

การผลิตกลาสเซรามิกจากเศษแก้วรีไซเคิล

นางสาวศุภวรรณ ธีระโสภณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF GLASS CERAMIC FROM RECYCLING GLASS CULLET

Miss Supawan Thirasophon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตกลาสเซรามิกจากเศษแก้วรีไซเคิล
โดย	นางสาวศุภวรรณ ธิระโสภณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉันทน์ เจียมศิริเลิศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉันทน์ เจียมศิริเลิศ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัศมี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุขฎิ อุตภาพ)

ศุภวารรณ ถิระโสภณ : การผลิตกลาสเซรามิกจากเศษแก้วรีไซเคิล (PRODUCTION OF GLASS CERAMIC FROM RECYCLING GLASS CULLET) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: รศ.ดร.เพชรพร เซาวกิจเจริญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริ
 เลิศ, 111 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำเศษแก้วรีไซเคิลมาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกลาสเซรามิก ศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงของกลาสเซรามิกด้วยการใช้ไททานเนียมไดออกไซด์เป็นสารก่อผลึก เศษแก้วที่ใช้ทำการศึกษามี 4 สี คือ เศษแก้วสีเขียว สีชา สีใสและสีน้ำเงิน บดและคัดเลือกขนาดของ เศษแก้ว 3 ขนาดคือ 4-16 เมช (1-4 มิลลิเมตร) 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) และ 32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร) ทำการหาขนาดของเศษแก้วและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้วเพื่อ ผลิตเป็นกลาสเซรามิกโดยนำมาหลอมที่ 1200-1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า ขนาดของเศษแก้วและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้ว คือ 0.5-1 มิลลิเมตร และ 1250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ศึกษาการผลิตกลาสเซรามิกจากเศษแก้วทั้ง 4 สีโดยใช้ขนาด 0.5-1 มิลลิเมตร มาผสมไททานเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก หลอม วัตถุดิบที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึกของ กลาสเซรามิกด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน ตรวจสอบการเกิดเฟสและ โครงสร้างทางจุลภาคของผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์และเครื่องออปติคอลไมโครสโคป ทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพของแก้วหลังการหลอมและกลาสเซรามิก ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำ และความแข็งแรง พบว่าที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็น อุณหภูมิที่ทำให้เกิดผลึกมากที่สุด กลาสเซรามิกที่ได้เกิดผลึกของเฟสวอลลาสโตไนท์และผลึกเกิด บนผิวหน้าเล็กน้อย ผลการทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพ พบว่า กลาสเซรามิกที่เหมาะสมที่ จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นโมเสกประดับตกแต่งฝาผนัง คือ กลาสเซรามิกที่ได้จากการผสมเศษแก้ว และไททานเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก มีค่าความหนาแน่นประมาณ 2.59 กรัม/ ลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าความแข็งแรงประมาณ 677 กิโลกรัม/มิลลิตารางเมตร มีค่าความพรุนตัว และการดูดซึมน้ำที่ต่ำ การนำเศษแก้วมาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกลาสเซรามิกจึงเป็นทางเลือก หนึ่งใน การจัดการของเศษประเภทแก้ว

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อ นิสิต.....
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

#5170481121: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : RECYCLING GLASS CULLET / GLASS CERAMIC / TITANIUMDIOXIDE

SUPAWAN THIRASOPHON: PRODUCTION OF GLASS CERAMIC FROM
 RECYCLING GLASS CULLET. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. PETCHPORN
 CHAWAKITCHAREON, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. SIRITHAN
 JIEMSIRILERS, Ph.D., 111 pp.

Utilization of recycling glass cullet as raw material for glass ceramic production was studied in this research. Increasing the hardness of glass ceramic with the addition of titanium dioxide (TiO_2) acted as a nucleating agent. The four colors of glass cullet were used for example as green, amber, flint and blue. The glass cullet was milled and sieved to various 3 particle size fractions, namely 4-16 mesh (1-4 mm.), 16-32 mesh (0.5-1 mm.) and 32-100 mesh (0.15-0.5 mm.). The samples were melted in the range of 1200–1450°C for 1 hour. The optimum particle size and melting temperature in order to produce the glass ceramics were 16-32 mesh and 1250°C, respectively. The four colors of glass cullet were milled and sieved to 16-32 mesh with the addition of 0, 5, 7 and 9 wt % TiO_2 , respectively. The samples were melted at 1250°C for 1 hour. Determination of the crystallization temperature was performed by differential thermal analysis. Glass ceramic products were examined by X-ray diffraction and optical microscopy. The physical properties of as-melted glasses and glass ceramics such as density, porosity and water absorption were determined. The result indicated that the crystallization temperature at 800°C exhibited maximum the crystalline growth. The crystalline structure of the glass ceramics products was the wollstonite phase and grown on the surface area of the glass ceramic samples. The optimum composition in order to produce glass ceramic from recycling glass cullet was at 7 wt% TiO_2 which can be used for mosaic. The density of glass ceramic sample was about 2.59 g/cm³ with very low porosity and water adsorption. The hardness value was about 677 kg/mm². The utilization of glass cullet to produce glass ceramic is an alternative way to reduce glass waste.

Department : Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2009 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้ความรู้ คำอธิบายและช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่องการปฏิบัติงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่ามาให้ความรู้ คำชี้แนะ และแนวทางในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่าน พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ และหน่วยปฏิบัติการเซรามิกชั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัย ช่วยให้คำปรึกษา และคอยอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการตลอดมาทำให้งานวิจัยบรรลุวัตถุประสงค์

ขอขอบคุณบริษัท บางกอกกล๊าส จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์เศษแก้วมาเป็นวัตถุดิบในงานวิจัย รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานของทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกองทุนดร.ธีระพันธุ์มวนิช สถาบันสิ่งแวดล้อมไทยที่มอบทุนสนับสนุนงานวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่คอยสนับสนุนอยู่เบื้องหลังในทุกๆ ความสำเร็จ และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ และมีความปรารถนาดีมอบให้เสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เศษแก้วรีไซเคิล.....	4
2.2 อุตสาหกรรมแก้วและกระจก.....	11
2.3 วัตถุดิบในการผลิตแก้ว.....	12
2.4 กระบวนการผลิตแก้ว.....	13
2.5 มิติด้านพลังงานในการผลิตแก้ว.....	14
2.6 แก้ว.....	17
2.7 วัสดุกระจกเซรามิก.....	22
2.8 การวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน.....	25
2.9 อุตสาหกรรมวัสดุกระจกเซรามิก.....	26
2.10 ไททานเนียมไดออกไซด์.....	28
2.11 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย.....	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับงานวิจัย.....	34
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	42
4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วรีไซเคิล.....	42
4.2 ศึกษาผลของขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลและอุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการหลอมแก้วเพื่อผลิตกระจกเซรามิก.....	43
4.3 ศึกษาผลของการหลอมแก้วที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลและ ไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ.....	49
4.4 ศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วเพื่อผลิตกระจกเซรามิก.....	51
4.5 ตรวจสอบการเกิดเฟสและโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้นในกระจกเซรามิก.....	60
4.5.1 ตรวจสอบเฟสการเกิดผลึกของกระจกเซรามิก.....	60
4.5.2 โครงสร้างทางจุลภาคของเฟสที่เกิดขึ้นในกระจกเซรามิก.....	64
4.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วและกระจกเซรามิก.....	67
4.7 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	81
ภาคผนวก ก.ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้ว และกระจกเซรามิก.....	82
ภาคผนวก ข.ค่าความแข็งของแก้วและกระจกเซรามิก.....	95
ภาคผนวก ค.การทนทานต่อกรดและด่างของแก้วและกระจกเซรามิก.....	105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	111

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ราคาากลางของเศษแก้วสี่ต่างๆ.....	5
ตารางที่ 2.2 ราคาเปรียบเทียบของวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้วและราคาของเศษแก้ว...	6
ตารางที่ 2.3 ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะปฐมภูมิของอุตสาหกรรมของแก้ว และกระจก.....	15
ตารางที่ 2.4 ค่าความแข็งของแก้วชนิดต่างๆ.....	22
ตารางที่ 3.1 สูตรการหลอมแก้ว 16 สูตรที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลและ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO ₂) ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ.....	38
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สี.....	42
ตารางที่ 4.2 ลักษณะการไหลของน้ำแก้วของเศษแก้วรีไซเคิลสี่เขียวขนาดต่างๆ หลอมที่ อุณหภูมิ 1200 ถึง 1450 องศาเซลเซียส.....	44
ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของน้ำแก้วและลักษณะสมบัติทางกายภาพของแก้วที่ หลอมจากเศษแก้วรีไซเคิลสี่เขียวขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 1200 ถึง 1450 องศาเซลเซียส.....	47
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วเพื่อผลิตกลาสเซรามิกของแก้ว 16 สูตร.....	55
ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 4 สี จำนวน 16 สูตร.....	69
ตารางที่ 4.6 สมบัติทางเคมีของแก้วและกลาสเซรามิกสูตร G7 A7 F7 และ B7.....	72
ตารางที่ 4.7 ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกลาสเซรามิก 1 กิโลกรัม สำหรับใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ.....	75
ตารางที่ ก1 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากเศษแก้ว รีไซเคิลขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิการหลอม 1250 องศาเซลเซียส.....	84
ตารางที่ ก2 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากเศษแก้ว รีไซเคิลขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิการหลอม 1350 องศาเซลเซียส.....	85
ตารางที่ ก3 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากเศษแก้ว รีไซเคิลขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิการหลอม 1450 องศาเซลเซียส.....	86
ตารางที่ ก4 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากส่วนผสม ของเศษแก้วสีเขียวและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ก5 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากส่วนผสม ของเศษแก้วสีชาและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	88
ตารางที่ ก6 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากส่วนผสม ของเศษแก้วสีใสและ TiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	89
ตารางที่ ก7 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากส่วนผสม ของเศษแก้วสีน้ำเงินและ TiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	90
ตารางที่ ก8 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกสีเขียวที่ได้ จากผสมเศษแก้วและ TiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	91
ตารางที่ ก9 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกสีชาที่ได้จาก ผสมเศษแก้วและ TiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	92
ตารางที่ ก10 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกสีใสที่ได้ จากผสมเศษแก้วและ TiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	93
ตารางที่ ก11 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกสีน้ำเงินที่ ได้จากผสมเศษแก้วและ TiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	94
ตารางที่ ข1 ค่าความแข็งของแก้วสีเขียวที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	97
ตารางที่ ข2 ค่าความแข็งของแก้วสีชาที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	98
ตารางที่ ข3 ค่าความแข็งของแก้วสีใสที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	99
ตารางที่ ข4 ค่าความแข็งของแก้วสีน้ำเงินที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	100
ตารางที่ ข5 ค่าความแข็งของกลาสเซรามิกสีเขียวที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	101
ตารางที่ ข6 ค่าความแข็งของกลาสเซรามิกสีชาที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	102

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข7 ค่าความแข็งของกลาสเซรามิกสีใสที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	103
ตารางที่ ข8 ค่าความแข็งของกลาสเซรามิกสีน้ำเงินที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO ₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก.....	104
ตารางที่ ค1 การทนทานต่อกรดของแก้วตัวอย่างสูตร G7 A7 F7 และ B7.....	107
ตารางที่ ค2 การทนทานต่อกรดของกลาสเซรามิกตัวอย่างสูตร G7 A7 F7 และ B7.....	108
ตารางที่ ค3 การทนทานต่อกรดของแก้วตัวอย่างสูตร G7 A7 F7 และ B7.....	109
ตารางที่ ค4 การทนทานต่อกรดของกลาสเซรามิกตัวอย่างสูตร G7 A7 F7 และ B7.....	110

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 สัดส่วนต้นทุนพลังงานในการผลิตแก้วและกระจก.....	4
ภาพที่ 2.2 แสดงสัดส่วนการนำเศษแก้วสีต่างๆ กลับมาใช้ใหม่.....	5
ภาพที่ 2.3 วัฏจักรของเศษแก้วจากขยะบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้ว.....	7
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างอุตสาหกรรมแก้วและกระจก.....	11
ภาพที่ 2.5 สัดส่วนการใช้พลังงานในการผลิตแก้วและกระจก.....	12
ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณเศษแก้วที่ผสมในวัตถุดิบกับพลังงานที่ใช้ ในการหลอมแก้ว.....	16
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างอสังหาริมทรัพย์.....	18
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างผลึก.....	18
ภาพที่ 2.9 ความแตกต่างของลักษณะการแปรผันของปริมาตรจำเพาะต่อ อุณหภูมิของวัสดุที่มีผลึก และไม่มีผลึก	19
ภาพที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของแก้วประเภทต่างๆ.....	20
ภาพที่ 2.11 การเติมโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ที่มีต่อโครงสร้างตาข่ายซิลิเกต.....	21
ภาพที่ 2.12 กราฟ DTA ของแก้ว.....	24
ภาพที่ 2.13 แผ่นรองให้ความร้อนของเตาหุงต้ม Ceran® และ Eurokera®.....	26
ภาพที่ 2.14 จานและภาชนะ Pyroceram®, Corningware® และ Pyrex®.....	27
ภาพที่ 2.15 อุปกรณ์แบกรับน้ำหนัก ระบบท่อและวาล์ว ฉนวนไฟฟ้า Macor®.....	28
ภาพที่ 2.16 กระเบื้องเคลือบเซรามิกที่ผลิตจากการเศษแก้วรีไซเคิลเหลือทิ้ง.....	28
ภาพที่ 3.1 แผนผังการทดลองตอนที่ 2.....	37
ภาพที่ 3.2 แผนผังการทดลองตอนที่ 3.....	39
ภาพที่ 3.3 แผนผังการทดลองตอนที่ 4.....	39
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของเศษแก้วสีเขียว.....	44
ภาพที่ 4.2 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ของแก้วหลังการหลอม.....	46
ภาพที่ 4.3 ลักษณะของแก้วทั้ง 4 สีก่อนและหลังการหลอมที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส.....	48
ภาพที่ 4.4 แก้วหลังการหลอม 16 สูตร ที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลและ ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ.....	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.5 การลากเส้นเลือกอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวและ TiO_2 ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	51
ภาพที่ 4.6 กระบวนการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก.....	52
ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว และอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0-9 โดยน้ำหนัก...	53
ภาพที่ 4.8 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีขาวและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0-9 โดยน้ำหนัก.....	53
ภาพที่ 4.9 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีใสและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0-9 โดยน้ำหนัก.....	54
ภาพที่ 4.10 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วน้ำเงินและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0-9 โดยน้ำหนัก.....	54
ภาพที่ 4.11 กลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G0 ถึง G9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส.....	58
ภาพที่ 4.12 กลาสเซรามิกสีขาวสูตร A0 ถึง A9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส.....	58
ภาพที่ 4.13 กลาสเซรามิกสีใสสูตร F0 ถึง F9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส.....	59
ภาพที่ 4.14 กลาสเซรามิกสีน้ำเงินสูตร B0 ถึง B9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส.....	59
ภาพที่ 4.15 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก (a) 700 (b) 750 และ (c) 800 องศาเซลเซียส.....	61
ภาพที่ 4.16 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G0 ถึง G9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส.....	62
ภาพที่ 4.17 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสีขาวสูตร A5 ถึง A9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส.....	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.18 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสี่ใสสูตร F5 ถึง F9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส.....	63
ภาพที่ 4.19 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสีน้ำเงินสูตร B5 ถึง B9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส.....	63
ภาพที่ 4.20 ผลึกจากการตรวจสอบด้วยออปติคอลลไมโครสโคปกำลังขยาย 60 เท่าของกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G0 ถึง G9 และกลาสเซรามิกสีขาวสูตร A0 ถึง A9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส.....	65
ภาพที่ 4.21 ผลึกจากการตรวจสอบด้วยออปติคอลลไมโครสโคปกำลังขยาย 60 เท่าของกลาสเซรามิกสี่ใสสูตร F0 ถึง F9 และกลาสเซรามิกสีน้ำเงินสูตร B0 ถึง B9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส.....	66
ภาพที่ 4.22 ผลึกจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G7 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส.....	67
ภาพที่ 4.23 ค่าความหนาแน่นของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 16 สูตร.....	70
ภาพที่ 4.24 ค่าความพรุนตัวของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 16 สูตร.....	70
ภาพที่ 4.25 ค่าการดูดซึมน้ำของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 16 สูตร.....	71
ภาพที่ 4.26 ค่าความแข็งของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 16 สูตร.....	71

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Amorphous ออสถฐาน: โครงสร้างของสสารไม่เป็นผลึก

Annealing การอบอ่อน: การลดความเครียดของแก้วเนื่องจากแก้วถูกหลอมที่อุณหภูมิสูงซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวมีการเคลื่อนที่อิสระ ถูกทำให้เย็นตัวลงกลายเป็นแก้วในเวลาอันรวดเร็วทำให้เกิดความเครียดในเนื้อแก้ว แก้วจึงแตกร้าวขึ้น การลดความเครียดของแก้วทำได้โดยให้ความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว

DTA (Differential Thermal Analysis) การวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน: เทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ โดยการตรวจวัดความแตกต่างของอุณหภูมิของวัสดุตัวอย่างเทียบกับวัสดุมาตรฐานในขณะที่เกิดปฏิกิริยา

T_c (crystallization temperature) อุณหภูมิการเกิดผลึก: อุณหภูมิที่วัสดุซึ่งผ่านการแปรรูปเย็นมาก่อนมีแนวโน้มที่จะเกิดผลึก ส่วนใหญ่จะมีค่าประมาณ $1/2$ ถึง $2/3$ เท่าของอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุนั้นในหน่วยสัมบูรณ์

T_g (glass transition temperature) อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว: อุณหภูมิสูงสุดที่แก้วสามารถเปลี่ยนสภาพจากลักษณะแข็งมาเป็นลักษณะของเหลวหนืด สามารถหาได้จากการวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน (DTA)

ที่มา : พจนานุกรมศัพท์วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี, 2547.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยมีปริมาณขยะบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้วหรือเศษแก้วที่ไม่ได้นำกลับมาใช้ซ้ำหรือรีไซเคิลใช้ใหม่ประมาณ 40,000 ตันต่อปี (วรรณมา ต.แสงจันทร์, 2550) โดยเศษแก้วจัดเป็นขยะมูลฝอยที่ไม่เป็นอันตราย ซึ่งปัจจุบันมีการนำเศษแก้วมารีไซเคิลใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วมากขึ้น เพราะเศษแก้วสามารถลดพลังงานในการหลอมได้ แต่เนื่องจากราคาขายของเศษแก้วในปัจจุบันมีราคาต่ำกว่าราคาของขวดแก้ว จึงทำให้ร้านรับซื้อเศษแก้วขาดแรงจูงใจในการขนส่งเศษแก้วไปยังโรงงานหลอมแก้ว ทำให้เศษแก้วบางส่วนไม่ได้นำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกทั้งยังถูกทิ้งกลายเป็นขยะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นทางเลือกหนึ่งในการจัดการเศษแก้วเหล่านี้ คือการนำเศษแก้วมาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ซึ่งเป็นการช่วยลดปริมาณของขยะประเภทแก้ว และยังช่วยลดต้นทุนในการผลิต นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของขยะประเภทแก้วหรือเศษแก้วอีกด้วย ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตแก้วมีการนำเศษแก้วมาใช้ทดแทนวัตถุดิบในการหลอมแก้ว เนื่องจากเศษแก้วช่วยลดพลังงานในการหลอม ซึ่งเป็นเพราะเศษแก้วผ่านการเกิดปฏิกิริยาการหลอมแก้วมาแล้ว ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นถูกใช้หมดไป เศษแก้วจึงหลอมได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง จึงใช้พลังงานในการหลอมแก้วน้อยกว่าการหลอมแก้วจากวัตถุดิบตั้งต้น นอกจากนี้เศษแก้วยังช่วยประหยัดต้นทุนทางด้านวัตถุดิบ เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว เช่น ททรายแก้ว โซดาแอส แรโดโลไมต์ แร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งได้จากการสกัดหินแร่ตามธรรมชาติ หากขุดใช้ในปริมาณมาก จะเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลือง วัตถุดิบและสารเคมีบางอย่างต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

จากการศึกษาการใช้พลังงานในการหลอมแก้วพบว่ากระบวนการหลอมแก้วเป็นตัวแปรสำคัญในการบริโภคพลังงาน ซึ่งพลังงานที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 75 ของพลังงานที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด และการใช้วัตถุดิบตั้งต้นโดยที่ไม่ผสมเศษแก้ว (เศษแก้วร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก) มาหลอมแก้วจะใช้พลังงานในการหลอมแก้วประมาณ 204 กิโลกรัม/ตัน-แก้ว แต่ถ้าใช้เศษแก้วร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มาทดแทนวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการหลอมแก้ว จะใช้พลังงานในการหลอมแก้วประมาณ 172 กิโลกรัม/ตัน-แก้ว ซึ่งการใช้เศษแก้วร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก สามารถลดพลังงานการใช้เชื้อเพลิงประมาณ 32 กิโลกรัม/ตัน-แก้ว การใช้เศษแก้วมารีไซเคิล 1 ตัน จะช่วยประหยัดพลังงานเท่ากับน้ำมัน 136 ลิตรและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 0.32 ตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548) แต่การนำเศษแก้วมาทดแทนวัตถุดิบที่ใช้

หลอมแก้วในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ผลิตภัณฑ์แก้วที่ได้มีปัญหาเรื่องความแข็ง เนื่องจากเศษแก้วมีองค์ประกอบของโซดาแอช (Na_2CO_3) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งเป็นสารช่วยหลอม (Flux) หากมีปริมาณมากเกินไป จะทำให้แก้วมีความเปราะ ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน ดังนั้นแนวทางในการเพิ่มความแข็งของแก้ว คือการนำแก้วไปทำให้เกิดผลึก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า แก้วเซรามิก

แก้วเซรามิกเป็นวัสดุที่มีผลึกขนาดเล็กกระจายอยู่ในเนื้อแก้ว เป็นวัสดุที่ปราศจากรูพรุน จึงมีความแข็งแรง ทนต่อแรงอัดและแรงกระแทกได้ดีกว่าแก้วและเซรามิก (Francis, 2004) ในการผลิตแก้วเซรามิกจะทำการหลอมแก้ว และควบคุมความร้อนให้แก้วเกิดผลึก โดยเศษแก้วมีองค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ดังนั้นจึงสามารถนำเศษแก้วมาทดแทนซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบหลักในการผลิตแก้ว นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการพัฒนาความแข็งของแก้วเซรามิกด้วยการเติมไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ลงในส่วนผสมของแก้วเซรามิก โดยไททาเนียมไดออกไซด์จะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยการเกิดนิวเคลียสทำให้ผลึกเกิดง่ายขึ้น ซึ่งส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดความแข็งมากขึ้น (Jeremy และคณะ, 2006)

ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมโดยการนำเศษแก้วรีไซเคิลที่ได้จากขยะบรรจุภัณฑ์มาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตแก้วเซรามิกและเพิ่มความแข็งของแก้วโดยเปลี่ยนเป็นแก้วเซรามิกที่ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) ซึ่งการนำเศษแก้วมาประยุกต์ใช้นั้นจัดเป็นทางเลือกหนึ่งในการจัดการของเสียประเภทแก้ว นอกจากนี้ยังเป็นการลดพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและลดการเกิดก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อนำเศษแก้วรีไซเคิลมาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตแก้วเซรามิก
2. ศึกษาผลของขนาดเศษแก้วรีไซเคิลและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตแก้วเซรามิก
3. ศึกษาปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ ที่เหมาะสมในการเตรียมแก้วเซรามิก
4. เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำและความแข็ง ลักษณะสมบัติทางเคมี ได้แก่ การทนทานต่อกรดและด่างของแก้วและแก้วเซรามิกที่ได้
5. ตรวจสอบเฟสการเกิดผลึกและโครงสร้างทางจุลภาคของแก้วเซรามิก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เศษแก้วรีไซเคิลที่ใช้ในการทำวิจัยมี 4 สี คือ เศษแก้วสีเขียว เศษแก้วสีชา เศษแก้วสีใส (จากโรงงานบางกอกกกลาส) และเศษแก้วสีน้ำเงิน (จากขวดโพลีเอทิลีน)
2. ศึกษาผลของขนาดเศษแก้วรีไซเคิลที่นำมาใช้ในการวิจัย 3 ขนาด คือ 4-16 เมช (1-4 มิลลิเมตร) 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) และ 32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร)
3. ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้วเพื่อผลิตเป็นกาสเซรามิกที่ช่วงอุณหภูมิ 1200 1250 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส
4. ศึกษาปริมาณของไททานเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมต่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของกาสเซรามิก โดยผสมไททานเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก
5. ศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึกของกาสเซรามิกด้วยเครื่องวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน (Differential Thermal Analysis, DTA)
6. ตรวจสอบการเกิดเฟส และโครงสร้างทางจุลภาคของกาสเซรามิก
7. ศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมี กายภาพ ของแก้วและกาสเซรามิก ได้แก่ ความหนาแน่น ปริมาณการเกิดรูพรุน การดูดซึมน้ำ ความแข็ง การทนทานต่อกรดและด่าง
8. สถานที่ทำการทดลอง คือ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและห้องปฏิบัติการเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการประยุกต์ใช้เศษแก้วรีไซเคิลมาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกาสเซรามิก
2. ได้กาสเซรามิกที่มีสมบัติเชิงกลที่สูงขึ้น
3. เป็นแนวทางหนึ่งสำหรับการจัดการของเสียอุตสาหกรรมประเภทแก้ว
4. เป็นการลดพลังงานและต้นทุนในการผลิตและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า

บทที่ 2

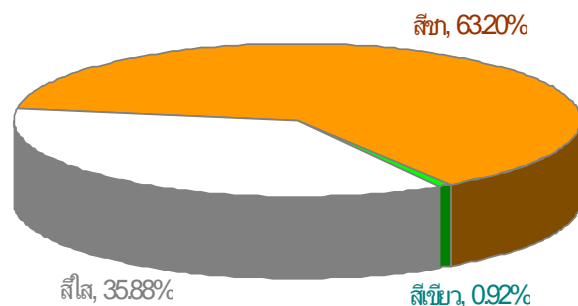
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เศษแก้วรีไซเคิล

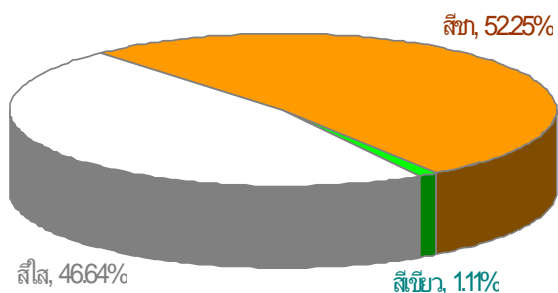
เศษแก้วรีไซเคิลจัดเป็นวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว หมายความว่า สิ่งของที่ไม่ใช้แล้วหรือของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการโรงงานรวมถึงของเสีย จากวัตถุดิบ ของเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์เสื่อมคุณภาพและน้ำทิ้ง ที่มีองค์ประกอบหรือมีคุณลักษณะที่เป็นอันตราย (กระทรวงอุตสาหกรรม การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือ วัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548, 2549)

2.1.1 ชนิดของเศษแก้วรีไซเคิล

เศษแก้วที่พบส่วนใหญ่มี 3 สี คือ เศษแก้วสีใส เศษแก้วสีชา และเศษแก้วสีเขียว ซึ่งเศษแก้วส่วนใหญ่มาจากขยะบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้ว จากการศึกษารัฐจักรของบรรจุภัณฑ์ ประเภทแก้วของสินค้าบริโภคในประเทศไทย พ.ศ. 2550 ดังแสดงในภาพที่ 2.1 พบว่าเศษแก้วสีชา จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 63.20 รองลงมา ได้แก่ เศษแก้วสีใส คิดเป็นร้อยละ 35.88 และเศษแก้วสีเขียว คิดเป็นร้อยละ 0.92 จากภาพที่ 2.2 พบว่าปริมาณบรรจุภัณฑ์แก้วที่ ผลิตได้ในปี พ.ศ. 2550 มากที่สุด ได้แก่ บรรจุภัณฑ์แก้วสีชา คิดเป็นร้อยละ 52.25 รองลงมาได้แก่ บรรจุภัณฑ์แก้วสีใสคิดเป็นร้อยละ 46.64 และบรรจุภัณฑ์แก้วสีเขียวคิดเป็นร้อยละ 1.11 (ปาณัสม์ อังกูรอดิษฐ์ และคณะ, 2551)



ภาพที่ 2.1 สัดส่วนการนำเศษแก้วสีต่างๆ กลับมาใช้ใหม่ (ปาณัสม์ อังกูรอดิษฐ์ และคณะ, 2551)



ภาพที่ 2.2 สัดส่วนบรรพบุรุษที่แกวที่ผลิตขึ้นในปี พ.ศ. 2550
(ปาณัสม์ อังกูรอดิศัย และคณะ, 2551)

จากการศึกษาราคากลางของขยะวีไซเคิล พบว่าเศษแกวสีไสมีราคาสูงกว่าเศษแกวสีอื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นเพราะว่าเศษแกวสีไสไม่มีสารที่ให้สีเจือปน จึงสามารถนำกลับมาใช้หลอมแกวได้ง่ายกว่าเศษแกวสีชาและเศษแกวสีชิว

ตารางที่ 2.1 ราคากลางของขยะวีไซเคิลประเภทเศษแกวสีต่างๆ (วงษ์พานิชย์, 4 มิถุนายน 2552)

เศษแกว	ราคา (บาท/กก.)
สีไส	1.00
สีชา	0.65
สีชิว	0.65
รวมสี	0.65

จากการสอบถามราคาของวัตถุดิบจากสารเคมีที่ใช้ในการผลิตแกวสำหรับใช้ในระดับห้องปฏิบัติการจากบริษัท เซอร์นิก จำกัด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 พบว่าราคาวัตถุดิบที่มาจากสารเคมีมีราคาที่สูงกว่าเศษแกว เนื่องจากวัตถุดิบส่วนใหญ่มาจากแร่ธรรมชาติที่ต้องผ่านกระบวนการทำให้แร่บริสุทธิ์และสารเคมีบางชนิดต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ดังนั้นในการหลอมแกวที่ใช้วัตถุดิบจากสารเคมีจึงมีราคาต้นทุนที่สูงกว่าแกวที่นำเศษแกวมารวม

ตารางที่ 2.2 ราคาเปรียบเทียบของวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้วและราคาของเศษแก้ว

แหล่งที่มาของวัตถุดิบ (1 กิโลกรัม)	สูตร สารประกอบ	¹ ราคาวัตถุดิบ (บาท/กิโลกรัม)	² เศษแก้ว ราคา (บาท/กิโลกรัม)
แร่โดโลไมต์	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	1	0.65-1.00
แร่โซเดียมเฟลด์สปาร์	$\text{NaCaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	15	
หินปูน	CaCO_3	5	
โซดาแอช	Na_2CO_3	20	
ทรายแก้ว	SiO_2	10	
เหล็กออกไซด์	Fe_2O_3	20	
ตะกั่วออกไซด์	PbO	50	
ไททาเนียมไดออกไซด์	TiO_2	150	
เซอร์โคเนียไดออกไซด์	ZrO_2	75	
โครเมียมออกไซด์	Cr_2O_3	360	

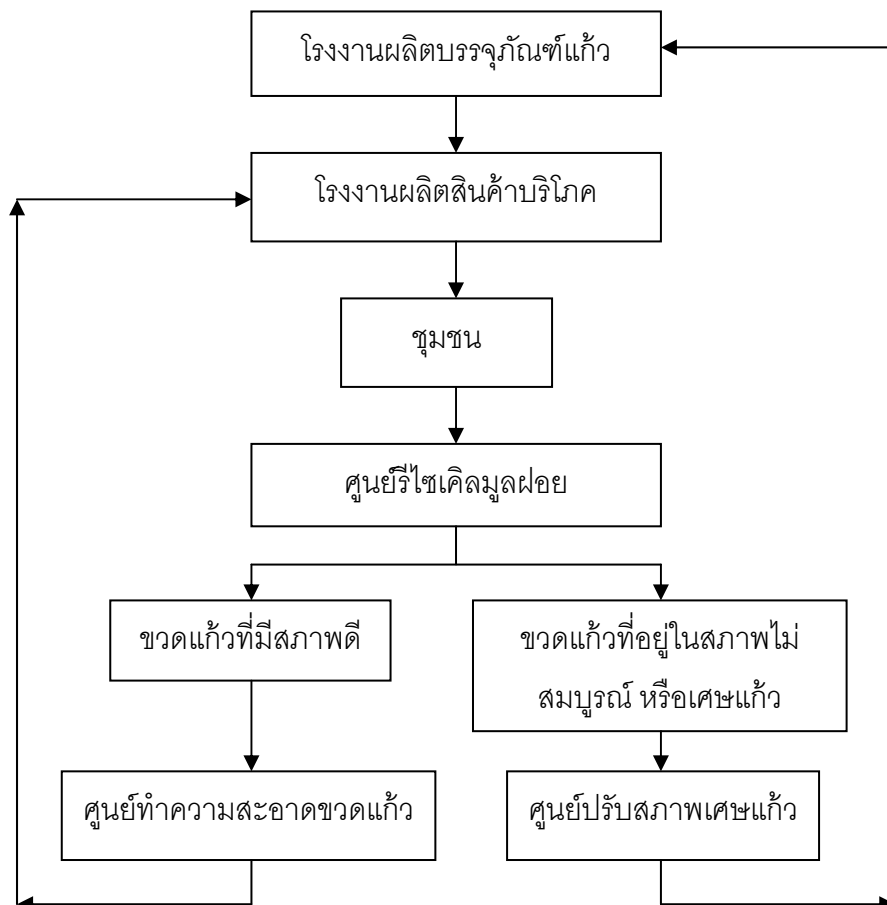
หมายเหตุ: ¹ ข้อมูลจากบริษัท เซอร์นิค จำกัด, 12 กุมภาพันธ์ 2553

² ข้อมูลจากบริษัทวงษ์พาณิชย์, 4 มิถุนายน 2552

2.1.2 วัฏจักรของเศษแก้วจากขยะบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้ว

เมื่อประชาชนบริโภคสินค้าที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้ว ทำให้บรรจุภัณฑ์ประเภทแก้วเหล่านั้นกลายเป็นขยะบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้ว ซึ่งจะถูกส่งไปยังศูนย์รีไซเคิลมูลฝอยเพื่อคัดแยกขวดแก้วที่มีสภาพดีไปยังศูนย์ทำความสะอาดขวดแก้วเพื่อนำขวดแก้วกลับมาทำความสะอาด และตรวจสอบคุณภาพของขวดแก้วก่อนส่งไปจำหน่ายยังโรงงานผลิตสินค้าบริโภค ส่วนขวดแก้วที่อยู่ในสภาพไม่สมบูรณ์ ที่มีรอยแตก หัก บิ่น หรือเศษแก้ว จะนำมาคัดแยกตามสีและส่งไปยังศูนย์ปรับสภาพเศษแก้ว เพื่อนำเศษแก้วมาบด คัดขนาดและคัดสิ่งแปลกปลอม เช่น ฝาขวด โลหะ กระดาษ และฉลากพลาสติก เป็นต้น ออกจากเศษแก้ว จากนั้นนำเศษแก้วที่ผ่านการปรับสภาพ ส่งไปจำหน่ายยังโรงงานผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว เพื่อนำเศษแก้วมาผสมกับวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้ในการหลอมแก้วและเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์แก้ว เพื่อส่งไปจำหน่ายยัง

