



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์แก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยผลึกลิเทียมไดซิลิเกตสำหรับประยุกต์ใช้
ในงานทันตกรรมเพื่อผู้สูงอายุ

Fabrication of glass-ceramics containing lithium disilicate crystals
for Dental Applications for Elderlies

โดย

นางสาววิไลวรรณ ลีนะกุล

นายอุดมเดชา พลเยี่ยม

นางธนาพร บุญชู

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์แก้วเซรามิกที่ประกอบด้วยผลึกลิเทียมไดซิลิเกตสำหรับประยุกต์ใช้
ในงานทันตกรรมเพื่อผู้สูงอายุ

Fabrication of glass-ceramics containing lithium disilicate crystals
for Dental Applications for Elderlies

โดย

นางสาววิไลวรรณ สีนะกุล

นายอุดมเดชา พลเยี่ยม

นางธนาพร บุญชู

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

กระบวนการทางความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาให้แก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกต มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นได้ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล และสมบัติทางกายภาพของแก้วระบบลิเทียมและซิลิกาโดยศึกษาจากการเติมสารเซอร์โคเนียมออกไซด์โดยใช้วิธีการหลอมแบบดั้งเดิม โดยตัวอย่างชิ้นงาน LD, LDZ0.5, LDZ1.0, และ LDZ1.5 ได้มาจากการเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์เข้มข้นร้อยละ 0.0, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5-1 โดยน้ำหนัก มีผลต่อกระบวนการเกิดปริมาณของผลึก การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเกิดสมบัติทางกลที่สูงขึ้นเนื่องมาจากการเกิดเฟสองค์ประกอบของลิเทียมไดซิลิเกตและลิเทียมเมตาซิลิเกต

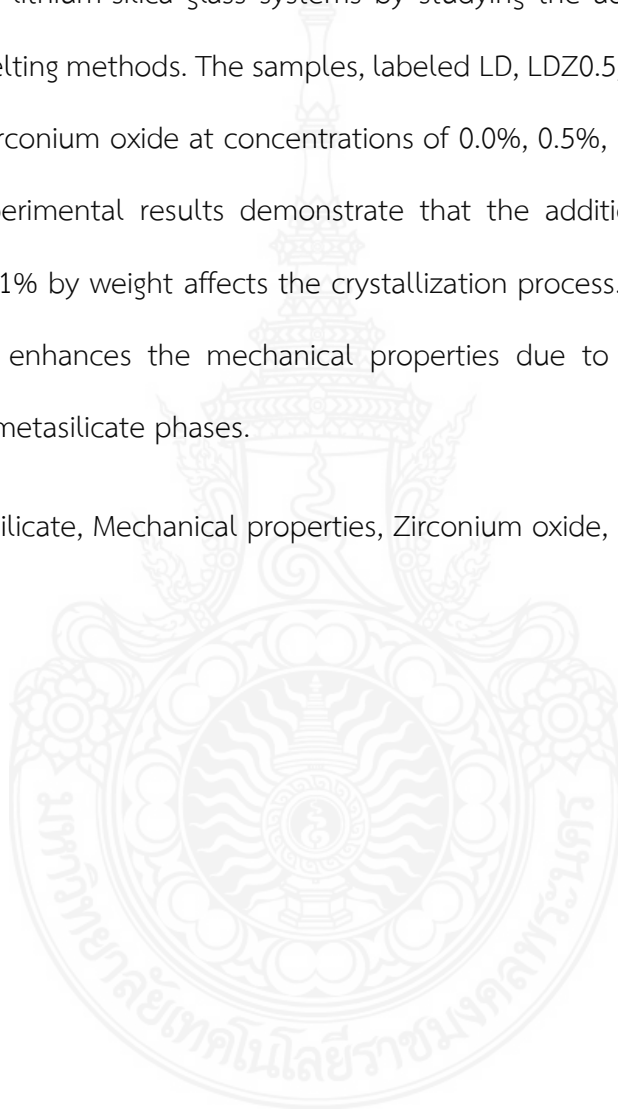
คำสำคัญ: ลิเทียมไดซิลิเกต, สมบัติทางกล, เซอร์โคเนียมออกไซด์, กระบวนการทางความร้อน



Abstract

Thermal processes play a vital role in improving the properties of lithium disilicate glass-ceramics. This research aims to investigate the factors influencing the thermal, mechanical, and physical properties of lithium-silica glass systems by studying the addition of zirconium oxide using conventional melting methods. The samples, labeled LD, LDZ0.5, LDZ1.0, and LDZ1.5, were prepared by adding zirconium oxide at concentrations of 0.0%, 0.5%, 1.0%, and 1.5% by weight, respectively. The experimental results demonstrate that the addition of zirconium oxide at concentrations of 0.5-1% by weight affects the crystallization process. Heating at a temperature of 650°C significantly enhances the mechanical properties due to the formation of lithium disilicate and lithium metasilicate phases.

Keywords: Lithium disilicate, Mechanical properties, Zirconium oxide, Heat treatment



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและมีส่วนช่วยทำให้การดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณความกรุณาจากคณาจารย์และบุคคลที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็น รองศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา เรืองสุริยะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทันตแพทย์ธีระพงษ์ ม้ามณี นายอานนท์ ไกรป๋อก และนางสาวอนุดิตา อรุณจิตร์ รวมไปถึงสาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

อนึ่ง คณะผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ให้แก่เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา ทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอกราบขอบคุณความกตัญญู-กตเวทิตาคุณแต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนั้น คณะผู้วิจัยพร้อม ที่จะรับคำแนะนำของทุกท่าน เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	20
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	33
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	42
บรรณานุกรม	43
ประวัติย่อผู้วิจัย	45

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบลักษณะโครงข่ายของวัสดุ	6
2.2 การแตกตัวของพันธะ (bond dissociation) และการเรียงตัวของอะตอมผลึกและแก้ว หลังสารตั้งต้นได้รับความร้อนกลายเป็นของเหลวด้วยอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน	7
2.3 แสดงรูปครอปพื้น	13
2.4 แสดงกำลังคั่งของชิ้นงานหลังการให้ความร้อน	16
2.5 แสดงการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA	18
3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมแก้วเซรามิก	23
3.2 แสดงเครื่องมือในการหลอมแก้ว (ก) เตาหลอม (ข) เตาอบอ่อน (ค) เตาแผ่นความร้อน	25
3.3 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	27
3.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	28
3.5 เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์	29
3.6 เครื่องวิเคราะห์สมบัติความดัดงอ	30
3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติความร้อนด้วยเทคนิค DTA ของแก้วที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ	33
4.2 แสดงลักษณะของแก้วที่มีปริมาณการเติม ZrO_2 ที่แตกต่างกัน ก่อนการปลูกผลึก	34
4.3 แสดงลักษณะของแก้วที่มีปริมาณการเติม ZrO_2 ที่แตกต่างกัน หลังการปลูกผลึก	35
4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	35
4.5 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	38
4.6 ผลการทดสอบค่าความแข็งและสมบัติการต้านทานการดัดงอของชิ้นงานที่ผ่านการปลูกผลึก ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	39

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
4.7 การทดสอบในหลอดทดลอง (In vitro) เพื่อประเมินความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ของ ZrO_2 0.5 wt% ใน $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ กับเซลล์ MG63 เป็นระยะเวลา 4 วัน และ 7 วัน	41



