



การผลิตแก้วคริสตัลสีจากของเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ

The fabrication of Color Crystals Glasses from Natural
raw materials for jewelry industry

วิไลวรรณ ลีนะกุล

ธนาพร บุญชู

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



การผลิตแก้วคริสตัลสีจากของเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ
The fabrication of Color Crystals Glasses from Natural
raw materials for jewelry industry

วิไลวรรณ ลีนะกุล
ธนาพร บุญชู

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2563
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะผลิตแก้วคริสตัล โดยใช้ซิลิกาจากแกลบเป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยการทดลองแบ่งเป็นสองช่วงได้แก่ ช่วงแรกเป็นการสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบ โดยใช้วิธีการเผาด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิที่ต่างกันที่ 1000-1200 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองเป็นการนำแกลบที่สังเคราะห์ได้ไปทำการผลิตเป็นแก้วคริสตัลส์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบชิ้นงานแก้วคริสตัลส์ที่ได้จากการใช้ซิลิกาจากสารเคมีด้วย โดยผลการทดลองพบว่าแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่ 1000-1200 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์ซิลิกาได้ความบริสุทธิ์เฉลี่ยอยู่ที่ 90 ร้อยละโดยน้ำหนัก และเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบของเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD Diffraction) พบว่าเกิดเป็นองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกันทั้งหมด นั่นคือ Cristoballite, Tridamite และเมื่อนำซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ไปเป็นสารตั้งต้นในการหลอมคริสตัลส์โดยการเติมสารให้สีที่แตกต่างกันได้แก่ คอปเปอร์ออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ และโครเมียมออกไซด์ พบว่าได้แก้วมีสีฟ้าใส สีม่วงอมชมพู และสีเขียวตามลำดับ โดยชิ้นงานแก้วคริสตัลส์ที่มีค่าความหนาแน่น และค่าความแข็งมากที่สุดได้มาจากชิ้นงานที่มีแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

ABSTRACT

The aim of this work was to synthesis the glass crystals by using silica from rice husk ash (RHA) as a raw material. First, rice husk was synthesis by heated at various temperatures between 1000-1200 °C and then, silica which was heated at the first step was used to be the raw materials for glass crystal. From the result shows that RHA with heated at 1000-1200 C could be use for silica to synthesis crystals glass. X-ray Diffraction pattern demonstrated that all of condition to heat RHA showed the same results. Cristoballite, tridamite are the phase formation appeared all of materials. The crystal glasses show blue, purple and bright green color from the samples which have adding the copper oxide, manganese oxide and chromium oxide, respectively. The optimum condition with show the highest density and density value were obtain with the sample of heated RHA at 12000°C

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากความกรุณาจากคณาจารย์ และบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายด้วยกัน ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.กมลพรรณ เพ็งพัด, ผศ.ดร.สุขุม อีสเสงี่ยม และนายนายวงศธร สุขวัฒน์แท้มีบทบาทสำคัญในงานวิจัยทุกๆส่วน

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนเงินวิจัยในโครงการวิจัยเงินงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2563

อนึ่งผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอขอบคุณความกตัญญูทวิตาคคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆที่จะเกิดขึ้นนั้นผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และพร้อมที่จะรับคำแนะนำของทุกท่าน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2563

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อไทย	(ก)
บทคัดย่ออังกฤษ	(ข)
กิตติกรรมประกาศ	(ค)
สารบาญ	(ง)
สารบาญตาราง	(ฉ)
สารบาญภาพ	(ช)
อักษรย่อและสัญลักษณ์	(ญ)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย	4
1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย	4
1.7 คำสำคัญของการวิจัย	4
1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แก้วคริสตัล	5
2.2 แก้วและคำนิยามของแก้ว	6
2.2.1 คำนิยามของแก้ว (Glass definitions)	7
2.3 การใช้งานและสมบัติที่สำคัญของแก้ว (Uses of glass and important properties)	11
2.4 การหลอมและกระบวนการการผลิตแก้ว (Melting and processing of glasses)	12
2.4.1 ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition) และการผสมเคมี (Batching)	12
2.4.2 ความสามารถในการทำให้เกิดแก้ว (Glass forming ability) และความเสถียร (Glass stability)	14
2.4.3 การขึ้นรูปของแก้ว (glass forming)	16
2.5 สมบัติทางแสงของแก้ว	20
2.6 ทฤษฎีการเกิดสีในวัสดุที่เกี่ยวข้อง	24
2.6.1 ทฤษฎีสถานมผลึก (crystal field theory)	24
2.6.2 การเปลี่ยนการถ่ายโอนประจุ (Charge-transfer transition)	24
2.6.3 ศูนย์กกลางของสี (color center)	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.4 สารฝังใน (inclusion) ในเนื้ออัญมณี	25
2.6.5 สีที่เกิดจากโครงสร้างของอัญมณี	25
2.6.6 ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band theory or band gaps):	25
2.7 แก้วตะกั่วหรือแก้วคริสตัล	26
2.8 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	29
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	29
3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	30
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวิเคราะห์สาร	30
3.3.1 เครื่อง X-ray Diffraction technique (XRD)	30
3.3.2 เครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)	30
3.3.3 เครื่อง ทดสอบความแข็ง (Hardness)	30
3.3.4 เครื่อง ทดสอบความหนาแน่น (Density)	30
3.3.5 เครื่อง ทดสอบวัดค่าดัชนีหักเห Refractive index (RI)	30
3.4 ขั้นตอนการวิจัย	30
3.4.1 การสังเคราะห์ซิลิกาจากแคลบ	30
3.4.2 การเตรียมแก้ว	31
3.5 วิธีการทดลอง	32
3.5.1 การศึกษาสูตรแก้วที่เหมาะสมที่สุดในการทำเป็นแก้วคริสตัลสี	32
3.6 การวิเคราะห์สมบัติของแก้ว	37
3.6.1 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)	37
3.6.2 การศึกษาองค์ประกอบของธาตุเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์หรือ (X-ray fluorescence: XRF)	38
3.6.3 การวัดความแข็ง Hardness	40
3.6.4 การวัดความหนาแน่น (Density)	41
3.6.5 การวัดค่าดัชนีหักเห (Refractive index: RI)	42
3.6.6 หลักการดูดกลืนรังสี UV-VIS	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	45
4.1 ผลการสังเคราะห์ซิลิกาจากแคลบ	45
4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ของแคลบที่ผ่านการเผาด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของแกลบที่ผ่านการเผาด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน	47
4.2 ผลการศึกษาการเจือโลหะทรานซิชันออกไซด์ที่มีต่อแก้วคริสตัลจากแกลบ	48
4.2.1 ผลการเติมสารให้สีฟ้าคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	49
4.2.2 ผลการเติมสารให้สีม่วงแมงกานีสออกไซด์ (MnO ₂)	54
4.2.3 ผลการเติมสารให้สีเขียวโครเมียมออกไซด์ (Cr ₂ O ₃)	58
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	62
5.1 สรุปผลการทดลอง	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม	64
ประวัติย่อผู้วิจัย	65

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 สมบัติ ส่วนประกอบทางเคมีและการใช้งานของแก้วซิลิเกตทางการค้า	6
2.2 ชื่อสามัญและส่วนประทางเคมีของวัตถุดิบที่สำคัญในการหลอมแก้ว	13
3.1 แสดงอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมแก้วคริสตัลจากแคลบ	34
4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000°	46
4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100°	47
4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200°	47
4.4 แสดงสัญลักษณ์ของชิ้นงานแก้วที่เงื่อนไขต่างๆ	49

สารบัญรูปภาพ

รูป	หน้า
2.1 ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก (crystal structures) ของทรายและแก้วแบบสองมิติ	8
2.2 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้ว หลังจากการทำให้เย็นตัวลงแบบช้า (slow cool) และแบบเร็ว (fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน	9
2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอลทัลปีของการหลอมเหลวในการเกิดแก้ว	10
2.4 ไดอะแกรมสรุปกระบวนการการหลอมแก้ว	16
2.5 การเป่าแก้ว (glass blowing)	17
2.6 การดึงรีดแก้ว (glass drawing)	17
2.7 การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (centrifugal casting)	17
2.8 การอัดขึ้นรูปแก้ว (glass pressing)	18
2.9 กระบวนการผลิตขวดของบริษัท Tynant spring water limited	19
2.10 แผนภาพแสดงการหักเหสองแนว (birefringence) ของวัสดุที่มีสมบัติเป็นแบบ แอนไอโซทรอปี (anisotropy)	21
2.11 หลักการของการโพลาไรเซชัน: คลื่นตามขวาง (a transverse wave) จะเกิดโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized) เมื่อการสั่นเกิดขึ้นในทิศทางเดียว	22
2.12 แสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized light) ผลิตโดยตัวกรองโพลาไรซ์ (a polarizing filter)	23
2.13 แผนภาพแสดงการแทรกสอดโดย (a) การแทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference) (b) การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (destructive interference)	24
2.14 GIA Color chart	26
3.1 แสดงขั้นตอนการสกัดซิลิกาและส่วนผสมในการทำแก้วคริสตัล	32
3.2 สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านมองเห็น	44
3.12 การตรวจสอบเฟสด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray diffraction technique (XRD)	38
3.13 การศึกษาองค์ประกอบของธาตุการเรืองรังสีเอกซ์หรือ X-ray fluorescence (XRF)	39
3.14 เครื่องทดสอบความแข็ง Hardness	40
3.15 หัวกดเครื่อง Hardness แบบ Vickers Hardness Test	41
3.16 สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า	43
4.1 แสดงผงแคลสที่ผ่านการเผาไล่สารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 1000°C	45
4.2 แสดงผงแคลสที่ผ่านการเผาที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ก.ผงแคลสที่อุณหภูมิ 1000°C ข.ผงแคลสที่อุณหภูมิ 1100°C ค.ผงแคลสที่อุณหภูมิ 1200°C	46

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแถบที่ผ่านเงื่อนไขที่แตกต่างกัน	48
4.4 แสดงรูปชิ้นงานแก้วคริสตัลลิตี้ที่เงื่อนไขในการใช้ซิลิกาที่แตกต่างกันหลังเติมสารให้สีชนิดคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) (ก) SiCu (ข) RCu1000 (ค) RCu1100 (ง) RCu1200	50
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของชิ้นงานแก้วที่ได้จากแถบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดคอปเปอร์ออกไซด์	51
4.6 แสดงสมบัติค่าความแข็งของชิ้นงานแก้วที่ได้จากแถบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดคอปเปอร์ออกไซด์	52
4.7 กราฟการดูดกลืนรังสี UV-VIS	53
4.8 สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า	53
4.9 สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านมองเห็น	54
4.10 แสดงรูปชิ้นงานแก้วคริสตัลลิตี้ที่เงื่อนไขในการใช้ซิลิกาที่แตกต่างกันหลังเติมสารให้สีชนิดแมงกานีสออกไซด์ (MnO ₂) ที่ 0.2 wt% (ก) SiMn (ข) RMn1000 (ค) RMn1100 (ง) RMn1200	56
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของชิ้นงานแก้วที่ได้จากแถบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดแมงกานีสออกไซด์	57
4.12 แสดงสมบัติค่าความแข็งของชิ้นงานแก้วที่ได้จากแถบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดแมงกานีสออกไซด์	58
4.13 แสดงรูปชิ้นงานแก้วคริสตัลลิตี้ที่เงื่อนไขในการใช้ซิลิกาที่แตกต่างกันหลังเติมสารให้สีชนิดโครเมียมออกไซด์ (Cr ₂ O ₃) ที่ 0.2 wt% (ก) SiCr (ข) RCr1000 (ค) RCr1100 (ง) RCr1200	59
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของชิ้นงานแก้วที่ได้จากแถบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดโครเมียมออกไซด์	61
4.15 แสดงสมบัติค่าความแข็งของชิ้นงานแก้วที่ได้จากแถบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดโครเมียมออกไซด์	62

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แก้วเป็นวัสดุวัสดุออสซิลฐานประเภทหนึ่งที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแก้วคริสตัลที่จะทำนี้มีสมบัติเฉพาะตัวในเรื่องของความโปร่งใส ความแข็งแรง และความ-มันแวววาว ซึ่งเป็นสมบัติที่วัสดุอื่นทดแทนไม่ได้แก้วคริสตัล (crystal glass) ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุประเภทแก้ว ซึ่งมีโครงสร้างเป็นวัสดุออสซิลฐาน มีสมบัติเฉพาะตัวในเรื่องของความแข็งแรง และความแวววาว สวยงาม นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหสูง (high refractive index) ทำให้มีความโปร่งใส เป็นประกายแวววาวเป็นพิเศษ ซึ่งสมบัติต่างๆเหล่านี้ล้วนมีผลทำให้แก้วคริสตัลนี้มีราคาสูงกว่าแก้วชนิดอื่นๆทั่วไปในท้องตลาด เมื่อก้าวถึงความโปร่งใส เป็นประกายแวววาว ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของประเภทนี้ พบว่าเกิดจากการเจือสารประกอบทางเคมีนั่นคือ ตะกั่วออกไซด์ ดังนั้นแก้วคริสตัลจึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แก้วตะกั่ว (lead glasses) โดยปกติแก้วคริสตัลจะมีส่วนผสมตะกั่วออกไซด์อยู่ประมาณ ร้อยละ 24 ถึง 32 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีโปรแตสเซียมออกไซด์ (K_2O) และซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักอีกด้วยปริมาณร้อยละ 12 และ 59 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากส่วนประกอบที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ซิลิกาเป็นสารเคมีสำคัญที่เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตแก้วคริสตัล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยมีความสนใจที่จะผลิตแก้วคริสตัลโดยมีจุดเด่นคือจะนำสารตั้งต้นที่สังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติ นั่นคือแกลบมาทำการสังเคราะห์ให้ได้ซิลิกา เนื่องจากสารเคมีชนิดนี้ถ้าต้องการความบริสุทธิ์สูงจะมีราคาที่สูงมากซึ่งมีผลทำให้ต้นทุนของการผลิตแก้วคริสตัลนี้สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะปรับราคาต้นทุนของวัสดุให้ต่ำลงจึงมีความจำเป็นต้องลดราคาของวัตถุดิบลง โดยในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการเพาะปลูกข้าว เลี้ยงสัตว์เป็นอาชีพหลัก ในฤดูเก็บเกี่ยวจะมีแกลบ (Rice husk) ที่เป็นวัสดุธรรมชาติเหลือใช้เป็นจำนวนมาก และจากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแกลบที่ได้จากการสีข้าว นั้น ความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 95 ของน้ำหนักแล้ว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะทำการสังเคราะห์แก้วคริสตัลที่สามารถผลิตได้ในประเทศ และมีจุดเด่นคือสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบทำเป็นแก้วคริสตัล โดยทั้งนี้ได้เป็นการลดต้นทุน

ในการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศเพราะสามารถผลิตและใช้ได้ในประเทศโดยที่วัตถุดิบหลักนั้นที่ใช้ได้มาจากแคลบข้าวที่เหลือจากการเกษตรโดยเป็นการนำพารายได้อีกทางให้กับชาวนาอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. การสังเคราะห์แคลบเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการทำแก้วในการผลิตแก้วคริสตัล
2. ทำการทดสอบและการตรวจสอบสมบัติในเงื่อนไขที่แตกต่างกันของแคลบและชิ้นงานของแก้วคริสตัล

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทำวิจัยบูรณาการระหว่างการผลิตแก้วคริสตัลสี และการสังเคราะห์ซิลิกาจากแคลบ ดังมีแผนภาพการดำเนินการดังรูปที่ 7.1 โดยเริ่มจากการหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ซิลิกาจากแคลบให้มีความบริสุทธิ์สูงสุด เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก้วคริสตัลสี จากนั้นในขั้นตอนต่อมาจะทำการวิจัยคู่ขนานกันระหว่างการประดิษฐ์คริสตัลสีโดยใช้ซิลิกาจากแคลบเป็นสารตั้งต้น เพื่อเปรียบเทียบกับ การประดิษฐ์แก้วคริสตัลสีที่ใช้ซิลิกาทางการค้ามาเป็นสารตั้งต้นนั่นเอง หลังจากนั้นจึงนำผลการวิจัยที่ได้จากเงื่อนไขที่ต่างกันมาขึ้นรูปเป็นเครื่องประดับ พร้อมทั้งศึกษาถึงสมบัติที่สำคัญอื่นๆ ในการนำไปใช้เป็นเครื่องประดับจริง ดังแสดงในไดอะแกรมแผนงาน



รูปที่ 1.1 แผนภาพขอบเขตโครงการวิจัย

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- ขั้นที่ 1 ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- ขั้นที่ 2 จัดเตรียมหรือจัดซื้อวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี ที่จำเป็น
- ขั้นที่ 3 หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซิลิกาจากแคลบ
- ขั้นที่ 4 ทำการเตรียมแก้วคริสตัลด้วยกระบวนการวิธีการหลอม และกำหนดเงื่อนไขในการเกิดสีของแก้วคริสตัล พร้อมทั้งการสังเคราะห์แก้วคริสตัลสีที่มาจากสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน
- ขั้นที่ 5 ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยกระบวนการวิธีวิเคราะห์ทางความร้อนแบบอนุพันธ์ของอุณหภูมิ (differential thermal analysis, DTA) เพื่อหาเงื่อนไขของอุณหภูมิและอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการเผาพูนึกและการตกผลึกที่ทำให้เกิดสีในแก้ว
- ขั้นที่ 6 ทำการศึกษาสมบัติต่างๆ ของแก้วคริสตัลสีเตรียมได้อื่น อาทิ สมบัติทางกายภาพ

สมบัติ สมบัติทางแสง สี เป็นต้น

ขั้นที่ 7 วิเคราะห์ผลการทดลอง สมบัติต่างๆ ของแก้วคริสตัลสีเตรียมได้ พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆกับสมบัติที่วัดได้

ขั้นที่ 8 ทำการอภิปรายผลที่ได้ โดยเชื่อมโยงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการสรุปถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ในการปรับปรุงสมบัติให้ดียิ่งขึ้นและเพื่อหาแนวทางในการทำการทดลองในเฟสต่อไป

ขั้นที่ 9 นำผลงานที่ได้ไปเผยแพร่ในรูปแบบของการประชุมสัมมนา การเผยแพร่ต่อชุมชน หรือการตีพิมพ์ในวารสารตามที่ตั้งเป้าหมายไว้

1.5 สมมุติฐานงานวิจัย (ถ้ามี)

-

1.6 กรอบแนวความคิดในการวิจัย (ถ้ามี)

-

1.7 คำสำคัญของกรวิจัย (ถ้ามี)

อุตสาหกรรมเครื่องประดับ, แก้วสีคริสตัล, ของเหลือใช้ทางการเกษตร

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.เป็นวัสดุที่มีตามธรรมชาติและเป็นวัสดุที่เหลือใช้จากการสีข้าว
- 2.ไม่ต้องนำเข้าแก้วคริสตัลจากต่างประเทศ
- 3.ที่สามารถผลิตได้เองภายในประเทศ
- 4.เป็นการเพิ่มรายได้ให้ชาวนาหรือแหล่งชุมชนที่ปลูกข้าว
- 5.เป็นแก้วคริสตัลที่สังเคราะห์ได้เองภายในประเทศ

1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ (ถ้ามี)

-

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก้วคริสตัล

“แก้วคริสตัล” (crystal glass) เป็นแก้วที่มีออกไซด์ของตะกั่ว (lead oxide, PbO) อยู่ในปริมาณที่สูง จึงเรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า แก้วตะกั่ว (lead glasses) [1-3] เนื่องจากตะกั่วเป็นธาตุโลหะหนักจึงทำให้แก้วชนิดนี้มีความหนาแน่นสูงเมื่อเทียบกับแก้วที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่น แก้วโซดาไลม์ (soda-lime glass) ซึ่งเมื่อแก้วมีความหนาแน่นสูงก็ทำให้มีค่าดัชนีหักเหสูง (high refractive index) ด้วย จึงเป็นแก้วที่มีความโปร่งใสและเป็นประกายแวววับเป็นพิเศษ ซึ่งสมบัติของความเป็นประกายแวววับนี้ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของแก้ว และยังแก้วมีความเป็นประกายแวววับมากเท่าใดก็จะมีค่าดัชนีหักเหสูงมากเท่านั้น แก้วที่มีค่าดัชนีหักเหสูงส่วนใหญ่มีส่วนผสมของตะกั่วออกไซด์ซึ่งสามารถนำไปทดแทนโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซึ่งเป็นตัวช่วยหลอมในแก้วโซดาทั่วไป โดยปกติแล้วแก้วคริสตัลจะมีส่วนผสมตะกั่วออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 24 ถึง 32 โดยน้ำหนัก และยังมีโปแตสเซียม ออกไซด์ (K_2O) และซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักอีกด้วยในปริมาณร้อยละ 12 และ 59 โดยน้ำหนักตามลำดับ [4] นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการศึกษาแก้วตะกั่วในเชิงลึกในเรื่องของโครงสร้างของแก้วตะกั่ว [4-6] ทำให้ทราบว่าตะกั่วทำให้โครงสร้างของแก้วมีการเกาะตัวกันแน่นยิ่งขึ้นทำให้คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) อาทิ ความหนาแน่น (density) ค่าดัชนีหักเหและการกระจายแสงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความหนืดของน้ำแก้วหลอมก็ลดลง มีผลทำให้การหลอมตัวของน้ำแก้วหลอมเกิดได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสารตะกั่วเป็นสารช่วยหลอมที่ดีตั้งที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลผลิตที่ได้จากแก้วตะกั่วจึงมีแรงตึงผิว (surface tension) ต่ำ จึงทำให้สามารถตัดหรือขึ้นรูปได้ง่าย นอกจากนี้ตะกั่วยังช่วยทำให้ผิวของแก้วเรียบไม่แตกง่ายอีกด้วย

แก้วคริสตัลเป็นแก้วที่มีส่วนประกอบค่อนข้างพิเศษ กล่าวคือ มีสารประกอบตะกั่วในปริมาณที่สูง ซึ่งตามมาตรฐานประเทศในกลุ่มการค้ายุโรป (European Common Market Country) ได้ตกลงและกำหนดว่า จะต้องมีค่าความหนาแน่นอย่างน้อยที่สุด 2.45 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าดัชนีหักเหอย่างน้อยที่สุด 1.520 และค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สเท่ากับ 550 ± 20 ดังแสดง ตัวอย่างของแก้วตะกั่วอัลคาไลน์ (alkaline lead) ที่ใช้กันในปัจจุบันดังตาราง 2.1 [7] เป็นแก้วที่ผลิตโดยบริษัทคอร์นิง (Corning Glass Co.) ซึ่งเป็นบริษัทระดับโลกของการผลิตแก้วหลากหลายชนิด ตั้งแต่เครื่องแก้วที่ใช้ในครัวเรือนหรือการทดลองทางเคมี จนถึงเส้นใยนำแสงที่ใช้ในวงการโทรคมนาคม (telecommunication) ในปัจจุบัน แก้วตะกั่วที่มีดัชนีหักเหสูงนี้ นอกจากจะนำมาประยุกต์เป็นเครื่องประดับได้ดีแล้ว ก็ยังมีสมบัติอื่นๆ อีกหลายด้าน ตัวอย่างเช่น การนำไปเป็นหลอดแก้วเทอร์โมมิเตอร์ ฉนวนกันไฟฟ้า จนถึงสมบัติที่พิเศษคือสามารถเป็นเกราะป้องกันรังสีเอกซ์ (x-ray) ได้อีกด้วย [8]

ตารางที่ 2.1 สมบัติ ส่วนประกอบทางเคมีและการใช้งานของแก้วซิลิเกตทางการค้า [7]

Glass Type	Corning Number	Kimble Number	Approximate Composition (wt. %)								Relative thermal Expansion $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	Density (gms/cm ³)	Refractive index	Uses
			SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	PbO	Na ₂ O	K ₂ O				
Soda lime	0080	R-6	72.6	0.8	1.7	4.6	3.6			15.2		2.47	1.51	Windows, lamps
"Pyrex" borosilicate	7740	KG-33	81.0	13.0	2.0					4.0		2.23	1.47	Headlamps, cooking, and labware
Soda borosilicate	7050	K-705	68.0	24.0	1.0					7.0		2.24	1.48	Sealing
Alkali lead	0010	KG-1	77.0			1.0		8	9.0	5.0		2.86	1.54	Lamp tubing, sealing
Alkaline earth Aluminosilicate	1720	EZ-1	64.0	4.5	10.4	8.9	10.2		1.3	0.7		2.52	1.53	High temperatures
"E" Fiberglass			55.0	7.0	15.0	21.0			1.0	1.0		2.61	1.55	Fiberglass

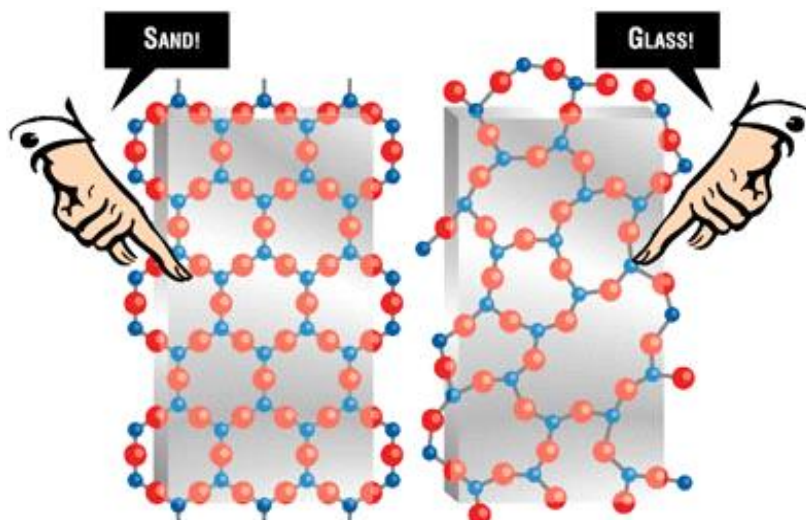
2.2 แก้วและค่านิยมของแก้ว [7,9]