โรงงานผลิตสินค้าบริโภคให้แก่ประชาชน โดยวัฏจักรของเศษแก้วจากขยะบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้ว แสดงดังในภาพที่ 2.3 (ปานัสม์ อังกูรอดิศัย และคณะ, 2551)



ภาพที่ 2.3 วัฏจักรของเศษแก้วจากขยะบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้ว
(ปานัสม์ อังกูรอดิศัย และคณะ, 2551)

2.1.2.1 กระบวนการทำความสะอาดขวดแก้ว

ขวดแก้วที่มีสภาพดีสมบูรณ์ จะถูกบรรจุมาเป็นถุง หรือเป็นลัง จากนั้นนำไปส่งให้น้ำหนักเพื่อประเมินราคาแยกสี การประเมินราคาจะคิดในสภาพขวดดีร้อยละ 95 และเศษแก้วร้อยละ 5 เนื่องจากมีการเสียหายระหว่างการขนส่ง จากนั้นจะถูกจัดเก็บเข้าโกดังรอผ่านกระบวนการทำความสะอาดดังนี้

- ขวดแก้วจะถูกจัดเรียงเป็นแถว เพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องล้างอัตโนมัติ
- จากนั้นขวดแก้วจะถูกล้างทำความสะอาดด้วยน้ำที่ใช้ในการล้างทำความสะอาดขวดในขั้นตอนสุดท้ายจะถูกนำกลับมาใช้เพื่อนำสิ่งสกปรกต่างๆ ขึ้นตันออก ที่มีอุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส
- ขวดแก้วจะไหลไปตามราง เข้าสู่กระบวนการแช่โซดาไฟ ที่มีอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมินี้ ฉลากต่างๆ ที่ติดมากับขวดจะหลุดออกมา
- ขั้นตอนสุดท้าย ขวดแก้วจะถูกล้างล้างไปล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดอีก 3 ครั้ง
- จากนั้นขวดแก้วที่ผ่านการล้างทำความสะอาดแล้ว จะมีการตรวจสอบคุณภาพ (Quality Control) โดยใช้พนักงาน คัดแยกขวดสกปรก แดก หัก บิ่น หรือไม่ตรงตามความต้องการ ออก แล้วนำไปเก็บไว้เพื่อรอการจำหน่าย

2.1.2.2 กระบวนการปรับสภาพเศษแก้ว

เศษแก้ว หรือขวดแก้วที่มีรอยแตก หัก บิ่น หรืออยู่ในสภาพไม่สมบูรณ์ ที่ถูกล้างมายังโรงงาน จะมีการชั่งน้ำหนักเพื่อประเมินราคา จากนั้นรถตักจะโกยเศษแก้วเหล่านั้นมากองรวมกันไว้ แยกประเภทตามสีต่างๆ คือ สีใส สีชาและสีเขียว เพื่อรอการเข้าสู่กระบวนการบดเศษแก้ว ดังนี้

- นำเศษแก้วใส่ในเครื่องป้อนวัตถุดิบเพื่อเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพเศษแก้ว
- เศษแก้วจะถูกล้างไปตามสายพานผ่านแม่เหล็ก เพื่อดูดโลหะที่ปะปนมากับเศษแก้ว เช่น เหล็ก อลูมิเนียม เป็นต้น
- จากนั้นจะเข้าสู่เครื่องทุบให้แก้วมีขนาดเล็กลงและตีฟาววดหรือจุกที่ติดอยู่ออกจากขวดแก้ว
- เศษแก้วที่มีขนาดเล็กลงจะผ่านไปยังตะแกรงคัดขนาด เพื่อแยกเศษแก้วเป็นขนาดเล็ก กลางและใหญ่
- เศษแก้วที่ผ่านการบดแล้วจะผ่านมายังไซโคลน เพื่อนำขยะพวกกระดาษ พลาสติก และฉลากต่างๆ ออก
- คนงานจะทำการคัดแยก คอขวด ฟาววด จุกและสิ่งแปลกปลอมออกจากเศษแก้ว
- เมื่อผ่านการคัดแยกด้วยมือแล้ว เศษแก้วจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องตรวจโลหะ (metal detector) เพื่อตรวจหาโลหะหรือโลหะที่ยังคงเหลืออยู่ และทำการแยกออกโดยใช้เครื่องแยกอโลหะ (Non-Ferrous Separator) เป็นขั้นตอนสุดท้าย
- เศษแก้วที่ผ่านกระบวนการทั้งหมดจะถูกเก็บไว้เพื่อรอการจำหน่าย

2.1.3 การนำเศษแก้วมารีไซเคิล

การนำเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เป็นการนำขวดแก้วที่มีการแตก หัก ชำรุดหรือเศษแก้วมาใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตแก้วอีกครั้ง เนื่องจากคุณสมบัติของแก้วที่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้ไม่รู้จำกัด สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันมีการนำเศษแก้วกลับมาเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตขวดแก้วเป็นหลักจะมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เป็นอุตสาหกรรมอื่น เช่น กระจก ไฟเบอร์กลาส ตกแต่งชิ้นงาน ผสมยางมะตอยเพื่อเพิ่มความแข็งแรงแก่ร่องให้ถนน ส่วนผสมของกระเบื้องปูพื้น ดังนั้นจะขอกกล่าวถึงเฉพาะในส่วนของการนำเศษแก้วกลับไปหลอมใหม่ในอุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์แก้ว เศษแก้วก่อนที่จะนำเข้าสู่เตาหลอมนั้นจะต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพเศษแก้วก่อน เป็นการนำสิ่งแปลกปลอมออกจากเศษแก้ว เช่น เหล็ก พลาสติก อะลูมิเนียมก่อนจึงจะสามารถนำเข้าสู่เตาหลอมได้

ข้อดีของการนำเศษแก้วมาหลอมใช้ใหม่

1. เศษแก้วช่วยประหยัดต้นทุนทางด้านวัตถุดิบ เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว เช่น ททรายแก้ว โซดาแอส แร่โดโลไมต์ แร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งได้จากการสกัดสินแร่ตามธรรมชาติ หากขุดใช้ในปริมาณมากจะเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างสิ้นเปลืองและวัตถุดิบบางอย่างต้องนำเข้าจากต่างประเทศ
2. เศษแก้วช่วยลดพลังงานในการหลอม เนื่องจากเศษแก้วเคยเกิดปฏิกิริยาการหลอมแก้วมาแล้ว ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีของวัตถุดิบตั้งต้นถูกใช้หมดไป เศษแก้วจึงหลอมได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง จึงใช้พลังงานในการหลอมแก้วน้อยกว่าการหลอมแก้วจากวัตถุดิบตั้งต้น
3. สามารถลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศเนื่องจากการเผาไหม้ในเตาหลอมแก้ว
4. สามารถประหยัดพื้นที่หลุมฝังกลบ เนื่องจากได้นำมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์

ข้อจำกัดของเศษแก้วที่จะนำมาหลอมใช้ใหม่

1. เศษแก้วบางประเภทไม่สามารถนำมาหลอมเป็นแก้วได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน เมื่อนำมาหลอมรวมกันอาจทำให้คุณสมบัติของแก้วเปลี่ยนไป
2. การนำเศษแก้วมาทดแทนวัตถุดิบที่ใช้หลอมแก้วในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ผลิตภัณฑ์แก้วที่ได้มีปัญหาเรื่องความแข็งแรง เนื่องจากเศษแก้วมีองค์ประกอบของโซดาแอส (Na_2CO_3) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซึ่งเป็นสารช่วยหลอม (Flux) หากมีปริมาณมากเกินไปจะทำให้แก้วมีความเปราะ ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

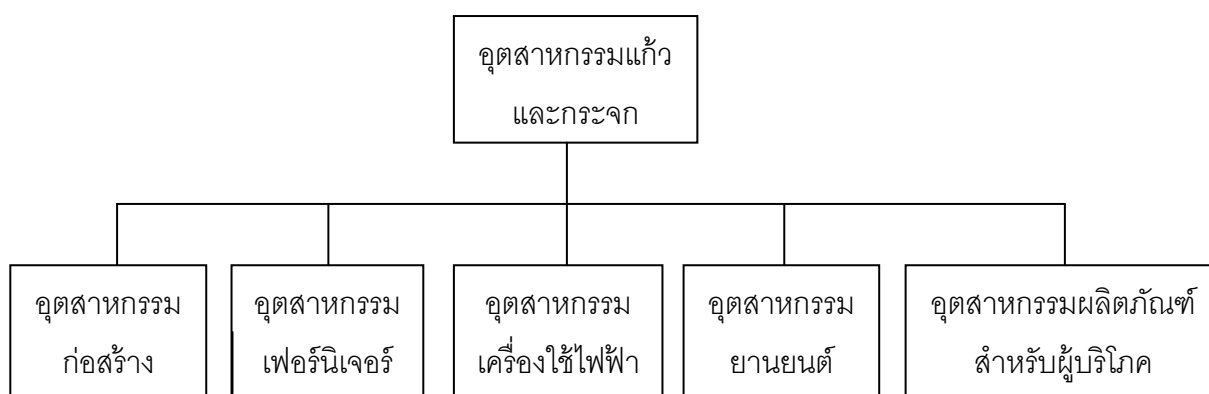
2.1.4 การประยุกต์ใช้ของเศษแก้วรีไซเคิล (วันทนีย์ พุคะคุปต์, 2544)

การนำเศษแก้วรีไซเคิลมาใช้ใหม่ มีด้วยกัน 4 ลักษณะ

1. การนำเศษแก้วรีไซเคิลมาตัดแต่ง ดัดแปลงเป็นหลังคาโอบิสต์
2. ใช้เศษแก้วรีไซเคิลเป็นวัตถุดิบในงานทางวิศวกรรม เช่น
 - ใช้แทนก้อนกรวดหยาบในคอนกรีต
 - ใช้แทนกรวดมวลเบาในการผลิตคอนกรีตก่อสร้าง
 - เป็นส่วนผสมของวัสดุขัดสีต่างๆ อยู่ในภาพของเม็ดแก้ว (Glass beads) ซึ่งใช้ขัดและตกแต่งพื้นผิวชิ้นงานโลหะ
 - ใช้ผสมกับยางมะตอยประมาณร้อยละ 30 เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวถนนและลดการดูดซับความชื้นทำให้แข็งแรงมากขึ้นการดูดซับ
 - เป็นส่วนผสมของกระเบื้องปูพื้นและกระเบื้องบุผนังภายในอาคารบ้านเรือน รวมทั้งอุปกรณ์ตกแต่งบ้านที่ใช้เศษแก้วรีไซเคิลผสมตั้งแต่ร้อยละ 50 ขึ้นไปหรืออาจใช้ถึงร้อยละ 100 ลักษณะที่ได้จะโปร่งแสงหรือโปร่งใสมีความแวววาวต่างจากกระเบื้องทั่วไป กระเบื้องที่มีส่วนผสมของแก้วที่ใช้แล้วหรือทำจากแก้วใช้แล้วจะมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการเสียดสีสูง และสึกกร่อนได้ดี ดูแลรักษาง่าย ดูดซึมน้ำน้อยมากเพียงร้อยละ 0.03
3. ใช้เศษแก้วรีไซเคิลแทนวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเซรามิก
 - ใช้ผสมแทนหินฟันม้าหรือซิลิกาในผลิตภัณฑ์เซรามิก เช่น พอร์ซเลน เพราะนอกจากจะให้ความแข็งแรงและความทนทานแก่ผลิตภัณฑ์แล้ว ยังทำหน้าที่ช่วยเป็นฟลักซ์ช่วยลดจุดสุกตัวของผลิตภัณฑ์ให้ต่ำลง ซึ่งทำให้ประหยัดพลังงาน
4. ใช้เศษแก้วในการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ
 - เศษแก้วรีไซเคิลสามารถทำเป็นโฟมได้โดยการนำแก้วที่ผ่านการบดจนมีขนาดสม่ำเสมอ มาผสมกับดิน หินปูน น้ำและสารก่อโฟม นำไปอัดเป็นแผ่นแล้วนำไปเผา สารก่อโฟมจะกลายเป็นก๊าซขยายตัวและทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อผลิตภัณฑ์ แผ่นแก้วที่มีความพรุนสามารถทนต่อเปลวไฟได้ดี ไม่ละลายน้ำ ทนทานต่อสารเคมีและสามารถตัดเป็นชิ้นส่วนได้ง่ายด้วยเลื่อย นอกจากนี้แผ่นแก้วที่มีความพรุนยังสามารถใช้เป็นฉนวนกันเสียงและกันความร้อน
 - นำเศษแก้วรีไซเคิลมาทำกรวดแก้วเรืองแสงเพื่อความสวยงาม ใช้ในการตกแต่งกระถางต้นไม้หรือใส่ในอ่างปลา โดยนำแก้วมาผสมสารเรืองแสง เช่น ยูเรเนียมออกไซด์ แมงกานีส เป็นต้น ซึ่งสามารถเรืองแสงได้เมื่อถูกแสงอุลตราไวโอเล็ต

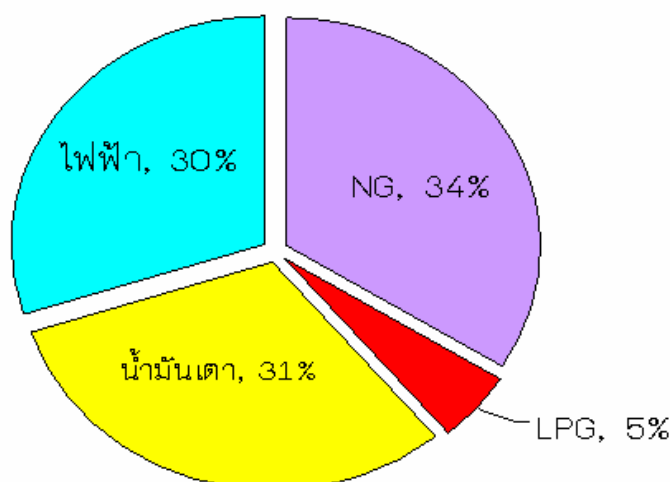
2.2 อุตสาหกรรมแก้วและกระจก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

ภาคอุตสาหกรรมแก้วและกระจกของประเทศไทย สามารถแบ่งตามประเภทผลิตภัณฑ์ได้เป็น 5 อุตสาหกรรมหลักๆ คืออุตสาหกรรมผลิตกระจกแผ่นเรียบ อุตสาหกรรมผลิตขวดแก้ว อุตสาหกรรมผลิตเครื่องแก้ว อุตสาหกรรมผลิตฉนวนใยแก้วและอุตสาหกรรมผลิตแก้วและกระจกประเภทอื่นๆ เช่น กระจกนิรภัย หลอดแก้ว ฯลฯ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมแก้วและกระจกสามารถนำไปใช้เป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานให้กับอุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างอุตสาหกรรมแก้วและกระจก
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

อุตสาหกรรมแก้วและกระจก เป็นอุตสาหกรรมที่บริโภคพลังงานสูง (Energy Intensive Industry) เนื่องจากใน กระบวนการผลิตแก้วและกระจกต้องมีการเดินเครื่องจักรตลอด 24 ชั่วโมง ในปี พ.ศ. 2548 ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption, SEC) ของกระบวนการผลิตแก้วและกระจก มีค่าประมาณ 18.6 และ 10.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และมีปริมาณการใช้พลังงานเทียบเท่า 697 และ 169 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ ตามลำดับ หรือรวมเป็น 866 พันล้านลิตรเทียบเท่าน้ำมันดิบ ต้นทุนพลังงานของ อุตสาหกรรมแก้วและกระจกมีค่าเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30-40 ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด และสัดส่วนการใช้พลังงานใน อุตสาหกรรมแก้วและกระจกจากข้อมูลการผลิตการใช้พลังงานและการอนุรักษ์พลังงานสำหรับโรงงานควบคุมใน ปี พ.ศ. 2548 แสดงดังรูปที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 สัดส่วนการใช้พลังงานในการผลิตแก้วและกระຈก
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

จากการศึกษาการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมแก้วและกระຈกมีการใช้พลังงานที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นกับกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยววัตถุดิบและกระบวนการผลิตแก้วประเภทบรรจุภัณฑ์แก้วก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของการใช้พลังงานในการผลิตแก้ว

2.3 วัตถุดิบในการผลิตแก้ว

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้วมีดังนี้ (Holand และ Beall, 2002)

- ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) หรือทราย (Silica) แก้วที่มีปริมาณของ SiO_2 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนต่อความร้อนและสารเคมี แต่ทำการผลิตได้ยากเนื่องจากต้องใช้การหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้นและขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีความหนืดสูง
- โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) หรือโซดาแอส (Soda Ash) เป็นตัวช่วยให้ทรายหลอมละลายในอุณหภูมิต่ำกว่าเดิม แต่ถ้าใช้โซดาแอสปริมาณมากจะได้แก้วที่เปราะมาก ไม่เหมาะแก่การนำไปใช้งาน ดังนั้นจึงต้องผสมหินปูนเพื่อให้แก้วมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น
- แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) หรือหินปูน (Limestone) หินปูนที่ใช้ต้องบดให้ละเอียดและผสมเข้าไปพร้อมกับทรายและโซดาแอส จะช่วยปรับปรุงสมบัติของแก้วให้ดีขึ้น
- โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม
- แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) หรือ แบเรียมออกไซด์ (BaO) จะช่วยในการขึ้นรูปทำให้แก้วคงตัวเร็วขึ้นเมื่อเย็นลงและเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณแมกนีเซียมออกไซด์มากกว่า

- แคลเซียมออกไซด์ จะทำให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม
6. อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) แก้วที่มีปริมาณ Al_2O_3 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีความทนทานต่อการสึกกร่อนและสารเคมีได้ดีขึ้น
 7. บอริกออกไซด์ (B_2O_3) แก้วที่มีสารประกอบพวกโบรอนเป็นองค์ประกอบ จะมีความคงทนต่อกรด-ด่างและทนต่อความร้อน เนื่องจากจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง แก้วประเภทนี้เป็นแก้วที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเป็นแก้วประเภทที่สามารถใช้ในเตาไมโครเวฟได้
 8. ตะกั่วออกไซด์ (PbO) แก้วที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ เนื้อแก้วใสมากเนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูง มีความอ่อนไม่แข็งกระด้าง ง่ายต่อการเจียรระไน เวลาเคาะจะมีเสียงกังวาน
 9. เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในขณะหลอม แต่จะทำให้เนื้อกระจกใส มีสีค่อนข้างเขียว
 10. ออกไซด์ อื่นๆ หากต้องการให้แก้ว หรือกระจกมีสีอื่นต่างๆ สามารถเติมสารนอกเหนือจากส่วนผสมข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว ดังนี้

โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3)	ให้สีเขียว
เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)	ให้สีอำพัน หรือสีชา
โคบอลออกไซด์ (CoO)	ให้สีน้ำเงิน
ยูเรเนียม (U)	ให้สีเหลือง
นิกเกิล (Ni)	ให้สีน้ำตาล
แมงกานีส (Mn)	ให้สีชมพู
 11. เศษแก้ว (Cullet) มีคุณสมบัติในการช่วยหลอม ทำให้แก้วหลอมได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำลงและช่วยประหยัดพลังงาน

2.4 กระบวนการผลิตแก้ว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

กระบวนการผลิตแก้วแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมและการผสมวัตถุดิบ (Batch & Mixing) เป็นขั้นตอนการนำวัตถุดิบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ทรายแก้ว โซดาแอช หินโดโลไมท์ หินฟันม้าและอื่นๆ วัตถุดิบเหล่านี้หลังจากที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพแล้ว จะถูกนำไปเก็บไว้ในอาคารเตรียมวัตถุดิบ โดยจะแยกตามชนิดของวัตถุดิบ หลังจากนั้นวัตถุดิบเหล่านี้จะถูก นำมาชั่งและนำมาผสมกันในอัตราส่วนตามสูตรการผลิตและถูกสายพานลำเลียงไปเข้าเตาหลอม

2. การหลอมวัสดุดิบ (Melting) ส่วนผสมวัสดุดิบและเศษแก้ว (Cullet) จะถูกหลอมละลายเป็นน้ำแก้ว ด้วยเตาหลอมโดยใช้พลังงานความร้อนจากน้ำมันเตา ก๊าซธรรมชาติ หรือไฟฟ้า ที่อุณหภูมิประมาณ 1300–1500 องศาเซลเซียส
3. การขึ้นรูป (Forming) เป็นการนำน้ำแก้วที่ได้จากการหลอมแล้วมาเข้าเครื่องขึ้นรูปให้ได้ผลิตภัณฑ์แก้วตามที่ต้องการ การขึ้นรูปมีอยู่หลายวิธีตามรูปร่าง ขนาด และชนิดของผลิตภัณฑ์แก้ว
4. การอบอ่อน (Annealing) แก้วที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วจะเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวภายนอกและภายในเนื้อแก้ว ส่งผลให้เกิดความเครียด (Strain) ในเนื้อแก้ว ซึ่งทำให้แก้วเกิดรอยร้าวหรือแตกได้ ดังนั้นจึงต้องมีการอบอ่อนเพื่อลดความเครียด โดยการทำให้แก้วค่อยๆ เย็นตัวลงอย่างช้าๆ
5. การตรวจสอบและบรรจุ (Inspection & Packing) เป็นการนำผลิตภัณฑ์แก้วที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนมาตรวจสอบด้วยสายตาหรือใช้เครื่องจักรในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น รูปทรง รอย ร้าว ความใส หรือข้อบกพร่องอื่นๆ ที่เกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์แก้วขึ้นใหม่ที่ไมผ่านการตรวจสอบจะถูกนำมาบดเป็นเศษแก้วเพื่อใช้เป็นวัสดุดิบในการผลิตต่อไป

2.5 มิติด้านพลังงานในการผลิตแก้ว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

2.5.1 การประเมินพลังงานที่ใช้ในการผลิตแก้ว

จากข้อมูลของการตรวจวัดและการประมวลผลข้อมูลของโรงงานตัวอย่างของอุตสาหกรรมแก้ว สามารถแสดงค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ โดยค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะสามารถคำนวณได้จากปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตหารด้วยปริมาณผลผลิตของกระบวนการนั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งพบว่าในการผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้วมีกระบวนการผลิตที่มีการใช้พลังงานที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการหลอมแก้วเป็นตัวแปรสำคัญในการบริโภคพลังงาน ซึ่งพลังงานที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 75 ของพลังงานที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ซึ่งเท่ากับการใช้เศษแก้วที่ผสมลงในวัสดุดิบ ประมาณร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในอุตสาหกรรมการผลิตแก้วจะมีการใช้เศษแก้วผสมเข้ากับวัสดุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้ว โดยเศษแก้วจะใช้พลังงานในการหลอมน้อยกว่าการหลอมแก้วจากวัสดุดิบตั้งต้น ดังแสดงในภาพที่ 2.6 เนื่องจากเศษแก้วเคยเกิดปฏิกิริยาการหลอมแก้วมาแล้ว ทำให้ปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุดิบตั้งต้นถูกใช้หมดไป ดังนั้นเศษแก้วจึงหลอมได้เร็วขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง

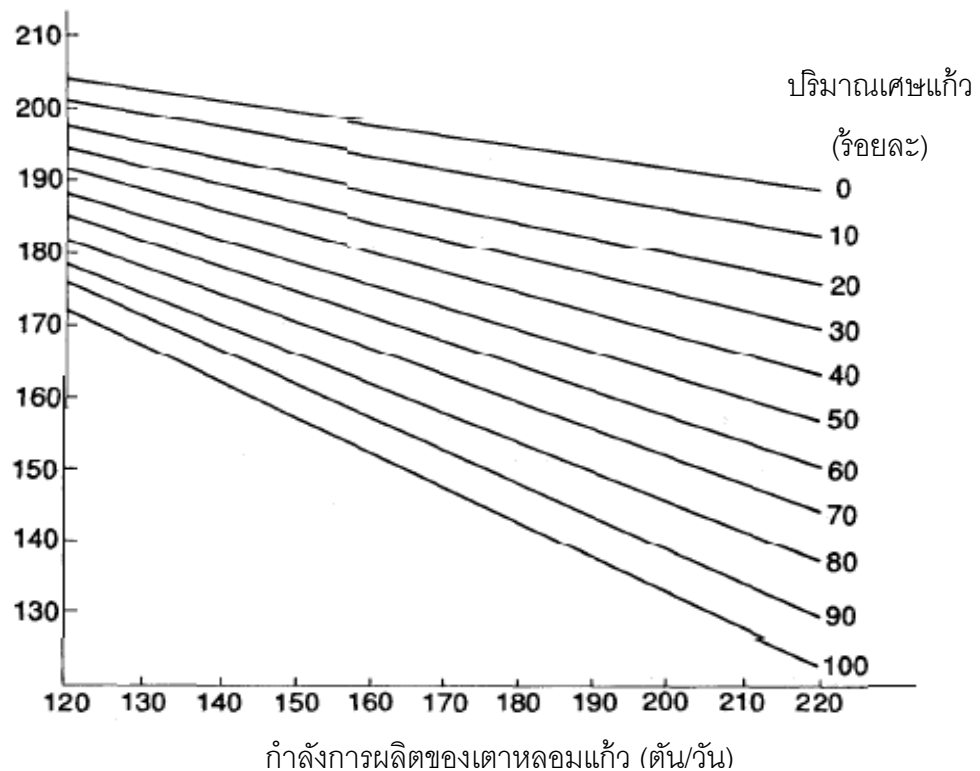
ตารางที่ 2.3 ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะปฐมภูมิของอุตสาหกรรมของแก้วและกระจก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

กระบวนการ	บรรจุก๊าซประเภทแก้ว	
	SEC ไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ตัน)	SEC เชื้อเพลิง (จิกะจูล/ตัน)
การเตรียมวัตถุดิบ	3.14	-
การหลอม	12.31	4.26
การขึ้นรูป	176.31	-
กระบวนการหลังขึ้นรูป	2.40	0.11
รวม	194.16	4.37
*SEC ปฐมภูมิ (จิกะจูล/ตัน)	5.92	
ร้อยละของเศษแก้ว	70	
กำลังการผลิตของเตาหลอม แก้ว (ตัน/วัน)	300	

หมายเหตุ *SEC (Specific Energy Consumption) ค่าดัชนีการบริโภคพลังงานจำเพาะ

จากภาพที่ 2.6 พบว่าการใช้วัตถุดิบตั้งต้นโดยที่ไม่ผสมเศษแก้ว (เศษแก้วร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก) มาหลอมแก้วจะใช้พลังงานในการหลอมแก้วประมาณ 204 กิโลกรัม/ตัน-แก้ว แต่ถ้าใช้เศษแก้วร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มาทดแทนวัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการหลอมแก้ว จะใช้พลังงานในการหลอมแก้วประมาณ 172 กิโลกรัม/ตัน-แก้ว ซึ่งการใช้เศษแก้วร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก สามารถลดพลังงานการใช้เชื้อเพลิงประมาณ 32 กิโลกรัม/ตัน-แก้ว โดยกำลังการผลิตแก้วเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับพลังงานในการหลอมแก้ว คือ ถ้าโรงงานผลิตแก้วใช้เตาหลอมแก้วที่มีกำลังการผลิตสูงจะใช้พลังงานในการหลอมแก้วที่น้อยกว่าเตาหลอมแก้วที่มีกำลังการผลิตต่ำ เนื่องจากเตาหลอมแก้วที่มีกำลังการผลิตสูงสามารถหลอมแก้วได้ในปริมาณมากๆ พร้อมกันในการหลอมหนึ่งครั้ง แต่ถ้าใช้เตาหลอมแก้วที่มีกำลังการผลิตต่ำมาหลอมแก้วในปริมาณที่เท่ากับเตาหลอมแก้วที่มีกำลังการผลิตสูง จะต้องใช้จำนวนครั้งในการหลอมแก้วที่มากกว่า จึงมีการใช้พลังงานในการหลอมแก้วที่สูงกว่าเตาหลอมแก้วที่มีกำลังการผลิตสูง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

ปริมาณเชื้อเพลิง (กิโลกรัม/ตัน-แก้ว)



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณเศษแก้วที่ผสมในวัตถุดิบกับพลังงานที่ใช้ในการหลอมแก้ว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

2.5.2 การใช้เศษแก้วในการลดพลังงานในการหลอมแก้ว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548)

เศษแก้วส่วนใหญ่มาจาก 2 แหล่ง คือ เศษแก้วจากภายในซึ่งเป็นเศษแก้วที่เสียจากกระบวนการผลิตและเศษแก้วจากภายนอกซึ่งเป็นเศษแก้วจากการรีไซเคิลของกระจกหรือบรรจุภัณฑ์แก้ว การใช้เศษแก้วรีไซเคิลในการหลอมแก้วนั้น เป็นหนึ่งในวิธีการที่ทำให้การใช้พลังงานในเตาหลอมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปใช้ได้กับเตาหลอมทุกชนิด ไม่ว่าจะเป็นเตาหลอมที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เตาหลอมที่ใช้เชื้อเพลิงออกซิเจนและเตาหลอมที่ใช้ไฟฟ้า แต่โดยส่วนมากแล้วโรงงานผลิตแก้วและกระจกต่างก็มีการใช้การรีไซเคิลเศษแก้วที่เสียจากแต่ละกระบวนการเป็นเศษแก้วภายใน (Internal cullet) โดยทั่วไปแล้วระดับการใช้เศษแก้วภายในจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 10-25 ต่อการผลิตแต่ละครั้ง ส่วนการผลิตบรรจุภัณฑ์แก้วมีอัตราการนำกลับมารีไซเคิลสูงกว่าการผลิตกระจกแผ่น จึงมีอัตราการนำเศษแก้วมารีไซเคิลสูงตามไปด้วย โดยมีความแปรผันตั้งแต่น้อยกว่าร้อยละ 20 จนถึงมากกว่าร้อยละ 90

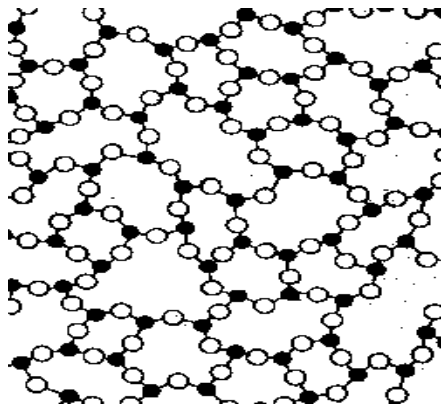
เศษแก้วรีไซเคิลนั้นต้องการพลังงานในการหลอมเหลวต่ำกว่าการหลอมวัตถุดิบในปริมาณที่เท่ากัน เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดความร้อนเชิงเคมี (endothermic chemical reactions) ในระหว่างการผลิตแก้ว นอกจากนี้ยังมีมวลต่ำกว่าประมาณร้อยละ 20 ดังนั้น การเพิ่มอัตราส่วนของเศษแก้วรีไซเคิล ทำให้เกิดการประหยัดพลังงานได้อย่างมีศักยภาพ โดยมีกฎโดยทั่วไปว่า ในการเพิ่มอัตราส่วนเศษแก้วรีไซเคิลร้อยละ 10 จะทำให้เกิดการลดการบริโภคพลังงานในเตาหลอมได้ร้อยละ 2.5-3.0 ดังนั้นการรีไซเคิลแก้ว 1 ตัน จะช่วยประหยัดพลังงานเท่ากับน้ำมัน 136 ลิตรและลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ถึง 0.32 ตัน แต่ถ้ามีการรีไซเคิลแก้ว 1 ใบ สามารถเทียบเท่ากับปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กับคอมพิวเตอร์นาน 25 นาที หรือสามารถประหยัดพลังงานเพียงพอที่จะให้แสงสว่างกับหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ได้ถึง 4 ชั่วโมง หรือประหยัดไฟฟ้าเท่ากับการชมโทรทัศน์ 1 ชั่วโมงครั้งเดียว ซึ่งในการใช้เศษแก้วรีไซเคิลนี้ นอกจากจะช่วยประหยัดทางด้านการใช้พลังงาน เนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่ลดลงและความร้อนที่ต้องการในเตาหลอมและการอุ่นลดลง แล้วยังส่งผลช่วยในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และฝุ่นออกมาสู่บรรยากาศในปริมาณมากอีกด้วย ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน

2.6 แก้ว

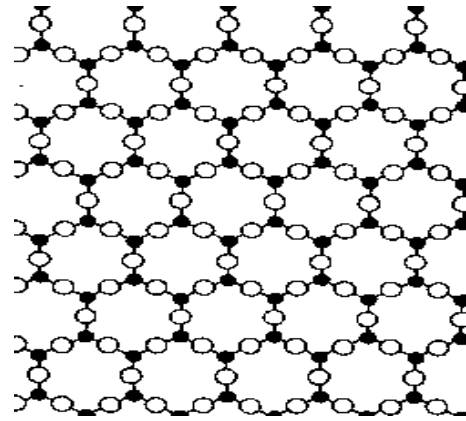
2.6.1 ลักษณะทั่วไปของแก้ว

แก้วเป็นวัสดุอสัณฐานซึ่งเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูงและเมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่ตกผลึก มีลักษณะโปร่งใส ผิวค่อนข้างแข็ง ยากแก่การกัดกร่อน เชื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ อย่างไรก็ตามแก้วนั้นถึงแม้จะแข็ง แต่ก็เปราะแตกหักง่าย แก้วส่วนใหญ่หรือแก้วโซดาไลม์ ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ ทราย ซิเดาแอช หินปูน เป็นแก้วราคาถูก หลอมละลายง่าย พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่ แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระบอก เป็นต้น (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)

วัสดุอสัณฐาน หมายถึง วัสดุที่มีโครงสร้างไม่เป็นระเบียบหรือไม่เป็นผลึก (Non-Crystalline Solid) โดยทั่วไปแก้วจะอยู่ในสภาพของโครงสร้างซิลิเกต (SiO₄)⁴⁻ ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบตาข่ายที่มีการจัดเรียงตัวไม่แน่นอน ทำให้โครงสร้างไม่เป็นระเบียบ เปราะและแตกง่าย ส่วนโครงสร้างที่เป็นผลึก (Crystal Structure) มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและเป็นในลักษณะเดียวกันตลอดทั้งโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างเป็นระเบียบและแข็งแรง สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่า ดังภาพที่ 2.7 และภาพที่ 2.8 (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างอสัณฐาน
(Amorphous Structure)
(Simmons และคณะ, 1981)

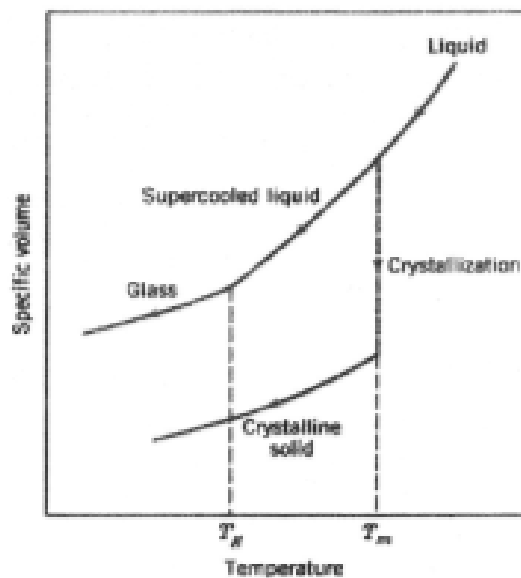


ภาพที่ 2.8 โครงสร้างผลึก
(Crystal Structure)
(Simmons และคณะ, 1981)

