Mn^{2+} เพิ่มขึ้น ความลาดเอียงเส้น A จะเพิ่มขึ้นตาม

2.6.2 Preparation and properties of CaO-SiO₂-B₂O₃ glass-ceramic at low temperature

Haibin Shao และคณะ (2552) ศึกษาแก้ว CaO-SiO₂-B₂O₃ (CBS) โดยทำให้เป็นแก้วอุณหภูมิต่ำ โดยมี CaCO₃, SiO₂, H₃BO₃, MgO และ ZnO เป็นวัตถุดิบ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของแก้ว CBS จากการศึกษาอิทธิพลของ B₂O₃ และ Na₂O ที่มีผลต่ออุณหภูมิหลอมเหลว Tm ของ CBS การวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ระหว่าง CBS กับตัวอย่างที่ถูกเผาผลึกจากแก้ว CBS ในตัวอย่างที่เผาผลึกแก้วพบเฟสแก้วจำนวนมาก และเฟสผลึกขนาดเล็กๆ ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่า การหลอมเหลวของแก้ว CBS สามารถลดอุณหภูมิลงได้จาก 1450°C เป็น 1100°C อุณหภูมิการเผาแก้ว-เซรามิกซ์นี้ลดลง 100°C อยู่ที่อุณหภูมิ 685°C แก้วเซรามิกซ์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนได้ดีเยี่ยม

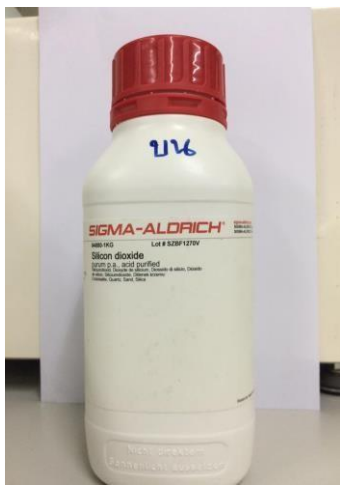
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือ

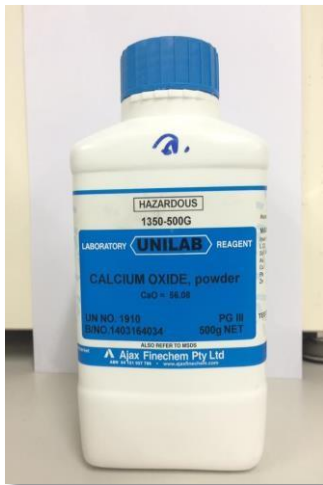
3.1.1 วัสดุ

วัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1 – 3.2 ตามหมายเลขดังนี้

1. ผงสารเคมี Silicon dioxide (SiO_2)
2. ผงสารเคมี Calcium oxide (CaO)
3. ผงสารเคมี Boron oxide (B_2O_3)
4. ผงสารเคมี Zinc oxide (ZnO)
5. ผงสารเคมี Magnesium oxide (MgO)
6. ผงสารเคมี Sodium orthophosphate hydrate ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)
7. เศษพลอยแซฟไฟร์ (Sapphire)
8. เศษพลอยการ์เนต (Garnet)
9. เศษพลอยเพอริโดต (Peridot)
10. เหล็กออกไซด์ (Iron oxide)
11. ขวดแก้วสีชา และสีเขียว



ผง SiO_2



ผง CaO



ผง B_2O_3

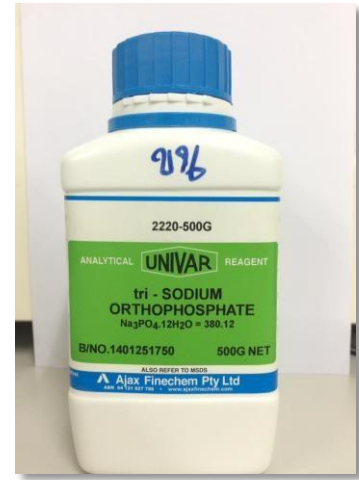
รูปที่ 3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง



ผง ZnO



ผง MgO



ผง $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$



พลอยแซฟไฟร์



พลอยการ์เน็ต



พลอยเพอริดอต



ขวดแก้วสีชา



ขวดแก้วสีเขียว

รูปที่ 3.2 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

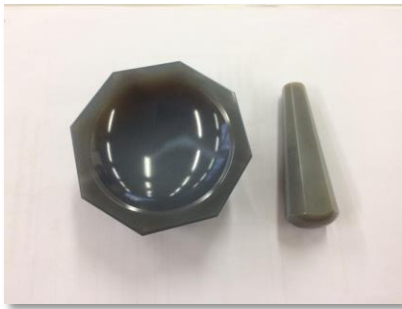
3.1.2 อุปกรณ์

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองสามารถจำแนกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

3.1.2.1 อุปกรณ์การผสมชิ้นงานแก้ว

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการผสมชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.3 ตามหมายเลขดังนี้

1. ครกอาร์เกต ใช้สำหรับบดเศษพลอย
2. ถ้วยบดสาร ใช้สำหรับบดสารเคมีให้เข้ากัน
3. ช้อนตักสาร ใช้สำหรับตักสารเคมี
4. เบ้าครุซีเปิล ใช้สำหรับบรรจุส่วนผสมต่างๆ ใส่เตาไฟฟ้า
5. เครื่องชั่งดิจิตอล ใช้สำหรับชั่งตวงปริมาณสารเคมีและเศษพลอย



1



2



3



4



5

รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการผสมชิ้นงานในการทดลอง

3.1.2.2 อุปกรณ์สำหรับให้ความร้อน

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการหลอม แสดงดังรูปที่ 3.4 ตามหมายเลขดังนี้

1. เตาหลอมไฟฟ้า ใช้สำหรับการหลอมแก้วที่อุณหภูมิ 1100°C
2. เตาอบไฟฟ้า ยี่ห้อ Rhino Therm Rojana รุ่น PFY-700



1



2

รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการหลอมชิ้นงานในการทดลอง

3.1.2.3 อุปกรณ์สำหรับความปลอดภัย

อุปกรณ์สำหรับความปลอดภัย แสดงดังรูปที่ 3.5 ตามหมายเลขดังนี้

1. หมวกกันความร้อน ใช้กันความร้อนบริเวณผิวหนัง
2. หน้ากากกันสารเคมี ใช้กันผงสารเคมี
3. ถุงมือกันความร้อน ใช้สวมใส่เพื่อกันความร้อน
4. เหล็กหนีบ ใช้คีบเข้าครุชชีเบลออกจากเตาไฟฟ้า
5. แผ่นหินทนไฟ ใช้รองกันเข้าครุชชีเบลในเตาไฟฟ้า
6. ทวิสเซอร์ ใช้คีบพลอยกับแก้วขณะทำการขึ้นรูป



1



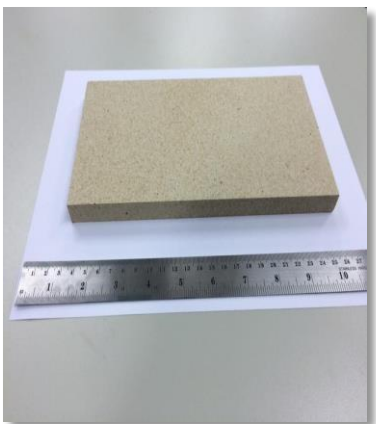
2



3



4



5



6

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการป้องกันความปลอดภัยในการทดลอง

3.1.3 เครื่องมือ

เครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.6 ดังนี้

1. เครื่องชั่งหาความถ่วงจำเพาะ ใช้หาความถ่วงจำเพาะของพลอย
2. เครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ ใช้หาค่าดัชนีหักเหของพลอย
3. กล้องจุลทรรศน์แสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น SXZ7 ใช้สำหรับดูตำหนิภายในเนื้อแก้วหลังหลอม
4. เครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบ Vickers ยี่ห้อ Eseway รุ่น EW-105 Series ใช้สำหรับวัดค่าความแข็งแก้วและแก้วสี
5. เครื่อง UV/Visible Spectrophotometer ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น LAMBDA950 ใช้สำหรับตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้วและแก้วสี
6. เครื่อง X-ray fluorescence ยี่ห้อ Fischer รุ่น XAN250 ใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของแก้วสี



1



2



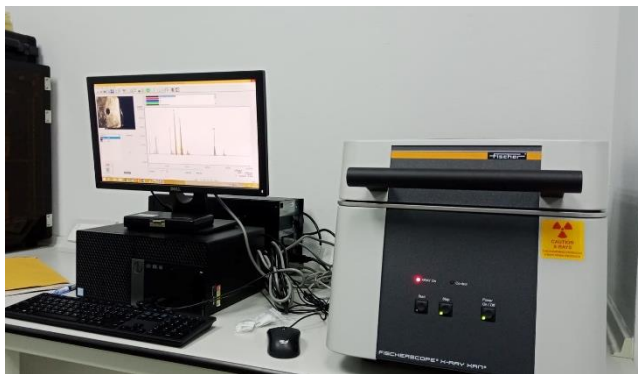
3



4



5



6

รูปที่ 3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2 ขั้นตอนการวิจัยส่วนที่ 1 การผสมแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษพลอยสี

3.2.1 การวิเคราะห์พลอยด้วยเครื่องมือพื้นฐาน

1. สุ่มตัวอย่างพลอยการ์เนตและพลอยเพอริดอต อย่างละ 5 เม็ด เพื่อทำการตรวจวัดค่า ดัชนีหักเห และค่าความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2
2. ทำการตรวจวัดปริมาณธาตุโดยเฉลี่ยในพลอยตัวอย่างด้วยเครื่อง XRF ที่เป็นตัวแทน ของพลอยการ์เนตและพลอยเพอริดอต ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4



(ก) พลอยการ์เนต

(ข) พลอยเพอริดอต

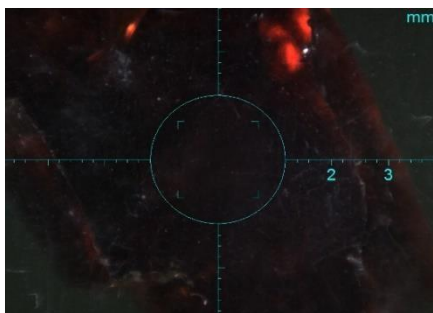
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างพลอยการ์เนต (ก) และพลอยเพอริดอต (ข)

ตารางที่ 3.1 ผลการตรวจวัดค่าดัชนีหักเหของพลอยการ์เนตและพลอยเพอริดอต

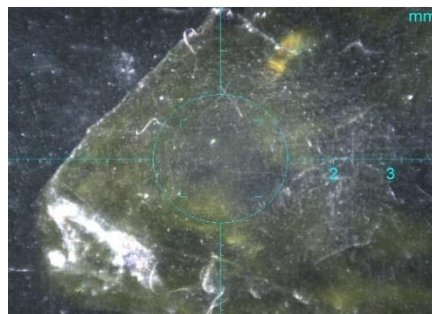
เม็ดที่	ค่าดัชนีหักเห	
	Garnet	Peridot
1	1.752	1.655 – 1.669
2	1.752	1.652 – 1.686
3	1.752	1.653 – 1.683
4	1.752	1.650 – 1.672
5	1.752	1.665 – 1.675

ตารางที่ 3.2 ผลการตรวจวัดค่าความถ่วงจำเพาะของพลอยการ์เนตและพลอยเพอริดอต

เม็ดที่	ค่าความถ่วงจำเพาะ	
	Garnet	Peridot
1	3.75	3.32
2	3.78	3.33
3	3.81	3.32
4	3.73	3.33
5	3.81	3.39



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 การวัดปริมาณธาตุด้วยเครื่อง XRF ฟลอยการ์เนต (ก) และฟลอยเพอริดอต (ข)

ตารางที่ 3.3 ผลการตรวจวัดปริมาณธาตุโดยเฉลี่ยในฟลอยการ์เนต

ปริมาณธาตุ (wt%)				
Fe	Mg	Mn	Al	Si
11.56	15.58	0.35	42.02	30.49

ตารางที่ 3.4 ผลการตรวจวัดปริมาณธาตุโดยเฉลี่ยในฟลอยเพอริดอต

ปริมาณธาตุ (wt%)		
Fe	Mg	Si
20.04	9.34	70.64

3.2.2 การเตรียมสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบแก้ว

1. เตรียมสารเคมี จากการทดลองแบ่งสูตรแก้วเป็น 3 ส่วน โดยสูตรแก้วประกอบด้วย SiO_2 , CaO และ B_2O_3 ในอัตราส่วน A B C (wt%) โดย $A+B+C = 100\%$ การเติมอัตราส่วนผสมฟลอย 2 ชนิดและเหล็กออกไซด์ คิดเทียบจากสูตรแก้ว $A+B+C$ เป็น 100% ซึ่งส่วนที่ 1 เป็นการสูตรแก้วใสแสดงอัตราส่วนผสมต่างๆ ดังตารางที่ 3.5 ส่วนที่ 2 เป็นการผสมฟลอยการ์เนตใน อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.6 ส่วนที่ 3 เป็นการผสมฟลอยเพอริดอตในอัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.7 และส่วนที่ 4 เป็นการผสมเหล็กออกไซด์อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 3.8 ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับน้ำหนักส่วนผสม $A+B+C$ เป็น 100 กรัม และเมื่อคิดเทียบส่วนผสมทั้งหมดรวมกันเป็น % โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 3.9

หมายเหตุ A B และ C แทน อัตราส่วน ร้อยละ 40 30 และ 30 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 ส่วนผสมแก้วใสในอัตราส่วนต่างๆ

สูตรแก้ว	ส่วนผสมแก้ว (%ของส่วนผสมเมื่อเทียบ A+B+C เป็น 100)					
	SiO ₂	CaO	B ₂ O ₃	MgO	ZnO	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O
1	A	B	C	6	6	10
2	A	B	C	6	6	10
3	A	B	C	6	6	10

ตารางที่ 3.6 ส่วนผสมแก้วที่เติมฟลอย์คาร์เนตในอัตราส่วนต่างๆ

สูตรแก้ว	ส่วนผสมแก้ว (%ของส่วนผสมเมื่อเทียบ A+B+C เป็น 100)						
	SiO ₂	CaO	B ₂ O ₃	MgO	ZnO	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	ฟลอย์คาร์เนต
1	A	B	C	6	6	10	5
2	A	B	C	6	6	10	10
3	A	B	C	6	6	10	15

ตารางที่ 3.7 ส่วนผสมแก้วที่เติมฟลอย์เพอริดอตในอัตราส่วนต่างๆ

สูตรแก้ว	ส่วนผสมแก้ว (%ของส่วนผสมเมื่อเทียบ A+B+C เป็น 100)						
	SiO ₂	CaO	B ₂ O ₃	MgO	ZnO	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	ฟลอย์เพอริดอต
1	A	B	C	6	6	10	5
2	A	B	C	6	6	10	10
3	A	B	C	6	6	10	15

ตารางที่ 3.8 ส่วนผสมแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ

สูตรแก้ว	ส่วนผสมแก้ว (%ของส่วนผสมเมื่อเทียบ A+B+C เป็น 100)						
	SiO ₂	CaO	B ₂ O ₃	MgO	ZnO	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	เหล็กออกไซด์
1	A	B	C	6	6	10	5
2	A	B	C	6	6	10	10
3	A	B	C	6	6	10	15

ตารางที่ 3.9 ส่วนผสมแก้วในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อคิดเทียบส่วนผสมทั้งหมดเป็น 100% โดยน้ำหนัก

สูตรแก้ว	ส่วนผสมแก้ว (%โดยน้ำหนัก)				
	A+B+C	MgO	ZnO	Na ₃ PO ₄ · 12H ₂ O	X
1	78.75	4.72	4.72	7.87	3.94
2	75.76	4.55	4.55	7.57	7.57
3	72.99	4.38	4.38	7.30	10.95

หมายเหตุ X คือ การ์เน็ต หรือเพอริดอต หรือเหล็กออกไซด์

2. นำส่วนผสมที่ได้ใส่ถ้วยบดสาร บดให้เข้ากันแล้วเทใส่เข้าครูซิเบลก่อน
นำเข้าเตา หลอมไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 การเตรียมส่วนผสมแก้วก่อนนำเข้าเตาหลอมไฟฟ้า

3.2.3 การหลอมแก้ว

ทำการหลอมแก้วด้วยเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,100°C ด้วยอัตราเร่ง 10°C ต่อนาที และยืนอุณหภูมิที่ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นยกออกจากเตาหลอมทันทีแล้วเทแก้ว เหลวใส่แม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ปล่อยให้เย็นตัวนอกเตา

3.2.4 การศึกษาแก้วหลังหลอม

1. นำแก้วที่ได้ในแต่ละส่วนผสมไปตรวจวัดการดูดกลืนสีด้วยเครื่อง UV/Visible Spectrophotometer
2. คำนวณปริมาณองค์ประกอบธาตุในแก้วก่อนการหลอมวิธีการคำนวณแสดงตัวอย่างการคำนวณไว้ในภาคผนวก ก.
3. ตรวจวัดปริมาณองค์ประกอบธาตุในแก้วหลังการหลอม ด้วยเครื่อง XRF
4. ศึกษาคุณสมบัติด้านความอ่อนตัว
5. นำแก้วที่ได้ในแต่ละส่วนผสมไปทดสอบอุณหภูมิการขึ้นรูปร่วมกับพลอยด้วยเตาอบไฟฟ้า ใช้อัตราส่วนแก้วเศษพลอยเป็น 1:1 โดยนำแก้ววางไว้บนเศษพลอย สังเกตการเปลี่ยนแปลง ของแก้วที่ติดกับเศษพลอย อุณหภูมิตั้งแต่ 600°C, 650°C และ 700°C

3.2.5. การทดสอบ Drop test

เลือกแก้วที่ติดกับเศษพลอยได้ดีในแต่ละช่วงอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้วแต่ละอัตราส่วนผสม มาทดสอบ Drop test ในระยะสูงจากพื้น 1.5 เมตร

3.2.6 การขึ้นรูปแก้วเพื่อทำชิ้นงาน

เลือกส่วนผสมแก้วที่มีการเกาะติดกับเศษพลอยได้ดี เนื้อแก้วมีสีสวยใสมาทำชิ้นงานเครื่องประดับ

