



การสังเคราะห์ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเพื่อมาประยุกต์ใช้ในการทำแก้วคริสตัลสี
The synthesis of silica from rice husk ash for color crystal glass

นายวงศธร สุขวัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ปีการศึกษา 2561



การสังเคราะห์ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเพื่อมาประยุกต์ใช้ในการทำแก้วคริสตัลสี
The synthesis of silica from rice husk ash for color crystal glass

นายวงศธร สุขวัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

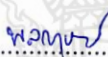
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ปีการศึกษา 2561


ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อปริญญาโท การสังเคราะห์ซิลิกาจากซีเถ้าแกลบเพื่อมาประยุกต์ใช้ในการทำแก้ว
คริสตัลลี
ชื่อ นามสกุล นาย วงศธร สุขวัฒน์
ชื่อปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม
คณะ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิไลวรรณ ลีนะกุล (วท.ด.)

คณะกรรมการสอบได้ให้ความเห็นชอบปริญญาโทฉบับนี้แล้ว


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ นายพลกฤษณ์ คุ่มกล้า, วท.ม)


..... กรรมการ
(อาจารย์ นายชนพงศ์ สารอินทร์, Ph.D)


..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิไลวรรณ ลีนะกุล, วท.ด.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อนุมัติให้รับปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม
วันที่ 5 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2562

ชื่อปริญญาบัตร	การสังเคราะห์ซิลิกาจากซีเภาแอลบเพื่อมาประยุกต์ใช้ในการทำแก้วคริสตัลลี
ชื่อ สกุล	นายวงศธร สุขวัฒน์
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	วัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม
คณะ	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้มีจุดประสงค์ที่จะผลิตแก้วคริสตัล โดยใช้ซิลิกาจากแอลบเป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยการทดลองแบ่งเป็นสองช่วงได้แก่ ช่วงแรกเป็นการสังเคราะห์ซิลิกาจากแอลบ โดยใช้วิธีการเผาด้วยเงื่อนไขอุณหภูมิที่ต่างกันที่ 1000-1200 องศาเซลเซียส และช่วงที่สองเป็นการนำแอลบที่สังเคราะห์ได้ไปทำการผลิตเป็นแก้วคริสตัลลี พร้อมทั้งเปรียบเทียบชิ้นงานแก้วคริสตัลลีที่ได้จากการใช้ซิลิกาจากสารเคมีด้วย โดยผลการทดลองพบว่าแอลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิที่ 1000-1200 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์ซิลิกาได้ความบริสุทธิ์เฉลี่ยอยู่ที่ 90 ร้อยละโดยน้ำหนัก และเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบของเฟสด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD Diffraction) พบว่าเกิดเป็นองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกันทั้งหมด นั่นคือ Cristoballite, Tridamite และเมื่อนำซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ไปเป็นสารตั้งต้นในการหลอมคริสตัลลีพบว่าได้แก้วสีฟ้าใส โดยชิ้นงานแก้วคริสตัลลีที่มีค่าความหนาแน่น และค่าความแข็งแรงมากที่สุดได้มาจากชิ้นงานที่มีแอลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส

Project title	The synthesis of silica from rice husk ash for color crystal glass
Author	Wongsathorn Sukawat
Degree	Bachelor of Science
Major program	Industrial Materials Science Science and Technology
Academic Year	2561

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 glass show blue colour. The optimum condition with show the highest density and density value were obtain with the sample of heated RHA at 1000°C

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าแบบอิสระเล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจาก อ.ดร.วิไลวรรณ ลีนะกุล อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระผู้ซึ่งให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในการค้นคว้าอิสระในครั้งนี้ จนการค้นคว้าอิสระเสร็จสมบูรณ์ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ธนพงศ์ สารอินทร์ ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการตรวจสอบการค้นคว้าอิสระและให้คำแนะนำเป็นอย่างดี รวมทั้ง แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในการค้นคว้าอิสระครั้งนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อ.พลกฤษณ์ คุ่มกล้า ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการตรวจสอบการค้นคว้าอิสระช่วยชี้แนะแนวทางการทางและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนการค้นคว้าอิสระในครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณวนิดา นนทธิ ที่ช่วยเหลือและให้ความรู้ในเชิงปฏิบัติการในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัยและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ให้ความกรุณาให้ความรู้และคำแนะนำ ตลอดจนเอื้อเฟื้อสอนเทคนิควิธีการต่างๆ

ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆในการทำโครงงานนี้ สอนวิธีใช้เครื่องมือให้เชี่ยวชาญและสามารถนำไปใช้ได้จริง

ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่างๆในการทำโครงงานนี้ สอนวิธีใช้เครื่องมือให้เชี่ยวชาญและสามารถนำไปใช้ได้จริง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ได้ส่งเสริมสนับสนุนทุกอย่างมาโดยตลอด และคอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

วงศ์ธร สุวัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ซ
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีโครงสร้างของการเกิดแก้ว	5
2.1.1 คำนิยามของแก้ว (Definitions of Glasses)	6
2.1.2 ในเรื่องของความสามารถในการทำให้เกิดแก้ว (glassforming ability)	10
2.1.3 การใช้งานและสมบัติที่สำคัญของแก้ว (Uses of glass and important Properties)	10
2.1.4 การหลอมและกระบวนการผลิตแก้ว (Melting and processing of glasses)	12
2.2 ประเภทของแก้ว	13
2.2.1 แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติ (god made glass)	13
2.2.2 แก้วที่มนุษย์สร้างขึ้น (man made glass)	14
2.3 ประเภทของแก้วที่แบ่งตามลักษณะการใช้งาน	16
2.4 โครงสร้างแก้ว	18

สารบัญ (ต่อ)

2.5	แกลบ	20
2.6	แก้วคริสตัล	20
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
3.	วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	24
3.2	อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	24
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบวิเคราะห์สาร	25
3.4	ขั้นตอนการวิจัย	25
3.4.1	การสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบ	25
3.4.2	การเตรียมแก้ว	26
3.5	วิธีการทดลอง	28
3.5.1	การสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบ	28
3.6	การทดสอบสมบัติของแก้ว	34
3.6.1	การตรวจสอบเฟสด้วย (XRD)	34
3.6.2	การศึกษาร่องรอยประกอบของธาตุ (XRF)	35
3.6.3	การวัดความแข็ง Hardness	37
3.6.4	การวัดความหนาแน่น (Density)	38
3.6.5	การวัดค่าดัชนีหักเห (Ri)	39
3.6.6	หลักการดูดกลืนรังสี UV-VIS	40
4.	ผลการทดลอง และอภิปรายผล	
4.1	ผลการสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบ	43
4.1.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคXRF	44
4.1.2	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสี XRD	46
4.2	ผลการสังเคราะห์แก้วคริสตัลจากแกลบ	46
4.2.1	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแก้วคริสตัลจากแกลบ	46
4.2.2	ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่น Density	47
4.2.3	ผลการทดสอบวัดค่าความแข็ง Hardness	48
4.2.4	ผลการทดสอบการดูดกลืนของแสง UV-VIS	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5. สรุปผล และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาคผนวก ก	
ประวัติการศึกษา	59



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก	6
2.2	แสดงภาพการเรียตัวของอะตอมของผลึกแบบซ้ำและเร็ว	7
2.3	แสดงภาพผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอลทัลปีของการหลอมเหลว	8
3.1	แสดงขั้นตอนการสกัดซิลิกาและส่วนผสมในการทำแก้วคริสตัล	27
3.2	แสดงแผนผังเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกแก้วคริสตัล	29
3.3	แสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้ว	31
3.4	แสดงรูปเตาหลอมไฟฟ้า	32
3.5	แสดงรูปเบ้าหลอมแก้ว porcelain	32
3.6	แสดงรูปเบ้าหลอมแก้ว Alumina	32
3.7	แสดงรูปแม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม	33
3.8	แสดงรูปถุงมือป้องกันความร้อน	33
3.9	แสดงรูปแว่นตาตัดแสงจ้า	33
3.10	แสดงรูปที่คีบเบ้าหลอมแก้ว	34
3.11	แสดงรูปหน้ากากสะท้อนแสง	34
3.12	แสดงรูปเครื่องXRD	35
3.13	แสดงรูปเครื่องXRF	36
3.14	แสดงรูปเครื่องHardness	37
3.15	แสดงรูปหัวกดเครื่องHardness	38
3.17	แสดงรูปสเปกตรัมรังสีแม่เหล็ก	41
4.1	แสดงรูปผงแคลบในช่วงแรก	43
4.2	แสดงรูปผงแคลบในช่วงที่สองที่เงื่อนไขต่างๆ	44
4.3	แสดงรูปกราฟเครื่องXRD	46
4.4	แสดงรูปชิ้นงานที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน	47
4.5	แสดงรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับค่าดัชนีหักเห	48
4.6	แสดงรูปกราฟเครื่องHardness	49
4.7	แสดงรูปกราฟการดูดกลืนรังสี	49

สารบัญรูป (ต่อ)

4.8	แสดงรูปสเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า[10]	50
4.9	แสดงรูปสเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านมองเห็น	50



สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
3.1	แสดงปริมาณของสารเคมีของการเตรียมแก้ว	29
3.2	แสดงปริมาณของสารเคมีของการเตรียมแก้ว	30
3.3	แสดงปริมาณของสารเคมีของการเตรียมแก้ว	30
3.4	แสดงปริมาณของสารเคมีของการเตรียมแก้ว	31
3.5	แสดงสเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในการมองเห็น	42
4.1	แสดงองค์ประกอบของธาตุในแก้วที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000°C	44
4.2	แสดงองค์ประกอบของธาตุในแก้วที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100°C	45
4.3	แสดงองค์ประกอบของธาตุในแก้วที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200°C	45



บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญ

แก้วเป็นวัสดุวัสดุออสซิลอนประเภทหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะแก้วคริสตัลที่จะทำนี้มีสมบัติเฉพาะตัวในเรื่องของความโปร่งใส ความแข็งแรง และความมันแวววาว ซึ่งเป็นสมบัติที่วัสดุอื่นทดแทนไม่ได้แก้วคริสตัล (crystal glass) ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของวัสดุประเภทแก้ว ซึ่งมีโครงสร้างเป็นวัสดุออสซิลอน มีสมบัติเฉพาะตัวในเรื่องของความแข็งแรง และความแวววาว สวยงาม นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหสูง (high refractive index) ทำให้มีความโปร่งใส เป็นประกายแวววาวเป็นพิเศษ ซึ่งสมบัติต่างๆเหล่านี้ล้วนมีผลทำให้แก้วคริสตัลมีราคาสูงกว่าแก้วชนิดอื่นๆทั่วไปในท้องตลาด เมื่อก้าวถึงความโปร่งใสเป็นประกายแวววาว ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของประเภทนี้ พบว่าเกิดจากการเจือสารประกอบทางเคมีนั่นคือ ตะกั่วออกไซด์ ดังนั้นแก้วคริสตัลจึงถูกเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า แก้วตะกั่ว (lead glasses) โดยปกติแก้วคริสตัลจะมีส่วนผสมตะกั่วออกไซด์อยู่ประมาณ ร้อยละ 24 ถึง 32 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีโปรแตสเซียมออกไซด์ (K_2O) และซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักอีกด้วยปริมาณร้อยละ 12 และ 59 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากส่วนประกอบที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ซิลิกาเป็นสารเคมีสำคัญที่เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตแก้วคริสตัล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยมีความสนใจที่จะผลิตแก้วคริสตัลโดยมีจุดเด่นคือจะนำสารตั้งต้นที่สังเคราะห์จากวัสดุธรรมชาติ นั่นคือแกลบมาทำการสังเคราะห์ให้ได้ซิลิกา เนื่องจากสารเคมีชนิดนี้ถ้าต้องการความบริสุทธิ์สูงจะมีราคาที่สูงมากซึ่งมีผลทำให้ต้นทุนของการผลิตแก้วคริสตัลนี้สูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะปรับราคาต้นทุนของวัสดุให้ต่ำลงจึงมีความจำเป็นต้องลดราคาของวัตถุดิบลง โดยในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการเพาะปลูกข้าว เลี้ยงสัตว์ เป็นอาชีพหลัก ในฤดูเก็บเกี่ยวจะมีแกลบ (Rice husk) ที่เป็นวัสดุธรรมชาติเหลือใช้เป็นจำนวนมาก และจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าแกลบที่ได้จากการสีข้าวนั้น ความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 95 ของน้ำหนักแก้ว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะทำการสังเคราะห์แก้วคริสตัลที่สามารถผลิตได้ในประเทศ และมีจุดเด่นคือสังเคราะห์ซิลิกาจากแกลบมาเป็นแก้วคริสตัล โดยทั้งนี้ได้เป็นการลดต้นทุน

ในการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศเพราะสามารถผลิตและใช้ได้ในประเทศโดยที่วัตถุดิบหลักนั้นที่ใช้ได้มาจากเกลบข้าวที่เหลือจากการเกษตรโดยเป็นการนำพารายได้อีกทางให้กับชาวนาอีกด้วย

1.1 วัตถุประสงค์โครงการ

1. การสังเคราะห์เกลบเพื่อเป็นสารตั้งต้นในการทำแก้วในการผลิตแก้วคริสตัล
2. ทำการทดสอบและการตรวจสอบสมบัติในเงื่อนไขที่แตกต่างกันของเกลบและชิ้นงานของแก้วคริสตัล

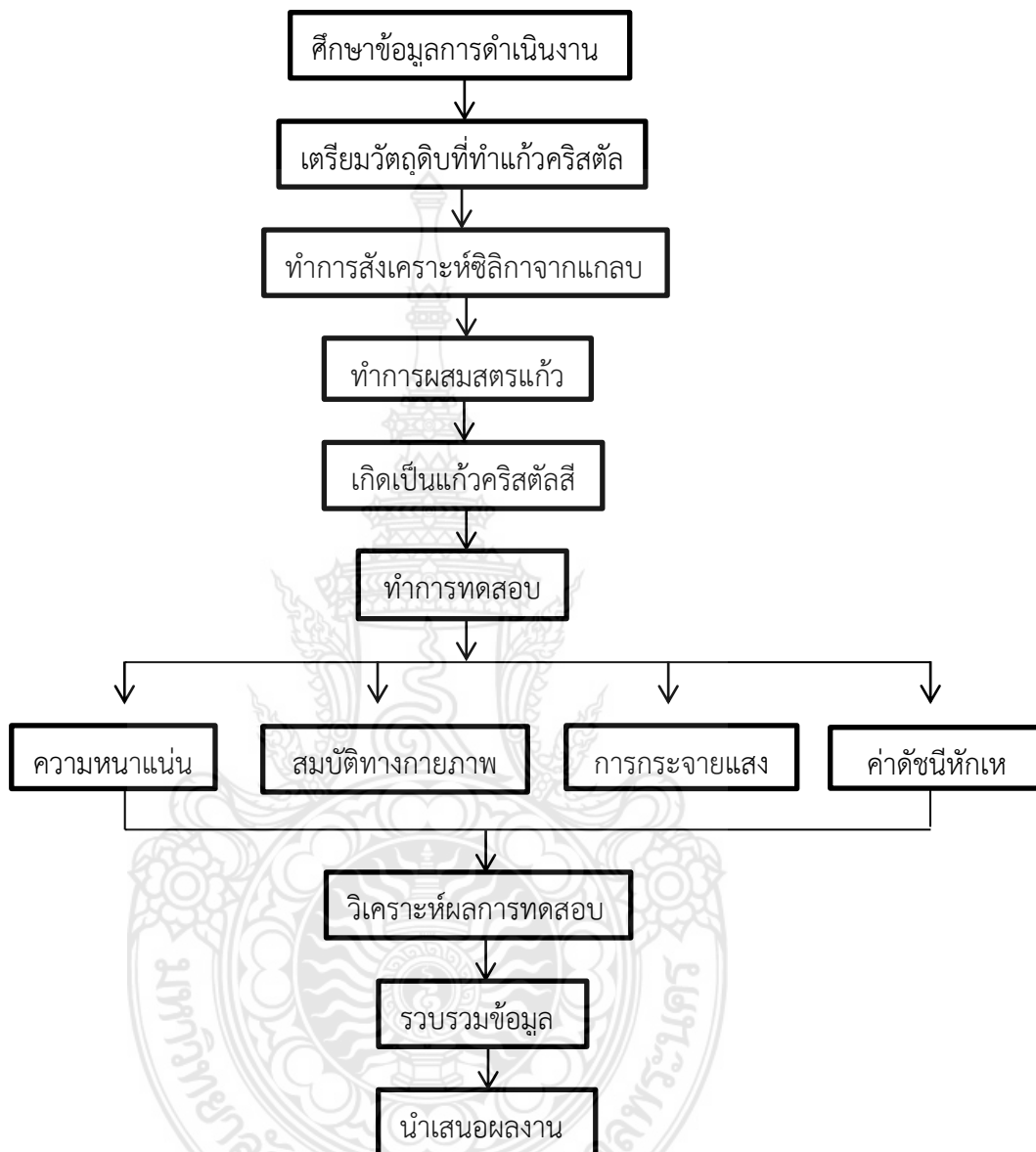
1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