2.6.2 สมบัติของแก้ว (วิลเลียมส์ และคาลิสเตอร์, 2548)

2.6.2.1 จุดหลอมเหลว และความหนืดของแก้ว

ในการผลิตแก้วต้องศึกษาสมบัติของแก้วก่อน โดยสมบัติของแก้วส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งแก้วเป็นวัสดุที่ไม่มีผลึก มีลักษณะการแข็งตัวแตกต่างจากวัสดุที่มีผลึก ในช่วงการเย็นตัว แก้วที่เป็นของเหลวจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง ไม่มีอุณหภูมิที่ชัดเจนที่จะมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็งดังในวัสดุที่มีผลึก ความแตกต่างที่ชัดเจนอย่างหนึ่งระหว่างวัสดุที่มีผลึกและไม่มีผลึก คือ การเปลี่ยนแปลงปริมาตรจำเพาะ (ปริมาตรต่อมวล ซึ่งเป็นส่วนกลับของความหนาแน่น) กับอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพ 2.9 สำหรับวัสดุที่มีผลึกการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรจะไม่ต่อเนื่อง ณ อุณหภูมิการหลอมเหลว แต่สำหรับวัสดุประเภทแก้วนั้น ปริมาตรจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังได้เห็นจากการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟในช่วงอุณหภูมิที่เรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) ณ อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมินี้ วัสดุที่ได้เรียกว่า แก้ว (Glass) ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะเรียกว่าเป็นของเหลวเย็นตัวยิ่งยวด (Supercooled liquid) และที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกเรียกว่าเป็นของเหลว (Liquid)

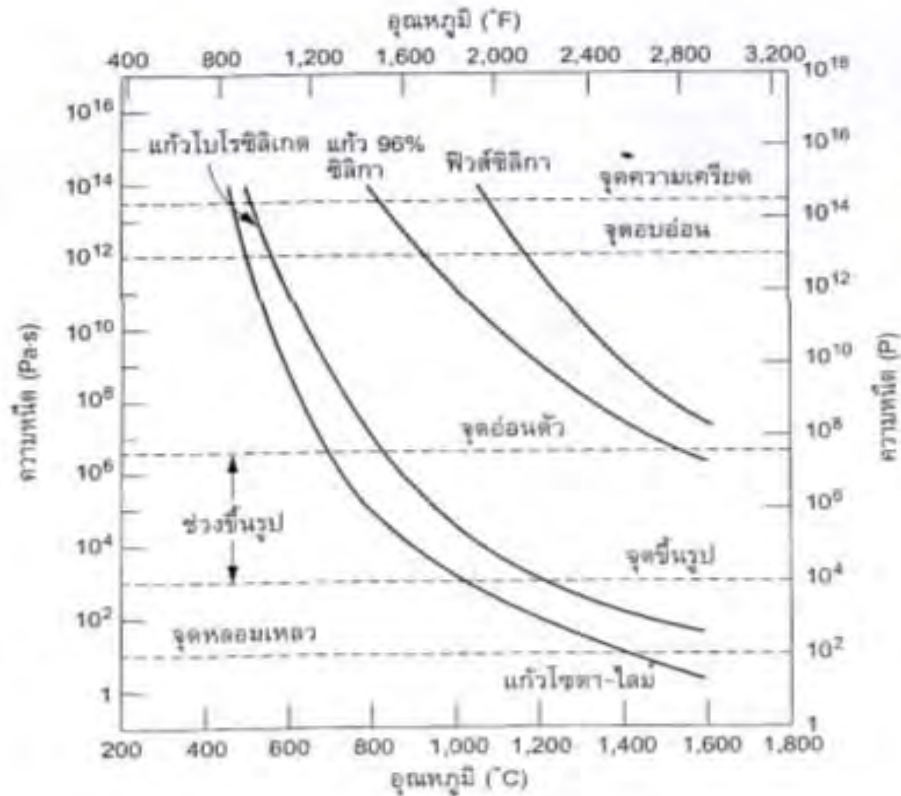


ภาพที่ 2.9 ความแตกต่างของลักษณะการแปรผันของปริมาตรจำเพาะต่ออุณหภูมิของวัสดุที่มีผลึกและไม่มีผลึก (วิลเลียมส์ และคาลิสเตอร์, 2548)

การขึ้นรูปแก้วนั้น จำเป็นต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิสำหรับแก้วชนิดนั้นๆ ภาพที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเนื้อแก้วที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งในแกนของค่าความหนืด มีจุดสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการขึ้นรูปดังนี้

1. จุดหลอมเหลว (Melting Point) เป็นอุณหภูมิที่แก้วมีค่าความหนืด 10 พาสคัล.วินาที (Pa-s) แก้วมีความหนืดต่ำเป็นของไหลเรียกได้ว่าเป็นของเหลวโดยสมบูรณ์
2. จุดขึ้นรูป (Working Point) เป็นอุณหภูมิที่มีค่าความหนืดเท่ากับ 10^3 พาสคัล.วินาที (Pa-s) สามารถขึ้นรูปแก้วได้โดยง่ายที่ค่าความหนืดนี้
3. จุดอ่อนตัว (Softening Point) เป็นอุณหภูมิที่มีค่าความหนืดเท่ากับ 10^6 พาสคัล.วินาที (Pa-s) เป็นอุณหภูมิสูงสุดที่แก้วจะสามารถถูกจับเคลือบเคลือบได้โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง
4. จุดอบอ่อน (Annealing Point) เป็นอุณหภูมิที่มีค่าความหนืดเท่ากับ 10^{12} พาสคัล.วินาที (Pa-s) ที่อุณหภูมินี้มีการแพร่ของอะตอมเป็นไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้นความเค้นตกค้างจะถูกกำจัดไปอย่างรวดเร็วภายในเวลา 15 นาที

5. จุดแข็งตัว (Strain Point) เป็นอุณหภูมิที่มีค่าความหนืดเท่ากับ 3×10^{13} พาสคัล.วินาที (Pa-s) สำหรับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดแข็งตัว แก้วจะมีการแตกหักเมื่อถูกแรงกระทำ อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วจะอยู่สูงกว่าอุณหภูมินี้



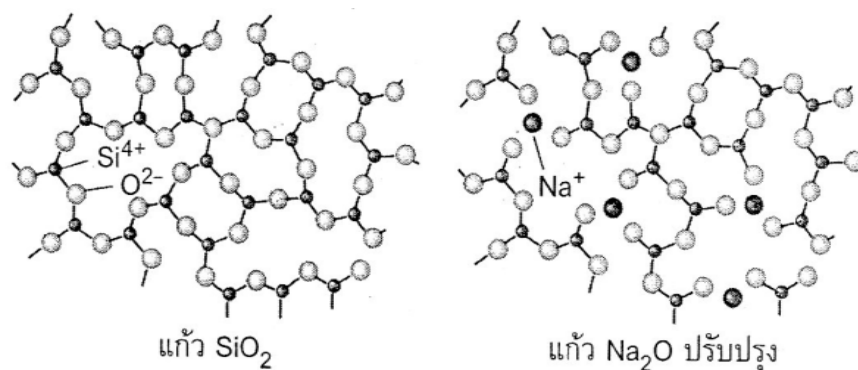
ภาพที่ 2.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของแก้วประเภทต่างๆ

(วิลเลียมส์ และคาลิสเตอร์, 2548)

การขึ้นรูปแก้วส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่อ่อนตัวและจุดอ่อนตัว โดยอุณหภูมิจุดขึ้นรูปจะขึ้นอยู่กับส่วนผสมของแก้วเป็นหลัก แก้วนั้นผลิตโดยการให้ความร้อนแก้ววัตถุดิบจนเกิดการหลอมเหลว แก้วต่างๆ โดยทั่วไปเป็นแก้วที่มีส่วนผสมจากซิลิกา โซดาและไลม์ ซึ่งซิลิกาได้มาจากทรายควอตซ์ ส่วนโซดา (Na_2O) และไลม์ (CaO) ได้มาจากแอส (Na_2CO_3) และหินปูน (CaCO_3) ในการใช้งานส่วนใหญ่จะคำนึงถึงความโปร่งใสของเนื้อแก้ว ดังนั้นการผลิตจำเป็นต้องควบคุมให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อเดียวและปราศจากรูพรุน การทำให้นเนื้อเดียวกันอย่างสมบูรณ์นั้นต้องได้จากการผสมและหลอมเหลววัตถุดิบที่สมบูรณ์ จึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อเดียวอย่างสมบูรณ์ รูพรุนอาจเกิดขึ้นจากฟองก๊าซที่เกิดขึ้นในช่วงการผลิต ฟองก๊าซเหล่านี้จะต้องถูกกำจัดออกโดยการควบคุมความหนืดของเนื้อแก้วให้เหมาะสม

2.6.2.2 การลดจุดหลอมเหลว และความหนืดของแก้ว

โครงสร้างของแก้วส่วนใหญ่จะมีความหนืดสูงมาก เนื่องจากมีพันธะระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนซึ่งเป็นหน่วยย่อยของโครงสร้างที่สั้น ทำให้ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงมีการเติมสารบางชนิดเข้าไปในออกไซด์บริสุทธิ์ของแก้ว เพื่อเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูป สารเหล่านี้เรียกว่า ตัวปรับปรุงตาข่าย (Network modifier) จำพวกแอลคาไลน์เอิร์ทออกไซด์ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น สารเหล่านี้จะทำให้ตาข่ายของแก้วบางส่วนแตกออก ดังแสดงในภาพที่ 2.11 และช่วยให้ความหนืดลดลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะอะตอมของออกซิเจนจากออกไซด์เหล่านี้จะเข้าสู่โครงสร้างตาข่ายของซิลิกาที่จุดเชื่อมต่อระหว่างรูปทรงสี่หน้า ทำให้ตาข่ายถูกทำลายไปและทำให้อะตอมของออกซิเจนมีอิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ ส่วนไอออนของโซเดียม (Na^+) จะไม่สามารถเข้าไปในโครงสร้างของตาข่ายนั้นได้ แต่ยังคงอยู่ในรูปของไอออนและเกิดพันธะไอออนิกภายในช่องของโครงสร้างตาข่ายนั้น การปรับปรุงโดยโซเดียมออกไซด์นี้จะทำให้จุดหลอมเหลวและความหนืดของซิลิกาตกลง



ภาพที่ 2.11 การเติมโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ที่มีต่อโครงสร้างตาข่ายซิลิกา
(ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)

2.6.3 สมบัติทางกลของแก้ว (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)

แก้วเป็นวัสดุที่เปราะ ซึ่งความแข็งของแก้วขึ้นกับขนาดของรอยแตก ร้าว ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความแข็งของแก้วชนิดต่างๆ ค่าความแข็งของซิลิกาบริสุทธิ์จะมีค่าประมาณ 6 กิกะปาสคาล (Gpa) และค่าความแข็งของแก้วของกลุ่มซิลิกาจะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 30 ของค่านี้ ซึ่งแก้วโซดา-ไลม์-ซิลิกา (Soda-lime-silica) มีค่าความแข็งประมาณ 4.5 กิกะปาสคาล

ตารางที่ 2.4 ค่าความแข็งของแก้วชนิดต่าง ๆ (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)

แก้ว	ความแข็ง (กิกะปาสคาล,Gpa)
SiO ₂	6.2
โซดา-ไลม์-ซิลิกา (Soda-lime-silica)	4.5
12.5Na ₂ O-17.5CaO ₂ -70SiO ₂	5.5
37MgO-13Al ₂ O ₃ -50SiO ₃	6.6
30Na ₂ O-70B ₂ O ₃	4.7
โซเดียมโบโรซิลิเกต (Sodium Borosilicate)	4.1

2.7 วัสดุกลาสเซรามิก (glass ceramic)

2.7.1 ลักษณะทั่วไปของกลาสเซรามิก

กลาสเซรามิกคือแก้วที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการเกิดผลึกในเนื้อแก้ว โดยกลาสเซรามิกประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นแก้ว (Glass) และส่วนที่เป็นผลึก (Polycrystalline) อยู่ในตัวของวัสดุชิ้นเดียวกัน ซึ่งมีขนาดของผลึกที่เล็กและสม่ำเสมอกระจายตัวอยู่ในเมทริกที่เป็นแก้ว เป็นวัสดุที่ปราศจากรูพรุนซึ่งทำให้มีสมบัติเชิงกลเช่นทนต่อแรงกระแทกและแรงอัดได้ ทำให้มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากแก้วโดยทั่วไปที่เป็นวัสดุที่มีความใสและแข็งเปราะและแตกต่างจากเซรามิกที่มีความเป็นพหุผลึกทั้งหมด (Holand และ Beall, 2002)

2.7.2 ความแตกต่างระหว่างแก้วและเซรามิก

แก้วเป็นวัสดุอสัณฐานซึ่งเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง เมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่ตกผลึก มีลักษณะโปร่งใส ผิวค่อนข้างแข็ง ยากแก่การกัดกร่อน เฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพ อย่างไรก็ตาม แก้วนั้นถึงแม้จะแข็ง แต่ก็เปราะแตกหักง่าย แก้วส่วนใหญ่หรือแก้วโซดาไลม์ ผลิตจากวัตถุดิบหลัก

คือ ททราย โซดาแอช หินปูน เป็นแก้วราคาถูก หลอมละลายง่าย พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่ แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ กระຈก เป็นต้น (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549)

เซรามิกหมายถึงวัสดุที่เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่ไม่ใช่โลหะ ซึ่งกรรมวิธีการผลิตต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง โดยผลิตจากวัตถุดิบที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น ดินต่างๆ เฟลด์สปาร์ ควอตซ์ และทรายทะเล เป็นต้น ได้แก่ เครื่องปั้นดินเผา วัตถุทนไฟ ซีเมนต์ เป็นต้น (ปรีดา พิมพ์ขาวขำ, 2539)

2.7.3 วัตถุดิบในการผลิตกลาสเซรามิก

กลาสเซรามิกจัดเป็นแก้วประเภทหนึ่งที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ผสมอยู่เล็กน้อยซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการเกิดผลึกในเนื้อแก้ว ดังนั้นการผลิตกลาสเซรามิกจะใช้วัตถุดิบชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในการหลอมแก้ว ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3

2.7.4 กระบวนการผลิตวัสดุกลาสเซรามิก

กระบวนการผลิตวัสดุกลาสเซรามิกแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ

ขั้นที่ 1 การหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1600 องศาเซลเซียส โดยใช้วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการหลอมแก้ว ซึ่งจะได้แก้วที่มีลักษณะใสและเป็นวัสดุอัญฐาน

ขั้นที่ 2 การนำแก้วที่ได้ไปผ่านกระบวนการควบคุมการให้ความร้อน (Heat treatment) เพื่อให้แก้วเกิดผลึก โดยอุณหภูมิของความร้อนที่ให้นั้นต้องเป็นอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน (Differential thermal analysis, DTA) โดยที่ขนาดและประเภทของผลึกจะถูกควบคุมโดยกระบวนการให้ความร้อนซึ่งประกอบไปด้วยอุณหภูมิ เวลา และอัตราเร็วในการให้ความร้อนและการเย็นตัวกับชิ้นงานเพื่อเปลี่ยนจากวัสดุแก้วให้เป็นกลาสเซรามิก กระบวนการทางความร้อนเหล่านี้มีผลต่อสมบัติต่างๆ ที่เกิดขึ้นเช่น สมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ทางไฟฟ้า ทางอุณหภูมิจึงและเชิงกล (Karamberi และคณะ, 2007)

2.7.4.1 ขั้นตอนในการเกิดผลึก (Crystallization)

ขั้นตอนในการเกิดผลึกประกอบด้วย 2 ขั้นตอน (Holand และ Beall, 2002)

ขั้นที่ 1 การสร้างนิวเคลียส (Nucleation)

มีลักษณะการเกิดได้ 2 แบบ คือ Homogeneous Nucleation เป็นการเกิดนิวเคลียสโดยการเกาะของกลุ่มอะตอมภายในเนื้อแก้วโดยปราศจากตัวช่วยและ Heterogeneous

Nucleation เป็นการเกิดนิวเคลียสโดยที่มีตัวช่วยการเกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) เช่นไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2)

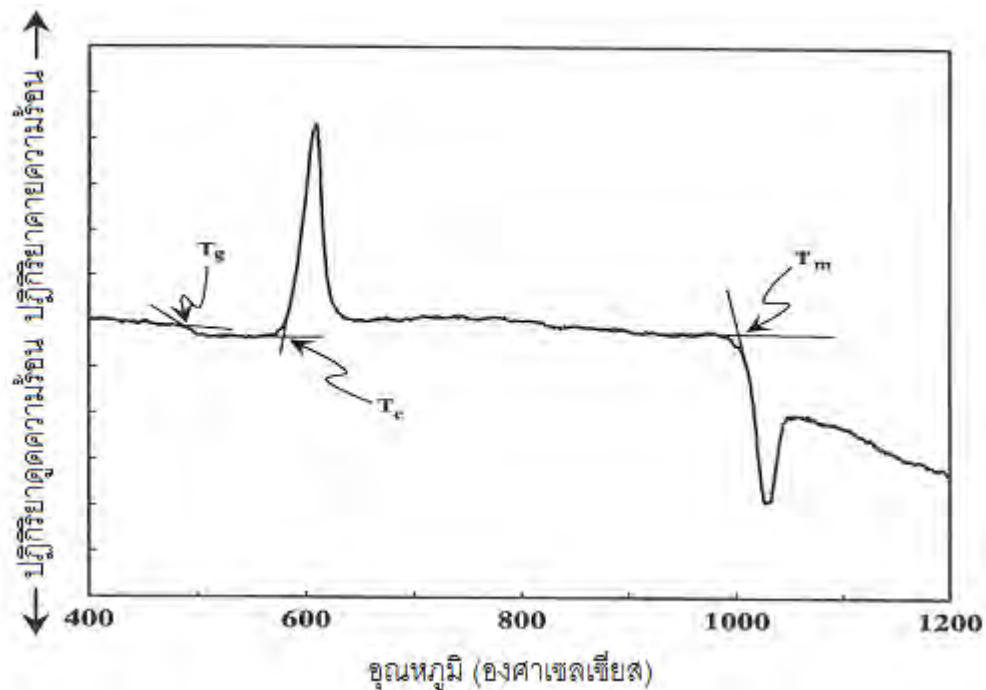
ขั้นที่ 2 การโตของผลึกรอบๆ นิวเคลียส (Crystal Growth)

เมื่อเกิดการสร้างนิวเคลียสแล้วนิวเคลียสจะค่อยๆ โตจนกลายเป็นผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ

2.7.4.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมการเกิดผลึก

อุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมการเกิดผลึกมี 3 ประเภทคือ (Atkinson และ McMillan, 1976)

1. อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (Glass Transition Temperature, T_g) คืออุณหภูมิสูงสุดที่เปลี่ยนสภาพจากลักษณะของแข็งของแก้วมาเป็นของเหลวที่มีความหนืดโดยผ่านกระบวนการดูดความร้อน
2. อุณหภูมิการเกิดผลึก (Crystallization Temperature, T_c) คืออุณหภูมิที่เกิดกระบวนการคายความร้อนเนื่องจากเกิดการสร้างผลึกขึ้น
3. อุณหภูมิการหลอมผลึก (Melting Temperature, T_m) คืออุณหภูมิที่หลอมละลายของผลึกเนื่องจากเกิดกระบวนการดูดความร้อน



ภาพที่ 2.12 กราฟ DTA ของแก้ว (Atkinson และ McMillan, 1976)

จากภาพที่ 2.12 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (T_g) ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เปลี่ยนจากสภาพแก้วมาเป็นของเหลวหนืดและที่ช่วงอุณหภูมิ 580–650 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิของการเกิดผลึก (T_c) โดยที่นิวเคลียสเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 580 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนนิวเคลียสจะค่อยๆ โตจนกลายเป็นผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ หลังจากนั้นเมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงประมาณ 1130 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิการหลอมของผลึก (T_m) ผลึกจะหลอมละลายที่อุณหภูมิสูงกว่า T_m จะไม่มีการเกิดของนิวเคลียสขึ้น

2.8 การวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน

การวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน (Differential Thermal Analysis, DTA) เป็นการวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อนของวัสดุ โดยวัดออกมาในรูปของอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างสารตัวอย่างกับสารอ้างอิงในระหว่างให้ความร้อนอุณหภูมิจนของตัวอย่างเปลี่ยนแปลงในลักษณะการดูด (Endothermic) หรือการคายความร้อน (Exothermic) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน (Enthalpic Transition) (John, 1986)

2.8.1 การวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน ประกอบด้วย

1. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) นิยมใช้ Pt – Pt/Rh หรือ Ni – Ni/Cr เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 – 0.3 มิลลิเมตร
2. ถ้วยใส่ตัวอย่างและสารอ้างอิงทำจากวัสดุที่มีสมบัติเฉื่อยต่อการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิที่ทดลองและมีค่าความสามารถในการนำความร้อน (Thermal Conductivity) สูง เพื่อให้สามารถนำความร้อนสู่ตัวอย่างหรือสารอ้างอิงได้ดี
3. ห้องควบคุมบรรยากาศในการทดลอง

2.8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์

1. อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 2–20 องศาเซลเซียส/นาที การเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะลด Resolution แต่จะเพิ่มพื้นที่ของกราฟ (Peak) ส่วนการลดอัตราในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะลดพื้นที่ของกราฟ
2. ปริมาณและสภาพของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองของ DTA จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการคายน้ำ (Dehydration) และปฏิกิริยาการเกิดผลึก (Recrystallisation) ที่แตกต่างกัน การเพิ่มปริมาณของตัวอย่างจาก 12 มิลลิกรัม เป็น 43 มิลลิกรัม อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาการคายน้ำ จะเพิ่มขึ้น 45 องศาเซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิที่เกิดจากการเกิดผลึกเพิ่มขึ้นเพียง 5 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของตัวอย่างทำให้พื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นด้วย ขนาด

อนุภาค (Particle Size) การอัดแน่น (Packing) และความหนาแน่น (Density) ของตัวอย่างมีผลต่อความสามารถในการนำความร้อนของตัวอย่างซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งและแก๊ส (Solid–Gas Reaction)

3. การเลือกสารอ้างอิง ควรมีสสมบัติทางความร้อน (Specific heat, Conductivity) ใกล้เคียงกับสารตัวอย่างและควรเป็นสารเฉื่อยในทุกช่วงอุณหภูมิของการทดลองนิยมใช้อะลูมินา (Alumina) เป็นสารอ้างอิง สารอ้างอิงที่เป็นของเหลวจะใช้เมื่อตัวอย่างเป็นของเหลว เช่น พาราฟินเหลว (liquid paraffin)

2.9 อุตสาหกรรมวัสดุกระจกセラ믹 (Holand และ Beall, 2002)

ในปัจจุบันโดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกาและกลุ่มสหภาพยุโรป มีการนำวัสดุกระจกセラ믹มาประยุกต์ใช้ในงานหลากหลายด้านเช่น ภาชนะทนความร้อน แผ่นรองให้ความร้อนของเตาหุงต้ม วัสดุทางการแพทย์เช่น ฟันเทียม กระดูกเทียมซึ่งมีการปรับปรุงสมบัติให้เข้ากับร่างกายได้ การนำมาใช้ในวงจรไฟฟ้า เช่น ฉนวนและแผ่นรองวงจรไฟฟ้า เป็นต้น

วัสดุกระจกセラ믹ทางการแพทย์ที่เป็นที่รู้จักและมีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น

2.9.1 แผ่นรองให้ความร้อนของเตาหุงต้มในครัวเรือนสมัยใหม่ ใช้ชื่อทางการค้าว่า Ceran® และ Eurokera® มีคุณสมบัติเด่นทั่วไปคือป้องกันการขีดข่วน มีผิวที่เรียบ ปราศจากรูพรุน ทำความสะอาดพื้นผิวได้ง่าย ทำให้ผิวที่ปรากฏมีลักษณะเหมือนใหม่อยู่ตลอดเวลา สำหรับสมบัติทางกายภาพที่เด่นคือเป็นวัสดุที่แทบจะไม่มี การขยายตัวทางความร้อน มีความคงทนและทนทานต่ออุณหภูมิที่สูง มีความเสถียรเชิงกลที่สูง และวัสดุได้รับการควบคุมการส่งผ่านรังสีอินฟราเรด (IR radiation) ที่ดี ในส่วนของสีส้นเองก็มีการพัฒนาเพื่อดึงดูดความสนใจของลูกค้าเช่นมีการเคลือบฟิล์มบางกึ่งโปร่งใสของโลหะบางประเภท เช่น ทองคำ แพลททินัมและทองแดง



ภาพที่ 2.13 แผ่นรองให้ความร้อนของเตาหุงต้มในครัวเรือน Ceran® และ Eurokera® (Holand และ Beall, 2002)

2.9.2 งานและภาชนะที่มีชื่อทางการค้าว่า Pyroceram®, Corningware® และ Pyrex® ผลิตโดยบริษัท Corning Glass Works มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว เช่นเมื่อนำภาชนะดังกล่าวที่มีความเย็นจัดเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะที่ร้อนจัดทันทีภาชนะที่ทำจากกลาสเซรามิกนี้จะไม่แตกเหมือนภาชนะแก้วหรือเซรามิกอื่นๆ โดยทั่วไป คุณสมบัติเด่นของภาชนะกลาสเซรามิกที่ผลิตโดย Corning Glass Works นอกจากที่สามารถทนต่อการแตกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันแล้วยังคงรักษารูปร่างในที่อุณหภูมิสูงๆ ได้ดีอีกด้วยทำให้มีการนำมาใช้งานในด้านอุปกรณ์ในห้องทดลองทางวิทยาศาสตร์ด้านชีววิทยาและเคมีอีกด้วย



ภาพที่ 2.14 งานและภาชนะ Pyroceram®, Corningware® และ Pyrex®

(Holand และ Beall, 2002)

2.9.3 อุปกรณ์แบกรับน้ำหนัก ระบบท่อและวาล์ว ฉนวนไฟฟ้า แผ่นรองกันความร้อน กลาสเซรามิก กลุ่มนี้เรียกว่า Machinable Glass-ceramics และวัสดุทางการค้าที่เป็นที่รู้จักกันมากที่สุดคือ Macor® เป็นกลาสเซรามิกที่ถูกนำมาใช้งานมากที่สุด ลักษณะเด่นของกลาสเซรามิกกลุ่มนี้คือสามารถทนความร้อนโดยไม่สูญเสียรูปร่างได้จนถึงอุณหภูมิประมาณ 1100 องศาเซลเซียส และสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการความแกร่งและทนต่อการแตกหัก ในส่วนของสมบัติที่สำคัญคือมีลักษณะสีขาวนวลคล้ายกับเซรามิกพอร์ซเลน มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนที่ใกล้เคียงกับโลหะและแก้วส่วนมากที่ใช้ในงานอุดผิว (Sealing) จึงทำให้สามารถใช้วัสดุร่วมกันได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ เป็นวัสดุที่ไม่เกาะน้ำ เป็นวัสดุปราศจากกรูพอน เป็นฉนวนทางไฟฟ้าที่ดีที่มีความต่างศักย์สูง ที่หลายความถี่และที่อุณหภูมิสูง สามารถขึ้นรูปเชิงกลในรูปร่างซับซ้อนได้โดยใช้เครื่องมือตัดแต่งที่ทำจากเหล็กกล้าและเซรามิกคาร์ไบด์โดยที่ชิ้นงานไม่เกิดการสูญเสียหรือแตกหักในระหว่างการขึ้นรูป ชิ้นงานที่ถูกตัดแต่งสามารถขัดผิวให้เรียบเงาได้



ภาพที่ 2.15 อุปกรณ์แบกรับน้ำหนัก ระบบท่อและวาล์ว
นวนอนไฟฟ้า Macor® (Holand และ Beall, 2002)

2.9.4 สีนํ้าวัสดุก่อสร้าง เช่นวัสดุผนัง วัสดุก่อสร้าง และวัสดุตกแต่ง จากการใช้เศษแก้วรีไซเคิลประเภทต่างๆ ที่เหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมและจากการบริโภคนำมาทำการรีไซเคิลให้เป็นวัสดุกลาสเซรามิกที่มีโครงสร้างทางจุลภาคและสีสันหลากหลายจากการตกผลึกในลักษณะที่ต่างๆ กันภายในแก้วเหลือทิ้งเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนที่เหมาะสม



ภาพที่ 2.16 กระเบื้องกลาสเซรามิกที่ผลิตจากการเศษแก้วรีไซเคิลเหลือทิ้ง
(Holand และ Beall, 2002)

2.10 ไททาเนียมไดออกไซด์

2.10.1 ลักษณะทั่วไปของไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารสีที่มีสีขาว ที่บ่งแสง เกิดเองตามธรรมชาติมี 2 รูปแบบ ใหญ่คือ รูไทล์และอานาเทส ทั้ง 2 รูปแบบมีไททาเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์อยู่กับสารปนเปื้อน ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีจึงจะนำสารปนเปื้อนออกได้เหลือไว้แต่ไททาเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์ ซึ่งมีสมบัติเป็นสารโฟโตคะตะลิสต์ (Photocatalyst) ที่สามารถถูกเร่งปฏิกิริยาได้ด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารไม่มีกลิ่นและมีความสามารถในการดูดซับจึงมีความสามารถในการกำจัดทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ในน้ำ อากาศและสิ่งมีชีวิต เพื่อการบำบัด

น้ำเสียเพื่อเพิ่มคุณสมบัติฆ่าเชื้อโรคให้กับสิ่งทอ เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบได้ในหลายผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่สีทาบ้านอาหาร ยา สีและเครื่องสำอาง ในกลุ่มเครื่องสำอางใช้เพื่อเป็นตัวที่ทำให้เกิดการทึบแสงและเป็นตัวป้องกันแสงแดด (สรวค์ จิตรวิเคราะห์, 2552)

2.10.2 ไททาเนียมไดออกไซด์กับการเกิดผลึก

ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารช่วยการเกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) ซึ่งเมื่อควบคุมการให้ความร้อนนิวเคลียสจะค่อยๆ โตแล้วกลายเป็นผลึก โดยการเกิดกลาสเซรามิกจะมีองค์ประกอบของไททาเนียมไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 2-20 โดยน้ำหนัก ปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์จะขึ้นกับปริมาณซิลิกาไดออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของแก้ว (Jeremy และคณะ, 2006)

2.11 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

2.11.1 การศึกษาขนาดและปริมาณเศษแก้วรีไซเคิลที่ใช้ทดแทนวัตถุดิบในการหลอมแก้ว

จิรวรรณ เทียนศิริ (2546) ศึกษาผลการนำของเสียที่เป็นแก้ว ประเภทขวดแก้วสีชาที่ใช้แล้วมาเป็นวัตถุดิบเพื่อทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ซึ่งใช้เป็นตัวหลอมละลายในการผลิตกระเบื้องเซรามิก โดยแปรค่าอัตราส่วนทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ด้วยเศษแก้วรีไซเคิลที่ผ่านการบดละเอียดขนาด 200 เมช เป็น ร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 แปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยโดยเผาที่อุณหภูมิ 1000 1100 และ 1200 องศาเซลเซียส ทดสอบค่ากำลังรับแรงดัด ค่าการหดตัว ค่าการดูดซึมน้ำ การทนสารเคมีและความทนการร่อน ผลการวิจัยพบว่าส่วนผสมที่ใช้ขวดแก้วสีชาทดแทนแร่เฟลด์สปาร์ ร้อยละ 10 ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาบุผนัง (มอก.36-2516) และผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินเผาปูพื้น (มอก.37-2529)

Karamberi และ Moutsatsou (2005) ศึกษาขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลที่มีผลต่อการหลอมของวัสดุซีเมนต์ โดยใช้เศษแก้วรีไซเคิลสีเขียว เศษแก้วรีไซเคิลสีชาและเศษกระจกใสมาคัดขนาด 90-200 ไมโครเมตรและ 90 ไมโครเมตรผสมกับส่วนผสมในการทำซีเมนต์ หลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น โครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรงด้านการกด ปริมาณการเกิดรูพรุน ทดสอบการชะละลายของโลหะ ผลการวิจัยพบว่าขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของวัสดุซีเมนต์

ลดดา พันธุ์สุขุมธนา (2550) ศึกษาการใช้เศษแก้วรีไซเคิลในกระเบื้องดินแดง โดยผสมเศษแก้วรีไซเคิลกระจกสีใสกับดินแดงในอัตราส่วนต่างๆ คือ ร้อยละ 10 และร้อยละ 20 เติมน้ำ แล้วนวดผสมในเครื่องรีดดินสุญญากาศ อัดขึ้นรูปโดยเครื่องมืออัดเป็นอิฐ เเผาในเตาถลุงขนาด 50 ตัน ที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส นำอิฐที่ได้มาทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมี คือ การ

ดูดซึมน้ำ ความทนทานต่อสารเคมี ความต้านแรงดัด ความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลันตามวิธี มอก.614-2529 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระเบื้องดินบุผนังภายนอก ผลการวิจัยพบว่า การเติมเศษแก้วรีไซเคิลในดินแดงมีผลทำให้ดินแดงสุกตัวเพิ่มมากขึ้น คือมีสมบัติการดูดซึมน้ำลดลง การหดตัวเมื่อเผาเพิ่มขึ้น ความต้านแรงดัดเพิ่มขึ้นและมีผลให้สมบัติการขยายตัวเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น ส่วนสมบัติการทนต่อสารเคมี และความทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเฉียบพลัน ไม่เปลี่ยนแปลง โดยเศษแก้วรีไซเคิลชนิดสีขามีแนวโน้มทำให้เกิดการสุกตัวของดินแดงมากกว่าเศษแก้วรีไซเคิลกระจกสีใส

วรรณภา ต.แสงจันทร์ (2550) ศึกษาการทำกระเบื้องจากเศษแก้วรีไซเคิล โดยนำเศษแก้วรีไซเคิลสี เศษแก้วรีไซเคิลสีเขียว และเศษแก้วรีไซเคิลสีขามาทำการบดและคัดขนาด ขึ้นรูปเป็นแผ่นกระเบื้องในแบบพิมพ์ดินเผา เผาที่อุณหภูมิ 750-850 องศาเซลเซียส ยืนไฟ 30-90 นาที ศึกษาสมบัติการหดตัว การดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น ความแข็งแรงและลักษณะผิวหน้า ผลการวิจัยพบว่า เศษแก้วใส เศษแก้วสีเขียวและเศษแก้วสีขาสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับทำกระเบื้องประดับตกแต่งได้โดยใช้เศษแก้วรีไซเคิลขนาด 12-35 เมช และขนาด 35-80 เมช จะได้กระเบื้องที่มีเนื้อแกร่ง มีการดูดซึมน้ำต่ำและให้ลักษณะผิวหน้าขรุขระ หรือ หยาบ หรือเรียบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้นำไปใช้งาน

2.11.2 การศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้วเพื่อใช้ในการผลิตกาสเซรามิก