3.3 ขั้นตอนการวิจัย ส่วนที่ 2 การผสมแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษแก้วสี

3.3.1 การเตรียมสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของแก้ว

1. เตรียมสารเคมี จากการทดลองโดยการแบ่งสูตรแก้ว CBS เป็น 6 สูตร มีสารที่เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ 3 สารคือ CaO , B_2O_3 และ SiO_2 ทั้ง 3 สารคิดเป็น 100% ดังตารางที่ 3.9 เมื่อคิดเทียบส่วนผสมรวมกันทั้งหมดคิดเป็น % โดยน้ำหนักและมีสารประกอบที่เป็นตัวปรับปรุงอีก 3 สารคือ MgO , ZnO , และ $(\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$ ซึ่งมีอัตราส่วนเท่าๆกันทั้ง 3 สาร

ตารางที่ 3.10 ส่วนผสมแก้วในอัตราส่วนต่างๆ

สูตรแก้ว	องค์ประกอบหลักของแก้ว (%)		
	CaO	B_2O_3	SiO_2
1.	10	70	20
2.	10	75	15
3.	10	80	10
4.	15	75	10
5.	20	70	10
6.	15	70	15

2. นำสารเคมีที่ได้จากการคำนวณมาชั่ง นำส่วนผสมที่ได้ใส่ลงในถุงพลาสติกรวมกันจากนั้นนำมาบดให้เข้าด้วยครกหิน แล้วเทใส่เบ้าอะลูมินา แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การเตรียมส่วนผสมแก้ว

3. การเตรียมแก้ว CBS 6 สูตรที่หลอมแล้ว ผสมเป็นแก้วสีโดยนำแก้วทั้ง 6 สูตรและแก้วสีมาบดในครกหินให้ละเอียด เพื่อให้ส่วนผสมในการทำแก้วสีเข้ากัน แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การบดส่วนผสมแก้วสี

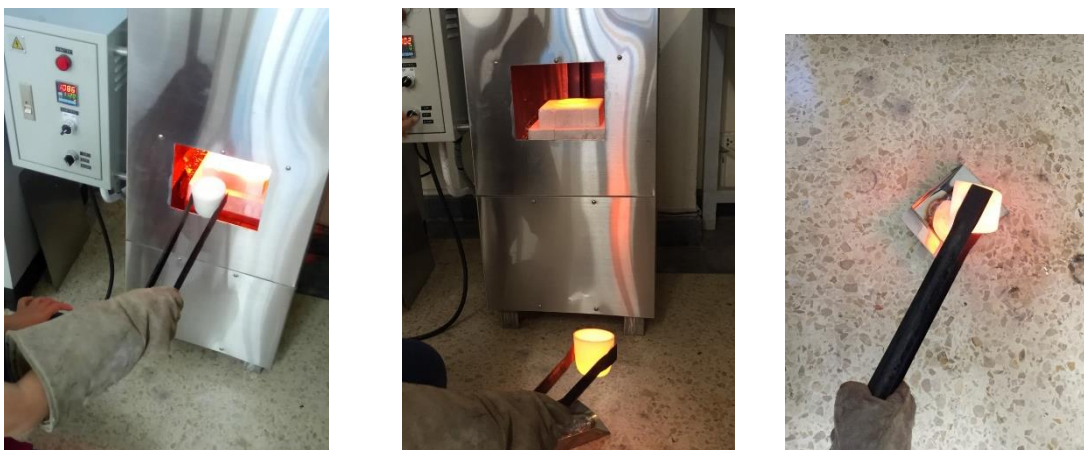
4. นำแก้วที่บดแล้วมาผสม เมื่อนำแก้ว 6 สูตรที่ได้มาผสมกับแก้วสีในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 ใส่ในถุงซิปล จากนั้นเขย่าให้แก้วกับแก้วสีเข้ากัน แล้วเทใส่เบ้าอะลูมินา แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การผสมแก้วกับแก้วสี

3.3.2 การนำส่วนผสมแก้วเข้าเตาไฟฟ้า

1. นำส่วนผสมแก้วที่อยู่ในเบ้าอะลูมินา ใส่ในเตาไฟฟ้า หลอมที่อุณหภูมิ 1100 °C จากอุณหภูมิห้องใช้อัตราเร่ง 10°C ต่อนาที แล้วเย็นอุณหภูมิที่ 1100°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำเบ้าอะลูมินาออกทันที แล้วเทใส่แม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ปล่อยให้แก้วเย็นนอกเตาไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.13 และแก้วที่ได้จากการหลอมแสดงดังรูปที่ 3.14

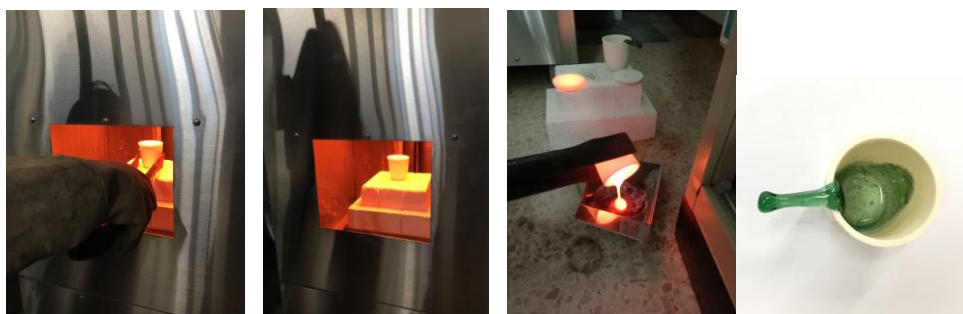


รูปที่ 3.13 การหลอมส่วนผสมแก้ว



รูปที่ 3.14 การหลอมส่วนผสมแก้ว

2. นำส่วนผสมแก้วที่เตรียมไว้ในเบ้าอะลูมินา ใส่ในเตาไฟฟ้า หลอมที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำออกจากเบ้าอะลูมินาทันที แล้วเทใส่แม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ ปล่อยให้แก้วสีเย็นนอกเตาไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.13 การหลอมแก้วสี

3.3.3 การศึกษาแก้วหลังการหลอม

1. นำแก้วและแก้วสีแต่ละสูตรมาทดสอบการขึ้นรูปด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 650°C 700°C และ 750°C และสังเกตการหลอมละลายของแก้ว
2. นำแก้วและแก้วสีที่ได้จากการหลอมมาทำการทดสอบการละลายน้ำ โดยนำแก้วแต่ละสูตรไปแช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง
3. นำแก้วและแก้วสีมาส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงเพื่อดูตำหนิภายในแก้ว
4. ทดสอบความแข็งของแก้วและแก้วสีด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบ Vickers
5. ตรวจสอบการดูดกลืนสีของแก้วและแก้วสีด้วยเครื่อง UV/Visible Spectrophotometer
6. ตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบธาตุของแก้วสีด้วยเครื่อง X-ray fluorescence

3.3.4 การขึ้นรูปแก้วเพื่อทำชิ้นงาน

เลือกการขึ้นรูปของแก้วที่มีทรงกลมและไม่มีการแตกร้าว มีความแข็งสูง เนื้อแก้วมีสีสวยใส มาทำชิ้นงานเครื่องประดับ










บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย ส่วนที่ 1 การผสมแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษพลอยสี

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงส่วนผสมของแก้วสีที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพในการขึ้นรูปร่วมกับพลอยคอร์รันดัม ได้ทำการเลือกพลอยการ์เนต พลอยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์มาเป็นตัวให้สีของแก้วใส ตรวจสอบวิเคราะห์พลอยก่อนผสมในแก้ว ทำการหลอมแก้ว แล้วจึงนำแก้วสีที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วย เครื่อง UV/Visible Spectrophotometer และเครื่อง X-ray Fluorescence เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของสีและสมบัติของแก้วสีก่อนการขึ้นรูปร่วมกับพลอยคอร์รันดัม ทดสอบอุณหภูมิการใช้งาน เพื่อให้ได้อุณหภูมิการใช้งานที่ต่ำ ทดสอบการเกาะติดด้วยการตกกระแทกที่ความสูง 150 เซนติเมตร ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดได้ผลดังนี้

4.1 การหลอมแก้วสี

การหลอมแก้วสี ทำการหลอมแก้วสีด้วยเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,100 °C ด้วยอัตราเร่ง 10 °C ต่อนาที และเย็นอุณหภูมิที่ 1,100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และยกออกจากเตาหลอมทันทีแล้วเทแก้วเหลวแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ปล่อยให้เย็นตัวนอกเตา ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหลอมแก้วสี โดยการเติมพลอยและเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วนต่างๆ

สูตรแก้ว	5	10	15
แก้วเติมพลอย การ์เนต			
แก้วเติมพลอยเพอริดอต			
แก้วเติม เหล็กออกไซด์			

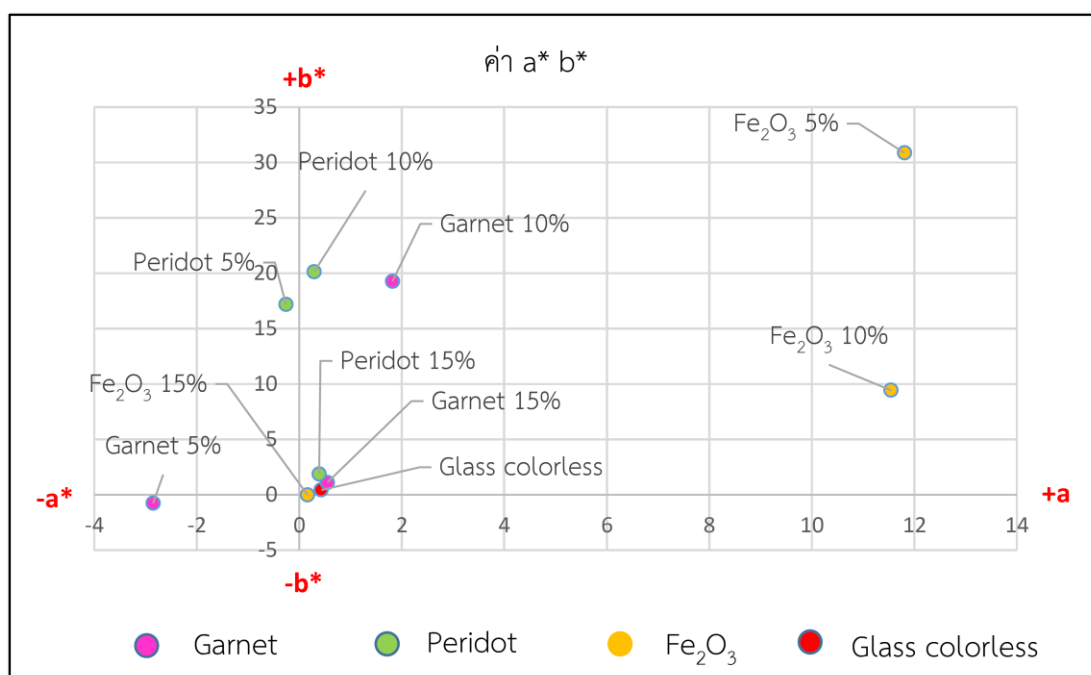
ผลการทดลองหลอมแก้วสีดังตารางที่ 4.1 แก้วที่เติมพลอยการ์เนตพลอยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ มีสีต่างกัน เนื่องจาก Fe มีไอออนต่างกัน โดยแก้วที่เติมพลอยการ์เนตจะมี Fe^{3+} Fe^{2+} และ Mn เป็นตัวให้สี เมื่อเติมพลอยการ์เนต 5% จะได้แก้วสีฟ้า เติม 10% มีสีเขียวเข้มเกือบดำ และ 15% แก้วมีสีเขียวเกือบดำเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนที่เติมลงไป แก้วที่เติมพลอยเพอริดอตจะมี Fe^{2+} เป็นตัวให้สี เมื่อเติมพลอยเพอริดอต 5% 10% และ 15% แก้วเป็นสีเขียวเหลือง แต่ความเข้มสีของแก้วจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของพลอยเพอริดอตที่เติมลงไป ส่วนแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์จะมี Fe^{3+} เป็นตัวให้สี

จึงส่งผลกระทบต่อสีแก้วคือ เมื่อเติมเหล็กออกไซด์ 5% จะได้แก้วสีชา แต่เมื่อเติม 10% แก้วมีสีชาเกือบดำ และ 15% แก้วมีสีเกือบดำเพิ่มมากขึ้นตามสัดส่วนของเหล็กออกไซด์ที่เติมลงไป

4.2 การตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้วด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer

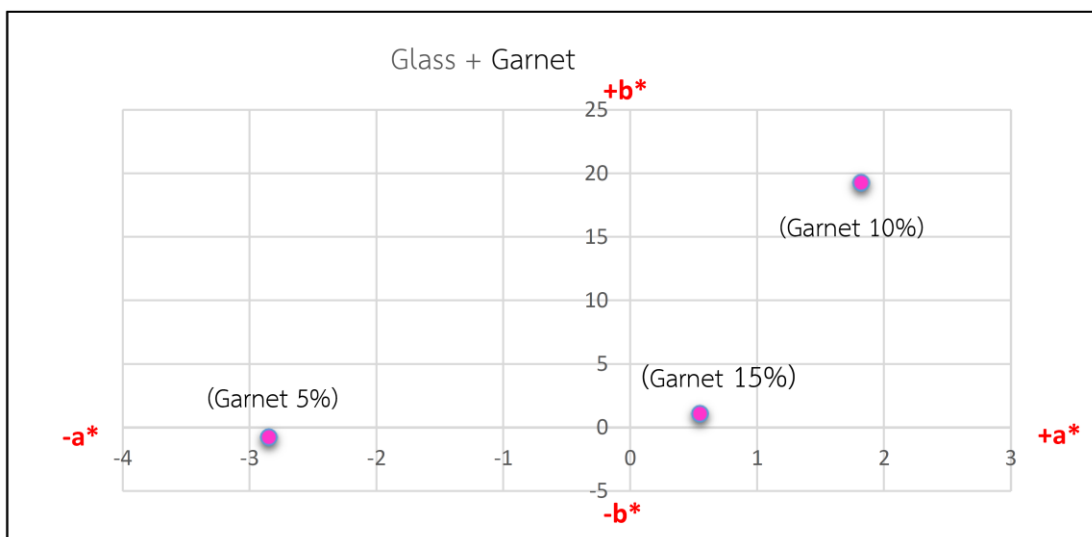
การวิเคราะห์แก้วสีหลังจากการหลอม ด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250 - 800 นาโนเมตร โดยทำการวิเคราะห์แก้วสี เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสีของแก้ว ซึ่งได้ค่าออกมาเป็นค่า L^* a^* b^* ในตารางที่ 4.2 และนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.1 - 4.12 ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต พลอยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ

สูตรแก้ว	ค่า L^* a^* b^* และ ΔE				
		L^*	a^*	b^*	ΔE
แก้วใส	-	91.66	0.43	17.19	-
แก้วเติมพลอยการ์เนต	5%	66.35	-2.85	-0.76	25.55
	10%	21.61	1.82	19.27	72.55
	15%	0.91	0.55	1.09	90.75
แก้วเติมพลอยเพอริดอต	5%	61.94	-0.26	17.19	34.13
	10%	27.78	0.29	20.12	66.85
	15%	68.07	0.39	1.87	23.63
แก้วเติมเหล็กออกไซด์	5%	19.20	11.81	30.86	79.41
	10%	5.79	11.55	9.43	87.05
	15%	0.12	0.16	-0.02	91.54

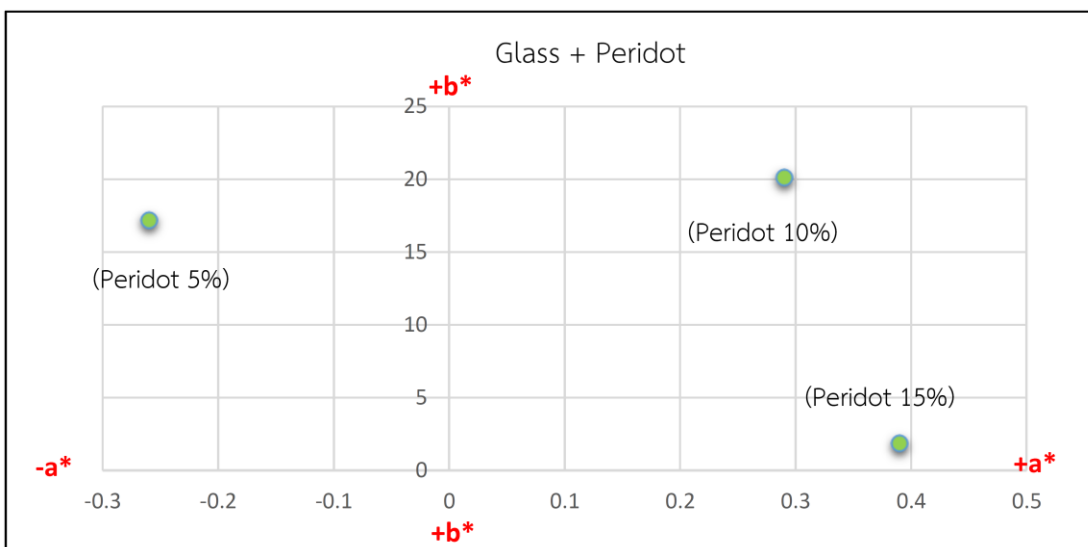


รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วสูตรต่างๆ

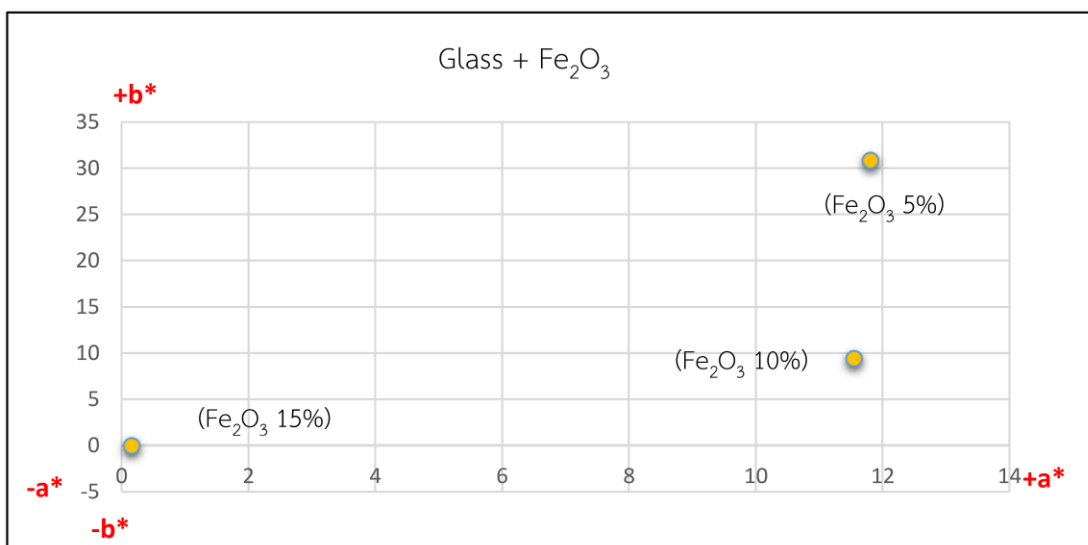
จากกรุปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วสูตรต่างๆ พบการเปลี่ยนแปลงสีของแก้วดังนี้ ที่อัตราส่วน 5% แก้วเติมพลอยการ์เนตและพลอยเพอริดอต มีค่า a^* อยู่ในช่วง $-a^*$ และ b^* อยู่ในช่วง $-b^*$ จึงทำให้สีของแก้วอยู่ในช่วงสีเขียวและสีน้ำเงิน ส่วนแก้วสูตรที่เหลือ มีค่า a^* b^* อยู่ในช่วง $+a^*$ $+b^*$ จึงทำให้สีของแก้วอยู่ในช่วงสีแดงและสีเหลือง