แก้ว (glass) เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่พบอยู่รอบๆ ตัวเรา ตั้งแต่กระจกส่องหน้า กระจกในอาคารบ้านเรือน หรือกระจกหน้าต่างในยานพาหนะ หรือแม้แต่นำไปเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ทั้งนี้เนื่องจากแก้วมีสมบัติเด่นๆ หลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความโปร่งใส (transparent) ซึ่งสามารถยอมให้แสงผ่านได้ แก้วที่มนุษย์ผลิตขึ้นเป็นครั้งแรกมีรูปแบบอย่างง่าย ๆ อาทิ ลูกปัด หรือนำไปขึ้นรูปให้เป็นวัตถุปลายแหลมที่ใช้ทำอาวุธ หลังจากนั้นได้มีการพัฒนาการขึ้นรูปแก้วอย่างต่อเนื่อง จนสามารถผลิตขวดในยุคแรกๆ ได้ ในเวลาต่อมาเมื่อมีการค้นคว้าศึกษาวิธีการทำแม่พิมพ์การขึ้นรูปโดยวิธีใหม่ๆ มาแทนที่วิธีการแบบดั้งเดิมทำให้สามารถปรับปรุงคุณภาพของเครื่องแก้วได้ในที่สุด อย่างไรก็ตามถึงแม้จะสามารถค้นพบวิธีผลิตเครื่องแก้วที่มีความโปร่งใสได้ก็ตาม แต่แก้วที่ได้ก็ยังมีคุณภาพไม่สูงพอเนื่องจากยังพบว่ามีฟองอากาศหรือตำหนิเกิดขึ้นในเนื้อแก้ว เมื่อประมาณช่วงศตวรรษแรกก่อนคริสต์ศักราชซึ่งได้มีการค้นพบวิธีการเป่าแก้ว (glass blowing) ขึ้นเป็นครั้งแรกในสมัยโรมัน ทำให้สามารถผลิตแก้วเพื่อไปประยุกต์ในงานด้านต่างๆ มากยิ่งขึ้น นอกจากนี้คุณภาพของเครื่องแก้วยังเพิ่มสูงขึ้น และในช่วงยุคนี้เองได้มีการผลิตแผ่นแก้วใสได้เป็นครั้งแรก ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการนำไปประยุกต์เป็นหน้าต่างในอาคารบ้านเรือนต่างๆ แก้วสีได้ถูกนำมาผลิตใช้ โดยเคลือบสีในการผลิตแก้วสี แต่ละสีนั้นจะเป็นสูตรลับเฉพาะของอุตสาหกรรมเชิงครอบครัวซึ่งก็ได้สืบทอดต่อๆ กันไปยังลูกหลาน ตัวอย่างเช่น เทคนิคการใช้คอลลอยด์ (colloid) ของทองคำในการทำให้เกิดแก้วสีแดงได้ค้นพบขึ้นครั้งแรกเมื่อหลายร้อยกว่าปีมาแล้วและก็ได้สูญหายไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นก็ได้ถูกค้นพบและนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นเองการผสมผสานแนวคิดระหว่างการค้นพบสารให้สีในแก้ว กับการค้นพบการเป่าแก้วจึงเป็นต้นกำเนิดของการผลิตงานกระจกสี (stained glass) ตามหน้าต่างของประติมากรรมตามโบสถ์ใหญ่ๆ ในประเทศแถบยุโรป ตะวันตกเป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศอิตาลี ณ เมืองเวนิส ซึ่งก็ได้กลายเป็นศูนย์กลางของอุตสาหกรรมการผลิตแก้วที่ยิ่งใหญ่ในประเทศแถบตะวันตกตั้งแต่ ค.ศ. 1300 เป็นต้นมา

แก้วนอกจากจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เหมือนวัสดุอื่นๆ ทัวไปแล้วยังมีความสวยงามเป็นที่นิยมชมชอบต่อผู้บริโภคมากกว่าวัสดุอื่นๆ ดังจะเห็นได้จากเครื่องแก้ว ภาชนะใส่อาหาร กระจกหรือหน้าต่างก็ยังเป็นสิ่งที่เราพบเห็นหรือนำมาใช้กันในชีวิตประจำวันมาโดยตลอด ยิ่งไปกว่านั้นแก้วบางชนิดหรือที่เรามักเรียกกันว่า แก้วคริสตัล (crystal glass) ยังมีความแวววาวสวยงามมากกว่าแก้วทั่วไป จึงเป็นที่นิยมกันมากสำหรับวงการเครื่องประดับ หรือเครื่องแก้วที่เน้นความหรูหรา เช่น แก้วไวน์ หรือเครื่องแก้วต่างๆ แก้วชนิดนี้มีส่วนผสมของตะกั่วอยู่เกือบประมาณ 50% ประโยชน์ต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น มาจากสมบัติที่พิเศษและสำคัญของวัสดุชนิดนี้ คือ ความโปร่งแสงของแก้ว เนื่องจากแสงสามารถทะลุผ่านวัสดุชนิดนี้ได้นั่นเอง ทั้งนี้เนื่องจากมีวัสดุชนิดนี้ที่มีสมบัติดังกล่าว เพราะเหล็กก็มีสมบัติทึบแสง (opaque) มีหินบางชนิดเท่านั้นที่มีสมบัติโปร่งแสงและหินเหล่านั้นเองก็เป็นสิ่งที่มนุษย์ตั้งค่าไว้สูงและอยากได้มาเป็นเจ้าของ อาทิ เพชร มรกต ทับทิม และหินที่มีค่าอื่นๆ ซึ่งหินเหล่านี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและยังมีความใสแวววาวเท่าใด ก็จะมีค่ามากขึ้นเท่านั้น ซึ่งตามความจริงการกำหนดคุณค่าของวัตถุเหล่านี้มาจากพื้นฐานของความชอบวัตถุที่มีความสว่างแวววาวของมนุษย์ ยิ่งหามาได้ยากเท่าใดก็ยิ่งมีค่ามากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงเริ่มมีอุตสาหกรรมในการผลิตแก้วคริสตัลสีต่างๆ เพื่อมาใช้ทดแทนหินราคาแพงดังกล่าวในราคาที่ถูกกว่ากันหลายเท่าตัว ทำให้ผู้ที่ชื่นชอบเครื่องประดับแต่มีปัจจัยน้อยสามารถหาซื้อมาใช้ได้ง่ายขึ้น วงการเครื่องประดับจึงสามารถขยายตัวเข้าไปในกลุ่มชนหลายระดับมากยิ่งขึ้น จนบางครั้งทำให้มีนักมีจฉฉิพต่างๆ พยายามที่จะนำแก้วคริสตัลที่เลียนแบบหินมีค่าได้อย่างแนบเนียนนี้ไปจำหน่ายในราคาสูงเกินควร ฉะนั้นเราจึงควรจะมาทำความรู้จักกับวัสดุที่เรียกว่า แก้วนี้ให้ลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น เพราะอย่างไรก็ตามแก้วก็มีความแตกต่างจากหินราคาแพงเหล่านั้นอย่างแน่นอน จึงเกิดคำถามว่า **แก้วคืออะไร?**

2.2.1 คำนิยามของแก้ว (Glass definitions)

นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มถือว่าแก้วเป็นอีกสถานะหนึ่งของสารนอกจากของเหลว (liquid) ของแข็ง (solid) และแก๊ส (gas) ทั้งนี้เนื่องจากแก้วไม่มีความเป็นผลึกเหมือนของแข็งทั่วไปและยังมีโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนของเหลวอีกด้วย ดังจะแสดงให้เห็นในรูป 2.1 ถึงโครงสร้างของทราย (sand) ที่เป็นผลึกของสารซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแก้วที่ประกอบไปด้วยอะตอมของ Si และ O ที่เรียงตัวกันแบบสุ่ม (random disordered arrangement) สมบัติของแก้วประกอบไปด้วยสมบัติของทั้งของแข็งและของเหลวอยู่ด้วยกัน แต่ก็ยังมีลักษณะเด่นที่แยกออกจากของแข็งและของเหลวอย่างสิ้นเชิง แก้วมีสภาพความแข็งเกร็งเชิงกล (mechanical rigidity) เหมือนของแข็ง แต่ก็มี การเรียงตัวของอะตอมหรือโมเลกุลแบบสุ่มเหมือนของเหลวดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากรูป 2.2 จะเห็นได้ว่าการทำให้เกิดแก้ว (glass formation) มาจากการหลอมของของแข็งที่เป็นผลึกที่อุณหภูมิสูง และเมื่อทำให้เย็นลงอะตอมของแก้วจะถูกล็อกให้อยู่ในสถานะแบบไม่มีระเบียบหรือแบบสุ่มก่อนที่อะตอมจะเรียงตัวกันอย่างเป็นผลึกที่สมบูรณ์ (perfect crystal arrangement)

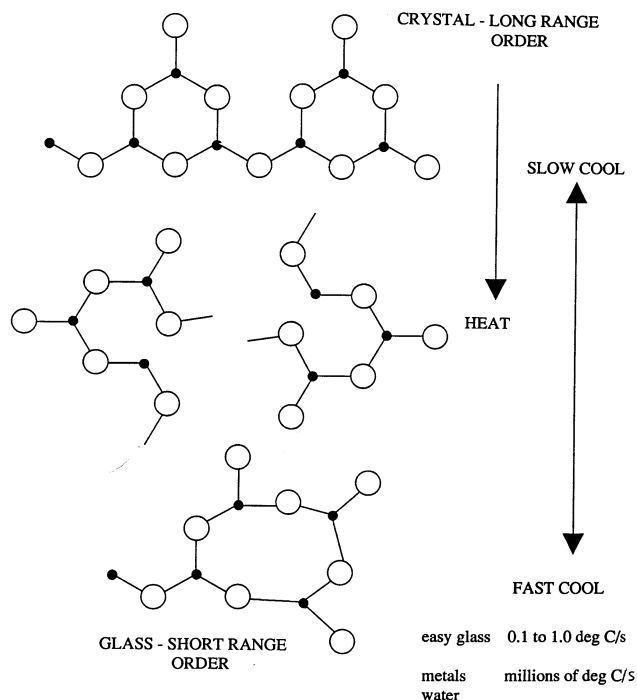


1

รูปที่ 2.1 ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก (crystal structures) ของทรายและแก้วแบบสองมิติ

แก้วที่เราใช้กันมาตั้งแต่ดึกดำบรรพ์จนกระทั่งถึงปัจจุบันนี้ มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญที่สุดคือ ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์นั่นเอง คำถามเกิดขึ้นมาว่า “จริงหรือไม่ที่แก้วทุกชนิดจะต้องใช้ซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก” และเนื่องจากในปัจจุบันมีการผลิตแก้วได้หลากหลายชนิดมากขึ้นโดยบางชนิดไม่จำเป็นต้องมีซิลิกาในส่วนผสมเลยก็ได้ ทำให้ได้คำตอบว่า ซิลิกาไม่ใช่ส่วนประกอบหลักของแก้วเสมอไป การผลิตแก้วส่วนใหญ่มาจากการนำส่วนผสมของวัตถุดิบของแก้วไปหลอมที่อุณหภูมิสูงแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จึงเกิดคำถามต่อไปว่าจำเป็นหรือไม่ที่เราจะต้องผลิตแก้วด้วยวิธีหลอมเท่านั้น คำตอบก็คือไม่จำเป็น เพราะปัจจุบันการพัฒนาของเทคโนโลยีต่างๆ ทำให้สามารถผลิตแก้วได้จากการการตกสะสมของไอ (vapor deposition) โดยกระบวนการวิธีโซลเจล (sogel processing) ของสารละลาย (solution) หรือการฉายรังสีของนิวตรอน (neutron irradiation) ของวัสดุที่เป็นผลึก เป็นต้น นอกจากนี้แก้วแบบดั้งเดิมมักจะเป็นสารอนินทรีย์ (inorganic substance) หรือ สารที่ไม่ใช่โลหะ (non-metallic substance) ขณะนี้เราสามารถผลิตแก้วที่เป็นสารอินทรีย์ (organic substance) ได้แล้ว และแก้วที่ทำมาจากโลหะก็กลายมาเป็นเรื่องปกติเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา ดังนั้นจึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าธรรมชาติทางเคมีของวัสดุไม่สามารถนำมานิยามคำว่าแก้วได้อย่างถูกต้อง [9]

¹ Site and imagery copyright © 2002 Acme Design Company, Inc.,
Available: <http://www.acmecompany.com/Pages/glass.html> (June 23, 2008)



รูปที่ 2.2 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้วหลังจากการทำให้เย็นตัวลงแบบช้า (slow cool) และแบบเร็ว (fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน [10]

มีนักวิทยาศาสตร์ผู้เชี่ยวชาญทางด้านแก้วหลายท่าน ได้พยายามหาคำนิยามที่เหมาะสมที่สุดของแก้วตามพื้นฐานความรู้และมุมมองที่แตกต่างกัน ซึ่งจะเลือกคำนิยามที่สำคัญดังต่อไปนี้

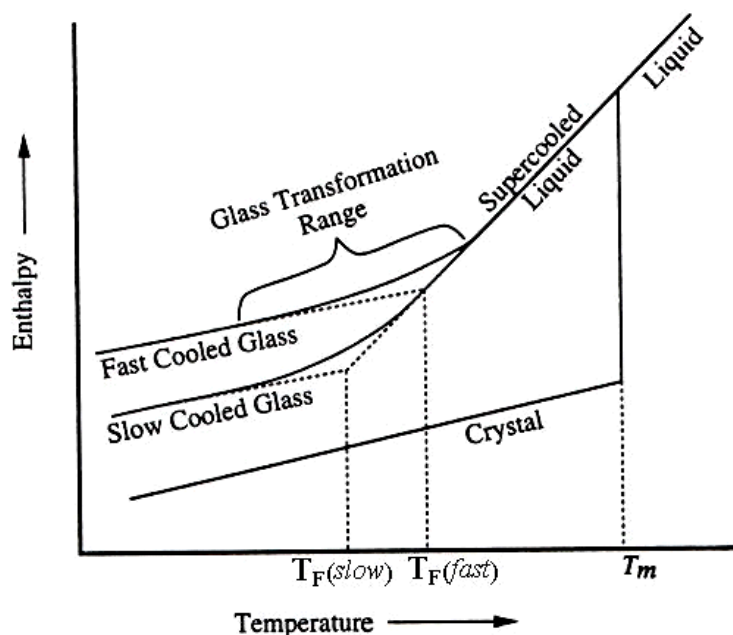
- James E. Shelby [9]

มีความเห็นว่าแก้วทุกชนิดแ่ขร้ลักษณะเฉพาะที่เหมือนกันอยู่ 2 ข้อคือ

1. มีการเรียงตัวของอะตอมในระยะสั้น (a short range, periodic atomic arrangement)
2. มีพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นอยู่กับเวลาคือพฤติกรรมการแปลงเฟสของแก้ว (glass transformation behavior) ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ เรียกกันว่าบริเวณการแปลงเฟสของแก้ว (glass transformation region)

James ได้ให้คำนิยามสั้นๆ ของแก้วว่า

“ของแข็งอสัณฐาน (an amorphous solid) ที่ไม่มีการเรียงตัวของอะตอมในระยะยาวและแสดงบริเวณที่มีพฤติกรรมการแปลงเฟสของแก้ว”



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอลทัลปีของการหลอมเหลวในการเกิดแก้ว

จากรูปที่ 2.3 แสดงถึงบริเวณการแปลงเฟสของแก้วซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิ ที่แตกต่างกับการตกผลึก (crystallization) ของของแข็งโดยทั่วไปที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิค่าใดค่าหนึ่งหรือที่เรียกกันว่าจุดหลอมเหลวของสารนั่นเอง (melting point, T_m) ตามความจริงแล้วการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีกับอุณหภูมิมิมีพฤติกรรมเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอุณหภูมิ ในกรณีนี้ทราบกันดีว่าของเหลวส่วนมาก เมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว นั่นก็คือ ทั้งเอลทัลปี และปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย ดังกราฟในรูป 1.3 เมื่อของเหลวถูกลดอุณหภูมิลง ค่าเอลทัลปีก็จะลดลงจนเมื่อมาถึงจุดหลอมเหลวก็จะเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งถ้าของแข็งนั้นมีการตกผลึกการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือเอลทัลปีของสารก็จะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous change) ซึ่งจะเกิดขึ้น ณ จุด T_m นั่นเอง หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงก็จะเริ่มช้าลงอย่างคงที่ จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงไปถึงอุณหภูมิห้อง (room temperature) และสารที่ได้ก็จะเป็นผลึกของแข็ง (crystalline solid) นั่นเอง อย่างไรก็ตาม ถ้าของเหลวถูกทำให้เย็นตัวลงโดยที่ไม่มีการตกผลึก ณ จุด T_m ของเหลวจะกลายเป็นของเหลวที่เย็นตัวแบบยิ่งยวด (supercooled liquid) ที่มีความหนืดสูง (high viscosity) ซึ่ง ณ ที่นี้ การเปลี่ยนแปลงของเอลทัลปีหรือปริมาตรจะเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous) จนกระทั่งเมื่อถึงช่วงที่เรียกว่า บริเวณการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (glass transformation range) การเปลี่ยนแปลงของเอลทัลปีเทียบกับอุณหภูมิจึงเกิดขึ้นอย่างช้าๆ สังเกตได้จากความชันของกราฟเปลี่ยนไปจากช่วง supercooled liquid จนกระทั่งถึงอุณหภูมิจึง สารที่ได้ก็เป็นของแข็งที่ไม่มีผลึก (non-crystalline solid) หรือเรียกกันอีกอย่างหนึ่งคือ แก้ว นั่นเอง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการเกิดแก้วกับการเกิดผลึกจึงต่างกันโดยสิ้นเชิง จะเห็นได้จากการกลายเป็นของแข็งแบบแก้วมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงบริเวณการแปลงเฟสของแก้ว (glass transformation range) จะเป็นช่วงแบ่งระหว่างความเป็นของเหลวและของแข็งต่างกับผลึก ที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิ T_m ของสาร ดังนั้น นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามนิยามอุณหภูมิต่างหนึ่งที่เรียกว่าอุณหภูมิฟิคทีฟ (Fictive temperature; T_f) ขึ้นมาเพื่อใช้แทนช่วง

บริเวณการเปลี่ยนสถานะของแก้ว ซึ่งก็คือจุดตัดของเส้นที่ลากมาจากเส้นกราฟช่วงของเหลวที่เย็นตัวแบบยิ่งยวด และเส้นกราฟช่วงที่แก้วเริ่มเย็นตัวอย่างช้าๆ ซึ่ง ณ อุณหภูมินี้เอง โครงสร้างของแก้วจะเหมือนกับของเหลวที่อยู่ในภาวะสมดุล (equilibrium liquid) ดังนั้น โครงสร้างของแก้วก็น่าที่จะแตกต่างกัน ถึงแก้วชนิดเดียวกัน ถ้ามี T_f ต่างๆ กัน กล่าวคือเป็นแก้วที่ได้จากการทำให้แก้วเย็นตัวลงในอัตราเร็วที่ต่างกันแบบช้าๆ (slow cooled glass) หรือแบบรวดเร็ว (fast cooled glass) ก็จะได้แก้วที่มีเอนทัลปีหรือปริมาตรสุดท้ายต่างกันมากที่สุด ซึ่งเป็นผลทำให้แก้วที่เย็นตัวอย่างช้าๆ มีความเสถียร (stability) ในโครงสร้างมากกว่าแก้วที่เย็นอย่างรวดเร็ว ดังที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของแก้วเกิดขึ้นเป็นช่วงของอุณหภูมิไม่ใช่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เพื่อความสะดวกในการใช้เทอมที่เหมาะสม จึงมีการนิยามอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (glass transformation temperature; T_g หรือ glass transition temperature) ขึ้น ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวคืออุณหภูมิที่เส้นกราฟของการวิเคราะห์เชิงความร้อน หรือเส้นกราฟของการขยายตัวทางความร้อนของแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงนั่นเอง ซึ่งรายละเอียดในเรื่องของ T_g นี้จะอธิบายในบทต่อไป

- ASTM Standards for Glass [7]

ได้ให้คำนิยามของแก้วไว้ดังนี้ “แก้วคือผลิตภัณฑ์สารอนินทรีย์ของการหลอมซึ่งได้ถูกทำให้เย็นตัวลงเป็นภาวะแข็งเกร็ง (rigid condition) โดยไม่มีการตกผลึก”

2.3 การใช้งานและสมบัติที่สำคัญของแก้ว (Uses of glass and important properties)

ความมุ่งหมายของการใช้งานของแก้วในตอนเริ่มแรกก็คือการนำไปตกแต่งตั้งแต่การตกแต่งเครื่องประดับ เสื้อผ้า จนไปถึงการตกแต่งอาคารบ้านเรือน วัดวาอาราม ต่างๆ หลังจากนั้นก็นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ อาทิ ขวด เครื่องแก้วในครัวเรือน ซึ่งก็เป็นวัตถุประสงค์ของการผลิตแก้วที่สำคัญที่สุดในปัจจุบัน รองลงมาคือการผลิตแก้วที่นำไปใช้เป็นหน้าต่างตามอาคาร สิ่งก่อสร้าง หรือยานพาหนะ และการผลิตแก้วที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือการผลิตหลอดไฟ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์นำแก้วไปใช้เป็นพิเศษอีกหลายอย่างซึ่งส่วนใหญ่แล้วเพิ่งจะได้รับการพัฒนาเมื่อไม่กี่ปีมานี้ ได้แก่แก้วเซรามิก (glass-ceramic) แก้วที่ผ่านการทำให้ผิวแข็งแรง (surface-strengthened glass) เพื่อทำให้แก้วแข็งแรงมากขึ้น เส้นใยแก้วนำแสง กระจกจากซิลิกาหลอม แก้วอิเล็กทรอนิกส์สำหรับแอลคาไลน์ไอออนและแก้วเลเซอร์ เป็นต้น ก่อนที่จะอธิบายถึงองค์ประกอบทางเคมีของแก้วทางการค้า ควรทำความเข้าใจสมบัติที่สำคัญของแก้วก่อนเพื่อเตรียมพร้อมที่จะเข้าใจในเรื่องของชนิดของแก้วที่มีทั้งส่วนประกอบทางเคมีที่ต่างกัน ซึ่งทำให้มีสมบัติต่างๆ ต่างกันไปด้วย

1. ความแข็งแรงเชิงกล (mechanically strong) มีความแข็งแรงแบบยึดเหนี่ยว (inherent strength) ที่สูงมาก จะถูกทำให้แข็งแรงน้อยลงได้เมื่อมีสาเหตุมาจากความไม่สมบูรณ์ของผิวแก้วเท่านั้น ซึ่งทำให้แก้วมีชื่อเสียงในเรื่องของความเปราะนั่นเอง อย่างไรก็ตามวิธีการทางความร้อนแบบพิเศษสามารถลดตำหนิของผิวไปได้บ้าง
2. ความแข็ง (hard) ผิวของแก้วสามารถต้านทานต่อรอยขีดข่วนและขีดถูได้

3. *ความยืดหยุ่น (elastic)* สามารถทนทานต่อความเค้นได้ถึงจุดแตกหักและสามารถคืนตัวกลับมา (rebound) อยู่ในรูปร่างเดิมได้
4. *ความต้านทานต่อการกรัดก่อนทางเคมี (chemical corrosion resistance)* แก้วได้รับผลกระทบจากสารเคมีบางชนิดเท่านั้น และสามารถต้านทานต่อการกรัดในทางอุตสาหกรรมและกรดในอาหารได้
5. *ความต้านทานต่อการช็อคด้วยความร้อน (thermal shock resistance)* สามารถทนต่อความร้อนจัดหรือเย็นจัดและยังทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยฉับพลันได้อีกด้วย
6. *การดูดกลืนความร้อน (heat absorbent)* เก็บกักความร้อนมากกว่าที่จะนำความร้อน ซึ่งสามารถดูดกลืนความร้อนได้ดีกว่าโลหะ
7. *สมบัติทางแสง (optical properties)* สามารถสะท้อน (reflect) หักเห (bend) ทะลุผ่าน (transmit) ดูดกลืน (absorb) แสงได้อย่างแม่นยำ
8. *ฉนวนไฟฟ้า (electrical insulator)* สามารถต้านทานต่อกระแสไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังเก็บไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย

2.4 การหลอมและกระบวนการการผลิตแก้ว (Melting and processing of glasses)

2.4.1 ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition) และการผสมเคมี (Batching)

ส่วนประกอบทางเคมีหลักของแก้วโดยปรกติ (แก้วกระจกหน้าต่าง หรือขวดแก้ว) มีอยู่ 3 ชนิด ได้แก่ ทรายขาวบด (crushed white sand) หินปูนบด (crushed lime stone) และโซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) อย่างไรก็ตามการใส่สารเติมแต่ง (additives) บางอย่างจะช่วยปรับปรุงคุณภาพของแก้วชนิดนี้ให้ดียิ่งขึ้น

แก้วไม่ว่าจะนำไปเป็นภาชนะบรรจุภัณฑ์จนกระทั่งถึงกระจกยานอวกาศ ก็ต้องอาศัยวัตถุดิบหลักด้วยกัน 3 ชนิดนั่นก็คือ ฟอเมอร์ (former) ฟลักซ์ (flux) และ สารช่วยให้เสถียร (stabilizer) ที่มีความสำคัญในการสร้างแก้วและในโครงสร้างของแก้วอีกด้วย