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

1.3 ขอบเขตของโครงการ

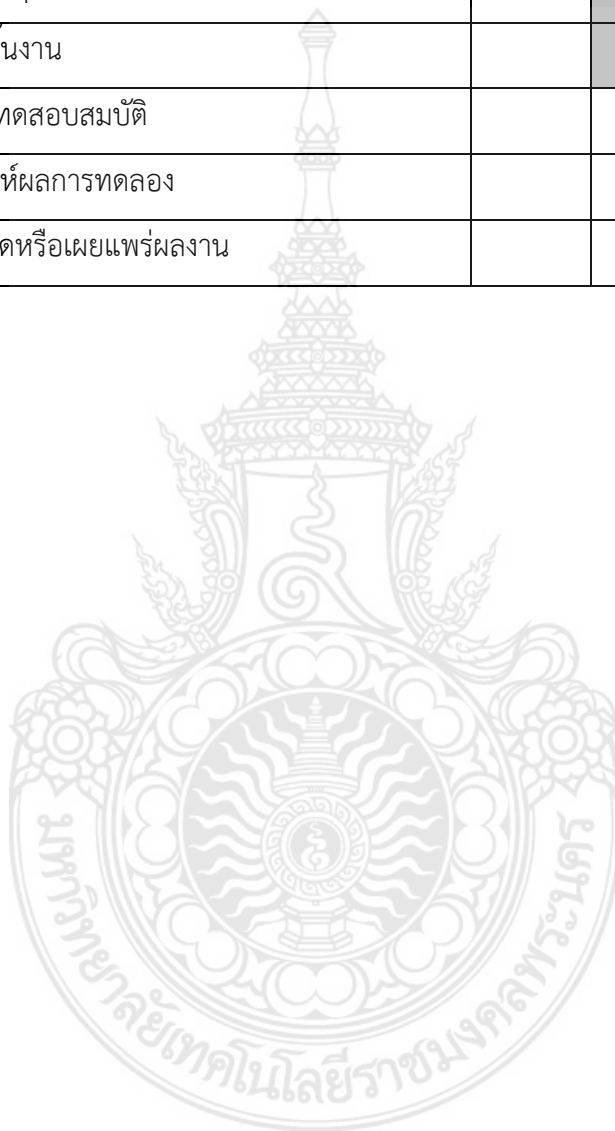
1. สกัดซิลิกาจากเกลบ
2. เอาซิลิกาจากเกลบไปหลอมเพื่อให้ได้เป็นแก้วคริสตัลหรือได้เป็นแก้วคริสตัลเป็นสีต่างๆ
3. ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ ความแข็งแรง ค่าดัชนีหักเห ค่าความเงาแวว

แผนผังขอบเขตของโครงการ



1.4 ระยะเวลาการดำเนินงาน

กิจกรรม	เดือน			
	พ.ย. 61	ธ.ค. 61	ม.ค. 62	ก.พ. 62
1. จัดหาวัสดุดิบและสารเคมีที่ต้องใช้				
2. ขึ้นรูปชิ้นงาน				
3. ทำการทดสอบสมบัติ				
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง				
5. ถ่ายทอดหรือเผยแพร่ผลงาน				



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีโครงสร้างของการเกิดแก้ว (Structural theories of glass formation)

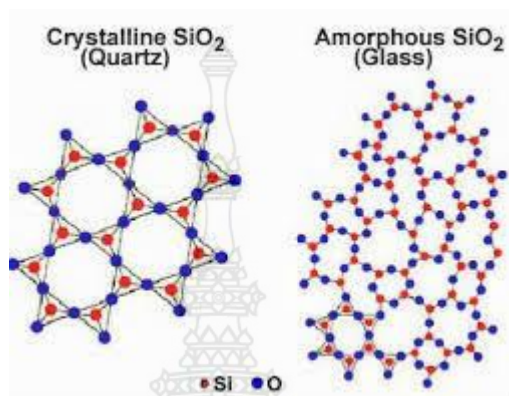
ในการศึกษาเรื่องโครงสร้างของแก้วซึ่งเป็นวัสดุอสัณฐาน เริ่มจากการพิจารณาจากพื้นฐานของศาสตร์ทางด้านสถานะของแข็ง (solid state) ดังนี้ “แก้วที่มีส่วนประกอบทาวเคมีเหมือนกันแต่ผลิตจากห้องปฏิบัติการต่างกันสองแห่ง เมื่อนำมาทดสอบสมบัติพื้นฐานปรากฏว่าแก้วจากทั้งสองแห่งมีสมบัติเหมือนกันในระดับหนึ่ง” จึงสรุปได้ว่าอย่างน้อยที่สุดแก้วจากทั้งสองแห่งนี้มีโครงสร้างที่เหมือนกัน อย่างไรก็ตามมีคำถามตามมาว่า ทำไหมแก้วที่เป็นวัสดุที่ปราศจากโครงสร้างที่มีการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเป็นสายยาว (long range, periodicity) เหมือนของผลึกจึงสามารถมีโครงสร้างเฉพาะตัวได้

ดังนั้นในปี ค.ศ. 1932 ซาคาเรียสเซน (Zachariasen) จึงพัฒนาทฤษฎีเครือข่ายแบบสุ่มของโครงสร้างแก้วขึ้นมา ซึ่งเป็นการขยายความทฤษฎีของโกลสมอดซ์ ให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น โดยเขาพยายามอธิบายว่าไอออนที่มีเลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number) เฉพาะค่าเท่านั้นที่อาจจะมีความเหมาะสมในโครงสร้างของแก้ว โดยต่อมาวอร์เรน (Warren) (ค.ศ. 1933) ได้ใช้ผลการทดลองด้านการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) ช่วยเสริมทฤษฎีของซาคาเรียสเซน ซึ่งต่อมาได้มีการเรียกทฤษฎีนี้ว่า ทฤษฎีเครือข่ายขององซาคาเรียสเซนและวอร์เรน (The Zachariasen-Warren network theory) และได้กลายเป็นทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการอธิบายแบบจำลองของแก้วกันอย่างกว้างขวางที่สุดโดยซาคาเรียสเซนได้สรุปทฤษฎีของเขาเป็นหัวข้อสำคัญดังต่อไปนี้

1. แก้วซิลิกาที่เกิดหลังจากการทำให้ผลึกซิลิกาหลอมเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะมีโครงสร้างที่ตรวกันข้ามกับโครงสร้างบรรจุชิดสุด (Close-packed structure) ส่วนโครงสร้างบรรจุชิดนั้นจะเกิดขึ้นถ้าเกิดการตกผลึกซ้ำ (recrystallization) อีกครั้ง

2. เครือข่ายของแก้วซิลิกานี้ประกอบไปด้วยโครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้าที่มีการเชื่อมต่อที่มุมทั้งสี่ คล้ายกับโครงสร้างผลึกซิลิกา แต่โครงร่างข่ายนี้จะไม่ต่อเนื่องและสมมาตรเหมือนกับของผลึกซิลิกา

3. เครือข่ายของแก้วซิลิกาจะเชื่อมขยายต่อเนื่องไปเป็นแบบ 3 มิติ โดยที่พฤติกรรมเฉลี่ยของโครงสร้างเหมือนกันทุกทิศทาง ทำให้สมบัติต่างๆของแก้วมีความเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) ตัวอย่างของการเชื่อมโยงของ SiO_4 ทรงเหลี่ยมสี่หน้าในแก้วซิลิกาเกิดกับผลึกซิลิกาแสดงไว้ในรูป 2.1



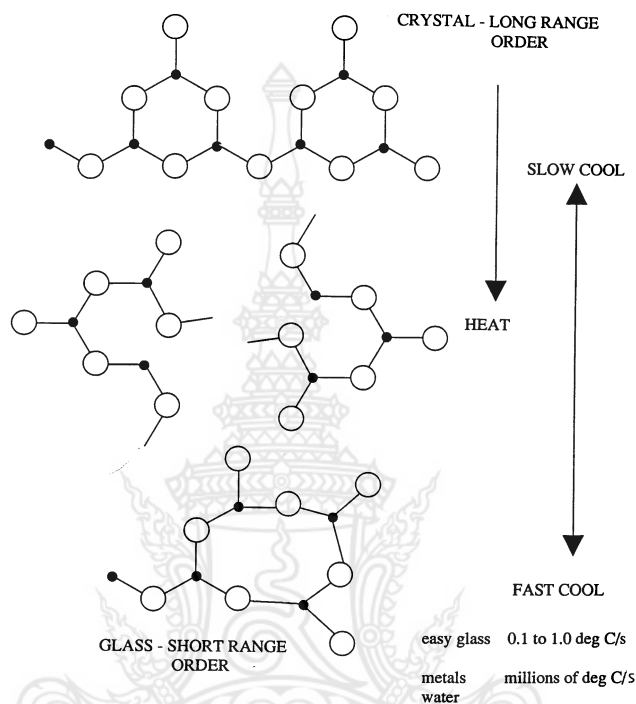
รูป 2.1 ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกโดย ● = ซิลิกอน (Si) และ ● = ออกซิเจน (O)[8]

ซาคาเรียสเซนยังยืนยันอีกว่าความสามารถในการเกิดเครือข่ายนี้มีความจำเป็นต่อการทำให้เกิดแก้ว และเขายังยังพิจารณาจากเพิ่มเติมเกี่ยวกับการจัดเรียงโครงสร้างที่จะทำให้เกิดเครือข่ายของแก้ว

2.1.1 คำนิยามของแก้ว (Definitions of Glasses)

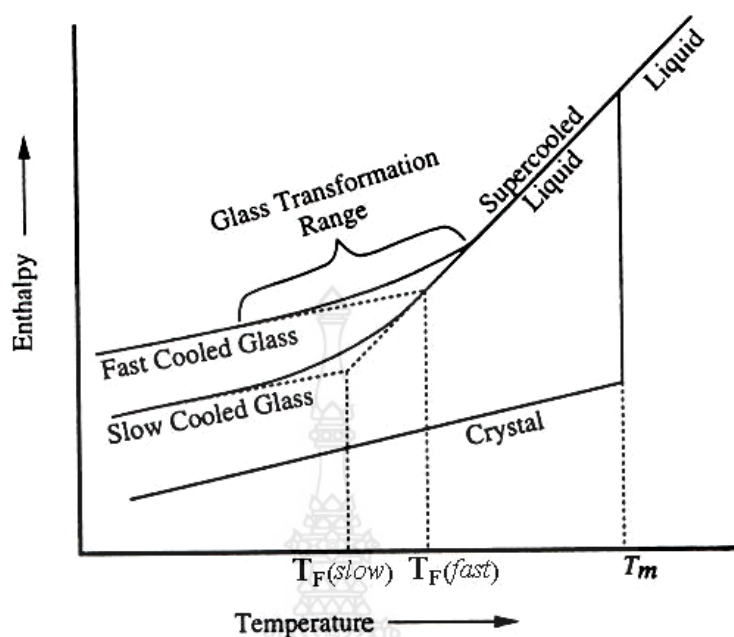
แก้ว คือ ไม่มีความเป็นผลึกเหมือนของแข็งทั่วไปและมีโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนของเหลว นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มจึงถือว่าแก้วเป็นอีกสถานะหนึ่งของสสาร นอกเหนือจาก ของเหลว (liquid) ของแข็ง (solid) และก๊าซ (gas) โดยที่นักวิทยาศาสตร์ผู้ที่มีความเชี่ยวชาญทางด้านแก้วหลายท่านพยายามให้คำนิยามที่เหมาะสมที่สุดของแก้ว ตามที่พื้นฐานความรู้ และมุมมองที่ต่างกัน จนสรุปคำนิยามของแก้วไว้เป็นมาตรฐานตาม ASTM standaras ไว้ว่า “แก้วคือผลิตภัณฑ์สารอนินทรีย์ของการหลอมซึ่งได้ถูกทำให้เย็นตัวลงเป็นภาวะแข็งแรงแรง (rigid condition) โดยไม่มีการตกผลึก” สมบัติที่สำคัญที่สุดของแก้วคือ ความโปร่งใส ซึ่งเกิดเนื่องจากแก้วปราศจากขอบของเกรน (grain boundary) และสิ่งแปลกปลอม (inclusion) ที่เป็นเหตุของการกระเจิงแสง (scattering of light) ซึ่งแตกต่างจากเซรามิก (ceramic) โดยทั่วไปที่มีขอบเกรนและรูพรุน ทำให้เซรามิกทึบแสง ถึงแม้ว่า

เซรามิกส่วนใหญ่จะมีความเป็นฉนวนเหมือนแก้วซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงาน (energy gap) ระหว่างแถบการนำ (conduction band) และแถบวาเลนซ์ (valence band) ที่มากกว่า 1 อิเล็กตรอนโวลต์เหมือนกันก็ตาม[5]



รูปที่ 2.2 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้วหลังจากการทำให้เย็นตัวลงแบบช้า (slow cool) และแบบเร็ว (fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน[5]

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าการทำให้เกิดแก้ว (glass formation) มาจากการหลอมของแข็งที่อุณหภูมิสูง และเมื่อทำให้เย็นตัวลง อะตอมของแก้วจะถูกล็อกให้อยู่ในสถานะแบบไม่มีระเบียบ หรือแบบสุ่มก่อนที่อะตอมจะเรียงตัวกันอย่างเป็นผลึกที่สมบูรณ์ (perfect crystal arrangement) นอกจากนี้ แก้วยังมีพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นกับเวลา คือ พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงเฟสของแก้ว (glass transformation) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอนทัลปีของการหลอมเหลวในการเกิดแก้ว[5]

บริเวณการแปลงเฟสของแก้วซึ่งเป็นช่วงของอุณหภูมิ ที่แตกต่างกับการตกผลึก (crystallization) ของของแข็งโดยทั่วไปที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิค่าใดค่าหนึ่งหรือที่เรียกกันว่าจุดหลอมเหลวของสารนั่นเอง (melting point, T_m) ตามความจริงแล้วการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีกับอุณหภูมิมิมีพฤติกรรมเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอุณหภูมิ ในกรณีนี้ทราบกันดีว่าของเหลวส่วนมาก เมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว นั่นก็คือ ทั้งเอนทัลปี และปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย ดังกราฟในรูป 1.3 เมื่อของเหลวถูกลดอุณหภูมิลง ค่าเอนทัลปีก็จะลดลงจนเมื่อมาถึงจุดหลอมเหลวก็จะเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ซึ่งถ้าของแข็งนั้นมีการตกผลึกการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือเอนทัลปีของสารก็จะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous change) ซึ่งจะเกิดขึ้น ณ จุด T_m นั่นเอง หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงก็จะเริ่มช้าลงอย่างคงที่จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงไปถึงอุณหภูมิห้อง (room temperature) และสารที่ได้ก็จะเป็นผลึกของแข็ง (crystalline solid) นั่นเอง อย่างไรก็ตาม ถ้าของเหลวถูกทำให้เย็นตัวลง โดยที่ไม่มีการตกผลึก ณ จุด T_m ของเหลวจะกลายเป็นของเหลวที่เย็นตัวแบบยิ่งยวด (supercooled liquid) ที่มีความหนืดสูง