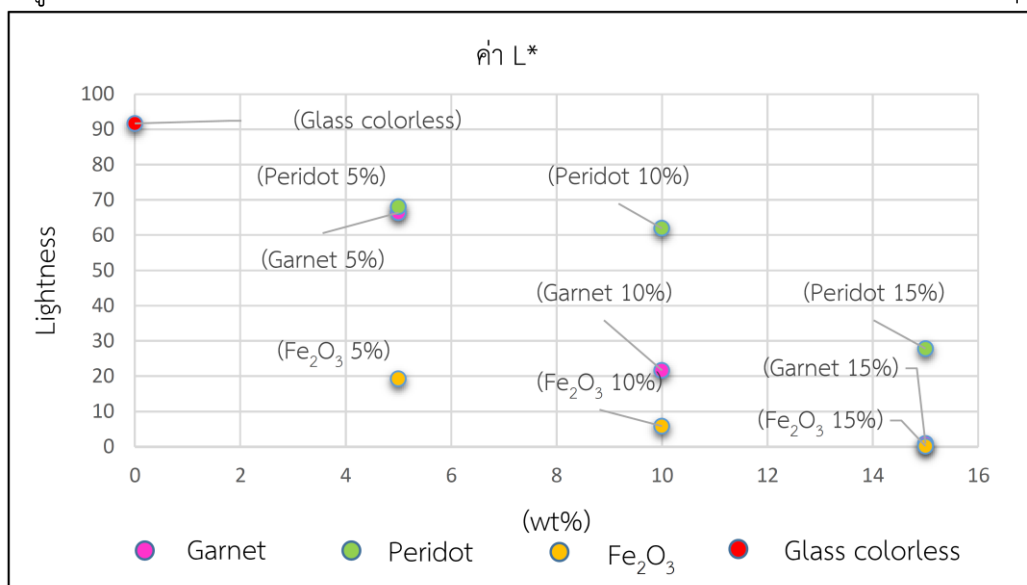
รูปที่ 4.2 กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วที่เติมพลอยเพอริดอต ในอัตราส่วนต่างๆ

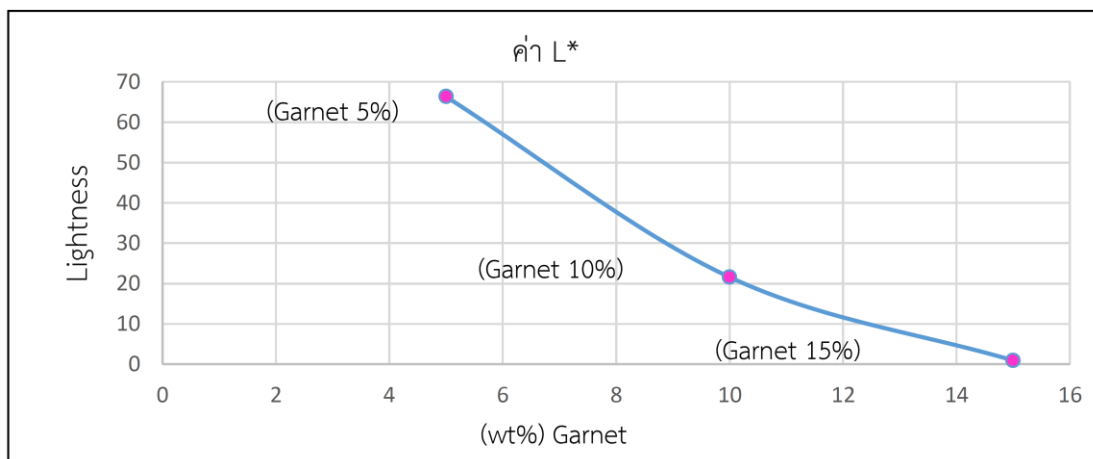


รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่า a^* และ b^* ของแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ

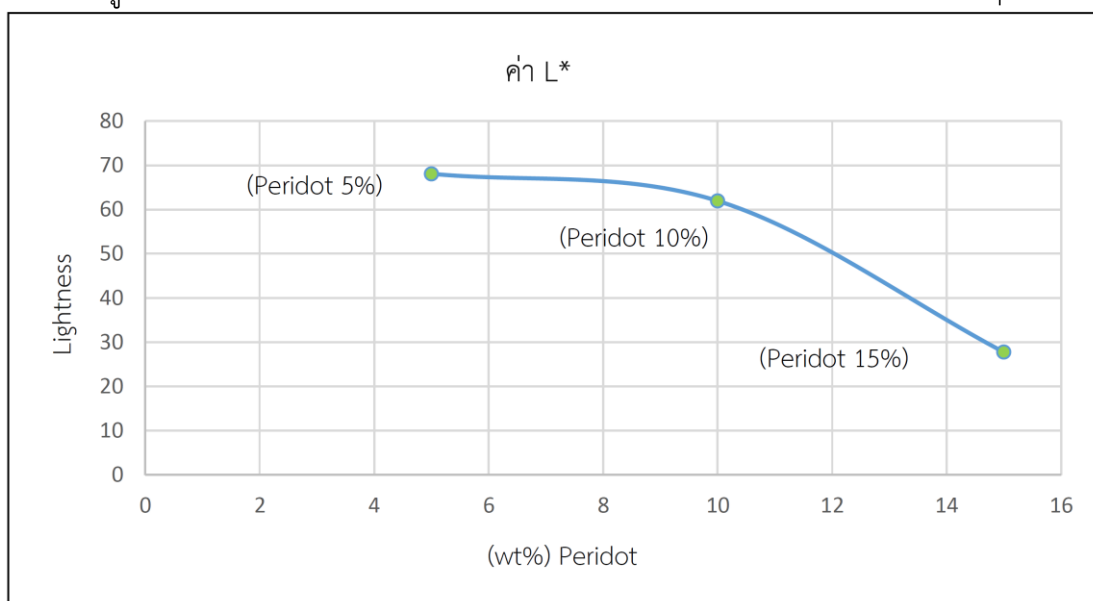


รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่า L^* ของแก้วสูตรต่างๆ

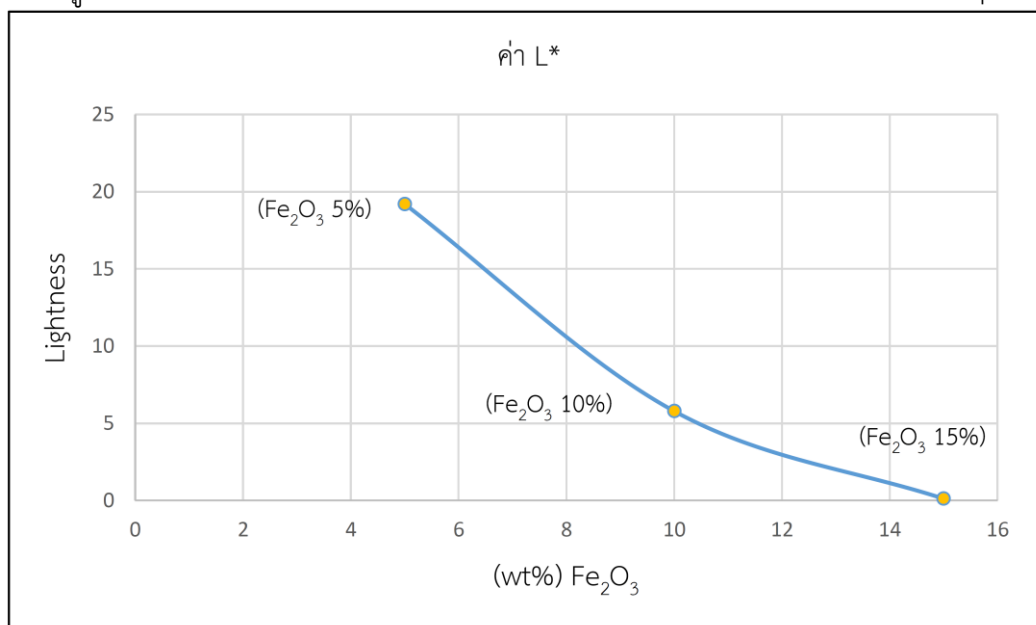
จากกราฟที่ 4.5 เปรียบเทียบค่า L^* ของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต พลอยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ ได้ผลดังนี้ แก้วที่มีค่า L^* มากที่สุด จะมีค่าความสว่างมากที่สุด ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงสีจึงแปรผันกับค่า L^* ที่ลดลง จากกราฟได้ว่า แก้วที่เติมพลอยเพอริดอตจะมีค่า L^* มากที่สุดในทุกๆ อัตราส่วนผสม ส่วนแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์จะมีค่า L^* น้อยที่สุดในทุกๆ อัตราส่วนผสม จึงสามารถบอกได้ว่าแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงสีได้มากที่สุดได้แก่ แก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ แก้วเติมการ์เนต และแก้วเติมเพอริดอต ตามลำดับ



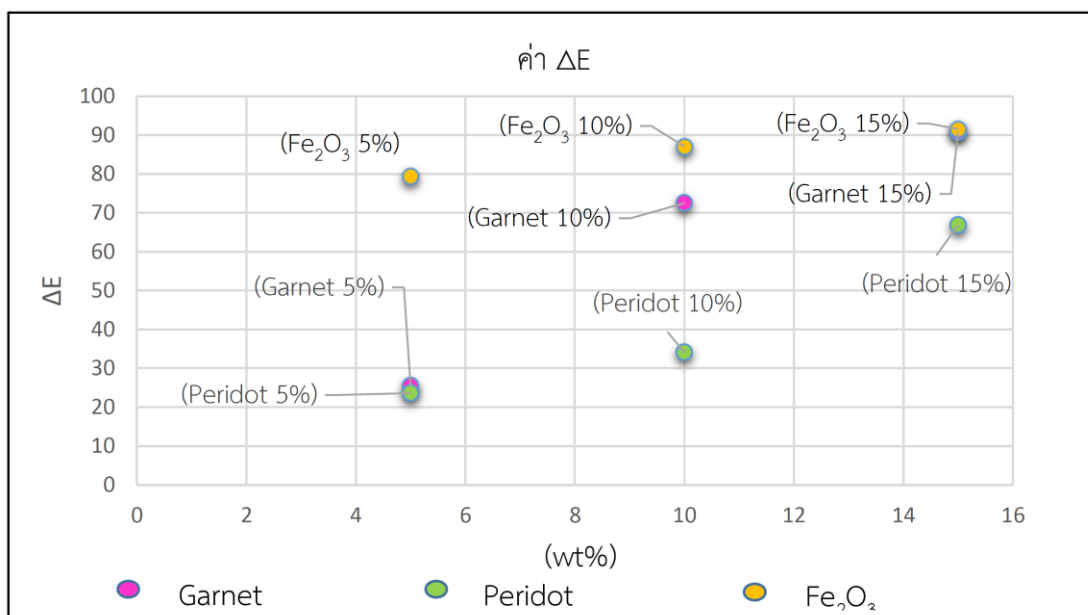
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่า L* ของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่า L* ของแก้วที่เติมพลอยเพอริดอต ในอัตราส่วนต่างๆ

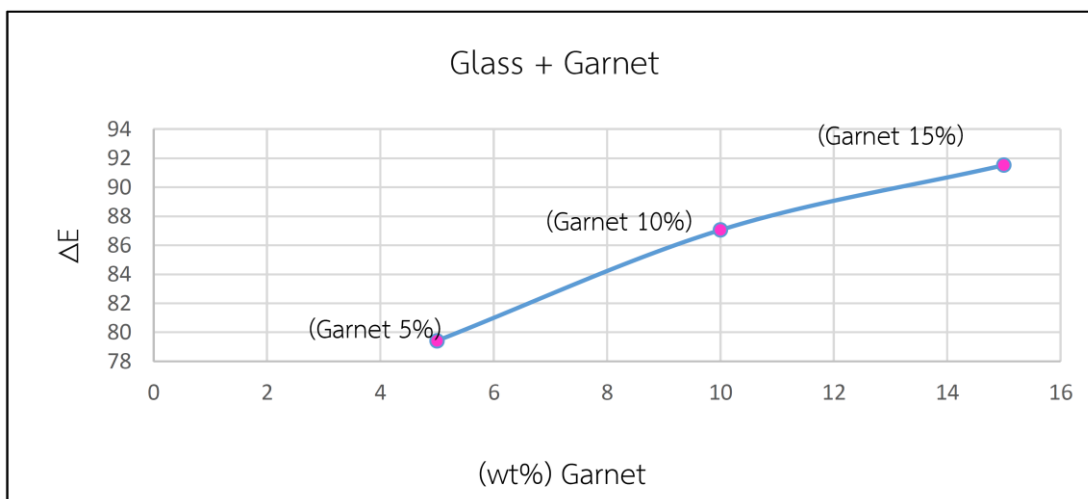


รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่า L* ของแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ

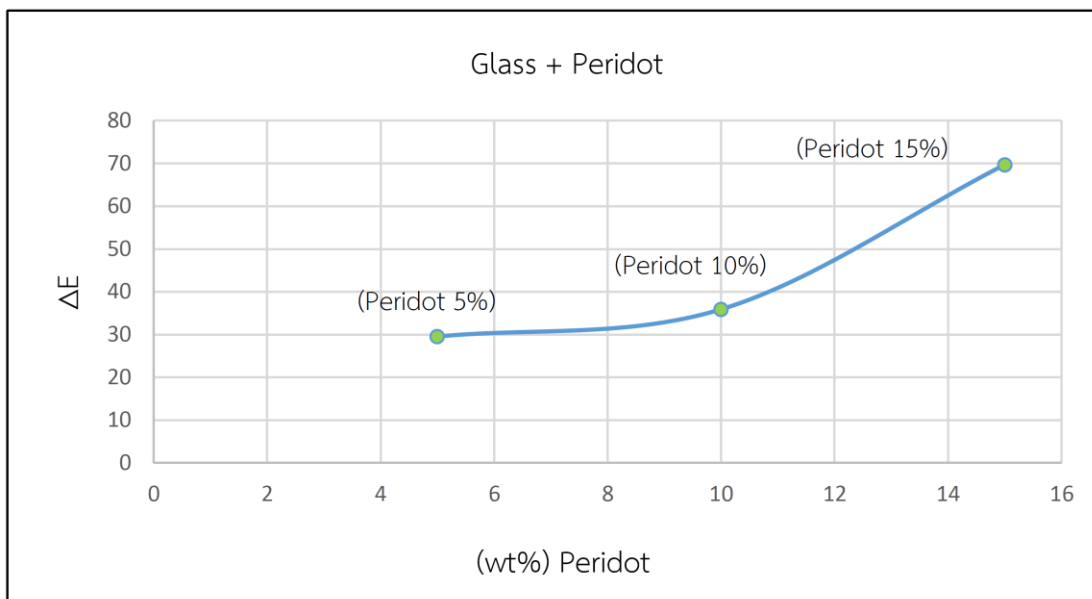


รูปที่ 4.9 กราฟค่า ΔE ของแก้วสูตรต่างๆ

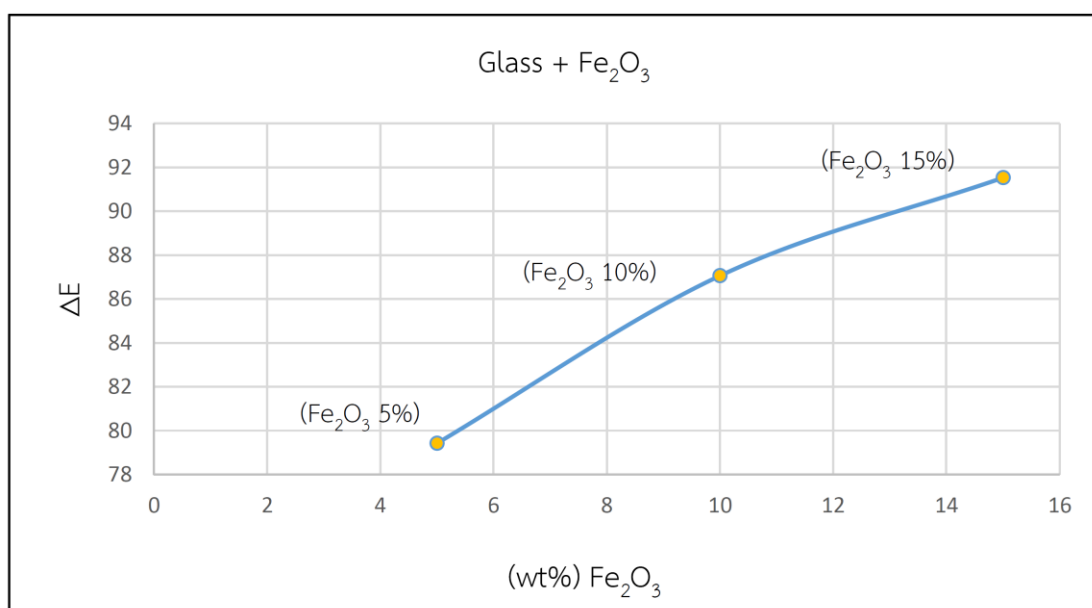
จากรูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์กราฟ ΔE ของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต พลอยเพอริidot และเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสีของแก้วในอัตราส่วนต่างๆ พบว่า แก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงสีน้อยที่สุดคือ แก้วเติมพลอยเพอริidot 5% และแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุดคือ แก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ 15%