1. *ฟอเมอร์ (former)* เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของแก้ว ได้แก่สารเคมีชนิดใดก็ตามที่สามารถหลอมและเย็นตัวลงกลายเป็นแก้วได้จะเรียกว่าเป็นฟอเมอร์ทั้งหมด อาทิ ดินจากเปลือกโลก ถ้าหลอมด้วยความร้อนที่เหมาะสมก็จะสามารถเย็นตัวกลายเป็นแก้วได้เช่นกัน แก้วทางการค้าส่วนใหญ่จะทำมาจากทรายซึ่งประกอบไปด้วยฟอเมอร์ทั่วไป ได้แก่ ซิลิกา อย่างไรก็ตามก็ยังมีสารเคมีชนิดอื่นๆ ที่เป็นฟอเมอร์ได้ อาทิ กรดบอริกปราศจากน้ำ (anhydrous boric acid) กรดฟอสฟอริกปราศจากน้ำ (anhydrous phosphoric acid) เป็นต้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากการหลอมทรายบริสุทธิ์จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูง (ประมาณ 1850 องศาเซลเซียส หรือ 3360 องศาฟาเรนไฮต์) ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองของต้นทุนการผลิตเป็นอย่างมาก

2. *ฟลักซ์ (flux)* เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตแก้วจากการหลอมทรายบริสุทธิ์จึงได้มีการใส่สารเติมแต่งเข้าไป ในที่นี้คือฟลักซ์หรือสารช่วยหลอมนั่นเอง ซึ่งจะเป็นตัวช่วยให้ฟอเมอร์หลอมในอุณหภูมิที่ต่ำลง ตัวอย่าง ถ้าใส่ฟลักซ์ลงไปทรายจะช่วยทำให้การหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงลดต่ำลงมาถึงประมาณ 1300 องศาเซลเซียส หรือ 2370 องศาฟาเรนไฮต์ได้ สารช่วยหลอมหรือฟลักซ์ที่สำคัญได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต หรือเถ้าโซดา (soda ash) ก็ได้ และยังมี โพแทช (potash, K_2O) กับ ลิเทียมคาร์บอเนต (lithium carbonate, Li_2CO_3) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใส่ฟลักซ์ลงไปแก้วมีข้อเสียคือจะทำให้แก้วไม่เสถียรทางเคมี กล่าวคือละลายน้ำได้ง่ายขึ้น หรือมีการตกผลึกที่ไม่ต้องการ
 3. *สารช่วยให้เสถียร (stabilizer)* เป็นสารที่เมื่อผสมกับฟอเมอร์และฟลักซ์แล้วจะช่วยทำให้แก้วที่ผลิตได้ไม่ละลาย ไม่ร่วนและไม่แตกออกจากกัน ซึ่งสารชนิดดังกล่าวจะไปช่วยยึดให้โครงสร้างของแก้วคงอยู่ไม่บอบสลายและผสมเป็นเนื้อเดียว ซึ่งสารเหล่านี้ได้แก่ หินปูน ตะกั่ว เหลือง (litharge) อะลูมินา (alumina) แมกนีเซีย (magnesia) แบเรียมคาร์บอเนต (barium carbonate, $BaCO_3$) สตรอนเทียมคาร์บอเนต (strontium carbonate, $SrCO_3$) สังกะสีออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) และ เซอร์โคเนีย (Zirconia) เป็นต้น
- ในที่นี้จะแสดงให้เห็นถึงชื่อสามัญของสารเคมีและส่วนประกอบทางเคมีของสารในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ชื่อสามัญและส่วนประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่สำคัญในการหลอมแก้ว [9]

ชื่อทั่วไป	ส่วนประกอบทางเคมี
limestone (calcite)	$CaCO_3$
litharge (yellow lead)	PbO
anhydrous borax	$Na_2O \cdot 2B_2O_3$
soda Ash	$NaNO_3$
potash	K_2O or K_2CO_3
albite feldspar	$Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$
cullet	scrap glass
dolomite	$CaCO_3 \cdot MgCO_3$
gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
microcline	$K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$
red lead	Pb_3O_4
whiting	$CaCO_3$
sand	SiO_2

2.4.2 ความสามารถในการทำให้เกิดแก้ว (Glass forming ability) และความเสถียร (Glass stability)

ในเรื่องของความสามารถในการทำให้เกิดแก้ว (glassforming ability) และความเสถียร (glass stability) ของแก้วขึ้นอยู่กับเรื่องของการตกผลึก ถ้าแก้วมีความสามารถในการที่จะเกิดแก้วได้ดีจะต้องมีความต้านทานในการตกผลึก ในขั้นตอนที่น้ำแก้วหลอมเย็นตัวลงได้ดีด้วย ในขณะที่ความเสถียรของแก้วนั้นขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อการตกผลึกของแก้วในขั้นตอนที่ให้ความร้อนแก่แก้วจนหลอมมันเอง ดังนั้นความสามารถในการเกิดแก้วได้ดีจะมีความสำคัญต่อกระบวนการการหลอมแก้วในเบื้องต้น ส่วนความเสถียรของแก้วจะมีความสำคัญในกระบวนการการขึ้นรูปใหม่ของแก้วที่มีอยู่แล้ว (reforming of an existing glass) นั้นเอง [9]

นอกจากเรื่องดังกล่าวแล้ว ยังมีขั้นตอนของส่วนประกอบทางเคมีของสารที่จะเติมลงไป ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการผลิตแก้วชนิดหนึ่งๆ อาทิ เมื่อจะผลิตแก้วโซเดียมแคลเซียมซิลิเกต หรือ โบโรซิลิเกต มีความจำเป็นที่จะต้องหาสูตรในการผสมสารเคมีที่ต้องใช้ในการผลิตแก้วชนิดนั้นๆ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า การผสมเคมี (batching) ในขั้นตอนแรกต้องทราบสูตรแก้ว (glass formula) ที่จะผลิตก่อน จากนั้นจึงคำนวณสารผสมเคมีเพื่อชั่งและผสมกันต่อไป

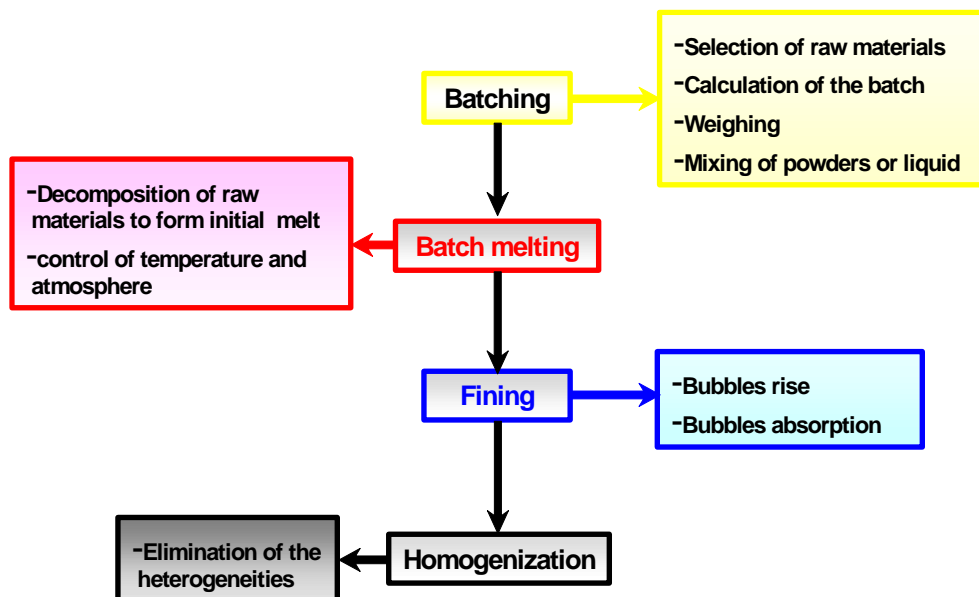
การเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของแก้วเพียงเล็กน้อย ตัวอย่างเช่นการเติมสารที่ช่วยให้ น้ำแก้วหลอมเป็นเนื้อเดียวของ As_2O_5 ร้อยละ 0.15 ถึง 0.5 โดยน้ำหนัก จะไม่นำไปคิดในการคำนวณการผสมเคมีเนื่องจากการผสมสารเพียงเล็กน้อยนี้ มักจะมีผลกระทบต่อส่วนประกอบทางเคมีของแก้วฐาน (based glass) น้อยมาก อย่างไรก็ตามถ้าการเติมสารที่มีร้อยละโดยน้ำหนักมากกว่า 5 ถึง 10 จะต้องเอามาคิดในการคำนวณการผสมเคมีนี้ด้วยเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อส่วนประกอบเคมีของแก้วฐาน

ศัพท์เฉพาะ (terminology) ที่ใช้อธิบายส่วนประกอบของแก้ว บางครั้งก็สามารถทำให้เกิดความสับสนได้ ส่วนประกอบทางเคมีของแก้วสามารถเป็นได้ทั้งโดยโมล โดยน้ำหนัก และโดยอะตอม ซึ่งอาจบอกเป็นเลขของสัดส่วน (fraction) หรือเป็นร้อยละ (percentage) ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับภูมิหลังและความโน้มเอียงของผู้เขียนนั่นเอง ในยุคเก่าแก่ๆ การเขียนส่วนประกอบทางเคมีของแก้วออกไซด์ จะเป็นแบบร้อยละโดยน้ำหนักซึ่งก็จะมีพื้นฐานขึ้นกับน้ำหนักของสารประกอบแต่ละตัว และเป็นที่รู้จักกันในสูตรของออกไซด์ (oxide formulations) ตัวอย่างเช่น ส่วนประกอบทางเคมีของแก้วโซดาไลม์ซิลิเกต (a soda-lime-silicate glass) นิยมเขียนในรูปของ 15% โซดา 10% ไลม์ (หินปูน) และ 75% ซิลิกา ผู้อ่านจะต้องทราบเองว่า % คือร้อยละโดยน้ำหนัก ส่วน โซดาก็คือ Na_2O และไลม์คือ CaO เป็นต้น การเขียนส่วนประกอบทางเคมีแบบร้อยละโดยน้ำหนักนั้น สามารถนำไปใช้ได้ดีในการผลิตแก้วทางการค้า อย่างไรก็ตามวิธีเขียนแบบนี้ไม่ช่วยในเรื่องของความเข้าใจของปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อสมบัติของแก้วหรือน้ำแก้วหลอมเท่าใดนัก ในทางตรงข้ามการเขียนส่วนประกอบทางเคมีแบบร้อยละโดยโมล หรือสัดส่วนโดยโมลนั้นมีประโยชน์มากกว่าในการที่จะเอาไปใช้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบจากส่วนประกอบทางเคมีต่อสมบัติต่างๆ ของแก้ว ซึ่ง

ปัจจุบันการเขียนด้วยวิธีนี้ก็เป็นที่นิยมใช้ในบรรดานักวิทยาศาสตร์ทางด้านแก้ว หรือสามารถนำไปใช้ในการเตรียมส่วนประกอบของแก้วที่ค่อนข้างซับซ้อนได้

การเขียนส่วนประกอบทางเคมีแบบสัดส่วนอะตอม ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) หรือสูตรทางเคมีก็ยังเป็นที่นิยมใช้ในแก้วซัลโคเจไนด์ (chalcogenide glasses) หรือแก้วออกไซด์อย่างง่าย ตัวอย่างเช่นแก้วที่ประกอบไปด้วย ร้อยละ 40 โดยอะตอมของอาร์เซนิก As และร้อยละ 60 โดยอะตอมของซัลเฟอร์ (S) สามารถเขียนสูตรให้อยู่ในรูปอย่างง่ายคือ As_2S_3 $As_{40}S_{60}$ หรือ $As_{0.4}S_{0.6}$ เนื่องจากแก้วซัลโคเจไนด์นี้ ปรกติแล้วจะมีส่วนประกอบหลักเป็นธาตุ มากกว่าที่จะเป็นสารประกอบเพราะฉะนั้นการเขียนส่วนประกอบทางเคมีแบบสัดส่วนอะตอมจึงเหมาะสมมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามในการคำนวณการผสมเคมี ยังคงต้องเปลี่ยนกลับจากฐานอะตอมเป็นฐานน้ำหนักก่อน ซึ่งการคำนวณไม่ยุ่งยากเนื่องจากเป็นธาตุอย่างง่าย และมีข้อที่ต้องระวังคืออาจเกิดความผิดพลาดในการคำนวณได้ถ้าในแก้วซัลโคเจไนด์นี้มีกลุ่มของสารประกอบของ As_2S_3 อยู่ในโครงสร้างแทนที่จะเป็นการต่อกันของอะตอม As หรือ S ในโครงสร้างของแก้ว As_2S_3

การใช้วิธีปริมาณสารสัมพันธ์ในการเขียนสูตรทางเคมีของแก้ว มีความยุ่งยากมากขึ้น ตัวอย่างเช่นสูตรทั่วไปของแก้ว $xLi_2O-(100-x)SiO_2$ ซึ่งแก้วชนิดนี้สามารถผลิตได้ในช่วงค่าของ x อยู่ในระหว่าง 0 ถึง 40 ถ้าต้องการเขียนสูตรแก้วนี้เป็นแบบร้อยละโดยอะตอมจะได้เป็น $Li_{2x}Si_{(100-x)}O_{(200-x)}$ ตัวอย่างของส่วนประกอบ เช่น $x = 33.33$ จะสามารถเขียนได้เป็น $33.33Li_2O-66.67SiO_2$ หรือ $Li_{66.67}Si_{66.67}O_{166.7}$ หรือจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายเป็น $Li_2O-2SiO_2$ หรือ $Li_2Si_2O_5$ ก็ได้ เนื่องจากแก้วชนิดนี้ประกอบไปด้วย Li_2O 1 โมล กับ SiO_2 2 โมล บางครั้งจึงมักถูกเรียกว่า แก้วลิเทียมไดซิลิเกต (lithium disilicate glass) ซึ่งหมายความว่าโครงสร้างของแก้วนี้ประกอบไปด้วยยูนิตของโมเลกุลของส่วนประกอบทางเคมีนั้นๆ หรือในแง่หนึ่งก็คือโครงสร้างของแก้วชนิดนี้จะมีฐานมาจากผลึกของส่วนประกอบทางเคมีของแก้วนั่นเอง



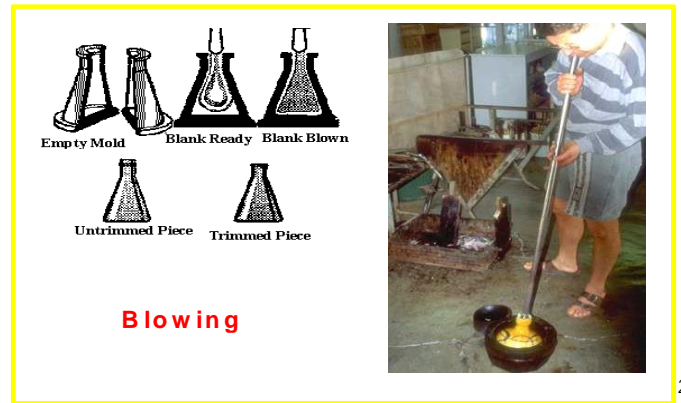
รูปที่ 2.4 ไดอะแกรมสรุปกระบวนการการหลอมแก้ว

การทำให้น้ำแก้วหลอมมีความหนืดน้อยลง และการใช้สารผสมเคมีที่มีขนาดของอนุภาคเหมาะสมจะช่วยให้เกิดฟองขนาดใหญ่ และการลอยตัวของฟองเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นแล้ว การเติมสารเคมีพิเศษ หรือที่เรียกว่าตัวทำให้เนื้อละเอียดลงในสารผสมเคมีเพื่อช่วยในการกำจัดฟอง ท้ายที่สุดนี้การผลิตแก้วที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน ต้องกำจัดความเป็นเนื้อผสมที่อยู่ภายในเนื้อแก้วออกไป เพื่อที่จะทำการผลิตน้ำแก้วหลอมจากส่วนประกอบทางเคมีจำนวนมากที่มีสมบัติแตกต่างกันไป

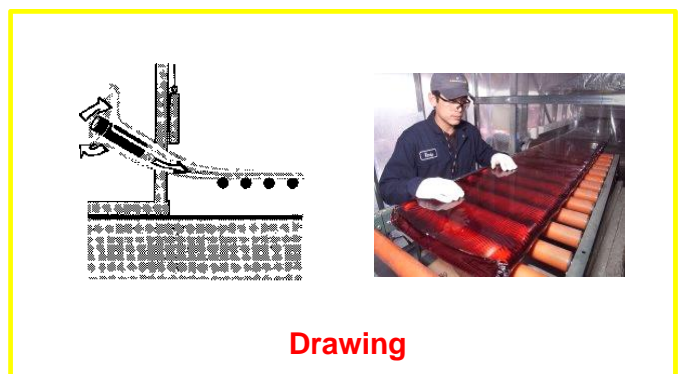
2.4.3 การขึ้นรูปของแก้ว (glass forming) [11]

เมื่อน้ำแก้วหลอมออกมาจากแท่งกหลอมเพื่อนำมาขึ้นรูป น้ำแก้วหลอมจะมีลักษณะเหมือนกับน้ำเชื่อมหนืดที่มีสีส้มออกแดง จากนั้นก็จะทำการขึ้นรูปในรูปแบบต่างๆ อย่างรวดเร็ว เนื่องจากเมื่อแก้วเริ่มเย็นตัวลงจะมีสภาพแข็งเกร็งซึ่งจะทำให้ขึ้นรูปได้ยากขึ้น ซึ่งกระบวนการการขึ้นรูปแก้วนั้นมีหลายแบบ ตั้งแต่การเป่า (Blowing) การรีด (drawing) การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (centrifugal casting) การอัด (pressing) เป็นต้น ซึ่งแสดงไว้ในรูป 2.5 ถึง 2.8

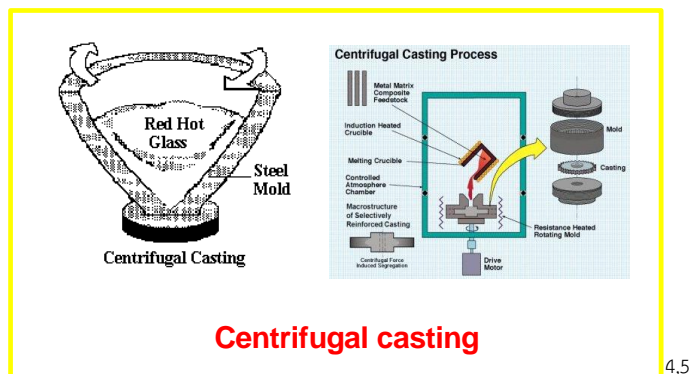
การเป่าแก้ว สำหรับการขึ้นรูปเป็นวัตถุที่มีผิวบางกลวง (hollow thin-wall item) อาทิ ขวดฟองอากาศในน้ำแก้วหลอมจะทำให้เกิดแรงดัน และดันน้ำแก้วหลอมให้ติดกับผนังแบบหล่อเมื่อแก้วมีสภาพแข็งเกร็ง จึงเปิดแบบหล่อออกมาและได้ขวดแก้วในที่สุด (ดังรูป 2.6) วิธีนี้สามารถควบคุมขนาดของขวดหรือผลิตภัณฑ์ได้เป็นอย่างดี และพื้นผิวแก้วที่ผลิตได้ก็จะดีกว่าการอัดแก้วอีกด้วย



รูปที่ 2.5 การเป่าแก้ว (glass blowing)



รูปที่ 2.6 การดึงรีดแก้ว (glass drawing)



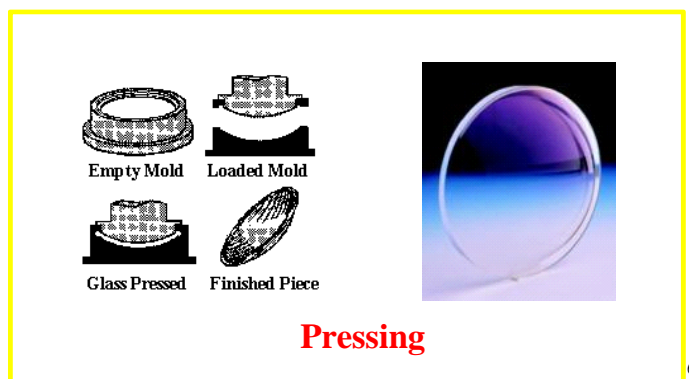
รูปที่ 2.7 การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (centrifugal casting)

² Russ Collins. Copyright 1997-1999. Available: <http://www.beyond.fr/themephotos/glasswP07.html> (November 9, 2005)

³ Lawrence Livermore National Laboratory, 2001. Available: http://www.science.doe.gov/Science_News/feature_articles_2001/september (November 9, 2005)

⁴ Corning Museum of Glass. 2002-2005 Available: <http://www.cmog.org/index.asp?pageId=712> (November 9, 2005)

⁵ The Pacific Northwest National Laboratory. 2005. Available: <http://www.technet.pnl.gov/dme/materials/casting.stm> (November 9, 2005)



รูปที่ 2.8 การอัดขึ้นรูปแก้ว (glass pressing)

การดึงรีดแก้ว สามารถนำไปใช้ผลิตท่อแก้ว (glass tube) แท่งแก้ว (glass rod) และแผ่นแก้ว (glass sheet) ได้ น้ำแก้วหลอมจะถูกรีดผ่านเหล็กแกนแบบ (mandrel) กระจบอกลมวง (hollow cylinder) หรือโคน (cone) ในการทำท่อแก้วอากาศจะถูกเป่าผ่านเหล็กแกนแบบตลอดเวลาจนกว่าจะได้ท่อแก้วกลางที่มีสภาพแข็งเกร็ง เหล็กแกนแบบอาจวางอยู่ในแนวนอนในเครื่องจักรแบบแดนเนอร์ (Danner machine) แนวเอียงในเครื่องจักรแบบเวลโล (Vello machine) ดังรูปที่ 2.7 และแนวตั้งในเครื่องจักรแบบอัปดอร์ (updraw machine) ส่วนการทำแท่งแก้วก็จะใช้วิธีเดียวกันเพียงแต่ปิดไม่ให้อากาศผ่านเหล็กแกนแบบเท่านั้น

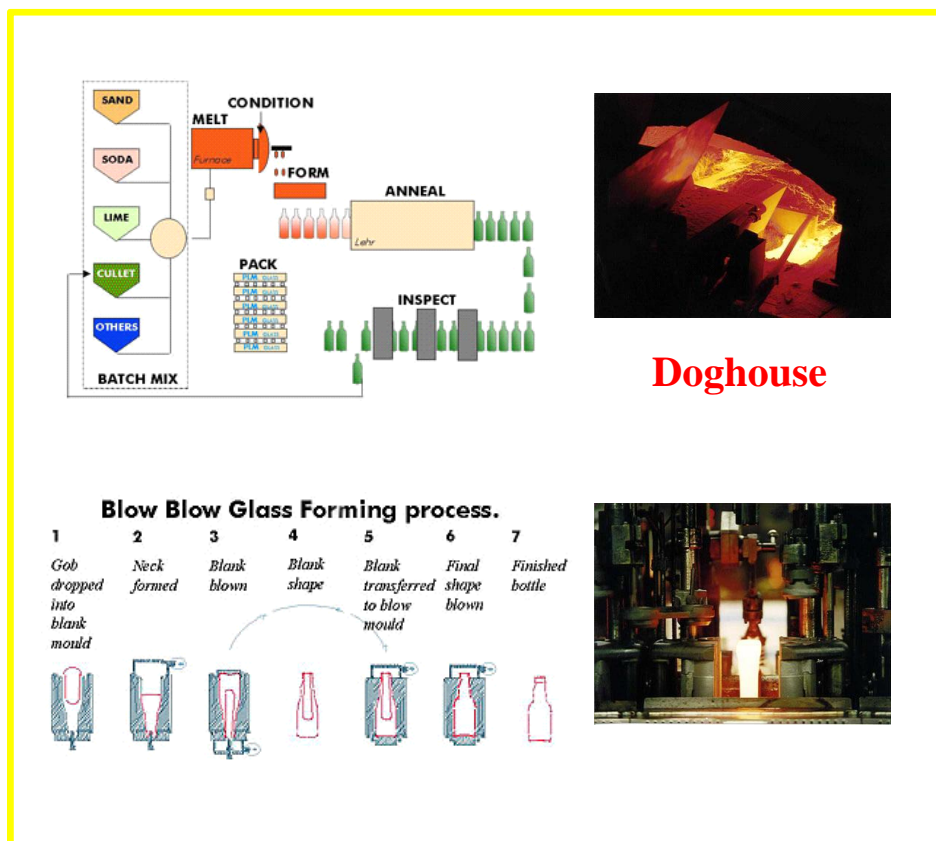
การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง นำไปใช้ในการผลิตแก้วที่มีรูปร่างแบบพิเศษ น้ำแก้วหลอมจะไหลผ่านแบบหล่อที่กำลังหมุนอยู่ แรงหนีศูนย์กลางจะผลักให้แก้วติดกับผนังของแบบหล่อขณะที่กำลังหมุนจนกระทั่งน้ำแก้วหลอมเริ่มแข็งตัว ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์แก้วที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้คือ หลอดภาพทีวี (television picture tubes) บางครั้งเรียกวิธีการขึ้นรูปแบบนี้ว่าการหมุน (spinning) อย่างไรก็ตามการหล่อแบบหมุนเหวี่ยงไม่ควรนำไปทำให้เกิดความสับสนกับวิธีที่ใช้ในการขึ้นรูปโลหะ ซึ่งเป็นวิธีที่แตกต่างกันโดยสิ้นเชิง