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วและชื่อเรียก	10
3.1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2 แสดงปริมาณของสารเคมีของการเตรียมแก้ว	22
4.1 แสดงตัวแปรทางความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DTA	34
4.2 แสดงค่าสมบัติการดัดงอและค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้	39
เปรียบเทียบกับวัสดุแก้วเซรามิกทางทันตกรรมทางการค้าและงานวิจัยอื่น ๆ	



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

อาจกล่าวได้ว่าแนวโน้มความต้องการของวัสดุทางทันตกรรมในผู้สูงอายุปัจจุบันนี้เป็นผลมาจากความต้องการที่จะใช้วัสดุทดแทนฟัน เนื่องมาจากปัญหาเรื่องฟันแท้ที่หมดสภาพหรือสูญเสียไป ภาวะดังกล่าวส่งผลสำคัญซึ่งทำให้การบดเคี้ยวมีประสิทธิภาพลดลง ส่งผลให้ขาดสารอาหารที่จำเป็นต่อร่างกาย เกิดผลเสียต่อสุขภาพตามมาและหากสูญเสียฟันหน้าจะมีผลต่อการพูด ทำให้ออกเสียงได้ไม่ชัดเจน ก่อให้เกิดปัญหาด้านความสวยงามจนทำให้ขาดความมั่นใจได้ จึงจำเป็นต้องเข้ารับคำปรึกษาจากทันตแพทย์ด้วยการใส่ฟันปลอมทดแทนฟันที่หายไป ซึ่งในทางทันตกรรมนั้น “ฟันปลอมรวมไปถึงวัสดุครอบฟัน” มีมากมายหลายรูปแบบและที่สำคัญคือ ราคาค่อนข้างสูง ในอดีตวัสดุที่มักจะถูกนำมาใช้ได้แก่ วัสดุครอบฟันชนิดโลหะเคลือบเซรามิก (Porcelain-Fused-to-Metal Crown) ที่มีความแข็งแรง แต่อย่างไรก็ตามวัสดุชนิดนี้มีข้อจำกัดคือ การมีโครงโลหะภายใน จึงเป็นเหตุให้วัสดุขาดความโปร่งแสง แสงจึงไม่สามารถทะลุผ่านและสะท้อนออกมาได้ ผลที่ตามมานั้นคือ เมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน ตามขอบของชิ้นงานจะมีสีดำคล้ำ เกิดความไม่สวยงามเหมือนฟันธรรมชาติ นอกจากนั้นอาจมีการสึกกร่อนของเซรามิกเคลือบผิว เหงือกบางร่น ทำให้เห็นรอยต่อของครอบฟันที่เป็นโลหะชัดเจน ซึ่งหากเป็นครอบฟันหน้าก็จะเห็นข้อตำหนินี้อย่างเห็นได้ชัด จากเหตุผลดังกล่าวทำให้วัสดุทางทันตกรรมในกลุ่มของเซรามิกถูกพัฒนาทดแทนอย่างต่อเนื่อง

วัสดุครอบฟันชนิดเซรามิกล้วน (All-Ceramic Crown) ที่ได้รับความนิยมสำหรับนำมาใช้บูรณะในส่วนของฟันหน้าและสะพานฟันนั้น เป็นกลุ่มของเซรามิกประเภทลิเทียมไดซิลิเกต [1-3] ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกพัฒนาให้มีความแข็งแรงมากขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณของวัฏภาคผลึกด้วยกระบวนการทางความร้อนเพื่อควบคุมการเกิดผลึก ซึ่งผลึกเหล่านี้มีผลทำให้วัสดุเกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุแก้วเซรามิกชนิดอื่น การมีผลึกที่เพิ่มขึ้นถึงแม้จะทำให้สมบัติทางด้านความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะมีผลทำให้วัสดุมีความทึบแสงเพิ่มมากขึ้นด้วย จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา [2-3] วัสดุแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมซิลิเกตเป็นวัสดุที่มีคุณลักษณะพิเศษ นั่นคือผลึกที่เกิดขึ้นเป็นชนิดลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) ที่มีรูปร่างคล้ายเข็ม [4-6] ซึ่งผลึกที่มีอยู่นี้ ไม่ทำให้ค่าสมบัติความโปร่งแสงของเซรามิกเสียไป นอกจากสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยมแล้ว วัสดุชนิดนี้ยังมีสี

ใกล้เคียงพันธุกรรมชาติ จึงทำให้วัสดุทางทันตกรรมกลุ่มนี้ถูกนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทำฟันเทียมชนิดครอบฟันหน้า ครอบฟันหลังและสะพานฟัน สำหรับในประเทศไทย วัสดุทางทันตกรรมกลุ่มนี้ยังคงเป็นวัสดุทางการแพทย์ที่ถูกนำเข้าเกือบทั้งหมด วัสดุทางการค้ากลุ่มนี้จึงมีราคาที่สูง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ต้นทุนในการรักษามีราคาแพง และเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อกลุ่มผู้ป่วยซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นกลุ่มผู้สูงอายุที่ต้องอดทนต่อสภาวะเจ็บป่วย มีผลทำให้คุณภาพชีวิตของประชากรลดลง ในโครงการวิจัยที่ผ่านมาทางคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและสังเคราะห์แก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกตที่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับวัสดุทันตกรรมเซรามิกชนิดครอบฟันส่วนหน้ารวมไปถึงสะพานฟัน โดยจากการวิจัยพบว่า สามารถผลิตต้นแบบวัสดุดังกล่าวได้ และมีสมบัติทางด้านกายภาพนั้นคือ สีและลักษณะคล้ายพันธุกรรมชาติ รวมถึงการศึกษาสมบัติจุลภาครวมถึงสมบัติทางกลเบื้องต้นว่ามีค่าใกล้เคียงกับชิ้นงานที่เป็นต้นแบบของโรงงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยจึงมีความคาดหวังให้ต้นแบบชิ้นงานที่ประดิษฐ์ได้นี้ มีการพัฒนาขยายผลการศึกษาวิจัยให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น โดยการประยุกต์เติมสารประกอบออกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกันเข้ามาผสมผสานกับกระบวนการสร้างแก้วเซรามิกนาโนคอมโพสิต (Ceramic-nanocomposites) ที่มีความแข็งแรงสูง มีความสวยงามคล้ายคลึงพันธุกรรมชาติ สามารถใช้บดเคี้ยวอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพเพื่อพัฒนาวัสดุเซรามิกที่เดิม มีสมบัติแบบแข็งแต่เปราะให้มีความแข็งแรงและเหนียวมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับเนื้อพันธุกรรมชาติที่สามารถใช้เคี้ยวอาหารที่แข็งได้ และสามารถนำมาขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้งานได้จริงในระดับห้องปฏิบัติการ โดยในงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าโครงการประดิษฐ์แก้วเซรามิกระบบลิเทียมและซิลิกานี้ จะสามารถผลิตต้นแบบที่มีจุดขายที่โดดเด่นคือ เป็นแก้วเซรามิกที่เตรียมวิธีที่ไม่ยุ่งยาก สามารถผลิตได้ในประเทศ ลดการนำเข้า แก้ปัญหาต้นทุนในการผลิต สร้างงานให้แก่แรงงานภายในประเทศ รวมถึงสร้างประโยชน์ทั้งในเชิงพัฒนาคุณภาพชีวิตของประชากร เพิ่มโอกาสให้แก่ผู้ป่วยที่มีปัญหาทางด้านทันตกรรมได้มีชีวิตที่ดีขึ้นต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาแก้วเซรามิกทางทันตกรรมระบบลิเทียมและซิลิกาที่สามารถผลิตได้ในประเทศ