รูปที่ 4.10 กราฟค่า ΔE ของแก้วที่เติมพลอยการ์เนต ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.11 กราฟค่า ΔE ของแก้วที่เติมพลอยเพอริโดต ในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 4.12 กราฟค่า ΔE ของแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ

4.3 การตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีของแก้วสี

ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแก้วสี ก่อนการหลอมจากการคำนวณ เปรียบเทียบกับองค์ประกอบของแก้วที่วัดจากเครื่อง XRF หลังการหลอมด้วยเตาไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ $1,100^{\circ}C$ แสดงในตารางที่ 4.3 - 4.6 ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบพบว่า ปริมาณธาตุองค์ประกอบของแก้วหลังการหลอม มีธาตุบางชนิดที่เครื่อง XRF ไม่สามารถตรวจวัดได้ จึงทำให้ค่าที่ได้ ไม่เท่ากับค่าก่อนการหลอม เนื่องจากผลการวิเคราะห์ของเครื่อง XRF จะแสดงผลเป็น (wt%) โดยเฉลี่ยน้ำหนักรวมของธาตุทั้งหมดเป็น 100%

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วใส ก่อนและหลังการหลอม

แก้วใส	องค์ประกอบทางเคมี (wt%)			
	ABC	Na	Zn	Mg
ก่อน	73.40	4.71	12.50	9.38
หลัง	78.19	-	10.19	11.02

หมายเหตุ ABC = (Si + B + Ca)

Na เครื่อง XRF ไม่สามารถทำการตรวจวัดได้

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่เติมฟลอย์คาร์เนต ก่อนและหลังการหลอม

แก้วเติมฟลอย์ คาร์เนต (% โดย น้ำหนัก)		องค์ประกอบทางเคมี (wt%)							
		ABC	Na	*Si	Zn	**Mg	Al	Mn	Fe
5%	ก่อน	64.97	4.17	3.5	11.1	10.1	4.8	0.04	1.3
	หลัง	74.5	-	1.50	10.4	-	12	-	1.3
10%	ก่อน	58.28	3.74	6.28	9.93	10.66	8.7	0.07	2.4
	หลัง	85.9	-	4.48	7.1	-	2.07	0.08	1.43
15%	ก่อน	52.84	3.39	8.54	9	11.1	11.8	0.1	3.24
	หลัง	63.3	-	4.79	8.74	-	20.5	0.12	2.65

หมายเหตุ * ค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งระบุเป็นของฟลอย์

** ค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งระบุเป็นของแก้วรวมกับฟลอย์

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่เติมฟลอย์เพอริดอต ก่อนและหลังการหลอม

แก้วเติมฟลอย์ คาร์เนต (% โดย น้ำหนัก)		องค์ประกอบทางเคมี (wt%)					
		ABC	Na	*Si	Zn	**Mg	Fe
5%	ก่อน	65	4.17	8.11	11.1	9.38	2.30
	หลัง	53.27	-	-	6.36	40	0.73
10%	ก่อน	58.28	3.74	14.5	9.93	9.38	4.13
	หลัง	67.00	-	3.82	7.58	24	0.99
15%	ก่อน	52.84	3.39	19.8	9.00	9.37	5.61
	หลัง	67.00	-	4.43	7.69	19	1.52

หมายเหตุ ABC = (Si + B + Ca)

* ค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งระบุเป็นของฟลอย์

** ค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งระบุเป็นของแก้วรวมกับฟลอย์

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ ก่อนและหลังการหลอม

แก้วเติมฟลอย การเนต (% โดย น้ำหนัก)		องค์ประกอบทางเคมี (wt%)				
		ABC	Na	Zn	Mg	Fe
5%	ก่อน	72.09	4.62	12.28	9.22	1.78
	หลัง	71.11	-	7.61	17.22	4.06
10%	ก่อน	70.83	4.54	12.06	7.65	3.50
	หลัง	84.82	-	7.53	-	7.65
15%	ก่อน	69.61	4.46	11.86	8.9	5.16
	หลัง	82.00	-	9.71	-	8.29

หมายเหตุ ABC = (Si + B + Ca)

จากผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วสี ทั้งก่อนการหลอมและหลังการหลอมด้วยเครื่อง XRF ตรวจพบธาตุองค์ประกอบหลังการหลอม มาเท่ากับก่อนการหลอมเนื่องจากธาตุบางชนิดเครื่อง XRF ไม่สามารถตรวจวัดได้



4.4 การศึกษาคุณสมบัติของแก้วสี

ศึกษาคุณสมบัติด้านความอ่อนตัว และความเปราะของแก้วสี หลังทำการหลอมด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,100°C โดยนำแก้วที่ได้จากการหลอมไปทดสอบการอ่อนตัวด้วยการนำเข้าเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 600°C, 650°C และ 700°C เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ และนำแก้วที่ผ่านการอบด้วยเตาไฟฟ้าไปทดสอบความเปราะด้วยการปล่อยตกลงพื้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.7- 4.10

จากตารางที่ 4.7- 4.8 การทดสอบคุณสมบัติความอ่อนตัวของแก้วสี ได้ผลดังนี้

- ที่อุณหภูมิ 600°C ก่อนการอบและหลังการอบด้วยเตาไฟฟ้า แก้วทุกสูตรไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่แก้วเริ่มอ่อนตัว จึงทำให้แก้วไม่เกิดความอ่อนตัว
- ที่อุณหภูมิ 650°C ก่อนการอบและหลังการอบด้วยเตาไฟฟ้า แก้วทุกสูตรเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของแก้วบริเวณเหลี่ยมมุมเล็กน้อย ทำให้แก้วเริ่มเกิดความอ่อนตัว แต่ยังมีความหนืดอยู่มาก
- ที่อุณหภูมิ 700°C ก่อนการอบและหลังการอบด้วยเตาไฟฟ้า แก้วมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะที่ต่างกัน โดยสูตรแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะบริเวณเหลี่ยมมุมเล็กน้อย ได้แก่ แก้วใส แก้วเติมฟลอยการเนต 5% และ 10% ทำให้แก้วมีความอ่อนตัวเล็กน้อย และสูตรแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะชัดเจนทั้งทั้งเม็ด ได้แก่ แก้วเติมฟลอยการเนต 15% แก้วเติมฟลอย เพอริดอต 5%, 10%, 15% และแก้วเติมเหล็กออกไซด์ 5%, 10%, 15% ทำให้แก้วมีความอ่อนตัวมาก เนื่องจากความหนืดของแก้วลดลงมากแต่แก้วยังมีความตึงผิวอยู่ในลักษณะที่แก้วยังคงรูปเป็นก้อนกลมได้



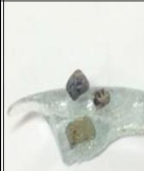






ตารางที่ 4.7 การศึกษาคุณสมบัติด้านความอ่อนตัวของแก้วสีที่ 600°C, 650°C และ 700°C

อุณหภูมิ/ สูตรแก้ว	600°C		650°C		700°C	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
แก้วใส						
แก้วเติม พลอย การ์เนต 5%						
แก้วเติม พลอย การ์เนต 10%						
แก้วเติม พลอย การ์เนต 15%						
แก้วเติม พลอย เพอริดอท 5%						

ตารางที่ 4.8 การศึกษาคุณสมบัติด้านความอ่อนตัวของแก้วสีที่ 600°C, 650°C และ 700°C (ต่อ)

อุณหภูมิ/ สูตรแก้ว	600°C		650°C		700°C	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
แก้วเติม ฟลอย เพอริตอท 10%						
แก้วเติม ฟลอย เพอริตอท 15%						
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 5%						
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 10%						
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 15%						

ตารางที่ 4.9 การศึกษาคุณสมบัติด้านความเปราะของแก้วสีที่ 600°C, 650°C และ 700°C

อุณหภูมิ/ สูตรแก้ว	600°C		650°C		700°C	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
แก้วใส						
แก้วเติม ฟลอย คาร์เนต 5%						
แก้วเติม ฟลอย คาร์เนต 10%						
แก้วเติม ฟลอย คาร์เนต 15%						
แก้วเติม ฟลอย เพอร์ริคอต 5%						

ตารางที่ 4.10 การศึกษาคุณสมบัติด้านความเปราะของแก้วสีที่ 600°C, 650°C และ 700°C (ต่อ)

อุณหภูมิ/ สูตรแก้ว	600°C		650°C		700°C	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
แก้วเติม ฟลอย เพอริตอท 10%						
แก้วเติม ฟลอย เพอริตอท 15%						
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 5%						
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 10%						
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 15%						

จากตารางที่ 4.9-4.10 การศึกษาคุณสมบัติด้านความเปราะของแก้วสี ได้ผลดังนี้

- ที่อุณหภูมิ 600°C หลังทดลองการปล่อยตก แก้วทุกสูตรไม่มีการแตกหัก เนื่องจากตัวแก้วยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังการอบ จึงทำให้แก้วมีความเปราะที่น้อยมาก
- ที่อุณหภูมิ 650°C หลังทดลองการปล่อยตก แก้วทุกสูตรไม่มีการแตกหัก เนื่องจากตัวแก้วเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังการอบเพียงเล็กน้อย จึงทำให้แก้วมีความเปราะที่น้อย
- ที่อุณหภูมิ 700°C หลังทดลองการปล่อยตก พบแก้วมีการแตกหักและไม่แตกหัก เนื่องจากตัวแก้วเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหลังการอบมาก โดยสูตรแก้วที่เกิดการแตกหัก ได้แก่ สูตรแก้วใส แก้วเติมฟลอยคาร์เนต 5% 10% และ 15% ส่วนแก้วที่ไม่พบการแตกหักหลังปล่อยตก ได้แก่ สูตรแก้วเติมฟลอยเพอริตอท 5% 10% 15% และแก้วเติมเหล็กออกไซด์ 5% 10% 15%

4.5 การทดสอบอุณหภูมิใช้งานของแก้วสี

จากการทดลองนำแก้วสีกับพลอยเข้าเตาหลอมไฟฟ้าเพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแก้วสีเมื่อติดกับพลอย พบว่า แก้วที่เติมพลอยคาร์เนต พลอยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนที่ต่างกัน มีผลต่ออุณหภูมิการทำงานของแก้ว ซึ่งแก้วสามารถขึ้นรูปติดกับพลอยได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 600°C ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การทดลองหาอุณหภูมิใช้งานของแก้วสีกับพลอยที่ 600°C, 650°C และ 700°C

อุณหภูมิ / สูตรแก้ว				
		600°C	650°C	700°C
แก้ว	-	✗	✓	✓
แก้วเติมพลอย คาร์เนต	5%	✗	✓	✓
	10%	✗	✓	✓
	15%	✗	✓	✓✓
แก้วเติมพลอย เพอริดอต	5%	✗	✓	✓✓
	10%	✗	✓	✓✓
	15%	✗	✓	✓✓
แก้วเติม เหล็กออกไซด์	5%	✗	✓	✓✓
	10%	✗	✓	✓✓
	15%	✗	✓	✓✓

✘ คือ แก้วกับพลอยไม่ติดกัน	
✓ คือ แก้วสีกับพลอยติดกันแบบเนื้อสัมผัส	
✓✓ คือ แก้วสีกับพลอยติดกันแบบจมน	

รูปที่ 4.13 ลักษณะการเกาะติดกันของแก้วสีกับพลอยคอร์รันดัม

จากตารางที่ 4.11 ผลการทดลองหาอุณหภูมิการทำงานของแก้วร่วมกับพลอยคอร์รันดัม ที่อุณหภูมิ 600°C, 650°C และ 700°C พบลักษณะของการเกาะติดดังนี้

- ที่อุณหภูมิ 600°C แก้วทุกสูตรไม่สามารถเกาะติดกับพลอยได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่แก้วเริ่มอ่อนตัว จึงทำให้ไม่เกิดการเกาะติดของแก้วกับพลอยได้
- ที่อุณหภูมิ 650°C แก้วทุกสูตรสามารถเกาะติดกับพลอยได้ในลักษณะแบบเนื้อสัมผัส เนื่องจากแก้วเริ่มมีการอ่อนตัว แต่ยังมี ความเหนียวอยู่มากการเกาะติดจึงเกิดเพียงเล็กน้อย
- ที่อุณหภูมิ 700°C แก้วทุกสูตรสามารถเกาะติดกับพลอยได้ โดยสูตรแก้วที่เกาะติดกับพลอยได้ในลักษณะแบบเนื้อสัมผัสได้แก่ แก้วใส แก้วเติมพลอยคาร์เนต 5% และ 10%

สูตรแก้วที่เกาะติดกับพลอยได้ในลักษณะแบบจมนได้แก่ แก้วเติมพลอยคาร์เนต 15% แก้วเติมพลอย เพอริดอต 5% 10% 15% และแก้วเติมเหล็กออกไซด์ 5% 10% 15% ซึ่งการเกาะติดในลักษณะ แบบจมน เกิดเนื่องจากแก้วเริ่มมีหลอมละลายทำให้ความเหนียวของแก้วลดน้อยลง จึงเกิดการเกาะติดได้ง่ายขึ้น

4.6 การทดสอบการเกาะติด














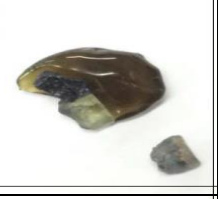







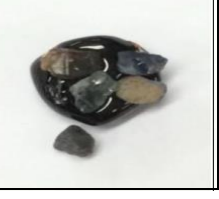


การทดลองการเกาะติดแก้วกับพลอยด้วยวิธีการตกกระแทก โดยการคัดเลือกแก้วที่สามารถเกาะติดกับพลอยได้ จากการหาอุณหภูมิขึ้นรูปร่วมกับพลอยได้แก้วทุกสูตร ที่อุณหภูมิ 650°C และ 700°C มาทำการทดสอบโดยปล่อยตกกระแทกบนพื้นกระเบื้อง 2 ครั้งที่ความสูง 150 เซนติเมตร พบว่า ที่อุณหภูมิ 650°C แก้วทุกสูตรเมื่อทำการตกกระแทกแก้วกับพลอยหลุดออกจากกันระหว่างรอยต่อ เนื่องจากลักษณะการเกาะติดของแก้วและพลอยเป็นแบบเนื้อสัมผัส จึงทำให้หลุดออกจากกัน

ได้ง่าย ที่อุณหภูมิ 700°C มีรอยแตกที่ตัวแก้วได้แก่สูตร แก้วใส แก้วเติมฟลอยการ์เนต 5% 10% และ 15% ส่วนแก้วสูตรที่เหลือสามารถเกาะติดกับฟลอยได้ดี ไม่มีรอยแตก ดังตารางที่ 4.12-4.13

ตารางที่ 4.12 การทดสอบการเกาะติดของแก้วสีกับฟลอยคอร์นดัม

อุณหภูมิ/สูตร แก้ว	650°C		700°C	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
แก้วใส				
แก้วเติมฟลอย การ์เนต 5%				
แก้วเติมฟลอย การ์เนต 10%				
แก้วเติม ฟลอย การ์เนต 15%				

ตารางที่ 4.13 การทดสอบการเกาะติดของแก้วสีกับฟลอยคอร์รันดัม (ต่อ)

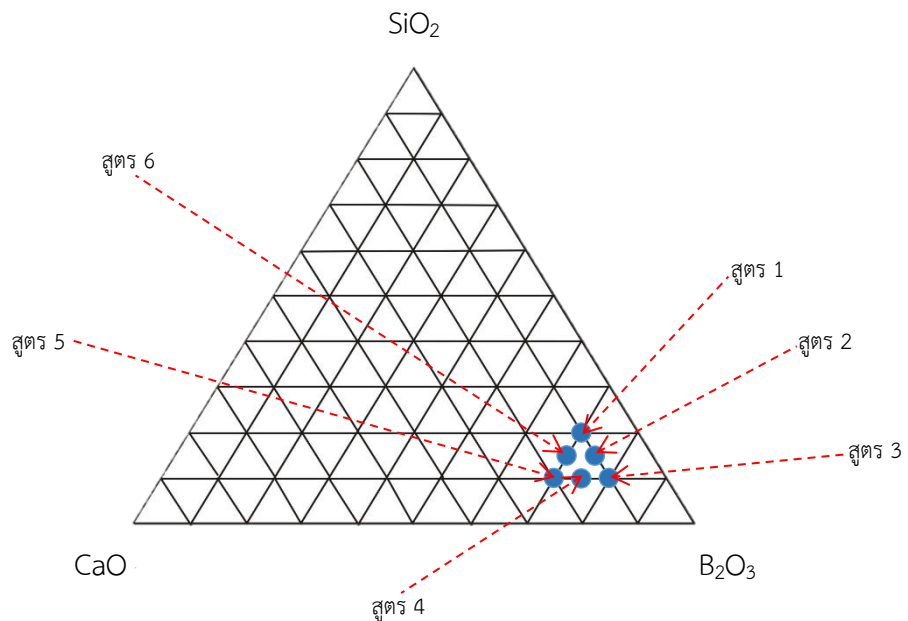
อุณหภูมิ/สูตร แก้ว	650°C		700°C	
	ก่อนอบ	หลังอบ	ก่อนอบ	หลังอบ
แก้วเติมฟลอย เพอริดอต 5%				
แก้วเติม ฟลอย เพอริดอต 10%				
แก้วเติม ฟลอย เพอริดอต 15%				
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 5%				
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 10%				
แก้วเติม เหล็ก ออกไซด์ 15%				