การอัดขึ้นรูปแก้ว เป็นวิธีที่ควบคุมขนาดได้ดีกว่าการเป่าแก้วและได้ขนาดที่หนากว่า เลนส์ของไฟหน้ารถยนต์เป็นตัวอย่างหนึ่งที่ใช้วิธีการขึ้นรูปแบบนี้ รูปร่างที่ซับซ้อนก็สามารถใช้วิธีนี้ได้โดยขนาดอาจต้องยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ วิธีนี้ทำได้โดยการนำก้อนของน้ำแก้วหลอม (a gob of molten glass) หรือกอบ ใส่เข้าไปในแบบแล้วลูกสูบก็จะกดต่ำลงมาดันให้น้ำแก้วหลอมกระจายเต็มแบบหล่อ

งานขั้นสุดท้าย (finishing) จะเป็นกระบวนการหลังจากการขึ้นรูปและการอบอ่อน (annealing) ซึ่งผลิตภัณฑ์บางอย่างต้องการกระบวนการที่มีการให้ความร้อนแก่แก้วอีกครั้งเพื่อการขึ้นรูปที่ต้องการ อาทิ การดัด (bending) การทำให้หย้อยคล้อยลง (sagging) การอัด (pressing) หรือการเป่า (blowing) เป็นต้น นอกจากนี้ยังอาจจะต้องมีการอบอ่อนเพิ่มเติมหลังจากมีการตกแต่งขึ้นรูปแก้วเสร็จแล้ว หรือมีการตกแต่ง โดยการตัด (cutting) หรือการเจาะ (drilling) เป็นต้น

⁶ Danyang Huarui Glasses Optical Co.,Ltd. 2004. <http://www.hroptic.com> (November 9, 2005)

ในการผลิตแก้วจำนวนมาก (mass production) กระบวนการทั้งหมดเป็นแบบอัตโนมัติ ตั้งแต่กระบวนการการหลอมแก้ว การขึ้นรูป จนกระทั่งถึงงานขั้นสุดท้าย ดังตัวอย่างของการผลิตขวดดังรูป 2.9 หลังจากที่สารผสมเคมีของขวดได้ผสมกันแล้วนั้น ก็จะนำไปหลอมโดยใส่ผ่านทางช่องใส่สารผสมเคมีหรือเรียกว่าดอกเฮาส์ (doghouse) ดังรูป หลังจากนั้นสารผสมเคมีจะถูกหลอมในห้องหลอมจนกระทั่งน้ำแก้วหลอมมีความเป็นเนื้อเดียว หลังจากนั้นจะมีการยิงก้อนน้ำแก้วหลอมหรือกอบ (gob) ออกมาเพื่อเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปโดยการเป่า (blow blow glass forming process) หลังจากนั้นจึงนำแก้วไปผ่านงานขั้นสุดท้ายซึ่งก็คือการอบอ่อนเพื่อไล่ความเครียดที่เกิดขึ้นออกจากขวดแก้วที่ผลิตได้ ซึ่งอุณหภูมิในการอบอ่อนนี้ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของแก้วที่ผลิต หลังจากขวดแก้วได้ผ่านการอบอ่อนแล้วก็จะผ่านมายังขั้นตอนของการตรวจสอบคุณภาพเช่น ขนาดของฟอง หรือข้อบกพร่องอื่นๆ ซึ่งเครื่องตรวจจับเหล่านี้ก็จะสามารถเลือกขวดที่ไม่ผ่านการทดสอบทั้งได้แบบอัตโนมัติ



รูป 2.9 กระบวนการผลิตขวดของบริษัท Tynant spring water limited

⁷ Tynant Spring Water limited, Available: <http://www.tynant.com/glass.htm> (November 9, 2005)

2.5 สมบัติทางแสงของแก้ว [12]

ผลของการเกิดอันตรกิริยาของรังสี (interaction of radiation) กับแก้วอาจมีหลายแบบดังนี้

- การสะท้อน (Reflection of radiation) ในบริเวณรอยต่อของตัวกลางทั้งสองชนิด (the boundary of the two media) ที่รังสีตกกระทบลงบนแก้ว ถ้าตัวกลางสองชนิดมีดัชนีหักเห (refractive indices) แตกต่างกัน
- การหักเห (Refraction of radiation) ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างตัวกลางสองชนิด ถ้าตัวกลางสองชนิดมีดัชนีหักเหแตกต่างกัน โดยลำของรังสีหักเหผ่านเข้าไปในแก้วด้วยมุมหักเหที่มีค่าแน่นอนค่าหนึ่ง
- การดูดกลืนรังสี (Absorption of radiation) เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในแก้วจะมีผลทำให้ความเข้มของรังสีและการกระจายตัวของสเปกตรัมลดลง ทั้งนี้ทำให้แก้วมีสมบัติของการดูดกลืนรังสี
- การกระเจิงของรังสี (Scattering of radiation) จะเกิดศูนย์กลางของการกระเจิงของรังสีภายในแก้ว

นอกจากนี้ผลของรังสียังทำให้เกิดปรากฏการณ์อื่นๆ เช่น

- การหักเหสองแนว (Birefringence) ซึ่งขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของโครงสร้างและดีกรีของไอโซทรอปี (degree of isotropy) ซึ่งก็คือการที่สารมีสมบัติเดียวกันในทุกทิศทาง ผลึกที่มีสมบัติการหักเหสองแนว อาทิ แคลไซต์ (calcite) และไมกา (mica) สามารถแบ่งแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic light) เป็นสองลำแสงที่มีโพลาไรเซชันที่ตรงข้ามกัน และมักแผ่ไปในทิศทางและความเร็วต่างกัน ปรากฏการณ์นี้มักเกิดขึ้นกับวัสดุที่มีสมบัติเป็นแบบแอนไอโซทรอปี (anisotropy) คือมีสมบัติที่ไม่เหมือนกันทุกทิศทาง ถ้าผลึกมีแกน (axis) ที่มีสมบัติต่างจากแกนอื่นหนึ่งแกนหรือที่เรียกว่าเป็นผลึกแกนเดียว (uniaxial crystal) สมบัติการหักเหสองแนวจะเกิดขึ้นได้จากการทำให้ผลึกมีดัชนีหักเหต่างกันสองค่าสำหรับโพลาไรเซชันที่ต่างกัน ดังนั้นขนาดของการหักเหสองแนว (birefringence magnitude) มีค่าดังสมการที่ 2.1 [13]

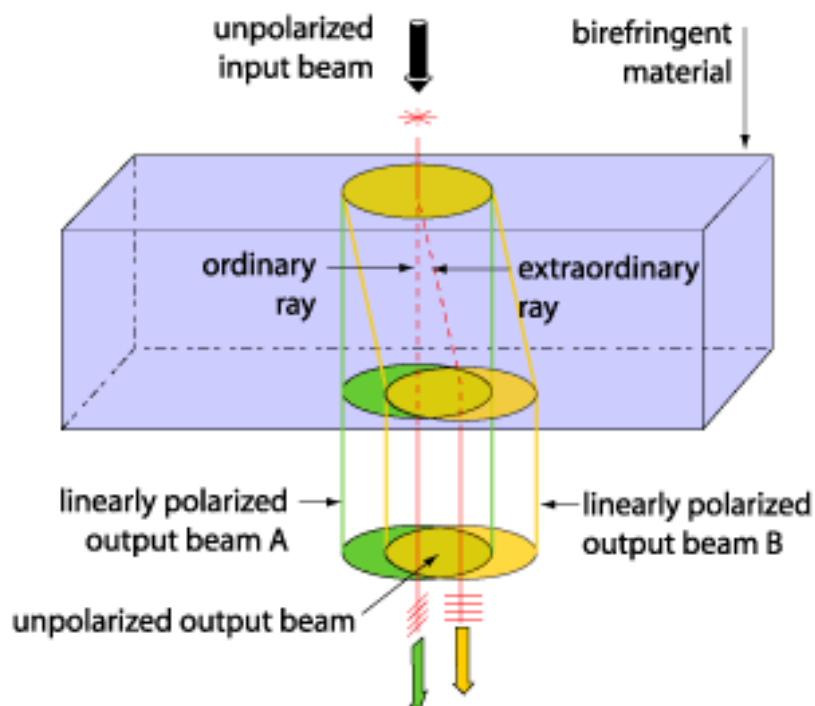
$$\Delta n = n_e - n_o \quad (2.1)$$

โดยที่ n_e = ดัชนีหักเหของโพลาไรเซชันแบบขนาน (parallel) กับแนวแกนที่เป็นแบบแอนไอโซทรอปี

n_o = ดัชนีหักเหของโพลาไรเซชันแบบตั้งฉาก (perpendicular) กับแนวแกนที่เป็นแบบแอนไอโซทรอปี

e มาจากคำว่าไม่ปรกติ “extraordinary”

o มาจากคำว่าไม่ปรกติ “ordinary”

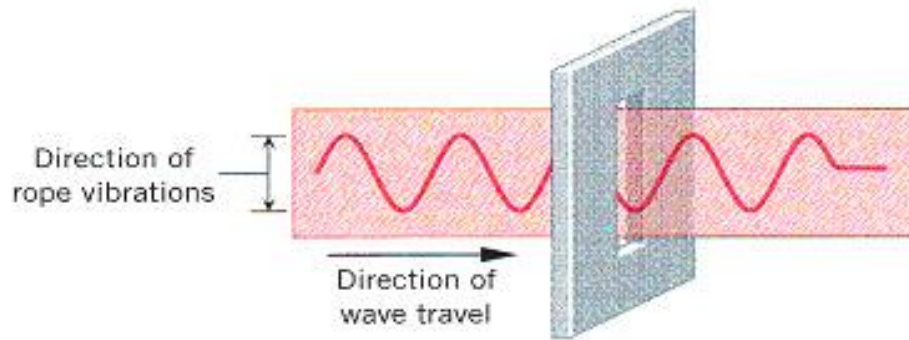


รูป 2.10 แผนภาพแสดงการหักเหสองแนว (birefringence) ของวัสดุที่มีสมบัติเป็นแบบแอนไอโซทรอปี (anisotropy) [14]

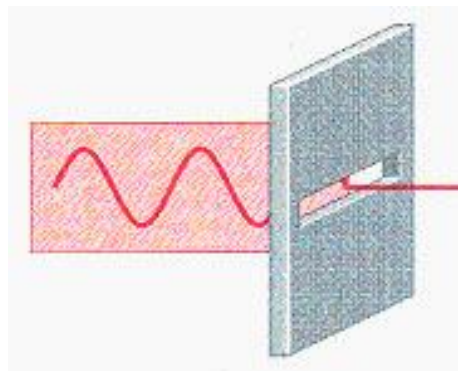
การหักเหสองแนวยังสามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุที่มีสมบัติแม่เหล็ก แต่ไม่มีสมบัติไดอิเล็กตริก อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพซึมผ่านได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability) มักพบได้ยากในช่วงความถี่แสง (optical frequencies)

- โพลาริเซชัน (Polarization) [14] เกิดขึ้นจากผลการตกกระทบของรังสีลงบนแก้วภายใต้อิทธิพลของการสะท้อน (Reflection) การหักเห (Refraction) การดูดกลืน (Absorption) และการกระเจิงของรังสี (Scattering) เป็นต้น

โพลาริเซชันจะเกิดขึ้นกับคลื่นตามขวาง (transverse wave) ดังรูปที่ 2.11 (a) ซึ่งแสดงถึงคลื่นตามขวางเคลื่อนที่ผ่านช่องเล็กยาว (slit) ที่ขนานกับระนาบคลื่น โดยคลื่นชนิดนี้จะสั่นในทิศทางเดียวกับแนวยาวของช่องเล็กยาว ดังนั้นการโพลาริเซชันแบบนี้เรียกว่าการโพลาริเซชันเชิงเส้น (linearly polarized) อย่างไรก็ตามคลื่นตามขวางนี้จะไม่สามารถผ่านช่องเล็กยาวที่ตั้งฉากกับระนาบคลื่นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (b)



(a)

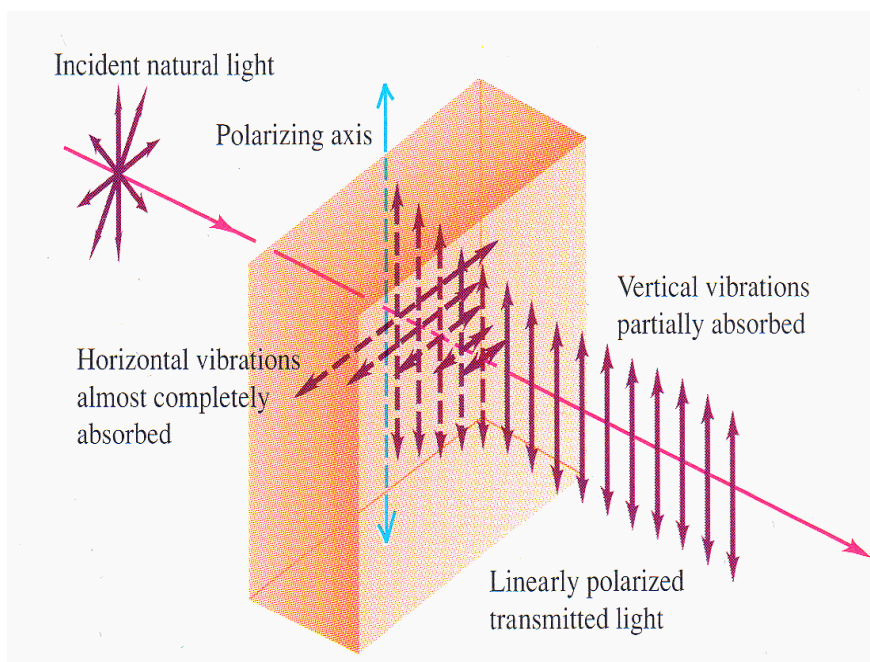


(b)

รูป 2.11 หลักการของการโพลาไรเซชัน: คลื่นตามขวาง (a transverse wave) จะเกิดโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized) เมื่อการสั่นเกิดขึ้นในทิศทางเดียว [15]

- (a) คลื่นสามารถผ่านช่องเล็กยาว (slit) ที่ขนานกับระนาบการสั่นของคลื่นได้
- (b) แต่ไม่สามารถผ่านช่องเล็กยาวที่ตั้งฉากกับระนาบการสั่นของคลื่นได้

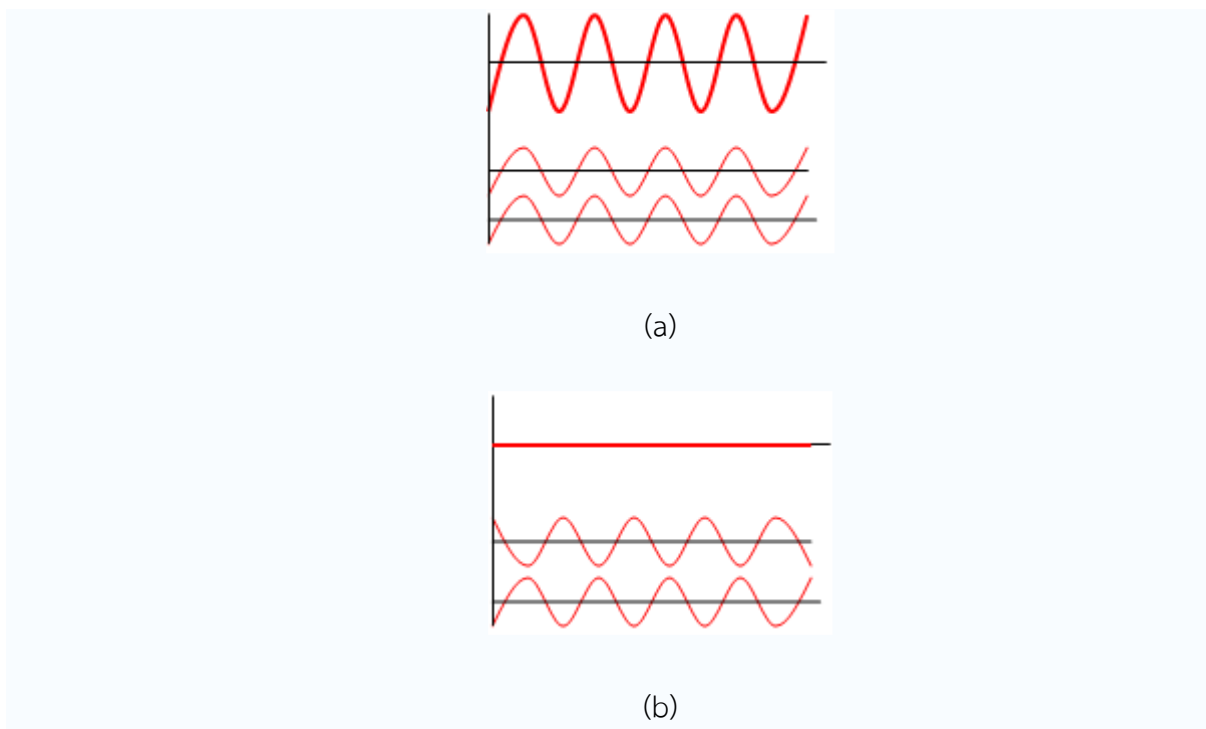
แสงธรรมชาติ (natural light) มักไม่เป็นแสงโพลาไรซ์ แต่วัสดุบางอย่างสามารถเปลี่ยนแสงธรรมชาติให้เป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นได้ อาทิ วัสดุที่มีอยู่ในทางการค้าอย่างหนึ่งคือโพลาไรซ์ (polaroid) หรือตัวกรองโพลาไรซ์ (a polarizing filter) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 โดยโพลาไรซ์จะยอมให้แสงผ่านได้ในทิศทางเดียว คือทิศทางที่ขนานกับแกนโพลาไรซ์ (polarizing axis) ดังรูป ส่วนในแนวแกนอื่นจะถูกดูดกลืน (absorb) ทั้งหมด แม้กระทั่งในแนวแกนที่ขนานกับแกนโพลาไรซ์จะถูกดูดกลืนเป็นบางส่วนด้วยเช่นกัน



รูป 2.12 แสงโพลาไรซ์เชิงเส้น (linearly polarized light) ผลิตโดยตัวกรองโพลาไรซ์ (a polarizing filter) [15]

- การแทรกสอด (Interference) [13] คือการซ้อนทับกัน (superposition) ของคลื่นสองลูกหรือมากกว่าและได้ผลเป็นรูปแบบของคลื่นลูกใหม่ (a new wave pattern) ปรากฏแล้วมักกล่าวถึงการแทรกสอดของคลื่นสองลูกว่าอาจเป็นแบบอาพันธ์ (coherent) คือมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (correlated) สาเหตุอาจเนื่องมาจาก คลื่นทั้งสองมีแหล่งกำเนิดเดียวกันหรือมีความถี่เท่ากัน ในกรณีที่คลื่นสองลูกที่ไม่เป็นแสงสีเดียวเกิดการแทรกสอดกันแบบอาพันธ์สมบูรณ์ (fully coherent) คลื่นทั้งสองจะต้องมีความยาวคลื่นเท่ากันและมีความต่างเฟส (phase differences) เหมือนกันอีกด้วย

หลักการของการซ้อนทับกันของคลื่นกล่าวไว้ว่า ผลของการกระจัด (displacement) ณ จุดหนึ่ง เท่ากับการรวมกันของกระจัดของคลื่นที่ต่างกัน ณ จุดนั้น ถ้ายอดคลื่น (a crest of a wave) หนึ่งพบกับยอดคลื่นของอีกคลื่นหนึ่ง ณ จุดเดียวกัน จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference) และผลของแอมพลิจูด (amplitude) เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้ายอดคลื่นหนึ่งพบกับท้องคลื่น (a trough) ของอีกคลื่นหนึ่ง ณ จุดเดียวกัน จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (destructive interference) รูปที่ 2.13 (a) แสดงถึงการแทรกสอดแบบเสริมกันหรือเรียกว่าสองคลื่นมีเฟสตรงกัน (two waves in phase) ส่วนรูปที่ 2.13 (b) แสดงถึงการแทรกสอดแบบหักล้างกันหรือเรียกว่าสองคลื่นมีเฟสตรงกันข้าม 180° (two waves 180° out of phase)



รูป 2.13 แผนภาพแสดงการแทรกสอดโดย (a) การแทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference) (b) การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (destructive interference)

[13]

2.6 ทฤษฎีการเกิดสีในวัตถุที่เกี่ยวข้อง [5]

2.6.1 ทฤษฎีสถานมผลึก (crystal field theory): เมื่อแสงซึ่งเป็นพลังงาน เคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า

เข้ามากระทบอัญมณีจะเกิดอันตรียากับแสงดังที่กล่าวมาข้างต้น อย่างไรก็ตามถ้าการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นในช่วงของความยาวคลื่นในช่วงที่มองเห็นได้ เพื่อใช้เป็นพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจากระดับพลังงานที่ต่ำกว่าขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า ซึ่งปรากฏการณ์นี้มักเกิดขึ้นจากไอออนของธาตุที่อยู่ในวัตถุ โดยส่วนมากได้แก่ธาตุทรานซิชัน อาทิ Cr Mn Fe Cu เป็นต้น อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานกระตุ้นเป็นอิเล็กตรอนในวงชั้น 3d ของธาตุเหล่านั้นและธาตุตัวอย่างมีสีอันเนื่องมาจากสาเหตุนี้คือ มรกต ทับทิมทั้งสองมีไอออนของทรานซิชันเป็นสารเจือปน คือ Cr^{3+}

2.6.2 การเปลี่ยนการถ่ายโอนประจุ (Charge-transfer transition): ไอออนของธาตุทรานซิชันบางตัวที่เป็นสารเจือปนในอัญมณีสามารถเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งไอออนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในอัญมณีได้ อีกทั้งยังสามารถแลกเปลี่ยนหรือย้ายอิเล็กตรอนไปมาระหว่างไอออนของธาตุทรานซิชันอื่น หรือชนิดเดียวกันที่อยู่ใกล้เคียงได้ เมื่อได้รับแสงมากระตุ้น แสงในช่วงคลื่นจะถูกใช้ไปเป็นพลังงานในการย้ายอิเล็กตรอนดังกล่าว หรือแสงนั้นจะถูกดูดกลืนไป ดังนั้นเราจะเห็นแสงในช่วงที่มองเห็นได้ที่ส่งผ่าน (transmit) ออกมาจากอัญมณีเป็นสีต่างๆ นั่นเอง ตัวอย่างการเกิดสีลักษณะนี้ได้แก่ ไพลีน ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนของ

Fe^{2+} ถูกถ่ายโอนไปอยู่ใน Ti^{4+} เมื่อได้รับแสงมากระตุ้นให้กลายเป็น Fe^{3+} และ Ti^{3+} ตามลำดับ ทำให้มองเห็นสีอัญมณีเป็นสีน้ำเงิน 47 โครงการย่อยที่ 1 Development of Technology for Red Crystal Glass using Reduction Reaction

2.6.3 ศูนย์กลางของสี (color center): ในโมเลกุลแร่อัญมณีบางชนิดมีอิเล็กตรอนส่วนเกินมาอยู่ในโครงสร้าง (ทั้งนี้อาจเกิดจากไอออนบางตัวหายไปหรือมีสารเจือปนเข้ามาปนในโมเลกุล) หรือการที่อิเล็กตรอนบางตัวในโมเลกุลหลุดไปในส่วนของโครงสร้าง เพราะอิทธิพลของรังสี เช่น แกมมา รังสีเอ็กซ์

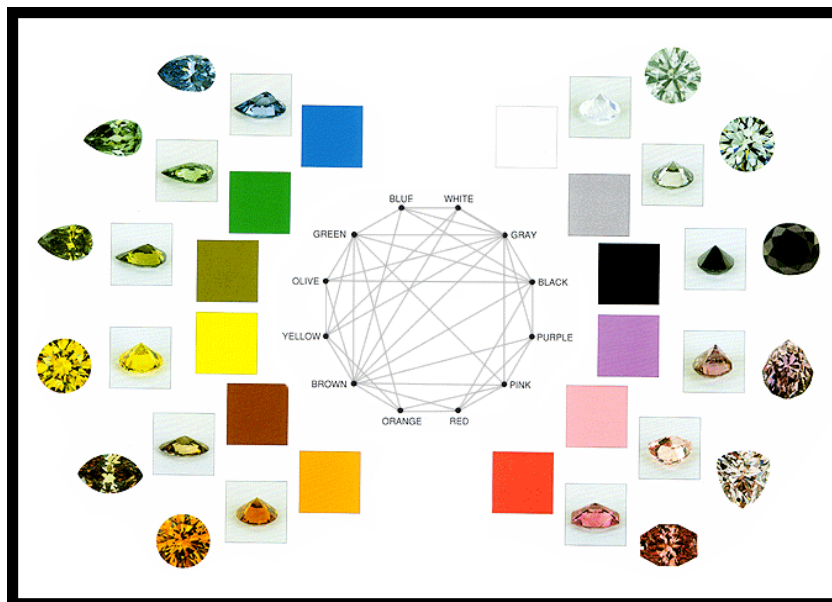
เป็นต้น ทำให้อิเล็กตรอนที่เหลืออยู่และหลุดไปอยู่ในสถานะไม่สมดุล เมื่อได้รับแสงสีขาวมากระทบ จะทำให้อยู่ในสถานะกระตุ้น (excited state) ซึ่งพลังงานที่ใช้ไปในการทำให้อิเล็กตรอนอยู่ในลักษณะเช่นนั้นเป็นพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนไปนั่นเอง ส่วนแสงที่เหลือจะออกมาเป็นสีที่ตาเรามองเห็น อัญมณีตัวอย่างที่ใช้ทฤษฎีนี้อธิบายการเกิดสี ได้แก่ ฟลูออไรด์สีม่วงแดง และควอตซ์สีควีนไฟ เป็นต้น กรณีนี้อาจทำให้สีของอัญมณีเปลี่ยนกลับไปเป็นสีเดิมหรือสีจางลงได้ เช่น การนำอัญมณีนั้นไปผ่านความร้อนหรือแสงสว่างที่มีความร้อน เช่น แสงแดด จะทำให้อิเล็กตรอนกลับไปอยู่ในตำแหน่งปกติ เช่น ในโพแทสเซียมน้ำตาล คุณไฮต์ แชนไฟร์สีเหลือง ที่ผ่านการอาบรังสี ฟลูออไรด์สีม่วง เป็นต้น