บุษราภรณ์ ภัทรเชาว์ (2547) ศึกษาการนำของเสียที่ได้จากการถลุงสังกะสีมาเปลี่ยนเป็นวัสดุประเภทกาสเซรามิก โดยผสมของเสียจากการถลุงสังกะสีและเศษแก้วที่อัตราส่วนต่างๆ ทั้งหมด 25 สูตร จากนั้นหลอมของผสมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ศึกษาอุณหภูมิการเกิดแก้ว และอุณหภูมิการเกิดผลึก ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแตกต่างทางความร้อน (DTA) พบว่าอุณหภูมิการเกิดแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึก อยู่ในช่วง 550-650 องศาเซลเซียส และ 680-870 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แก้วที่ได้ถูกนำไปผลิตเป็นกาสเซรามิกด้วยกระบวนการทางความร้อน จากการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติของกาสเซรามิก พบว่ามีผลึกเกิดขึ้น 5 ชนิด คือ วอลลาสไตน์-เฟอรอน ไพรอกซีน อะนอร์ไทต์ ควอร์ตซและคริสโตบาไลต์ จากการทดสอบหาค่าความทนแรงดัดโค้งของกาสเซรามิก พบว่ามีค่าความทนแรงดัดโค้งสูงสุดเท่ากับ 119.26 เมกะปาสคาล ส่วนการทดสอบหาความทนต่อสารเคมีโดยวัดปริมาณตะกั่วที่ถูปลดปล่อยออกจากกาสเซรามิกด้วยเทคนิค TCLP พบว่ากาสเซรามิกที่เกิดผลึกไพรอกซีนปลดปล่อยตะกั่วออกมามากกว่าค่ามาตรฐานที่ประเทศสหรัฐอเมริกากำหนด

ไว้คือ 5 พีพีเอ็ม ส่วนกลาสเซรามิกที่เกิดผลึกวอลลาสโตไนท์-เฟอรอน ปลดปล่อยตะกั่วออกมาต่ำกว่ามาตรฐาน

Francis และคณะ (2004) ศึกษาการเกิดผลึกของแก้วที่เตรียมส่วนผสมของซีเถ้าจากถ่านหินและเศษแก้วรีไซเคิลที่อัตราส่วนซีเถ้าจากถ่านหินต่อเศษแก้วรีไซเคิลคือร้อยละ 40 ต่อ 60 โดยน้ำหนัก หลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและศึกษาผลของขนาดตัวอย่างแก้วที่มีผลต่ออุณหภูมิในการเกิดผลึก ซึ่งทดสอบด้วยเครื่องการวิเคราะห์ความแตกต่างของความร้อน (DTA) โดยแปรค่าขนาดแก้วที่ทดสอบคือ 20-53 53-74 74-150 และ 150-500 ไมโครเมตร ศึกษาโครงสร้างจุลภาคกลาสเซรามิกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ผลการวิเคราะห์พบว่าขนาดของแก้วที่เหมาะสมต่ออุณหภูมิในการเกิดผลึก คือขนาด 74-150 ไมโครเมตรและกลาสเซรามิกที่ได้เกิดผลึกของไพโรซีน (Pyroxenes) และ แพลจีโอเคลส (Plagioclase)

Erol และคณะ (2007) ศึกษาการนำซีเถ้า (Coal fly ash) ซึ่งเป็นของเสียอุตสาหกรรมจากการเผาไหม้ของถ่านหินโดยมีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2 Al_2O_3 และ CaO ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแก้วมาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกลาสเซรามิก หลอมที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก โดยวิธี TCLP ผลการวิเคราะห์พบว่าซีเถ้าจากการเผาไหม้ของถ่านหินสามารถผลิตกลาสเซรามิกได้และให้เฟสผลึกของออยต์ (Augite) และ ไดออปไซด์ (Diopside) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นกระเบื้องปูพื้นและฉนวนกันความร้อน นอกจากนี้การชะละลายของโลหะหนัก ในผลิตภัณฑ์กลาสเซรามิก ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ประเทศสหรัฐอเมริกา (EPA) กำหนด

Karamberi และคณะ (2007) ศึกษาการผลิตแก้ว-เซรามิกจากเศษแก้วรีไซเคิลและกากถลุงแร่หรือสแลก (Slag) โดยใช้ผลิตผลพลอยได้จาก 4 โรงงาน ซึ่งมีปริมาณของซิลิกาสูงดังนี้ 1 ซีเถ้าจากแคลเซียมและลิกไนต์ 2 กากถลุงแร่ของเหล็กและนิกเกิล 3 กากถลุงแร่ของเหล็ก 4 เศษแก้วรีไซเคิล และทรายจากประเทศอียิปต์ นำส่วนผสมมาหลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการตกผลึกที่อุณหภูมิ 900 950 และ 1000 องศาเซลเซียส นำชิ้นงานที่ได้มาตรวจสอบโครงสร้างของผลึกโดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ จากผลการศึกษาพบว่าเฟสของผลึกที่เกิดขึ้น ขึ้นกับโครงสร้างของวัตถุดิบและอุณหภูมิที่ใช้หลอม

Bingham และ Jackson (2008) ศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อความหนืดของการหลอมขวดแก้วสีน้ำเงินและขวดแก้วสีเขียว โดยการนำเศษแก้วรีไซเคิลมาผสมกับวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้ว นำมาหลอมที่อุณหภูมิ 1000-1200 องศาเซลเซียส ศึกษาค่าความหนืดของการหลอมขวดแก้วและปฏิกิริยาทางเคมีที่มีผลต่อความหนืดของการหลอมขวดแก้ว ผลการวิจัยพบว่า

ที่อุณหภูมิการหลอมสูงขึ้นความหนืดของแก้วจะลดลงและอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการหลอมขวดแก้วสีน้ำเงินและขวดแก้วสีเขียว คือ 1150 องศาเซลเซียส

Erol และคณะ (2008) ศึกษาการนำขี้เถ้า (Coal fly ash) ซึ่งเป็นของเสียอุตสาหกรรมจากการเผาไหม้ของถ่านหินโดยมีองค์ประกอบหลัก คือ SiO_2 Al_2O_3 และ CaO ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตแก้วมาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตแก้ว กลาสเซรามิกและเซรามิก หลอมที่อุณหภูมิ 1550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก โดยวิธี TCLP ผลการวิเคราะห์พบว่าขี้เถ้าจากการเผาไหม้ของถ่านหินสามารถผลิตแก้ว กลาสเซรามิกและเซรามิกได้ โดยกลาสเซรามิกให้เฟสผลึกของออไรต์ (Augite) ซึ่งสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ดีกว่าแก้วและเซรามิก นอกจากนี้การชะละลายของโลหะหนัก ในผลิตภัณฑ์แก้ว กลาสเซรามิกและเซรามิก ต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ประเทศสหรัฐอเมริกา (EPA) กำหนด

2.11.3 การศึกษาการพัฒนาความแข็งของกลาสเซรามิก

Jeremy และคณะ (2006) ศึกษาการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) จากกากหลอมเหล็กเป็นสารช่วยในการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก ซึ่งเตรียมจากส่วนผสมของกากหลอมเหล็กที่มีปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์อยู่มาก ผสมกับเศษแก้วรีไซเคิลในอัตราส่วนร้อยละ 60 ต่อ 40 หลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกลาสเซรามิก เช่น โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง ผลการวิจัยพบว่ากลาสเซรามิกที่ได้ให้เฟสของไพโรซีน (Pyroxenes) และมีสมบัติทางกายภาพคือความแข็งที่ 7 กิกะปาสคาล (Gpa) กลาสเซรามิกที่ได้เหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์เป็นฉนวนกันความร้อน อุตสาหกรรมก่อสร้างได้

Wu และคณะ (2006) ศึกษาการผลิตกลาสเซรามิกจากส่วนผสมเศษขวดแก้ว และสแลกซึ่งเป็นของเสียอุตสาหกรรมจากการผลิตโลหะที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) 34 เปอร์เซ็นต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 60 ต่อ 40 โดยน้ำหนัก หลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและศึกษาสมบัติทางกายภาพของกลาสเซรามิก เช่น โครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรงต้านการกด ความทนทานต่อการแตกร้าว พบว่าการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์จากสแลกซึ่งเป็นตัวทำให้กลาสเซรามิกเป็นเนื้อเดียวกันและมีความแข็งแรงสูง เกิดผลึกของไพโรซีน (Pyroxenes) นอกจากนี้ยังพบว่าเศษแก้วรีไซเคิลที่หลอมไม่หมดส่งผลให้สัมประสิทธิ์การหดตัวเนื่องจากความร้อนและความแข็งของกลาสเซรามิก ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการรวมตัวกันของแก้วที่หลงเหลืออยู่

Arvind และคณะ (2008) ศึกษาผลของการเติมฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) และไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ผสมกับฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) ที่ใช้เป็นสารช่วยในการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก หลอมที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกลาสเซรามิก เช่น โครงสร้างจุลภาค ความแข็งแรง ผลการวิจัยพบว่ากลาสเซรามิกที่ได้มีค่าความแข็งที่สูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการเกิดผลึก โดยพบว่ากลาสเซรามิกที่มีการเติมฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์จะมีค่าความแข็งน้อยกว่ากลาสเซรามิกที่มีการเติมฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ผสมกับไททาเนียมไดออกไซด์

Weixin (2009) ศึกษาการพัฒนาความแข็งของกลาสเซรามิกที่ผลิตจากของเสียประเภทเหล็ก นำของผสมจากของเสียประเภทเหล็กกล้า ทราายและเศษแก้ว ที่อัตราส่วนร้อยละ 60 ต่อ 25 ต่อ 15 โดยน้ำหนัก มาหลอมเป็นแก้วและผลิตเป็นกลาสเซรามิกด้วยกระบวนการทางความร้อน ศึกษาสมบัติทางกายภาพของกลาสเซรามิก เช่น โครงสร้างจุลภาค ความแข็ง ผลการวิจัยพบว่ากลาสเซรามิกที่เกิดผลึกของแมกนีไทด์และอะนอร์ไทต์ กลาสเซรามิกที่ได้มีค่าความแข็ง 7.9 กิกะปาสคาลและสามารถนำไปประยุกต์เป็นฉนวนกันความร้อน กระเบื้องปูพื้น

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า

1. ขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลที่เหมาะสมในการนำมาใช้หลอมเป็นแก้วเพื่อผลิตกลาสเซรามิกมีขนาดอยู่ในที่ช่วงประมาณ 75-850 ไมโครเมตร
2. ปริมาณของเศษแก้วรีไซเคิลที่นำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกลาสเซรามิกอยู่ที่ช่วงร้อยละ 20-100
3. อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการหลอมแก้วอยู่ในช่วงประมาณ 1000–1550 องศาเซลเซียส
4. ไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเป็นสารช่วยในการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการนำเศษแก้วรีไซเคิลมาทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกลาสเซรามิก เพื่อเป็นการลดพลังงานที่ใช้ในการผลิตกลาสเซรามิกและยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยแบ่งการทดลองเป็น 6 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วรีไซเคิล

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้วเพื่อผลิตกลาสเซรามิก

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของการหลอมแก้วที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลและไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ

ตอนที่ 4 ศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วเพื่อผลิตกลาสเซรามิก

ตอนที่ 5 ตรวจสอบการเกิดเฟสและโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้นในแก้วและกลาสเซรามิก

ตอนที่ 6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วและกลาสเซรามิก

3.1 การเตรียมวัตถุดิบสำหรับงานวิจัย

3.1.1 วัตถุดิบ

เศษแก้วรีไซเคิลที่ใช้ในการทำวิจัยมี 4 สี คือ เศษแก้วสีเขียว เศษแก้วสีขาว เศษแก้วสีใส (จากโรงงานบางกอกกลาส) และเศษแก้วสีน้ำเงิน (จากขวดโพลีเอทิลีนเทอแรพลาสติก)

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายกรดไนตริก (HNO_3) เกรด AR
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรด AR
3. ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เกรด AR

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เตาหลอมแก้ว ยี่ห้อ Heraeus Schalteinheit Re 1700
2. เตาแอลนีล ยี่ห้อ Heraeus Electronic
3. อะลูมินา ครุซิบิล
4. เครื่องมือการวิเคราะห์ความแตกต่างของความร้อน (DTA) ยี่ห้อ Perkin Elmer, DTA 7, USA

5. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ยี่ห้อ PHILIPS รุ่นPW 2510
6. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) ยี่ห้อ Bruker D8 Advance
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ยี่ห้อ JEOL JSM-5410

3.2 การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาโดยแบ่งการทดลองเป็น 6 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วรีไซเคิล

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สี คือเศษแก้วสีเขียว เศษแก้วสีชา เศษแก้วใส (จากบริษัท บางกอกกล๊าส จำกัด) และเศษแก้วสีน้ำเงิน (จากขวดไวน์ยี่ห้อนี้เวีย) ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้วเพื่อผลิตกลาสเซรามิก

ในการผลิตกลาสเซรามิกจะทำการหลอมแก้วและนำน้ำแก้วมาขึ้นรูปเป็นแก้วก่อนที่จะนำแก้วที่ได้มาเข้าสู่กระบวนการควบคุมความร้อนให้แก้วเกิดผลึก ซึ่งกระบวนการหลอมแก้วในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เตาที่ใช้ในการหลอมแก้วเป็นเตาขนาดเล็ก ดังนั้นขนาดของเศษแก้วที่นำมาใช้ในการหลอมแก้วนั้น จึงใช้ขนาด 0-4 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นเศษแก้วขนาดเล็กที่สุดของบริษัท บางกอกกล๊าส จำกัด และงานวิจัยนี้ต้องการนำไททานเนียมไดออกไซด์ซึ่งมีลักษณะเป็นผงมาผสมกับเศษแก้วรีไซเคิลเพื่อนำมาพัฒนาความแข็งแรงของการผลิตกลาสเซรามิก ในการทดลองนี้ทำการทดลองกับเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียว โดยบดและคัดขนาดเศษแก้วเป็น 3 ขนาด ดังนี้ คือ 4-16 เมช (1-4 มิลลิเมตร) 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) และ 32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร) ทดลองหาอุณหภูมิการหลอมเศษแก้วที่ต่ำสุดที่สามารถนำน้ำแก้วมาขึ้นรูปในแบบพิมพ์ได้ โดยนำเศษแก้วมาหลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและลดอุณหภูมิลงทีละ 100 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่ไม่สามารถนำน้ำแก้วมาขึ้นรูปในแบบพิมพ์ได้

เลือกขนาดของเศษแก้วและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้ว โดยพิจารณาจากความหนืดของน้ำแก้วและความยากง่ายของน้ำแก้วที่นำมาขึ้นรูปในแบบพิมพ์ พิจารณาจากความเป็นเนื้อเดียวกันของแก้วหลังการหลอม โดยนำแก้วมาตรวจสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) แก้วต้องไม่เกิดเฟสของผลึก เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุอสัณฐานคือเมื่อหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงแล้วนำมาขึ้นรูป เมื่อเวลาเย็นตัวจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่เกิดการตกผลึก (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549) นอกจากนี้ยังตรวจสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพของแก้วหลังการ

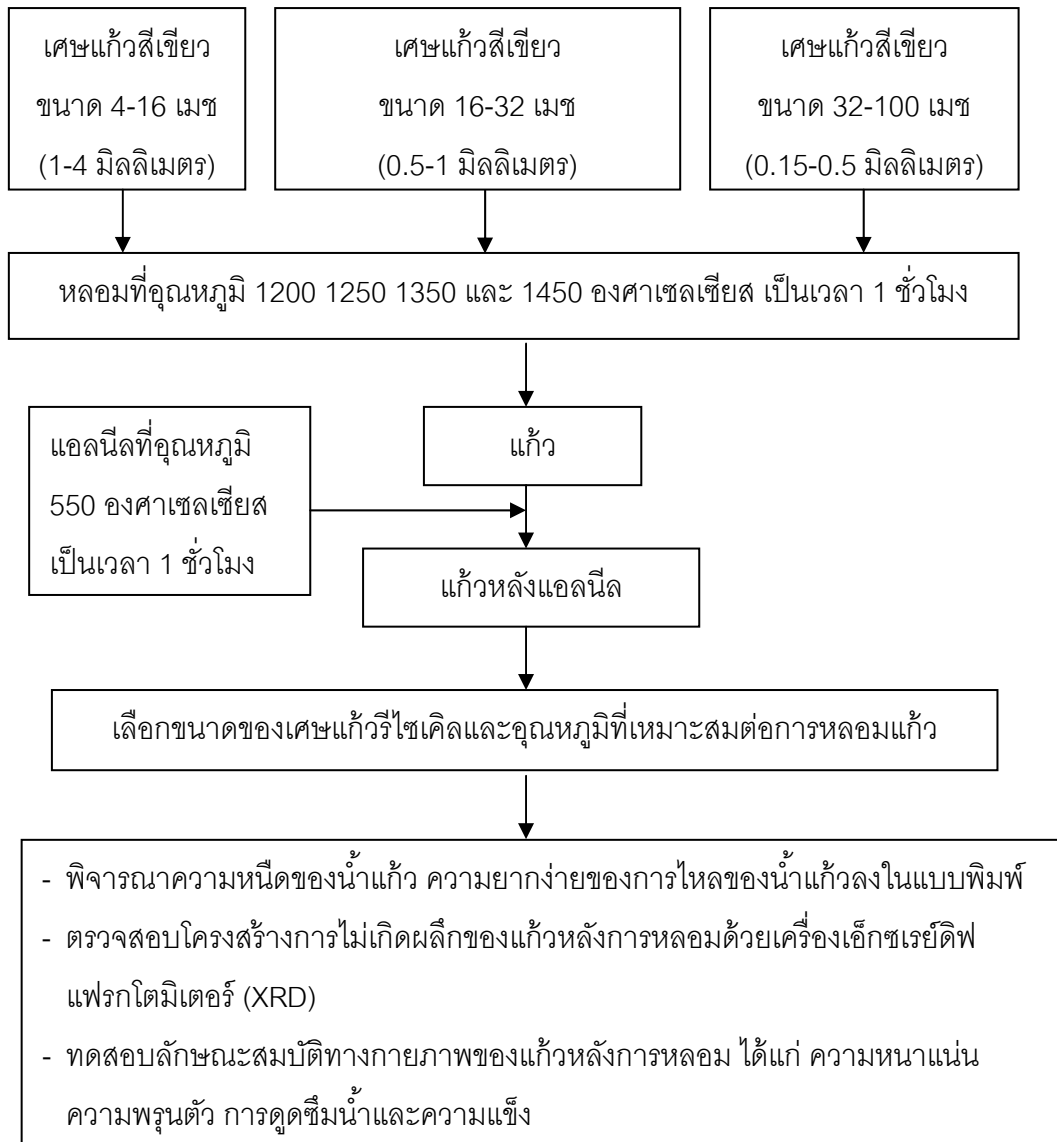
หลอม ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำและความแข็งเพื่อนำมาเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกขนาดของเศษแก้วและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้วเพื่อผลิตเป็นกลาสเซรามิก

ปัจจัยที่ถูกแปรค่าในการทดลอง

- ขนาดของเศษแก้ววีโรไซเคลิสี่เขียว คือ 4-16 เมช (1-4 มิลลิเมตร) 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) และ 32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร)
- อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเศษแก้ววีโรไซเคลิสี่ คือ 1200 1250 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลอง

- อุณหภูมิที่ใส่แอลนีส คือ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.1 แผนผังการทดลองตอนที่ 2

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของการหลอมแก้วที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลและไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ

การเติมไททาเนียมไดออกไซด์ในการทดลองนี้ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการเกิดผลึกของแก้วเพื่อเปลี่ยนเป็นกลาสเซรามิก โดยทำการศึกษาปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงในเศษแก้วรีไซเคิลสีต่างๆ ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

นำเศษแก้วสีเขียว เศษแก้วสีชา เศษแก้วสีใส และเศษแก้วสีน้ำเงิน โดยใช้ขนาดที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 คือ ขนาด 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) มาผสมไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก มาหลอมที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ซึ่งได้จากการทดลองตอนที่ 2

ปัจจัยที่ถูกแปรค่าในการทดลอง

- ปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

ปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลอง

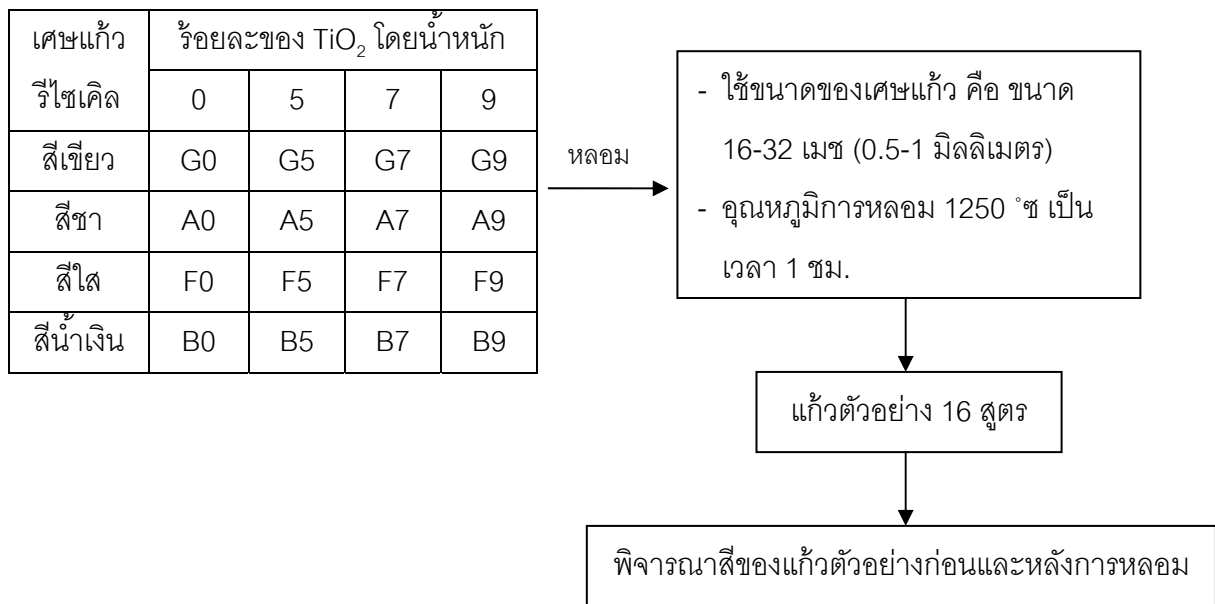
- ขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สี คือ ขนาด 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร)
- อุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้ว คือ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- อุณหภูมิที่ใช้แอลนีสที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ดังนั้นในการทดลองตอนที่ 3 จะได้แก้วทั้งหมด 16 ตัวอย่าง โดยจะใช้สูตรแทนการเรียกชื่อของแก้วตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สูตรการหลอมแก้ว 16 สูตรที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลและไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ

เศษแก้วรีไซเคิล	ร้อยละของ TiO ₂ โดยน้ำหนัก			
	0	5	7	9
สีเขียว	G0	G5	G7	G9
สีชา	A0	A5	A7	A9
สีใส	F0	F5	F7	F9
สีน้ำเงิน	B0	B5	B7	B9

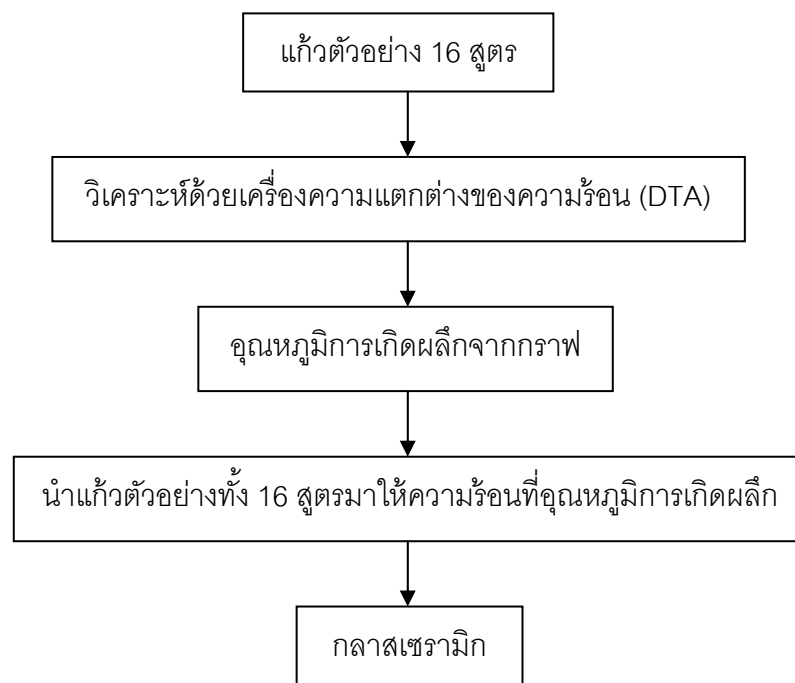
หมายเหตุ : G = Green (สีเขียว) A = Amber (สีชา) F = Flint (สีใส) B = Blue (สีน้ำเงิน)



ภาพที่ 3.2 แผนผังการทดลองตอนที่ 3

ตอนที่ 4 ศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วเพื่อผลิตกลาสเซรามิก

นำแก้วตัวอย่างจำนวน 16 สูตรมาศึกษาหาอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วเพื่อผลิตเป็นกลาสเซรามิก ด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ความแตกต่างของความร้อน (DTA)



ภาพที่ 3.3 แผนผังการทดลองตอนที่ 4

ตอนที่ 5 ตรวจสอบการเกิดเฟสและโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้นในกลาสเซรามิก

ในการทดลองนี้ตรวจสอบการเกิดเฟสและโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้นในกลาสเซรามิกจากเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สี ที่ได้จากการทดลองที่ 3 ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM)

ตอนที่ 6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วและกลาสเซรามิก

ในการทดลองนี้ทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วและกลาสเซรามิกจากเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สี ที่ได้จากการทดลองที่ 3

การทดลองที่ 6.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ได้แก่ การทดสอบความแข็ง ความหนาแน่น ปริมาณการเกิดรูพรุนและการดูดซึมน้ำ การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวิกเกอร์ไมโครฮาร์ดเน็ต (Vickers micro hardness)

ASTM C 1327-03

เตรียมชิ้นงานให้มีความหนาอย่างน้อย 0.50 มิลลิเมตร ออกแรงกดประมาณ 1 กิโลกรัม ให้หัวกดสัมผัสกับชิ้นงานประมาณ 0.015–0.070 มิลลิเมตรต่อวินาที

การคำนวณ ความแข็ง (Vickers micro hardness, HV) ได้จากสูตร

$$HV = (1.8544)(P/d^2)$$

P = แรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตก หน่วย กิโลกรัม

d = ความยาวเฉลี่ยระหว่างรอยหัวกด 2 หัว หน่วย มิลลิเมตร

การทดสอบความหนาแน่น ร้อยละการเกิดรูพรุนและร้อยละการดูดซึมน้ำ

(ASTM C 20-00)

- นำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดน้ำในชิ้นงาน ปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนัก (Dry Weight, D)

- นำชิ้นงานวางลงในอ่างน้ำให้ความร้อน โดยให้น้ำท่วมทั้งชิ้นงาน ต้มน้ำให้เดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ทดสอบขึ้นจากน้ำและทำการชั่งน้ำหนัก (Suspended Weight, S)

- นำชิ้นงานที่ทดสอบมาแช่ด้วยผ้าหมาดๆ ทำการชั่งน้ำหนัก (Saturated Weight, W)

การคำนวณ

ปริมาตรของชิ้นงาน (Exterior Volume, V)

V (ลูกบาศก์เซนติเมตร) = W-S โดยกำหนดให้ปริมาตรของน้ำ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เท่ากับ 1 กรัม

ร้อยละการเกิดรูพรุน (Apparent Porosity, P)

$$P (\text{ร้อยละ}) = \frac{(W - D)}{V} \times 100$$

ร้อยละการดูดซึมน้ำ (Water Adsorption, A)

$$A (\text{ร้อยละ}) = \frac{(W - D)}{D} \times 100$$

ความหนาแน่น (Bulk Density, B)

$$B (\text{กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร}) = \frac{D}{V}$$

การทดลองที่ 6.2 การทดสอบสมบัติทางเคมี

ศึกษาการทนทานต่อสารเคมีในแก้วและกลาสเซรามิกโดยทดสอบการทนทานต่อกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ASTM C 20-00)

การเตรียมสารละลายและชิ้นงาน

- สารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร
- นำชิ้นงานมาบดและคัดขนาด 0.3-0.5 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบการทนทานต่อกรด

- นำตัวอย่างชิ้นงานประมาณ 2 กรัม มาต้มในสารละลายกรดไนตริกปริมาณ 70 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- นำชิ้นงานที่ทดสอบมาล้างและเช็ดให้แห้ง ทำการชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของการดูดซึมน้ำกรดไนตริก

วิธีการทดสอบการทนทานต่อด่าง

ทดสอบเช่นเดียวกับการทนทานกรดแต่เปลี่ยนเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แทน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วรีไซเคิล

เศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สีที่นำมาวิจัย ได้แก่ เศษแก้วรีไซเคิลสีเขียว เศษแก้วรีไซเคิลสีชา เศษแก้วรีไซเคิลสีใสและเศษแก้วรีไซเคิลสีน้ำเงิน ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สีด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สี

เศษแก้ว รีไซเคิล	ปริมาณสารประกอบ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)											
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	CoO	PbO	TiO ₂	ZrO ₂
สีเขียว	70.97	15.12	10.87	1.21	0.84	0.21	0.29	0.24	-	0.02	0.09	0.02
สีชา	71.32	14.18	10.91	1.30	1.59	0.16	0.30	0.02	-	0.01	0.09	0.01
สีใส	71.39	14.37	10.82	1.24	1.56	0.19	0.10	-	-	0.03	0.06	0.01
สีน้ำเงิน	65.64	16.95	9.53	1.47	3.89	2.01	0.04	0.03	0.06	-	0.04	0.01

หมายเหตุ: (-) = ไม่พบ

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สีซึ่งเป็นแก้วชนิดโซดาโลอิมซิลิเกตที่มีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) โซเดียมออกไซด์ (Na₂O) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นหลัก ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ ต่อ โซเดียมออกไซด์ ต่อ แคลเซียมออกไซด์ (SiO₂: Na₂O: CaO) ของเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียว เศษแก้วรีไซเคิลสีชาและเศษแก้วรีไซเคิลสีใส ประมาณ 71: 14: 11 ร้อยละโดยน้ำหนักและเศษแก้วรีไซเคิลสีน้ำเงินมีอัตราส่วนของ SiO₂: Na₂O: CaO ประมาณ 70: 17: 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยทั่วไปเศษแก้วรีไซเคิลจากขวดบรรจุภัณฑ์จะมีอัตราส่วนของ SiO₂: Na₂O: CaO ที่คล้ายคลึงกัน ส่วนที่แตกต่างกันจะขึ้นกับองค์ประกอบอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตแก้ว เช่น อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) ช่วยให้แก้วมีความทนทานต่อการสึกกร่อน และสารเคมี แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และโพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ช่วยในการขึ้นรูปของแก้ว ทำให้แก้วคงตัวเร็วขึ้น ส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่ทำให้เกิดสี คือ ออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบในตารางที่ 4.1 พบว่าเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียวมีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ร้อยละ 0.29 และโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) ร้อยละ 0.24

เศษแก้วรีไซเคิลสีชาวมีองค์ประกอบของเหล็กออกไซด์ร้อยละ 0.30 และโครเมียมออกไซด์ร้อยละ 0.02 เศษแก้วรีไซเคิลสีน้ำเงินมีองค์ประกอบของโคบอลออกไซด์ (CoO) ร้อยละ 0.06 และโครเมียมออกไซด์ร้อยละ 0.03

จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่าเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียวเกิดจากการเติมสารประกอบของเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ เศษแก้วรีไซเคิลสีชาเกิดจากการเติมสารประกอบของเหล็กออกไซด์และเศษแก้วรีไซเคิลสีน้ำเงินเกิดจากการเติมสารประกอบของโคบอลออกไซด์

4.2 ศึกษาผลของขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้วเพื่อผลิตกาสเซรามิก

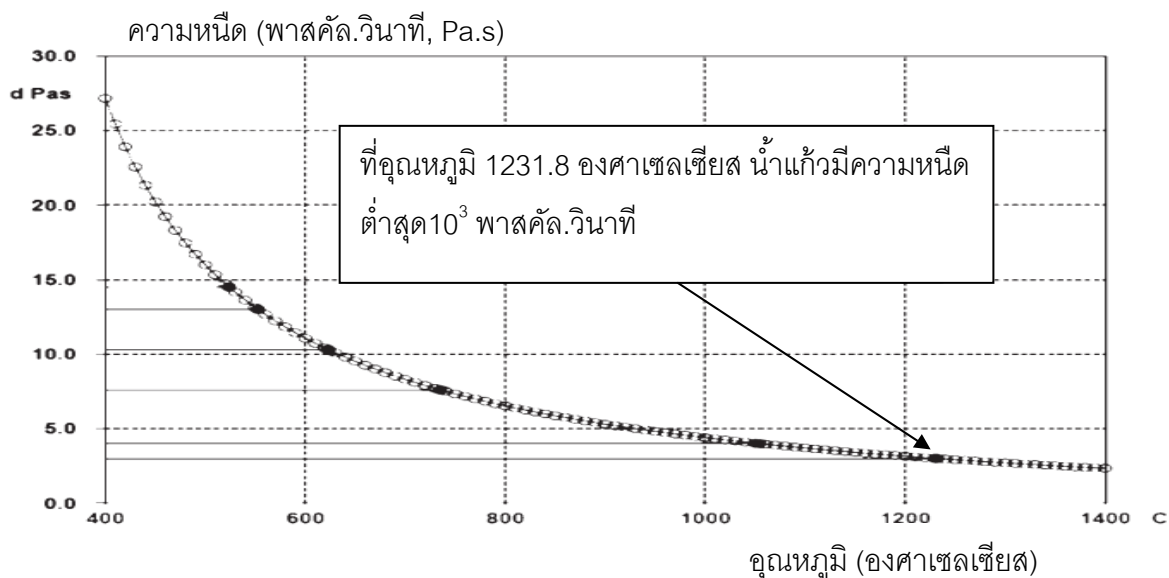
ในการผลิตกาสเซรามิกจะทำการหลอมแก้วและนำน้ำแก้วมาขึ้นรูปเป็นแก้วก่อนที่จะนำแก้วที่ได้มาเข้าสู่กระบวนการควบคุมความร้อนให้แก้วเกิดผลึก ในการทดลองนี้ทำการทดลองกับเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียว เนื่องจากเศษแก้วสีเขียวมีราคาขายตามท้องตลาดถูกกว่าเศษแก้วสีอื่น (วงษ์พานิชย์, 4 มิถุนายน 2552) และมีสัดส่วนการนำเศษแก้วกลับมาใช้ใหม่ในปริมาณที่ต่ำกว่าเศษแก้วสีอื่น (ปานัสม์ อังกูรอดิษฐ์ และคณะ, 2551) จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมวัตถุดิบเพื่อนำมาผลิตเป็นแก้วส่วนใหญ่หลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เศษแก้วมาเป็นวัตถุดิบในการหลอมแก้วร้อยละ 100 และเศษแก้วใช้พลังงานในการหลอมที่น้อยกว่าวัตถุดิบ ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเศษแก้ว คือ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แต่จากการทดลองเบื้องต้น พบว่าที่อุณหภูมิการหลอมแก้ว 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เศษแก้วถูกหลอมหมด และน้ำแก้วที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดน้อยมากและสามารถนำมาเทขึ้นรูปลงในแบบพิมพ์ได้ง่าย และจากงานวิจัยของ วรรณภา ต.แสงจันทร์, 2550 พบว่าอุณหภูมิการหลอมที่ต่ำสุดที่สามารถนำน้ำแก้วมาเทขึ้นรูปในแบบพิมพ์ คือ 1232 องศาเซลเซียส (วรรณภา ต.แสงจันทร์, 2550) ดังนั้นในการทดลองนี้จึงทำการทดลองหาอุณหภูมิการหลอมเศษแก้วที่ต่ำสุดที่สามารถนำน้ำแก้วมาเทขึ้นรูปในแบบพิมพ์ได้ โดยนำเศษแก้วมาหลอมที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและลดอุณหภูมิลงทีละ 100 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิที่ไม่สามารถนำน้ำแก้วมาเทขึ้นรูปในแบบพิมพ์ได้ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมคือ 1200 1250 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การเลือกขนาดของเศษแก้ว และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้ว โดยพิจารณาจากความหนืดของน้ำแก้วและความยากง่ายของน้ำแก้วที่นำมาเทขึ้นรูปในแบบพิมพ์ พิจารณาจากความเป็นเนื้อเดียวกันของแก้วหลังการหลอม โดยนำแก้วมาตรวจสอบ

ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) แก้วต้องไม่เกิดเฟสของผลึก เนื่องจากแก้วเป็นวัสดุอสัณฐานคือเมื่อหลอมแก้วที่อุณหภูมิสูงแล้วนำมาเทขึ้นรูป เมื่อเวลาเย็นตัวจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่เกิดการตกผลึก (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549) นอกจากนี้ยังตรวจสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพของแก้วหลังการหลอม ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำและความแข็ง เพื่อนำมาเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกขนาดของเศษแก้วและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้วเพื่อผลิตเป็นกระจกเซรามิก

จากตารางที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิการหลอมที่ 1200 ถึง 1450 องศาเซลเซียสสามารถหลอมแก้วได้ ซึ่งอุณหภูมิการหลอมที่ 1250 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ต่ำสุดที่สามารถเทน้ำแก้วออกจากเบ้าหลอมได้ แต่ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ไม่สามารถเทน้ำแก้วออกจากเบ้าหลอมได้ เนื่องจากน้ำแก้วมีความหนืด โดยความหนืดจะขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิการหลอมสูง ความหนืดของน้ำแก้วจะลดลง จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของวรรณ ต.แสงจันทร์, 2550 ดังแสดงในภาพที่ 4.1 พบว่าที่อุณหภูมิ 1231.8 องศาเซลเซียส น้ำแก้วมีความหนืด 10^3 พาสคัล.วินาที (Pa.s) ซึ่งเป็นค่าความหนืดที่ต่ำสุดที่สามารถนำน้ำแก้วมาขึ้นรูป ดังนั้นเมื่อนำแก้วมาหลอมที่อุณหภูมิที่สูงกว่า 1231.8 องศาเซลเซียส จะสามารถเทน้ำแก้วออกจากเบ้าหลอมได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ลักษณะการไหลของน้ำแก้วของเศษแก้ววีไซเคลสิ่ชียวขนาดต่างๆ หลอมที่อุณหภูมิ 1200 ถึง 1450 องศาเซลเซียส

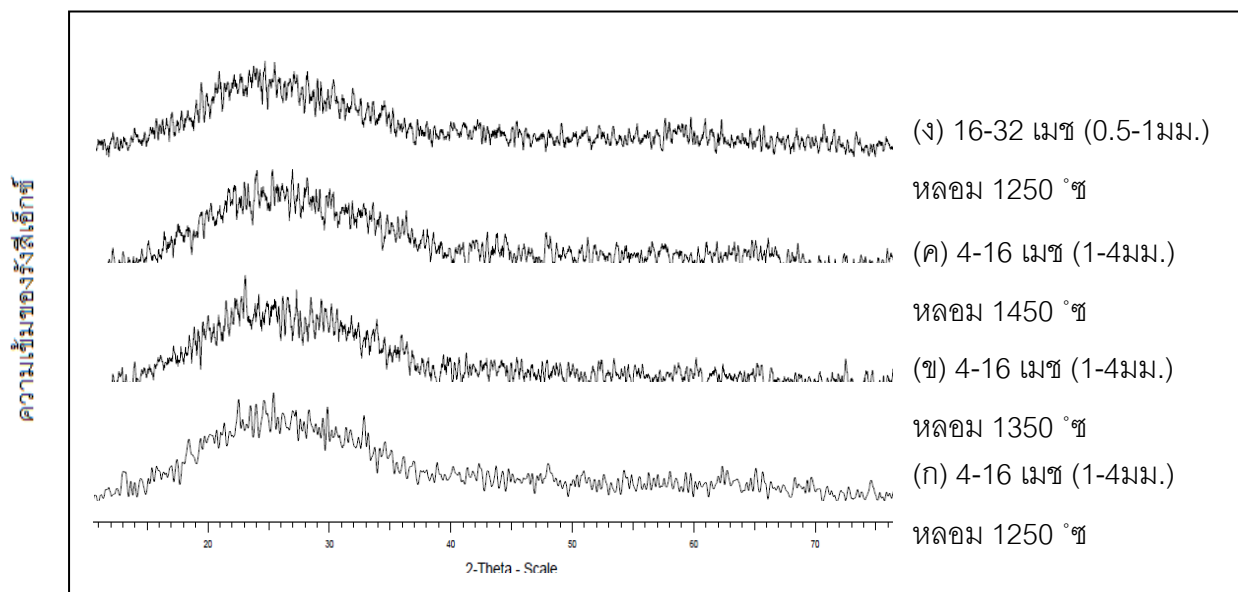
ขนาดของ เศษแก้ววีไซเคลสิ่	อุณหภูมิการหลอม (องศาเซลเซียส)			
	1200	1250	1350	1450
4-16 เมช (1-4 มม.) (ขนาดใหญ่)	ความหนืดสูง เทน้ำแก้วไม่ได้	ความหนืดปานกลาง แต่เทได้	ความหนืดเล็กน้อย เทง่าย	ความหนืดน้อยมาก เทได้ง่ายมาก
16-32 เมช (0.5-1 มม.) (ขนาดกลาง)	ความหนืดสูง เทน้ำแก้วไม่ได้	ความหนืดปานกลาง เทได้ง่ายกว่า	ความหนืดเล็กน้อย เทง่ายกว่า	ความหนืดน้อยมาก เทได้ง่ายกว่า
32-100 เมช (0.15-0.5 มม.) (ขนาดเล็ก)	ความหนืดสูง เทน้ำแก้วไม่ได้	ความหนืดปานกลาง เทได้ง่ายสุด	ความหนืดเล็กน้อย เทง่ายสุด	ความหนืดน้อยมาก เทได้ง่ายสุด



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอุณหภูมิของเศษแก้วสีเขียว (วรรณภา ต.แสงจันทร์, 2550)

ที่อุณหภูมิการหลอมเดียวกันสามารถหลอมเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 3 ขนาดได้ และสามารถเหน้าแก้วออกจากบ่้าหลอมได้ โดยขนาดของเศษแก้วจะมีผลต่อการหลอมแก้ว คือ เศษแก้วขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการหลอมได้มากกว่าเศษแก้วขนาดใหญ่ ดังนั้น เศษแก้วขนาดเล็กจึงเกิดปฏิกิริยาการหลอมได้เร็วและรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าจึงสามารถเหน้าแก้วได้ง่ายกว่าเศษแก้วขนาดใหญ่

การตรวจสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของแก้วหลังการหลอมเพื่ออุดโครงสร้างการไม่เกิดผลึกของแก้วหลังการหลอมด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ โดยแก้วหลังการหลอมทั้ง 9 ตัวอย่างไม่ได้ทำการตรวจสอบทั้งหมด แต่จะเลือกแก้วบางตัวอย่างมาทำการตรวจสอบโดยแก้ว ก-ค เป็นแก้วหลังการหลอมที่เกิดจากการใช้เศษแก้วขนาด 4-16 เมช (1-4 มิลลิเมตร) มาหลอมที่อุณหภูมิ 1250 1350 และ 1450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นแก้วที่เกิดจากเศษแก้วขนาดเดียวกัน (ขนาดเล็กที่สุดของโรงงานบางกอกกล๊าส) แต่อุณหภูมิการหลอมต่างกัน และแก้ว ง เป็นแก้วหลังการหลอมที่เกิดจากการใช้เศษแก้วขนาด 16-32 เมช (0.5- 1 มิลลิเมตร) หลอมที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส จากภาพที่ 4.2 พบว่าแก้ว ก-ง ไม่ปรากฏสัญญาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ แสดงว่าแก้ว ก-ง มีโครงสร้างที่ไม่ได้เป็นผลึกเพราะถ้ามีโครงสร้างที่เป็นผลึกจะพบสัญญาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบผลึกนั้น (Holand และ Beall, 2002) โดยแสดงดังภาพที่ 4.15-4.19 ซึ่งเป็นภาพตัวอย่างของเฟสการเกิดผลึกที่ตรวจวัดด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ และจากการวิเคราะห์ภาพที่ 4.2 พบว่าแก้วตัวอย่างที่ได้ไม่เกิดเฟสของผลึก ดังนั้นแก้วสามารถหลอมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี



ภาพที่ 4.2 เฟสการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของแก้วหลังการหลอม

การทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพของแก้วหลังการหลอม ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำและความแข็ง เพื่อนำมาเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกขนาดของเศษแก้วและอุณหภูมิการหลอมที่เหมาะสมต่อการผลิตกลาสเซรามิก จากตารางที่ 4.3 พบว่าแก้วหลังการหลอมส่วนใหญ่มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.51-2.52 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งค่าความหนาแน่นของแก้วทั่วไปมีค่าประมาณ 2.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (Holand และ Beall, 2002) ค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมีค่าน้อยมาก และสอดคล้องไปในทางเดียวกัน ค่าความแข็งของแก้วหลังการหลอมที่ได้อยู่ในช่วง 487-545 กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร ซึ่งค่าความแข็งของแก้วทั่วไปมีค่าประมาณ 450 กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549) เมื่อพิจารณาการใช้เศษแก้วขนาดเดียวกัน หลอมที่อุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าแก้วที่ได้มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นทั่วไป แก้วมีค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำที่ต่ำและใกล้เคียงกัน ส่วนความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยการหลอมที่อุณหภูมิ 1250 และ 1450 องศาเซลเซียส ให้ค่าความพรุนตัว การดูดซึมน้ำและค่าความแข็งที่ใกล้เคียงกันและไม่แตกต่างกัน จึงเลือกอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้ว




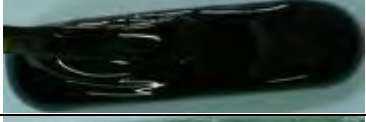




ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติของน้ำแก้ว และ ลักษณะสมบัติทางกายภาพของแก้วที่หลอมจากเศษแก้วรีไซเคิลสีเขียวขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิ 1200 ถึง 1450 องศาเซลเซียส

ขนาด เศษแก้ว	ลักษณะของน้ำแก้ว	อุณหภูมิการหลอม (องศาเซลเซียส)			
		1200	1250	1350	1450
4-16 เมช (1-4มม.) (ขนาดใหญ่)	ความหนืด	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำมาก
	การเทออกจากเบ้าหลอม	ไม่สามารถเทได้	เทได้ง่าย	เทได้ง่าย	เทได้ง่าย
	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	-	2.51	2.51	2.52
	ความพรุนตัว (%)	-	0.26	0.21	0.20
	การดูดซึมน้ำ (%)	-	0.10	0.08	0.08
	ความแข็ง (กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร)	-	487.67	512.28	523.88
16-32 เมช (0.5-1มม.) (ขนาดกลาง)	ความหนืด	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำมาก
	การเทออกจากเบ้าหลอม	ไม่สามารถเทได้	เทได้ง่ายกว่า	เทได้ง่ายกว่า	เทได้ง่ายกว่า
	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	-	2.52	2.51	2.51
	ความพรุนตัว (%)	-	0.17	0.18	0.10
	การดูดซึมน้ำ (%)	-	0.07	0.07	0.04
	ความแข็ง (กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร)	-	532.72	532.72	535.77
32-100 เมช (0.15-0.5 มม.) (ขนาดเล็ก)	ความหนืด	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำมาก
	การเทออกจากเบ้าหลอม	ไม่สามารถเทได้	เทได้ง่ายสุด	เทได้ง่ายสุด	เทได้ง่ายสุด
	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	-	2.51	2.52	2.56
	ความพรุนตัว (%)	-	0.10	0.09	0.08
	การดูดซึมน้ำ (%)	-	0.04	0.04	0.03
	ความแข็ง (กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร)	-	532.72	535.77	545.15

หมายเหตุ: (-) = ไม่สามารถทดลองได้

เมื่อพิจารณาการใช้เศษแก้วขนาดต่างกัน หลอมที่อุณหภูมิเดียวกัน คือ 1250 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้เศษแก้วขนาดเล็กลง คือ 32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร) แก้วที่ได้มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นทั่วไป มีค่าความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำลงเมื่อเทียบกับการใช้เศษแก้วขนาดใหญ่ เนื่องจากเศษแก้วขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาการหลอมแก้วมากกว่าจึงสามารถหลอมและรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่า จึงส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้เศษแก้วขนาดใหญ่ จากการพิจารณาการใช้เศษแก้วขนาด 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) และ 32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร) หลอมที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส พบว่าแก้วที่ได้มีค่าความแข็งที่เท่ากัน ซึ่งตามทฤษฎีการใช้เศษแก้วขนาดเล็ก 32-100 เมช มาหลอมจะให้ค่าความแข็งที่สูงกว่าการใช้เศษแก้วขนาดใหญ่ (วรรณ ต.แสงจันทร์, 2550) ดังนั้นในการเลือกขนาดของเศษแก้วที่นำมาใช้หลอมแก้วจะใช้ขนาด 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) มาหลอมแก้ว

จากการพิจารณาความยากง่ายของการเทน้ำแก้ว ความเป็นเนื้อเดียวกันของแก้ว หลังการหลอม และลักษณะสมบัติทางกายภาพของแก้วหลังการหลอม เพื่อเลือกขนาดของเศษแก้วและอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้วเพื่อผลิตกลาสเซรามิก ดังนั้นจึงเลือกขนาดของเศษแก้วและอุณหภูมิการหลอมที่เหมาะสมคือ ขนาด 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) และอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มาใช้หลอมเศษแก้วรีไซเคิล 3 สีที่เหลือ คือ เศษแก้วสีชา เศษแก้วสีใส และเศษแก้วสีน้ำเงิน โดยลักษณะของแก้วก่อนและหลังการหลอมดังแสดงใน ภาพที่ 4.3 พบว่าแก้วตัวอย่างทั้ง 3 สีที่ได้หลังการหลอมมีสีของแก้วที่ไม่แตกต่างไปจากแก้วก่อนหลอมและแก้วตัวอย่างทั้ง 3 สีสามารถเทออกจากเบ้าหลอมได้ง่ายเหมือนการหลอมเศษแก้วสีเขียว








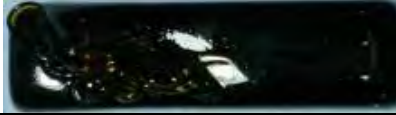








เศษแก้ว รีไซเคิล	ลักษณะของแก้วตัวอย่าง	
	ก่อนหลอม	หลังหลอม
สีเขียว		
สีชา		
สีใส		
สีน้ำเงิน		

ภาพที่ 4.3 ลักษณะของแก้วทั้ง 4 สีก่อนและหลังการหลอมที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส

4.3 ศึกษาผลของการหลอมแก้วที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลและไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ

การเติมไททาเนียมไดออกไซด์ในการทดลองนี้ เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการเกิดผลึกของแก้วเพื่อเปลี่ยนเป็นกลาสเซรามิก โดยทำการศึกษาปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงในเศษแก้วรีไซเคิลสีต่างๆ ที่อัตราส่วนร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

แก้วตัวอย่างหลังการหลอม 16 สูตร ที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สี และไททาเนียมไดออกไซด์ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่าแก้วตัวอย่างสีเขียว สีชา และสีน้ำเงินหลังการหลอม มีสีของแก้วที่เหมือนกับสีเดิมของแก้วก่อนหลอม ยกเว้นแก้วตัวอย่างสีใสสูตร F5 ถึง F9 ที่มีการผสมไททาเนียมไดออกไซด์ จะมีสีเหลืองอ่อน ซึ่งแตกต่างกับแก้วตัวอย่างสีใสสูตร F0 ที่ไม่ได้ผสมไททาเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยในการเกิดผลึกในเนื้อแก้ว แล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้อิออนเหล็ก (Fe_2O_3) เข้าทำปฏิกิริยาสร้างพันธะกับตาข่ายของแก้วซึ่งอยู่ในภาพซิลิเกต (SiO_4)⁴⁻ ทำให้องค์ประกอบของแก้วตัวอย่างมีไอออนเหล็กมากขึ้น ส่งผลให้แก้วเปลี่ยนจากไม่มีสีเป็นสีเหลืองอ่อน เมื่อเพิ่มปริมาณไททาเนียมไดออกไซด์ มากขึ้นจะส่งผลให้สีของแก้วตัวอย่างมีสีเหลืองที่เข้มขึ้น (Weyl, 1999) ในทำนองเดียวกันปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดกับแก้วตัวอย่างสีเขียว สีชา และสีน้ำเงิน แต่สีเดิมของแก้วตัวอย่างไปดับกับสีเหลืองอ่อนของไอออนเหล็ก จึงเห็นสีของแก้วตัวอย่างทั้ง 3 สี มีสีที่เหมือนกับสีเดิมของแก้วก่อนหลอม

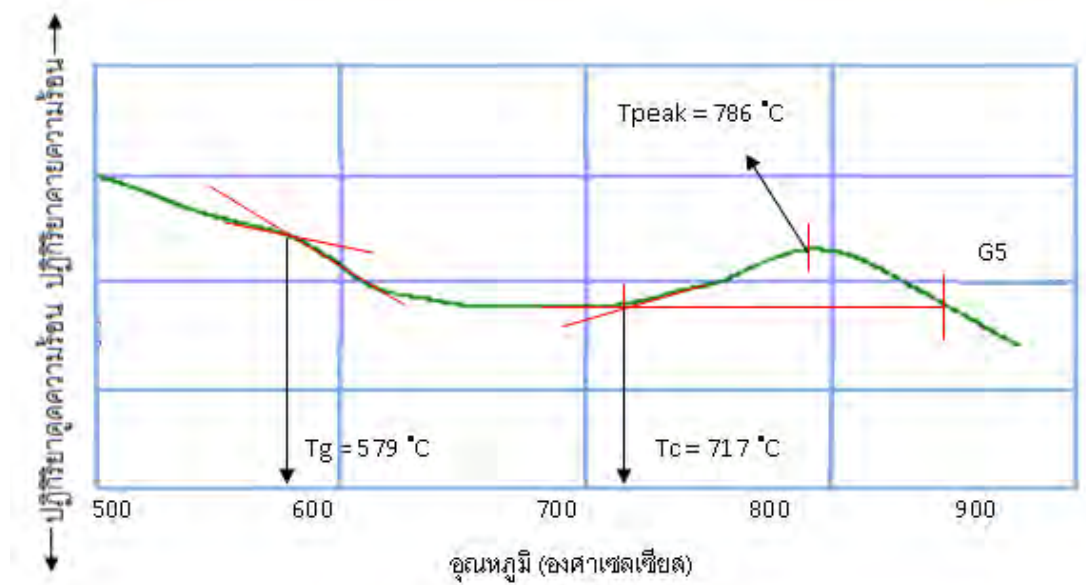
เศษแก้ว	ร้อยละของ TiO ₂ โดยน้ำหนัก			
	0	5	7	9
สีเขียว				
	G0	G5	G7	G9
สีชา				
	A0	A5	A7	A9
สีใส				
	F0	F5	F7	F9
สีน้ำเงิน				
	B0	B5	B7	B9

ภาพที่ 4.4 แก้วหลังการหลอม 16 สูตร ที่ได้จากการผสมเศษแก้วรีไซเคิลและไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ

หมายเหตุ : G = Green (สีเขียว) A = Amber (สีชา) F = Flint (สีใส) B = Blue (สีน้ำเงิน)

4.4 ศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วเพื่อผลิตกลาสเซรามิก

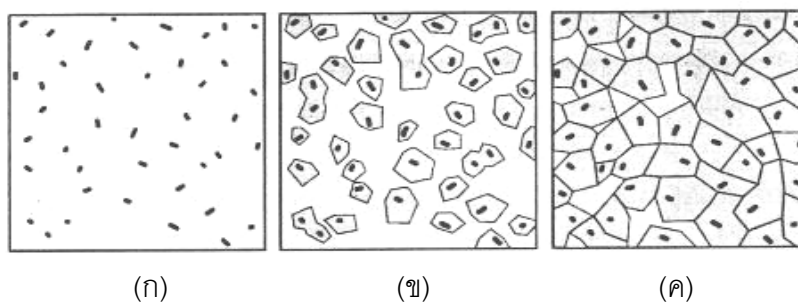
การศึกษาอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างทั้ง 4 สีจำนวน 16 สูตร ด้วยเครื่องมือการวิเคราะห์ความแตกต่างของความร้อน (DTA) ซึ่งแสดงอุณหภูมิที่วิเคราะห์ 2 ค่า คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature, T_g) คืออุณหภูมิที่เปลี่ยนจากสภาพแก้วมาเป็นของเหลวหนืดและอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature, T_c) คืออุณหภูมิที่ใช้ควบคุมความร้อนให้แก้วเกิดผลึก ซึ่งอุณหภูมิที่ได้เป็นค่าที่มาจากการเลือกช่วงของอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 4.5 ซึ่งเป็นกราฟตัวอย่างของแก้วที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวและ TiO_2 ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือ G5 โดยอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วจะเลือกจากช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือความชันที่มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 550-650 องศาเซลเซียสทำการลากเส้นหาจุดตัดของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันซึ่งอุณหภูมิที่ได้ คือ อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วโดยมีค่าประมาณ 579 องศาเซลเซียส จากกราฟในภาพที่ 4.5 พบว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนในการสลายเปลี่ยนสภาพจากของแข็งที่เป็นแก้วมาเป็นของเหลว



ภาพที่ 4.5 การลากเส้นเลือกอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว และอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวและ TiO_2 ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

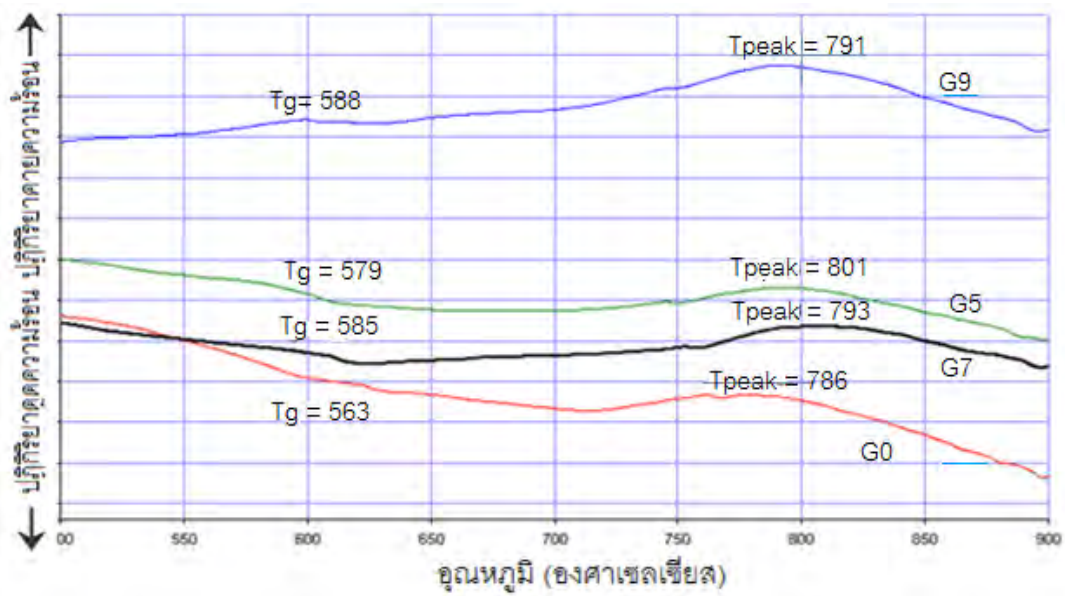
ส่วนอุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่สูงกว่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว มีลักษณะเป็นพีคที่เกิดจากปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 700-850 องศาเซลเซียส โดยในกระบวนการเกิดผลึกจะเกิดผลึกในเฟสแก้วซึ่งมีขั้นตอนการเกิด 2 ขั้นตอน คือ การเกิด

นิวเคลียสและการโตของผลึกบนนิวเคลียส ซึ่งการเกิดนิวเคลียสจะเกิดเมื่ออุณหภูมิดังกล่าวเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเหมือนกับการไต่ขึ้นภูเขา ในการหาอุณหภูมิการเกิดผลึกจะทำการลากเส้นหาจุดตัดของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น ซึ่งนิวเคลียสเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 717 องศาเซลเซียส โดยในงานวิจัยนี้ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารช่วยก่อผลึก (nucleating agent) ดังแสดงในภาพ 4.6 (ก) เมื่ออุณหภูมิลดลงเรื่อยๆ สูงขึ้น จะเกิดเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนโดยเกิดการโตของผลึกบนนิวเคลียส ดังแสดงในภาพ 4.6 (ข) และผลึกจะโตขึ้นมากที่สุด และมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบกลายเป็นกลาสเซรามิก ดังแสดงในภาพ 4.6 (ค) (Holand และ Beall, 2002) จากภาพที่ 4.5 พบว่าผลึกจะโตมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส (peak of crystallization temperature, T_{peak}) จากนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน โดยผลึกที่เกิดขึ้นจะหลอมละลายและไม่เกิดผลึกอีกเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 850 องศาเซลเซียส (Atkinson และ คณะ, 1976)

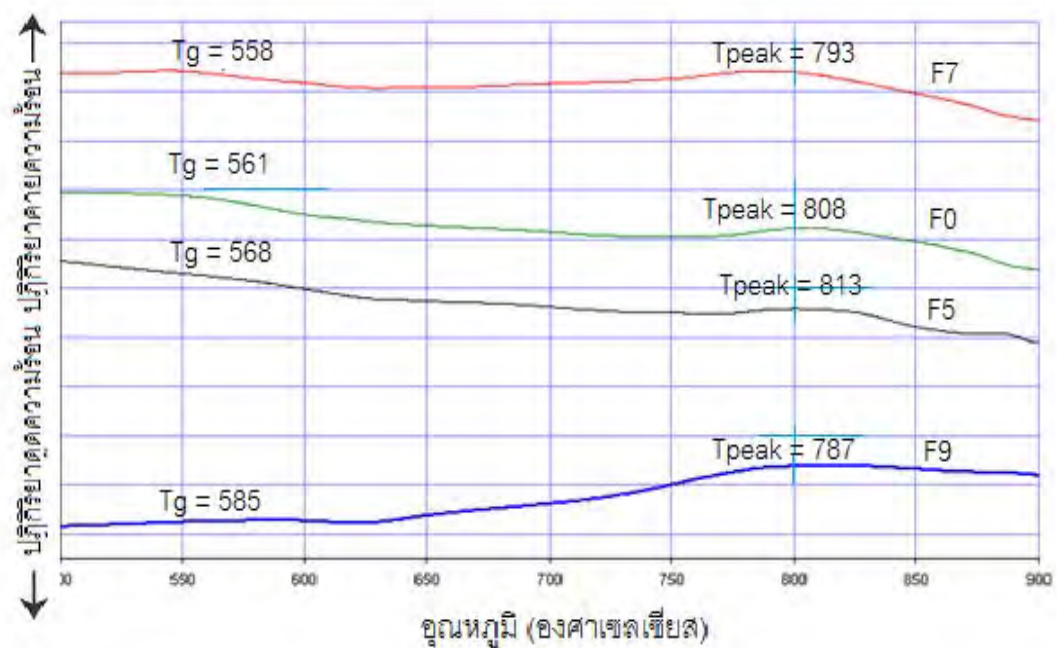


ภาพที่ 4.6 กระบวนการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก เมื่อ (ก) การเกิดนิวเคลียส (ข) การโตของผลึกบนนิวเคลียส และ (ค) ผลึกของกลาสเซรามิก (Holand และ Beall, 2002)

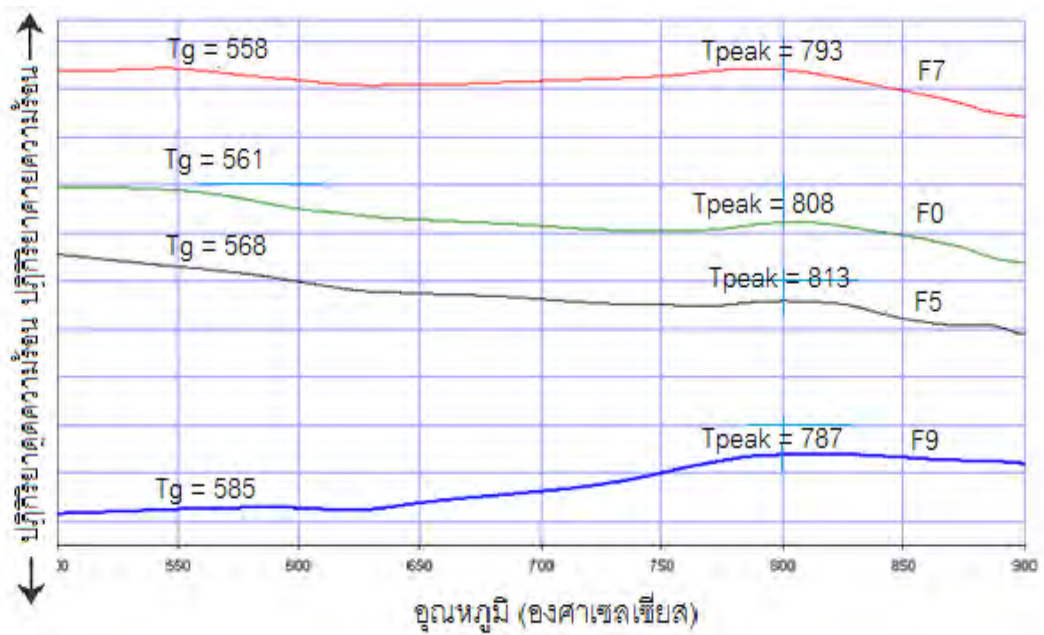
ส่วนอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว และอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างสี่เหลี่ยม สีชา สีใสและสีน้ำเงินทั้งหมด 16 สูตรเกิดขึ้นในทำนองเดียวกันกับแก้วตัวอย่างสี่เหลี่ยมสูตร G5 ดังแสดงในภาพที่ 4.5 โดยในที่นี้จะนำอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่าง 4 สีจำนวน 16 สูตร มาวางเรียงซ้อนกัน เพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงดังในภาพ 4.7-4.10 จากการวิเคราะห์ความแตกต่างของความร้อนของแก้วตัวอย่างทั้ง 4 สีจำนวน 16 สูตร พบว่าแก้วตัวอย่างมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ใกล้เคียงกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสรุปอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.4



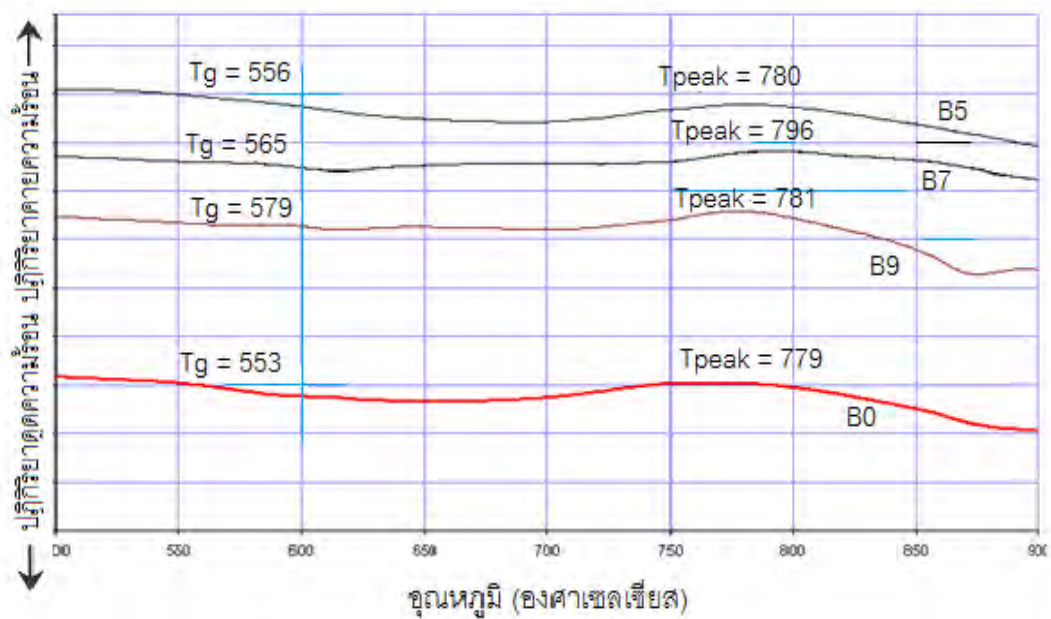
ภาพที่ 4.7 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0-9 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.8 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีขาวและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0-9 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.9 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีใสและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0-9 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.10 อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีน้ำเงินและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0-9 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างทั้ง 16 สูตร

สูตรแก้ว ตัวอย่าง	อุณหภูมิการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก (องศาเซลเซียส)	
	Tg	Tpeak
G0	563	786
G5	579	793
G7	585	801
G9	588	792
A0	565	789
A5	584	784
A7	571	785
A9	588	789
F0	561	808
F5	568	813
F7	558	793
F9	585	787
B0	553	779
B5	556	780
B7	565	796
B9	579	781

จากตารางที่ 4.4 พบว่า

- แก้วตัวอย่างสีเขียวสูตร G0-G9 มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วและช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ผลึกโตมากที่สุด 563-588 องศาเซลเซียส และ 785-801 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- แก้วตัวอย่างสีขาวสูตร A0-A9 มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว และช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ผลึกโตมากที่สุด 565-588 องศาเซลเซียส และ 784-789 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- แก้วตัวอย่างสีใสสูตร F0-F9 มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว และช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ผลึกโตมากที่สุด 561-585 องศาเซลเซียส และ 787-813 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- แก้วตัวอย่างสีน้ำเงินสูตร B0-B9 มีช่วงอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้ว และช่วงอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ผลึกโตมากที่สุด 553-579 องศาเซลเซียส และ 779-796 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้ว ในตารางที่ 4.4 พบว่า แก้วตัวอย่างสีเขียว สีใสและสีน้ำเงิน มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ 600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ผลึกโตมากที่สุดประมาณ 800 องศาเซลเซียส แต่แก้วตัวอย่างสีชาที่มีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วประมาณ 620 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ผลึกโตมากที่สุดประมาณ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างสีชาคล้ายคลึงกับแก้วตัวอย่างสีเขียว สีใส และสีน้ำเงิน ดังนั้นแก้วตัวอย่างทั้ง 4 สีจำนวน 16 สูตรมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสภาพแก้วในช่วง 600-620 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ผลึกเริ่มเกิดขึ้นประมาณ 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ผลึกโตมากที่สุดประมาณ 800 องศาเซลเซียส