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพของแก้วระบบลิเทียมและซิลิกาสำหรับการประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรม

1.2.3 เพื่อผลิตบัณฑิตและพัฒนาขีดความสามารถในด้านการวิจัยของบุคลากรที่เกี่ยวข้องในเรื่องของการผลิตแก้วและแก้วเซรามิก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการพัฒนาแก้วเซรามิกระบบลิเทียมและซิลิกา หรือที่เรียกว่าแก้วชนิดลิเทียมได-ซิลิเกตขึ้นเพื่อนำไปใช้ในทางทันตกรรม โดยมีการปรับปรุงคุณสมบัติของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต คือ การเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์ในปริมาณต่าง ๆ จากนั้นทำการปรับแก้วเซรามิกให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยการนำไปเข้าเตาหลอมโดยผ่านกระบวนการทางความร้อน (heat treatment) เพื่อทำการปลุกผลึก โดยการควบคุมอุณหภูมิและช่วงเวลา และทำการศึกษาผลของการให้ความร้อนต่อสมบัติต่าง ๆ ของแก้วเซรามิกชนิดลิเทียม-ไดซิลิเกต (Lithium disilicate glass ceramic) รวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบของเฟสแก้ว โดยการทำวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน (Differential Thermal Analysis : DTA) วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) วิเคราะห์ความแข็งด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) การวิเคราะห์ความดัดงอด้วยเครื่องทดสอบความดัดงอ (Bending Test) และการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการปลุกผลึก (Crystallization) ของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต (Lithium disilicate glass ceramic) สำหรับการประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรมต่อไป

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

กิจกรรมที่ 1: ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เพื่อเลือกระบบแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่เหมาะสม

กิจกรรมที่ 2: จัดเตรียมหรือจัดซื้อวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี ที่จำเป็น

กิจกรรมที่ 3: ทำการเตรียมแก้วระบบลิเทียมไดซิลิเกตที่มีการเติมสารออกไซด์โดยกระบวนการหลอม

กิจกรรมที่ 4: ทำการศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยกระบวนการวิเคราะห์ทางความร้อนแบบอนุพันธ์ของอุณหภูมิ (differential thermal analysis, DTA) เพื่อหาเงื่อนไขของอุณหภูมิและอัตราการขึ้น/ลงของอุณหภูมิที่เหมาะสม ต่อการเผาผนึกและการตกผลึกในแก้ว

กิจกรรมที่ 5: ศึกษาเฟสและองค์ประกอบของเฟสของแก้วและแก้วเซรามิกที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนแบบรังสีเอ็กซ์ (x-ray diffraction)

กิจกรรมที่ 6: ทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของแก้วเซรามิกที่เตรียมได้ อาทิ สมบัติทางกายภาพและชีวภาพ สี สมบัติทางกล ฯลฯ

กิจกรรมที่ 7: ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของแก้วและแก้วเซรามิกที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแก้วและผลึกที่ได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบการกระจายของพลังงาน (energy dispersive analysis: EDS)

กิจกรรมที่ 8: ทำการวิเคราะห์ชนิด ขนาดและรูปร่างจากผลที่ได้จากโครงสร้างจุลภาค เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังกล่าวกับสมบัติที่วัดได้

กิจกรรมที่ 9: ทำการอภิปรายผลที่ได้ โดยเชื่อมโยงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทำการสรุปถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ในการสมบัติให้ดีขึ้นและเพื่อหาแนวทางในการทำการทดลองในเฟสต่อไป

กิจกรรมที่ 10: นำผลงานที่ได้ไปเผยแพร่ในรูปแบบของการประชุมสัมมนาหรือการตีพิมพ์ในวารสารที่มี impact factor ตามที่ตั้งเป้าหมายไว้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้รับองค์ความรู้ในการพัฒนาแก้วเซรามิกทางทันตกรรมระบบลิเทียมและซิลิกาที่สามารถผลิตได้ในประเทศ รวมไปถึงปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติที่เกี่ยวข้องกับวัสดุทางทันตกรรม

1.5.2 ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิจัยระดับนานาชาติ

1.5.3 นักศึกษาระดับปริญญาตรีที่มีความรู้เกี่ยวกับการสังเคราะห์แก้วเซรามิก

1.5.4 สร้างเครือข่ายความร่วมมือทางด้านวิชาการกับหน่วยงานภายนอก

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คำจำกัดความและที่มาของแก้ว

2.1.1 คำจำกัดความของแก้ว

ก่อนที่จะศึกษาเกี่ยวกับแก้ว วัสดุกลุ่มหนึ่งที่มีความเกี่ยวข้องและสัมพันธ์โดยตรงกับแก้ว คือ วัสดุอสัณฐาน (Amorphous materials) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะจากการจัดเรียงตัวของอะตอมหรือไอออน ในลักษณะที่ไม่มีความเป็นระเบียบ กล่าวคือ เป็นวัสดุที่ไม่มีโครงสร้างผลึก (non-crystalline material) การจัดเรียงตัวของอะตอมหรือไอออนในวัสดุประเภทนี้เกิดขึ้นเพียงในช่วงเวลาสั้น ๆ และไม่สม่ำเสมอ โดยทั่วไป วัสดุส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะจัดเรียงตัวในลักษณะที่เป็นระเบียบ เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นระเบียบช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic stability) ของวัสดุ อย่างไรก็ตาม เมื่อมีปัจจัยรบกวนหรือขัดขวางกระบวนการดังกล่าว จลนพลศาสตร์ (kinetics) ของวัสดุอาจเปลี่ยนไป ส่งผลให้เกิดความไม่เป็นระเบียบในโครงสร้าง และทำให้วัสดุมีแนวโน้มเปลี่ยนเป็นวัสดุอสัณฐาน

คำจำกัดความของแก้วตามมาตรฐาน ASTM (ASTM standard no. C 162-92) ได้ให้คำจำกัดความของแก้วว่า แก้วคือผลิตภัณฑ์สารอนินทรีย์ที่ได้จากการหลอมและถูกทำให้เย็นตัวลงในสภาพแข็งเกร็ง (rigid condition) โดยไม่มีการตกผลึก [1]

ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า แก้ว คือ วัสดุชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างอสัณฐาน เนื่องจากแก้วมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในที่ไม่เป็นระเบียบ ในทางวัสดุศาสตร์แก้วถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มของวัสดุประเภทเซรามิก นอกจากนี้ นักวิทยาศาสตร์ด้านแก้วบางกลุ่มได้จำแนกแก้วเป็นอีกสถานะหนึ่งของสสาร สมบัติของแก้วประกอบไปด้วยสมบัติทั้งของแข็ง ของเหลวและแก๊สอยู่ด้วยกัน เนื่องมาจากแก้วไม่มีความเป็นผลึกเหมือนวัสดุที่เป็นของแข็งโดยทั่วไป มีโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนของเหลว และยังมีการจัดเรียงตัวอะตอมแบบสับสนเหมือนแก๊ส