2.6.4 สารฝังใน (inclusion) ในเนื้ออัญมณี: การที่แร่หรืออัญมณี มีสารฝังในอยู่ในเนื้อ สารฝัง

ในดังกล่าวจะเป็นตัวทำหน้าที่แสดงกลไกทำให้เกิดสี ทำให้ได้สีจากสารฝังในนั้น เช่น ควอตซ์ไซต์ (quartzite) ที่มีสีเขียว เนื่องจากมีแร่คลอไรต์หรือฟัชไซต์ (fuchsite) เป็นสารฝังในอยู่ในเนื้อ แคลไซต์ (calcite) มีสีดำเนื่องจากมีสารแมงกานีสออกไซด์ (MnO) อยู่ในเนื้อ แจสเปอร์ (jasper) สีแดง เนื่องมาจากแร่ฮีมาไทต์ (hematite) อยู่ในเนื้อ

2.6.5 สีที่เกิดจากโครงสร้างของอัญมณี: อัญมณีบางชนิดมีโครงสร้างพิเศษ อาจทำให้เกิดสีต่างไปจากอัญมณีที่มีโครงสร้างธรรมดา โดยเฉพาะอัญมณีที่มีปรากฏการณ์ทั้งหลาย เช่น โอปอล (opal) มีการเล่นแสง อันเนื่องมาจากแสงตกกระทบ โครงสร้างที่เป็นทรงกลมซิลิกาขนาดเล็ก แสงที่เกิดการเลี้ยวเบนออกมาเป็นสเปกตรัมของสีต่างๆ กัน นอกจากนี้ยังมีอัญมณีชนิดอื่นๆ ที่มีสีอันเนื่องมาจากโครงสร้าง เช่น ลาบริดอไรต์ (labradorite) มูนสโตนตาแมว (cat's eye moonstone) สาแหวก (asterism) ในอัญมณี เป็นต้น

2.6.6 ทฤษฎีแถบพลังงาน (Band theory or band gaps): เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเกิดสีในวัตถุในอีกแง่มุมหนึ่งที่นอกเหนือจากการอธิบายด้วยสาเหตุมาจากอิเล็กตรอนภายในวงโคจรหนึ่ง ซึ่งทฤษฎีนี้สามารถอธิบายวัตถุที่ใสไม่มีสี วัตถุสีดำ และวัตถุที่มีสีได้ กล่าวคือ ในทฤษฎีอื่น เช่น ทฤษฎีสนามผลึก และทฤษฎีการเปลี่ยนการถ่ายโอนอิเล็กตรอน อะตอมในอัญมณีถูกยึดติดกันด้วยพันธะทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.14 GIA Color chart [6]

ดังนั้นสีของอัญมณีจึงถูกอธิบายในรูปของการดูดกลืนแสงในระหว่างที่แสงนั้นมีอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรรอบอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุลเท่านั้น แต่ในวัสดุบางประเภทมีอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วทั้งโครงสร้างของวัสดุนั้น อิเล็กตรอนในกลุ่มหลังนี้มีระดับพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนที่โคจรอยู่เฉพาะในวงโคจรรอบๆ อะตอมหรือในไอออน ช่องว่างหรือข้อแตกต่างในเรื่องพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนที่เป็นพันธะระหว่างอะตอม หรือ เรียกว่าแถบเวเลนซ์ (Valence band) กับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปทั่วเรียกว่า แถบการนำ (Conduction band) ถือเป็นค่าพลังงานหรือระยะห่างระหว่างแบนแถบหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็น เขตหวงห้ามหรือแถบหวงห้าม (Forbidden zone or Forbidden band) การแยกหรือความห่างกันของค่าพลังงานเรียกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy bandgap) จะแตกต่างกันไปในวัสดุต่างชนิดกันรวมทั้งสภาวะทางกายภาพที่ต่างกันไปด้วย ซึ่งประเด็นเหล่านี้มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติอื่นๆ ของวัตถุ ทฤษฎีนี้ถูกนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์การเกิดสีในอัญมณีบางประเภทได้ รวมทั้งอธิบายที่อัญมณีไม่มีสีโดยเฉพาะอัญมณีที่ปราศจากสารเจือปนหลายชนิด

2.7 แก้วตะกั่วหรือแก้วคริสตัล

ตะกั่วเป็นธาตุหนัก ซึ่งมีค่าน้ำหนักอะตอมสูงและค่าสถานะออกซิเดชันสเตทรวม 2 ค่า คือ +2 และ +4 ในการผสมเป็นแก้ว ตะกั่วอาจอยู่ในรูปของสารประกอบของตะกั่ว อาทิ ตะกั่ว (II) ออกไซด์ (PbO) ตะกั่ว (IV) ออกไซด์ (PbO₂) ตะกั่ว (II, IV) ออกไซด์ (Pb₃O₄) ตะกั่วซัลเฟต (PbSO₄) ตะกั่วซัลไฟด์ (PbS) ตะกั่วฟลูออไรด์ (PbF₂) และตะกั่วคลอไรด์ (PbCl₂) เป็นต้น ตะกั่วจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแก้วและมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางกายภาพของแก้ว อาทิ

1. การหลอมของน้ำแก้วเร็วขึ้น (อุณหภูมิจากหลอมเหลวต่ำลง)
2. ความหนาแน่นเพิ่มสูงขึ้น

3. ค่าดัชนีหักเหและการกระจายแสงเพิ่มขึ้น
4. ความหนืดลดลงและแรงตึงผิวลดลง
5. สามารถตัดหรือทำให้เป็นรูปร่างได้ง่าย
6. ค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น
7. ค่า Photoelectric Constant ลดลง
8. ค่า Thermal Capacity ลดลง
9. ค่า Modulus of Elasticity ลดลง
10. ผิวเรียบและไม่แตกง่าย
11. สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น
12. สามารถดูดกลืนรังสีและรังสีแกมมาได้ดี

เนื่องจากสมบัติดังกล่าวของแก้วตะกั่ว จึงสามารถนำแก้วตะกั่วไปใช้ในงานด้านการประดับตกแต่งได้ ซึ่งสามารถเจียรระโนเป็นรูปแบบต่างๆ คล้ายอัญมณีได้อีกด้วย...

2.8 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

สีในแก้วจะเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนของโลหะ (metal ions) ที่เกิดการเปลี่ยนชั้นของอิเล็กตรอน (electron transition) ของธาตุทรานซิชัน (transition element) และธาตุโลหะหายาก (rare earth metal) โดยธาตุโลหะเหล่านี้สามารถมีได้เลขเวเลนซ์ได้หลายเลข ซึ่งจะส่งผลสามารถทำให้เกิดแก้วที่มีสีแตกต่างกันได้และแม้ว่าจะเป็นโลหะเพียงตัวเดียวก็ตาม หากโลหะตัวนี้เกิดได้หลายสถานะเวเลนซ์ (valency states) ภายในส่วนผสมเคมีของสารเดียวกันจะส่งผลให้แก้วมีความทึบแสงมากขึ้น นอกจากนี้สีของแก้วที่ได้ยังขึ้นอยู่กับสูตรแก้วฐาน (base glass) หรือตัวดัดแปรเครือข่าย (network modifier) อย่างไรก็ตามธาตุโลหะหายากไม่วิวต่อสูตรแก้วฐานเท่ากับธาตุทรานซิชันเนื่องจากมีแถบการดูดกลืนที่แคบกว่า

แก้วสีถูกใช้ในอียิปต์ครั้งแรกตั้งแต่ 1500 ก่อนคริสตศักราชหลังจากนั้นข้อมูลก็ได้สูญหายไปจนกระทั่งปี ค.ศ. 1870 เวลล์ (Weyl) [7] เป็นนักวิทยาศาสตร์คนแรกที่ทำการศึกษาและวิจัยแก้วสี โดยเริ่มจากแก้วสีแดงที่เกิดจากการกระจายตัวกันของผลึกโลหะทองแดงกระจายตัวอยู่ในแก้ว ซึ่งขนาดของผลึกโลหะทองแดงนี้จะมีผลทำให้แก้วมีสีและการส่งผ่านของแสงแตกต่างกันออกไป โดยแก้วที่ทึบของแดงจะมีสีแดงใส (clear red) เนื่องจากมีผลึกของโลหะทองแดงที่มีขนาดน้อยกว่า 50 นาโนเมตร แก้วชนิดที่สองเรียกว่าแก้วฮีมาติน (hematinone glass) มีสีแดงทึบ (opaque red) เนื่องจากขนาดของผลึกทองแดงใหญ่กว่าประมาณ 200 ถึง 300 นาโนเมตร ส่วนชนิดสุดท้ายคือแก้วอเวนจิวรีน (Aventurine glass) ที่มีผลึกของโลหะทองแดงขนาดใหญ่ประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร ในปริมาณน้อยๆ ทำให้แก้วชนิดนี้มีลักษณะแวววาว (spangle appearance) อาจมีสีได้ตั้งแต่ใส เขียว ฟ้า หรือน้ำเงิน [9] อีเบลล์ยังพบอีกว่าความสามารถในการละลายของทองแดงในแก้วยังสูงกว่าของทองคำถึง 30 เท่า นอกจากนี้งานวิจัยในช่วงศตวรรษที่ 18 พบว่ามีความจำเป็นต้องใช้ตะกั่วและดีบุกต่อการเกิดสีแดงในแก้ว ซึ่งถูกเติมในความเข้มข้น (Concentration) ที่สูงกว่าปริมาณทองแดง ส่วนแก้วฐานที่มักนิยมใช้คือแก้วตะกั่ว เนื่องจากเป็นแก้วที่สามารถยอมให้โลหะต่างๆ ละลาย

ได้สูงสุด อย่างไรก็ตามก็ยังมี การนำแก้วโซดา-ไลม์-ซิลิกา (soda-lime-silica glass) มาใช้เป็นแก้วฐานได้อีกด้วย

สตูกีย์ (Stookey) [8] ได้ทำการศึกษาแก้วสีแดงจากสารตั้งต้นที่อยู่ในกลุ่มแก้วโซดาไลม์ซึ่งไม่ให้สีหลังจากการให้ความร้อน แต่เมื่อนำตัวอย่างเดิมไปให้ความร้อนอีกครั้งในบรรยากาศไฮโดรเจนพบว่าจะให้สีชมพูอ่อน จากผลการทดลองดังกล่าวทำให้สตูกีย์และคณะสรุปได้ว่า แก้วสีต้องการสภาวะรีดักชันหรือการผ่านกระบวนการทางความร้อนบางอย่าง นอกจากนี้เขายังพบอีกว่า เมื่อมีการเติมซิลิเนียมออกไซด์ร่วมกับทองที่ลงในส่วนผสมเคมีของแก้ว ให้แก้วสามารถเกิดการให้สีแดงได้เร็วขึ้น

กมลพรรณ และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์อัญมณีเทียมสีต่างๆกัน จากผลการศึกษาพบว่า แก้วสีสูตรที่มีความขาวใสที่สุดประกอบด้วยน้ำเคลือบแก้วทางการค้า: ตะกั่วแดง กรดบอริก: แคลเซียมคาร์บอเนต:โซเดียมคาร์บอเนต ในสัดส่วนน้ำหนักเท่ากับ 60:14:12:9.76:4.24 โดยแก้วโทนาสีฟ้าเงินเกิดจากเจือสารในกลุ่มของคอปเปอร์ออกไซด์และสารโคบอลต์ออกไซด์ สารเจือสีดำที่ทำให้เกิดสีนิลเกิดจากการเจือด้วยออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน 4 ชนิด คือ เหล็กออกไซด์ โคบอลต์ออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ และโครเมียมออกไซด์ ในปริมาณต่างๆ ในขณะที่โคบอลต์ออกไซด์ในปริมาณเพียงเล็กน้อย (ร้อยละ 0.025-0.075 โดยน้ำหนัก) สามารถทำให้แก้วมีสีน้ำเงินเข้มคล้ายพลินได้ นอกจากนี้ที่มวิจัยของกมลพรรณ ได้สรุปข้อมูลการเกิดสีของแก้วบางชนิดดังนี้คือ สีแดงทับทิมโลหะที่ให้สีในลักษณะนี้มักอยู่ในสถานะอนุภาคคอลลอยด์ ที่สามารถเกิดปรากฏการณ์ทินดอลล์ (Tyndall effect) ซึ่งจะเกิดการกระเจิง (scattering) แสงได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ของโลหะ ซึ่งได้แก่ ทองคำ เงิน หรือทองแดงเป็นต้น ในที่นี้ถ้าอนุภาคคอลลอยด์มีขนาดเล็กมากในระดับนาโนเมตร แก้วอาจจะยังไม่ปรากฏสีใดๆ และจะสามารถทำให้เกิดสีแดงขึ้นได้โดยการนำแก้วไปผ่านกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) เพื่อให้ขนาดอนุภาคคอลลอยด์เติบโตขึ้น โดยสารสีที่ทำให้เกิดสีแดงในแก้วนั้นจะแบ่งได้ออกเป็น 3 กลุ่ม คือ ธาตุทรานซิชัน (transition elements) โลหะสำหรับการผลิตเหรียญกษาปณ์ (coinage metals) และธาตุอื่นๆ (other elements)

มีนักวิจัยในบางกลุ่ม [8-16] ได้พยายามที่จะทำการผลิตแก้วสีด้วยวิธีการกระตุ้นแก้วด้วยการฉายรังสีพลังงานสูง เช่น X-ray, Gamma radiation, Synchrotron radiation, Laser and UV radiation เพื่อทำลายพันธะระหว่าง silicon-oxygen เพื่อสร้าง Holes และ Electrons ให้เกิดขึ้นในเนื้อแก้ว หรือที่เรียกว่า การทำให้เกิด Color center ขึ้น จะสังเกตเห็นแก้วสามารถเปลี่ยนสีเป็นสีอ่อนมากขึ้น และเมื่อนำแก้วที่ได้ไป Heat treatment จะสามารถเกิดการ Diffusion ของอนุภาคทองได้ง่ายขึ้นในกรณีของแก้วสีโทนาชมพูและแดง ส่งผลทำให้อนุภาคของโลหะที่เป็นตัวทำให้เกิดสีในแก้วเกิดการ Growth ได้ง่ายด้วยเช่นกัน

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ซิลิกา (SiO_2) หรือ ควอตซ์ (Quartz)
- 3.1.2 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3)
- 3.1.3 โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
- 3.1.4 บอแรกซ์ (Borax)
- 3.1.5 เลดออกไซด์ (PbO)
- 3.1.6 แบเรียมคาร์บอเนต (Ba_2CO_3)
- 3.1.7 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)
- 3.1.8 คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) .สารให้สี

3.2 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 3.2.1 ซ้อนตักสารพลาสติกขนาดต่างๆ
- 3.2.2 เบ้าหลอมเซรามิกทนไฟ ชนิดกระเบื้องขาว (porcelain) และอะลูมินา (Alunina)
- 3.2.3 เครื่องชั่งระบบดิจิทัล (ความละเอียด 0.0001 กรัม) ผลิตโดยบริษัท AND รุ่น HR-250A
- 3.2.4 ถูพลาสติกสำหรับผสมผงสารเคมี
- 3.2.5 แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil)
- 3.2.6 เตารอบไฟฟ้าอุณหภูมิ 450°C
- 3.2.7 เตเผาไฟฟ้า (furnace) ทนอุณหภูมิสูงถึง 1700°C
- 3.2.8 แผงให้ความร้อน (hot plate)
- 3.2.9 เวอร์เนียร์คาร์ลิบเปอร์ระบบดิจิทัล ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร
- 3.2.10 กระจกทรายเบอร์ 360,600, 1000 และ 1200
- 3.2.11 ผงขัดเพชรคริสตัลไลน์ขนาด 3 ไมโครเมตร polycrystalline Diamond $3\ \mu\text{m}$
- 3.2.12 เครื่องตัดของแข็ง BUEHLER รุ่น IsoMet™ 5000 Linear Precision Saw
- 3.2.13 เครื่องขัดของแข็ง BUEHLER รุ่น MetaServ™ 250 Twin Grinder – Polishers

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวิเคราะห์สาร

- 3.3.1 เครื่อง X-ray Diffraction technique (XRD)
- 3.3.2 เครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)
- 3.3.3 เครื่อง ทดสอบความแข็ง (Hardness)
- 3.3.4 เครื่อง ทดสอบความหนาแน่น (Density)
- 3.3.5 เครื่อง ทดสอบวัดค่าดัชนีหักเห Refractive index (RI)

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 การสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบ

- 3.4.1.1 เตรียมแกลบ โดยนำแกลบมาประมาณ 100 กรัม มาล้างทำความสะอาด สะอาดใน บีกเกอร์ขนาดใหญ่ นำไปอบให้แห้ง
- 3.4.1.2 ใส่แกลบในถ้วย crucible ขนาดใหญ่ แล้วไปเผาด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 3.4.1.3 นำซี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มาทำการเผาอีกครั้งในเงื่อนไขช่วงอุณหภูมิ 1000, 1100, และ 1200 องศาเซลเซียส
- 3.4.1.4 ใส่ซี้เถ้าแกลบที่ได้จากการเผาครั้งที่ 1 ลงถ้วย crucible ขนาดใหญ่ แล้วไปเผาครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 1000, 1100, และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 3.4.1.5 จากนั้นเราจะได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุดที่ผ่านการเผา 2 ครั้ง ในเงื่อนไขเผาครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 1000 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเผาครั้งที่ 2 ในเงื่อนไขที่ 1000, 1100, และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามลำดับ
- 3.4.1.6 จากนั้นเราก็ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่ต่างก็นำมาเป็นส่วนผสมในการทำการคริสตัลลีสต่อ
- 3.4.1.7 นำแกลบที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ มาวิเคราะห์เฟสด้วยวิธีการ XRD, XRF

3.4.2 การเตรียมแก้ว

นำผงแก้วที่บริสุทธิ์มาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก้วคริสตัลลี นำสารเคมีทั้งหมดมาผสมตามอัตราส่วน 42% (SiO_2), 14% (K_2CO_3), 3% (Na_2CO_3), 1% (Borax), 20% (PbO), 8% (Ba_2CO_3), 12% (CaCO_3), 0.2% (CuO, MnO_2 , Cr_2O_3 โดยน้ำหนัก) รวมเป็นจำนวน 50 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งระบบดิจิทัล (ความละเอียด 0.0001 กรัม) โดยแต่ละครั้งใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ในการถ่วงสารทุกครั้งที่ยั่ง

3.4.2.1 ←

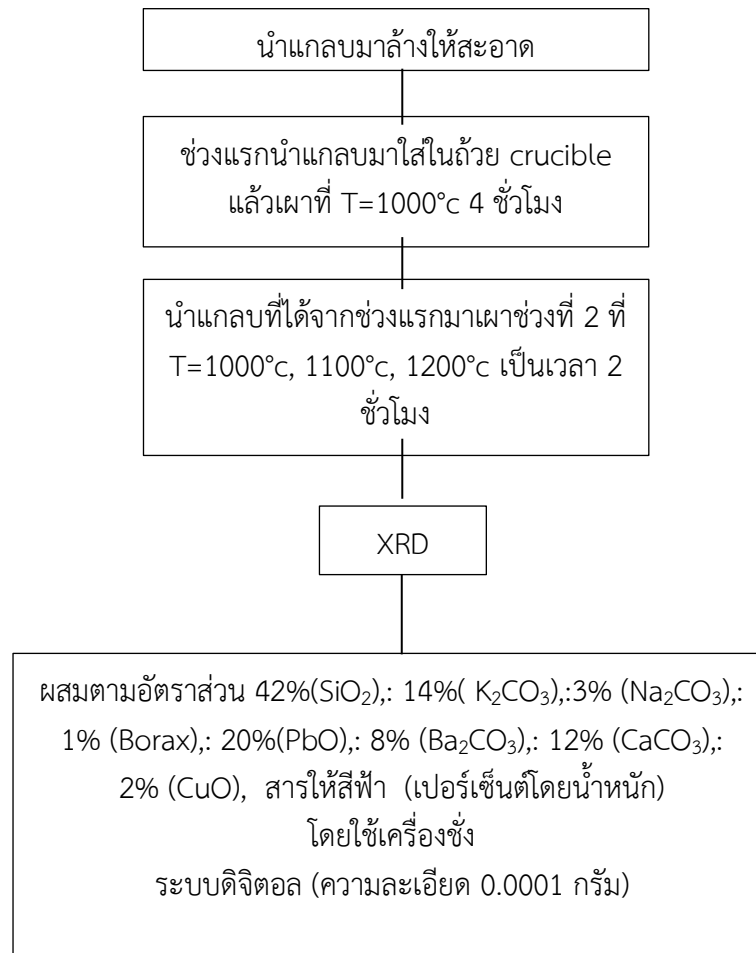
นำสารทั้งหมดที่ผ่านการผสมมาทำการหลอมแก้ว ที่อุณหภูมิ 1400°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง rate ที่ $10^\circ\text{C}/\text{m}$

นำน้ำแก้วเทลงในโมลเหล็ก แล้วนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 450°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง rate ลง $5^\circ\text{C}/\text{m}$

นำการแก้วคริสตัลที่ได้จากซีเถ้าแก้วและแก้วคริสตัลที่ได้จากซิลิกาอุตสาหกรรมไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ความแข็ง ความหนาแน่น การหักเหของแสง และ XRF

นำการแก้วคริสตัลที่ได้จากซีเถ้าแก้วและแก้วคริสตัลที่ได้จากซิลิกาอุตสาหกรรมมาเปรียบเทียบและหาเงื่อนไขที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการสกัดซิลิกา



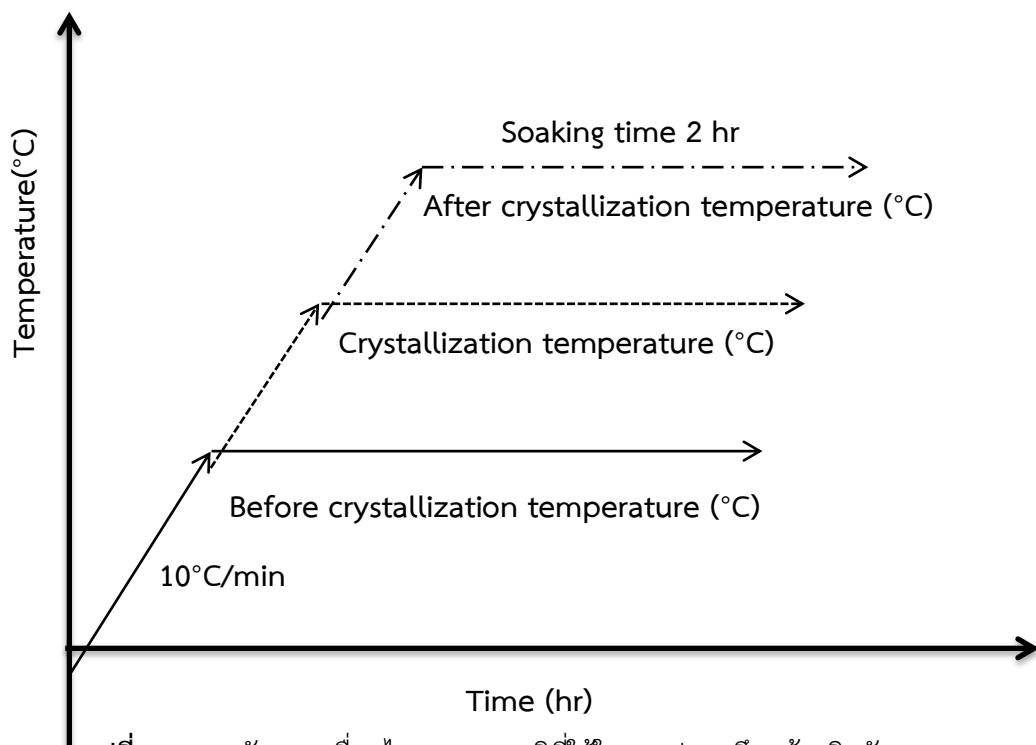
รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการสกัดซิลิกาและส่วนผสมในการทำแก้วคริสตัล

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การศึกษาสูตรแก้วที่เหมาะสมที่สุดในการทำเป็นแก้วคริสตัลลี

ในการเตรียมแก้วคริสตัลที่มีความแวววาวสูงและราคาถูก มีความจำเป็นต้องใช้ออกไซด์ของตะกั่วเพื่อเพิ่มดัชนีหักเหของแก้ว โดยทำการผสมสารตั้งต้นของออกไซด์ซึ่งได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) หรือ ขี้เถ้าแกลบ เลดออกไซด์ (PbO) โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) แบเรียมคาร์บอเนต (Ba_2CO_3) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่ปรับสูตรของโรงงานโถงคริสตัล อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการลดต้นทุนของวัตถุดิบและลดปัญหาการเลือกทราย (SiO_2) ที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งหาได้ยากในประเทศ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำ

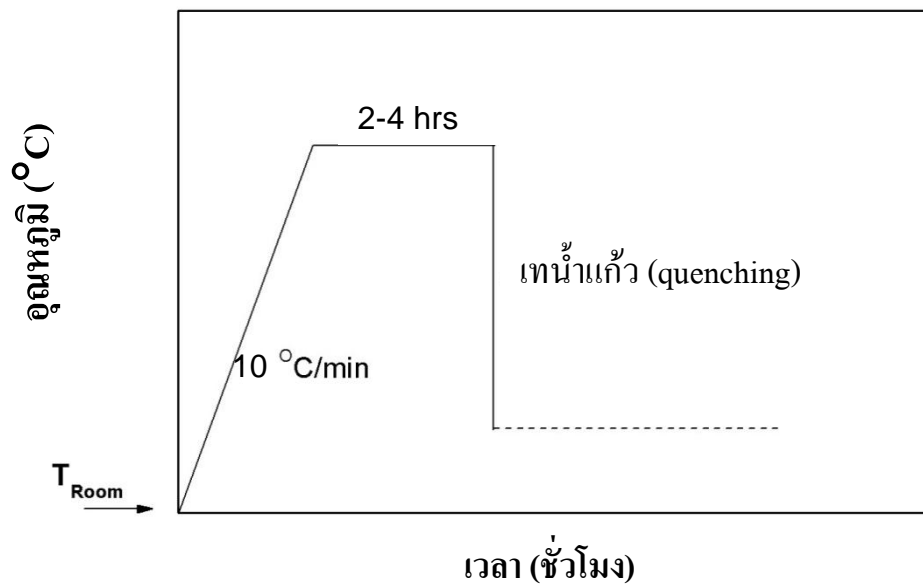
ซีเถ้าแอลบที่มาทดแทนซิลิกาจากสารเคมี มาเป็นสารตั้งต้น โดยมีการปรับสูตรให้เหมาะสมกับการนำมาเป็นแก้วคริสตัลด้วยการเติมสารตะกั่วและสารเจือต่างๆ ทั้งหมด 3 สูตร และสูตรแก้วจากซิลิกาที่ใช้ในอุตสาหกรรมอีก 1 สูตร มาเปรียบเทียบกับสูตรแก้วคริสตัลที่ได้จากแอลบใน ช่วงเผาที่แตกแต่กันได้แก่ช่วงอุณหภูมิที่ 1000°C , 1100°C และ 1200°C โดยการนำผงผสมที่ได้มาทำการหลอมที่อุณหภูมิในช่วง 1400°C แซ่ทิ้งไว้เป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง (เพื่อให้เกิดความเป็นเนื้อละเอียดและเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำแก้ว) โดยมีอัตราการขึ้นของอุณหภูมิคือ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ตามแผนผังแสดงเงื่อนไขการหลอมหลอมแก้วนี้จะใช้เตาไฟฟ้า ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 1700 องศาเซลเซียส และใช้เบ้าหลอมกระเบื้องขาว (porcelain crucible) หรือเบ้าหลอมอะลูมินา ตามลำดับ เป็นภาชนะในการหลอมน้ำแก้ว เนื่องจากเบ้าหลอมชนิดนี้มีราคาถูก คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจจะนำมาใช้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการหลอมสารโดยใช้เบ้าหลอมที่มีราคาถูก และสามารถหลอมแก้วได้ในปริมาณมากขึ้น จากนั้นทำให้สารหลอมเหลวเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว (quenching) โดยการเทน้ำแก้วลงบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel plate) แล้วกดทับอย่างรวดเร็ว โดยในการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงนี้มีความจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันความร้อนที่สูงและอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นได้ทุกเมื่อ โดยภาพอุปกรณ์กันความร้อน อาทิ ถุงมือทนความร้อน แว่นตากันแสง ฯลฯ



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกแก้วคริสตัล [8]

ตาราง 3.1 แสดงอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมแก้วคริสตัลจากแก้ว

ส่วนผสม	wt%
SiO ₂	42
K ₂ CO ₃	14
Na ₂ CO ₃	3
Borax	1
Pb ₃ O ₄	20
Ba ₂ CO ₃	8
CaCO ₃	12



รูป 3.3 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้ว [8]



รูปที่ 3.4 เตาไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมแก้ว สามารถเผาได้อุณหภูมิสูงสุดถึง 1700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 เบ้าหลอมแก้วทนไฟที่ทำมาจากกระเบื้องขาว (porcelain)



รูปที่ 3.6 เบ้าหลอมแก้วทนไฟที่ทำมาจากอะลูมินา (Alumina)



รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel mold)



รูปที่ 3.8 ถุงมือป้องกันความร้อนในการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 3.9 แวนตาตัดแสงจ้าและกันรังสีเหนือม่วง (UV ray)



รูปที่ 3.10 ที่คีบเข้าหลอมแก้วทนไฟออกจากเตาไฟฟ้า



รูปที่ 3.11 หน้ากากสะท้อนแสงและกันรังสีเหนือม่วง (UV ray)

3.6 การวิเคราะห์สมบัติของแก้ว

3.6.1 การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique: XRD)

เทคนิคนี้เป็นการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบของสารโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction technique) เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผิววัสดุซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูปผลึกและมีการจัดเรียงของอะตอมอย่างมีระเบียบที่มีลักษณะเป็นระนาบ (hkl) จะทำให้เกิดการกระเจิง (scattering) ของรังสีเอกซ์เกิดขึ้น หลังจากนั้นรังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน โดยที่มุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ออกจากผลึกจะเป็นลักษณะเฉพาะตามชุดระนาบนั้นๆ ดังนั้น เมื่อนำเครื่องมือสำหรับตรวจวัด (detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่างๆ ก็จะสามารถ

ตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด นอกจากนี้รังสีที่ตรวจจับได้นั้นยังสามารถบอกได้ว่า มาจากระนาบใดและปริมาณเท่าใดอีกด้วย โดยดูจากค่ามุม (Bragg's angle) และความเข้มของ รูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ ซึ่งสารแต่ละชนิดก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะ-เฉพาะ แตกต่างกันไปตามลักษณะของโครงสร้าง

สำหรับการตรวจสอบนั้น จะมีขั้นตอนในการเตรียมสารตัวอย่างดังต่อไปนี้ คือ

1. นำผงและชิ้นงานที่เตรียมได้มาบรรจุใส่ในแผ่นบรรจุชิ้นงาน (sample holder) จากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffractometer (ในกรณีที่ สารตัวอย่างเป็นผงให้นำมาบดให้ละเอียดแล้วบรรจุลงในแผ่นบรรจุสารตัวอย่างก่อน 1 . จากนั้นเกลี่ยผงตัวอย่างให้เรียบโดยใช้กระจกไลด์)



รูปที่ 3.12 การตรวจสอบเฟสด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray diffraction technique (XRD)

3.6.2 การศึกษาองค์ประกอบของธาตุเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์หรือ (X-ray fluorescence: XRF)

เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์หรือ X-ray fluorescence (XRF) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการศึกษา องค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยความต่างของชั้นพลังงานของแต่ละธาตุ (ชั้น K, L, M, ...) ดังนั้นเมื่อเรากระตุ้นอะตอมด้วยการให้พลังงานที่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นใน ทำให้เกิดที่ว่าง และเมื่ออิเล็กตรอนในชั้นนอกลงมาแทนที่ อะตอมจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของรังสีเอกซ์ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "การเรืองรังสีเอกซ์" เราสามารถนำปรากฏการณ์นี้ไป

ใช้ในการหาชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างที่เราสนใจได้ เราเรียกเทคนิคนี้ว่า "เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์" ซึ่งข้อดีของเทคนิคนี้ก็คือ การเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายคุณสมบัติของตัวอย่าง (non-destructive method) โดยทั่วไปเราจะใช้รังสีเอกซ์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการคายพลังงานของอะตอมในตัวอย่าง ในที่นี้คือ แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ และเนื่องจากแสงซินโครตรอนมีความเข้มสูง ทำให้เราสามารถโฟกัสลำรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการหาค่าประกอบของธาตุที่บริเวณเล็กๆ บนตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียว นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาการกระจายตัวของธาตุต่างๆ ได้ เราเรียกเทคนิคนี้ว่า micro-X-ray fluorescence spectroscopy/imaging

ข้อดีของเครื่อง XRF เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ ก็คือ เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (ยกเว้นกรณีที่ต้องบดตัวอย่างเพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ด) และให้ผลการทดสอบที่รวดเร็ว และไม่จำเป็นต้องใช้ Standard ในการทดสอบ

ข้อเสียของ XRF แบบ EDXRF ก็คือความสามารถในการวิเคราะห์ ตัวอย่างที่มีปริมาณน้อยๆ จะทำได้ยาก โดยเฉพาะธาตุในกลุ่ม Light Element หากมีปริมาณน้อยๆ ผลที่ได้จะไม่ดีเท่าที่ควร อีกทั้ง หากตัวอย่างนั้น ไม่สามารถขึ้นรูปให้เป็นของแข็ง เพื่อทดสอบในสภาพ Low pressure ก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนรังสีของอากาศ ภายในห้องใส่ตัวอย่าง ซึ่งมีผลให้ Intensity ของ X-ray ที่ได้ลดลง



รูปที่ 3.13 การศึกษาองค์ประกอบของธาตุการเรืองรังสีเอกซ์หรือ X-ray fluorescence (XRF)

3.6.3 การวัดความแข็ง Hardness

Hardness หรือ ความแข็ง เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่แสดงถึงความสามารถในการคงรูปของวัสดุต่างๆ เมื่อมีแรงภายนอกหรือโหลดมากระทำกับวัตถุนั้นๆ ความแข็งเป็นปริมาณสัมพัทธ์ที่มีความแตกต่างจากปริมาณทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น ระยะทาง เวลา ปริมาตร หรือกระแสไฟฟ้า ตรงที่ไม่มีจำนวนหรือมาตรฐานที่แน่นอน แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางกายภาพอย่างอื่น เช่น tensile strength, yield strength, ซีดจำกัดความยืดหยุ่น ความต้านทานการเกิดรอย เป็นต้น

ความแข็งของวัสดุ จึงกลายเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การคำนวณน้ำหนัก ความดัน หรืออุณหภูมิ เพื่อที่จะดูว่าวัสดุนั้นมีความสามารถในการยืดหยุ่นได้หรือไม่ เป็นสิ่งที่ยุ่งยาก การวัดค่าความแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการดังกล่าวที่ดูเหมือนจะเป็นวิธีที่ง่ายและดีที่สุด Hardness Tester จึงเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและทดสอบค่า ความแข็ง นั้นเอง

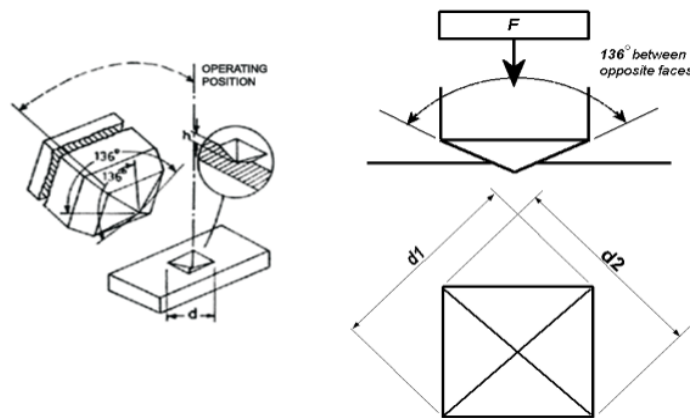


รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบความแข็ง Hardness

3.6.3.1 ทดสอบแบบ Vickers Hardness Test

เทคนิคนี้เป็นการพัฒนามาจากการทดสอบแบบ Brinell เพื่อลดปัญหาของความถูกต้องในการวัด หัวกดที่ใช้ในวิธีการนี้ คือ เพชร ซึ่งมีรูปร่างเป็นปิระมิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส และมีมุมระหว่าง

ผิวหน้าด้านตรงข้ามกันเท่ากับ 136 องศา แรงกดที่ใช้อยู่ระหว่าง 1 กรัม - 100 กิโลกรัม ใช้ระยะเวลา กดประมาณ 10-15 วินาที รอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กในระดับไมครอนจึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์ในการช่วยคำนวณความแข็ง ค่า ความแข็ง ที่ได้จะแสดงออกมาดังเช่น 800 HV/10 ซึ่งหมายถึง มีค่า ความแข็ง Vickers 800 และใช้แรงกด 10 กิโลกรัม ค่าความแข็งที่ได้จากวิธีการนี้จะให้ผลที่ชัดเจน และเป็นรูปแบบมากกว่าวิธีการอื่นๆ และสามารถใช้ทดสอบวัสดุได้อย่างหลากหลายทั้งที่มีองค์ประกอบสม่ำเสมอและไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 3.15 หัวกดเครื่อง Hardness แบบ Vickers Hardness Test [9]

3.6.4 การวัดความหนาแน่น (Density)

การหาค่าความหนาแน่นของแก้วมีดังต่อไปนี้

1. ชั่งมวลของแก้วในอากาศได้เป็น M_1
2. ชั่งมวลของแก้วในน้ำได้เป็น M_2
3. คำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะ

น้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่โดยวัตถุ = $M_1 - M_2$ น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่าวัตถุความถ่วงจำเพาะ = น้ำหนักของวัตถุในอากาศ / น้ำหนักของน้ำที่ถูกแทนที่โดยวัตถุ

$$(s) = \frac{M_1 g}{M_{st} g} \quad (3.1)$$

หรือ

$$S = \frac{M_1 g}{(M_1 - M_2) g} = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \quad (3.2)$$

และ

$$S = \frac{\rho}{\rho_{st}} \quad (3.3)$$

ซึ่ง ρ_{st} เท่ากับ 1 g/m^3 ดังนั้นค่าความหนาแน่นจะมีค่าเท่ากับ s

3.6.5 การวัดค่าดัชนีหักเห (Refractive index: RI)

ค่าดัชนีหักเหของแก้วทำการวัดโดยอาศัยเทคนิคของปริซึมคู่ควบโดยใช้เครื่องมือมาตรฐานดัชนีหักเหแบบ Rayner Duplex II และความยาวคลื่นเท่ากับ 589 นาโนเมตร สามารถตรวจวัดได้จากเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ได้ดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ต้องการหาค่าดัชนีหักเหไปขัดเปิดผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 จากนั้นขัดด้วยผ้าสักหลาดที่ใส่ผงขัดขนาด 5 และ 0.1 ไมครอน
2. ทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ
3. เปิดไฟให้แสงส่องผ่านช่องรับแสงด้านหลังเครื่อง
4. หยดน้ำยาค่า RI (RI liquid) ในปริมาณเล็กน้อยลงบนแผ่นเหล็กด้านบน
5. วางตัวอย่างโดยใช้หน้าเรียบที่เลือกไว้บนน้ำยา
6. เลื่อนตัวอย่างไปอยู่กึ่งกลางของแท่งแก้วปริซึม ให้ขนานกับด้านยาวของปริซึม
7. ใส่เลนส์ขยายบนรีแฟรคโตมิเตอร์และเคลื่อนสรีระออกให้ห่างประมาณ 10 -12 นิ้ว
8. สังเกตแนวเส้นสีเขียวที่อยู่บนสเกล โดยให้อ่านค่า RI จากขอบด้านล่างของแถบสี

จากที่กล่าวมาแล้ว ค่าดัชนีหักเหของแสงขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นของรังสีที่ตกกระทบลงบนแก้วเป็นอย่างมาก การระบุค่าดัชนีหักเหของวัสดุต่างๆ จึงต้องมีการระบุความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้ในการหาดัชนีหักเห นั้นๆ อยู่เสมอ ตัวอย่างเช่น รังสีที่มีความยาวคลื่น $\lambda = 546.07$ นาโนเมตร และ $\lambda = 587.56$ นาโนเมตร

3.6.6 หลักการดูดกลืนรังสี UV-VIS

โมเลกุลที่ดูดกลืนคลื่นแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิล จะทำให้เกิด การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน (การทรานซิชัน) ของอิเล็กตรอนในโมเลกุล ไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นกว่าเดิม พลังงานที่โมเลกุลดูดกลืนเข้าไป ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นหรือความถี่ของคลื่นแสงนั้น รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง UV-VIS มีช่วงความยาวคลื่นคือ

1. รังสี Ultraviolet มีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 200 – 400 nm
2. รังสี Visible มีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 400 – 800 nm 42

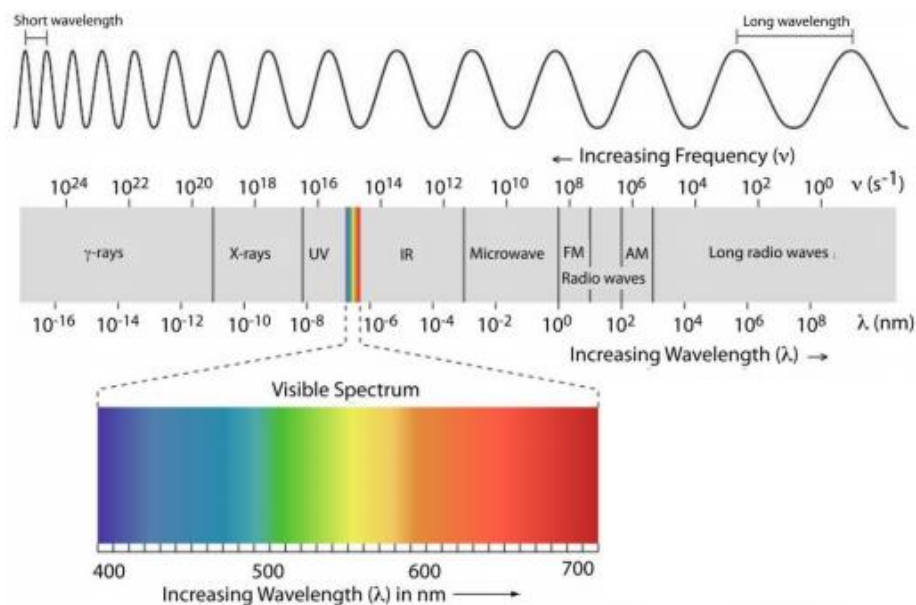
สเปกโทรโฟโตเมทรี การวัดการดูดกลืนคลื่นแสงและการปล่อยคลื่นแสงจะใช้เครื่องมือวัดสมบัติ ทางแสงหรือที่เรียกว่าสเปกโตรมิเตอร์หรือสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีหลาย ชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบพื้นฐานที่เหมือนกัน เพียงแต่การจัด วางส่วนประกอบต่างกัน ซึ่งประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดคลื่นแสง (source) ที่มีพลังงานคงที่
2. อุปกรณ์เลือกความยาวคลื่น (monochromator) ที่ทำหน้าที่แยกแสง ออกมาเป็นความยาวคลื่นต่างๆ จากคลื่นแสงประเภท polychromatic radiation เป็น monochromatic radiation
3. ภาชนะใส่ตัวอย่าง (sample container) เป็นภาชนะโปร่งแสงสำหรับ ใส่สารที่วิเคราะห์
4. ส่วนตรวจวัดสัญญาณ (detector) ระบบอ่านสัญญาณเพื่อให้สัญญาณ ที่ขยายแล้ว ออกมาอยู่ในรูปที่ผู้ใช้สามารถนำค่ามาใช้ต่อได้

หลักการดูดกลืนรังสี UV-VIS

เมื่อสารดูดกลืนรังสี UV-VIS เข้าไปจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ ที่ระดับพลังงานสูงกว่าเดิม อิเล็กตรอนเหล่านี้ เป็นอิเล็กตรอนวงนอกสุดที่ หลุดได้ง่าย แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดพันธะซิกมา (σ)
2. อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดพันธะไพ (π)
3. อิเล็กตรอนที่ไม่ได้สร้างพันธะ หรืออิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยว (n)



รูปที่ 3.16 สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า [10]

สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านมองเห็น (visible region) เรียกว่า วิสิเบิลสเปกตรัม (visible spectrum) มีย่านความยาวคลื่นในช่วง 380-780 nm ซึ่งเป็นแสงขาว (white light) ตลอดช่วงความยาว คลื่น แต่ถ้าแสงถูกดูดกลืนในบางช่วงความยาวคลื่น แสงที่เรามองเห็นจะเป็นแสงสีผสม (complementary color) เมื่อแสงขาวถูกดูดกลืนคลื่นแสงไปบางช่วงความยาวคลื่น สีที่ปรากฏจะเป็นสี ตรงกันข้ามในวงล้อสีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารที่มองเห็นมี ประโยชน์สำหรับใช้ในการท านายว่าสารประกอบที่มีสีจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น ในช่วงใด

ตาราง 3.2 สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านมองเห็น [10]

ย่าน	ความยาวคลื่น (nm)	ความถี่ (THz)	พลังงานโฟตอน (eV)	complementary color
ultraviolet (UV)	<380			
violet	380-450	668-789	2.75-3.26	yellow-green
blue	450-495	606-668	2.50-2.75	yellow
green	495-570	526-606	2.17-2.50	red-purple
yellow	570-590	508-526	2.10-2.17	blue
orange	590-620	484-508	2.00-2.10	green-blue
red	620-750	400-484	1.65-2.00	blue-green
near IR	>750			

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในบทนี้จะแบ่งผลการวิเคราะห์การทดลองเป็นสองส่วนใหญ่ๆ โดยส่วนแรกจะเป็นการวิเคราะห์ถึงสมบัติทางกายภาพ เฟสองค์ประกอบของแกลบ คือ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค (XRF) และในส่วนที่สอง เป็นการวิเคราะห์ถึงสมบัติแก้วคริสตัลที่มีวัตถุประสงค์ตั้งต้นมาจากแกลบพร้อมทั้งเปรียบเทียบชิ้นงานแก้วคริสตัลที่ได้จากสารเคมีด้วย โดยจะกล่าวถึงสมบัติทางกายภาพของแก้ว คือ ลักษณะเนื้อแก้วและสีของแก้ว ความหนาแน่น การดูดกลืนแสงยูวี-วิสิเบิล โดยมีรายละเอียดของผลการทดลองนี้

4.1 ผลการสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบ

ในการเตรียมซิลิกาจากแกลบนั้นผู้วิจัยเริ่มจากการนำแกลบไปทำการเผาที่อุณหภูมิ 1000°C 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ให้ออกจากแกลบ โดยผลการทดลองแสดงดังรูป 4.1 หลังจากนั้นทำการนำแกลบที่ได้มาเผาในช่วงที่ 2 โดยเผาในอุณหภูมิที่แตกต่างกันโดยเงื่อนไขที่ 1000°C, 1100°C และ 1200°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยผงแกลบที่ผ่านการเผาแล้วแสดงดังรูป 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงผงแกลบที่ผ่านการเผาไล่สารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 1000°C



รูปที่ 4.2 แสดงผงแกลบที่ผ่านการเผาที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน ก.ผงแกลบที่อุณหภูมิ 1000°C ข.ผงแกลบที่อุณหภูมิ 1100°C ค.ผงแกลบที่อุณหภูมิ 1200°C

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ของแกลบที่ผ่านการเผาด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.1-4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแกลบที่ผ่านเงื่อนไขในการเผาที่ต่างต่าง กัน พบว่าองค์ประกอบหลักที่พบทั้ง 3 เงื่อนไขคือ ซิลิกา (SiO_2) รองลงมา คือ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) โดยที่ 3เงื่อนไขมีแนวโน้มในการเกิดธาตุคล้ายคลึงกัน นอกจากนั้นพบว่าซิลิกามีความบริสุทธิ์สูงที่สุดจากการเผาแกลบที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 1200° โดยได้ปริมาณซิลิกาเท่ากับ 90.89 % w/w

ตาราง 4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000°

องค์ประกอบสารเคมี	%w/w
SiO_2	90.50
P_2O_5	0.92
SO_3	0.66
K_2O	5.39
CaO	1.71
MnO	0.59
Fe_2O_3	0.24

ตาราง 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแคลสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100°

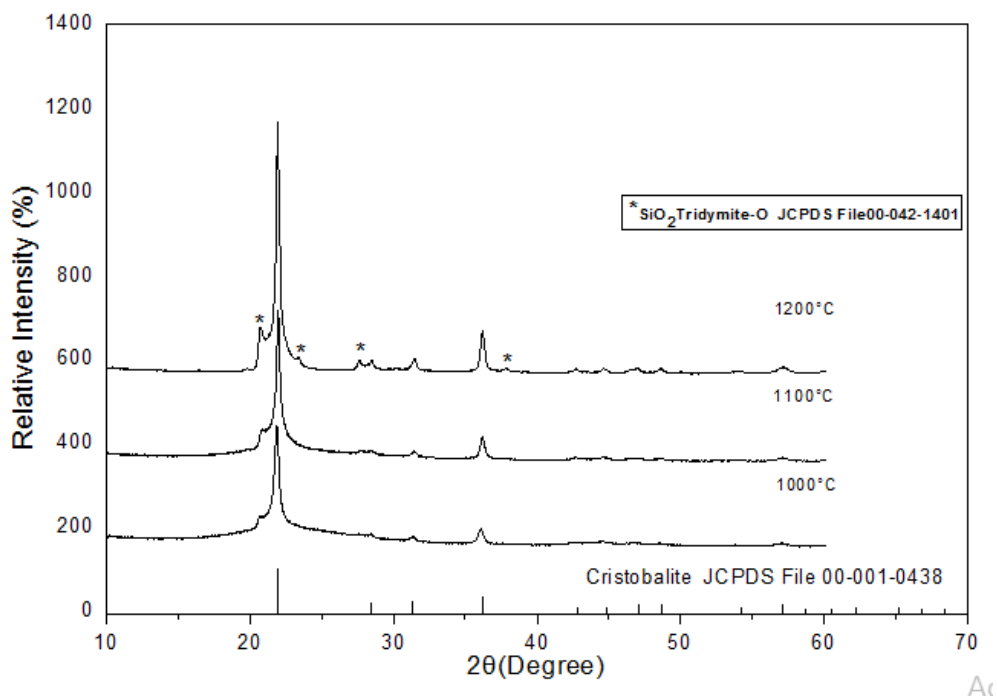
องค์ประกอบสารเคมี	%w/w
SiO ₂	90.88
SO ₃	0.76
K ₂ O	5.79
CaO	1.79
MnO	0.58
Fe ₂ O ₃	0.19

ตาราง 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแคลสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200°

องค์ประกอบสารเคมี	%w/w
SiO ₂	90.89
P ₂ O ₅	1.25
K ₂ O	5.47
CaO	1.88
MnO	0.52

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ของแคลสที่ผ่านการเผาด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