บทที่ 5 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย ส่วนที่ 2 การผสมแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษแก้วสี

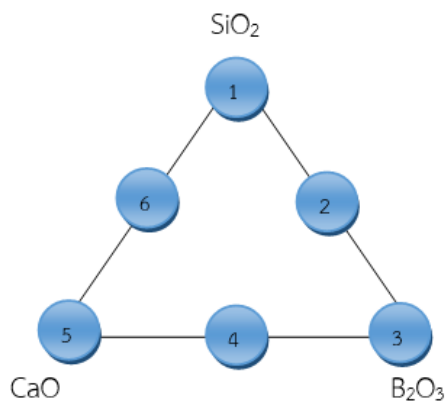
การศึกษการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของแก้ว CBS 6 สูตร และนำมาทำแก้วสีจากการผสมกับขวดเบียร์สีเขียวจากตราช้างและสีจากตราสิงห์ เพื่อทดสอบอุณหภูมิการขึ้นรูป ทดสอบคุณสมบัติการละลายน้ำ ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแก้วและแก้วสี ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ทดสอบความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งจุลภาคแบบ Vickers แล้วนำแก้วและแก้วที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV/Visible Spectrophotometer และนำแก้วสีไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray fluorescence ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

5.1 การหลอมแก้ว CBS

การทดลองหลอมแก้ว CBS และอัตราส่วนผสมของแก้ว CBS 6 สูตร แสดงดังรูปที่ 5.1 นำมาหลอมแก้วด้วยเตาไฟฟ้า หลอมที่อุณหภูมิ 1100 °C จากอุณหภูมิห้องใช้อัตราเร่ง 10 °C ต่อนาที แล้วเย็นที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำแก้วออกมาจากเตาทันที แล้วเทลงบนแผ่นสแตนเลสปล่อยแก้วให้เย็นนอกเตา



รูปที่ 5.1 อัตราส่วนผสมของแก้วCBS









รูปที่ 5.2 อัตราส่วนผสมของแก้ว CBS (ต่อ)

เมื่อทำการหลอมแก้ว ด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1100°C แก้ว CBS ทั้ง 6 สูตร แก้ว CBS สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 มีสีขาวขุ่นมีรอยแตกร้าวภายในเนื้อแก้ว ส่วนแก้ว CBS สูตร 4 และสูตร 6 มีสีใสปนสีขาวขุ่นมีรอยแตกร้าวภายในเนื้อแก้ว และแก้ว CBS สูตร 5 มีสีใสและเนื้อแก้วเป็นเนื้อเดียวกัน ดังตารางที่ 5.1 จึงนำแก้ว CBS 6 สูตรมาพัฒนาคุณสมบัติต่อไป เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและเพิ่มสีส้ม













5.1.1 การปรับปรุงคุณสมบัติแก้ว

จากการทดลองเผาแก้ว CBS 6 สูตร นำมาปรับปรุงคุณภาพโดยการเติมแก้วสีจากขวดเบียร์ตราช้างสีเขียว และขวดเบียร์ตราสิงห์สีชา โดยนำแก้วและแก้วสีมาบด แล้วผสมกันในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 นำมาหลอมที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 30 นาที และนำแก้วออกจากเตาทันที เทใส่แม่พิมพ์ แล้วให้แก้วเย็นตัวนอกเตา ผลการทดลองดังตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองการหลอมของแก้วสี

แก้ว CBS	ก่อนเติมสี	เติมแก้วสีเขียว	เติมแก้วสีชา
สูตร 1			
สูตร 2			

ตารางที่ 5.2 ผลการหลอมแก้วสี (ต่อ)

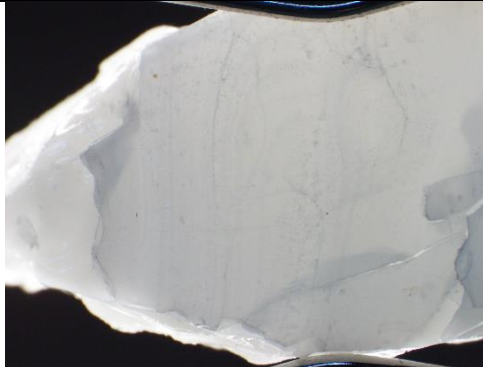

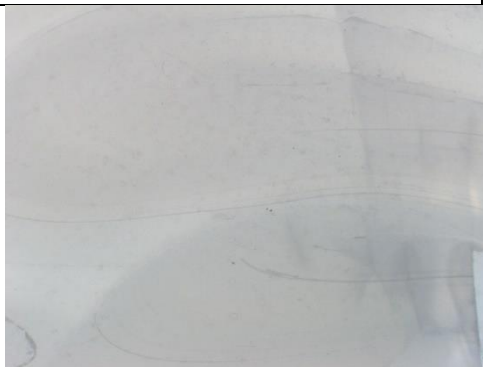
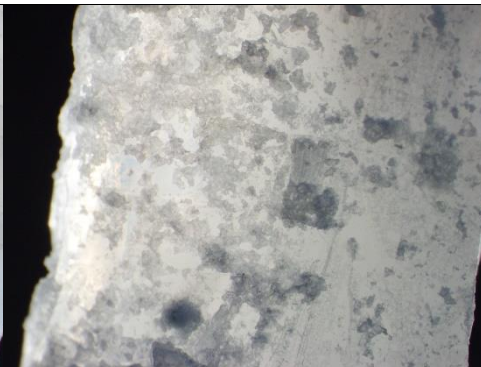
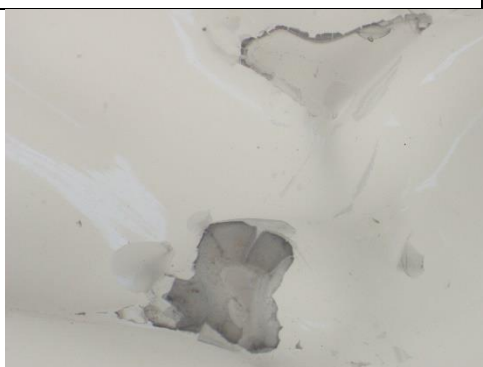
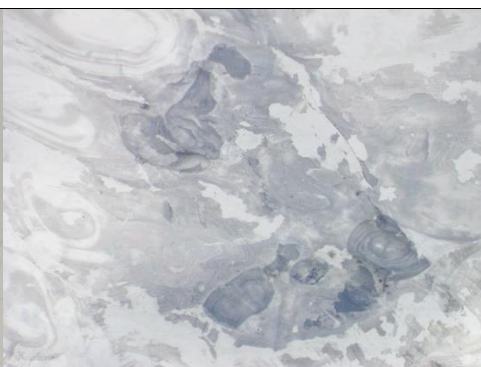
แก้ว CBS	ก่อนเติมสี	เติมแก้วสีเขียว	เติมแก้วสีชา
สูตร 3			
สูตร 4			
สูตร 5			
สูตร 6			

ผลการทดลองการหลอมแก้วสีดังตาราง 5.1 แก้ว CBS หลอมผสมกับขวดเปียร์สีเขียว ตราข้าง ได้แก้วหลังการหลอมสีเขียวเข้ม ส่วนแก้ว CBS หลอมผสมกับขวดเปียร์สีชา ตราสิงห์ ได้แก้วหลังการหลอมสีเขียวอ่อน

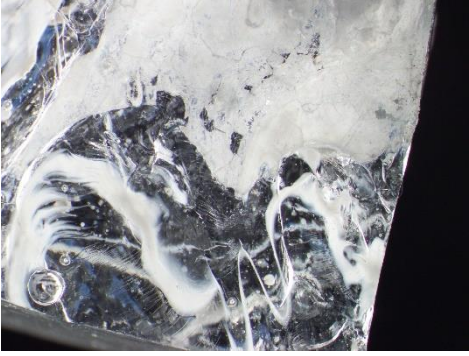

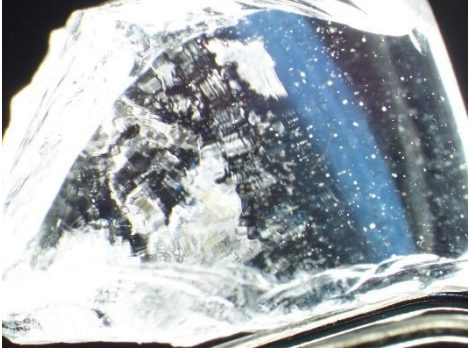
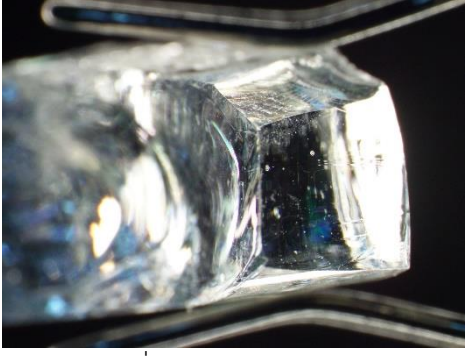


5.2 การส่องตำหนิภายในแก้วด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

จากการส่องแก้วและแก้วสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยายต่างๆ เพื่อส่องดูตำหนิภายในเนื้อแก้ว ส่องแก้วก่อนและหลังทดสอบการละลายน้ำ และส่องแก้วสีหลังหลอม ดังตารางที่ 5.3 - 5.6


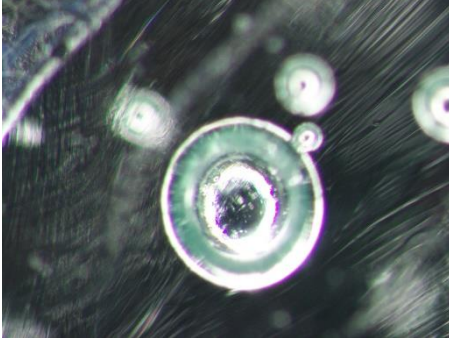
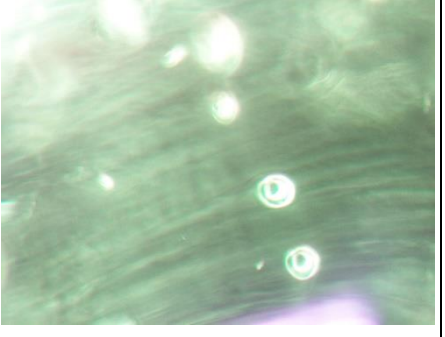
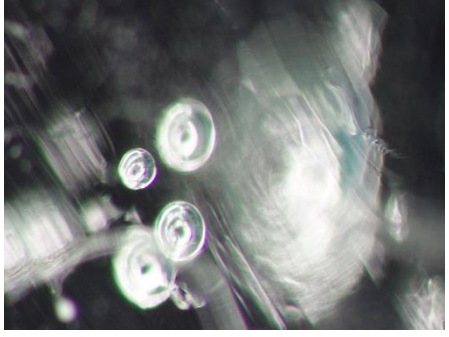
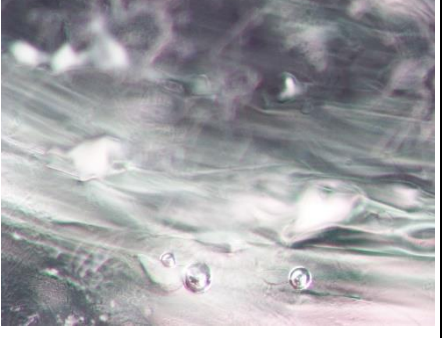
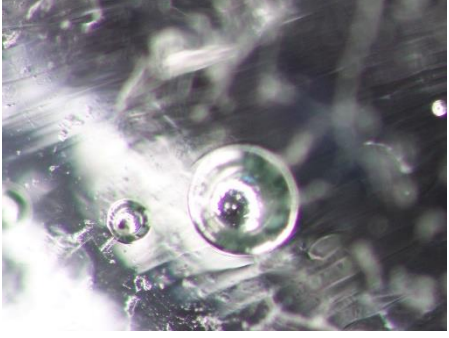
ตารางที่ 5.3 การส่องดูมลทินภายในแก้ว CBS ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 10X

แก้ว CBS	หลังหลอม	หลังแช่น้ำ
CBS1	 <ul style="list-style-type: none"> - แก้วมีสีขาวขุ่น - เกิดรอยแตกของแก้ว 	 <ul style="list-style-type: none"> - เกิดคราบของสารเคมีตามรอยแตกที่เกิดจากการละลายน้ำ
CBS2	 <ul style="list-style-type: none"> - แก้วมีสีขาวขุ่น - เกิดรอยแตกของแก้ว 	 <ul style="list-style-type: none"> - เกิดคราบของสารเคมีตามรอยแตกที่เกิดจากการละลายน้ำ
CBS3	 <ul style="list-style-type: none"> - แก้วมีสีขาวขุ่น - เกิดรอยแตกของแก้ว 	 <ul style="list-style-type: none"> - เกิดคราบของสารเคมีตามรอยแตกที่เกิดจากการละลายน้ำ

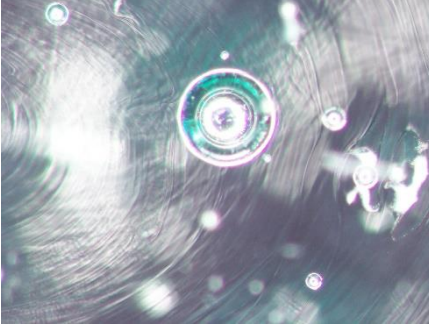
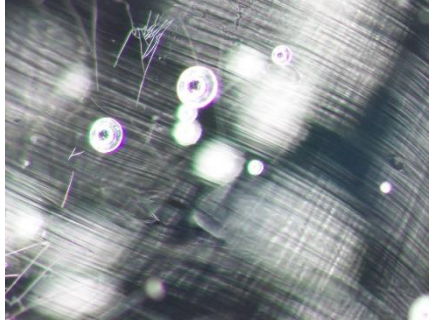

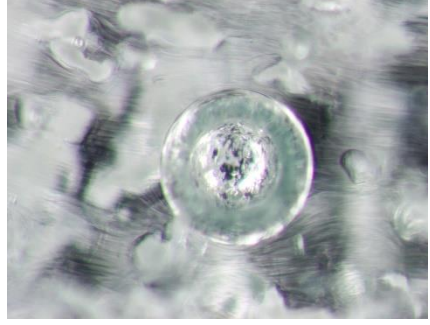
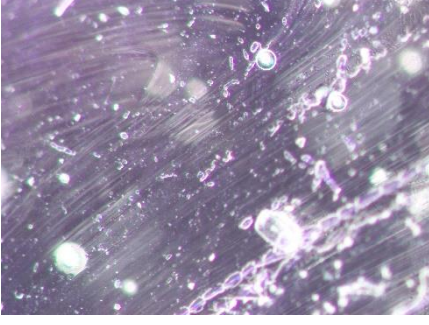
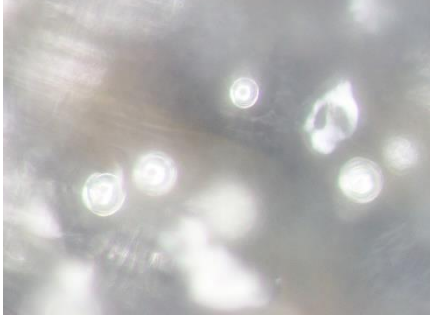
ตารางที่ 5.4 การส่องดูมลทินภายในแก้ว CBS ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงที่กำลังขยาย 10X (ต่อ)

แก้ว CBS	หลังหลอม	หลังแช่น้ำ
CBS4	 <ul style="list-style-type: none"> - แก้วมีสีขาวขุ่นผสมสีใส - เกิดรอยแตกของแก้ว - ภายในมีฟองอากาศ 	 <ul style="list-style-type: none"> - เกิดคราบของสารเคมีบริเวณผิวสีขาวที่เกิดจากการละลายน้ำ
CBS5	 <ul style="list-style-type: none"> - แก้วมีสีใส - เนื้อแก้วเป็นเนื้อเดียวกัน - ภายในมีฟองอากาศ 	 <ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีการเปลี่ยนแปลง
CBS6	 <ul style="list-style-type: none"> - แก้วมีสีขาวขุ่นผสมสีใส - เนื้อแก้วเป็นเนื้อเดียวกัน 	 <ul style="list-style-type: none"> - ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 5.5 การส่องดูมลทินภายในแก้วสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

แก้วCBS	เติมแก้วสีเขียว	เติมแก้วสีชา
CBS1	 <p data-bbox="699 663 753 694">56X</p> <ul data-bbox="513 707 756 784" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว 	 <p data-bbox="1161 663 1216 694">50X</p> <ul data-bbox="970 707 1212 784" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว
CBS2	 <p data-bbox="699 1146 753 1178">56X</p> <ul data-bbox="513 1191 756 1267" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว 	 <p data-bbox="1161 1146 1216 1178">50X</p> <ul data-bbox="970 1191 1212 1267" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว
CBS3	 <p data-bbox="699 1626 753 1657">56X</p> <ul data-bbox="513 1671 756 1747" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว 	 <p data-bbox="1161 1626 1216 1657">50X</p> <ul data-bbox="970 1671 1212 1747" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว

ตารางที่ 5.6 การส่องดูมลทินภายในแก้วสีด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (ต่อ)

แก้วCBS	เติมแก้วสีเขียว	เติมแก้วสีชา
CBS4	 <p data-bbox="699 654 746 685">56X</p> <ul data-bbox="507 698 746 779" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว 	 <p data-bbox="1161 654 1209 685">50X</p> <ul data-bbox="954 698 1193 779" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว
CBS5	 <p data-bbox="699 1124 746 1155">56X</p> <ul data-bbox="507 1169 794 1249" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาวจำนวนมาก 	 <p data-bbox="1161 1124 1209 1155">50X</p> <ul data-bbox="954 1169 1257 1249" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาวจำนวนมาก
CBS6	 <p data-bbox="699 1594 746 1626">56X</p> <ul data-bbox="507 1639 746 1720" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว 	 <p data-bbox="1161 1594 1209 1626">56X</p> <ul data-bbox="954 1639 1193 1720" style="list-style-type: none"> - ภายในมีฟองอากาศ - มีตำหนิสีขาว