(high viscosity) ซึ่ง ณ ที่นี้ การเปลี่ยนแปลงของเอลทัลปีหรือปริมาตรจะเป็นแบบต่อเนื่อง (continuous) จนกระทั่งเมื่อถึงช่วงที่เรียกว่า บริเวณการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (glass transformation range) การเปลี่ยนแปลงของเอลทัลปีเทียบกับอุณหภูมิจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ สังเกตได้จากความชันของกราฟเปลี่ยนไปจากช่วง supercooled liquid จนกระทั่งถึงอุณหภูมิห้อง สารที่ได้ก็เป็นของแข็งที่ไม่มีผลึก (non-crystalline solid) หรือเรียกกันอีกอย่างหนึ่งคือ แก้ว นั่นเอง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของการเกิดแก้วกับการเกิดผลึกจึงต่างกันโดยสิ้นเชิง จะเห็นได้จากการกลายเป็นของแข็งแบบแก้วมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงบริเวณการแปลงเฟสของแก้ว (glass transformation range) จะเป็นช่วงแบ่งระหว่างความเป็นของเหลวและของแข็งต่างกับผลึก ที่เกิดขึ้น ณ อุณหภูมิ T_m ของสาร ดังนั้น นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามนิยามอุณหภูมิกำหนดหนึ่ง ที่เรียกว่าอุณหภูมิฟิคทีฟ (Fictive temperature; T_f) ขึ้นมาเพื่อใช้แทนช่วงบริเวณการเปลี่ยนสถานะของแก้ว ซึ่งก็คือจุดตัดของเส้นที่ลากมาจากเส้นกราฟช่วงของเหลวที่เย็นตัวแบบยิ่งยวด และเส้นกราฟช่วงที่แก้วเริ่มเย็นตัวอย่างช้าๆ ซึ่ง ณ อุณหภูมินี้เอง โครงสร้างของแก้วจะเหมือนกับของเหลวที่อยู่ในภาวะสมดุล (equilibrium liquid) ดังนั้น โครงสร้างของแก้วก็น่าที่จะแตกต่างกันถึงแก้วชนิดเดียวกัน 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[5]

2.1.2 ในเรื่องของความสามารถในการทำให้เกิดแก้ว (glassforming ability)

และความเสถียร(glass stability) ของแก้วขึ้นอยู่กับเรื่องของอัตราการตกผลึก ถ้าแก้วมีความสามารถในการที่จะเกิดแก้วได้ดีจะต้องมีความต้านทานในการตกผลึกในขั้นตอนที่น้ำแก้วหลอมเย็นตัวลงได้ดี ในขณะที่ความเสถียรของแก้วนั้นขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อการตกผลึกของแก้วในขั้นตอนที่ให้ความร้อนกับแก้วจนหลอม ดังนั้น ความสามารถในการเกิดแก้วได้ดีจะมีความสำคัญต่อกระบวนการการหลอมแล้วในเบื้องต้น ส่วนความเสถียรของแก้วจะมีความสำคัญต่อกระบวนการขึ้นรูปใหม่ของแก้วที่มีอยู่แล้ว (reforming of an existing glass)

ทฤษฎีในปัจจุบันได้ตระหนักว่า วัสดุทุกชนิดสามารถทำให้เกิดแก้วได้ถ้าสามารถทำให้น้ำแก้วหลอมเย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็วเพียงพอที่จะหลีกเลี่ยงการจัดเรียงตัวซ้ำ (reorganization) ไปเป็นโครงสร้างของที่มีการจะเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบที่เกิดขึ้นในการตกผลึก (crystallization) นั่นเอง ดังนั้น คำถามของนักวิทยาศาสตร์ทางด้านแก้วในปัจจุบันจึงเปลี่ยนจาก ‘จะทำให้วัสดุเกิดเป็นแก้วได้อย่างไร (What will a material from a glass?)’ ไปเป็น ‘จะต้องทำให้อัตราการเย็นตัวเร็วเท่าไรจึงจะหลีกเลี่ยงการตกผลึกได้ (How fast a material must be cooled to avoid crystallization)’ ทำให้นำไปสู่ทฤษฎีใหม่เกี่ยวกับจลนพลศาสตร์ของการทำให้เกิดแก้ว

2.1.3 การใช้งานและสมบัติที่สำคัญของแก้ว (Uses of glass and important properties)

ความมุ่งหมายของการใช้งานของแก้วในตอนเริ่มแรกก็คือการนำไปตกแต่งตั้งแต่ การตกแต่งเครื่องประดับ เสื้อผ้า จนไปถึงการตกแต่งอาคารบ้านเรือน วัดวาอาราม ต่างๆ หลังจากนั้นก็นำมาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ต่างๆ อาทิ ขวด เครื่องแก้วในครัวเรือน ซึ่งก็เป็นวัตถุประสงค์ของการผลิตแก้วที่สำคัญที่สุดในปัจจุบัน รองลงมาคือการผลิตแก้วที่นำไปใช้เป็นหน้าต่างตามอาคาร สิ่งก่อสร้าง หรือยานพาหนะ และการผลิตแก้วที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือการผลิตหลอดไฟ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์นำแก้วไปใช้เป็นพิเศษอีกหลายอย่างซึ่งส่วนใหญ่แล้วเพิ่งจะได้รับการพัฒนาเมื่อไม่กี่สิบปีมานี้ ได้แก่ แก้วเซรามิก (glass-ceramic) แก้วที่ผ่านการทำให้ผิวแข็งแรง (surface-strengthened glass) เพื่อให้แก้วแข็งแรงมากยิ่งขึ้น เส้นใยแก้วนำแสง กระดาษจากซิลิกาหลอม แก้วอิเล็กทรอนิกส์สำหรับแอล

คาไลไนต์ไอออนและแก้วเลเซอร์เป็นต้น 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. *ความต้านทานต่อการกัดกร่อนทางเคมี (chemical corrosion resistance)* แก้วได้รับผลกระทบจากสารเคมีบางชนิดเท่านั้น และสามารถต้านทานต่อกรดในทางอุตสาหกรรมและกรดในอาหารได้
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

2.1.4 การหลอมและกระบวนการการผลิตแก้ว (Melting and processing of glasses)

2.1.4.1 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 ดินจากเปลือกโลกถ้าหลอมด้วยความร้อนที่เหมาะสมก็จะสามารถเย็นตัวกลายเป็นแก้วได้เช่นกัน 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 ซึ่งจะเป็นตัวช่วยให้ ฟอเมอร์หลอมในอุณหภูมิที่ต่ำลง ตัวอย่าง ถ้าใส่ฟลักซ์ลงไปทรายจะช่วยทำให้การหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงลดต่ำลงมาถึงประมาณ 1300 องศาเซลเซียส หรือ 2370 องศาฟาเรนไฮต์ได้ สารช่วยหลอมหรือฟลักซ์ที่สำคัญได้แก่ โซเดียม

คาร์บอเนต หรือเถ้าโซดา (soda ash) ก็ได้ และยังมี โพแทช (potash, K_2O) กับ ลิเทียมคาร์บอเนต (lithium carbonate, Li_2CO_3) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการใส่ฟลักซ์ลงไปแก้วมีข้อเสียคือจะทำให้แก้วไม่เสถียรทางเคมี กล่าวคือละลายน้ำได้ง่ายขึ้น หรือมีการตกผลึกที่ไม่ต้องการ

3. สารช่วยให้เสถียร (stabilizer) เป็นสารที่เมื่อผสมกับฟอเมอร์และฟลักซ์แล้วจะช่วยให้แก้วที่ผลิตได้ไม่ละลาย ไม่ร่วนและไม่แตกออกจากกัน ซึ่งสารชนิดดังกล่าวจะไปช่วยยึดให้โครงสร้างของแก้วคงอยู่ไม่บอบสลายและผสมเป็นเนื้อเดียว ซึ่งสารเหล่านี้ได้แก่ หินปูน ตะกั่วเหลือง (litharge) อะลูมินา (alumina) แมกนีเซีย (magnesia) แบเรียมคาร์บอเนต (barium carbonate, $BaCO_3$) สตรอนเชียมคาร์บอเนต (strontium carbonate, $SrCO_3$) สังกะสีออกไซด์ (zinc oxide, ZnO) และ เซอร์โคเนีย (Zirconia) เป็นต้น

2.2 ประเภทของแก้ว

แก้วจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.2.1 แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติ (god made glass)

แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติเรียกว่าออบซิเดียนเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของสารหลอมเหลวที่พ่นออกมาจากปล่องภูเขาไฟ (magma) มีสีเทาหรือสีม่วงดำ ต่อมาในยุคหินที่ มนุษย์เริ่มรู้จักใช้ความร้อนจากไฟในการหุงต้ม กรวดและทรายบริเวณเชิงตะกอนของเตาไฟที่ หุงต้มเมื่อได้รับความร้อนสูงจะเกิดการหลอมละลายบริเวณผิวจนกระทั่งมีลักษณะคล้ายลูกปัด แก้วก้อนกลม ๆ (glass bead) โดยแก้วธรรมชาติที่เกิดจากการหลอมตัวของทรายหรือทราย แก้วซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีคือซิลิกอนไดออกไซด์ นอกจากนี้แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติยังเกิด จากการหลอมตัวของซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในลักษณะของหินหรือแร่ เช่นหินเขี้ยวหนุमान (quartz) ซึ่งมีจุดหลอมสูงมากกว่าทราย ที่หากเกิดการหลอมละลายแล้วจะเรียกว่าซิลิกาหลอม (fused silica)

2.2.2 แก้วที่มนุษย์สร้างขึ้น (man made glass)

แก้วที่มนุษย์คิดประดิษฐ์ขึ้นแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ตามองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะการใช้งานดังต่อไปนี้ประเภทของแก้วที่แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมี แบ่งได้เป็น 7 ชนิด ดังนี้คือ

2.2.2.1 แก้วซิลิกาหลอมเหลว (silica glass หรือ fused silica หรือ vitreous silica) หรือแก้วควอตซ์ (quartz) ได้จากการหลอมเศษแก้ว ทรายแก้วหรือพวกหินควอตซ์โดยไม่เติมสารประกอบอื่น จึงต้องทำการหลอมที่อุณหภูมิสูงถึง 1,710 องศาเซลเซียส ขณะหลอม จะได้น้ำแก้วที่มีความหนืดสูงจึงเกิดฟองอากาศมาก แข็งตัวเร็ว ทำให้ขึ้นรูปยาก จึงนิยมหลอม 10 ในสุญญากาศ สมบัติของซิลิกาหลอมคือมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนต่อสารเคมีและทนความร้อนได้ดี ยอมให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตส่งผ่านได้ดี (โปร่งใส) จึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้ในห้องปฏิบัติการ (laboratory) ใช้งานทางด้านไฟฟ้าและใช้งานเกี่ยวกับด้านแสง แต่ แก้วชนิดนี้จะมีราคาแพง

2.2.2.2 แก้วซิลิกาหลอมเหลวร้อยละ 96 (96% silica glass) มีสมบัติเกือบจะเหมือนแก้วประเภทซิลิกาหลอม แต่มีจุดหลอมต่ำกว่า มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่าเพราะมีสารช่วยหลอมละลาย (fluxing oxide) และสารอื่นอีกประมาณร้อยละ 4 เพื่อลดจุดหลอมละลายให้ต่ำลงและสะดวกในการขึ้นรูป แก้วชนิดนี้อาจเรียกว่าไวคอร์ (vycor) นิยมใช้ทำเครื่องใช้ในห้องทดลองพวกหลอดแก้ว (tubes) หรือถ้วแก้ว (rod)

2.2.2.3 แก้วโซดาไลม์ (soda lime glass) เป็นแก้วชนิดที่ใช้มากที่สุด แก้วชนิด นี้ถูกให้ความหมายไว้ว่าเป็นแก้วที่ทำมาจากไลม์(lime) โซดา (soda) และทราายเป็นส่วนผสม หลักโดยใช้โซดาหรือโพแทส (potash) ผสมเป็นสารช่วยหลอมละลายเพื่อลดจุดหลอมให้ต่ำลง ลดความหนืดให้สะดวกในการขึ้นรูป นอกจากนี้ยังมีไลม์ (calcium oxide, CaO) แมกนีเซียม ออกไซด์ (magnesium oxide, MgO) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (aluminium oxide, Al₂O₃) ปน อยู่เล็กน้อย เพื่อให้แก้วมีความคงทนต่อสารเคมี(กระทรวงอุตสาหกรรม, 2527, หน้า 1) แก้ว ชนิดโซดาไลม์นี้ถ้าขึ้นรูปให้บาง จะไม่สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยกะทันหันได้ (thermal shock) นิยมใช้ทำขวด

กระจกหน้าต่าง กระจกแผ่น ถ้วยแก้ว แก้วกันกระสุน (bullet proof glass) แก้วกระจกรถยนต์ เป็นต้น

2.2.2.4 แก้วเลดซิลิเกต (lead alkali silicate glass) แก้วชนิดนี้ได้จากการแทนแคลเซียมออกไซด์ด้วยตะกั่ว (lead oxide, PbO) ตามปกติแคลเซียมออกไซด์จะใช้ได้ไม่เกิน ร้อยละ 15 แต่ถ้าใช้ตะกั่วแทน สามารถใช้ได้ถึงร้อยละ 80 บางครั้งใส่ตะกั่วถึงร้อยละ 92 แก้ว จึงมีน้ำหนักมาก โดยตะกั่วทำหน้าที่เป็นตัวช่วยหลอมละลายทำให้มีจุดหลอมต่ำกว่าแก้วโซดาไลม์ และตะกั่วช่วยให้แก้วมีความแวววาวใสสวยงาม แต่ความหนาแน่น การหักเหของแสง ความมันเงาและราคาสูงกว่า จึงนิยมใช้ทำหลอดแก้วเพื่อการให้แสงสว่าง และยังนิยมนำไป ทำผลิตภัณฑ์ประเภทงานศิลปะ (art ware) และแก้วเจียรระโน รวมทั้งนิยมนำไปใช้ผลิต 11 อุปกรณ์วิทยุ เรดาร์ (radar) และเครื่องหลอดโทรทัศน์ หลอดวิทยุต่าง ๆ เป็นต้น เนื่องจากมี ความต้านทานทางไฟฟ้าดี

2.2.2.5 แก้วโบโรซิลิเกต (borosilicate glass) แก้วชนิดนี้มีความหมายที่กล่าวไว้ตามมาตรฐานอุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2527, หน้า 1) ว่าแก้วโบโรซิลิเกตเป็น แก้วที่มีโบรอนไตรออกไซด์ (boron trioxide, B₂O₃) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือ นิยมเรียกว่า แก้วไพเรก (pyrex) ได้แก่ แก้วทนไฟ แก้วชนิดนี้ใช้โบรอนออกไซด์เป็นตัวช่วยหลอม ละลาย โดยโบรอนจะลดความหนืดของแก้วลงแต่ทำได้น้อยกว่าโซดา การขึ้นรูปค่อนข้าง ลำบากแต่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหันได้ดี ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ นิยมใช้ทำภาชนะหุงต้ม (cooking ware) ชนิดที่สัมผัสความร้อนโดยตรง ใช้ทำภาชนะที่ใช้ในห้องทดลอง และทำเลนส์ของกล้องดูดาว