เมื่อทำการหลอมทรายซึ่งเป็นวัสดุที่มีผลึกที่อุณหภูมิสูง แล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จะทำให้เกิดแก้วได้ (glass formation) ตำแหน่งของอะตอมต่าง ๆ ในโครงสร้างแก้วทั้ง Si และ O จะมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (random disordered arrangement) ที่ไม่เป็นระเบียบและแน่นอน เนื่องมาจากอะตอมแก้วถูกล็อค แก้วจะมี

สภาพความแข็งแรงเชิงกล (mechanical rigidity) เหมือนของแข็ง แต่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลหรืออะตอมภายในโครงสร้างที่เป็นแบบสุ่มเหมือนของเหลวและแก๊ส และหากพิจารณาถึงระยะห่างระหว่างอะตอมและมุมระหว่างอะตอมของแก้วที่ประกอบด้วยซิลิกา 1 อะตอมที่ถูกจับกับออกซิเจน 4 อะตอมที่ล้อมรอบ จะพบว่ามีระยะห่างระหว่างอะตอมและมุมระหว่างอะตอมไม่แน่นอน ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาโครงสร้างที่เป็นผลึกของสารซิลิกา หรือซิลิกอนไดออกไซด์ ที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบ จะมีระยะห่างและมุมระหว่างอะตอมอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูป 2.1

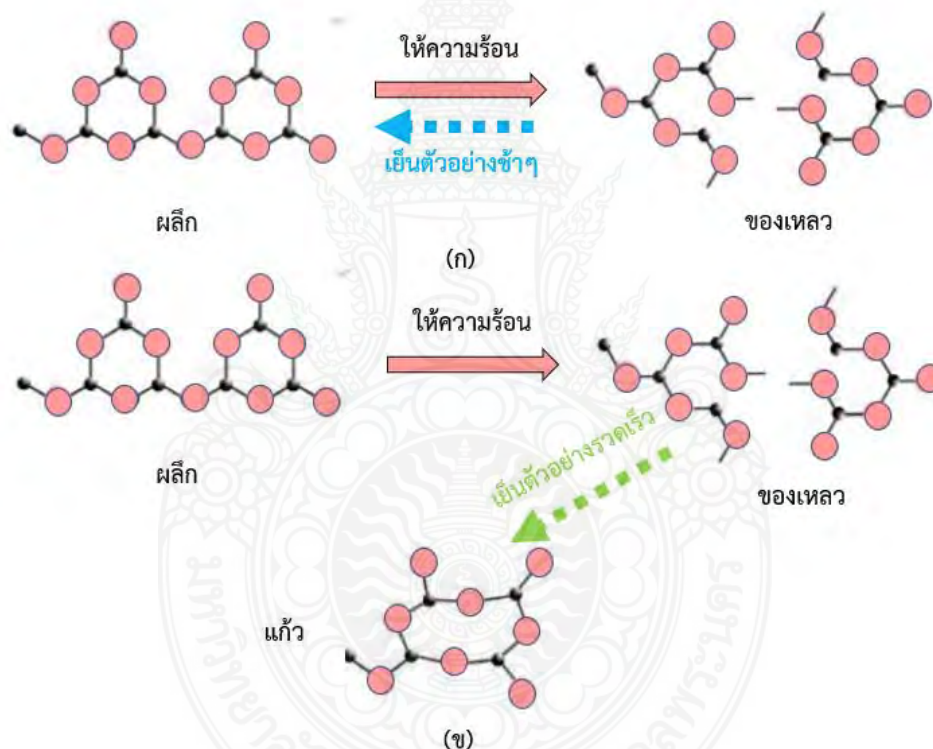


รูป 2.1 การเปรียบเทียบลักษณะโครงข่ายของวัสดุ (ก) ผลึกซิลิกา และ (ข) แก้วซิลิกา [ดัดแปลงจาก

American Society for Testing of Materials (1993), [1]]

โดยทั่วไปการที่จะทำให้เกิดแก้ว (glass formation) ได้นั้น ต้องเริ่มจากการให้ความร้อนแก่ของแข็งที่มีผลึก เมื่อวัสดุมีอุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการแตกตัวของพันธะ (bond dissociation) กลายสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิสูง และเมื่อทำการลดอุณหภูมิที่ให้อย่างรวดเร็ว (fast cool) อะตอมของวัสดุนั้นจะถูกตรึงสถานะ

การเคลื่อนที่ของอะตอมหรือโมเลกุลภายในโครงสร้างจะหยุดชะงัก กลายเป็นวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่มีระเบียบแบบสุ่ม ก่อนที่อะตอมจะสามารถเรียงตัวกันกลายเป็นผลึกที่สมบูรณ์ (perfect crystal arrangement) ได้อย่างไรก็ตาม หากทำการลดอุณหภูมิของของเหลวที่ได้อย่างช้า ๆ (slow cool) อะตอมที่วิ่งอยู่ภายในของเหลวที่มีอุณหภูมิสูงนั้นจะมีเวลาในการกลับมาเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบเพื่อเป็นผลึกที่มีพลังงานอิสระ (free energy) ต่ำที่สุด หรือเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดได้ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ปัจจัยที่สำคัญในการทำให้เกิดแก่นั้นคือการเย็นตัว (cooling rate) นั่นเอง รูปที่ 2.2 แสดงถึงการแตกตัวของพันธะ (bond dissociation) ในกรณีที่สารตั้งต้นได้รับความร้อนด้วยอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.2 การแตกตัวของพันธะ (bond dissociation) และการเรียงตัวของอะตอมผลึกก่อนและหลังที่สารตั้งต้นได้รับความร้อนกลายเป็นของเหลวด้วยอัตราการเย็นตัวที่แตกต่างกัน (ก) เย็นตัวอย่างช้า ๆ (slow cool rate) (ข) เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (fast cool rate) [ดัดแปลงจาก Holland, D. 1995, [3] และ กมลพรรณ เพ็งพัต 2561, [4]]

2.2 ประเภทของแก้ว

2.2.1 แก้วที่เกิดโดยธรรมชาติ (god made glass)

แก้วที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เรียกว่า ออบซิเดียน (Obsidian) ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วของสารหลอมเหลวที่พุ่งออกมาจากปล่องภูเขาไฟ (magma) โดยมีลักษณะสีเทาหรือสีม่วงดำเป็นเอกลักษณ์ ต่อมาในยุคหิน เมื่อมนุษย์เริ่มรู้จักการใช้ความร้อนจากไฟในการหุงต้ม กรวดและทรายบริเวณเชิงตะกอนของเตาไฟที่ได้รับความร้อนสูงจะเกิดการหลอมละลายบริเวณผิว จนกลายเป็นแก้วลักษณะคล้ายลูกปัด หรือ แก้วก้อนกลม (glass bead)

นอกจากนี้ แก้วธรรมชาติยังสามารถเกิดจากการหลอมตัวของทรายหรือทรายแก้ว ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีหลักเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) หรือจากการหลอมตัวของซิลิกอนไดออกไซด์ที่อยู่ในรูปของหินหรือแร่ เช่น หินเขี้ยวหนุมาน (Quartz) ซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูงกว่าทราย หากเกิดการหลอมละลายแล้ว จะเรียกว่า ซิลิกาหลอม (Fused Silica)

2.2.2 แก้วที่มนุษย์สร้างขึ้น (man-made glass)

ประเภทของแก้วที่จำแนกตามองค์ประกอบทางเคมี สามารถแบ่งได้เป็น 6 ชนิด ดังนี้

1. แก้วซิลิเกต (Silicate glass)