5.3 การทดสอบการละลายน้ำโดยการแช่น้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

นำแก้วหลังหลอมมาแช่น้ำ สังเกตการละลายน้ำของแก้ว CBS เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ศึกษาความแข็งแรงของแก้ว CBS เพื่อนำไปปรับปรุงเป็นแก้วสี และนำแก้วสีมาสังเกตการละลายน้ำ แสดงดังตารางที่ 5.7 และเปรียบเทียบดังตารางที่ 5.8 ตามตัวอย่างลักษณะการละลายน้ำ

ตารางที่ 5.7 ตัวอย่างลักษณะการละลายน้ำ

เครื่องหมาย	ลักษณะการละลายน้ำ	รูปลักษณะแก้วและสีของน้ำ
✘	แก้วและน้ำไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง	
✓	แก้วเกิดการแตกตามรอยร้าวและน้ำเกิดสีขุ่นเล็กน้อย มีฟุ้งผงเล็กน้อย	
✓✓	แก้วเกิดการแตกละเอียดตามรอยร้าวและน้ำเกิดสีขุ่นขาวมาก มีฟุ้งผงปริมาณมาก	

ตารางที่ 5.8 การทดสอบการแช่แก้วในน้ำเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

สูตรแก้ว	ผลการแช่น้ำ	สูตรแก้ว	ผลการแช่น้ำ	สูตรแก้ว	ผลการแช่น้ำ
CBS1	✓	CBS1-G	✗	CBS1-B	✗
CBS2	✓✓	CBS2-G	✗	CBS2-B	✗
CBS3	✓✓	CBS3-G	✗	CBS3-B	✗
CBS4	✓	CBS4-G	✗	CBS4-B	✗
CBS5	✗	CBS5-G	✗	CBS5-B	✗
CBS6	✗	CBS6-G	✗	CBS6-6	✗

จากการทดสอบการแช่น้ำก่อนการหลอมแก้วสีเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แก้ว CBS สูตร 1 และสูตร 4 มีตะกอนผงแก้วเล็กน้อย แก้ว CBS สูตร 2 และสูตร 3 มีตะกอนผงแก้วจำนวนมาก ส่วนแก้ว CBS สูตร 5 และสูตร 6 ไม่มีตะกอนของผงแก้ว และหลังจากการหลอมแก้วสีนำมาทดสอบการแช่น้ำ ไม่มีตะกอนของผงแก้วและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง


5.4 การตรวจสอบอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้วและแก้วสี

จากการทดสอบอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้วและแก้วสีด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 650°C 700°C และ 750°C เป็นเวลา 10 นาที และ 15 นาที แสดงดังตารางที่ 5.11-5.13 เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแก้วและแก้วสีดังตัวอย่างตารางที่ 5.9-5.10

ตารางที่ 5.9 ตัวอย่างลักษณะการขึ้นรูปของแก้วและแก้วสี

เครื่องหมาย	ลักษณะ	ลักษณะด้านบน	ลักษณะด้านข้าง
✗	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง		
✓	แก้วติดกับผิวสัมผัส รูปร่างโค้งมนเล็กน้อย		

ตารางที่ 5.10 ตัวอย่างลักษณะการขึ้นรูปของแก้วและแก้วสี (ต่อ)

เครื่องหมาย	ลักษณะ	ลักษณะด้านบน	ลักษณะด้านข้าง
✓✓	แก้วติดกับเนื้อสัมผัส รูปร่างกลมมน		

ตารางที่ 5.11 การทดลองหาอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้ว CBS

สูตรแก้ว CBS	อุณหภูมิ 650°C		อุณหภูมิ 700°C		อุณหภูมิ 750°C	
	10 นาที	15 นาที	10 นาที	15 นาที	10 นาที	15 นาที
CBS1	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓✓
CBS2	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓✓
CBS3	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓✓
CBS4	✓	✓	✓	✓	✓	✓✓
CBS5	✓	✓	✓	✓	✓	✓✓
CBS6	✗	✗	✓	✓	✓	✓✓

ตารางที่ 5.12 การทดลองหาอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้ว CBS เติมแก้วสีเขียว

สูตรแก้ว	อุณหภูมิ 650°C		อุณหภูมิ 700°C		อุณหภูมิ 750°C	
	10 นาที	15 นาที	10 นาที	15 นาที	10 นาที	15 นาที
CBS1-G	✗	✗	✗	✗	✓	✓✓
CBS2-G	✗	✗	✗	✗	✓	✓✓
CBS3-G	✗	✗	✗	✗	✓	✓✓
CBS4-G	✗	✗	✗	✗	✓	✓✓
CBS5-G	✗	✗	✗	✗	✓	✓✓
CBS6-G	✗	✗	✗	✗	✓	✓✓

ตารางที่ 5.13 การทดลองหาอุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้ว CBS เติมแก้วสีชา

สูตรแก้ว	อุณหภูมิ 650°C		อุณหภูมิ 700°C		อุณหภูมิ 750°C	
	10 นาที	15 นาที	10 นาที	15 นาที	10 นาที	15 นาที
CBS1-B	×	×	×	×	✓	✓✓
CBS2-B	×	×	×	×	✓	✓✓
CBS3-B	×	×	×	×	✓	✓✓
CBS4-B	✓	✓	✓	✓	✓	✓✓
CBS5-B	×	✓	✓	✓	✓	✓✓
CBS5-B	×	×	×	×	✓	✓✓

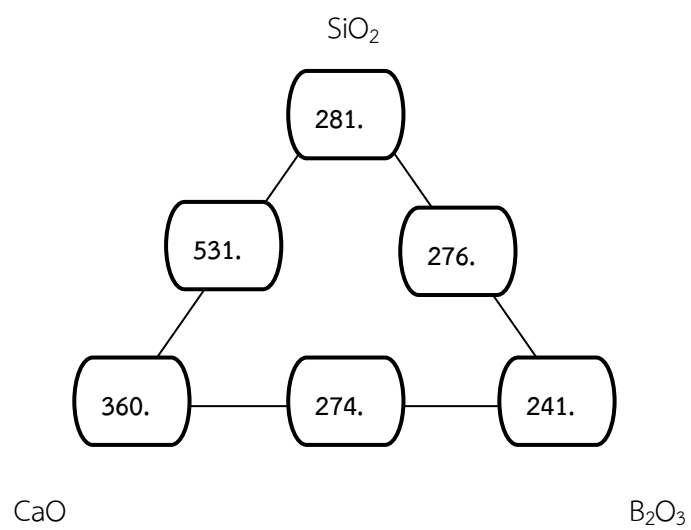
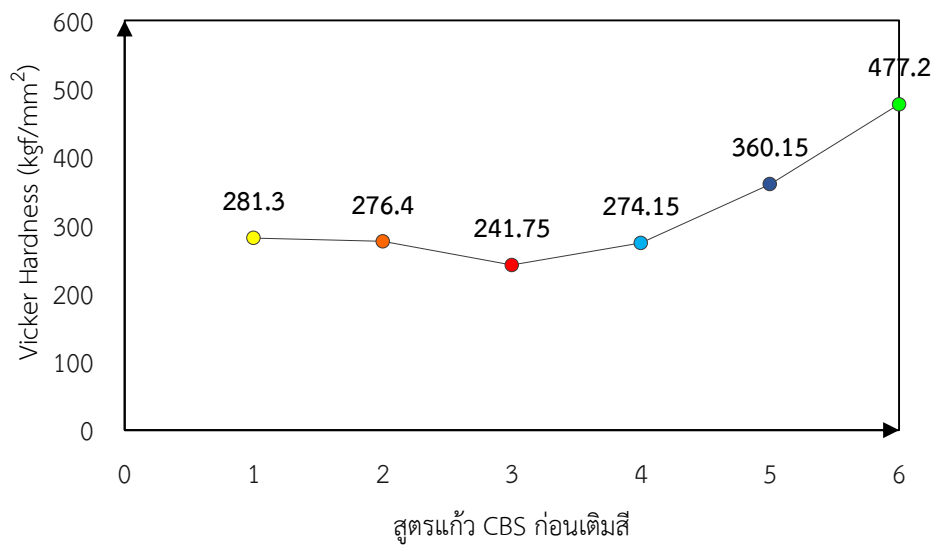
จากตารางที่ 5.7-5.9 ผลการทดลองหาอุณหภูมิการขึ้นรูป ที่อุณหภูมิ 650°C 700°C และ 750°C เป็นเวลา 10 นาที และ 15 นาที พบลักษณะการขึ้นรูปดังนี้

- อุณหภูมิ 650°C และ 700°C แก้วทุกสูตรไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากอุณหภูมิต่ำกว่าที่แก้วเริ่มอ่อนตัว จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแก้วเล็กน้อยเท่านั้น

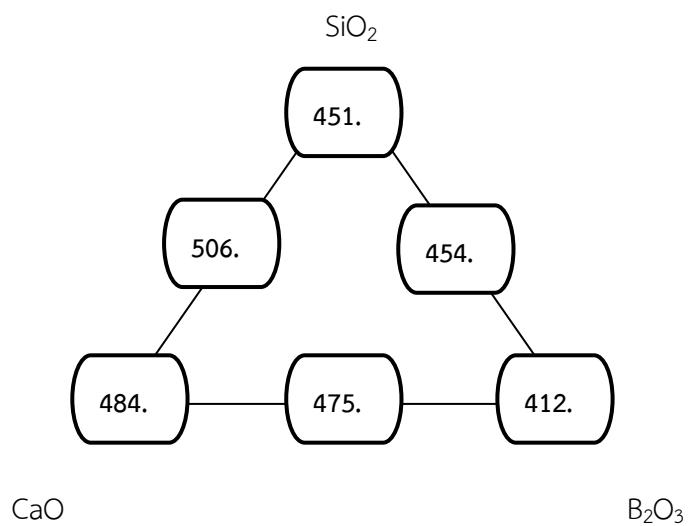
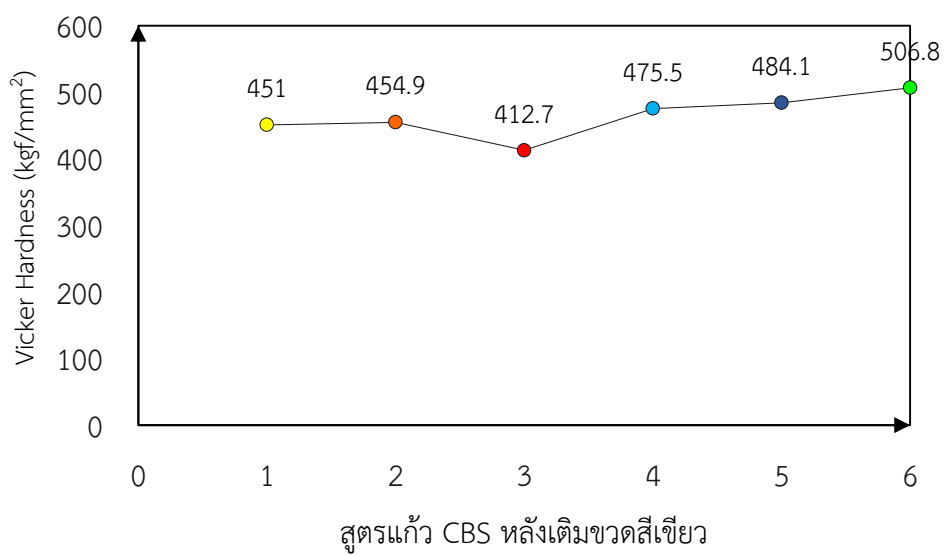
- แก้วสามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิ 750°C ใช้เวลา 10 นาที จะป็นแก้วสูตร 1 สูตร 2 สูตร 3 และแก้วที่สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิ 750°C ใช้เวลา 15 นาที คือแก้วสูตร 4 สูตร 5 สูตร 6 และแก้วสี เนื่องจากเป็นอุณหภูมิและเวลาที่แก้วเริ่มอ่อนตัว จึงเป็นอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมในการขึ้นรูป

5.5 การตรวจวัดความแข็งด้วยเครื่อง Vickers Hardness

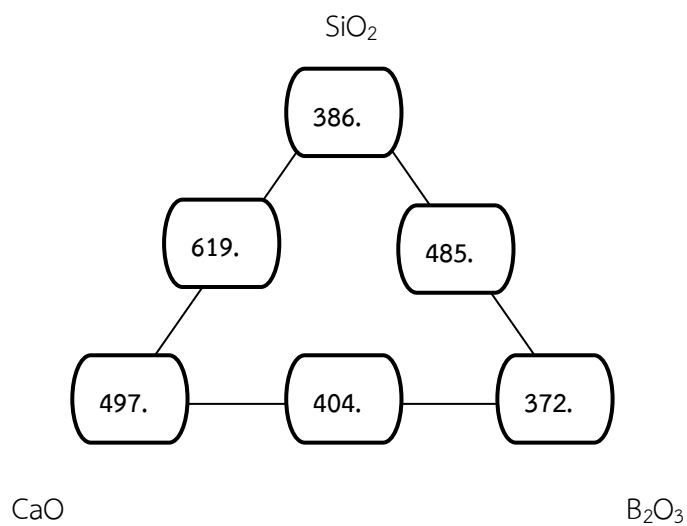
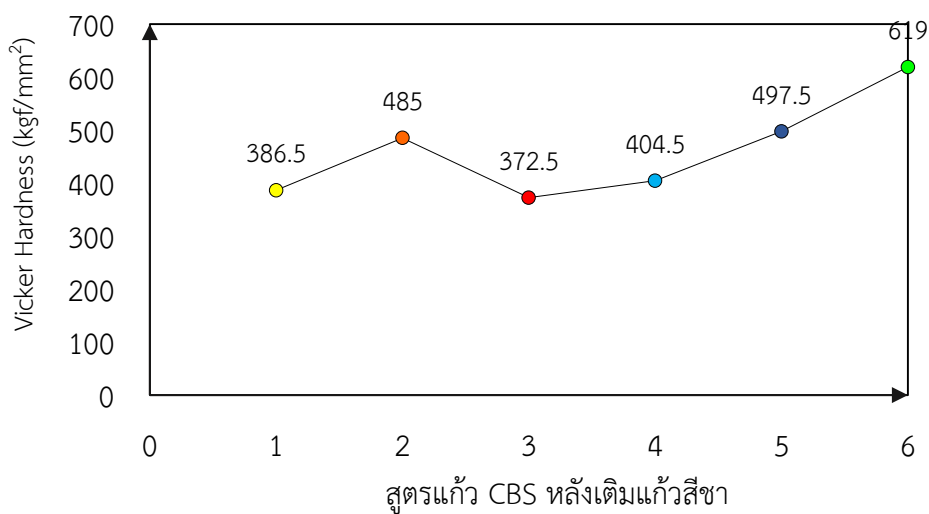
การทดสอบความแข็งของแก้วและแก้วสี หลังการหลอมด้วยเครื่อง Vickers Hardness ใช้น้ำหนักหัวกดอยู่ที่ 50 gf (gram force) โดยการทำการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ดูความแข็งของแก้ว CBS ก่อนและหลังเติมแก้วสีเขียวและแก้วสีชา ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.3- 5.5



รูปที่ 5.3 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสูตรแก้ว CBS ก่อนเติมสี



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสูตรแก้ว CBS หลังเติมแก้วสีเขียว



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบความแข็งของสูตรแก้ว CBS หลังเติมแก้วสีชา

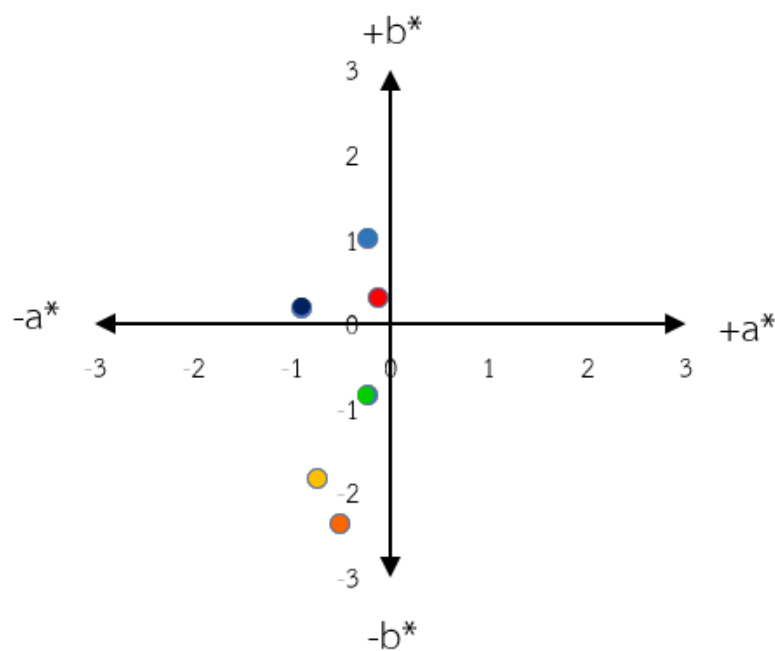
ผลการทดสอบวัดความแข็งของแก้วและแก้วสี จากการทดสอบก่อนการเติมสีปรากฏว่าแก้ว CBS ที่มีความแข็งคือสูตร CBS6 และแก้ว CBS ที่มีการเติมแก้วสีเขียวและแก้วสีชาไปนั้นมีความแข็งที่เพิ่มมากยิ่งขึ้นจากสูตรตั้งต้น

5.6 การตรวจวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV/Visible Spectrophotometer