2.2.2.6 แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate glass) ได้แก่ แก้วที่มี อะลูมิเนียมออกไซด์มากกว่าร้อยละ 20 มีแคลเซียมและแมกนีเซียมปริมาณน้อย ทำให้การหลอมยากและการขยายตัวต่ำเมื่อได้รับความร้อนจึงเหมาะที่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์ประเภทที่ต้อง สัมผัสกับอุณหภูมิสูง (high temperature ware) เช่น ภาชนะหุงต้ม

2.2.2.7 แก้วสี (color glass) ได้แก่ แก้วที่มีสีในเนื้อแก้ว ทำได้โดยผสมสารให้สี ที่เป็นออกไซด์ของโลหะลงไปประมาณร้อยละ 1 – 4 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสีที่ต้องการ

2.3 ประเภทของแก้วที่แบ่งตามลักษณะการใช้งาน

2.3.1 แก้วที่ใช้ในวงการวิทยาศาสตร์ ได้แก่ หลอดแก้วทดลองต่าง ๆ (tubes) ปริซึม (prism) และบีกเกอร์ (beaker) เป็นต้น

2.3.2 แก้วที่ใช้ในการให้แสงสว่าง ใช้ทำหลอดไฟที่ให้แสงสว่าง เช่น หลอด ฟลูออเรสเซนต์ (fluorescent) แก้วประเภทนี้ยังใช้ทำเลนส์ของแว่นตา แว่นขยาย กล้องถ่ายรูป กล้องจุลทรรศน์ กล้องส่องทางไกล เป็นต้น

2.3.3 แก้วที่ใช้ในวงการก่อสร้าง เช่น แก้วบุเพดาน (เนื่องจากสมบัติด้านการ ฉนวนกันความร้อน) เส้นใยแก้ว (fiber glass) เสื่อกันความร้อนและเสื่อกันไฟ

2.3.4 แก้วสะเทิน (neutral glass) หมายถึงแก้วที่ไม่ทำปฏิกิริยากับกรดหรือ ด่าง แก้วพวกนี้ได้แก่ ขวดใส่ยา ขวดใส่น้ำเกลือ เป็นต้น

2.3.5 แก้วกระจกรถยนต์(safety glass) หรือเรียกทั่วไปว่าแก้วนิรภัย มีสมบัติ เด่นของแก้วชนิดนี้คือเมื่อแตกจะไม่มีลักษณะแหลมคม (angular fragment) ทั้งนี้เพราะขณะ ขึ้นรูป ใช้ลมเป่าให้ผิวด้านนอกของแผ่นแก้วเย็นและหดตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการกระทบที่ผิว จึงเกิดการ แตกช้าเป็นฝอย แก้วที่นำมาทำกระจกรถยนต์นี้เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์

2.3.6 แก้วกันกระสุน (bullet proof glass) เป็นแก้วชนิดโซดาไลม์ ที่ภายหลัง การขึ้นรูปให้เป็นแผ่นบาง ๆ (sheet) หลาย ๆ แผ่น แล้วใช้แผ่นพลาสติก (laminated) แทรกใส่ ระหว่างชั้นหรือแผ่นแก้วและประกบกันจนกระทั่งได้ความหนาตามความต้องการ แก้วชนิดนี้จะ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นจนสามารถกันกระสุนปืนทะลุผ่านได้ โดยกรณีที่ถูกยิง กระสุนปืนจะ แฉกไม่สามารถ ทะลุกระจกเข้าไปได้และหากส่วนที่เป็นแก้วหรือกระจกแตก จะมีลักษณะร้าว เป็นแผ่นไม่หลุดแตก กระจายเพราะมีแผ่นพลาสติกเชื่อมยึดเศษแก้วอยู่

2.3.7 ใยแก้ว ทำได้โดยการดึงแก้วเป็นเส้นใยแล้วนำมาอัดขึ้นรูป ใยแก้วจะมี ความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กกล้าแต่มีความเบาและอ่อนนุ่มเหมือนขนสัตว์ อีกทั้งสามารถที่จะ โค้ง งอได้

สามารถดึงให้เป็นเส้นเล็กได้ถึง 1/300 ของความหนาของเส้นผม ทนต่ออุณหภูมิสูงได้ สมบัติของใยแก้วคือเก็บเสียงและกันความร้อนได้ดี นอกจากนั้นยังนิยมนำแผ่นใยแก้วไปต่อ เป็นโครงเรือได้เพราะมีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง

2.3.8 แก้วในวงการศิลปะ ผลิตภัณฑ์แก้วประเภทนี้ได้แก่แก้วซึ่งมีความไวต่อ แสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) โดยสามารถจะอัดภาพถ่ายลงไปบนพื้นผิวของแก้ว ได้(photo sensitive glass) นอกจากนี้แก้วที่ใช้ในวงการศิลปะยังรวมถึงแก้วสีตลอดจนเครื่องประดับ ต่าง ๆ

2.3.9 แก้วที่เป็นเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ได้แก่ โคมไฟและภาชนะเครื่องแก้วต่าง ๆ เพราะสมบัติของแก้วที่แม้จะเป็นตัวนำความร้อนได้ไม่ดี แต่สามารถดูดความร้อนได้ ดี ฉะนั้นหม้อแก้วจึงสามารถดูดและกักเก็บความร้อนไว้ได้นานกว่าหม้อโลหะ

2.3.10 แก้วในงานอิเล็กทรอนิกส์และงานด้านการโทรคมนาคม แก้วประเภท นี้ได้แก่ หลอดโทรทัศน์ หลอดสุญญากาศ เป็นต้น 13

2.3.11 แก้วในวงการอวกาศ เช่นแก้วที่ใช้ทำหน้าต่างจรวด เครื่องบิน เป็นต้น แก้วประกอบด้วยซิลิเกตที่ไม่เป็นผลึก (non crystalline silicates) กับออกไซด์ของธาตุ ต่าง ๆ เช่น แคลเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์ โพแทสเซียมออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และโบรอนออกไซด์ เป็นต้น โดยออกไซด์ของธาตุเหล่านี้มีผลทำให้แก้วแสดงสมบัติแตกต่าง กันไป ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของออกไซด์ ดังแสดงองค์ประกอบและคุณลักษณะของแก้ว ชนิดต่าง ๆ

2.4 โครงสร้างแก้ว

วัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของการทำแก้ว คือ Silicon dioxide (SiO_2) ซึ่ง SiO_2 พบได้ในธรรมชาติในรูปแบบของผลึกบริสุทธิ์ เช่น Quartz และ Cristobalite และที่เป็นสารประกอบของแร่ silicate หรือทรายทุกชนิด จะประกอบด้วย SiO_2 ในอัตราส่วนที่สูง ผลึกของ SiO_2 มีจุดหลอมเหลวประมาณ $1700\text{ }^\circ\text{C}$ ดังนั้นแก้ว SiO_2 บริสุทธิ์จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ $1700\text{ }^\circ\text{C}$

แก้วเป็นวัสดุเซรามิกส์ประเภทหนึ่งที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะแก้วมีสมบัติเฉพาะตัวในเรื่องของความโปร่งใส ความแข็งแกร่ง และความมันแวววาว ซึ่งเป็นสมบัติที่วัสดุอื่นทดแทนไม่ได้ อีกทั้งในปัจจุบันมนุษย์สามารถสร้างสรรค์และ ผลิตแก้วได้อย่างหลากหลายลักษณะ ไม่ว่าจะเป็นแท่งแก้วที่บิดัน แผ่นแก้วที่บางเฉียบหรือเส้นใยแก้วที่ละเอียดอ่อน ดังนั้นการได้ศึกษาถึงวิวัฒนาการของแก้ว สมบัติและประเภทของแก้ว รวมถึงขั้นตอนการผลิตแก้ว ลักษณะต่าง ๆ ที่จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในวัสดุประเภทนี้มากขึ้น อันจะนำมาซึ่งการเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสมในชีวิตประจำวัน รวมทั้งเพื่อการปรับปรุง พัฒนา และสร้างสรรค์ผลิตภัณฑ์แก้วต่อไป

ความหมายของแก้ว แก้วคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหลอมอินทรีย์สารอันได้แก่ซิลิกา (silica) กับสารโลหะ ออกไซด์แล้วทำให้เย็นตัวจนกระทั่งแข็งโดยไม่มีการตกผลึก (crystallization) ส่วนประกอบทาง เคมีของแก้วประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (silicon dioxide, SiO_2) โบรอนออกไซด์ (boron oxide, B_2O_3) โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate, Na_2CO_3) แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate, CaCO_3) และ แมกนีเซียมคาร์บอเนต (magnesium carbonate, MgCO_3) มีลักษณะโปร่งแสงและมีความเปราะ หากพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพแล้ว แก้วจะหมายถึง วัสดุที่มีความแข็ง (hard) โปร่งใส (transparent) เปราะ (brittle) มีความแวววาว (relative) มีจุดหลอมละลายสูง (high softening point) ไม่ละลายในน้ำและในสารละลายใด ๆ (insoluble in water and organic solvents) อีกทั้งไม่ติดไฟ (non inflammable)

ซึ่งแก้วมีสมบัติดังต่อไปนี้

1. แก้วมีโครงสร้างทางเคมีไม่แน่นอน แต่แก้วจะมียุคประกอบทางเคมีคล้ายกัน คือ ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตเป็นหลัก
2. มีความแข็งแต่เปราะทำให้แตกหักง่าย
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องไม่ดี แต่ที่อุณหภูมิสูงจะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
4. มีลักษณะโปร่งใส (transparency)
5. สามารถทำให้หลอมละลายได้ด้วยความร้อน
6. เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสมบัติของแก้วจะเปลี่ยนไปทั้งลักษณะทางกายภาพ และสมบัติ ทางเคมี
7. มีช่วงการหลอมละลายกว้าง
8. สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงนั้นจะสามารถสังเกตเห็นได้

แก้วเป็นวัสดุที่ทำจากทรายแก้วเป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนั้นเป็นโลหะออกไซด์ ต่าง ๆ เช่น เหล็กออกไซด์ (ferric oxide) ฟอสเฟอริกออกไซด์ (phosphoric oxide) เป็นต้น โดยที่แก้วมีส่วนประกอบทางเคมีไม่แน่นอน แต่ส่วนผสมจะต้องอยู่ในขอบเขตจำกัด หากส่วนผสมคลาดเคลื่อนไปจากที่กำหนดไว้จะทำให้แก้วไม่หลอมละลายในอุณหภูมิที่กำหนดหรือเกิด ความยุ่งยากอื่น ๆ ขึ้น เช่น เกิดตำหนิ สมบัติผิดไปจากความต้องการ เป็นต้น บรรดาแก้วหลากหลายชนิดที่มนุษย์ผลิตขึ้นสามารถผลิตแก้วให้เบาเหมือนไม้คอร์ก (cork) หรือแก้วมีน้ำหนักมากเหมือนโลหะพวกเหล็ก (iron) แก้วที่มีความแข็งเหมือนเหล็กกล้า (steel) แก้วที่มีความเปราะเหมือนเปลือกไข่ให้อ่อนนุ่มเหมือนปุ๋ยฝ้ายหรือให้แข็งเหมือนเพชร พลอย ทั้งนี้เนื่องจากแก้วสามารถควบคุมส่วนผสมและวิธีการผลิตให้มีสมบัติตามต้องการได้จึง มีการนำแก้วไปใช้ในงานต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นงานทางด้านวิทยาศาสตร์ ใช้ในด้านอุตสาหกรรม สถาปัตยกรรม โทรคมนาคม งานวิศวกรรม เป็นของใช้ภายในบ้านเรือนและชีวิตประจำวัน หรือแม้กระทั่งเครื่องประดับขนาดเล็ก

2.5 แกลบ

แกลบ เป็นที่รู้จักกันมานานหลายพันปี แกลบ ก็คือ เปลือกข้าวนั่นเอง ในสมัยก่อน ตามโรงสี ข้าวมักจะมีปัญหาในเรื่องการจัดเก็บ หรือการ กำจัดเปลือกข้าวทางโรงสีข้าวจะต้องเสียค่าใช้จ่ายเอง ในการจัดเก็บ กำจัดเปลือกข้าว ไม่ว่าจะนำไปเผาทิ้งเพื่อลดปริมาณแกลบลง แต่ในปัจจุบันพบว่า สามารถใช้ประโยชน์จากแกลบได้หลายทาง เมื่อพิจารณาแกลบให้ชัดขึ้น

โครงสร้างนี้เกิดจากส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์จำพวกเซลลูโลส ลิกนินและ ส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ซึ่งมี ซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก คุณสมบัติเด่นของแกลบคือความ

พรุนของแกลบ หรือ ซิลิกาในแกลบที่มีขนาดระดับนาโนเมตร(เท่ากับหนึ่งในสิบล้านส่วนของ มิลลิเมตร) และถ้าสามารถควบคุมการเผาให้เหมาะสม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารที่มีค่าเป็นอย่างมาก นั่นก็คือ สามารถนำแกลบและขี้เถ้าแกลบมาแปรรูปเป็นสารประกอบซิลิกอนอื่นๆได้อีก เช่น ซิลิกอน (Si) , ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) , ซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ,ซิลิโคน เป็นต้นสำหรับการวิจัยนี้จึง มีการนำประโยชน์จากขี้เถ้าแกลบมาทำประโยชน์เป็นสารตั้งต้นในการทำแก้วคริสตัลล์

2.6 แก้วคริสตัล

“แก้วคริสตัล” (crystal glass) เป็นแก้วที่มีออกไซด์ของตะกั่ว (lead oxide, PbO) อยู่ใน ปริมาณที่สูง จึงเรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่า *แก้วตะกั่ว* (lead glasses) [5] เนื่องจากตะกั่วเป็นธาตุโลหะหนักจึงทำให้แก้วชนิดนี้มีความหนาแน่นสูงเมื่อเทียบกับแก้วที่ใช้กันโดยทั่วไป เช่นแก้วโซดาไลม์ (soda-lime glass) ซึ่งเมื่อแก้วมีความหนาแน่นสูงก็ทำให้มีค่าดัชนีหักเหสูง (high refractive index) ด้วย จึงเป็นแก้วที่มีความโปร่งใสและเป็นประกายแวววับเป็นพิเศษ ซึ่งสมบัติของความเป็นประกายแวววับนี้ขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของแก้ว และยังแก้วมีความเป็นประกายแวววับมากเท่าใดก็จะมีค่า ดรรชนีหักเหสูงมากเท่านั้น แก้วที่มีค่าดัชนีหักเหสูงส่วนใหญ่มีส่วนผสมของตะกั่วออกไซด์ซึ่ง สามารถนำไปทดแทนโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซึ่งเป็นตัวช่วยหลอมในแก้วโซดาทั่วไป โดยปกติแล้ว

แก้วคริสตัลจะมีส่วนผสมแก้วออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 24 ถึง 32 โดยน้ำหนัก และยังมีโปแตสเซียม ออกไซด์ (K_2O) และซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักอีกด้วยในปริมาณร้อยละ 12 และ 59 โดยน้ำหนักตามลำดับ นักวิทยาศาสตร์หลายท่านได้ทำการศึกษาแก้วตะกั่วในเชิงลึกในเรื่องของโครงสร้างของแก้วตะกั่ว ทำให้ทราบว่าตะกั่วทำให้โครงสร้างของแก้วมีการเกาะตัวกันแน่นยิ่งขึ้นทำให้คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) อาทิ ความหนาแน่น (density) ค่าดัชนีหักเห และการกระจายแสงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความหนืดของน้ำแก้วหลอมก็ลดลง มีผลทำให้การหลอมตัวของน้ำแก้วหลอมเกิดได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสารตะกั่วเป็นสารช่วยหลอมที่ดีตั้งที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลผลิตที่ได้จากแก้วตะกั่วจึงมีแรงตึงผิว (surface tension) ต่ำ จึงทำให้สามารถตัดหรือขึ้นรูปได้ง่าย นอกจากนี้ตะกั่วยังช่วยทำให้ผิวของแก้วเรียบไม่แตกง่ายอีกด้วย