แก้วซิลิเกตหรือที่เรียกว่าซิลิกากระจก (Silica Glass), ฟิวส์ซิลิกา (Fused Silica) หรือวิเทรียสซิลิกา (Vitreous Silica) และแก้วควอตซ์ (Quartz) ได้จากการหลอมเศษแก้ว ทรายแก้ว หรือหินควอตซ์ โดยไม่เติมสารประกอบอื่น ๆ ทำให้ต้องหลอมที่อุณหภูมิสูงถึง 1,710 องศาเซลเซียส กระบวนการนี้ทำให้เกิดน้ำแก้วที่มีความหนืดสูง มีฟองอากาศมาก และแข็งตัวเร็ว ส่งผลให้การขึ้นรูปยาก จึงนิยมหลอมในสุญญากาศ แก้วประเภทนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ทนต่อสารเคมีและความร้อนได้ดี อีกทั้งยังยอมให้รังสีอัลตราไวโอเลตผ่านได้ดี จึงนิยมใช้ทำเครื่องมือในห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์ไฟฟ้า และผลิตภัณฑ์ด้านแสง ทั้งนี้ แก้วชนิดนี้มีราคาสูง นอกจากนั้นยังมีแก้วที่เรียกว่า แก้วซิลิเกตร้อยละ 96 มีสมบัติใกล้เคียงกับแก้วซิลิกาหลอม แต่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าและสัมประสิทธิ์การขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนสูงกว่า เนื่องจากมีส่วนผสมของสารช่วยหลอมละลายประมาณร้อยละ 4 เพื่อลดจุดหลอมเหลวและเพิ่มความสะดวกในการขึ้นรูป นิยมใช้ทำหลอดแก้วและถ้วยแก้วในห้องปฏิบัติการ

2. แก้วโซดาไลม์ (Soda lime silicate)

แก้วโซดาไลม์เป็นแก้วที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน ผลิตจากโซดาไลม์ และทรายเป็นส่วนผสมหลัก มีการเติมโซดาหรือโพแทสเพื่อลดจุดหลอมและเพิ่มความสะดวกในการขึ้นรูป ส่วนผสมอื่น ๆ ได้แก่ โลหะ แมกนีเซียม ออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ เพื่อเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี นิยมใช้ทำขวด กระจกหน้าต่าง ถ้วยแก้ว และแก้วกระจกรถยนต์

3. แก้วเลดซิลิเกต (Lead silicate glass)

แก้วเลดซิลิเกตได้จากการแทนแคลเซียมออกไซด์ด้วยตะกั่ว (Lead Oxide) ซึ่งสามารถใช้ในปริมาณสูงถึงร้อยละ 80 ทำให้แก้วมีน้ำหนักมาก มีจุดหลอมต่ำกว่าแก้วโซดาไลม์ และมีความแวววาว นิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์ศิลปะ แก้วเจียรไน และอุปกรณ์วิทยุและโทรทัศน์

4. แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass)

แก้วโบโรซิลิเกตมีส่วนประกอบของโบรอนไตรออกไซด์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีจุดเด่นที่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน และทนต่อสารเคมีได้ดี นิยมใช้ทำภาชนะหุงต้ม ห้องปฏิบัติการ และเลนส์กล้องดูดาว

5. แก้วอะลูมินซิลิเกต (Alumina Silicate glass)

แก้วอะลูมินซิลิเกต เป็นประเภทของแก้วที่มีส่วนผสมหลักจากซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งมักใช้เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษ เช่น ความทนทานสูงต่อความร้อน การขยายตัวต่ำเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และความทนทานต่อสารเคมีที่ทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น ภาชนะหุงต้ม กระจกและหน้าต่าง วัสดุทนไฟ เป็นต้น

6. แก้วสี (Color glass)

แก้วสีเป็นแก้วที่มีสีในเนื้อแก้วเกิดจากการเติมสารประกอบเคมีหรือโลหะที่สามารถทำให้แก้วมีสีต่าง ๆ โดยการเติมสารเหล่านี้เข้าไปในกระบวนการผลิตแก้ว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการสะท้อนหรือการดูดซับแสง ซึ่งส่งผลให้แก้วมีสีเฉพาะตัว โดยการเติมสารเหล่านี้ไม่ได้เพียงแค่เปลี่ยนสีของแก้ว แต่ยังส่งผลต่อคุณสมบัติอื่น ๆ เช่น ความแข็งแรง ความทนทานต่อการกัดกร่อน และการทนความร้อนของแก้วด้วย

2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก้ว

สมบัติของวัตถุดิบที่ส่งผลต่อคุณลักษณะของแก้ว ซึ่งประกอบไปด้วยวัตถุดิบสำคัญดังต่อไปนี้

1) ฟอว์เมอร์หรือโครงร่างตาข่ายแก้ว (Glass former หรือ Glass network former)

ฟอว์เมอร์หรือโครงร่างตาข่ายแก้ว เป็นส่วนประกอบที่เป็นตัวพื้นฐานของแก้ว ซึ่งจะเป็นสารเคมีชนิดใดก็ได้ที่สามารถหลอมและทำให้เย็นตัวกลายเป็นแก้วได้ ซึ่งสามารถเรียกว่าเป็นฟอว์เมอร์ของแก้วได้ทั้งสิ้น แก้วทุกชนิดจะต้องมีสารประกอบที่ทำหน้าที่เป็นฟอว์เมอร์แก้วเสมอ ซึ่งจะมีหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งชนิดก็ได้ ในกรณีแก้วทางการค้ามักจะทำมาจากทรายที่มีฟอว์เมอร์เป็นซิลิกา โดยทั่วไปแล้วระบบแก้วจะเรียกแก้วตามชนิดของตัวฟอว์เมอร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วและชื่อเรียก [ณัฐพล เล่าห์รอดพันธุ์. 2558, [10]]

องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว	ชื่อเรียก
ระบบที่มีโครงร่างตาข่าย 1 ชนิด	
SiO_2	แก้วซิลิกา
$Na_2O \cdot SiO_2$	แก้วโซเดียมซิลิเกต
$CaO \cdot SiO_2$	แก้วแคลเซียมซิลิเกต
B_2O_3	แก้วโบรอนออกไซด์
$Li_2O \cdot B_2O_3$	แก้วลิเทียมบอเรต
$Ti_2O \cdot B_2O_3$	แก้วเทลเลียมบอเรต
P_2O_5	แก้วฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์
$Rb_2O \cdot P_2O_5$	แก้วรูบิเดียมฟอสเฟต
$BaO \cdot P_2O_5$	แก้วแบเรียมฟอสเฟต
$CaO \cdot Al_3O_2$	แก้วแคลเซียมอะลูมินต
$MgO \cdot Ga_2O_3$	แก้วแมกนีเซียมแกลเลต

องค์ประกอบทางเคมีของแก้ว	ชื่อเรียก
ระบบที่มีโครงสร้างตาข่าย 2 ชนิด $\text{CaO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	แก้วแคลเซียมโบโรซิลิเกต
$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	แก้วแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกต

ตัวเอียง คือ สารประกอบกลุ่มที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างตาข่าย (Glass former)