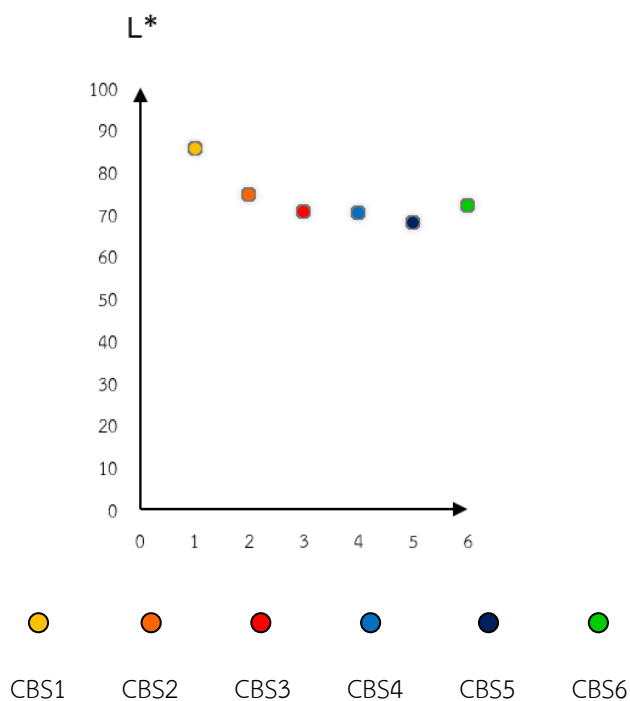
การวิเคราะห์แก้วและแก้วสีหลังการหลอม ด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer ที่ช่วงความยาวคลื่น 250- 800 นาโนเมตร โดยทำการวิเคราะห์แก้วและแก้วสี เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงสี ซึ่งได้ค่าออกมาเป็น L^* a^* และ b^* ดังตารางที่ 5.14 - 5.16 และแสดงดังรูปที่ 5.6 - 5.8 นำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบแต่สูตร

ตารางที่ 5.14 ผลการตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้ว CBS

สูตรแก้ว	ค่า L^* a^* b^*		
	L^*	a^*	b^*
CBS1	85.79	-0.74	-1.84
CBS2	74.45	-0.51	-2.38
CBS3	70.60	-0.12	0.30
CBS4	70.20	-0.23	1.01
CBS5	67.88	-0.90	0.19
CBS6	72.07	-0.24	-0.85



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$

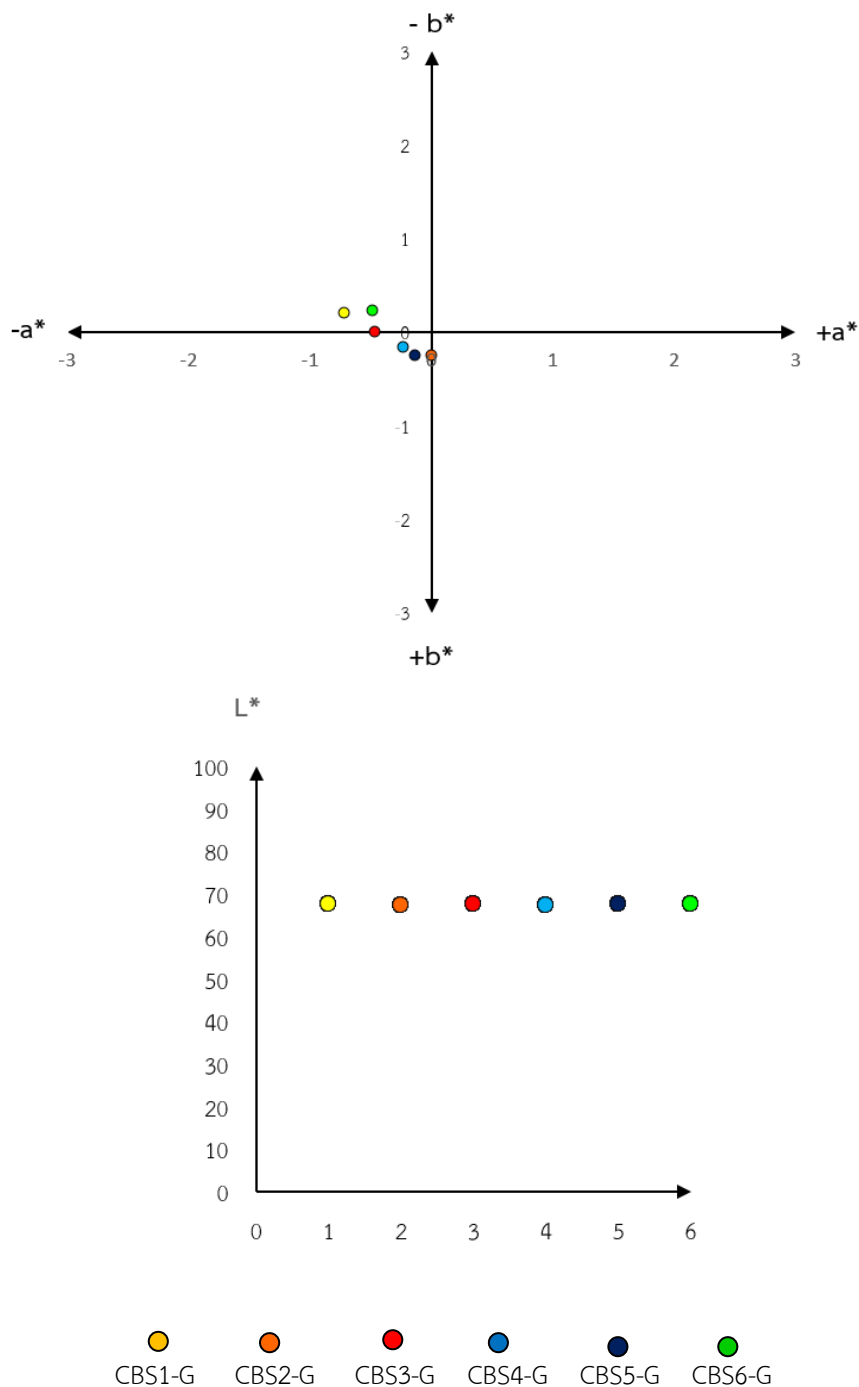


รูปที่ 5.7 กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS ในระบบ CIE L*a*b* (ต่อ)

จากตารางที่ 5.10 และรูปที่ 5.7 เปรียบเทียบค่า L* ของแก้ว CBS ก่อนการเติมสี พบการเปลี่ยนแปลงของแก้ว CBS ที่มีสีขุนขาวจะมีค่า L* ที่สูง และแก้วที่ได้ค่า L* ต่ำลงมา ได้แก้วที่มีความใส เปรียบเทียบค่า a* b* อยู่ในวงสี่เหลี่ยม

ตารางที่ 5.15 ผลการตรวจวัดการดูดกลืนสีของแก้ว CBS เติมขวดแก้วสีเขียว

สูตรแก้ว	ค่า L* a* b*			ΔE
	L*	a*	b*	
CBS1-G	67.70	-0.72	0.21	18.20
CBS2-G	67.29	0	-0.25	7.65
CBS3-G	67.76	-0.47	0.01	2.86
CBS4-G	67.49	-0.23	-0.16	2.95
CBS5-G	67.75	-0.14	-0.24	0.88
CBS6-G	67.74	-0.49	0.24	4.47

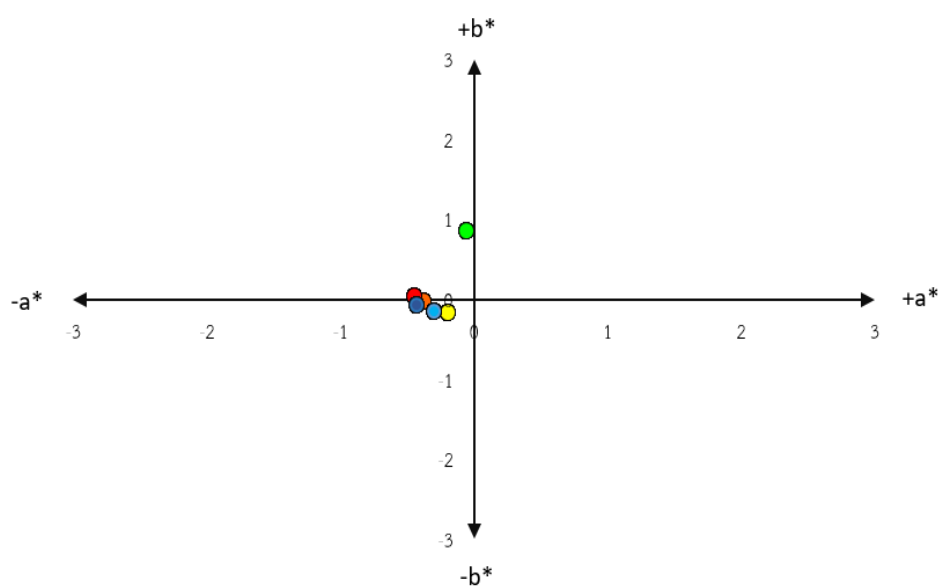


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS เติมแก้วสีเขียว ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$

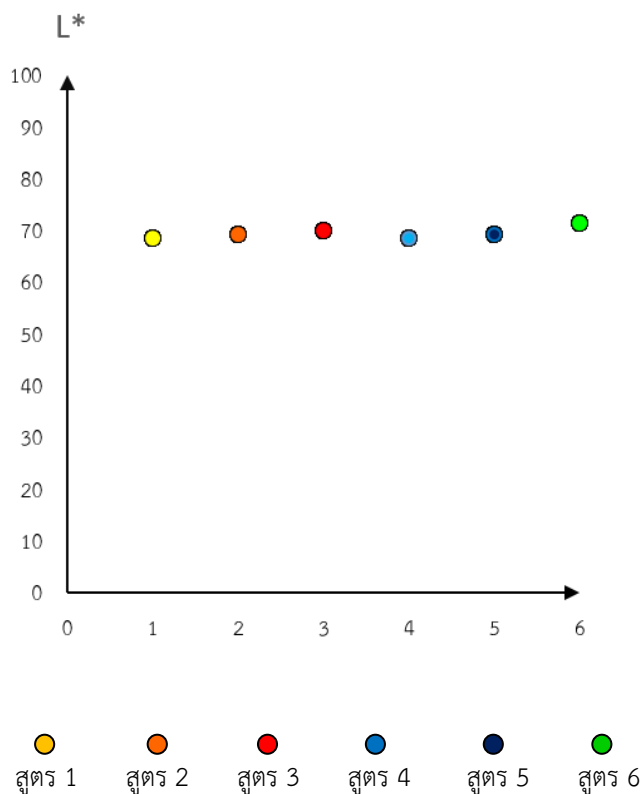
จากตารางที่ 5.15 และรูปที่ 5.8 เปรียบเทียบค่า a^* และ b^* พบว่าสูตร 1 สูตร 3 สูตร 6 มีค่าสีที่อยู่ในช่วง $-a^* + b^*$ ทำให้สีของแก้วอยู่ในช่วงสีเขียวและสีเหลือง และสูตร 2 สูตร 4 สูตร 5 มีค่าอยู่ในช่วง $-a^* - b^*$ จึงทำให้สีของแก้วอยู่ในช่วงสีเขียวยและสีฟ้า และค่า L^* มีค่าความสว่างอยู่ในช่วงที่ 67

ตารางที่ 5.16 ผลการตรวจวัดการดูกลืนสีของแก้ว CBS เต็มขวดแก้วสีชา

สูตรแก้ว	ค่า L^* a^* b^*			ΔE
	L^*	a^*	b^*	
CBS1-B	68.50	-0.19	-0.17	17.38
CBS2-B	69.19	-0.37	-0.03	5.76
CBS3-B	69.86	-0.44	0.04	0.85
CBS4-B	68.50	-0.30	-0.16	2.06
CBS5-B	69.13	-0.43	-0.07	1.36
CBS6-B	71.42	-0.05	0.85	1.83



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS เต็มแก้วสีชา ในระบบ CIE $L^*a^*b^*$



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงค่าสีของแก้ว CBS เติมแก้วสีชา ในระบบ CIE L*a*b*

จากตารางที่ 5.16 และรูปที่ 5.10 เปรียบเทียบค่า a^* และ b^* พบว่าสูตร 1 สูตร 2 สูตร 4 สูตร 5 มีค่าสีที่อยู่ในช่วง $-a^* -b^*$ ทำให้สีของแก้วอยู่ในช่วงสีเขียวและสีฟ้า และสูตร 3 สูตร 6 มีค่าสีอยู่ในช่วง $-a^* +b^*$ จึงทำให้สีของแก้วอยู่ในช่วงสีเขียวและสีเหลือง และค่า L^* มีความสว่างอยู่ในช่วง 68.50 - 71.42

5.7 การตรวจวัดองค์ประกอบภายในของแก้วสีด้วยเครื่อง X-ray fluorescence

ผลการหาล่องค์ประกอบทางเคมีเพื่อหาธาตุให้สีของแก้วสีที่ได้จากขวดเบียร์ตราช้างและขวดเบียร์ตราสิงห์ แสดงดังตารางที่ 5.17 - 5.20 จากการศึกษาธาตุให้สีของแก้วสีได้ปริมาณออกไซด์ที่เป็นธาตุให้สีของแก้ว CBS ที่เติมแก้วสีเขียวพบ Fe และ Cr เป็นตัวให้สีของแก้ว และแก้ว CBS ที่เติมขวดสีชาพบ Fe และพบ Cr ในปริมาณน้อย ซึ่งเป็นออกไซด์ที่เป็นธาตุให้สีของแก้ว

ตารางที่ 5.17 องค์ประกอบภายในขวดเบียร์ตราช้าง

องค์ประกอบทางเคมีของขวดเบียร์ตราช้าง (wt%)				
Ca	Si	Fe	K	Cr
34.22	62.21	1.09	1.46	1.02

หมายเหตุ เครื่อง XRF วิเคราะห์ได้เฉพาะธาตุ Al-U

ตารางที่ 5.18 องค์ประกอบภายในขวดเปียร์ตราสิงห์

องค์ประกอบทางเคมีของขวดเปียร์ตราสิงห์ (wt%)			
Ca	Si	Fe	K
34.49	63.58	0.86	1.07

หมายเหตุ เครื่อง XRF วิเคราะห์ได้เฉพาะธาตุ Al-U

ตารางที่ 5.19 องค์ประกอบภายในของแก้วสีที่ได้จากการเติมขวดสีเขียว

แก้วสีเติม แก้วสีเขียว	องค์ประกอบเคมี (wt%)					
	Si	Ca	Zn	Fe	Cr	Zr
สูตร 1	67.96	24.75	6.37	0.48	0.38	0.04
สูตร 2	75.13	19.59	4.56	0.38	0.30	0.03
สูตร 3	71.35	23.70	4.02	0.48	0.40	0.04
สูตร 4	66.14	28.69	4.31	0.46	0.35	0.03
สูตร 5	63.17	31.66	4.34	0.45	0.32	0.04
สูตร 6	65.58	28.00	5.60	0.45	0.34	0.03

หมายเหตุ เครื่อง XRF วิเคราะห์ได้เฉพาะธาตุ Al-U

ตารางที่ 5.20 องค์ประกอบภายในของแก้วสีที่ได้จากการเติมขวดสีชา

แก้วสีเติม แก้วสีชา	องค์ประกอบเคมี (wt%)					
	Si	Ca	Zn	Fe	Cr	Zr
สูตร 1	72.41	21.53	5.44	0.43	0.16	0.02
สูตร 2	72.34	21.92	5.31	0.32	0.08	0.03
สูตร 3	71.23	24.36	3.88	0.42	0.09	0.03
สูตร 4	67.33	27.96	4.22	0.36	0.08	0.02
สูตร 5	58.71	35.42	5.21	0.50	0.11	0.04
สูตร 6	62.86	30.30	6.29	0.42	0.09	0.03

หมายเหตุ เครื่อง XRF วิเคราะห์ได้เฉพาะธาตุ Al-U

5.8 การทำชิ้นงานเครื่องประดับ

1. นำแก้วสีหลังหลอม มาเลือกแก้วที่มีการขึ้นรูปทรงกลมและไม่มีการแตกร้าว เนื้อแก้วมีสีสวยใสมาทำชิ้นงานเครื่องประดับ

ตารางที่ 5.21 การเลือกแก้วมาทำเครื่องประดับ

การขึ้นรูปแก้ว CBS หลังเติมสีจากขวดเบียร์			
	CBS1-G แก้วใส มีการ แตกร้าว รูปทรงไม่เป็นทรง กลม		CBS1-B แก้วใส มีการแตกร้าว มีคิบบที่เกิดจากการเท และมีคราบจากแผ่น สแตนเลส
	CBS2-G แก้วใส มีความหนืด ทำให้เนื้อแก้วติดกับ เบ้าครุชชีเบล		CBS2-B แก้วใส มีทรงกลม มีคิบบที่เกิดจากการ เทเล็กน้อย
	CBS3-G แก้วใส มีทรงกลม มีคิบบที่เกิดจากการ เทเล็กน้อย		CBS3-B แก้วใส มีการ แตกร้าว รูปทรงไม่ เป็นทรงกลมมีคิบบที่ เกิดจากการเท
	CBS4-G แก้วใส มีทรงกลม มี คิบบที่เกิดจากการเท เล็กน้อย		CBS4-B แก้วใส มีทรงกลม มี คิบบที่เกิดจากการเท เล็กน้อย
	CBS5-G แก้วมีตำหนิจากการ หลอมไม่ละลาย มี การแตกร้าว		CBS5-B แก้วมีตำหนิจากการ หลอมไม่ละลาย มี การแตกร้าว
	CBS6-G แก้วมีทรงกลมและใส สะอาดไม่เกิดรอย แตกร้าวและมีคิบบที่ เกิดจากการเท เล็กน้อย		CBS6-B แก้วใส มีการ แตกร้าว และมีคราบ ที่เกิดจากแผ่นสแตน เลส

2. ทำตัวเรือนเครื่องประดับ และนำแก้วเข้าตัวเรือนเครื่องประดับ



รูปที่ 5.11 การนำแก้วเข้าตัวเรือนเครื่องประดับ

3. แก้วสีที่นำมาเข้าตัวเรือน เป็นเครื่องประดับ



รูปที่ 5.12 เครื่องประดับที่เสร็จสมบูรณ์



รูปที่ 5.13 เครื่องประดับจากแก้วสี

บทที่ 6 สรุปผล และผลผลิต

6.1 สรุปผลการวิจัย ส่วนที่ 1 การผสมแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษพลอยสี

จากการศึกษาคุณสมบัติของแก้วสีเพื่อการขึ้นรูปร่วมกับพลอยคอร์รันดัม โดยการผสมพลอย การเน็ต พลอยเพอริดอตและเหล็กออกไซด์ ในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้เกิดสีในแก้ว ทำการหลอม แก้วด้วยเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,100°C ศึกษาแก้วหลังการหลอมโดยนำแก้วที่ได้ในแต่ละ ส่วนผสมไปตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรมิเตอร์ ตรวจวัดปริมาณ องค์ประกอบธาตุในแก้วด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ทดสอบคุณสมบัติของแก้วสี ทดสอบ อุณหภูมิการขึ้นรูปของแก้วสีร่วมกับพลอยด้วยเตาอบไฟฟ้า และทดสอบการเกาะติดของแก้วสีกับ พลอยเนื้อแข็ง ได้ผลการทดลองดังนี้

ผลการหลอมแก้ว

เมื่อทำการหลอมแก้ว ด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1,100°C พบว่า แก้วที่เติมพลอยการเน็ต พลอย เพอริดอต และเหล็กออกไซด์ มีสีต่างกัน เนื่องจากตัวให้สีของพลอยแต่ละชนิดต่างกัน โดยแก้วที่เติม พลอยการเน็ตจะมี Fe^{3+} Fe^{2+} และ Mn เป็นตัวให้สี ทำให้แก้วมีสีฟ้า และสีเขียวเข้มเกือบดำ แก้วที่ เติมพลอยเพอริดอตจะมี Fe^{2+} เป็นตัวให้สี ทำให้แก้วมีสีเขียวเหลือง และแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์จะมี Fe^{3+} เป็นตัวให้สีทำให้แก้วเป็นสีชาเกือบดำ ซึ่งแก้วจะมีสีเข้มขึ้นตามอัตราส่วนของพลอยการเน็ต พลอยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ที่เติมลงไป

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer

การวิเคราะห์แก้วสีหลังจากการหลอม ด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer ที่ช่วงความ ยาวคลื่น 250 -800 นาโนเมตร พบว่า แก้วที่เติมพลอยชนิดเดียวกันจะให้สีที่อยู่ในโทนใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการทดลองแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงสีมากที่สุดคือ แก้วเติมเหล็กออกไซด์ แก้วเติมพลอยการ เน็ต และแก้วที่เติมพลอยเพอริดอต ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence

ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของแก้วสี ก่อนการหลอมและหลังการหลอมพบว่า แก้วหลังการหลอมทุกสูตรจะมีสีเข้มขึ้นตามปริมาณของธาตุให้สีที่อยู่ในพลอยการเน็ต พลอยเพอริ ดอต และเหล็กออกไซด์ที่เติมลงไป

ผลการศึกษาคุนสมบัติของแก้วสี

การทดสอบคุณสมบัติความอ่อนตัว หลังการอบด้วยเตาไฟฟ้าพบว่า อุณหภูมิที่แก้วมีการ เปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ชัดเจนที่สุดหลังการอบคือ 700°C โดยที่แก้วเติมพลอยการเน็ต 15% แก้วเติม พลอย เพอริดอต 5% 10% 15% และแก้วเติมเหล็กออกไซด์ 5% 10% 15% แก้วมีความอ่อนตัวมาก เนื่องจากความหนืดของแก้วลดลงมากแต่แก้วยังมีความตึงผิวอยู่ในลักษณะที่แก้วยังคงรูปเป็นก้อน กลมได้

การทดสอบความเปราะของแก้ว พบว่าแก้วที่มีความเปราะมากคือ แก้วที่อบในอุณหภูมิ 700°C โดยแก้วเกิดการแตกหักและหลังจากการปล่อยตก โดยสูตรแก้วที่เกิดการแตกหัก ได้แก่สูตรแก้วใส แก้วเติมพลอยการเน็ต 5% 10% และ 15%

ผลการทดสอบอุณหภูมิใช้งานของแก้วสี

จากการทดลอง พบว่าแก้วที่เติมพลอยการเน็ต พลอยเพอริดอต และเหล็กออกไซด์ ใน อัตราส่วนที่ต่างกัน มีผลต่ออุณหภูมิการใช้งานของแก้ว โดยสูตรแก้วที่มีการทำงานได้ดีที่สุดคือ

แก้วที่เติมฟลอยเพอริตอตและแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วน 5% 10% 15% ซึ่งแก้วสามารถเกาะติดกับฟลอยได้ในลักษณะที่ก้อนฟลอยจมลงในเนื้อแก้วที่อุณหภูมิ 700°C เนื่องจากตัวแก้วเริ่มมีการละลาย ทำให้ความหนืดของแก้วลดลง จึงเพิ่มความสามารถในการเกาะติดกับฟลอยได้มากขึ้น

ผลการทดสอบการเกาะติด

จากการทดลองการตกกระแทกพบว่า แก้วที่เติมฟลอยเพอริตอตและแก้วที่เติมเหล็กออกไซด์ในอัตราส่วน 5% 10% 15% ที่อุณหภูมิ 700°C แก้วสามารถทนการกระแทกได้ โดยที่ตัวแก้วและฟลอยไม่แตกหรือหลุดออกจากกัน หลังการตกกระแทก ดังนั้นลักษณะของการเกาะติดมีผลต่อการตกกระแทก เนื่องจากสูตรแก้วดังกล่าวมีความสามารถในการเกาะติดกับฟลอยได้ดี

6.2 สรุปผลการวิจัย ส่วนที่ 2 การผสมแก้วอุณหภูมิต่ำร่วมกับเศษแก้วสี

จากการศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติของแก้ว CBS เพื่อทำแก้วสีใช้ในการทำเครื่องประดับ โดยการเติมสีแก้วโดยใช้ขูดสีขาวและขูดสีเขียว ที่เหลือใช้จากเครื่องต้ม เพื่อให้เกิดสีในแก้ว CBS ทำการหลอมแก้วด้วยเตาหลอมไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 1100°C ศึกษาแก้วและแก้วสีหลังหลอมโดยนำไปทดสอบการขึ้นรูปของแก้วด้วยเตาอบไฟฟ้า ทดสอบการละลายน้ำ ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงสีด้วยเครื่อง UV/Visible-spectrophotometer ทดสอบความแข็งจุลภาคแบบ Vickers และ ตรวจวัดปริมาณองค์ประกอบธาตุด้วยเครื่อง X-ray fluorescence ได้ผลการทดลองดังนี้

ผลการหลอมแก้วและแก้วสี

จากการศึกษาการหลอมแก้ว พบว่าแก้ว สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 หลอมได้แก้วที่มีสีขาวขุ่น มีปริมาณ CaO ร้อยละ 10 ของอัตราส่วนผสม แก้ว สูตร 4 และสูตร 6 หลอมได้แก้วที่มีสีขาวขุ่นผสมสีใส มีปริมาณ CaO ร้อยละ 15 ของอัตราส่วนผสม และแก้ว CBS สูตร 5 หลอมได้แก้วที่มีสีใส มีปริมาณ CaO ร้อยละ 20 ของอัตราส่วนผสม ซึ่งแก้วแต่ละสูตรจะมีสีขาวขุ่นและสีใส ตามอัตราส่วนผสมของ CaO ในแต่ละสูตร เมื่อมีปริมาณ CaO มากจะเกิดสีใส และเมื่อมีปริมาณ CaO น้อยจะเกิดสีขาวขุ่น

ผลการศึกษาอุณหภูมิการขึ้นรูปแก้ว

จากการนำแก้วและแก้วสี มาทดสอบอุณหภูมิการขึ้นรูป พบว่าที่อุณหภูมิ 750°C เป็นอุณหภูมิ ที่ทำให้แก้วและแก้วสีขึ้นรูป

ผลการส่องดูมลทินภายในแก้ว

จากการส่องดูมลทินภายในแก้ว พบว่าแก้วและแก้วสีเกิดฟองอากาศเนื่องจากการเทลงบนแม่พิมพ์และปล่อยให้เย็นนอกเตา และแก้วที่มีการเติมสีเกิดมลทินภายในแก้วเป็นสีขาว เนื่องจากองค์ประกอบของแก้วไม่หลอมเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด

ผลการทดสอบการละลายน้ำหลังหลอมแก้ว

จากการทดสอบการละลายน้ำของแก้ว CBS ปรากฏว่าสูตร 1 สูตร 2 สูตร 3 และสูตร 4 เกิดการละลายน้ำ สูตร 5 และสูตร 6 เป็นแก้วสีที่ไม่เกิดการละลายน้ำ เนื่องจากมีปริมาณ ธาตุ Na P ที่เป็นตัวปรับปรุงคุณสมบัติในปริมาณมาก ทำให้เกิดการละลายน้ำขึ้น

ผลการทดสอบความแข็งแก้ว

จากการวัดความแข็งแก้ว CBS ก่อนการเติมสี ความแข็งของแก้วขึ้นอยู่กับปริมาณสัดส่วนของสาร CaO, B₂O₃, SiO₂ จากแก้ว CBS สูตร 1, 2, 3 ที่มีปริมาณ CaO เท่ากัน และปริมาณ B₂O₃

กับ SiO_2 ในสัดส่วนที่ต่างกันพบว่าแก้วที่มีปริมาณ B_2O_3 มากจะได้แก้วที่มีความแข็งต่ำลงมา และแก้วที่มีปริมาณ SiO_2 มากจะได้แก้วที่มีค่าความแข็งมาก

แก้ว CBS สูตร 4 มีปริมาณ B_2O_3 ที่เท่ากับแก้ว CBS สูตร 2 และสัดส่วน SiO_2 ที่มีปริมาณน้อยกว่าสูตร 2 และมีปริมาณ CaO มากกว่าสูตร 2 ทำให้แก้วสูตร 4 มีความแข็งน้อยกว่าสูตร 2

แก้ว CBS สูตร 5 และสูตร 6 มีปริมาณ B_2O_3 ในปริมาณที่เท่ากัน แต่สัดส่วน SiO_2 และ CaO แตกต่างกัน ซึ่งสูตร 5 มีปริมาณ CaO มากกว่า และสัดส่วน SiO_2 ปริมาณน้อยกว่า ทำให้ได้แก้วที่มีความแข็งน้อยกว่าสูตร 6 และสูตร 6 ที่มีปริมาณ CaO น้อยกว่า และมี SiO_2 ที่มากกว่าจะได้แก้วที่มีความแข็งมากกว่า และการทดสอบแก้วสี ปรากฏว่าแก้วที่เติมสีจากขวดสีขาและสีเขียวลงไปทำให้ได้แก้วที่มีความแข็งมากยิ่งขึ้น

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer

การวิเคราะห์แก้วและแก้วสีหลังการหลอม ด้วยเครื่อง UV/Vis Spectrophotometer ในช่วงความยาวคลื่น 250-800 นาโนเมตร พบว่าสูตรที่เติมขวดสีขา มีสีในโทนสีเขียวและสีเหลือง และสูตรที่เติมขวดสีเขียว ได้สีโทนสีเขียว ซึ่งจากการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงสีของขวดสีเขียวที่นำมาเป็นส่วนผสมจากสีขาเป็นสีเขียวอ่อน

ผลการวิเคราะห์แก้วสีด้วยเครื่อง X-ray fluorescence

จากการศึกษาการหลอมแก้วสีที่ได้จากขวดสีขา และการหลอมแก้วสีที่ได้จากขวดสีเขียว มีองค์ประกอบธาตุจากเหล็ก โครเมียม และเซอร์โคเนียม ที่เพิ่มขึ้นมาจากสูตรตั้งต้น ขวดเบียร์ ตราช้างจะมีปริมาณ โครเมียมที่มากกว่า ซึ่งจะได้สีเขียวที่เข้มมากกว่าการเติมขวดสีเขียว จึงศึกษาพบว่าเหล็ก และโครเมียมนี้เป็นธาตุในการให้สีของแก้ว (Colored glass. 2562, ออนไลน์)

การเลือกชิ้นงานทำเครื่องประดับ

จากการทดลองแก้วสีที่เหมาะสมในการนำมาเป็นเครื่องประดับจะใช้แก้วสีสูตรที่ 6 ซึ่งพิจารณาจากอุณหภูมิการขึ้นรูป ความแข็ง และการละลายน้ำ พบว่าแก้ว CBS สูตรที่ 6 อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดีที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส มีความหนืดน้อย สามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีความแข็งมากกว่าสูตรอื่น ไม่มีการละลายน้ำหลังการเติมแก้วสี จึงเลือกใช้แก้วสีสูตร 6 ในการทำเครื่องประดับ

6.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาในครั้งนี้มีข้อเสนอแนะคือ

1. ไม่ควรนำแก้วเข้าเตาอบร่วมกับแผ่นโลหะ เพราะจะเกิดการแตกร้าวภายในเนื้อแก้วและจะเกิด ออกไซด์จากผิวโลหะ
2. ไม่ควรนำแก้วจุ่มลงในขณะร้อน เพราะจะเพิ่มปริมาณฟองอากาศภายในเนื้อแก้วทำให้แก้วเกิดการเปราะแตก
3. แก้วและแก้วสีที่ได้ไม่ควรทำอีนาเมล เพราะแก้วเกิดการแตกร้าวไม่จับตัวกัน

6.4 ผลผลิต (Output)

จากผลการวิจัย ทำให้ได้สูตรแก้วอุณหภูมิต่ำหลายสูตรที่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 เครื่องประดับจากแก้วสี

รายงานสรุปการเงิน

เลขที่โครงการระบบบริหารงานวิจัย (NRMS 13 หลัก) 2559A10802144 สัญญาเลขที่ 158/2559
โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559 มหาวิทยาลัยบูรพา

ชื่อโครงการ การพัฒนาเครื่องประดับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากแก้วอุณหภูมิที่ปราศจากตะกั่ว
โครงการวิจัยประเภทโครงการวิจัยต่อเนื่อง 2 ปี (ปีที่ 2)

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุญ.....

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2562

ระยะเวลาดำเนินการ 3 ปี 11 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2558

รายรับ

จำนวนเงินที่ได้รับ

งวดที่ 1 (50%)	207,500	บาท	เมื่อ วันที่	6 มกราคม 2559
งวดที่ 2 (40%)	166,000	บาท	เมื่อ วันที่	11 มีนาคม 2562
งวดที่ 3 (10%)	41,500	บาท	เมื่อ วันที่	15 กันยายน 2562
			รวม	415,000 บาท

รายจ่าย

รายการ	งบประมาณที่ตั้งไว้	งบประมาณที่ใช้จริง	จำนวนเงิน คงเหลือ/เกิน
1. งบบุคลากร	156,000	156,000	-
2. ค่าตอบแทน	38,500	38,500	-
3. ค่าใช้สอย	99,000	76,000	23,000
4. ค่าวัสดุ	50,000	75,000	-25,000
5. ค่าครุภัณฑ์	30,000	28,000	2,000
6. ค่าธรรมเนียมอุดหนุนสถาบัน	41,500	41,500	-
รวม	415,000	415,000	-

(ผศ.ดร.สายสมร นิยมสรวนุญ)
ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

บรรณานุกรม

- จิตรา เกตุแก้ว, จักรพงษ์แก้วขาว และคณะ. (2551). การศึกษาคุณสมบัติทางแสงและแม่เหล็กของ แก้วเจือแมงกานีสไดออกไซด์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และอนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล. (ม.ป.ป.). วัสดุโลหะ. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- น้อยอร่าม , ก., แซ่อิง, น. & สุชีวะกุล, ล., 2555. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตยาสีร่อนที่ ปราศจากตะกั่วโดยใช้เปลือกไข่และวัสดุเหลือทิ้งมาเป็นวัตถุดิบ, กรุงเทพมหานคร: โครงการ วิทยาศาสตร์ ระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- ประสิทธิ์ ปุระชาติ. (2549). การเป่าแก้วเบื้องต้น. สำนักวิทยบริการและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี.
- ปัญจวรรณ ธนสุทธิพิทักษ์. (2549). อัญมณีวิทยาเบื้องต้น. เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เพอริตอต. แร่โอลิวีน. วันที่สืบค้นข้อมูล 10 กันยายน 2560, เข้าถึงได้จาก <http://www.gemhut.com/almandte.htm>.
- แร่การ์เนต. วันที่สืบค้นข้อมูล 10 กันยายน 2560, เข้าถึงได้จาก <http://www.gemhut.com/almandte.htm>.
- วรรณก้อน, อ., สอนลา, ว. & เฉยเจริญ, ภ., 2012. สูตรเคลือบเซรามิกจากวัสดุเหลือทิ้ง 100%, กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- วิทยาศาสตร์บริการ, กรม. (2556). ความรู้เบื้องต้นทางด้านแก้ว. กรุงเทพฯ: สำนักพัฒนาศักยภาพ นักวิทยาศาสตร์ห้องปฏิบัติการศูนย์เชี่ยวชาญด้านแก้ว กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- สถาบันพัฒนาการศึกษานอกระบบภาคตะวันออก, 2549. การหล่อสิ่งประดิษฐ์จากเศษพลอย. [Online] Available at: <http://eastern.nfe.go.th/nfe/8103-02-0023.htm>
- สุรศักดิ์ โกลิพันธ์. (2534). วัสดุศาสตร์. กรุงเทพฯ: เอกสารประกอบการศึกษาวิชาชั้น 461 ภาควิชาช่างปั้นดินเผา คณะวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ วิทยาลัยครูพระนคร.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. (2527). มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมวิธีทดสอบ ความต้านทานทาง เคมีของภาชนะแก้วบรรจุยา (มอก. 501 – 2527). กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐาน ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- 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.
- Haibin Shao, TingweiWang. (2009). Preparation and properties of CaO–SiO₂–B₂O₃ glass-ceramic at low temperature. *Journal of Alloys and Compounds*. Volume 484, Issues 1–2. ScienceDirect.

- 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. et al., 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. et al., 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, et al., 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.