หลักจากการเผาแคลสที่เงื่อนไขแตกต่างกันพบว่าแคลสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000-1200 องศาพบแนวโน้มการเกิดเฟสองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน โดยเฟสที่เกิดประกอบด้วยเฟสองค์ประกอบด้วยกัน 2 เฟส โดยเฟสหลักได้แก่ เฟสของ SiO₂ (Cristobalite JCPDS File 00-001-0438) และเฟสรองคือเฟสของ SiO₂ Tridymite-o JCPDS File 00-042-1401 โดยที่แคลสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะพบเฟสของ Cristobalite และ Tridymite มีแนวโน้มสูงขึ้น



รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแคลบที่ผ่านเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

4.2 ผลการศึกษาการเจือโลหะทรานซิชันออกไซด์ที่มีต่อแก้วคริสตัลจากแคลบ

ในการศึกษาอิทธิพลของโลหะทรานซิชันที่ทำให้สีภายในแก้ว ซึ่งสามารถผลิตแก้วสีในเฉดสีที่ต่างๆ กัน เมื่อใช้ตัวทำให้เกิดสี (colorant) ต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้มีการเลือกใช้ ซิลิกอนไดออกไซด์ที่มาจากสารตั้งต้นที่แตกต่างกันแทน frit เพื่อลดผลกระทบต่อการเติมสารให้สี ซึ่งอาจทำให้แก้วที่ได้มีสีที่ผิดเพี้ยนไปจากที่ควรจะเป็น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการศึกษาคำเติมตัวทำให้เกิดสีแบบเดี่ยว (single colorant) ได้แก่ คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO), แมงกานีสออกไซด์ (MnO₂) และ โครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) เพื่อศึกษาสีที่เกิดขึ้นในเนื้อแก้ว หลังจากที่มีการใช้แคลบที่เป็นสารตั้งต้นที่ได้จากการเตรียมด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยกำหนดสัญลักษณ์ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงสัญลักษณ์ของชิ้นงานแก้วที่เงื่อนไขต่างๆ

เงื่อนไข	สารให้สีคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	สารให้สีแมงกานีสออกไซด์ (MnO ₂)	สารให้สีโครเมียมออกไซด์ (Cr ₂ O ₃)
สีจากสารเคมี	SiCu	SiMn	SiCr
สีจากแก้วที่เผาที่อุณหภูมิ 1000°C	RCu1000	RMn1000	RCr1000
สีจากแก้วที่เผาที่อุณหภูมิ 1100°C	RCu1100	RMn1100	RCr1100
สีจากแก้วที่เผาที่อุณหภูมิ 1200°C	RCu1200	RMn1200	RCr1200

4.2.1 ผลการเติมสารให้สีฟ้าคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)

- ลักษณะทางกายภาพ: สี

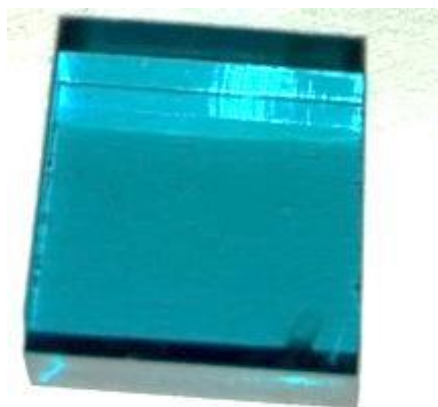
หลังจากได้สีจากแก้วที่ผ่านการเผาที่เงื่อนไขที่แตกต่างกันแล้วนำมาผสมกับออกไซด์ของคอปเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.02%wt เพื่อให้เกิดสีฟ้าในเนื้อแก้วโดยอาศัยหลักการผสมสีของแม่สีและตะกั่ว เพื่อทำให้เกิดแก้วคริสตัลสี พบว่าชิ้นงานแก้วที่ได้มีสีฟ้าทั้งหมด และมีเฉดความเข้มของสีที่แตกต่างกัน ดังแสดงรูปที่ 4.4



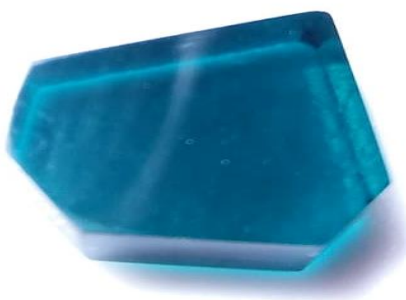
(ก)



(ข)



(ค)

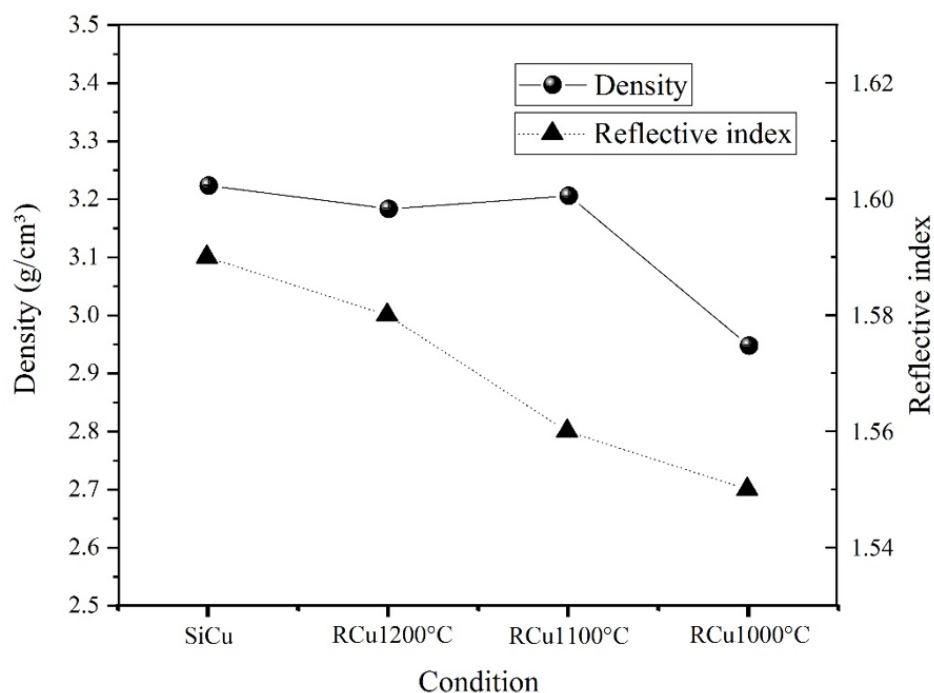


(ง)

รูปที่ 4.4 แสดงรูปชิ้นงานแก้วคริสตัลลีสี่ที่เงื่อนไขในการใช้ซิลิกาที่แตกต่างกันหลังเติมสารให้สีชนิด
คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) (ก) SiCu (ข) RCu1000 (ค) RCu1100 (ง) RCu1200

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ใช้ซิลิกาจากสารเคมีจะให้สีฟ้าสว่างใส นอกจากนั้นยังพบว่ามิโทสนีที่ใกล้เคียงกับชิ้นงานที่ใช้ซิลิกาจากเกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส ในขณะที่ชิ้นงานที่ใช้ซิลิกาจากเกลบที่เผาที่อุณหภูมิ 1100 และ 1000 องศาเซลเซียส จะมีสีออกฟ้าหม่นๆ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะเป็นผลมาจากการที่ซิลิกาที่เผาที่อุณหภูมิสูงนั้น (1200 องศาเซลเซียส) มีปริมาณของซิลิกาสูงที่สุดนั่นเอง

- ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่น (Density) และค่าดัชนีหักเหของแก้วคริสตัล (Reflective index)



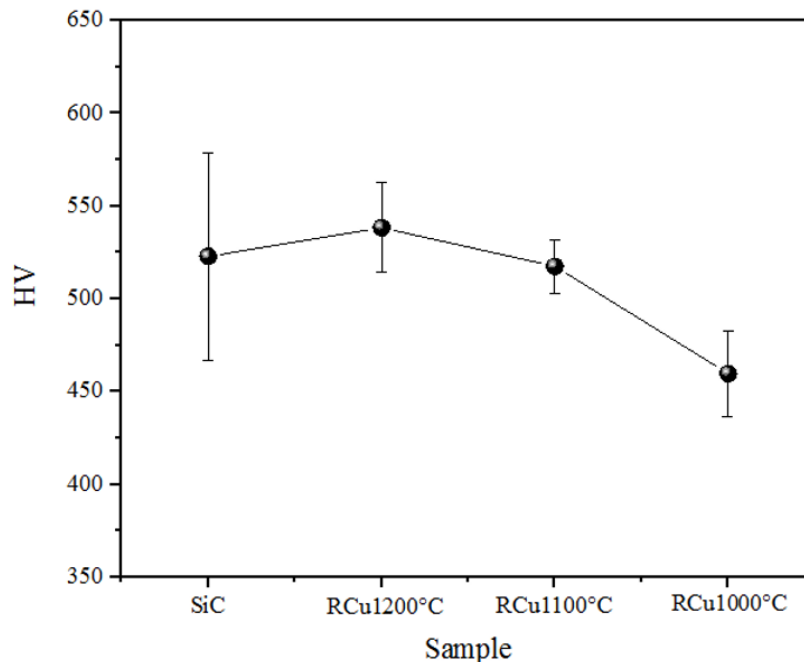
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของชิ้นงานแก้วที่ได้จากเกลบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดคอปเปอร์ออกไซด์

จากเอกสารทางวิชาการ [1-3] ได้กำหนดว่าแก้วที่สามารถจัดได้ว่าเป็นแก้วคริสตัลได้นั้นจะต้องมีค่าความหนาแน่นมากกว่า 2.95 g/cm^3 และเมื่อนำแก้วคริสตัลที่ได้ไปตรวจหาค่าดัชนีหักเหด้วยเครื่องรีแฟรคโตมิเตอร์ (Refractometer) ซึ่งเป็นเครื่องมือทางแสงจะต้องให้ค่าดัชนีหักเหแก้วมากกว่า 1.55 เนื่องจากว่าค่าต่ำกว่านี้จะทำให้แก้วสูญเสียความใส เคาะแล้วจะต้องมีเสียงดังกังวาน นอกจากนี้แก้วตะกั่วยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหได้ตั้งแต่ 1.5-1.7 ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสูตรแก้ว จากการทดลองนี้พบว่า จากรูป 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นที่ได้จะอยู่ในช่วง $2.94\text{-}3.22 \text{ g/cm}^3$ โดยค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดได้มาจากชิ้นงานเกลบที่เผา

อุณหภูมิ 1000 องศาเซียส เหตุที่เป็นเช่นนั้นอาจเป็นผลมาจากการเกิดเฟสองค์ประกอบของ Tridymite ที่มีปริมาณมากที่สุดที่ปรากฏในการเผาเคลือบที่อุณหภูมินี้ ในขณะที่การปรากฏเฟสของ Cristobalite มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของแก้วมีค่าสูงนั่นเอง

- ผลการทดสอบวัดค่าความแข็ง (hardness)

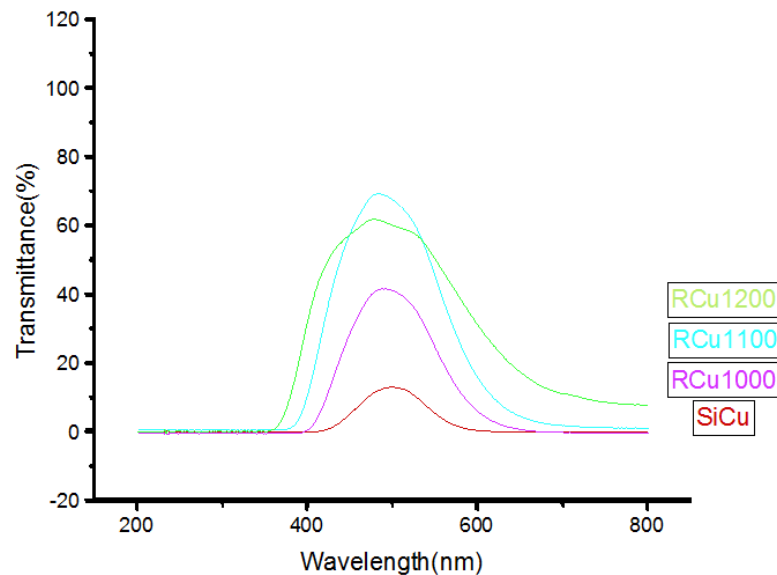
เมื่อนำชิ้นงานแก้วคริสตัลจากเคลือบในแต่ละเงื่อนไข คือ RCu1000, RCu1100, RCu1200 และชิ้นงานจากแก้วคริสตัลที่ได้จากซิลิกาทางเคมี มาทำการทดสอบความแข็งของชิ้น โดยชิ้นงานที่วัด มีขนาดที่ 10*10mm กว้างxยาว ชิ้นงานหนา ขนาด 5-8 mm จากกราฟจะเห็นได้ว่าชิ้นงานสูตรแก้ว RCu1200ที่ได้จากเคลือบ มีความแข็งมากที่สุดถ้ามาเปรียบเทียบกับซิลิกาที่ได้จากสารเคมี นั่นคือ SiCu ซึ่งมีความแข็งที่ใกล้เคียงกันมาก นั่นก็หมายความว่า ซิลิกาที่ได้จากเคลือบนั้นก็มีความใกล้เคียงกับซิลิกาที่ได้จากทางเคมี แล้วถ้าลดอุณหภูมิในการเผาเคลือบให้ต่ำลงไป ค่าความแข็งก็จะลดลง เหตุผลที่สามารถอธิบายผลการทดลองนี้ได้ อาจเนื่องมาจากการที่ซิลิกาเป็นสารที่มีค่าความหนาแน่นสูง นั่นคือ 2.65 g/cm^3 ซึ่งเมื่อเทียบกับสารประกอบอื่นๆ ในโครงสร้างของแก้วนั้น มีค่าความหนาแน่น และปริมาณน้อยกว่า จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานมีค่าลดลงตามปริมาณซิลิกาที่ลดลงได้



รูปที่ 4.6 แสดงสมบัติค่าความแข็งของชิ้นงานแก้วที่ได้จากเคลือบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดคอปเปอร์ออกไซด์

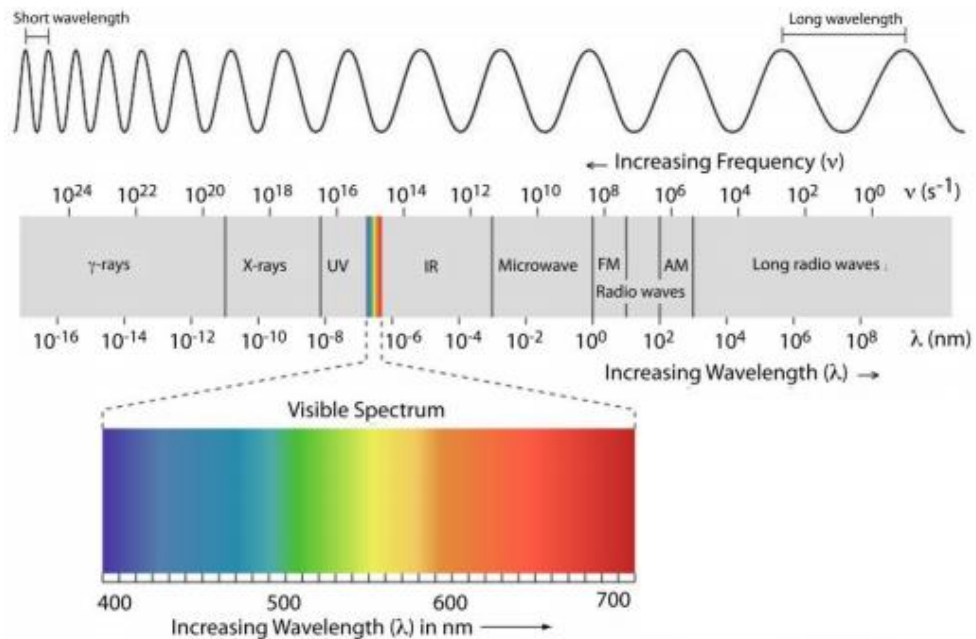
- ผลการทดสอบการดูดกลืนรังสี UV-VIS

จากกราฟเราจะเห็นว่า SiCu, มีการดูดกลืนรังสี UV-VIS ช่วงกราฟมีการเกาะกลุ่มกันในทิศทางเดียวกัน ในช่วงความยาวคลื่นที่ 450-495 nm คือ RCu1000, RCu1100, RCu1200 เป็นช่วงของแสงฟ้า



รูปที่ 4.7 กราฟการดูดกลืนรังสี UV-VIS

ภาพและการเทียบแอมพลิจูดไฟฟ้าในช่วงค่า 450-495 nm



รูปที่ 4.8 สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า[10]

ย่าน	ความยาวคลื่น (nm)	ความถี่ (THz)	พลังงานโฟตอน (eV)	complementary color
ultraviolet (UV)	<380			
violet	380–450	668–789	2.75–3.26	yellow-green
blue	450–495	606–668	2.50–2.75	yellow
green	495–570	526–606	2.17–2.50	red-purple
yellow	570–590	508–526	2.10–2.17	blue
orange	590–620	484–508	2.00–2.10	green-blue
red	620–750	400–484	1.65–2.00	blue-green
near IR	>750			

รูปที่ 4.9 สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านมองเห็น [10]

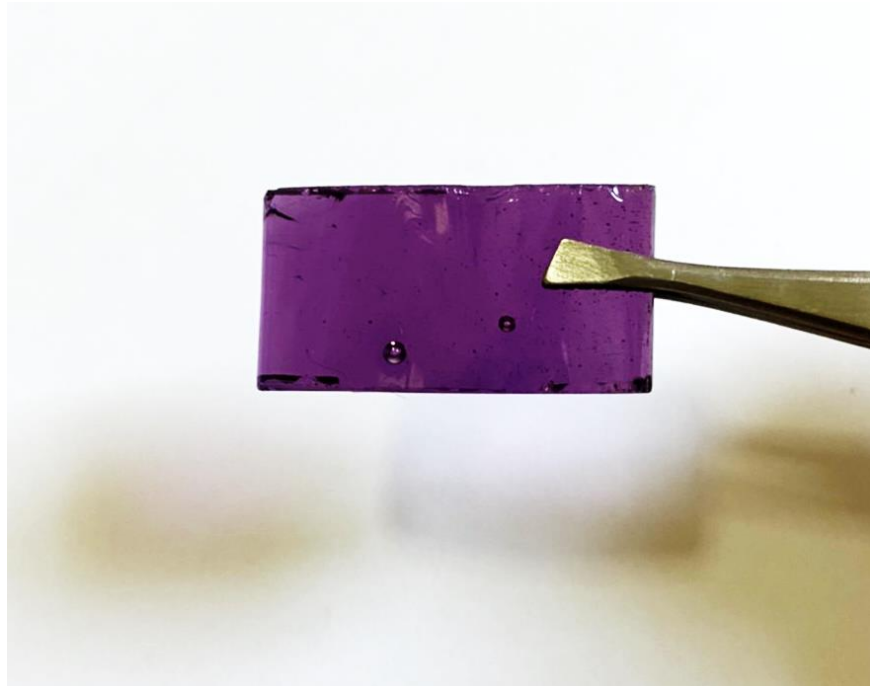
4.2.2 ผลการเติมสารให้สีม่วงแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2)

- ลักษณะทางกายภาพ: สี

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ชิ้นงานแก้วที่มีการเติมซิลิกาที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน หลังเติมสาร MnO_2 ซึ่งตามทฤษฎีในการให้แสงสีม่วง ในปริมาณ 0.2 wt% ผลที่ได้พบว่า แก้วคริสตัลที่ได้มีสีม่วงอมแดงและมีค่าความเข้มของสีมากขึ้นเล็กน้อย ตามปริมาณความบริสุทธิ์ของสารซิลิกาที่เพิ่มขึ้น โดยความอึดตัวของสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารที่เจือเข้าไป



(ก)



(ข)



(ค)



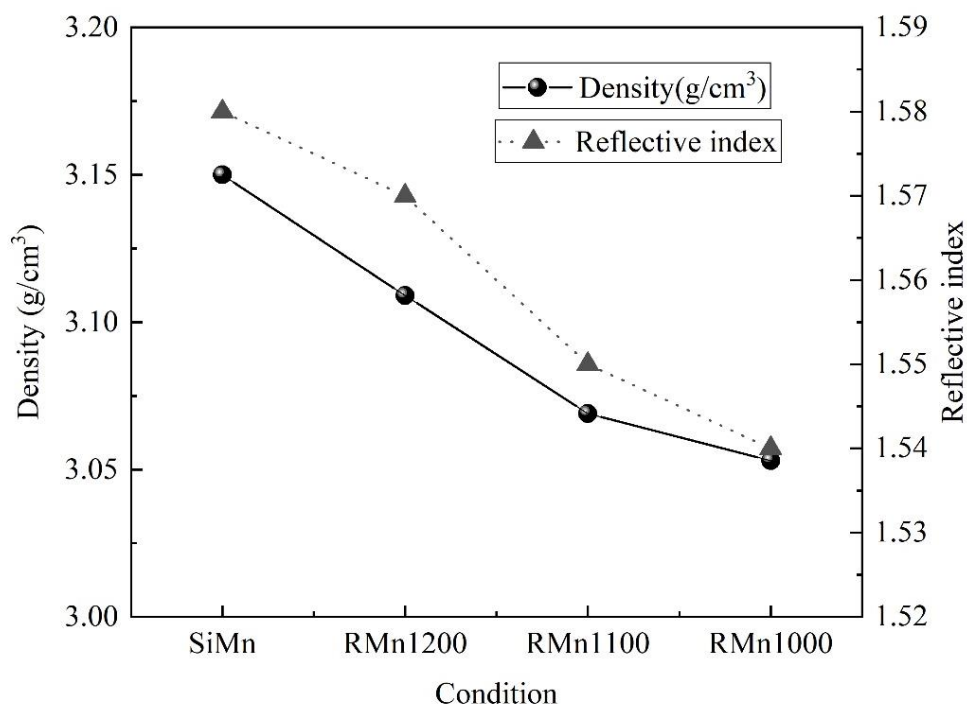
(ง)

รูปที่ 4.10 แสดงรูปชิ้นงานแก้วคริสตัลสีที่เงื่อนไขในการใช้ซิลิกาที่แตกต่างกันหลังเติมสารให้สีชนิดแมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) ที่ 0.2 wt% (ก) SiMn (ข) RMn1000 (ค) RMn1100 (ง) MnCu1200

- ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่น (Density) และค่าดัชนีหักเหของแก้วคริสตัล (Reflective index)

เมื่อทำการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของแสง จากผลการทดลองพบว่า แก้วที่ทำการเติม MnO_2 ที่ปริมาณ 1%wt ในสารชิ้นงาน SiMn มีค่าความหนาแน่นมากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 3.15 g/cm^3 และแนวโน้มค่าความหนาแน่นของแก้วคริสตัลมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณของซิลิกาบริสุทธิ์ภายในชิ้นงานลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเป็นไปได้จาก ปริมาณของซิลิกาในชิ้นงานซึ่งมีคุณสมบัติสำคัญต่อความแข็งแรงมีปริมาณลดลง และมีสารอื่นเจือปนมากขึ้น สารเจือปนนั้นอาจจะไปแทนที่ตำแหน่งของซิลิกาในโครงสร้างจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดลงได้ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงานแก้วที่มีการเติมแมงกานีสเทียบกับคอปเปอร์ออกไซด์ จะเห็นได้ว่ามีค่าความหนาแน่นโดยรวมมากกว่า เหตุผลที่สามารถอธิบายได้นั้นอาจเกิดมาจากธาตุโลหะทรานซิชัน Mn ที่เติมเข้าไปนั้น ถือได้ว่าเป็นธาตุโลหะหนัก (มีน้ำหนักอะตอมสูง) มีความเสถียรมากกว่าเมื่อเทียบกับคอปเปอร์ออกไซด์ จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของแก้วมีมีแนวโน้มสูงกว่า ตามน้ำหนักอะตอมของธาตุที่เติมเข้าไป นอกจากนี้ธาตุทรานซิชัน Mn ที่เติมเข้าไปนั้น ยังส่งผลทำให้ค่า electron density มีค่าเพิ่มขึ้น [1] (ซึ่งค่านี้จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของโลหะทรานซิชัน) ส่งผลทำให้ค่า RI มีค่าสูงขึ้นไปด้วย (อยู่ในช่วง 1.54-1.58) หรืออาจกล่าวได้ว่าโลหะทรานซิชัน