โดยในการทำให้แก้วเกิดผลึกเพื่อเปลี่ยนเป็นกลาสเซรามิก จะพิจารณาจากอุณหภูมิการเกิดผลึกเท่านั้น และจากกระบวนการเกิดผลึกที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่ามี 2 กระบวนการที่ใช้ในการเกิดผลึก คือ กระบวนการเกิดนิวเคลียสและกระบวนการเกิดผลึกบนนิวเคลียส ซึ่งจากการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึกของแก้วตัวอย่างทั้ง 4 สีจำนวน 16 สูตร ดังแสดงในภาพที่ 4.7-4.10 และ ตารางที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึก 2 อุณหภูมิ คือ อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียสประมาณ 700-800 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียสประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เนื่องจากการทดลองนี้ต้องการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อการควบคุมความร้อนในการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก จึงทำการแปรค่าอุณหภูมิที่ใช้ควบคุมความร้อน และกำหนดเวลาที่ใช้ควบคุมความร้อน เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใช้ศึกษา โดยนำแก้วตัวอย่างที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.3 ทั้ง 16 สูตรมาทำการทดลองควบคุมความร้อน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองดังนี้

ชุดที่ 1 ควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ชุดที่ 2 ควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ชุดที่ 3 ควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

โดยกลาสเซรามิกทั้ง 4 สีที่ได้หลังการให้ความร้อน แสดงดังในภาพที่ 4.11-4.14 พบว่ากลาสเซรามิกที่ได้หลังการให้ความร้อน มีสีที่ไม่แตกต่างจากกลาสเซรามิกก่อนนำมาให้ความร้อน

ที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กลาสเซรามิกสีเขียว สีชาและสีใส





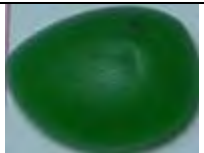







เกิดผลึกขึ้นที่ผิวหน้าเพียงเล็กน้อย ทำให้กลาสเซรามิกที่ได้มีลักษณะผิวหน้าไม่มันวาว ชุ่มเล็กน้อย ส่วนกลาสเซรามิกสีน้ำเงินไม่พบการเกิดผลึกขึ้นที่ผิวหน้า ทำให้กลาสเซรามิกมีลักษณะผิวหน้ามันวาวเหมือนแก้ว

ที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กลาสเซรามิกทั้ง 4 สีเกิดผลึกขึ้นที่ผิวหน้ามากขึ้น ทำให้กลาสเซรามิกที่ได้มีลักษณะผิวหน้าไม่มันวาวและชุ่มมากขึ้น













ที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลึกของกลาสเซรามิกทั้ง 4 สีเกิดขึ้นที่ผิวหน้ามากกว่า กลาสเซรามิกที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 750 องศาเซลเซียส ทำให้กลาสเซรามิกที่ได้มีลักษณะผิวหน้าไม่มันวาวและชุ่มมากขึ้นกว่าเดิม

ในการเกิดผลึกของกลาสเซรามิกจะเกิดขึ้นที่ผิวหน้าง่ายกว่าการเกิดผลึกจากภายใน เนื่องจากนิวเคลียสที่ใช้ในการเกิดผลึกมีลักษณะการเกิดนิวเคลียสแบบเฮเทอโรจีเนียส นิวคลีโอชัน (Heterogeneous Nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสโดยที่มีตัวช่วยการเกิดนิวเคลียส (Nucleating agent) ในที่นี้ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารที่ช่วยให้ผลึกเกิดง่ายขึ้น ซึ่งเกิดนิวเคลียสแบบเฮเทอโรจีเนียส นิวคลีโอชัน ที่ผิวหน้าจะใช้พลังงานในการเกิดนิวเคลียสที่น้อยกว่าการเกิดนิวเคลียสแบบโฮโมจีเนียส นิวคลีโอชัน (Homogeneous Nucleation) ซึ่งเป็นการเกิดนิวเคลียสโดยการเกาะของกลุ่มอะตอมภายในเนื้อแก้วโดยปราศจากตัวช่วย โดยในการทดลองจะควบคุมเวลาที่ใช้ในการเกิดนิวเคลียสและการเกิดผลึก จึงทำให้เกิดการโตของนิวเคลียสที่ผิวหน้าและผลึกที่ได้จึงเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวหน้าเท่านั้น (Holand และ Beall, 2002)













จากการทดลองการควบคุมความร้อนในการเกิดผลึกของกลาสเซรามิกทั้ง 3 ชุด ด้วยการสังเกตด้วยสายตา พบว่าในการควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นสภาวะที่มีการเกิดผลึกที่ผิวหน้ามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับอุณหภูมิการเกิดผลึกของแก้วทั้ง 4 สีดังแสดงในตารางที่ 4.4 แต่จากการสังเกตด้วยสายตาจะให้ผลการทดลองที่ไม่แน่นอน จึงทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมความร้อนของแก้วเพื่อให้เกิดผลึกด้วยการนำกลาสเซรามิกที่ได้หลังการควบคุมความร้อนทั้ง 3 ชุดการทดลอง มาตรวจจสอบเฟสการเกิดผลึกด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ เพื่อดูว่าอุณหภูมิการเกิดนิวเคลียสและอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส สภาวะไหนเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการเกิดผลึก

อุณหภูมิการเกิดผลึก (องศาเซลเซียส)	ร้อยละของ TiO ₂ โดยน้ำหนัก			
	0	5	7	9
700 1 ชม. / 800 2 ชม.				
	G0	G5	G7	G9
750 1 ชม. / 850 2 ชม.				
	G0	G5	G7	G9
800 1 ชม. / 900 2 ชม.				
	G0	G5	G7	G9






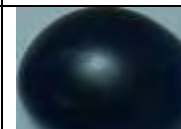

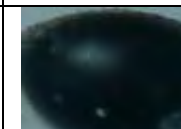




ภาพที่ 4.11 กลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G0 ถึง G9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 700 750 และ 800 °ซ

อุณหภูมิการเกิดผลึก (องศาเซลเซียส)	ร้อยละของ TiO ₂ โดยน้ำหนัก			
	0	5	7	9
700 1 ชม. / 800 2 ชม.				
	A0	A5	A7	A9
750 1 ชม. / 850 2 ชม.				
	A0	A5	A7	A9
800 1 ชม. / 900 2 ชม.				
	A0	A5	A7	A9

ภาพที่ 4.12 กลาสเซรามิกสีดำสูตร A0 ถึง A9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 700 750 และ 800 °ซ

อุณหภูมิการเกิดผลึก (องศาเซลเซียส)	ร้อยละของ TiO ₂ โดยน้ำหนัก			
	0	5	7	9
700 1 ชม. / 800 2 ชม.				
	F0	F5	F7	F9
750 1 ชม. / 850 2 ชม.				
	F0	F5	F7	F9
800 1 ชม. / 900 2 ชม.				
	F0	F5	F7	F9

ภาพที่ 4.13 กลาสเซรามิกสีใสสูตร F0 ถึง F9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 700 750 และ 800°ซ

อุณหภูมิการเกิดผลึก (องศาเซลเซียส)	ร้อยละของ TiO ₂ โดยน้ำหนัก			
	0	5	7	9
700 1 ชม. / 800 2 ชม.				
	B0	B5	B7	B9
750 1 ชม. / 850 2 ชม.				
	B0	B5	B7	B9
800 1 ชม. / 900 2 ชม.				
	B0	B5	B7	B9

ภาพที่ 4.14 กลาสเซรามิกสีน้ำเงินสูตร B0 ถึง B9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 700 750 และ 800°ซ

4.5 ตรวจสอบการเกิดเฟสและโครงสร้างของเฟสที่เกิดขึ้นในกลาสเซรามิก

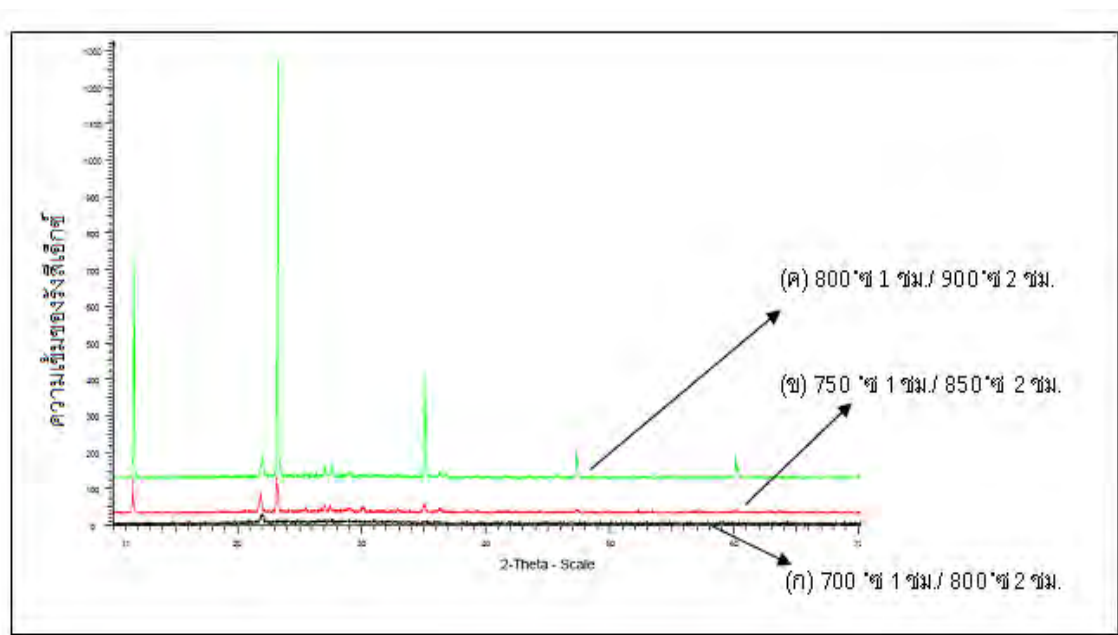
4.5.1 ตรวจสอบเฟสการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก

ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการควบคุมความร้อนของแก้วเพื่อให้เกิดผลึกด้วยการนำกลาสเซรามิกที่ได้หลังการควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดผลึก ดังที่ได้กำหนดสภาวะในการควบคุมความร้อนที่ใช้ในการเกิดผลึกของ 3 ชุดการทดลองที่กล่าวมาในหัวข้อ 4.4 มาตรวจสอบเฟสการเกิดผลึกด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เพื่อดูว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกสภาวะไหนเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการผลิตกลาสเซรามิก ในที่นี้จะใช้กลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G9 มาทำการตรวจสอบเฟสการเกิดผลึกเพื่อหาสภาวะในการควบคุมความร้อนที่เหมาะสมในการผลิตกลาสเซรามิก เนื่องจากกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G9 มีการผสมไททานเนียมไดออกไซด์ซึ่งใช้เป็นตัวช่วยในการเกิดผลึกมากที่สุด จึงควรมีการเกิดผลึกมากกว่ากลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G0-G7

จากการตรวจสอบเฟสการเกิดผลึก (XRD) ของกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G9 ของชุดการทดลองที่ 1 ซึ่งควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 2 ซึ่งควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

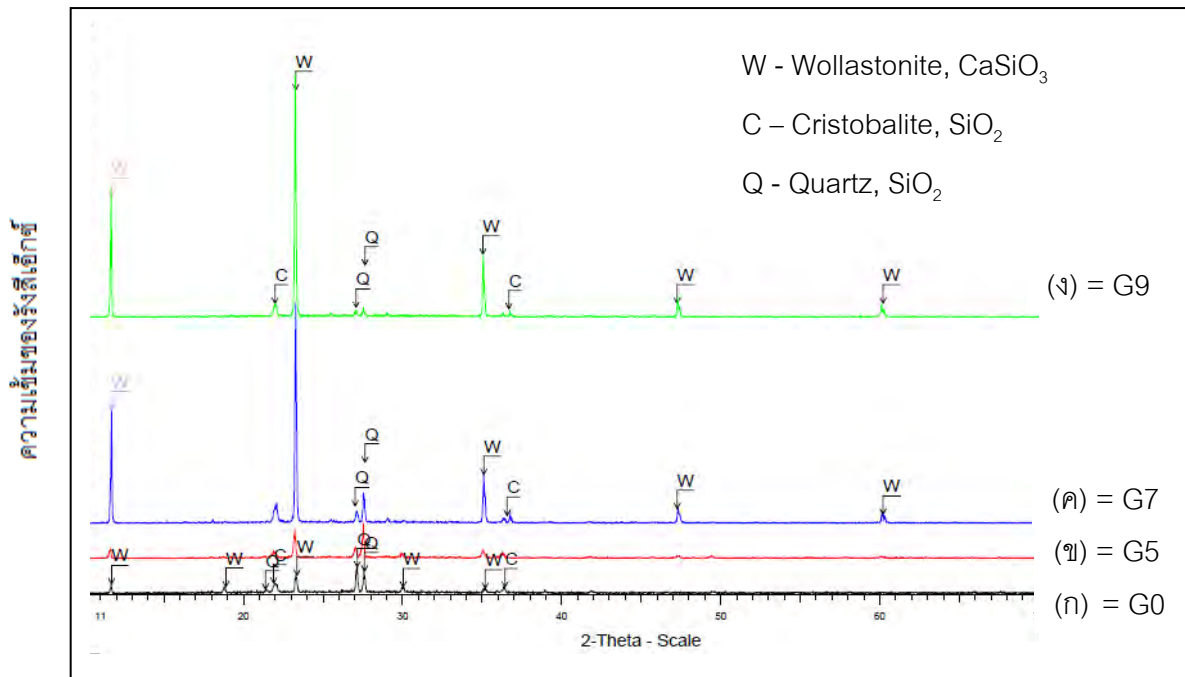
พบว่าในการควบคุมความร้อนของการทดลองชุดที่ 1 และ 2 เกิดพีคของเฟสการเกิดผลึกไม่ค่อยชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 4.15 (ก) และ 4.15 (ข) ตามลำดับ ส่วนการควบคุมความร้อนของการทดลองชุดที่ 3 ที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เกิดพีคของเฟสการเกิดผลึกเกิดชัดเจนมากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 4.15 (ค)

ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในตารางที่ 4.4 คือ ผลึกจะเกิดมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส จึงนำกลาสเซรามิกทั้ง 4 สีจำนวน 16 สูตรที่ได้ทำการควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ในที่นี้จะขอใช้คำว่าอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ 800 องศาเซลเซียสแทนการควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิการเกิดนิวเคลียส 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและอุณหภูมิที่ผลึกโตบนนิวเคลียส 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) มาตรวจสอบเฟสการเกิดผลึก

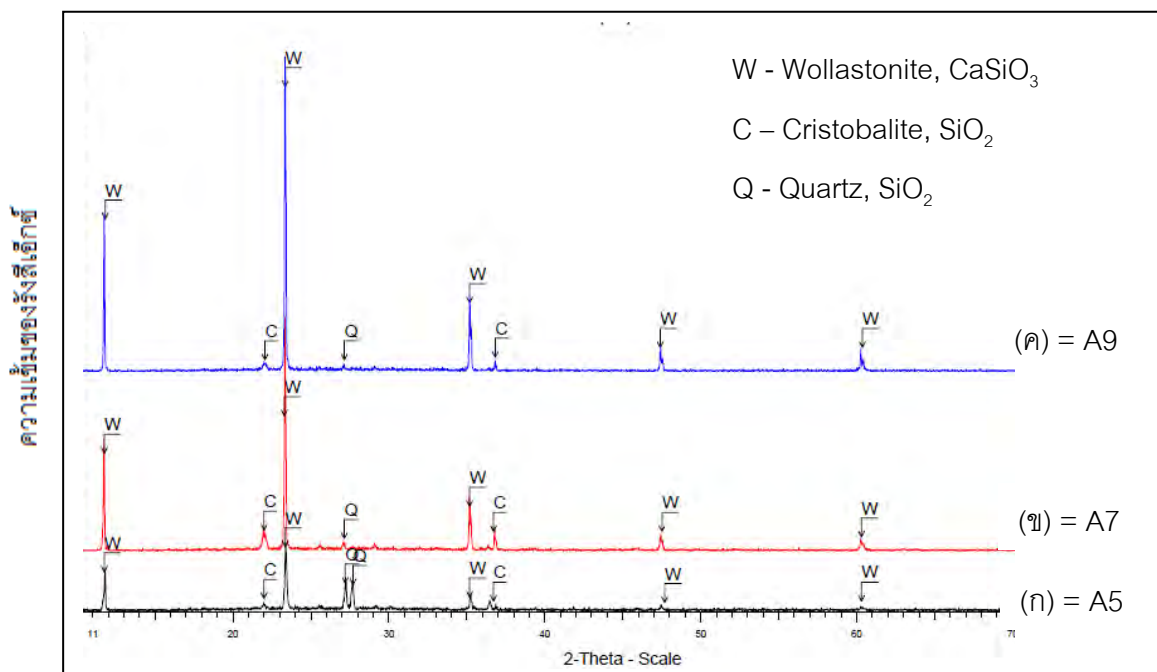


ภาพที่ 4.15 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก (ก) 700 °ซ 1 ซม./ 800°ซ 2 ซม. (ข) 750 °ซ 1 ซม./ 850°ซ 2 ซม. และ (ค) 800 °ซ 1 ซม./ 900°ซ 2 ซม.

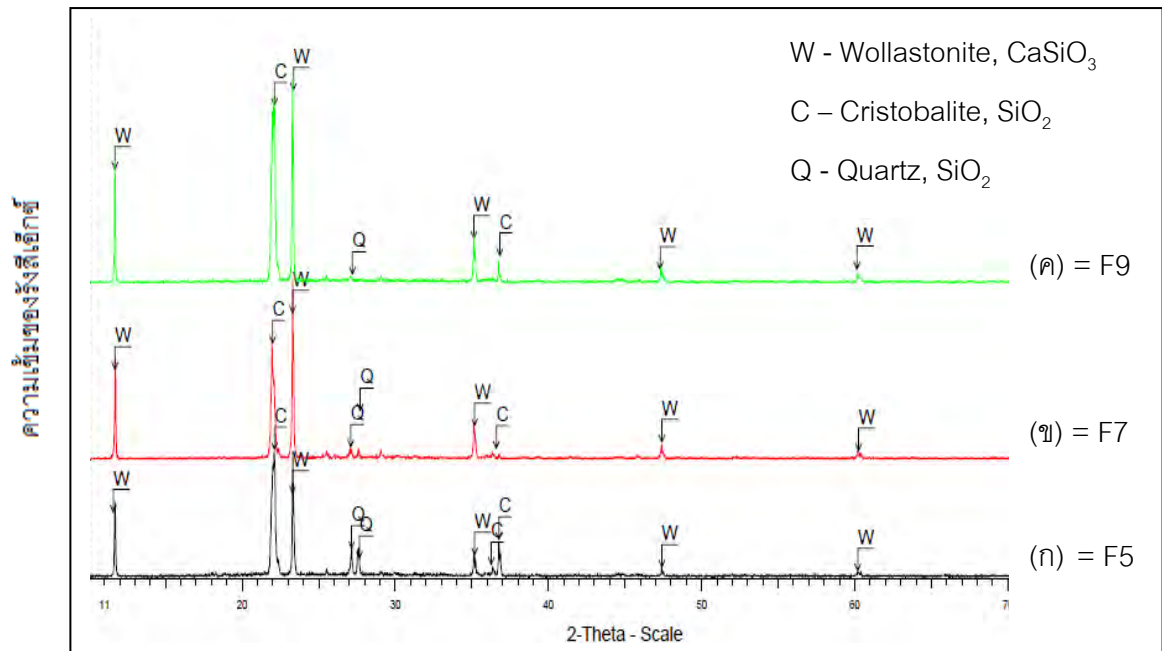
พบว่า กลาสเซรามิกทั้ง 4 สูตรเกิดผลึกบนผิวหน้า และเกิดเฟสของผลึกวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite, CaSiO_3) ซึ่งมีรหัสมาตรฐานที่ใช้ระบุความเป็นเอกลักษณ์ของผลึกที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (Joint Committee on Powder Diffraction Standards, JCPDS คือ 01-084-0654) คริสโตบาไลท์ (Cristobalite, SiO_2 ที่มีรหัสมาตรฐานของ JCPDS คือ 00-001-0438) และ ควอตซ์ (Quartz, SiO_2 ที่มีรหัสมาตรฐานของ JCPDS คือ 01-078-1258) โดยกลาสเซรามิกสูตร G9 A9 F9 และ B9 ซึ่งมีปริมาณ TiO_2 มากที่สุด จะเกิดผลึกบนผิวหน้ามากที่สุด และเกิดเฟสของผลึกวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite, CaSiO_3) เป็นหลัก ดังแสดงในภาพที่ 4.16-4.19 เนื่องจากการเติม TiO_2 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้ผลึกเกิดง่ายขึ้น โดยทำให้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกลาสเซรามิก เข้าไปสร้างพันธะกับโครงสร้างของแก้ว โดยไปทำลายพันธะระหว่างซิลิกอน และออกซิเจน (Si-O-Si bond) และเข้าไปแทนที่ซิลิเกตไอออน (Si^{4+}) ในโครงสร้างของแก้ว ทำให้เกิดการรวมตัวของผลึกวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite, CaSiO_3) (Holand และ Beall, 2002)



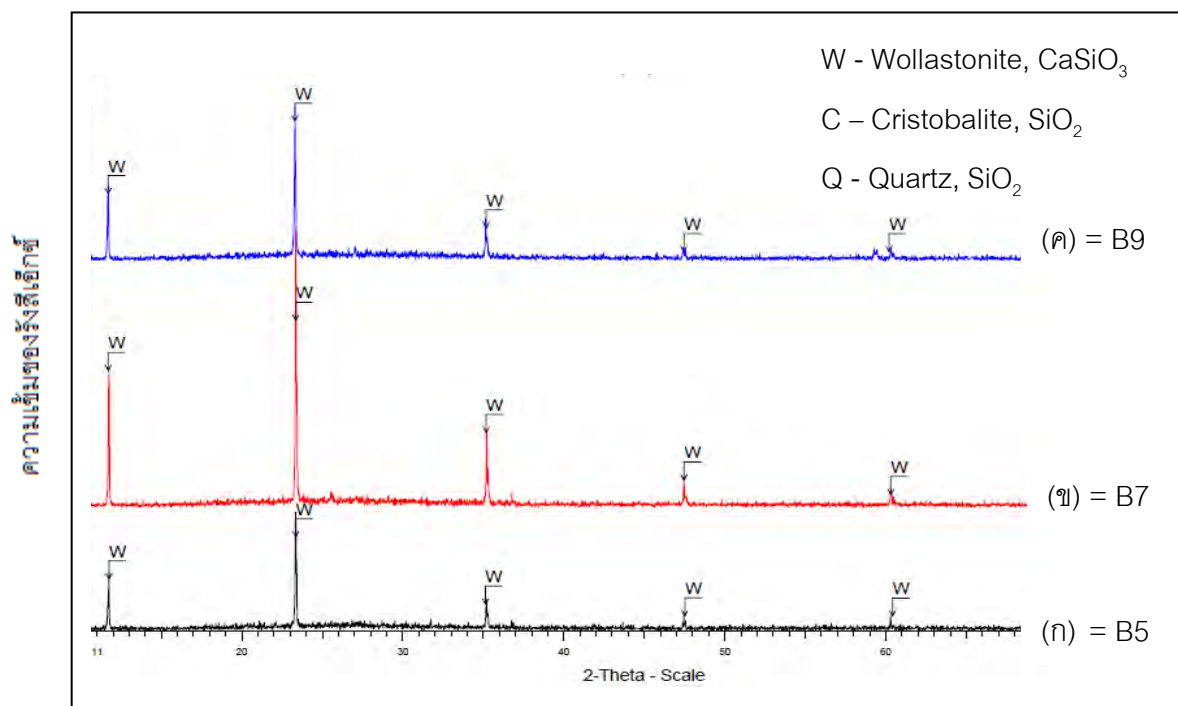
ภาพที่ 4.16 เฟสการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสี่เหลี่ยม G0 ถึง G9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.17 เฟสการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสี่เหลี่ยม A5 ถึง A9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.18 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสีใสสูตร F5 ถึง F9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส



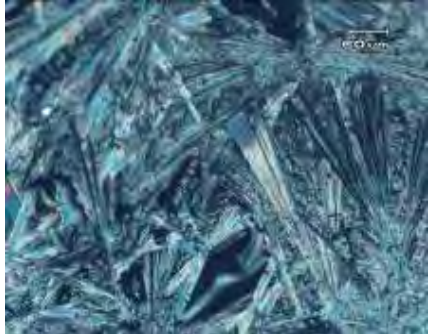

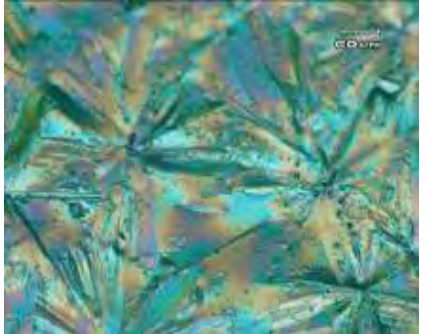

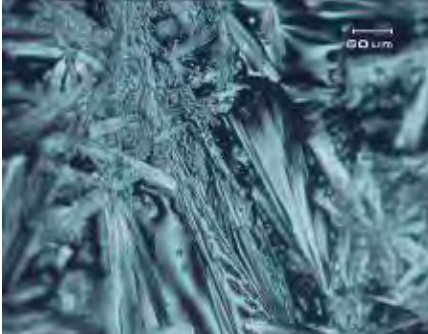
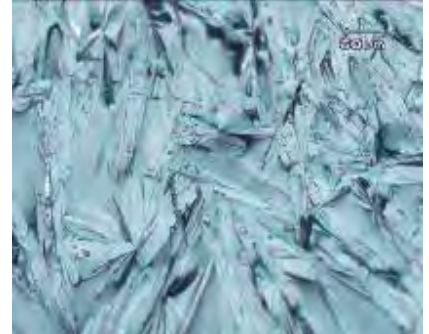
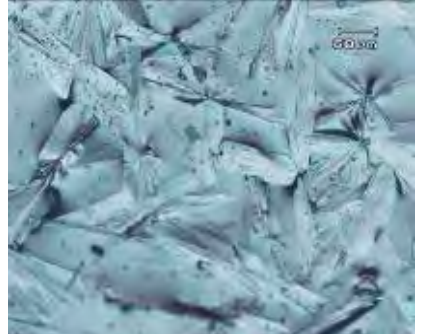

ภาพที่ 4.19 เฟสการวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) ของกลาสเซรามิกสีน้ำเงินสูตร B5 ถึง B9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส

4.5.2 โครงสร้างทางจุลภาคของเฟสที่เกิดขึ้นในกลาสเซรามิก


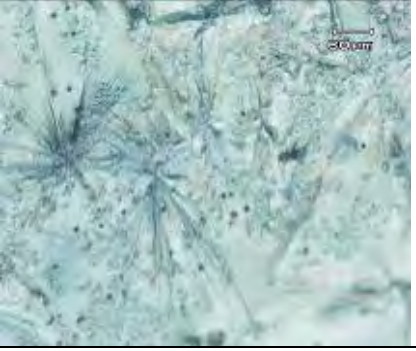


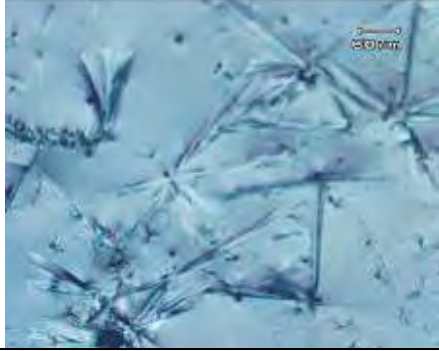



การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของผลึกของกลาสเซรามิกทั้ง 4 สี่ จำนวน 16 สูตร ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียสด้วยเครื่องออปติคอลลไมโครสโคป (OM) ดังแสดงในภาพที่ 4.20 และภาพที่ 4.21 พบว่าเกิดเฟสของผลึกวอลลาสโตไนท์ (CaSiO_3) ที่ผิวหน้าของกลาสเซรามิก โดยผลึกมีรูปร่างคล้ายดอกไม้ที่มีแกนเรียวยาวเหมือนเข็มและจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของผลึกของกลาสเซรามิกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ของกลาสเซรามิกสูตร G7 ซึ่งใช้เป็นตัวอย่างแทนกลาสเซรามิกสูตรอื่นๆ พบว่าที่กำลังขยาย 200 เท่าผลึกของกลาสเซรามิกสูตร G7 มีรูปร่างแบบเดียวกับการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของผลึกด้วยเครื่องออปติคอลลไมโครสโคป ดังแสดงในภาพที่ 4.22 โดยทางทฤษฎีโครงสร้างทางจุลภาคของผลึกวอลลาสโตไนท์ที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน ผลึกมีรูปร่างคล้ายเข็ม (Needle-shaped) (Holand และ Beall, 2002) จึงทำให้เป็นการยืนยันว่าผลึกที่เกิดขึ้นเป็นผลึกของวอลลาสโตไนท์

การเติมไททานเนียมไดออกไซด์มีผลต่อการเกิดของผลึกคือกลาสเซรามิกสูตร G0 โครงสร้างยังมีรูพรุนอยู่ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของไททานเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวช่วยในการเกิดผลึกทำให้ผลึกเติบโตมากขึ้น จึงไปเข้าไปบดบังรูพรุนของโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างมีปริมาณรูพรุนที่น้อยลง จึงมีความเป็นกลาสเซรามิกมากขึ้น (Holand และ Beall, 2002) และจากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของการเกิดผลึกของกลาสเซรามิกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า พบว่ากลาสเซรามิกสูตร G7 โครงสร้างมีรูพรุนที่ผิวหน้าน้อยมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.22

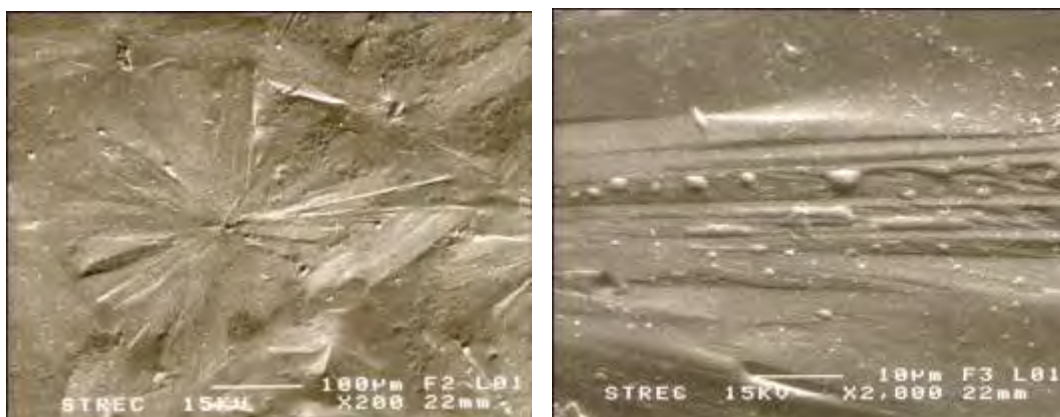
โครงสร้างทางจุลภาคของเฟสที่เกิดขึ้นในกลาสเซรามิก

กลาส เซรามิก	ร้อยละของ TiO ₂ โดยน้ำหนัก			
	0	5	7	9
สีเขียว				
	G0	G5	G7	G9
สีชา				
	A0	A5	A7	A9

ภาพที่ 4.20 ผลึกจากการตรวจสอบด้วยออปติคัลไมโครสโคปกำลังขยาย 60 เท่าของกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G0 ถึง G9 และกลาสเซรามิกสีชาสูตร A0 ถึง A9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส

กลาส เซรามิก	ร้อยละของ TiO ₂ โดยน้ำหนัก			
	0	5	7	9
สีใส				
	F0	F5	F7	F9
สีน้ำเงิน				
	B0	B5	B7	B9

ภาพที่ 4.20 ผลึกจากการตรวจสอบด้วยออปติคอลลไมโครสโคปกำลังขยาย 60 เท่าของกลาสเซรามิกสีใสสูตร F0 ถึง F9 และกลาสเซรามิกสีน้ำเงินสูตร B0 ถึง B9 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.22 ผลึกจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกลาสเซรามิกสีเขียวสูตร G7 ที่อุณหภูมิการเกิดผลึก 800 องศาเซลเซียส (ก) กำลังขยาย 200 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 2,000 เท่า

4.6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก้วและกลาสเซรามิก

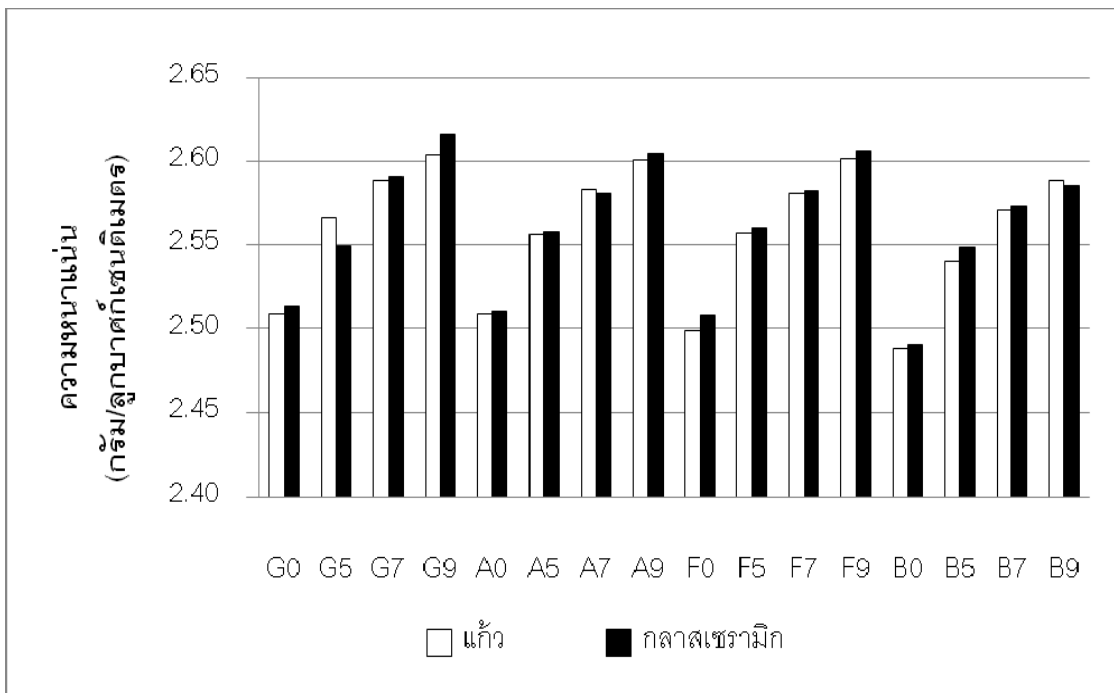
การทดสอบลักษณะสมบัติทางกายภาพของแก้วและกลาสเซรามิก ได้แก่ ความหนาแน่น ความพรุนตัว การดูดซึมน้ำและความแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าค่าความหนาแน่นของแก้วและกลาสเซรามิกมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน จากภาพที่ 4.23 พบว่าแก้วและกลาสเซรามิกที่ไม่ได้เติมไททาเนียมไดออกไซด์ มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงที่เท่ากัน คือ 2.49–2.51 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร แก้วและกลาสเซรามิกมีค่าความหนาแน่นมากขึ้นเมื่อเติมไททาเนียมไดออกไซด์ และค่าที่ได้ที่ไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งอยู่ในช่วง 2.54–2.60 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และในช่วง 2.55–2.62 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากกลาสเซรามิกที่ได้เกิดผลึกเฉพาะผิวหน้าของแก้วเท่านั้น จึงทำให้กลาสเซรามิกมีส่วนที่เป็นแก้วอยู่มาก ดังนั้นค่าความหนาแน่นของแก้วและกลาสเซรามิกจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาภาพที่ 4.24 และภาพที่ 4.25 พบว่าค่าความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำมีความสอดคล้องกัน คือ แก้วและกลาสเซรามิกมีค่าความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำ โดยกลาสเซรามิกจะมีค่าความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าแก้ว เนื่องจากกลาสเซรามิกมีโครงสร้างที่เป็นผลึกมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่เป็นวงสม่ำเสมอมากกว่าแก้วที่มีจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่มีผลึกและไม่เป็นระเบียบ การเติมไททาเนียมไดออกไซด์ไม่มีผลต่อค่าความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำของแก้ว แต่จะมีผลต่อกลาสเซรามิก คือ ค่าความพรุนตัวและค่าการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกจะต่ำลงเมื่อเติมไททาเนียมไดออกไซด์มากขึ้น เนื่องจากไททาเนียมไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้ผลึกเกิดง่ายขึ้น ทำให้ช่องว่างในโครงสร้างของผลึกแคบลง จึงสามารถดูดซึมน้ำได้ต่ำลง (Holand และ Beall, 2002)