แก้วคริสตัลเป็นแก้วที่มีส่วนผสมค่อนข้างพิเศษ กล่าวคือ มีสารประกอบตะกั่วในปริมาณที่สูง ซึ่งตามมาตรฐานประเทศในกลุ่มการค้ายุโรป (European Common Market Country) ได้ตกลงและกำหนดว่า จะต้องมีความหนาแน่นอย่างน้อยที่สุด 2.45 กรัมต่อลูกบาศก์ แล้วสารที่ทำให้เกิดสีในแก้ว คือ สาร Cu ซึ่งให้เฉดสีฟ้า

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุทางการเกษตรที่ทำได้ง่าย ราคาถูก และถูกใช้ในการเกษตรเป็นเวลานาน จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบภายในทั้งองค์ประกอบทางเคมี ทางกายภาพ ทางกล เพื่อที่จะพัฒนาแก้วให้เป็นวัสดุทางเลือก และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ที่ผ่านมา

ในปี 2003 Tzong-Horng Liou [1] ได้ทำการศึกษาการเตรียมและศึกษาสมบัติของซิลิกานาโนที่มีโครงสร้างจากแก้ว ในปัจจุบันวัสดุซิลิกาแบบนาโนมีการเตรียมโดยใช้วิธีการต่างๆรวมทั้งปฏิกิริยาระหว่างไอ – โซลเจลและเทคนิคการสลายตัวด้วยความร้อนอย่างไรก็ตาม ในทางตรงกันข้ามแก้วเป็นผลพลอยได้ทางการเกษตรซึ่งส่วนประกอบสำคัญคือวัสดุอินทรีย์และซิลิคอนไฮไดรด์

เนื่องจากอะตอมของซิลิคอนในแก้วได้กระจายตัวโดยหน่วยโมเลกุลอย่างเป็นธรรมชาติและสม่ำเสมอโดยมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมากมีความบริสุทธิ์สูงและผงซิลิกาในพื้นที่ผิวสามารถเตรียมได้ภายใต้สภาวะที่ควบคุมได้ นอกจากนี้ปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเทคนิคการทดลองแบบปกติ กระบวนการนี้มีประโยชน์ไม่เพียง แต่ในการผลิตผงซิลิกาที่มีค่า แต่ยังช่วยลดปัญหาการกำจัดและมลภาวะด้วย

ในปี 2015 Lala. [2] และคณะผู้วิจัย ได้มีการศึกษาลักษณะทางกายภาพเคมีความร้อนแร่ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ RHA สามประเภทที่ผลิตได้ตามวิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี คือ เตาตะแกรงเตียงฟลูอิดไอซ์และการเผาไหม้ที่ระงับ / entrained ผลยืนยันได้ระบุว่าสภาวะการเผาไหม้กำหนดลักษณะของแต่ละ RHA แม้ว่าวัตถุดิบจะใช้เป็นหลัก $m^2 g^{-1}$, SiO_2 (ระหว่าง 90.02 ถึง 96.71 wt%) ปริมาณคาร์บอนทั้งหมด (ระหว่าง 2.18 ถึง 8.63 wt%) และโครงสร้างของซิลิกาที่ผลิต (ไม่มีรูปร่างสมบูรณ์หรือเป็นผลึกบางส่วน)

ในปี 2002 Della [3] และคณะผู้วิจัย ได้มีการศึกษาเพื่อพัฒนาขั้นตอนในการหาซิลิกาที่ใช้ งานได้และมีลักษณะเฉพาะที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจากซีเมนต์แก้ว ปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นเมื่อเผาวัสดุคาร์บอนในช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ต่างกัน ผงซิลิกา 95% สามารถผลิตได้หลังจากผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พื้นที่ผิวเฉพาะของอนุภาคเพิ่มขึ้นหลังจากการบดเปียกจาก 54 ถึง 81 m^2/g

ในส่วนคริสตัลได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องถึงจะเห็นได้ว่างานวิจัย ในปี 2553 จักรพงษ์ แก้วขาว เป็นการนำเอาซีเมนต์เหลือใช้ทางการเกษตรและระบบพลังงานชีวมวลมาเป็นส่วน ประกอบในการหลอมแก้ว ได้แก่ แก้ว, ฟางข้าว, ช้างข้าวโพด, ทะลายปาล์ม, ใบและก้านปาล์ม, ลำต้นมันสำปะหลัง, ไม้ยูคาลิปตัส, ไม้ยางพารา, ชานอ้อย, ยอดและใบอ้อย, กะลามะพร้าว อย่างน้อย 11 ชนิด โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของซีเมนต์และโครงสร้างของซีเมนต์ทุก ทำการทดลองหลอมเนื้อแก้วเพื่อคุณสมบัติของแก้วที่ได้จากซีเมนต์ชนิดต่างๆ พบว่าซีเมนต์ที่สามารถนำมาเป็นองค์ประกอบในการหลอมแก้วได้ คือ แก้ว, ฟางข้าว, ใบและก้านปาล์ม และยอดและใบอ้อย จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของแก้วที่เตรียมขึ้นดังต่อไปนี้ ความหนาแน่น, การส่งผ่านหรือการดูดกลืนช่วง

uv-visible, ดรรชนีหักเห, ความหนาแน่น และความแข็ง หลังจากนั้นทำการออกแบบสูตรแก้วจากองค์ความรู้ที่ได้เพื่อใช้เป็นอัญมณี เทียมโดยวัดคุณสมบัติดังต่อไปนี้ ความหนาแน่น ดรรชนีหักเห การดูดกลืนหรือการส่งผ่านแสง สี และความแข็ง และสุดท้ายทดลองนำไปใช้จริงในแง่ของผลิตภัณฑ์ เช่น เข้าตัวเรือน ชุบ เข้าแบบ เจาะ เป็นต้น

ในปี 2015 [4] อโนชา หมั่นภักดี ได้มีการศึกษาผลิตแก้วคริสตัลสีแดงโดยการใช้อุณหภูมิของค่าเป็นส่วนประกอบและมีการ เติมรีดิวซึ่งเอเจนต์ซึ่งคือ ดีบุกออกไซด์ (SnO) , อาร์เซนิกออกไซด์ (As_2O_5) , แอนติโมนีออกไซด์ (Sb_2O_5) และ ซีเรียมออกไซด์ (Ce_2O_4) ในปริมาณตั้งแต่ 1-15 เท่าของปริมาณทองคำ 0.05wt% เพื่อเปรียบเทียบบริดิวซึ่งเอเจนต์ที่ใช้และหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก้วสีแดงที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งกระทำได้พบว่าแก้วคริสตัลสีแดงที่มีการเติมรีดิวซึ่งเอเจนต์ทั้ง 4 ชนิดที่กล่าวมานั้นมีค่าดัชนีหักเห อยู่ประมาณ 1.57-1.58 และ มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 3.261-3.335 สำหรับกรณีการเทียบสีจาก GIA Color Chart นั้นพบว่าแก้วคริสตัลที่มีการเติมรีดิวซึ่งเอเจนต์คือ SnO ในการทดลอง แต่หากใส่ SnO ในปริมาณที่มากกว่าหรือเท่ากับ 6.25 เท่าของปริมาณทองคำ 0.05wt% จะทำให้มีสีแดงที่มีโทนมืดมาก และจากการทดสอบความแข็งพบว่า ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์โดยเฉลี่ยนั้นอยู่ในช่วง 470.32 - 492.24 MPa

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 ถังพลาสติกสำหรับผสมผงสารเคมี
- 3.2.5 แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil)
- 3.2.6 เต้าอบไฟฟ้าอุณหภูมิ 450°C
- 3.2.7 เต้าเผาไฟฟ้า (furnace) ทนอุณหภูมิสูงถึง 1700°C
- 3.2.8 แผงให้ความร้อน (hot plate)
- 3.2.9 เวอร์เนียร์คาลิเปอร์ระบบดิจิทัล ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร

- 3.2.10 กระดาษทรายเบอร์ 360,600, 1000 และ 1200
- 3.2.11 ผงขัดเพชรคริสตัลไลน์ขนาด 3ไมโครเมตร polycrystalline Diamond 3 μm
- 3.2.12 เครื่องตัดของยี่ห้อ BUEHLER รุ่น IsoMet™ 5000 Linear Precision Saw
- 3.2.13 เครื่องขัดของยี่ห้อ 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 มาล้างทำความสะอาดใน บีกเกอร์ขนาดใหญ่ นำไปอบให้แห้ง
- 3.4.1.2 ใส่แกลบในถ้วย crucible ขนาดใหญ่ แล้วไปเผาด้วยอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที
- 3.4.1.3 นำซีเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส มาทำการเผาอีกครั้งในเงื่อนไขช่วงอุณหภูมิ 1000, 1100, และ 1200 องศาเซลเซียส
- 3.4.1.4 ใส่ซีเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาครั้งที่ 1 ลงถ้วย crucible ขนาดใหญ่ แล้วไปเผาครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 1000, 1100, และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงด้วยอัตราการขึ้น-ลงของอุณหภูมิ คือ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที

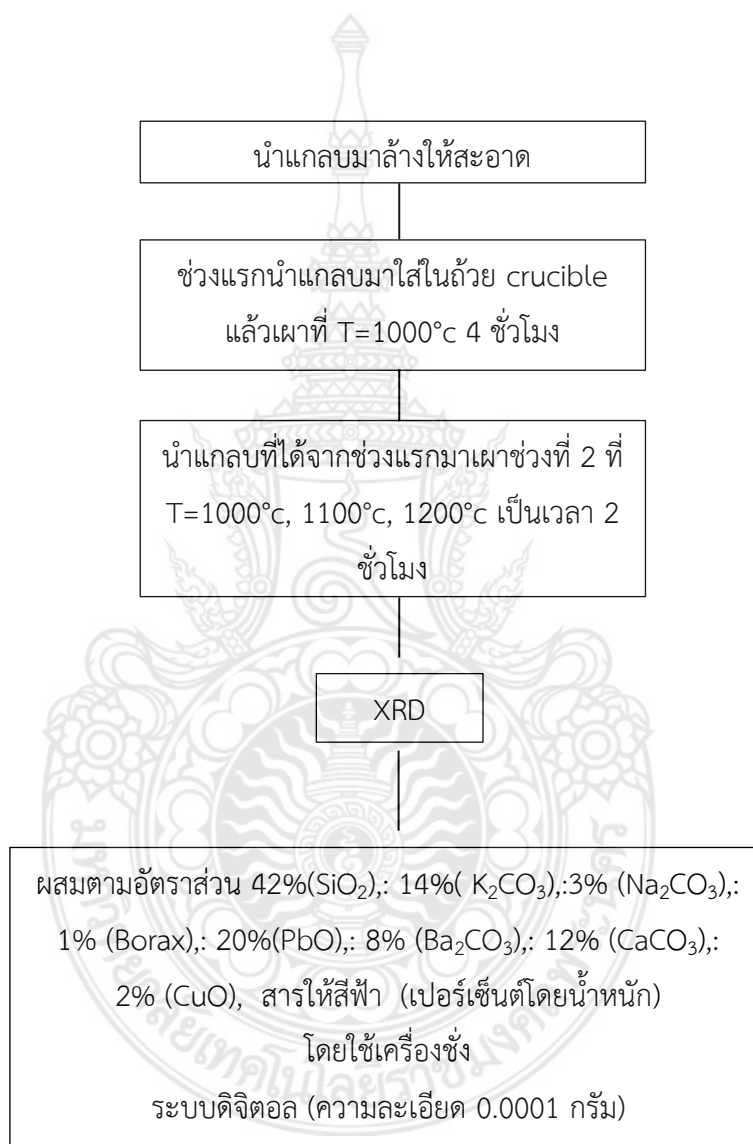
- 3.4.1.5 จากนั้นเราจะได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุดที่ผ่านการเผา 2 ครั้ง ในเงื่อนไขเผาครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 1000 เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเผาครั้งที่ 2 ในเงื่อนไขที่ 1000, 1100, และ 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตามลำดับ
- 3.4.1.6 จากนั้นเราก็ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์มากที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่ต่างก็นำมาเป็นส่วนผสมในการทำการคริสตัลลีสต่อ
- 3.4.1.7 นำแกลบที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ มาวิเคราะห์เฟสด้วยวิธีการ XRD, XRF

3.4.2 การเตรียมแก้ว

- นำผงแกลบที่บริสุทธิ์มาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก้วคริสตัลลีส นำสารเคมีทั้งหมดมาผสมตามอัตราส่วน 42% (SiO_2), 14% (K_2CO_3), 3% (Na_2CO_3), 1% (Borax), 20% (PbO), 8% (Ba_2CO_3), 12% (CaCO_3), 2% (CuO), สารให้สีฟ้า (โดยน้ำหนักรวม) รวมเป็นจำนวน 50 กรัม โดยใช้เครื่องชั่งระบบดิจิทัล (ความละเอียด 0.0001 กรัม) โดยแต่ละครั้งใช้แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ในการถ่วงสารทุกครั้ง
- 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 $5^\circ\text{C}/\text{m}$
- นำการแก้วคริสตัลที่ได้จากซีเถ้าแกลบและแก้วคริสตัลที่ได้จากซิลิกาอุตสาหกรรมไปทดสอบสมบัติทางกายภาพ ความแข็ง ความหนาแน่น การหักเหของแสง และ XRF

นำการแก้วคริสตัลที่ได้จากซีเถ้าแกลบและแก้วคริสตัลที่ได้จากซิลิกาอุตสาหกรรม มาเปรียบเทียบและหาเงื่อนไขที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการสกัดซิลิกา

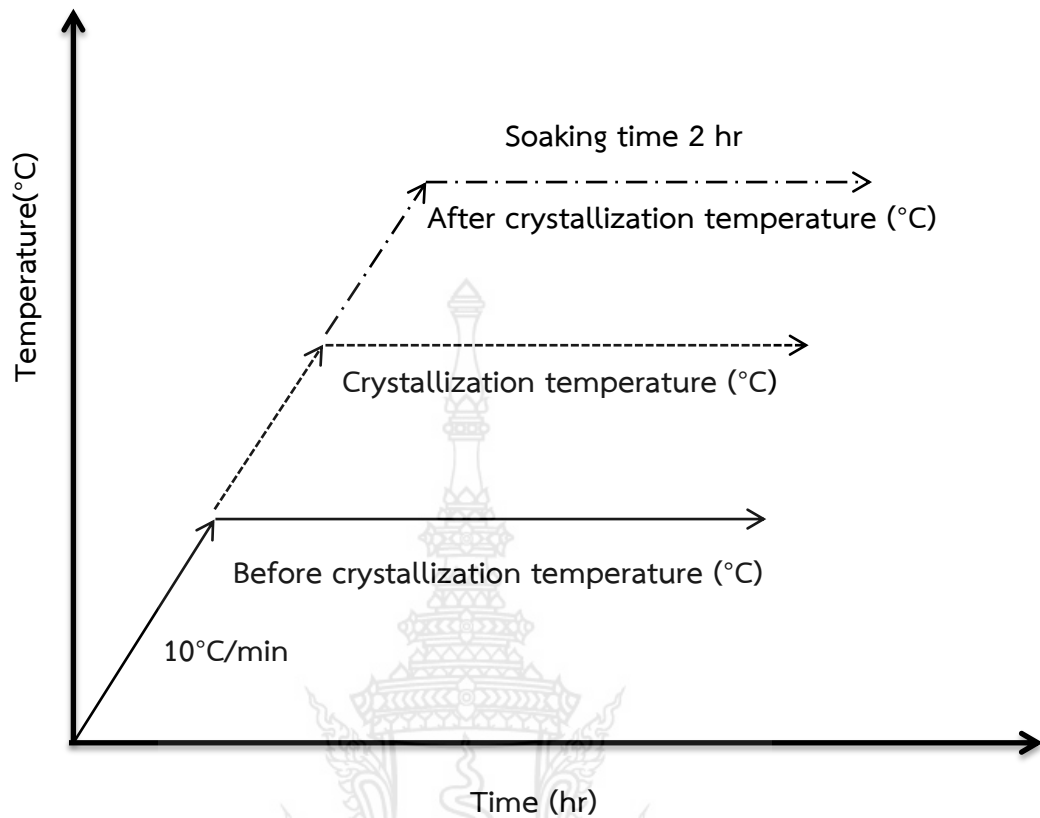


รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการสกัดซิลิกาและส่วนผสมในการทำแก้วคริสตัล