จากตารางที่ 2.1 จะแสดงให้เห็นว่า สารที่เป็นฟอร์เมอร์ที่สามารถเป็นแก้วได้ด้วยตนเองนั้นมีได้หลายชนิด ได้แก่ ซิลิกา (SiO_2) โบรอนออกไซด์ (B_2O_3) ฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ (P_2O_5) เจอมาเนียมไดออกไซด์ (GeO_2) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นที่ทำหน้าที่เป็นฟอร์เมอร์แก้วที่ไม่สามารถทำให้เป็นแก้วได้ด้วยตัวเองต้องผสมกับฟอร์เมอร์ตัวอื่น ยกตัวอย่างเช่น บิสมัทไตรออกไซด์ (Bi_2O_3) อาร์เซนิกไตรออกไซด์ (As_2O_3) เทลลูเรียมไดออกไซด์ (TeO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) แกลเลียมไตรออกไซด์ (Ga_2O_3) และวานาเดียมเพนตะออกไซด์ (V_2O_5)

2) วัตถุดิบที่ช่วยลดอุณหภูมิหลอม (Fluxing Agents)

วัตถุดิบที่ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิการหลอมแก้ว ได้แก่ โซดาแอช (Soda Ash, Sodium Carbonate, Na_2CO_3) ซึ่งเมื่อนำไปผสมกับทรายแก้วในสัดส่วนร้อยละ 10–16 จะช่วยลดอุณหภูมิหลอมลงได้ 700–800 องศาเซลเซียส การผสมโซดาแอชกับทรายแก้วจะก่อให้เกิดโซเดียมซิลิเกต (Sodium Silicate, Na_2SiO_3) หรือที่เรียกว่า "น้ำแก้ว" (Water Glass) ซึ่งมีสมบัติละลายน้ำ เพื่อเพิ่มความทนทานของแก้วและลดการละลายน้ำ จะมีการเติมหินปูน (Calcium Carbonate, CaCO_3) ร่วมกับวัตถุดิบอื่น เช่น แมกนีเซียมและแบเรียม วัตถุดิบที่ช่วยลดอุณหภูมิอื่นที่นิยมใช้ ได้แก่ หินฟันม้า (Feldspar), ตะกั่วออกไซด์ และบอริกออกไซด์ (ในรูปของ บอร์แรกซ์ Borax, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ซึ่งมักใช้ในการผลิตแก้วโบโรซิลิเกต

3) สารช่วยให้เสถียร (Stabilizer)

เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยในปรับปรุงสมบัติแก้ว โดยจะช่วยให้สารที่ผสมกันระหว่างฟอร์เมอร์และฟลักซ์ไม่เกิดการละลาย ไม่ร่วนและไม่แตกออกจากกัน โดยจะช่วยยึดโครงสร้างของแก้วให้คงอยู่เป็นเนื้อเดียวกัน สารในกลุ่มนี้มีหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น ออกไซด์ของธาตุหมู่อัลคาไลน์เอิร์ธ เช่น แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แบเรียมคาร์บอเนต (BaCO_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นต้น ออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน (Transition metal oxide) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) โดยสารเหล่านี้นอกจากจะเป็นสารช่วยให้เสถียรในน้ำแก้วแล้ว

ยังแสดงพฤติกรรมเป็นตัวช่วยหลอมได้อีกด้วย แต่ความสามารถในการลดอุณหภูมินั้นยังน้อยกว่ากลุ่มออกไซด์ของธาตุหมู่อัลคาไลน์หรือตะกั่วออกไซด์ รวมถึงปริมาณในการใช้สารช่วยให้เสถียรนั้นยัง不多 ดังนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิของน้ำแก้วมากนัก

4) วัตถุดิบสำหรับฟอกสี (Decolorizing Agents)

สารฟอกสีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซีลีเนียม (Selenium) และโคบอลต์ (Cobalt) ซึ่งใช้ในปริมาณน้อย เนื่องจากราคาสูง สารเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการฟอกสีเขียวที่เกิดจากออกไซด์ของเหล็ก อย่างไรก็ตามหากปริมาณเหล็กออกไซด์ในแก้วสูงกว่าร้อยละ 0.06 สารฟอกสีอาจไม่สามารถกำจัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5) วัตถุดิบที่ช่วยไล่ฟองอากาศ (Oxidizing Agents)

ในกระบวนการหลอมแก้วมักเกิดฟองอากาศ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของสารคาร์บอเนตในวัตถุดิบ ฟองอากาศเหล่านี้สามารถกำจัดได้ด้วยการเติมสารช่วยไล่ฟอง เช่น อาร์เซนิกออกไซด์ (Arsenic Oxide, As_2O_3) และ โซเดียมไนเตรท (Sodium Nitrate, NaNO_3) เป็นต้น

6) วัตถุดิบควบคุมความหนืดและการไหลตัว (Viscosity and Fluidity Control Agents)

การควบคุมความหนืดและการไหลตัวของน้ำแก้วสามารถทำได้โดยการใช้วัตถุดิบ เช่น อะลูมินา (Alumina) และหินฟันม้า (ทั้งชนิดโซดาและโพแทส) ซึ่งเป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิการหลอม

2.4 วัสดุครอบฟันทางทันตกรรม (Dental Crown)

ครอบฟันเป็นการสร้างวัสดุที่มีลักษณะคล้ายฟันธรรมชาติเพื่อครอบหรือคลุมฟันที่ได้รับความเสียหาย เช่น ฟันแตก ฟันบิ่น ฟันสึก ฟันหัก ฟันสั้น ฟันที่มีสีหรือรูปร่างไม่สมบูรณ์ ฟันที่ผ่านการรักษารากฟัน หรือฟันที่มีลักษณะไม่สวยงาม วัตถุประสงค์ของการครอบฟัน คือ เพื่อฟื้นฟูการใช้งาน ความแข็งแรง และความสวยงามให้กลับมาใกล้เคียงกับฟันธรรมชาติมากที่สุด



รูปที่ 2.3 แสดงรูปครอบฟัน (Dental Crown) [5]

2.4.1 ประเภทของครอบฟัน

1. ครอบฟันแบบเซรามิกล้วน (All-Porcelain Crowns)

เป็นครอบฟันชนิดที่ผลิตจากวัสดุเซรามิกทั้งหมด เป็นที่นิยมอย่างมากในทันตกรรมสมัยใหม่ เนื่องจากให้ความสวยงามและความเป็นธรรมชาติสูง เหมาะสำหรับการทำครอบฟันหน้า เนื่องจากมีรูปลักษณ์ สี และขนาดที่คล้ายฟันธรรมชาติ นอกจากนี้ วัสดุเซรามิกในปัจจุบันได้รับการพัฒนาให้มีความแข็งแรงสูง จึงสามารถใช้ครอบฟันกรามได้ ตัวอย่างของครอบฟันแบบเซรามิกล้วน ได้แก่ ซีแรมโค (Ceramco; Dentsply, USA) เป็นต้น

2. ครอบฟันเซอรโคเนีย (Zirconia Crowns)

ผลิตจากวัสดุเซอรโคเนียที่มีคุณสมบัติคล้ายฟันธรรมชาติ ทั้งในด้านความโปร่งแสง ความแข็งแรง และความทนทาน รองรับแรงบดเคี้ยวได้ดีและไม่บิ่นหรือแตกง่าย เซรามิกชนิดนี้ได้แก่ เซอรคอน (Cercon; Dentsply Ceramo, NJ) ไอพีเอส อีแมค เซอรแคด (IPS e.max ZirCAD; Ivoclar Vivadent, Liechtenstein) ลาวา (Lava; 3M-ESPE, Germany)