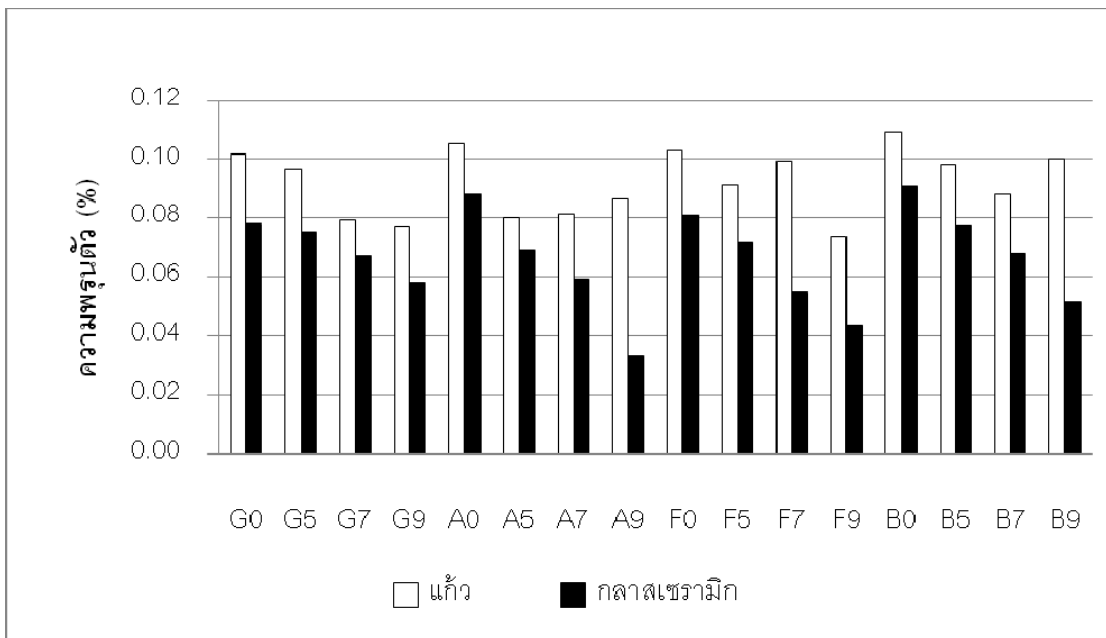
เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.26 พบว่าแก้วมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่า
กลาสเซรามิก คือ แก้วและกลาสเซรามิกมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 490–518 กิโลกรัมต่อมิลลิตาราง
เมตร และช่วง 644–704 กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร ตามลำดับ โดยแก้วที่ได้มีค่าความแข็งที่สูง
กว่าแก้วโซดาไลม์ทั่วไป ซึ่งมีค่าความแข็งที่ 450 กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร (ณรงค์ศักดิ์ ธรรม
โชติ, 2549) และกลาสเซรามิกทั่วไปมีค่าความแข็งประมาณ 650 กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร
(ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2549) โดยกลาสเซรามิกที่ไม่ได้เติมไททาเนียมไดออกไซด์ จะมีค่าความ
แข็งที่ต่ำกว่าค่าความแข็งของกลาสเซรามิกทั่วไป ส่วนกลาสเซรามิกที่เติมไททาเนียมไดออกไซด์
จะมีค่าความแข็งที่สูงกว่าค่าความแข็งของกลาสเซรามิกทั่วไป ซึ่งการเติมไททาเนียมไดออกไซด์
จะไม่มีผลต่อการความแข็งของแก้ว แต่จะมีผลทำให้กลาสเซรามิกมีความแข็งมากขึ้น เนื่องจาก
ผลึกของกลาสเซรามิกที่เกิดขึ้น จะเข้าไปแทนที่ช่องว่างในโครงสร้างของแก้ว ทำให้กลาสเซรามิกมี
ความพรุนตัวที่ต่ำ จึงทำให้โครงสร้างมีความแข็งมากขึ้น (Holand และ Beall, 2002)

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางกายภาพของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 4 สี จำนวน 16 สูตร

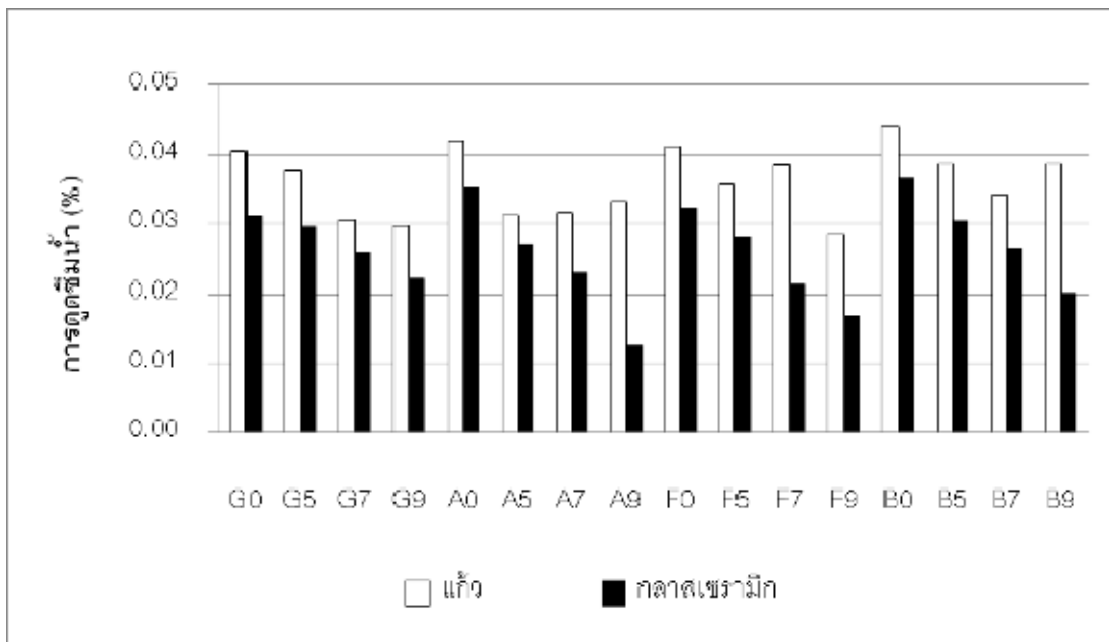
สูตร	ค่าความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)		ความพรุนตัว (ร้อยละ)		ค่าการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)		ค่าความแข็ง (กิโลกรัมต่อมิลลิ ตารางเมตร)	
	แก้ว	กลาส เซรามิก	แก้ว	กลาส เซรามิก	แก้ว	กลาส เซรามิก	แก้ว	กลาส เซรามิก
G0	2.51	2.51	0.10	0.08	0.04	0.03	490	644
G5	2.57	2.55	0.10	0.08	0.04	0.03	518	652
G7	2.59	2.59	0.08	0.07	0.03	0.03	518	677
G9	2.60	2.62	0.08	0.06	0.03	0.02	488	704
A0	2.51	2.51	0.11	0.09	0.04	0.04	533	640
A5	2.56	2.56	0.08	0.07	0.03	0.03	498	660
A7	2.58	2.58	0.08	0.06	0.03	0.03	490	678
A9	2.60	2.60	0.08	0.03	0.03	0.01	482	699
F0	2.50	2.51	0.10	0.08	0.04	0.03	504	640
F5	2.56	2.56	0.09	0.07	0.04	0.03	507	652
F7	2.58	2.58	0.10	0.06	0.04	0.02	490	682
F9	2.60	2.60	0.07	0.04	0.03	0.02	499	690
B0	2.49	2.49	0.11	0.09	0.04	0.04	513	652
B5	2.54	2.55	0.10	0.08	0.04	0.03	533	669
B7	2.57	2.57	0.09	0.07	0.03	0.03	527	677
B9	2.59	2.59	0.10	0.05	0.04	0.02	513	690



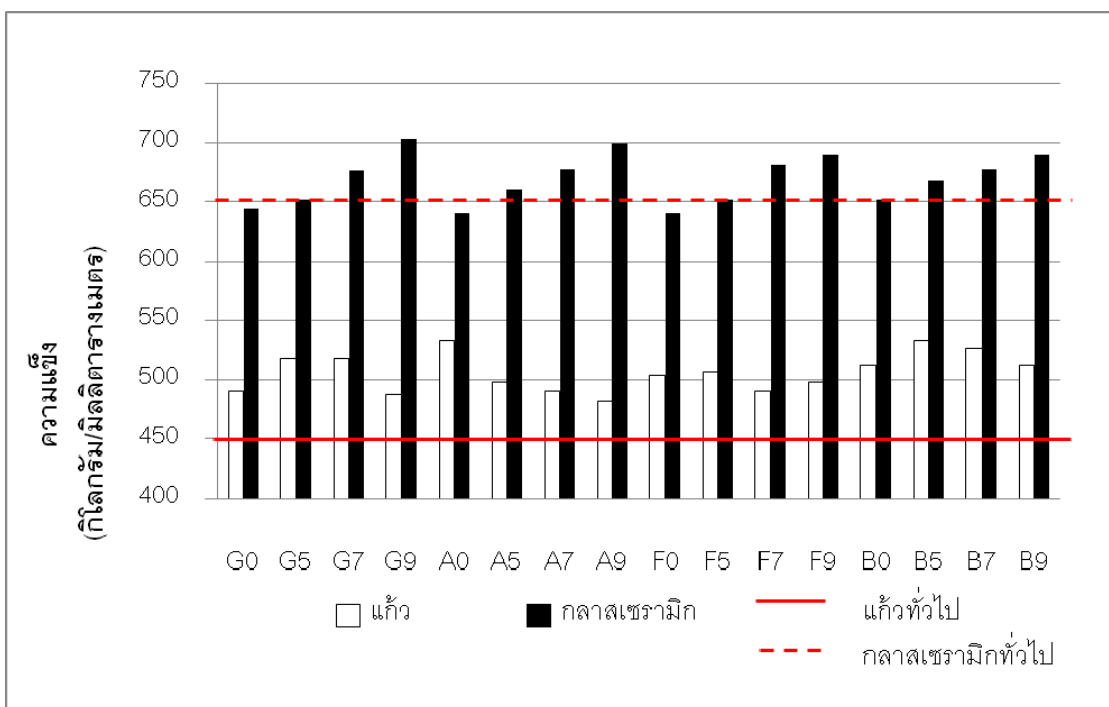
ภาพที่ 4.23 ค่าความหนาแน่นของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 16 สูตร



ภาพที่ 4.24 ค่าความพรุนตัวของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 16 สูตร



ภาพที่ 4.25 ค่าการดูดซึมน้ำของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 16 สูตร



ภาพที่ 4.26 ค่าความแข็งของแก้วและกลาสเซรามิกทั้ง 16 สูตร

ลักษณะสมบัติทางเคมีของแก้วและกลาสเซรามิกจากการทดสอบการทนทานต่อสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแก้วและกลาสเซรามิก โดยหาจากร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของการดูดซึ่มกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแก้วและกลาสเซรามิก ผลการทดลองพบว่าแก้วและกลาสเซรามิกก่อนและหลังการทดสอบมีลักษณะที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยจากการวิเคราะห์ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของการดูดซึ่มกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า แก้วและกลาสเซรามิกมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของการดูดซึ่มกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต่ำมากและมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกลาสเซรามิกที่เกิดผลึกของเฟสวอลลาสโตไนท์ (Wollastonite, CaSiO_3) โดยมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของการดูดซึ่มกรดและต่างประมาณ 0.080 โดยน้ำหนัก (Holand และ Beall, 2002) ดังนั้นแก้วและกลาสเซรามิกตัวอย่างจึงมีความทนทานต่อกรดและด่าง เชื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี จึงยากต่อการกัดกร่อน

ตารางที่ 4.6 ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของการดูดซึ่มกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ของแก้วและกลาสเซรามิก

สูตร	น้ำหนักที่หายไปของการดูดซึ่มกรดไนตริก(ร้อยละ)		น้ำหนักที่หายไปของการดูดซึ่มโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ)	
	แก้ว	กลาสเซรามิก	แก้ว	กลาสเซรามิก
G7	0.03	0.03	0.03	0.03
A7	0.05	0.03	0.03	0.02
F7	0.03	0.02	0.03	0.02
B7	0.06	0.03	0.03	0.03

ในการทดลองนี้กลาสเซรามิกสูตร G9 A9 F9 และ B9 ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดคือมีค่าความแข็งสูงที่สุดและมีความพรุนตัวที่ต่ำที่สุดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน หรือโมเสกตกแต่งฝาผนัง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการกลาสเซรามิกที่มีความเหมาะสมและประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิต จากการทดลองพบว่ากลาสเซรามิกที่เดิมไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกับกลาสเซรามิกที่เดิมไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก ดังนั้นในการผลิตกลาสเซรามิกที่มีความแข็งที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน คือ กลาสเซรามิกที่เดิมไททาเนียมไดออกไซด์ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก

4.7 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

ในการผลิตกลาสเซรามิกจะใช้วัตถุดิบที่มาจากทรัพยากรทางธรรมชาติ จำพวกทราย หินปูน แร่โดโลไมต์ แร่เฟลด์สปาร์ เป็นต้น ทำให้ในการผลิตกลาสเซรามิกจำเป็นต้องขุดแร่จากธรรมชาติขึ้นมาเพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกลาสเซรามิก จึงเป็นสาเหตุทำให้ทรัพยากรทางธรรมชาติค่อยๆ หดไป ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงนำเศษแก้วรีไซเคิลมาทดแทนวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกลาสเซรามิกและเพิ่มความแข็งแรงของกลาสเซรามิกด้วยการเติมไททานเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารก่อผลึกช่วยให้ผลึกเกิดง่ายขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะทำการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับใช้ในระดับห้องปฏิบัติการจากการทดลองเท่านั้น ในที่นี้จะทำการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของการผลิตกลาสเซรามิกที่ได้จากการผสมเศษแก้วสีเขียวและไททานเนียมไดออกไซด์

การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกลาสเซรามิกสำหรับใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ วัตถุดิบที่ใช้ในที่นี้เป็นวัตถุดิบจากการใช้เศษแก้วรีไซเคิลร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก มาทำการผลิตกลาสเซรามิก ซึ่งในการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการนี้ใช้เศษแก้วสีเขียวมาทำการทดลอง โดยนำมาหลอมในถ้วยอะลูมินาครุซีเบล ซึ่งถ้วย 1 ใบสามารถหลอมเศษแก้วได้ประมาณ 200 กรัมและได้แก้วหลังการหลอมหนักประมาณ 180 กรัม ซึ่งมีการสูญเสียเนื้อแก้วที่ติดในถ้วยครุซีเบลประมาณ 20 กรัม เมื่อนำแก้วที่ได้ไปทำให้เกิดผลึก โดยการให้ความควบคุมความร้อนที่เหมาะสม พบว่ากลาสเซรามิกที่ได้ไม่มีการสูญเสียน้ำหนักและจากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกลาสเซรามิกจากเศษแก้วรีไซเคิลด้วยการเติมไททานเนียมไดออกไซด์เพื่อการพัฒนาสมบัติเชิงกลของกลาสเซรามิก พบว่ากลาสเซรามิกที่มีความแข็งแรงเหมาะสมที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นโมเสกประดับตกแต่งฝาผนัง คือกลาสเซรามิกที่ได้จากการผสมเศษแก้วสีเขียวและไททานเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการผลิตกลาสเซรามิก 1 กิโลกรัมจะใช้เศษแก้วสีเขียวประมาณ 930 กรัม หรือ 0.93 กิโลกรัมและเติมไททานเนียมไดออกไซด์ประมาณ 70 กรัมหรือ 0.07 กิโลกรัม จากการสอบถามราคาของเศษแก้วสีเขียวจากบริษัท วงษ์พาณิชย์ พบว่าเศษแก้วสีเขียวมีราคาประมาณ 0.65 บาท/กิโลกรัม (บริษัท วงษ์พาณิชย์, 4 มิถุนายน 2552) และจากการสอบถามราคาสารเคมีจากบริษัท เซอร์นิค จำกัด พบว่าไททานเนียมไดออกไซด์มีราคาประมาณ 150 บาท/กิโลกรัม (บริษัท เซอร์นิค จำกัด, 12 กุมภาพันธ์ 2553)

ดังนั้นในการผลิตกลาสเซรามิก 1 กิโลกรัมที่ได้จากการผสมเศษแก้วสีเขียวและไททานเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้เศษแก้วสีเขียวประมาณ 0.93 กิโลกรัม คิดเป็นค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบประมาณ 0.6 บาทและเติมไททานเนียมไดออกไซด์ประมาณ 0.07 กิโลกรัม คิดเป็นค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบประมาณ 10.5 บาท ดังนั้นคิดเป็นค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบทั้งหมดประมาณ 11.1 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 28.11 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดซึ่งแสดงในตารางที่ 4.7

การพิจารณาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตกลาสเซรามิกซึ่งมี 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการหลอมแก้วและกระบวนการควบคุมความร้อนให้แก้วเกิดผลึก โดยในกระบวนการหลอมแก้วเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งพลังงานที่ใช้คิดเป็นร้อยละ 75 ของพลังงานที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ดังนั้นแนวทางหนึ่งที่ใช้ในการลดพลังงานการหลอมแก้ว คือ การนำเศษแก้วมาผสมกับวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมแก้ว โดยในงานวิจัยนี้เป็นการผลิตกลาสเซรามิกที่ได้จากการผสมเศษแก้ววีโรซิลร้อยละ 100 และไททาเนียมไดออกไซด์ มาทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าขนาดของเศษแก้วที่นำมาทดลองเป็นขนาดเล็กที่สุดของโรงงานบางกอกกล๊าส คือขนาด 1-4 มิลลิเมตร แต่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของไททาเนียมไดออกไซด์ที่นำมาใช้ผสม จึงทำให้ต้องมีการบดและคัดขนาดของเศษแก้วที่เหมาะสมต่อการหลอมแก้วเพื่อผลิตเป็นกลาสเซรามิก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการคิดพลังงานที่ใช้ในการบดเศษแก้วเพิ่มขึ้น โดยนำเศษแก้วขนาด 1-4 มิลลิเมตรมาบดให้ได้ขนาด 0.5-1 มิลลิเมตร จะต้องใช้เวลาในการบดประมาณ 2 ชั่วโมง ส่วนในกระบวนการหลอมวัตถุดิบที่ได้จากการผสมเศษแก้วและไททาเนียมไดออกไซด์ จะหลอมในเตาหลอมที่ใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งหลอมที่อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้เป็นเศษแก้วจึงต้องการอุณหภูมิการหลอมและเวลานี้น้อยกว่าการใช้วัตถุดิบจากสารเคมีมาหลอมแก้ว โดยโรงงานผลิตแก้วส่วนใหญ่จะหลอมวัตถุดิบที่อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งจะใช้พลังงานในการหลอมแก้วที่สูงกว่าการหลอมเศษแก้วอย่างเดียว ในการควบคุมความร้อนให้แก้วเกิดผลึกจะทำในเตาไฟฟ้า ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึกจะควบคุมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และคงสภาพของอุณหภูมิที่ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตกลาสเซรามิก 1 กิโลกรัมจากการผสมเศษแก้ววีโรซิลและไททาเนียมไดออกไซด์ แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าใช้จ่ายของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตกลาสเซรามิก 1 กิโลกรัมคิดเป็น 28.39 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 71.89 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด

ดังนั้นในการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นทั้งหมดในการผลิตกลาสเซรามิก 1 กิโลกรัมที่ได้จากการผสมเศษแก้วสีเขียวและไททาเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก สำหรับใช้ในระดับห้องปฏิบัติการคิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 39.49 บาท ซึ่งเป็นราคาที่สูงกว่าการผลิตกลาสเซรามิกในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากในการทดลองนี้ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งเป็นวัตถุดิบจากสารเคมีที่มีราคาค่อนข้างสูง จึงทำให้การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกลาสเซรามิกในระดับห้องปฏิบัติการมีราคาที่สูง ดังนั้นในลดค่าใช้จ่ายในการผลิตกลาสเซรามิกนี้จึงควรลดการใช้วัตถุดิบจากสารเคมีด้วยการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มาจากกากของเสียอุตสาหกรรมหรือใช้สารอื่นที่มีสมบัติในการเป็นตัวช่วยในการเกิดผลึกแทนการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตกลาสเซรามิก 1 กิโลกรัมสำหรับใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ

ค่าใช้จ่าย	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	ปริมาณที่ใช้	พลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง หรือ หน่วย)	ราคาต่อหน่วย	ราคา (บาท)	
เศษแก้วสีเขียว	-	0.93 กิโลกรัม	-	¹ 0.65 บาท/กิโลกรัม	0.60	ค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบทั้งหมด 11.10 บาท (คิดเป็นร้อยละ 28.11 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด)
ไททาเนียมไดออกไซด์	-	0.07 กิโลกรัม	-	² 150 บาท/กิโลกรัม	10.50	
ค่าพลังงานในการบดแก้ว	1.5	2 ชั่วโมง	³ 3.0	⁴ 1.67 บาท/หน่วย	5.01	ค่าใช้จ่ายของพลังงานทั้งหมด 28.39 บาท (คิดเป็นร้อยละ 71.89 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด)
ค่าพลังงานในการหลอมแก้ว	5.0	1 ชั่วโมง	³ 5.0	⁴ 1.67 บาท/หน่วย	8.35	
ค่าพลังงานในการทำให้เกิดผลึก	3.0	3 ชั่วโมง	³ 9.0	⁴ 1.67 บาท/หน่วย	15.03	
รวม					39.49	

หมายเหตุ: ¹บริษัทวงษ์พาณิชย์, 4 มิถุนายน 2552

²บริษัท เซอร์นิค จำกัด, 12 กุมภาพันธ์ 2553

³พลังงานไฟฟ้า = กำลังไฟฟ้า x เวลาที่ใช้
(กิโลวัตต์-ชั่วโมง) (กิโลวัตต์) (ชั่วโมง)

⁴อัตราค่าไฟฟ้าสำหรับธุรกิจอุตสาหกรรมและส่วนราชการ; การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2 เมษายน 2553

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การนำเศษแก้วรีไซเคิลที่ได้จากขยะบรรจุภัณฑ์มาทดแทนวัตถุดิบในการผลิต
กลาสเซรามิกและพัฒนาความแข็งของกลาสเซรามิกด้วยการเติมไททาเนียมไดออกไซด์สามารถ
สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เศษแก้วรีไซเคิลสี่เหลี่ยมผืนผ้าประกอบของเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 0.29
และโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ร้อยละ 0.24 เศษแก้วรีไซเคิลสี่เหลี่ยมผืนผ้าประกอบของเหล็กออกไซด์
ร้อยละ 0.30 และโครเมียมออกไซด์ร้อยละ 0.02 เศษแก้วรีไซเคิลสีน้ำเงินผืนผ้าประกอบของโค
บอลออกไซด์ (CoO) ร้อยละ 0.06 และโครเมียมออกไซด์ร้อยละ 0.03

2. อุณหภูมิการหลอมและขนาดของเศษแก้วรีไซเคิลที่เหมาะสมสำหรับการผลิต
กลาสเซรามิก คือ 1250 องศาเซลเซียสและขนาด 16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร) ตามลำดับ

3. อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก คือ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็น
อุณหภูมิที่เกิดผลึกมากที่สุด สำหรับเศษแก้วรีไซเคิลทั้ง 4 สี

4. กลาสเซรามิกที่มีความแข็งที่เหมาะสม คือกลาสเซรามิกที่ได้จากการผสมเศษ
แก้วรีไซเคิลและไททาเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก โดยกลาสเซรามิกที่ได้เกิดผลึกของ
เฟสวอลลาสโตไนท์ ($CaSiO_3$) และมีค่าความหนาแน่นประมาณ 2.59 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร มี
ค่าความแข็งประมาณ 677 กิโลกรัมต่อมิลลิเมตร ส่วนค่าความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำมี
ค่าค่อนข้างต่ำ

5. ไททาเนียมไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้ผลึกเกิดง่ายขึ้น โดยทำให้
แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของกลาสเซรามิก เข้าไปสร้างพันธะกับ
โครงสร้างของแก้ว โดยไปทำลายพันธะระหว่างซิลิกอนและออกซิเจน ซึ่งเข้าไปแทนที่ซิลิกेट
ไอออน (Si^{4+}) ในโครงสร้างของแก้ว ทำให้เกิดการรวมตัวของผลึกวอลลาสโตไนท์

6. กลาสเซรามิกที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฉนวนกันความร้อนหรือโมเสก
ประดับตกแต่งฝาผนัง การนำเศษแก้วมาประยุกต์ใช้ทดแทนวัตถุดิบในการผลิตกลาสเซรามิกเป็น
ทางเลือกหนึ่งในการจัดการของเสียประเภทแก้ว

1. การผลิตกลาสเซรามิก 1 กิโลกรัมที่ได้จากการผสมเศษแก้วสีเขียวและไททาเนียมไดออกไซด์ที่ร้อยละ 7 โดยน้ำหนักสำหรับใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 39.49 บาท ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าการผลิตกลาสเซรามิกในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์จึงทำให้ค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. กลาสเซรามิกที่ได้เกิดผลึกบนผิวหน้าเพียงเล็กน้อย เนื่องจากใช้เวลาในการเกิดผลึก 1 ชั่วโมง ดังนั้นควรเพิ่มเวลาที่ใช้ในการเกิดผลึกให้นานมากขึ้น เพื่อเปรียบเทียบการเกิดผลึกของกลาสเซรามิก

2. การศึกษาครั้งนี้ใช้ไททาเนียมไดออกไซด์จากสารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเป็นตัวช่วยในการเกิดผลึก ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการผลิตกลาสเซรามิกมีราคาที่สูงกว่าการผลิตกลาสเซรามิกในระดับอุตสาหกรรม ในการศึกษาครั้งต่อไปอาจใช้กากของเสียที่มีไททาเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่มาพัฒนาความแข็งแรงของกลาสเซรามิก เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายและใช้กากของเสียอุตสาหกรรมมาทำให้เกิดประโยชน์

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2553. อัตราค่าไฟฟ้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html>. [2553, เมษายน 2]
- เซอร์นิก. 2553. ราคาสารเคมี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.cernicinter.com>. [2553, กุมภาพันธ์ 12]
- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ. 2549. วัสดุวิศวกรรม Engineering Materials. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- บุษราภรณ์ ภัทรเชาว์. 2547. การเปลี่ยนของเสียจากการถลุงสังกะสีเป็นวัสดุประเภทกลาสเซรามิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. สาขาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปรีดา พิมพ์ขาวขำ. 2539. เซรามิกส์. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปานัสร์ม อังกูรอดิศัย, พิมพ์ประภา การุณมรรคผล และเพชรพร เซาวกิจเจริญ. 2551. วิจัยการของบรรจุภัณฑ์ประเภทแก้วของสินค้าบริโภค. เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 7, 217. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมแห่งประเทศไทย.
- พจนานุกรมศัพท์วัสดุศาสตร์และเทคโนโลยี. 2547. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. อุตสาหกรรมแก้วและกระจก. 2548. โครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมอลูมิเนียม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib11138.pdf> [2552, มีนาคม 2]
- เพชรพร เซาวกิจเจริญ และ วิวรรธน์ เทียนศิริ. 2548. การใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย 19: ฉบับที่ 1 (มกราคม-เมษายน) หน้า 103-112.
- ลดดา พันธุ์สุขุมธนา. 2550. การทดลองใช้เศษแก้วในกระเบื้องดินแดง. วารสารเซรามิกส์. 11: 69-73.
- วงศ์พานิชย์. 2552. ราคากลางขยะรีไซเคิล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.wongpanit.com. [2552, มิถุนายน 4]

- วรรณนา ต.แสงจันทร์. 2550. เทคโนโลยีการทำกระเบื้องประดับตกแต่งจากเศษแก้ว. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 55: 47-60.
- วันทนีย์ พุกะคุปต์. 2544. แก้ววัสดุไม่เคยตาย. เซรามิกส์ 5 (ธันวาคม- มีนาคม): 58-63
- จิวิรรณ เทียนศิริ. 2546. การใช้ของเสียที่เป็นแก้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระเบื้องเซรามิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิลเลียมส์ และคาลิสเตอร์.เจ อาร์. 2548. วัสดุศาสตร์ และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน-Materials Science and Engineering.กรุงเทพมหานคร: ทีอีพี.
- สรวิศ จิตรโค้วครวญ. 2552. การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงด้วยไททาเนียมไดออกไซด์. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ 57: 21-24.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2549. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548.

ภาษาอังกฤษ

- Annual Book of ASTM Standards, 2008, C 1327-03, Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics. ASTM International. 384-386.
- Annual Book of ASTM Standards, 2008, C-20 (2005), Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Adsorption, Apparent Specific Gravity and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. ASTM International. 6-8.
- Arvind, A., Sarkar, A., Shrikhande, V.K., Tyagi, A.K., and Kothiyal, G.P. 2008. The effect of TiO_2 addition on the crystallization and phase formation in lithium aluminum silicate (LAS) glasses nucleated by P_2O_5 . Journal of Physics and Chemistry of Solids. 69: 2622– 2627.
- Atkinson, D.I.H., and McMillan, P.W. 1976. Glass ceramics with random and oriented Microstructures. Materials Science.11: 994-1002.
- Bingham, P.A., and Jackson, C.M. 2008. Roman blue-green bottle glass: chemicaleoptical analysis and high temperature viscosity modeling. Journal of Archaeological Science. 35: 302-309.