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การศึกษาสูตรแก้วที่เหมาะสมที่สุดในการทำเป็นแก้วคริสตัลลี

ในการเตรียมแก้วคริสตัลที่มีความแวววาวสูงและราคาถูก มีความจำเป็นต้องใช้ออกไซด์ของตะกั่วเพื่อเพิ่มดัชนีหักเหของแก้ว โดยทำการผสมสารตั้งต้นของออกไซด์ซึ่งได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) หรือ ซีลีเนียมออกไซด์ (PbO) โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) แบเรียมคาร์บอเนต (Ba_2CO_3) และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) เข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่ปรับสูตรของโรงงานโกลด์คริสตัล อย่างไรก็ตาม เพื่อเป็นการลดต้นทุนของวัตถุดิบและลดปัญหาการเลือกทราย (SiO_2) ที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งหาได้ยากในประเทศ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำซีลีเนียมที่มาจากแทนซิลิกาจากสารเคมี มาเป็นสารตั้งต้น โดยมีการปรับสูตรให้เหมาะสมกับการนำมาเป็นแก้วคริสตัลด้วยการเติมสารตะกั่วและสารเจือต่างๆ ทั้งหมด 3 สูตร และสูตรแก้วจากซิลิกาที่ใช้ในอุตสาหกรรมอีก 1 สูตร มาเปรียบเทียบกับสูตรแก้วคริสตัลที่ได้จากแคลบใน ช่วงเผาที่แตกแต่กัน ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิที่ 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 แวนตากันแสง ฯลฯ



รูปที่ 3.2 แผงผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกแก้วคริสตัล[8]

ตาราง 3.1 แสดงอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมแก้วคริสตัลจากแคลบ

ส่วนผสม	wt%
Rha1000°C	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

ตาราง 3.2 แสดงอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมแก้วคริสตัลจากแคลบ

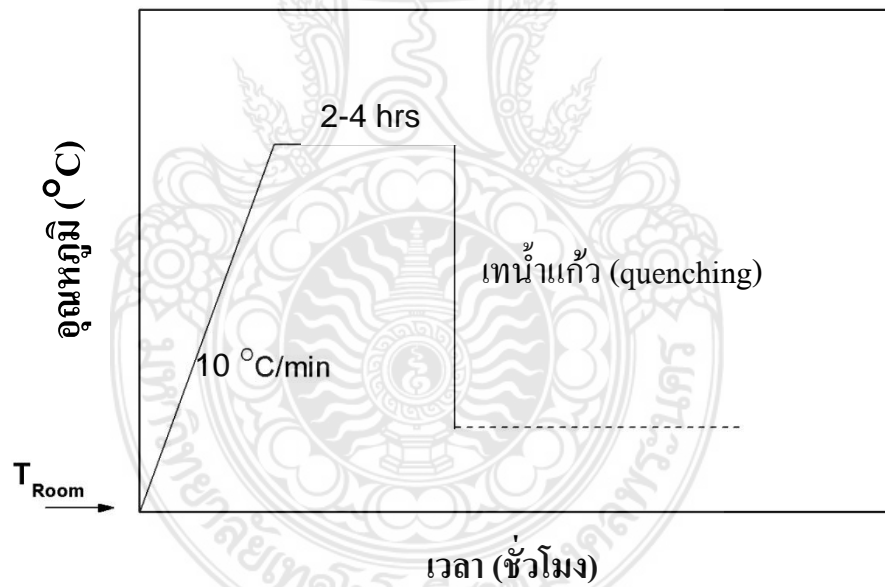
ส่วนผสม	wt%
Rha1100°C	42
K ₂ CO ₃	14
Na ₂ CO ₃	3
Borax	1
Pb ₃ O ₄	20
Ba ₂ CO ₃	8
CaCO ₃	12

ตาราง 3.3 แสดงอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมแก้วคริสตัลจากแคลบ

ส่วนผสม	Wt%
Rha1200°C	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

ตาราง 3.4 แสดงอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมแก้วคริสตัลทางเคมี

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



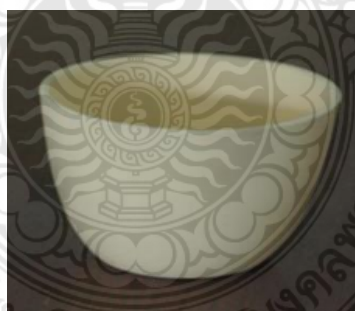
รูป 3.3 แผนผังแสดงเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้ว[8]



รูปที่ 3.4 เตาไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมแก้ว สามารถเผาได้อุณหภูมิสูงสุดถึง 1700 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.5 เบ้าหลอมแก้วทนไฟที่ทำมาจากกระเบื้องขาว (porcelain)



รูปที่ 3.6 เบ้าหลอมแก้วทนไฟที่ทำมาจากอะลูมินา (Alumina)



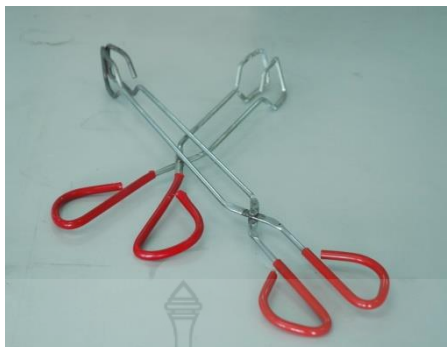
รูปที่ 3.7 แม่พิมพ์เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel mold)



รูปที่ 3.8 ถุงมือป้องกันความร้อนในการหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 3.9 แว่นตาตัดแสงจ้าและกันรังสีเหนือม่วง (UV ray)



รูปที่ 3.10 ที่คิบบ้าหลอมแก้วทนไฟออกจากเตาไฟฟ้า



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 ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด นอกจากนี้รังสีที่ตรวจจับได้นั้นยังสามารถบอกได้ว่า

มาจากระนาบตาและปริมาณเท่าใดอีกด้วย โดยดูจากค่ามุม (Bragg's angle) และความเข้มของรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ปรากฏ ซึ่งสารแต่ละชนิดก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่เป็นลักษณะ-เฉพาะแตกต่างกันไปตามลักษณะของโครงสร้าง

สำหรับการตรวจสอบนั้น จะมีขั้นตอนในการเตรียมสารตัวอย่างดังต่อไปนี้ คือ

1. นำผงและชิ้นงานที่เตรียมได้มาบรรจุใส่ในแผ่นบรรจุชิ้นงาน (sample holder) จากนั้นนำไปวางที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffractometer (ในกรณีที่สารตัวอย่างเป็นผงให้นำมาบดให้ละเอียดแล้วบรรจุลงในแผ่นบรรจุสารตัวอย่างก่อน 1 . จากนั้นเกลี่ยผงตัวอย่างให้เรียบโดยใช้กระจกไลต์)



รูปที่ 3.12 การตรวจสอบเฟสด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ X-ray diffraction technique (XRD)

3.6.2 การศึกษาองค์ประกอบของธาตุเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์หรือ (X-ray fluorescence: XRF)

เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์หรือ X-ray fluorescence (XRF) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการศึกษาองค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง โดยอาศัยความต่างของชั้นพลังงานของแต่ละธาตุ (ชั้น K, L, M, ...) ดังนั้นเมื่อเรากระตุ้นอะตอมด้วยการให้พลังงานที่มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นใน ทำให้เกิดที่ว่าง และเมื่ออิเล็กตรอนในชั้นนอกลงมาแทนที่ อะตอมจะปลดปล่อย

พลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า "การเรืองรังสีเอกซ์" เราสามารถนำปรากฏการณ์นี้ไปใช้ในการหาชนิดของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างที่เราสนใจได้ เราเรียกเทคนิคนี้ว่า "เทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์" ซึ่งข้อดีของเทคนิคนี้ก็คือ การเตรียมตัวอย่างที่ไม่ยุ่งยาก และเป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายคุณสมบัติของตัวอย่าง (non-destructive method) โดยทั่วไปเราจะใช้รังสีเอกซ์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการคายพลังงานของอะตอมในตัวอย่าง ในที่นี้คือ แสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอกซ์ และเนื่องจากแสงซินโครตรอนมีความเข้มสูง ทำให้เราสามารถโฟกัสลำรังสีเอกซ์ให้มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการหาองค์ประกอบของธาตุที่บริเวณเล็กๆ 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

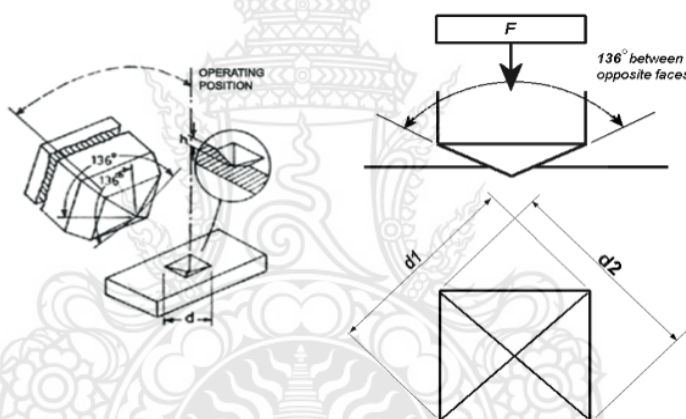
Hardness หรือ ความแข็ง เป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่แสดงถึงความสามารถในการคงรูปของวัสดุต่างๆ เมื่อมีแรงภายนอกหรือโหลดมากระทำกับวัตถุนั้นๆ ความแข็งเป็นปริมาณสัมพัทธ์ที่มีความแตกต่างจากปริมาณทางฟิสิกส์อื่นๆ เช่น ระยะทาง เวลา ปริมาตร หรือกระแสไฟฟ้า ตรงที่ไม่มีจำนวนหรือมาตรฐานที่แน่นอน แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางกายภาพอย่างอื่น เช่น tensile strength, yield strength, ชีตจำกัดความยืดหยุ่น 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 และมีมุมระหว่างผิวหน้าด้านตรงข้ามกันเท่ากับ 136 องศา แรงกดที่ใช้อยู่ระหว่าง 1 กรัม - 100 กิโลกรัม ใช้ระยะเวลากดประมาณ 10-15 วินาที รอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กในระดับไมครอนจึงต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์ในการช่วยคำนวณความแข็ง ค่า ความแข็ง ที่ได้จะแสดงออกมาดังเช่น 800 HV/10 ซึ่งหมายถึง มีค่า ความแข็ง Vickers 800 และใช้แรงกด 10 กิโลกรัม ค่าความแข็งที่ได้จากวิธีการนี้จะให้ผลที่ชัดเจนและเป็นรูปแบบมากกว่าวิธีการอื่นๆ 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 = $M_1 - M_2$ น้ำหนักของน้ำที่มีปริมาณเท่าวัตถุความ
ถ่วงจำเพาะ = น้ำหนักของวัตถุในอากาศ / น้ำหนักของที่ถูกแทนที่โดยวัตถุ

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

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)

ค่าดัชนีหักเหของแก้วทำการวัดโดยอาศัยเทคนิคของปริซึมคู่ควบโดยใช้เครื่องมาตรฐานดัชนีหัก
เหแบบ 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. หยดน้ำยาหาค่า RI (RI liquid) ในปริมาณเล็กน้อยลงบนแผ่นเหล็กด้านบน
5. วางตัวอย่างโดยใช้หน้าเรียบที่เลือกไว้บนน้ำยา
6. เลื่อนตัวอย่างไปอยู่ที่กึ่งกลางของแท่งแก้วปริซึม ให้ขนานกับด้านยาวของปริซึม
7. ใส่เลนส์ขยายบนรีแฟรคโตมิเตอร์และเคลื่อนสรีระออกให้ห่างประมาณ 10 -12 นิ้ว

8. สังเกตแนวเส้นสีเขียวที่ขอบบนสเกล โดยให้อ่านค่า RI จากขอบด้านล่างของแถบสี

จากที่กล่าวมาแล้ว ค่าดัชนีหักเหของแสงขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของความยาวคลื่นของรังสีที่ตกกระทบลงบนแก้วเป็นอย่างมาก การระบุค่าดัชนีหักเหของวัสดุต่างๆ จึงต้องมีการระบุความยาวคลื่นของรังสีที่ใช้ในการหาค่าดัชนีหักเห 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

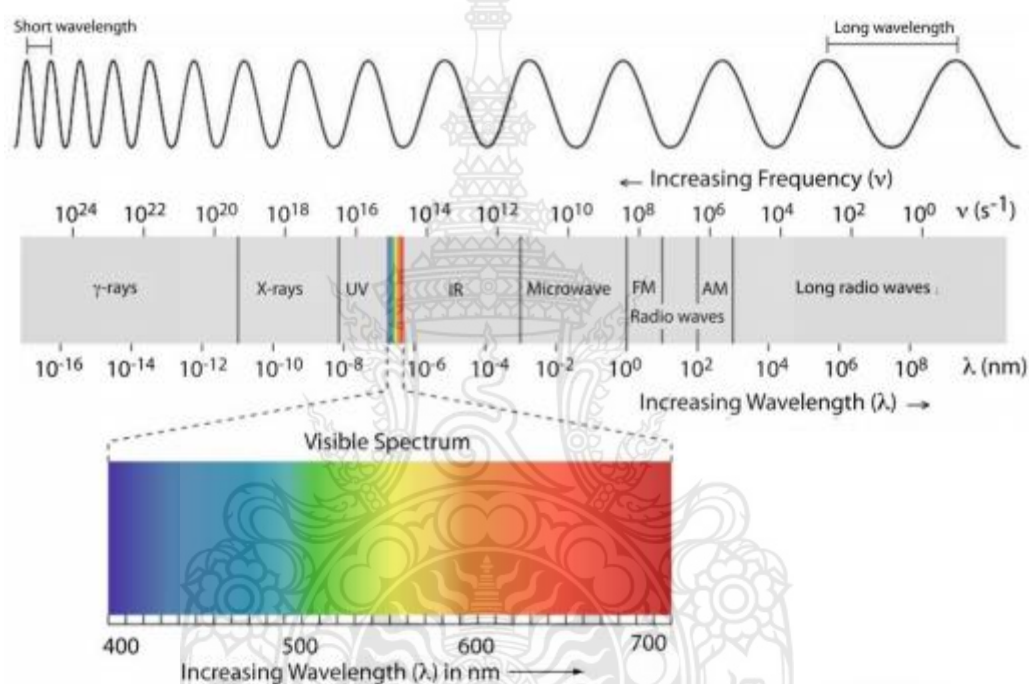
สเปกโทรโฟโตเมทรี การวัดการดูดกลืนคลื่นแสงและการปล่อยคลื่นแสงจะใช้เครื่องมือวัดสมบัติ ทางแสงหรือที่เรียกว่าสเปกโตรมิเตอร์หรือสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งมีหลาย ชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบพื้นฐานที่เหมือนกัน เพียงแต่การจัด วางส่วนประกอบต่างกัน ซึ่งประกอบด้วย

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 เข้าไปจะทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงกว่าเดิม 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 ตรงกันข้ามในวงล้อสีความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืนกับสีของสารที่

มองเห็นมี ประโยชน์สำหรับใช้ในการท านายว่าสารประกอบที่มีสีจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น ในช่วงใด