3. ครอบฟันเซรามิกล้วนแบบแก้วเซรามิก (Glass Ceramic Crowns)

เป็นเซรามิกที่มีการพัฒนาให้มีความแข็งแรงมากขึ้นโดยเพิ่มปริมาณของวัฏภาคผลึกด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การอบร้อน (ceraming) ซึ่งเป็นกระบวนการควบคุมการเกิดผลึก (controlled crystallization) ด้วยความร้อน (heat treatment) ร่วมกับการใส่สารสร้างนิวเคลียส (nucleating agent) ไว้ในเซรามิกให้เป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการเกิดผลึก (crystallization) วัสดุกลุ่มนี้มีความโปร่งแสงและสวยงามคล้ายฟันธรรมชาติ เหมาะสำหรับครอบฟันทั้งฟันหน้าและฟันหลัง โดยเฉพาะในกระบวนการ CAD/CAM หรือ One-Day Crown Restoration ซึ่งสามารถทำเสร็จในวันเดียว วัสดุชนิดนี้มีข้อจำกัดในกรณีที่ผู้ป่วยมีฟันสั้น ฟันสึกมา หรือพฤติกรรมนอนกัดฟัน เนื่องจากอาจแตกได้ง่าย ตัวอย่างวัสดุกลุ่มนี้ ได้แก่ ไอพีเอส เอ็มเพรสทู (IPS Empress II; Ivoclar Vivadent, Liechtenstein) ไอพีเอส อีแมกแคด (IPS e.max CAD; Ivoclar Vivadent, Liechtenstein)

4. ครอบฟันไฮบริดเซรามิก (Hybrid Ceramic Crowns)

ครอบฟันชนิดนี้เป็นการผสมกันระหว่างเซรามิกและวัสดุคอมโพสิต มีคุณสมบัติยึดหยุ่น แข็งแรงระดับปานกลาง และให้ความสวยงาม เหมาะสำหรับการทำครอบฟันทั้งฟันหน้าและฟันหลัง โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการรักษาเนื้อฟันไว้มากที่สุด เช่น การครอบฟันแบบ Minimally Invasive Restoration ตัวอย่างวัสดุ เช่น Enamic, Cerasment

5. ครอบฟันแบบเรซิน (Resin Crowns)

วัสดุครอบฟันชนิดนี้เป็นกลุ่มของครอบฟันพลาสติก ซึ่งมักใช้สำหรับครอบฟันชั่วคราวในระหว่างรอการผลิตครอบฟันถาวร โดยช่วยให้ผู้ป่วยสามารถประเมนผลการใช้งานก่อนติดตั้งครอบฟันถาวร

6. ครอบฟันเซรามิกผสมโลหะ (Porcelain Fused to Metal, PFM Crowns)

เป็นครอบฟันที่มีโครงสร้างฐานเป็นโลหะและเคลือบด้วยเซรามิกชั้นบน แม้ว่าจะมีความแข็งแรงสูงแต่ไม่เป็นที่นิยมในปัจจุบัน เนื่องจากความไม่เป็นธรรมชาติและอาจทำให้ขอบเหงือกมีสีดำคล้ำ ปัจจุบันครอบฟันเซอรโคเนียมักถูกเลือกใช้แทน เนื่องจากมีความสวยงามและแข็งแรงกว่า

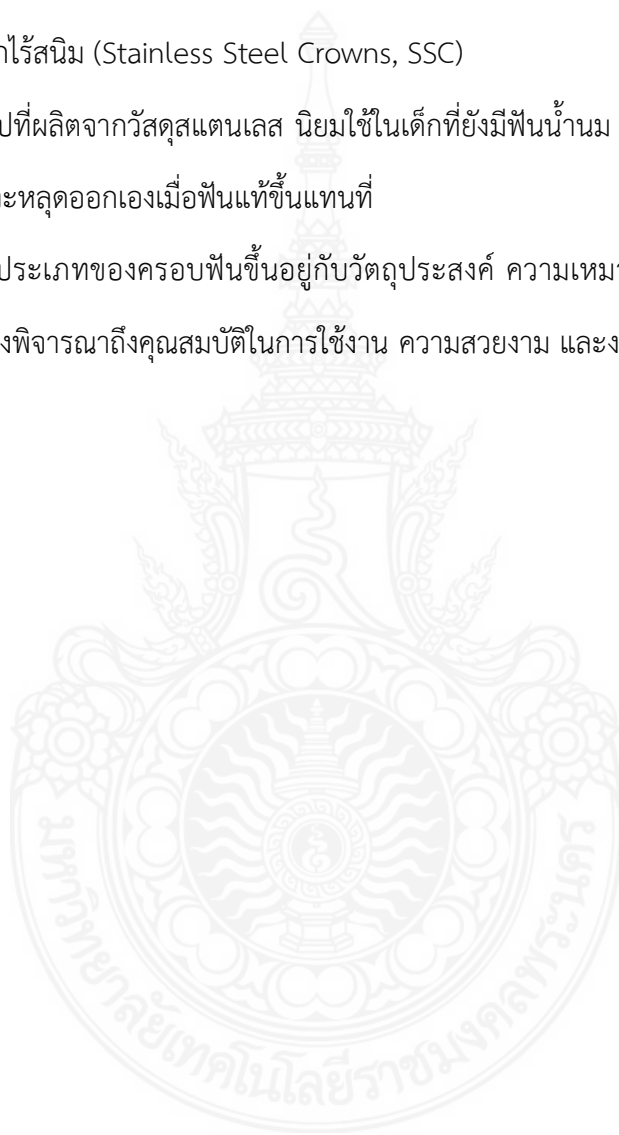
7. ครอบฟันโลหะล้วน (Full Metal Crowns)

ครอบฟันโลหะล้วนเป็นครอบฟันที่ผลิตจากโลหะล้วน มีความแข็งแรงสูง รongรับแรงบดเคี้ยวได้ดี และไม่แตกหักง่าย เหมาะสำหรับผู้ที่ให้ความสำคัญกับการใช้งานมากกว่าความสวยงาม ตัวอย่างเช่น ครอบฟันทองคำ (Golden Crowns) หรือครอบฟันพาลาเดียม (Palladium Crowns)

8. ครอบฟันเหล็กไร้สนิม (Stainless Steel Crowns, SSC)

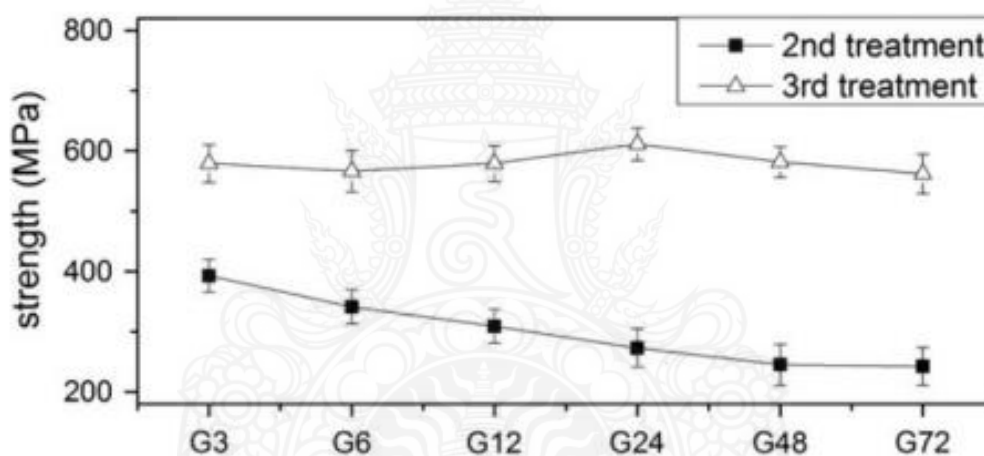
ครอบฟันสำเร็จรูปที่ผลิตจากวัสดุสแตนเลส นิยมใช้ในเด็กที่ยังมีฟันน้ำนม เพื่อปกป้องฟันจากการสึกหรือแตก โดยครอบฟันชนิดนี้จะหลุดออกเองเมื่อฟันแท้ขึ้นแทนที่