- Erol, M., Kucukbayrak, S., and Ersoy-Mericboyu, A. 2007. Production of glass-ceramics obtained from industrial wastes by means of controlled nucleation and crystallization. Chemical Engineering Journal. 132: 335–343.
- Erol, M., Kucukbayrak, S., and Ersoy-Mericboyu, A. 2008. Comparison of the properties of glass, glass–ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash. Journal of Hazardous Materials. 153: 418–425.
- Francis, A.A., Rawlings, R.D., Sweeney, R. A., and Boccaccini, R. 2004. Crystallization kinetic of glass particles prepared from a mixture of coal ash and soda-lime cullet glass. Journal of Non-Crystalline Solids. 333: 187–193.
- Holand, W., and Beall G.H. 2002. Glass-Ceramic Technology. Wiley-Blackwell. 372.
- Jeremy P.W., Rawlings, R.D., and Boccaccini, A.R. 2006. A Glass–Ceramic Derived from High TiO₂-Containing Slag: Microstructural Development and Mechanical Behavior. The American Ceramic Society. 89: 2426–2433.
- John, W.S. 1986. Thermal Analysis. Simultaneously. 423-430.
- Karamberi, A., and Moutsatsou, A. 2005. Participation of coloured glass cullet cementitious materials. Cement & Concrete Composites. 27: 319–327.
- Karamberi, A., Orkopoulos, K., and Moutsatsou, A. 2007. Synthesis of glass-ceramics using glass cullet and vitrified industrial by-products. Journal of the European Ceramic Society. 27: 629–636.
- Simmons, J.H., Uhlmann, D.R., and Beall, G.H. 1981. Nucleation and crystallization in glasses. Advances in ceramics. Volume 4: 331.
- Weixin, H. 2009. Glass ceramic of high hardness and fracture toughness developed from iron-rich wastes. Acta Metallurgica Sinica. 22: 181-190.
- Weyl, W.A. Colour Glasses. 1999. Society of Glass Technology. 212-216.
- Wu, J.P., Rawlings, R.D., and Boccaccini, A.R. 2006. Waste Not, Want Not—An Inexpensive Glass-Ceramic from Waste. American Ceramic Society Bulletin. 85: 29-32.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วและกลาสเซรามิก

การทดสอบความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วและกลาสเซรามิก (ASTM C 20-00)

- นำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 5 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดน้ำในชิ้นงาน ปล่อยให้เย็นในเดลิคเคเตอร์ ทำการชั่งน้ำหนัก (Dry Weight, D)

- นำชิ้นงานวางลงในอ่างน้ำให้ความร้อน โดยให้น้ำท่วมทั้งชิ้นงาน ต้มน้ำให้เดือดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง นำชิ้นงานที่ทดสอบขึ้นจากน้ำและทำการชั่งน้ำหนัก (Suspended Weight, S)

- นำชิ้นงานที่ทดสอบมาเช็ดด้วยผ้าหมาดๆ ทำการชั่งน้ำหนัก (Saturated Weight, W)

การคำนวณ

ปริมาตรของชิ้นงาน (Exterior Volume, V)

V (ลูกบาศก์เซนติเมตร) = W - S โดยกำหนดให้ปริมาตรของน้ำ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร เท่ากับ 1 กรัม

ร้อยละการเกิดรูพรุน (Apparent Porosity, P)

$$P \text{ (ร้อยละ)} = \frac{(W - D)}{V} \times 100$$

ร้อยละการดูดซึมน้ำ (Water Adsorption, A)

$$A \text{ (ร้อยละ)} = \frac{(W - D)}{D} \times 100$$

ความหนาแน่น (Bulk Density, B)

$$B \text{ (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \frac{D}{V}$$

ตารางที่ ก1 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากเศษแก้วรีไซเคิล
ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิการหลอม 1250 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษ แก้ว	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
4-16 เมช (1-4 มิลลิเมตร)	1	15.8232	9.5347	15.8360	2.5111	0.2031	0.0809
	2	15.8233	9.5386	15.8358	2.5128	0.1985	0.0790
	3	15.8233	9.5390	15.8463	2.5087	0.3647	0.1454
	ค่าเฉลี่ย				2.5109	0.2554	0.1017
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.68×10^{-3}	7.73×10^{-2}	3.08×10^{-2}
16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร)	1	11.3267	6.8343	11.3324	2.5181	0.1267	0.0503
	2	11.3266	6.8339	11.3338	2.5171	0.1600	0.0636
	3	11.3267	6.8348	11.3366	2.5160	0.2199	0.0874
	ค่าเฉลี่ย				2.5171	0.1689	0.0671
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				8.58×10^{-4}	3.86×10^{-2}	1.53×10^{-2}
32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร)	1	9.6970	5.8415	9.7011	2.5124	0.1062	0.0423
	2	9.7000	5.8460	9.7023	2.5154	0.0596	0.0237
	3	9.5370	5.7463	9.5423	2.5124	0.1396	0.0556
	ค่าเฉลี่ย				2.5134	0.1018	0.0405
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.39×10^{-3}	3.28×10^{-2}	1.31×10^{-2}

ตารางที่ ก2 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากเศษแก้วรีไซเคิล
ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิการหลอม 1350 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษ แก้ว	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
4-16 เมช (1-4 มิลลิเมตร)	1	14.1227	8.5089	14.1385	2.5087	0.2807	0.1119
	2	9.1064	5.4942	9.1121	2.5170	0.1575	0.0626
	3	9.1066	5.4908	9.1131	2.5140	0.1794	0.0714
	ค่าเฉลี่ย				2.5132	0.2059	0.0819
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.43×10^{-3}	5.37×10^{-2}	2.15×10^{-2}
16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร)	1	17.8815	10.7628	17.8928	2.5079	0.1585	0.0632
	2	17.8816	10.7634	17.8951	2.5073	0.1893	0.0755
	3	17.8815	10.7641	17.8945	2.5078	0.1823	0.0727
	ค่าเฉลี่ย				2.5077	0.1767	0.0705
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.62×10^{-4}	1.32×10^{-2}	5.26×10^{-3}
32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร)	1	11.3226	6.8324	11.3287	2.5182	0.1357	0.0539
	2	11.3226	6.8324	11.3255	2.5200	0.0645	0.0256
	3	11.3227	6.8318	11.3263	2.5192	0.0801	0.0318
	ค่าเฉลี่ย				2.5191	0.0934	0.0371
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				7.36×10^{-4}	3.06×10^{-2}	1.21×10^{-2}

ตารางที่ ก3 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากเศษแก้วรีไซเคิล
ขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิการหลอม 1450 องศาเซลเซียส

ขนาดเศษ แก้ว	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
4-16 เมช (1-4 มิลลิเมตร)	1	17.8237	10.7534	17.8342	2.5172	0.1483	0.0589
	2	17.8816	10.8112	17.8994	2.5227	0.2511	0.0995
	3	17.8817	10.8126	17.8952	2.5247	0.1906	0.0755
	ค่าเฉลี่ย				2.5216	0.1967	0.0780
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.17×10^{-3}	4.22×10^{-2}	1.67×10^{-2}
16-32 เมช (0.5-1 มิลลิเมตร)	1	9.6970	5.8415	9.7011	2.5124	0.1062	0.0423
	2	9.7000	5.8460	9.7023	2.5154	0.0596	0.0237
	3	9.5370	5.7463	9.5423	2.5124	0.1396	0.0556
	ค่าเฉลี่ย				2.5134	0.1018	0.0405
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.41×10^{-3}	3.28×10^{-2}	1.31×10^{-3}
32-100 เมช (0.15-0.5 มิลลิเมตร)	1	18.8012	11.4670	18.8097	2.5605	0.1158	0.0452
	2	18.8013	11.4663	18.8063	2.5615	0.0681	0.0266
	3	18.8013	11.4663	18.8061	2.5616	0.0654	0.0255
	ค่าเฉลี่ย				2.5612	0.0831	0.0324
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.97×10^{-4}	2.31×10^{-2}	9.04×10^{-3}

ตารางที่ ก4 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีเขียวและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

แก้วสีเขียวผสม TiO ₂	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง D (กรัม)	น้ำหนักแขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนักอิมตัว W (กรัม)	ความหนาแน่น B (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความพรุนตัว P (%)	การดูดซึมน้ำ A (%)
TiO ₂ 0 %	1	10.7036	6.4481	10.7068	2.5134	0.0749	0.0298
	2	10.7033	6.4358	10.7088	2.5049	0.1287	0.0514
	3	10.7035	6.4420	10.7078	2.5091	0.1019	0.0406
	ค่าเฉลี่ย				2.5091	0.1018	0.0406
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.47×10^{-3}	2.20×10^{-2}	8.82×10^{-3}
TiO ₂ 5 %	1	14.4047	8.8106	14.4100	2.5725	0.0947	0.0368
	2	14.4045	8.8131	14.4091	2.5741	0.0822	0.0319
	3	11.7073	7.1246	11.7125	2.5518	0.1133	0.0444
	ค่าเฉลี่ย				2.5661	0.0967	0.0377
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.02×10^{-2}	1.28×10^{-2}	5.18×10^{-3}
TiO ₂ 7 %	1	17.6503	10.8349	17.6558	2.5877	0.0806	0.0312
	2	17.6497	10.8431	17.6550	2.5910	0.0778	0.0300
	3	17.6500	10.8351	17.6554	2.5879	0.0792	0.0306
	ค่าเฉลี่ย				2.5889	0.0792	0.0306
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.97×10^{-4}	2.31×10^{-2}	9.04×10^{-3}
TiO ₂ 9 %	1	28.2607	17.4373	28.2697	2.6089	0.0831	0.0318
	2	28.2604	17.3927	28.2682	2.5985	0.0717	0.0276
	3	28.2606	17.4150	28.2690	2.6037	0.0774	0.0297
	ค่าเฉลี่ย				2.6037	0.0774	0.0297
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.25×10^{-3}	4.65×10^{-3}	1.71×10^{-3}

ตารางที่ ก5 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีชาและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

แก้วสีชา ผสม TiO ₂	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
TiO ₂ 0 %	1	10.7226	6.4525	10.7269	2.5086	0.1006	0.0401
	2	10.7226	6.4524	10.7273	2.5083	0.1099	0.0438
	3	10.7226	6.4525	10.7271	2.5084	0.1053	0.0420
	ค่าเฉลี่ย				2.5084	0.1053	0.0420
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.25×10^{-4}	3.80×10^{-3}	1.51×10^{-3}
TiO ₂ 5 %	1	33.2690	20.2658	33.2791	2.5565	0.0776	0.0304
	2	33.2682	20.2678	33.2789	2.5569	0.0822	0.0322
	3	33.2686	20.2668	33.2790	2.5567	0.0799	0.0313
	ค่าเฉลี่ย				2.5567	0.0799	0.0313
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.63×10^{-4}	1.88×10^{-3}	7.35×10^{-4}
TiO ₂ 7 %	1	17.7734	10.8978	17.7796	2.5827	0.0901	0.0349
	2	17.7732	10.8976	17.7782	2.5831	0.0727	0.0281
	3	17.7733	10.8977	17.7789	2.5829	0.0814	0.0315
	ค่าเฉลี่ย				2.5829	0.0814	0.0315
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.63×10^{-4}	7.10×10^{-3}	2.78×10^{-3}
TiO ₂ 9 %	1	23.5883	14.5248	23.5956	2.6005	0.0805	0.0309
	2	23.5878	14.5264	23.5962	2.6007	0.0926	0.0356
	3	23.5881	14.5256	23.5959	2.6006	0.0865	0.0333
	ค่าเฉลี่ย				2.6006	0.0865	0.0333
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				8.16×10^{-5}	4.94×10^{-3}	1.92×10^{-3}

ตารางที่ ก6 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีใสและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

แก้วสีใส ผสม TiO ₂	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
TiO ₂ 0 %	1	15.2705	9.1628	15.2766	2.4977	0.0998	0.0399
	2	15.2706	9.1673	15.2771	2.4994	0.1064	0.0426
	3	15.2706	9.1651	15.2769	2.4985	0.1031	0.0413
	ค่าเฉลี่ย				2.4985	0.1031	0.0413
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.17×10^{-3}	4.22×10^{-2}	1.67×10^{-2}
TiO ₂ 5 %	1	8.5464	5.2072	8.5497	2.5569	0.0987	0.0386
	2	8.5463	5.2069	8.5491	2.5571	0.0838	0.0328
	3	8.5464	5.2071	8.5494	2.5570	0.0913	0.0357
	ค่าเฉลี่ย				2.5570	0.0913	0.0357
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.41×10^{-3}	3.28×10^{-2}	1.31×10^{-3}
TiO ₂ 7 %	1	7.8023	4.7815	7.8054	2.5802	0.1025	0.0397
	2	7.8017	4.7827	7.8046	2.5817	0.0960	0.0372
	3	7.8020	4.7821	7.8050	2.5810	0.0992	0.0385
	ค่าเฉลี่ย				2.5810	0.0992	0.0385
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.97×10^{-4}	2.31×10^{-2}	9.04×10^{-3}
TiO ₂ 9 %	1	22.5832	13.9047	22.5900	2.6002	0.0783	0.0301
	2	22.5822	13.9127	22.5882	2.6030	0.0692	0.0266
	3	22.5827	13.9087	22.5891	2.6016	0.0737	0.0283
	ค่าเฉลี่ย				2.6016	0.0737	0.0283
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.97×10^{-4}	2.31×10^{-2}	9.04×10^{-3}

ตารางที่ ก7 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของแก้วที่หลอมจากส่วนผสมของเศษแก้วสีน้ำเงินและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

แก้วสีน้ำเงินผสม TiO ₂	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง D (กรัม)	น้ำหนักแขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนักอิมตัว W (กรัม)	ความหนาแน่น B (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความพรุนตัว P (%)	การดูดซึมน้ำ A (%)
TiO ₂ 0 %	1	9.7969	5.8653	9.8016	2.4889	0.1194	0.0480
	2	9.7958	5.8622	9.7997	2.4878	0.0990	0.0398
	3	9.7964	5.8638	9.8007	2.4883	0.1092	0.0439
	ค่าเฉลี่ย				2.4883	0.1092	0.0439
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.17×10^{-3}	4.22×10^{-2}	1.67×10^{-2}
TiO ₂ 5 %	1	13.8260	8.3936	13.8312	2.5427	0.0956	0.0376
	2	13.8254	8.3818	13.8309	2.5372	0.1009	0.0398
	3	13.8257	8.3877	13.8311	2.5399	0.0983	0.0387
	ค่าเฉลี่ย				2.5399	0.0983	0.0387
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.41×10^{-3}	3.28×10^{-2}	1.31×10^{-3}
TiO ₂ 7 %	1	18.7769	11.4740	18.7832	2.5689	0.0862	0.0336
	2	18.7769	11.4840	18.7835	2.5724	0.0904	0.0351
	3	18.7769	11.4790	18.7834	2.5706	0.0883	0.0344
	ค่าเฉลี่ย				2.5706	0.0883	0.0344
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.97×10^{-4}	2.31×10^{-2}	9.04×10^{-3}
TiO ₂ 9 %	1	21.0365	12.9161	21.0460	2.5875	0.1169	0.0452
	2	21.0356	12.9209	21.0424	2.5901	0.0837	0.0323
	3	21.0361	12.9185	21.0442	2.5888	0.1003	0.0387
	ค่าเฉลี่ย				2.5888	0.1003	0.0387
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.97×10^{-4}	2.31×10^{-2}	9.04×10^{-3}

ตารางที่ ก8 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกสีเขียวที่ได้จากผสม
เศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

กลาส เซรามิก สีเขียว	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
TiO ₂ 0 %	1	5.1457	3.0989	5.1474	2.5119	0.0830	0.0330
	2	5.1455	3.1008	5.1470	2.5147	0.0733	0.0292
	3	5.1456	3.0999	5.1472	2.5133	0.0781	0.0311
	ค่าเฉลี่ย				2.5133	0.0781	0.0311
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.14×10^{-3}	3.96×10^{-3}	1.55×10^{-3}
TiO ₂ 5 %	1	2.7044	1.6436	2.7051	2.5477	0.0659	0.0259
	2	2.7045	1.6452	2.7054	2.5509	0.0849	0.0333
	3	2.7045	1.6444	2.7053	2.5493	0.0754	0.0296
	ค่าเฉลี่ย				2.5493	0.0754	0.0296
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.31×10^{-3}	7.76×10^{-3}	3.02×10^{-3}
TiO ₂ 7 %	1	5.7701	3.5454	5.7716	2.5919	0.0674	0.0260
	2	5.7703	3.5441	5.7718	2.5903	0.0673	0.0260
	3	5.7702	3.5448	5.7717	2.5911	0.0674	0.0260
	ค่าเฉลี่ย				2.5911	0.0674	0.0260
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.53×10^{-4}	4.71×10^{-5}	0.00
TiO ₂ 9 %	1	5.6417	3.4847	5.6428	2.6142	0.0510	0.0195
	2	5.6416	3.4880	5.6430	2.6179	0.0650	0.0248
	3	5.6417	3.4864	5.6429	2.6161	0.0580	0.0222
	ค่าเฉลี่ย				2.6161	0.0580	0.0222
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.51×10^{-3}	5.72×10^{-3}	2.16×10^{-3}

ตารางที่ ก9 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกสีขาที่ได้จากผสม
เศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

กลาส เซรามิก สีขา	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
TiO ₂ 0 %	1	4.5622	2.7461	4.5638	2.5099	0.0880	0.0351
	2	4.5619	2.7464	4.5635	2.5105	0.0881	0.0351
	3	4.5621	2.7463	4.5637	2.5102	0.0880	0.0351
	ค่าเฉลี่ย				2.5102	0.0880	0.0351
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.50×10^{-4}	4.71×10^{-5}	0.00
TiO ₂ 5 %	1	5.3504	3.2660	5.3519	2.5650	0.0719	0.0280
	2	5.3506	3.2540	5.3520	2.5503	0.0667	0.0262
	3	5.3505	3.2600	5.3520	2.5577	0.0693	0.0271
	ค่าเฉลี่ย				2.5577	0.0693	0.0271
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.00×10^{-3}	2.12×10^{-3}	7.35×10^{-4}
TiO ₂ 7 %	1	4.1515	2.5443	4.1524	2.5816	0.0560	0.0217
	2	4.1516	2.5440	4.1526	2.5809	0.0622	0.0241
	3	4.1516	2.5442	4.1525	2.5812	0.0591	0.0229
	ค่าเฉลี่ย				2.5812	0.0591	0.0229
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.87×10^{-4}	2.53×10^{-3}	9.80×10^{-4}
TiO ₂ 9 %	1	5.8934	3.6224	5.8941	2.5943	0.0308	0.0119
	2	5.8932	3.6400	5.8940	2.6146	0.0355	0.0136
	3	5.8933	3.6312	5.8941	2.6044	0.0331	0.0127
	ค่าเฉลี่ย				2.6044	0.0332	0.0127
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				8.29×10^{-3}	1.92×10^{-3}	6.94×10^{-4}

ตารางที่ ก10 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกสีใสที่ได้จากผสม
เศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

กลาส เซรามิก สีใส	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
TiO ₂ 0 %	1	4.8067	2.8917	4.8083	2.5079	0.0835	0.0333
	2	4.8064	2.8916	4.8079	2.5082	0.0783	0.0312
	3	4.8066	2.8917	4.8081	2.5080	0.0809	0.0322
	ค่าเฉลี่ย				2.5080	0.0809	0.0322
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.29×10^{-4}	2.12×10^{-3}	8.58×10^{-4}
TiO ₂ 5 %	1	6.9731	4.2499	6.9752	2.5587	0.0771	0.0301
	2	6.9731	4.2528	6.9749	2.5617	0.0661	0.0258
	3	6.9731	4.2514	6.9751	2.5602	0.0716	0.0280
	ค่าเฉลี่ย				2.5602	0.0716	0.0280
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.23×10^{-3}	4.50×10^{-3}	1.76×10^{-3}
TiO ₂ 7 %	1	7.0433	4.3177	7.0452	2.5823	0.0697	0.0270
	2	7.0427	4.3168	7.0438	2.5826	0.0403	0.0156
	3	7.0430	4.3173	7.0445	2.5825	0.0550	0.0213
	ค่าเฉลี่ย				2.5825	0.0550	0.0213
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.29×10^{-4}	1.20×10^{-2}	4.65×10^{-3}
TiO ₂ 9 %	1	5.1418	3.1684	5.1426	2.6045	0.0405	0.0156
	2	5.1893	3.2023	5.1903	2.6103	0.0503	0.0193
	3	5.1417	3.1678	5.1425	2.6038	0.0405	0.0156
	ค่าเฉลี่ย				2.6062	0.0438	0.0168
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.91×10^{-3}	4.62×10^{-3}	1.75×10^{-3}

ตารางที่ ก11 ความหนาแน่น ความพรุนตัวและการดูดซึมน้ำของกลาสเซรามิกสีน้ำเงินที่ได้จาก ผสมเศษแก้วและ TiO_2 ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

กลาส เซรามิก สีใส	ครั้งที่	น้ำหนัก แห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนัก อิมตัว W (กรัม)	ความหนา แน่น B (กรัม/ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความ พรุนตัว P (%)	การดูด ซึมน้ำ A (%)
TiO_2 0 %	1	4.5284	2.7145	4.5306	2.4935	0.1211	0.0486
	2	4.5287	2.7093	4.5298	2.4876	0.0604	0.0243
	3	4.5286	2.7119	4.5302	2.4905	0.0907	0.0364
	ค่าเฉลี่ย				2.4905	0.0908	0.0364
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.41×10^{-3}	2.85×10^{-2}	9.92×10^{-3}
TiO_2 5 %	1	5.4264	3.2989	5.4280	2.5487	0.0751	0.0295
	2	5.4258	3.2990	5.4275	2.5491	0.0799	0.0313
	3	5.4261	3.2990	5.4278	2.5489	0.0775	0.0304
	ค่าเฉลี่ย				2.5489	0.0775	0.0304
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.63×10^{-4}	1.96×10^{-2}	7.35×10^{-4}
TiO_2 7 %	1	5.4766	3.3496	5.4779	2.5732	0.0611	0.0237
	2	5.4764	3.3495	5.4780	2.5729	0.0752	0.0292
	3	5.4765	3.3496	5.4780	2.5731	0.0681	0.0265
	ค่าเฉลี่ย				2.5731	0.0681	0.0265
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.29×10^{-4}	5.76×10^{-3}	2.24×10^{-3}
TiO_2 9 %	1	6.4944	3.9845	6.4959	2.5860	0.0597	0.0231
	2	6.4942	3.9837	6.4953	2.5857	0.0438	0.0169
	3	6.4943	3.9841	6.4956	2.5858	0.0518	0.0200
	ค่าเฉลี่ย				2.5858	0.0518	0.0200
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.29×10^{-4}	6.50×10^{-3}	2.53×10^{-3}

ภาคผนวก ข
ค่าความแข็งของแก้วและกลาสเซรามิก

การทดสอบความแข็งด้วยเครื่องวิกเกอร์ไมโครฮาร์ดเน็ต (Vickers micro hardness)

ASTM C 1327-03

เตรียมชิ้นงานให้มีความหนาอย่างน้อย 0.50 มิลลิเมตร ออกแรงกดประมาณ 1 กิโลกรัม ให้หัวกดสัมผัสกับชิ้นงานประมาณ 0.015–0.070 มิลลิเมตรต่อวินาที

การคำนวณ ความแข็ง (Vickers micro hardness, HV) ได้จากสูตร

$$HV = (1.8544)(P/d^2)$$

P = แรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตก หน่วย กิโลกรัม

d = ความยาวเฉลี่ยระหว่างรอยหัวกด 2 หัว หน่วย มิลลิเมตร

ตารางที่ ข1 ค่าความแข็งของแก้วสีเขียวที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

แก้วสี เขียวผสม TiO ₂	ครั้งที่	d ₁ (ไมโครเมตร)	d ₂ (ไมโครเมตร)	d (ไมโครเมตร)	ค่าความแข็ง, HV (กิโลกรัมต่อมิลลิ ตารางเมตร)
TiO ₂ 0 %	1	0.062	0.061	0.062	490.29
	2	0.062	0.062	0.062	482.41
	3	0.061	0.061	0.061	498.36
	ค่าเฉลี่ย				490.35
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.51
TiO ₂ 5 %	1	0.060	0.060	0.060	515.11
	2	0.060	0.061	0.061	506.63
	3	0.059	0.059	0.059	532.72
	ค่าเฉลี่ย				518.15
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				10.87
TiO ₂ 7 %	1	0.059	0.060	0.060	523.80
	2	0.060	0.061	0.061	506.63
	3	0.060	0.059	0.060	523.80
	ค่าเฉลี่ย				518.08
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				8.09
TiO ₂ 9 %	1	0.061	0.062	0.062	490.29
	2	0.062	0.062	0.062	482.41
	3	0.061	0.062	0.062	490.29
	ค่าเฉลี่ย				487.66
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.71

ตารางที่ ข2 ค่าความแข็งของแก้วสีชาที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดย
น้ำหนัก

แก้วสีชา ผสม TiO ₂	ครั้งที่	d ₁ (ไมโครเมตร)	d ₂ (ไมโครเมตร)	d (ไมโครเมตร)	ค่าความแข็ง, HV (กิโลกรัมต่อมิลลิ ตารางเมตร)
TiO ₂ 0 %	1	0.059	0.059	0.059	532.72
	2	0.059	0.059	0.059	532.72
	3	0.059	0.059	0.059	532.72
	ค่าเฉลี่ย				532.72
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.00
TiO ₂ 5 %	1	0.061	0.061	0.061	498.36
	2	0.061	0.061	0.061	498.36
	3	0.061	0.061	0.061	498.36
	ค่าเฉลี่ย				498.36
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.00
TiO ₂ 7 %	1	0.059	0.065	0.062	482.41
	2	0.061	0.060	0.061	506.63
	3	0.062	0.062	0.062	482.41
	ค่าเฉลี่ย				490.49
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				11.42
TiO ₂ 9 %	1	0.062	0.062	0.062	482.41
	2	0.061	0.063	0.062	482.41
	3	0.061	0.063	0.062	482.41
	ค่าเฉลี่ย				482.41
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.00

ตารางที่ ข3 ค่าความแข็งของแก้วสีใสที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดย
น้ำหนัก

แก้วสีใส ผสม TiO ₂	ครั้งที่	d ₁ (ไมโครเมตร)	d ₂ (ไมโครเมตร)	d (ไมโครเมตร)	ค่าความแข็ง, HV (กิโลกรัมต่อมิลลิ ตารางเมตร)
TiO ₂ 0 %	1	0.059	0.061	0.060	515.11
	2	0.062	0.059	0.061	506.63
	3	0.061	0.062	0.062	490.29
	ค่าเฉลี่ย				504.01
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				10.30
TiO ₂ 5 %	1	0.062	0.059	0.061	506.63
	2	0.059	0.061	0.060	515.11
	3	0.061	0.061	0.061	498.36
	ค่าเฉลี่ย				506.70
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.84
TiO ₂ 7 %	1	0.061	0.063	0.062	482.41
	2	0.061	0.062	0.062	490.29
	3	0.061	0.061	0.061	498.36
	ค่าเฉลี่ย				490.35
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.51
TiO ₂ 9 %	1	0.059	0.061	0.060	515.11
	2	0.061	0.061	0.061	498.36
	3	0.062	0.062	0.062	482.41
	ค่าเฉลี่ย				498.63
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				13.35

ตารางที่ ข4 ค่าความแข็งของแก้วสีน้ำเงินที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

แก้วสีน้ำเงินผสม TiO ₂	ครั้งที่	d ₁ (ไมโครเมตร)	d ₂ (ไมโครเมตร)	d (ไมโครเมตร)	ค่าความแข็ง, HV (กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร)
TiO ₂ 0 %	1	0.060	0.062	0.061	498.36
	2	0.059	0.059	0.059	532.72
	3	0.060	0.061	0.061	506.63
	ค่าเฉลี่ย				512.57
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				14.64
TiO ₂ 5 %	1	0.059	0.059	0.059	532.72
	2	0.059	0.059	0.059	532.72
	3	0.059	0.059	0.059	532.72
	ค่าเฉลี่ย				532.72
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.00
TiO ₂ 7 %	1	0.057	0.062	0.060	523.80
	2	0.057	0.059	0.058	551.25
	3	0.060	0.061	0.061	506.63
	ค่าเฉลี่ย				527.23
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				18.38
TiO ₂ 9 %	1	0.062	0.061	0.062	490.29
	2	0.060	0.060	0.060	515.11
	3	0.060	0.058	0.059	532.72
	ค่าเฉลี่ย				512.71
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				17.41

ตารางที่ ข5 ค่าความแข็งของกลาสเซรามิกสีเขียวที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

กลาส เซรามิก สีเขียว	ครั้งที่	d ₁ (ไมโครเมตร)	d ₂ (ไมโครเมตร)	d (ไมโครเมตร)	ค่าความแข็ง, HV (กิโลกรัมต่อมิลลิ ตารางเมตร)
TiO ₂ 0 %	1	0.053	0.054	0.054	647.88
	2	0.054	0.053	0.054	647.88
	3	0.054	0.054	0.054	635.94
	ค่าเฉลี่ย				643.90
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.63
TiO ₂ 5 %	1	0.053	0.054	0.054	647.88
	2	0.053	0.054	0.054	647.88
	3	0.054	0.052	0.053	660.16
	ค่าเฉลี่ย				651.98
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.79
TiO ₂ 7 %	1	0.052	0.052	0.052	685.80
	2	0.052	0.053	0.053	672.80
	3	0.052	0.053	0.053	672.80
	ค่าเฉลี่ย				677.13
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.13
TiO ₂ 9 %	1	0.051	0.053	0.052	685.80
	2	0.051	0.051	0.051	712.96
	3	0.051	0.051	0.051	712.96
	ค่าเฉลี่ย				703.90
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				12.80

ตารางที่ ข6 ค่าความแข็งของกลาสเซรามิกสีขาที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

กลาสเซรามิกสีขา	ครั้งที่	d ₁ (ไมโครเมตร)	d ₂ (ไมโครเมตร)	d (ไมโครเมตร)	ค่าความแข็ง, HV (กิโลกรัมต่อมิลลิตารางเมตร)
TiO ₂ 0 %	1	0.053	0.054	0.054	647.88
	2	0.054	0.054	0.054	635.94
	3	0.054	0.054	0.054	635.94
	ค่าเฉลี่ย				639.92
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.63
TiO ₂ 5 %	1	0.053	0.053	0.053	660.16
	2	0.053	0.053	0.053	660.16
	3	0.052	0.054	0.053	660.16
	ค่าเฉลี่ย				660.16
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.00
TiO ₂ 7 %	1	0.052	0.054	0.053	660.16
	2	0.052	0.053	0.053	672.80
	3	0.051	0.052	0.052	699.18
	ค่าเฉลี่ย				677.38
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				16.26
TiO ₂ 9 %	1	0.050	0.053	0.052	699.18
	2	0.051	0.053	0.052	685.80
	3	0.051	0.051	0.051	712.96
	ค่าเฉลี่ย				699.31
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				11.09

ตารางที่ ข7 ค่าความแข็งของกลาสเซรามิกสีใสที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

กลาส เซรามิก สีใส	ครั้งที่	d ₁ (ไมโครเมตร)	d ₂ (ไมโครเมตร)	d (ไมโครเมตร)	ค่าความแข็ง, HV (กิโลกรัมต่อมิลลิ ตารางเมตร)
TiO ₂ 0 %	1	0.054	0.054	0.054	635.94
	2	0.054	0.054	0.054	635.94
	3	0.053	0.054	0.054	647.88
	ค่าเฉลี่ย				639.92
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.63
TiO ₂ 5 %	1	0.053	0.054	0.054	647.88
	2	0.053	0.053	0.053	660.16
	3	0.053	0.054	0.054	647.88
	ค่าเฉลี่ย				651.98
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.79
TiO ₂ 7 %	1	0.051	0.052	0.052	699.18
	2	0.052	0.053	0.053	672.80
	3	0.052	0.053	0.053	672.80
	ค่าเฉลี่ย				681.59
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				12.44
TiO ₂ 9 %	1	0.052	0.052	0.052	685.80
	2	0.052	0.052	0.052	685.80
	3	0.051	0.052	0.052	699.18
	ค่าเฉลี่ย				690.26
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.31

ตารางที่ ข8 ค่าความแข็งของกลาสเซรามิกสีน้ำเงินที่ได้จากผสมเศษแก้วและTiO₂ ที่ร้อยละ 0 5 7 และ 9 โดยน้ำหนัก

กลาส เซรามิก สีน้ำเงิน	ครั้งที่	d ₁ (ไมโครเมตร)	d ₂ (ไมโครเมตร)	d (ไมโครเมตร)	ค่าความแข็ง, HV (กิโลกรัมต่อมิลลิ ตารางเมตร)
TiO ₂ 0 %	1	0.052	0.053	0.053	672.80
	2	0.053	0.055	0.054	635.94
	3	0.053	0.054	0.054	647.88
	ค่าเฉลี่ย				652.21
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				15.36
TiO ₂ 5 %	1	0.052	0.053	0.053	672.80
	2	0.053	0.053	0.053	660.16
	3	0.053	0.052	0.053	672.80
	ค่าเฉลี่ย				668.59
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.96
TiO ₂ 7 %	1	0.053	0.053	0.053	660.16
	2	0.052	0.052	0.052	685.80
	3	0.052	0.052	0.052	685.80
	ค่าเฉลี่ย				677.25
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				12.09
TiO ₂ 9 %	1	0.051	0.051	0.051	712.96
	2	0.052	0.053	0.053	672.80
	3	0.052	0.052	0.052	685.80
	ค่าเฉลี่ย				690.52
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				16.73

ภาคผนวก ค
การทนทานต่อกรดและด่างของแก้วและกลาสเซรามิก

การทนทานต่อสารเคมีในแก้วและกลาสเซรามิก

โดยทดสอบการทนทานต่อกรดไนตริกและไฮโดรฟลูออริก (ASTM C 20-00)

การเตรียมสารละลายและชิ้นงาน

- สารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร
- สารละลายไฮโดรฟลูออริกเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร
- นำชิ้นงานมาบดและคัดขนาด 0.3-0.5 มิลลิเมตร

วิธีการทดสอบการทนทานต่อกรด

- นำตัวอย่างชิ้นงานประมาณ 2 กรัม มาต้มในสารละลายกรดไนตริก ปริมาณ 70 มิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- นำชิ้นงานที่ทดสอบมาล้างและเช็ดให้แห้ง ทำการชั่งน้ำหนัก คำนวณค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของการดูดซึ่มกรดไนตริก

วิธีการทดสอบการทนทานต่อด่าง

ทดสอบเช่นเดียวกับการทนทานกรดแต่เปลี่ยนเป็นสารละลายไฮดรอกไซด์แทน

ตารางที่ ค1 การทันทานต่อกรดของแก้วตัวอย่างสูตร G7 A7 F7 และ B7

แก้ว	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนักอิมตัว W (กรัม)	การดูดซึมกรด A (%)
G7	1	17.6495	10.8408	17.6562	0.0380
	2	17.6499	10.8352	17.6539	0.0227
	3	17.6500	10.8432	17.6537	0.0210
	ค่าเฉลี่ย				0.0272
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				7.64×10^{-3}
A7	1	2.0967	1.2853	2.0979	0.0572
	2	2.0969	1.2835	2.0978	0.0429
	3	2.0969	1.2829	2.0980	0.0525
	ค่าเฉลี่ย				0.0509
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.95×10^{-3}
F7	1	2.5556	1.5611	2.5562	0.0235
	2	2.5551	1.5640	2.5561	0.0391
	3	2.5552	1.5608	2.5560	0.0313
	ค่าเฉลี่ย				0.0313
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.37×10^{-3}
B7	1	1.6052	0.9814	1.6062	0.0623
	2	1.6052	0.9745	1.6066	0.0672
	3	1.6050	0.9785	1.6060	0.0623
	ค่าเฉลี่ย				0.0606
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.31×10^{-3}

ตารางที่ ค2 การทนทานต่อกรดของกลาสเซรามิกตัวอย่างสูตร G7 A7 F7 และ B7

กลาส เซรามิก	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนักอิมตัว W (กรัม)	การดูดซึมกรด A (%)
G7	1	4.4504	2.7320	4.4515	0.0247
	2	4.4506	2.7331	4.4518	0.0270
	3	4.4507	2.7325	4.4520	0.0292
	ค่าเฉลี่ย				0.0270
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.84×10^{-3}
A7	1	4.7665	2.9259	4.7674	0.0189
	2	4.7666	2.9267	4.7680	0.0294
	3	4.7664	2.9240	4.7677	0.0273
	ค่าเฉลี่ย				0.0252
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.54×10^{-3}
F7	1	7.1153	4.3565	7.1170	0.0239
	2	7.1153	4.3569	7.1168	0.0211
	3	7.1153	4.3557	7.1171	0.0253
	ค่าเฉลี่ย				0.0234
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.75×10^{-3}
B7	1	6.9701	4.2631	6.9720	0.0273
	2	6.9702	4.2648	6.9725	0.0330
	3	6.9702	4.2656	6.9723	0.0301
	ค่าเฉลี่ย				0.0301
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.33×10^{-3}

ตารางที่ ค3 การทนทานต่อต่างของแก้วตัวอย่างสูตร G7 A7 F7 และ B7

แก้ว	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนักอิมตัว W (กรัม)	การดูดซึ่มกรด A (%)
G7	1	17.7982	10.8220	17.8026	0.0247
	2	17.7938	10.8109	17.7992	0.0303
	3	42.1857	26.4486	42.1992	0.0320
	ค่าเฉลี่ย				0.0290
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.12×10^{-3}
A7	1	39.2625	24.0791	39.2740	0.0293
	2	39.0362	23.9206	39.0486	0.0318
	3	41.7515	25.6160	41.7646	0.0314
	ค่าเฉลี่ย				0.0308
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.10×10^{-3}
F7	1	26.1239	16.0166	26.1322	0.0318
	2	26.1016	15.9920	26.1098	0.0314
	3	35.6546	21.9567	35.6678	0.0370
	ค่าเฉลี่ย				0.0334
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.55×10^{-3}
B7	1	41.8977	25.7434	41.9102	0.0298
	2	41.8950	25.7305	41.9081	0.0313
	3	40.7889	26.4989	40.7983	0.0230
	ค่าเฉลี่ย				0.0280
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.61×10^{-3}

ตารางที่ ค4 การทนทานต่อต่างของแก้วตัวอย่างสูตร G7 A7 F7 และ B7

กลาส เซรามิก	ครั้งที่	น้ำหนักแห้ง D (กรัม)	น้ำหนัก แขวนลอย S (กรัม)	น้ำหนักอิมด้ว W (กรัม)	การดูดซึ่มกรด A (%)
G7	1	5.7701	3.5454	5.7716	0.0260
	2	5.7703	3.5441	5.7718	0.0260
	3	5.7702	3.5448	5.7717	0.0260
	ค่าเฉลี่ย				0.0260
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				0.00
A7	1	4.1515	2.5443	4.1524	0.0217
	2	4.1516	2.5440	4.1526	0.0241
	3	4.1516	2.5442	4.1525	0.0229
	ค่าเฉลี่ย				0.0229
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				9.80×10^{-4}
F7	1	7.0433	4.3177	7.0452	0.0270
	2	7.0427	4.3168	7.0438	0.0156
	3	7.0430	4.3173	7.0445	0.0213
	ค่าเฉลี่ย				0.0213
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.65×10^{-3}
B7	1	5.4766	3.3496	5.4779	0.0237
	2	5.4764	3.3495	5.4780	0.0292
	3	5.4765	3.3496	5.4780	0.0265
	ค่าเฉลี่ย				0.0265
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.25×10^{-3}

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศุภวรรณ ธิระโสภณ เกิดวันที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551