ตาราง 3.5 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

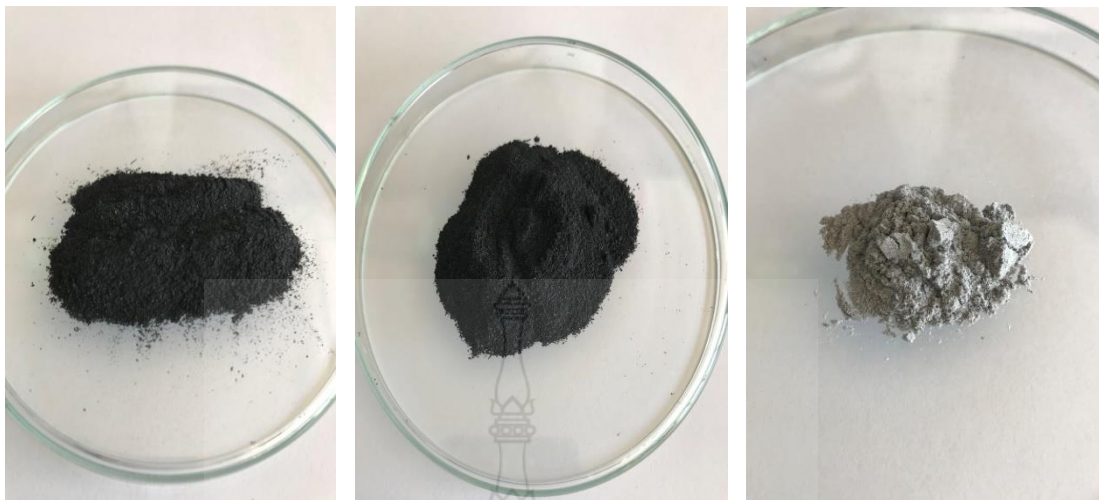
ในบทนี้จะแบ่งผลการวิเคราะห์การทดลองเป็นสองส่วนใหญ่ๆ โดยส่วนแรกจะเป็นการวิเคราะห์ถึงสมบัติทางกายภาพ เฟสองค์ประกอบของแกลบ คือ การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค(XRF) และในส่วนที่สอง เป็นการวิเคราะห์ถึงสมบัติแก้วคริสตัลที่มีวัตุถุคิตั้งต้นมาจากแกลบพร้อมทั้งเปรียบเทียบชิ้นงานแก้วคริสตัลที่ได้จากสารเคมีด้วย 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 แสดงผงแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000°C ช่วงแรก จากกล้อง OM



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

4.1.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ของแกลบที่ผ่านการเผาด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.1-4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแกลบที่ผ่านเงื่อนไขในการเผาที่แตกต่างกัน พบว่าองค์ประกอบหลักที่พบทั้ง 3 เงื่อนไขคือ ซิลิกา (SiO_2) รองลงมา คือ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) โดยที่ 3 เงื่อนไขมีแนวโน้มในการเกิดธาตุคล้ายคลึงกัน นอกจากนี้พบว่าซิลิกามีความบริสุทธิ์สูงที่สุดจากการเผาแกลบที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 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 ₂ O ₃	0.24

ตาราง 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุในแคลสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1100°

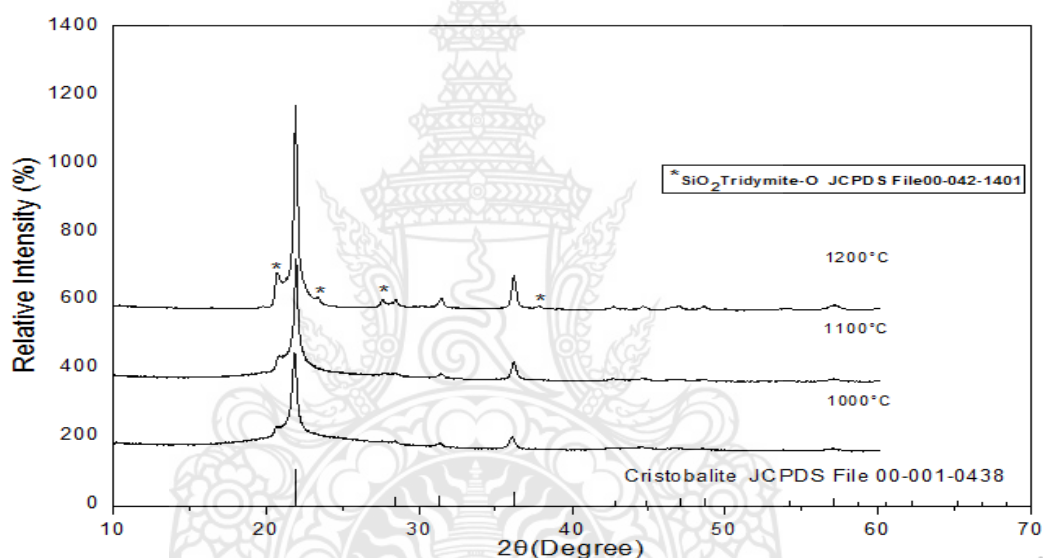
องค์ประกอบสารเคมี	%w/w
SiO ₂	90.88
SO ₃	0.76
K ₂ O	5.79
CaO	1.79
MnO	0.58
Fe ₂ O ₃	0.19

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) ของแคลบที่ผ่านการเผาด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

หลักจากการทำการเผาแคลบที่เงื่อนไขแตกต่างกันพบว่าแคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000-1200 องศาเซลเซียสพบแนวโน้มการเกิดเฟสองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกัน โดยเฟสที่เกิดประกอบด้วยเฟสองค์ประกอบด้วยกัน 2 เฟส โดยเฟสหลักได้แก่ เฟสของ SiO_2 (Cristobalite JCPDS File 00-001-0438) และเฟสรองคือเฟสของ SiO_2 Tridymite-o JCPDS File 00-042-1401 โดยที่แคลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะพบเฟสของ Cristobalite และ Tridymite มีแนวโน้มสูงขึ้น

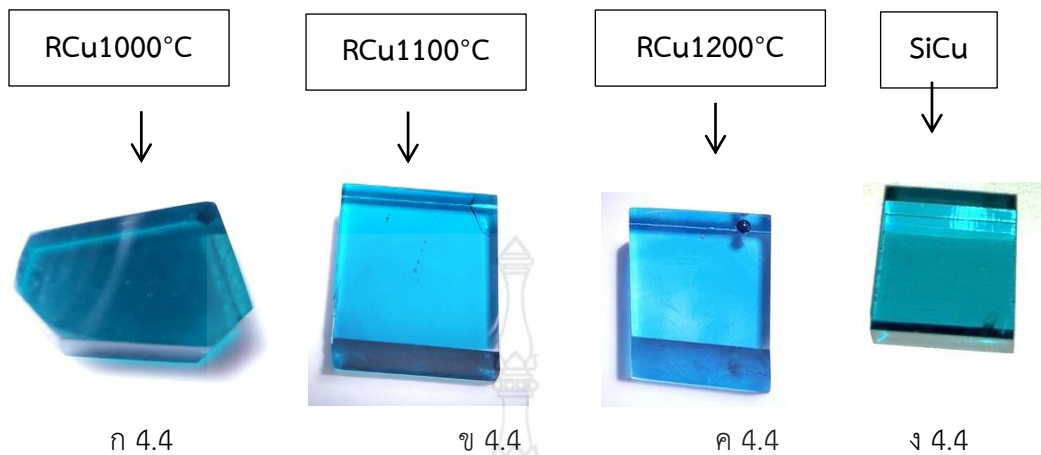


รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแคลบที่ผ่านเงื่อนไขที่แตกต่างกัน

4.2 ผลการสังเคราะห์แก้วคริสตัลจากแคลบ

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของแก้วคริสตัลจากแคลบ

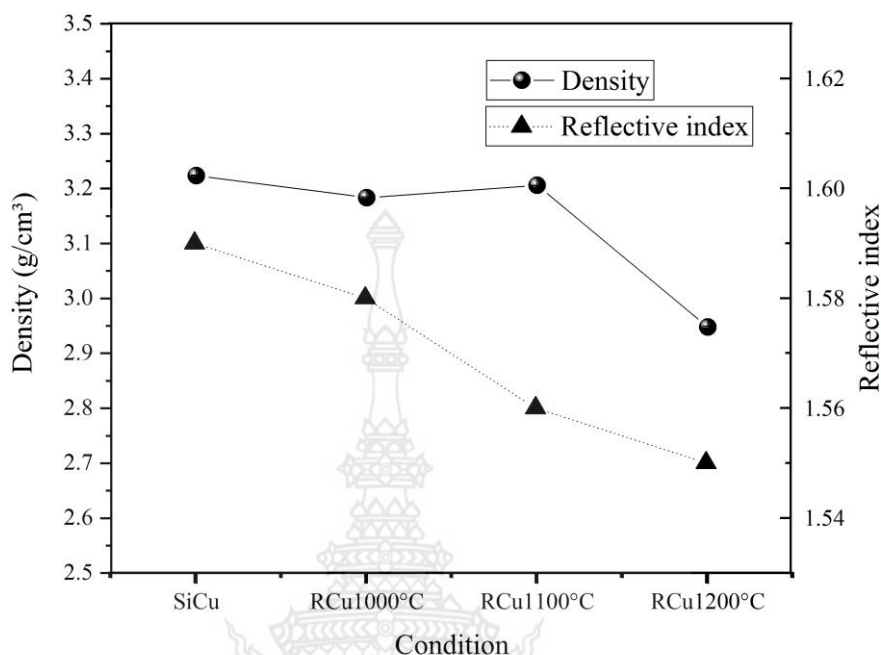
หลังจากได้ซิลิกาจากแคลบที่ผ่านการเผาที่เงื่อนไขที่แตกต่างกัน (RCu1000, RCu1100, RCu1200) แล้วให้นำมาผสมกับออกไซด์ของ Cu เพื่อให้เกิดสีฟ้าในเนื้อแก้วโดยอาศัยหลักการผสมสีของแม่สี และ Pb เพื่อทำให้เกิดแก้วคริสตัลสี เปรียบเทียบกับแก้วซิลิกาจากสารเคมี พบว่าในการเทียบเฉดสีในการวิเคราะห์ที่ใช้วิธี shade of color or chromatic spectrophotometer ดังแสดงรูป 3.16 และตาราง 3.5 มาเทียบกับรูปที่แสดงรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงรูปชิ้นงานแก้วคริสตัลสี

4.2.2 ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่น (Density)

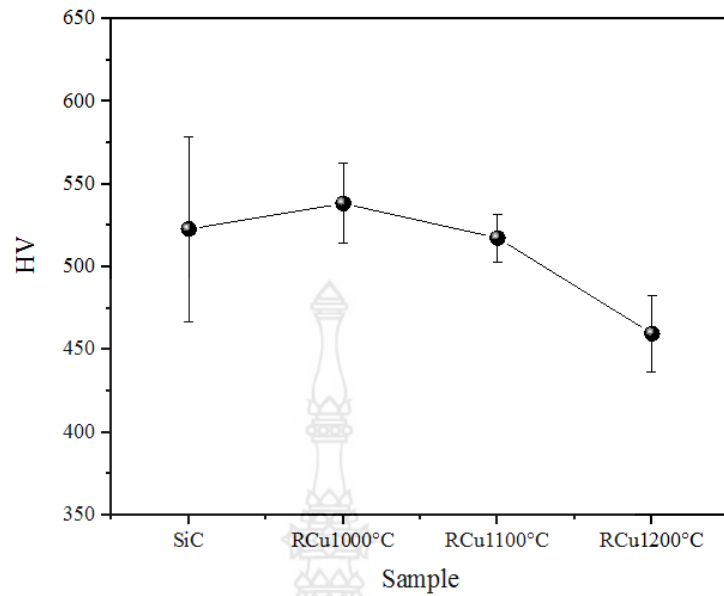
จากเอกสารทางวิชาการ [1-3] ได้กำหนดว่าแก้วที่สามารถจัดได้ว่าเป็นแก้วคริสตัลได้นั้น จะต้องมึค่าความหนาแน่นมากกว่า 2.95 g/cm³ ค่าดัชนีหักเหของแสง 1.55 เนื่องจากว่าค่าต่ำกว่านี้จะทำให้แก้วสูญเสียความใส เคาะแล้วจะต้องมีเสียงดังกังวาน นอกจากนี้แก้วตัวยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าดัชนีหักเหได้ตั้งแต่ 1.5-1.7 ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของสูตรแก้ว จากการทดลองนี้พบว่า จากรูป 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นที่ได้จะอยู่ในช่วง 2.94-3.22 g/cm³ โดยค่าความหนาแน่นน้อยที่สุดได้มาจากชิ้นงานแก้วที่เผาอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เหตุที่เป็นเช่นนั้นอาจเป็นผลมาจากการเกิดเฟสองค์ประกอบของ Tridymite ที่มีปริมาณมากที่สุดที่ปรากฏในการเผาแก้วที่อุณหภูมินี้ ในขณะที่การปรากฏเฟสของ Cristobalite มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของแก้วมีค่าสูงนั่นเอง



รูปที่ 4.5 จากกราฟจะเห็นความสัมพันธ์ลักษณะแปรผันระหว่างค่าความหนาแน่นและค่าดัชนีหักเหกล่าวคือ หากแก้วคริสตัลมีความหนาแน่นสูงจะมีค่าดัชนีหักเหสูงไปด้วย

4.2.3 ผลการทดสอบวัดค่าความแข็ง (hardness)

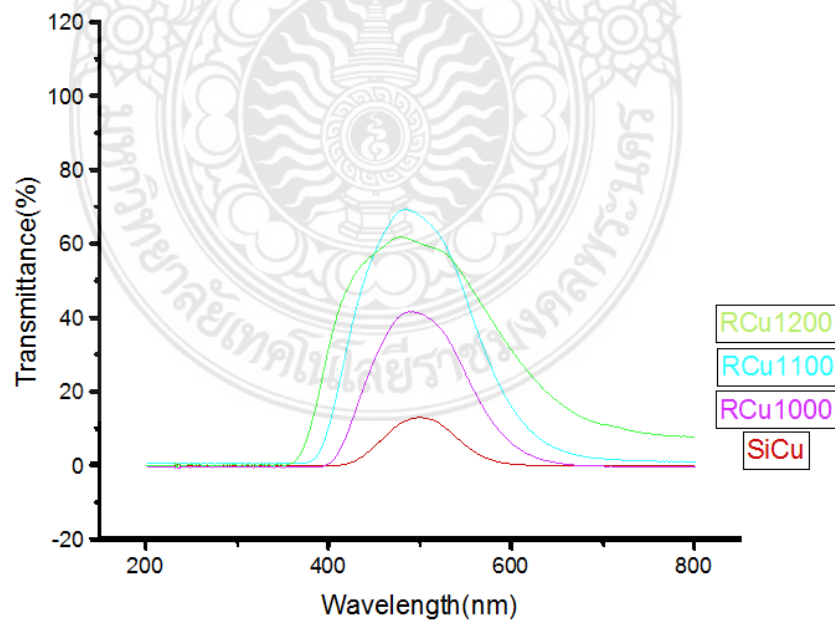
โดยนำชิ้นงานแก้วคริสตัลจากแกลบในแต่ละเงื่อนไข คือ RCu1000, RCu1100, RCu1200 และชิ้นงานจากแก้วคริสตัลที่ได้จากซิลิกาทางเคมี มาทำการทดสอบความแข็งของชิ้น โดยชิ้นงานที่วัดมีขนาดที่ 10*10mm กว้าง*ยาว ชิ้นงานหนา ขนาด 5-8 mm จากกราฟจะเห็นได้ว่า SiCu เป็นซิลิกาทางเคมีมีความแข็งมากที่สุดถ้ามาเปรียบเทียบกับซิลิกาที่ได้จากแกลบ คือ RCu1000°C ซึ่งมีความแข็งที่ใกล้เคียงกันมาก นั่นก็หมายความว่า ซิลิกาที่ได้จากแกลบนั้นก็มีความใกล้เคียงกับซิลิกาที่ได้จากทางเคมี แล้วถ้าเผาแกลบในอุณหภูมิที่สูงขึ้นไป ค่าความแข็งก็จะลดลง ยิ่งมีความบริสุทธิ์ที่มากกว่าซิลิกาที่ได้จากทางเคมี เป็นการตอกย้ำว่าแกลบจากธรรมชาติสามารถนำมาสังเคราะห์ให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก



รูปที่ 4.6 ค่าความแข็ง (hardness)

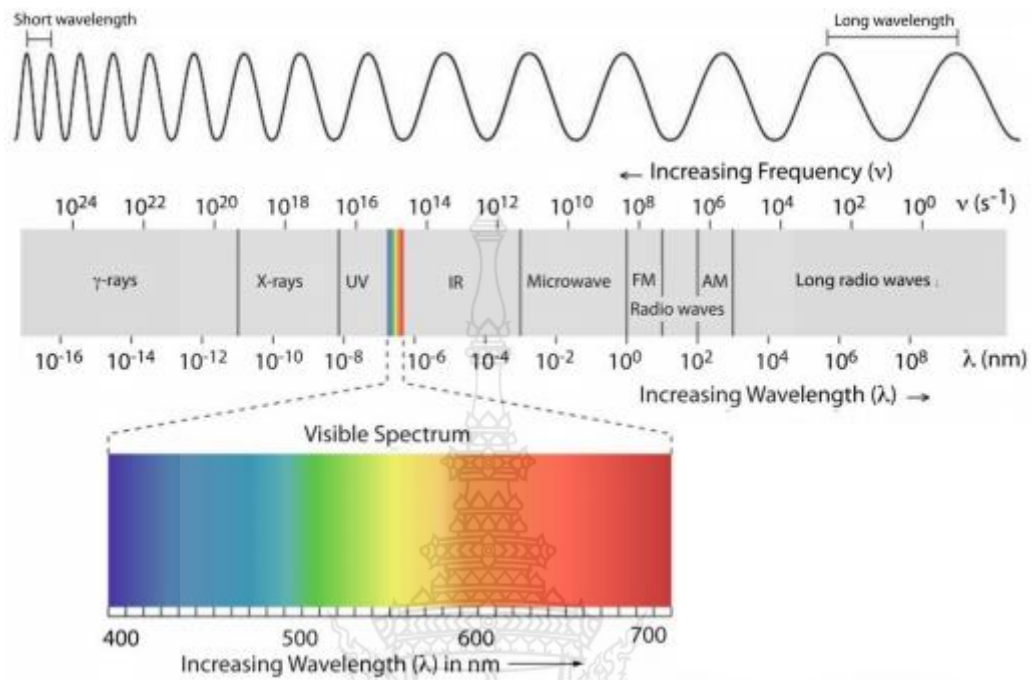
4.2.4 ผลการทดสอบการดูดกลืนรังสี UV-VIS

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



รูปที่ 4.7 กราฟการดูดกลืนรังสี UV-VIS

นี่คือภาพและการเทียบแอมพลิจูดไฟฟ้าในช่วงค่า 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]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ในงานวิจัยนี้ที่สามารถผลิตแก้วคริสตัลที่มีวัตถุดิบตั้งต้นมาจากแกลบ
2. เงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ในผลิตรการผลิตแก้วคริสตัลได้แก่ชิ้นงานที่มีแกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลที่ได้มีแค่ ความหนาแน่น มีค่าเท่ากับ 3.1835 ละมีค่าความ hardness เท่ากับ 538.37 และเฟสที่ได้เป็นเฟสของซิลิกา Cristobalite และ Tridymite และพบว่ามีค่าความบริสุทธิ์ของซิลิกาเท่ากับ 90.89 %
3. แก้วคริสตัลที่มีแกลบเป็นวัตถุดิบสามารถวัดค่าดัชนีหักเหได้มากกว่า 1.5 ซึ่งตรงกับความต้องการในเงื่อนไขของแก้วคริสตัล

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมแก้วคริสตัลสามารถทำได้หลายสีเนื่องจากแกลบที่สังเคราะห์ได้สามารถทดแทนซิลิกาได้
2. ในงานวิจัยนี้ควรนำไปใช้ได้จริงเนื่องจากเป็นการลดต้นทุนในการผลิตของชิ้นงานแก้วคริสตัลได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] (2004) 313–323. Preparation and characterization of nano-structured Materials Science and Engineering
- [2] (2016) 351-359. Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy
- [3] (2002) 818–821. husk ash as an alternate source for active silica production Materials
- [4] (2010). การผลิตแก้วคริสตัลสีแดงโดยอนุภาคทองคำด้วยปฏิกิริยารีดักชัน
<http://gensci.science.swu.ac.th/Pm3/บทความปัญหาพิเศษวัสดุศาสตร์2553/4.การผลิตแก้วคริสตัลสีแดง%20โดยอนุภาคทองคำ%20ด้วยปฏิกิริยารีดักชัน.pdf>.
- [5] (2558). แก้วและการประยุกต์. ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [6] (2005) 26: 3631-3638. Arinzeh T.L., Tran T., Mcalary J., Daculsi G. A comparative study of Biphasic calcium phosphate ceramics for human mesenchymal stem-cell-induced bone formation Biomater
- [7] (2015). Glass Production Industry. Retrieved Dec 7, 2018 from https://www.researchgate.net/profile/Nattapol_Laorodphan/publication/286775244_xutsahkrmkarphlitkaew_Glass_Production_Industry/links/566d7e0308ae1a797e4033fb/xutsahkrmkarphlitkaew-Glass-Production-Industry
- [8] (1994). Vogel, W. Glass Chemistry, 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 464 p.
- [9] (2007). วีระชัย ลามอ. ความแข็ง (hardness). สืบค้นเมื่อวันที่ 30 มกราคม 2562, จากเว็บไซต์ http://www.dss.go.th/images/st-article/pep_5_2550_hardness.pdf

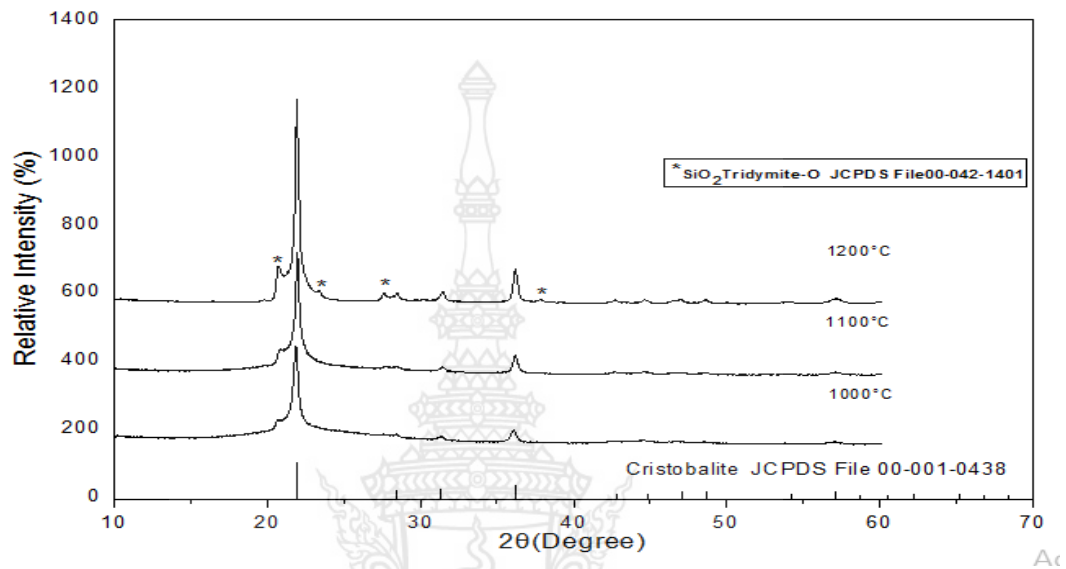
[10] (2000). Harvey, Modern Analytical Chemistry. สเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อ
วันที่ 3 มีนาคม 2562, จากเว็บไซต์ <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:XS0fbbBcmJoJ:https://web.rmutp.ac.th/woravith/upload/AnalChem/spectroscopy.pdf+&cd=4&hl=th&ct=clnk&gl=th>



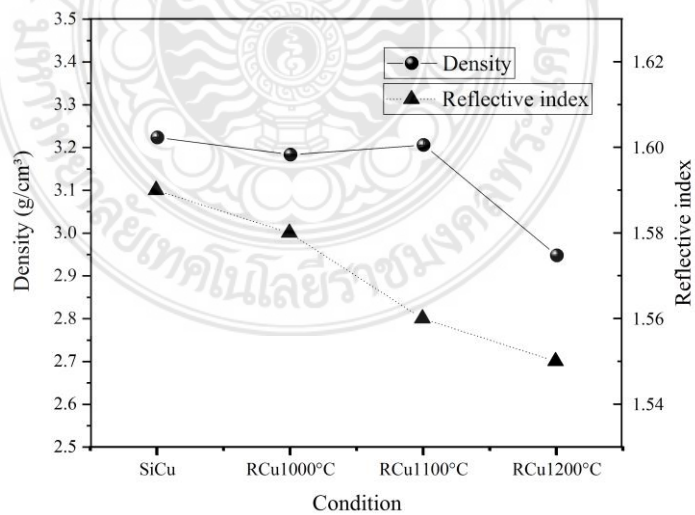
ภาคผนวก ก



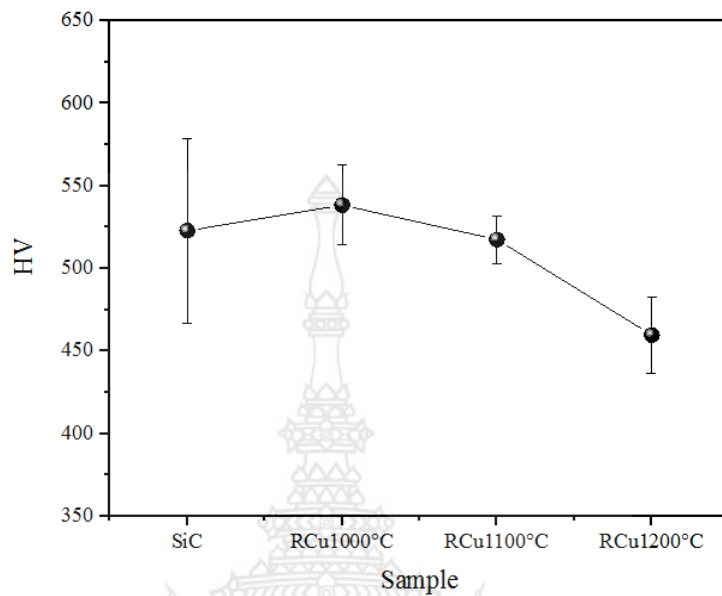
ผลการทดสอบ XRD



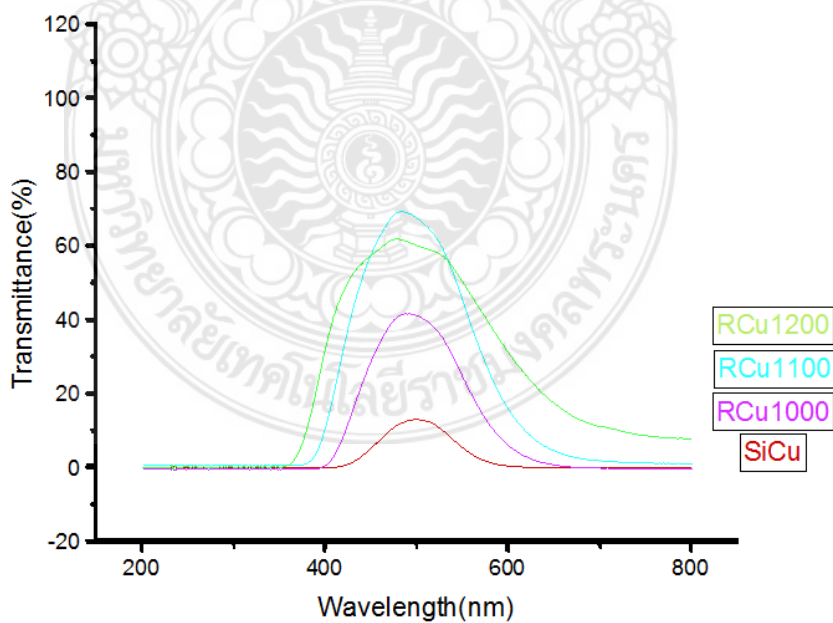
ผลการทดสอบความหนาแน่น Density



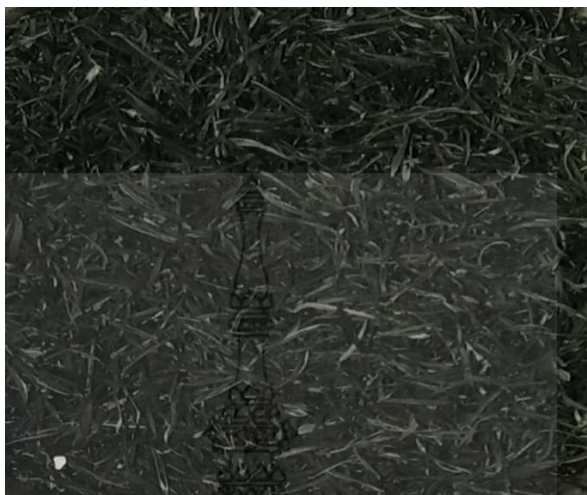
ผลการทดสอบความแข็ง hardness



ผลการทดสอบการดูดกลืนรังสี UV-VIS



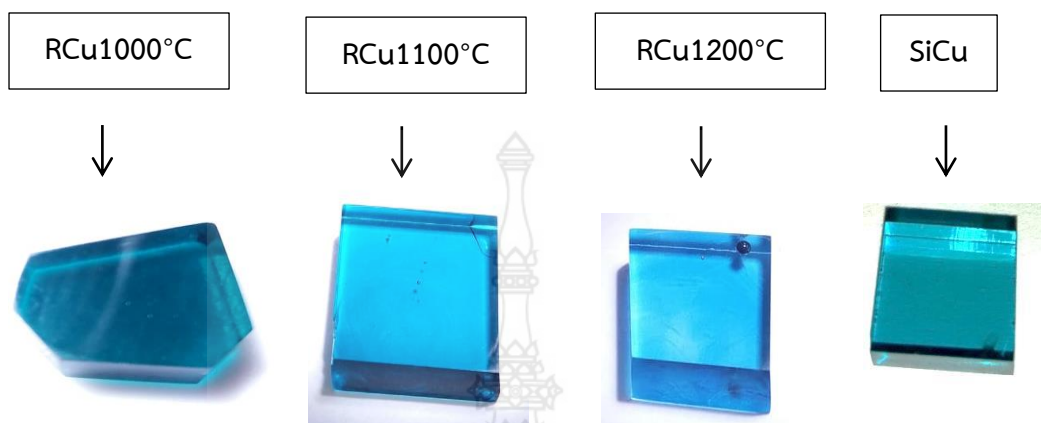
แสดงผงเกลบที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000°C ช่วงแรก



แสดงผงเกลบที่ผ่านการเผาที่เงื่อนไขที่แตกต่างกันช่วงที่สอง



แสดงรูปชิ้นงานแก้วคริสตัลสี



ประวัติการนักศึกษา



ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย)

นายวงศธร สุขวัฒน์

(ภาษาอังกฤษ)

Wongsathorn Sukawat

ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา

ชื่อสถาบัน

มัธยมศึกษาตอนต้น

โรงเรียนมัธยมวัดมกุฎกษัตริย์

มัธยมศึกษาปลาย

โรงเรียนมัธยมวัดเบญจมบพิตร

สิ่งประกวดที่ได้รับรางวัลใน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

-รับรางวัลชนะเลิศการประกวดสิ่งประดิษฐ์ด้านวิทยาศาสตร์ประจำปีการศึกษา2560