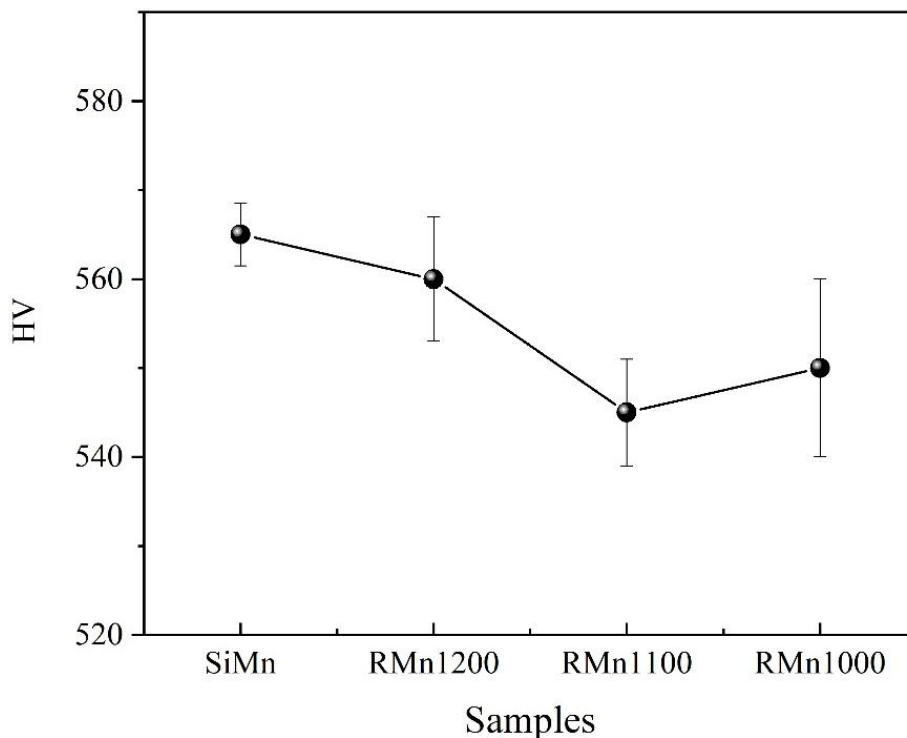
ที่เติมเข้าไปนั้น จะส่งผลให้ค่าแนวโน้มค่าความหนาแน่น และค่า RI ของแก้วคริสตัลมีค่าสูงขึ้น จากกราฟจะเห็น ความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตามระหว่างค่าความหนาแน่น และ ค่าดัชนีหักเห กล่าวคือ หากแก้วคริสตัลมีค่าความหนาแน่นสูง จะมีค่าดัชนีหักเหสูงไปด้วย



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของชิ้นงานแก้วที่ได้จาก แกลบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดแมงกานีสออกไซด์

- ผลการทดสอบวัดค่าความแข็ง (hardness)

จากการวัดสมบัติทางกลของชิ้นงานด้านค่าความแข็งพบว่า ชิ้นงานที่ได้หลังจากการเติมด้วยแมงกานีสออกไซด์พบว่า แนวโน้มของค่าความแข็งมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มของค่าความแข็งลดลงตามปริมาณซิลิกาที่ลดน้อยลงด้วย ดังแสดงในรูป 4.12 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองการวัดค่าสมบัติความแข็งของชิ้นงานที่เติมคอปเปอร์ออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณา ค่าสมบัติความแข็งเปรียบเทียบกันระหว่างการเติมสารให้สีคอปเปอร์ออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์พบว่า แก้วที่ให้สีม่วงจากแมงกานีสออกไซด์มีค่าสมบัติด้านความแข็งมีค่ามากกว่า สาเหตุอาจเนื่องมาจากว่า แมงกานีสออกไซด์เป็นธาตุโลหะหนักที่มีความเสถียรของโครงสร้างมากกว่า จึงทำให้การอยู่กันของอะตอมภายในเนื้อของชิ้นงานมีค่าสูงนั่นเอง

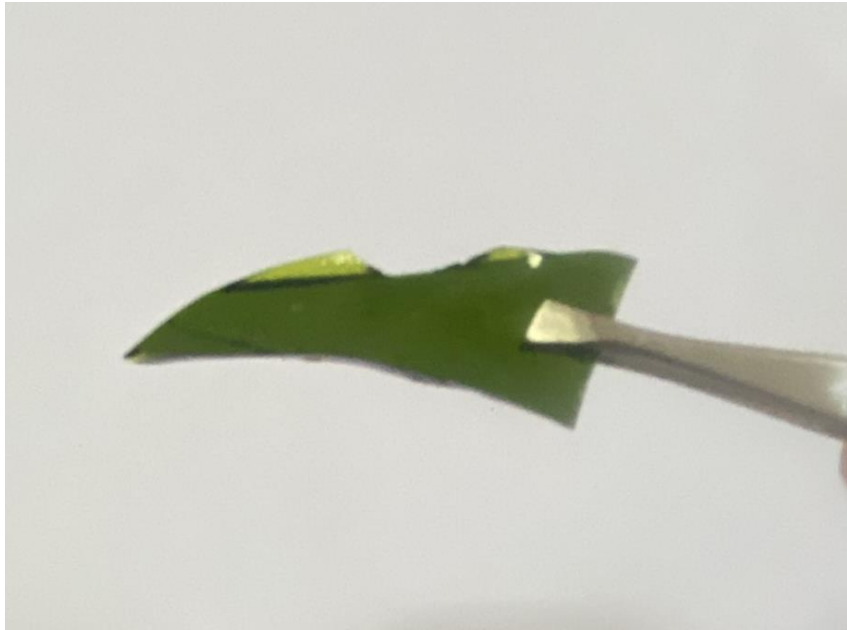


รูปที่ 4.12 แสดงสมบัติค่าความแข็งของชิ้นงานแก้วที่ได้จากเคลือบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดแมงกานีสออกไซด์

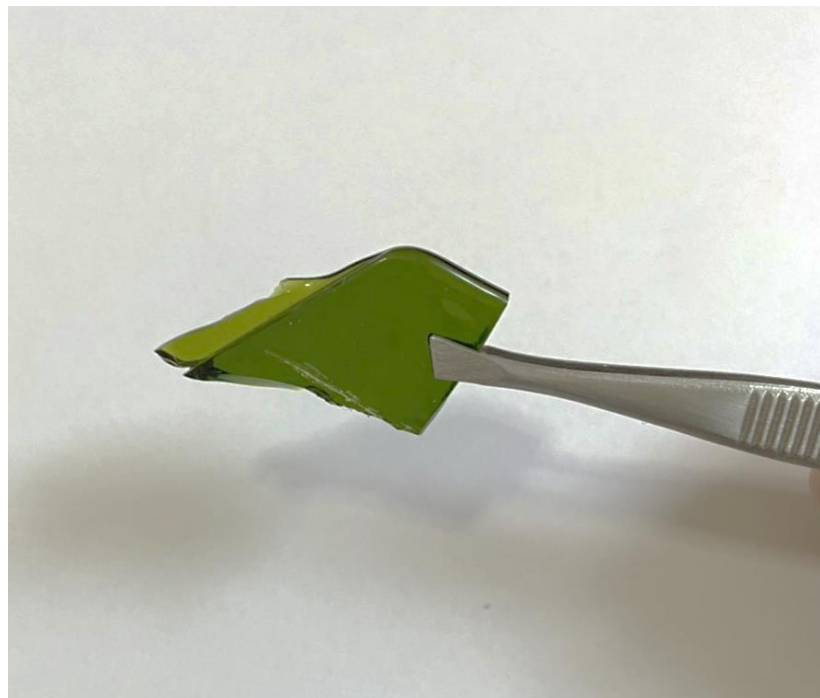
4.2.3 ผลการเติมสารให้สีเขียวโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)

- ลักษณะทางกายภาพ: สี

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าสารเติม Cr_2O_3 (0.2 wt%) นั้นจะส่งผลทำให้แก้วคริสตัลเกิดสีเขียวได้ลักษณะที่มีเฉดสีเขียวที่ต่างกันเล็กน้อย ตามปริมาณซิลิกาที่แตกต่างกัน โดยแก้วสูตร RCr และ RCr1200 จะให้เฉดสีเขียวที่สว่างที่สุด ในขณะที่แก้วสูตร RCr1000 จะให้แก้วสีเขียวที่มีลักษณะที่บกว่า นอกจากนี้ยังพบอีกว่า สูตรแก้ว RCr1000 เนื้อแก้วมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตได้จากเกิดแถบริ้วลายขนาน (Striae) ที่เกิดขึ้นดังแสดงรูป ซึ่งถือเป็นข้อบกพร่องแบบที่บ่งชี้ให้เห็นถึงการกระจายของส่วนประกอบทางเคมีเฉพาะที่ (Local composition) ในแก้วแตกต่างกัน [8] เหตุที่เป็นเช่นนั้น เนื่องมาจาก Cr_2O_3 เป็นสารเคมีที่มีความสามารถละลายในน้ำแก้วได้น้อย [9] แต่อย่างไรก็ตาม ริ้วลายที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้แก้วดูคล้ายอัญมณีหยก (Jadeite) และเมื่อนำผลการทดลองไปทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหแสดงได้ดังรูปที่ 4.14



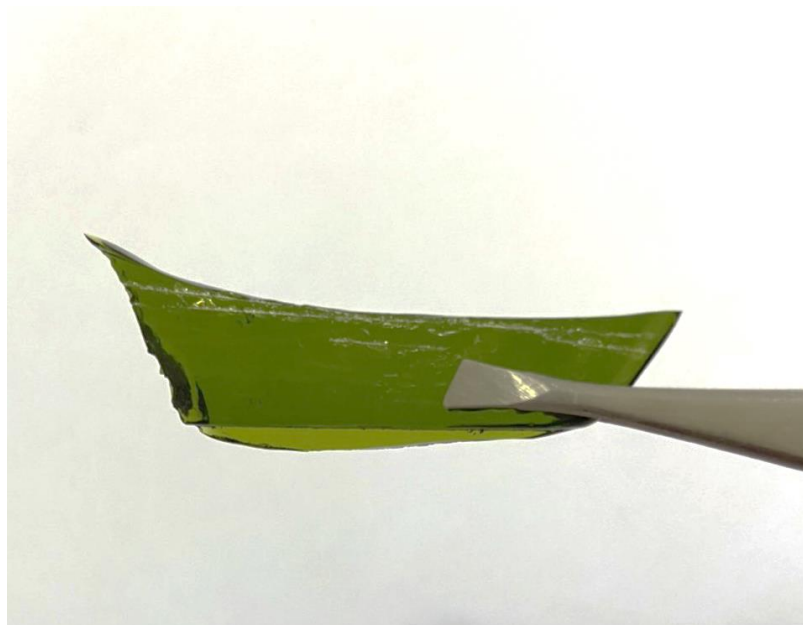
(ก)



(ข)



(ค)

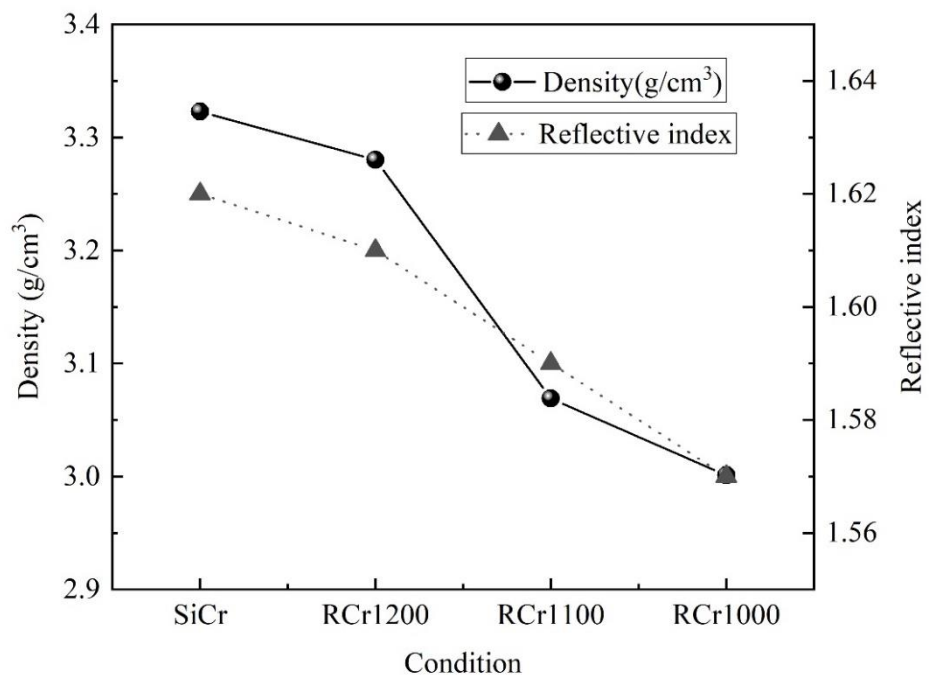


(ง)

รูปที่ 4.13 แสดงรูปชิ้นงานแก้วคริสตัลสีที่เงื่อนไขในการใช้ซิลิกาที่แตกต่างกันหลังเติมสารให้สีชนิดโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ที่ 0.2 wt% (ก) SiCr (ข) RCr1000 (ค) RCr1100 (ง) RCr1200

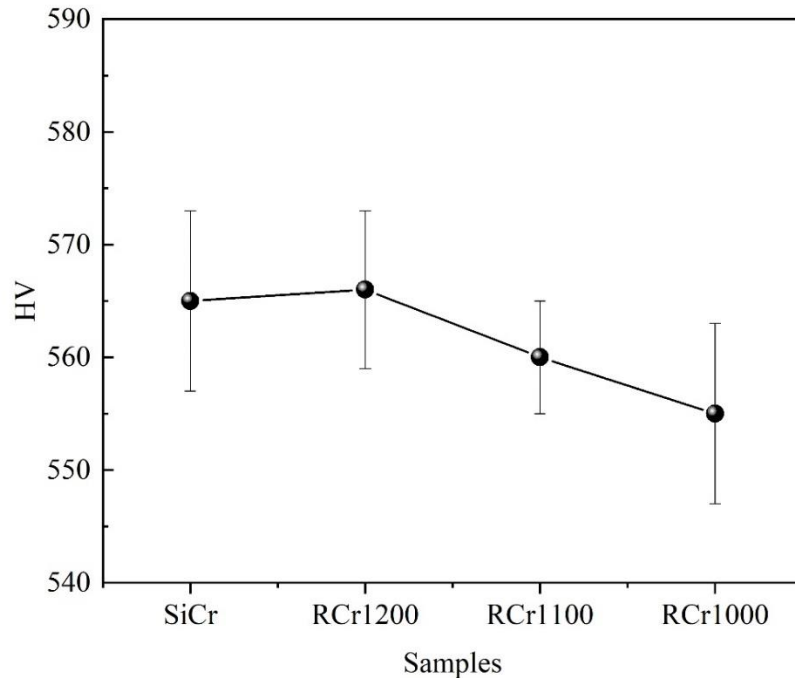
- ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่น (Density) และค่าดัชนีหักเหของแก้วคริสตัล (Reflective index)

ในกรณีของชิ้นงานแก้วที่มีปริมาณซิลิกาสูงนั้น (RiCr และ RCr1200) ค่าดัชนีหักเหของแก้วคริสตัลมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปริมาณซิลิกามีค่าสูงขึ้น จากการทดลองพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 1.57-1.62 โดยค่าดัชนีหักเหสูงที่สุดเท่ากับ 1.62 ที่ชิ้นงานแก้วสูตร RiCr และ RCr1200 (รูปที่ 4.13) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาชิ้นงานแก้ว RCr1100 และ RCr1000 ปริมาณซิลิกาที่มีปริมาณน้อยลง พบว่าค่าดัชนีหักเหมีค่าลดลงด้วย อาจเนื่องมาจากการมีซิลิกาน้อยในโครงสร้างซึ่งเป็นตัว glass former และทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงจะทำให้โครงสร้างของแก้วเกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) หรือ เกิดตำหนิข้อบกพร่อง (Defect) ภายในโครงสร้างของเนื้อแก้วมากขึ้นส่งผลให้ค่าดัชนีหักเหลดลง สำหรับค่าความหนาแน่นของแก้วคริสตัลที่เติม Cr_2O_3 นั้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 3.2032 – 3.3229 g/cm^3



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหของชิ้นงานแก้วที่ได้จาก แกลบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดโครเมียมออกไซด์

- ผลการทดสอบวัดค่าความแข็ง (hardness)



รูปที่ 4.15 แสดงสมบัติค่าความแข็งของชิ้นงานแก้วที่ได้จากเคลือบที่เงื่อนไขแตกต่างกันของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดโครเมียมออกไซด์

จากรูปที่ 4.15 แสดงสมบัติของค่าความแข็งของชิ้นงานหลังจากเติมสารให้สีชนิดโครเมียมออกไซด์ ผลที่ได้พบว่าค่าความแข็งที่ได้มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณซิลิกาที่เปลี่ยนแปลงไป ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลของค่าความแข็งของชิ้นงานที่เติมสารให้สีชนิดคอปเปอร์ออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ และปริมาณเฉลี่ยค่าความแข็งมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับแก้วคริสตัลสีอื่นๆ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าปริมาณซิลิกาภายในชิ้นงานมีผลต่อสมบัติค่าความแข็งนั่นเอง

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ในงานวิจัยนี้ที่สามารถผลิตแก้วคริสตัลที่มีวัตถุดิบตั้งต้นมาจากแคลบได้ และเฟสที่ได้เป็นเฟสของซิลิกา Cristobalite และ Tridymite และพบว่ามีค่าความบริสุทธิ์ของซิลิกาเท่ากับ 90.89 %

2. เงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ในผลิตรากผลผลิตแก้วคริสตัลสีได้แก่ชิ้นงานที่มีแคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลที่ได้หลังจากผสมสารให้สีได้แก่ คอปเปอร์ออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และโครเมียมออกไซด์ โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกันคือความความหนาแน่น ค่าดัชนีหักเห และค่าความแข็ง ที่มากที่สุดได้มาจากชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมซิลิกาจากสารเคมี และชิ้นงานที่สังเคราะห์แคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส

3. แก้วคริสตัลที่มีแคลบเป็นวัตถุดิบสามารถวัดค่าดัชนีหักเหได้มากกว่า 1.5 ซึ่งตรงกับความต้องการในเงื่อนไขของแก้วคริสตัลสี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมแก้วคริสตัลสามารถทำได้หลายสีเนื่องจากแคลบที่สังเคราะห์ได้สามารถทดแทนซิลิกาได้

2. ในงานวิจัยนี้ควรนำไปใช้ได้จริงเนื่องจากการลดต้นทุนในการผลิตของชิ้นงานแก้วคริสตัลได้อีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] Leenakul W., Pisitpipathsin N, Kantha P, Tawichai N, Tigunta S, Rujijanagul G, Eitssayeam S, Pengpat K, J Adv. Mater. Res, 506 (2012) 174.
- [2] Yucel S., Özçimen D, Terzioglu P, Acar S, Yaman Can, Adv Sci Letter, 19 (2013) 3477.
- [3] Shelby, J.E., 1997, Introduction to Glass Science and Technology, The Royal Society of Chemistry, England. 244 pp.
- [4] Holland, D., 1995, Hand out in Physical Method of Materials Characterisation. Physics department, Warwick University, U.K.
- [5] รศ.เสวีวัฒน์สมินทร์ปัญญา, 2549, หลักการวิเคราะห์พลอย.กรุงเทพฯ.,
- [6] <https://groups.google.com/forum/#!topic/kulsrisuwan/m3hXYJEBZag>
- [7] Weyl, Woldemar A., 1959, Coloured Glasses, Dawson's Reprint, London.
- [8] Stookey, S.D., 1949, Coloration of glass by gold, silver and copper. Journal of The American Ceramic Society, 32 (8): p. 246-249.
- [9] กมลพรรณ เฟื่องพัด และคณะเชียงใหม่: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2 แผ่น. ภาพประกอบ. (ส.ร. 661.1 ก167ก)
- [10] Andreia Ruivo .Gold nanoparticles in ancient and contemporary ruby glass. J. Culteral Heritage 9. 134-137. (2008)
- [11] Maik Eichelbaum .et al., Gold-Ruby Glass in a New Light: On the Microstructuring of Optical Glasses with Synchrotron Radiation (2007). p 278-282.
- [12] Maik Eichelbaum .et al., On the Chemistry of Gold in Silicate Glasses : Studies on a Nonthermally Activated Growth of Gold Nanopaticles. Angwandte Chemie (2005). p 7905-7909.
- [13] อุไรวรรณ อินต๊ะธา. “การเตรียมแก้วตะกั่วสีแดง”. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2545.
- [14] Xiongwei Jiang. et al., Laser-controlled dissolution of gold nanoparticles in glass.Chemical Physics Letters 391 (2004) p 91-94.
- [15] Jiawei Sheng. et al., Long-term stability of X-ray induced color centers in silver-doped glass. Journal of Non-Crystalline Solids 352 (2006) p 2914-2916.
- [16] Huidan Zen. et al., Irradiation assisted fabrication of gold nanoparticles-doped glasses. Journal of Crystal Growth 267 (2004) p 156-160

ประวัติย่อผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ – นามสกุล
(ภาษาไทย) ดร.วิไลวรรณ ลีนะกุล
(ภาษาอังกฤษ) Dr. Wilaiwan Leenakul
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน
1-5599-00034-75-2
3. ตำแหน่งปัจจุบัน
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เวลาที่ใช้ทำวิจัย 17.5 ชั่วโมง : สัปดาห์
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร 1381 ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร
โทรศัพท์ 089-266-2485
E-mail: wilaiwan.l@rmutp.ac.th, leenakulw@gmail.com
5. ประวัติการศึกษา

วท.บ. (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วศ.ม. (วิศวกรรมพลังงาน)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
วท.ด. (วัสดุศาสตร์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
Bioglass- ceramics, Composite materials, Magnetic Materials
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 7.1 งานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่/ตีพิมพ์

International Journal

- W. Leenakul, K Pengpat, G Rujijanagul, S Eitssayeam, N Pisitpipatsina and P kanta, Structural and magnetic properties of $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ containing $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$ glass ceramics, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2013; 325: 102-106.
- W. Leenakul, S. Eitssayeam, G. Rujijangul, T. Tunkasiri, N. Tongsir, K. Pengpat, Effects of Rice Husk as a Precursor on Crystallization Kinetic of 45S5 Bioactive Glass-Ceramics,

Characterization and Development of Biosystems and Biomaterials Advanced Structured Materials: Springer Link, 2013; 29: 129-142.

- **W. Leenakul**, P. Inthawin, J. Ruangsuriya, P. Jantaratana, K. Pengpat, Magnetic bioactive $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}\text{-SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ glass-ceramic for hyperthermia treatment of bone cancer, *Integrated Ferroelectrics*, 2013; 148(1): 81-89.
- **W. Leenakul**, J. Ruangsuriya, P. Jantaratana, K. Pengpat, Fabrication and characterization of ferrimagnetic bioactive glass-ceramic containing $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, *Ceramics International*, 2013; 39: 201-205.
- **W. Leenakul**, N. Pisitpipathsin, P. Kantha, N. Tawichai, S. Tigunta, S. Eitssayeam, G. Rujijanagul, K. Pengpat, A. Munpakdee, Characteristics of 45S5 Bioglass-ceramics Using Natural Raw Materials. *Advanced Materials Research* 2012; 506: 174-177.
- Prathana Intawin, **Wilaiwan Leenakul**, Pongsakorn Jantaratana, Kamonpan Pengpat, Fabrication and Magnetic Properties of $\text{P}_2\text{O}_5\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ Bioactive Glass Ceramic Containing $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$, *Integrated Ferroelectrics*, 2013; 148(1): 171-177.
- P. Inthawin, **W. Leenakul**, S. Eitssayeam, G. Rujijanagul, T. Tunkasiri, K. Pengpat, EFFECT OF Ba-FERRITE CONTENT ON BIOACTIVITY OF $\text{CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-BIOGLASS CERAMICS}$, *Pure and Applied Chemistry International Conference* 2012; 1-4.
- N. Pisitpipathsin, P. Kantha, P. Sriprapha, **W. Leenakul**, K. Pengpat, S. Eitssayeam, G. Rujijanagul, Effect of $\text{BaZr}_{0.05}\text{Ti}_{0.95}\text{O}_3$ Additions on Microstructure and Piezoelectric Properties of Hydroxyapatite Bone. *Advanced Materials Research* 2012; 506: 166-169.
- S. Tigunta, **W. Leenakul**, S. Eitssayeam, G. Rujijanagul, T. Tunkasiri, K. Pengpat, Phase Formation of Hydroxyapatite Particles at Different Calcination Temperatures, *Advanced Materials Research* 2012; 506: 170-173.
- P. Kantha, K. Pengpat, N. Pisitpipathsin, **W. Leenakul** and S. Sirisoonthorn. Enhanced Electrical Properties of Lead-Free Bi_2GeO_5 Ferroelectric Glass Ceramics by Thermal Annealing, *Ferroelectrics*, 2011; 416(1):158-167. Published.
- N. Pisitpipathsin, K. Pengpat P. Kantha, and **W. Leenakul**. Dielectric properties of lead free solid solution of $\text{Bi}_{0.489}\text{Na}_{0.487}\text{La}_{0.017}\text{TiO}_3$ and BaTiO_3 addition, *Phase Transitions*, 2010; 83(10-11): 875-883. Published.
- **W. Leenakul** and N. Tippayawong. Dilute Acid Pretreatment of Bamboo for Fermentable Sugar Production. *Journal of Sustainable Energy & Environment*. 2010; (1) 117-120.

7.2 งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- “Magnetic Bioactive Glass-ceramics in $\text{Sr}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}\text{-SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ system for hyperthermia treatment of bone cancer” Oral presentation at the AMF-8 The 8th Asian Meeting on Ferroelectrics 9-14 December 2012, Thailand
- “Characteristics of 45S5 Bioglass-ceramics Using Natural Raw Materials” Poster presentation at Chiang Mai International Conference on Biomaterials & Applications (CMICBA 2011), 9 - 10 August 2011, Chiang Mai, Thailand
- “Effects of Rice Husk as a Precursor on Crystallization Kinetic of 45S5 Bioactive Glass-Ceramics” Poster Presentation at 5th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting, ACE-X 2011, 3-6 JULY 2011, Algarve, Portugal.
- “Structural and magnetic properties of $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ containing $\text{BaO-Fe}_2\text{O}_3$ glass ceramics” at The 2011 International Forum on Functional Materials (IFFM2011) and the 2nd Special Symposium on Advances in Functional Materials (AFM-2), July 28-31, 2011, Jeju Grand Hotel, Jeju, Korea.

ทุน/รางวัลที่ได้รับ

- 1) ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ ปี 2557 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
- 2) ทุนงบประมาณของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2558
- 3) ทุนงบประมาณของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2559
- 4) Poster Presentation Award in The international conference on Chiang Mai International Conference on Biomaterial & Applications 2011 (CMICBA 2011)