ดังนั้น การเลือกประเภทของครอบฟันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ ความเหมาะสมในแต่ละกรณี และความต้องการของผู้ป่วย โดยต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติในการใช้งาน ความสวยงาม และงบประมาณร่วมกัน



2.5 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2014 Zhang และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลทางความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติของลิเทียมไดซิลิเกต พบว่า การให้อุณหภูมิการเกิดผลึกที่ 650 องศาเซลเซียส ทำให้แก้วมีสมบัติที่ดี โดยการเพิ่มเวลาการหลอมเหลว ซึ่งไม่ทำให้แก้วเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส แต่มีการเพิ่มปริมาณของผลึกที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งเมื่อลดขนาดของแก้วลิเทียมไดซิลิเกต ทำให้มีความโปร่งแสงเพิ่มมากขึ้น และการรักษาอุณหภูมิการปลูกผลึกให้คงที่เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในระยะแรกพบว่าเป็นช่วงที่สมบูรณ์ที่สุด มีค่าแรงดัดอยู่ที่ 581 ± 25 MPa [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.4

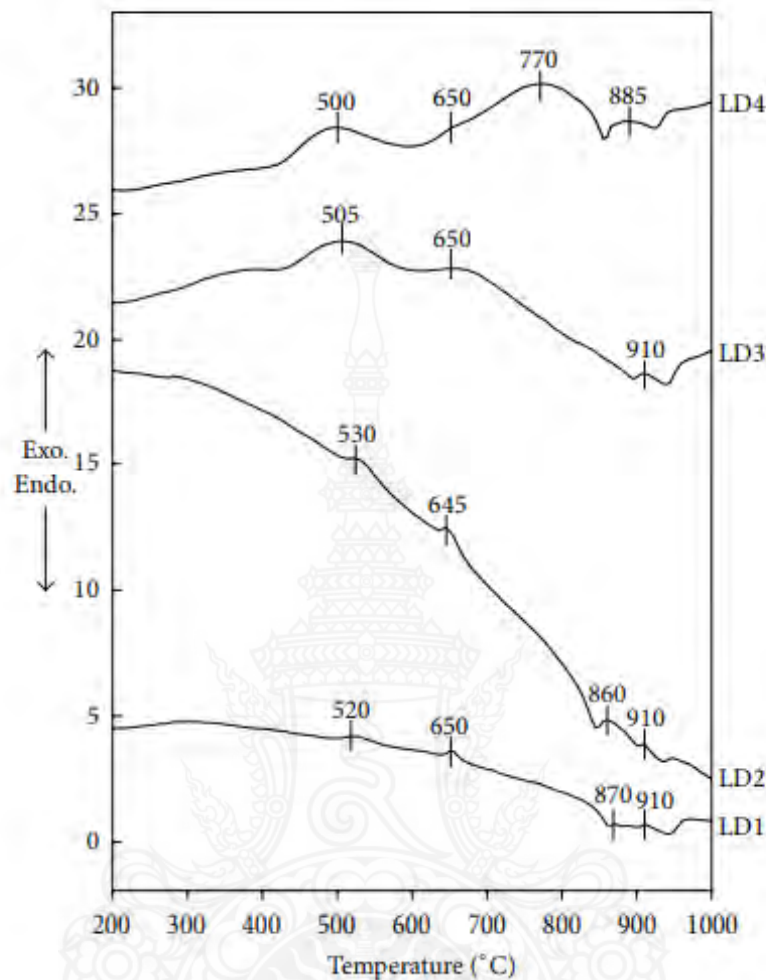


รูปที่ 2.4 แสดงกำลังดัดของชิ้นงานหลังการให้ความร้อน [9]

ในปี 2000 Zheng และคณะ [10] ได้มีการศึกษาผลของการเติมฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ต่อการเกิดผลึกและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของแก้วเซรามิกในระบบ $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O-K}_2\text{O-ZnO-P}_2\text{O}_5$ พบว่าแก้วเซรามิกที่สังเคราะห์ได้มีลิเทียมเทียมไดซิลิเกตเป็นเฟสหลัก และพบเฟสรองได้แก่ ลิเทียมเมทาซิลิเกต ลิเทียมอโรฟอสเฟตและคริสโตบาไลต์ นอกจากนั้นยังแสดงให้เห็นว่า แก้วเซรามิกที่มีปริมาณฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ที่ร้อยละ 1.0-2.5 พบผลึกของลิเทียมไดซิลิเกตเป็นหลักและเมื่อตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานพบว่าผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นแท่ง ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญของการเกิดผลึกของลิเทียมไดซิลิเกตและยังส่งผลให้แก้วเซรามิกระบบนี้มีความแข็งแรงสูงขึ้นอีกด้วย

ในปี 2006 Höland และคณะ [11] ได้ทำการสังเคราะห์แก้วระบบ $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ พบว่าการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เฟสองค์ประกอบที่ได้คือ Li_2SiO_3 ในขณะที่เมื่อมีการผ่านกระบวนการความร้อนขั้นที่สองที่อุณหภูมิ 830 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเฟสองค์ประกอบของ Li_2SiO_3 สลายหมดและกลายเป็นเฟสของ $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ เข้ามาแทนที่ โดยที่เฟส $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ เป็นเฟสที่มีขนาดเล็กมีค่าความโปร่งใสสูง และเมื่อทำการปลูกผลึกต่อในขั้นที่สามที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพื่อลดความเค้นภายในแก้วเซรามิกและเพื่อเพิ่มสมบัติทางกล พบว่าที่อุณหภูมิดังกล่าวสามารถทำให้วัสดุตัวอย่างที่ได้มีค่าสมบัติการดัดงอที่ดีขึ้นที่ 560 เมกะปาสคาล นอกจากนั้นแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกตได้มีการพัฒนาโดยมีการเติมสารประกอบออกไซด์หลายชนิดด้วยกัน P_2O_5 เป็นสารประกอบออกไซด์ชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาเติมในแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต เนื่องจากได้มีการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณทำให้เกิดการสร้างผลึก $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ที่มีคุณสมบัติเพิ่มสมบัติทางกลของชิ้นงาน [12]

ปี 2017 Bai และคณะ [12] พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ P_2O_5 แก้วลิเทียมไดซิลิเกตระบบ $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ พบว่าสมบัติทางกลมีค่ามากขึ้น โดยปริมาณที่ดีที่สุดคือการเติม P_2O_5 ที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยโมล ซึ่งการเติม P_2O_5 เชื่อว่าจะไปมีผลทำให้ผลึกมีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกเฟส โดยเมื่อวิเคราะห์สมบัติทางจุลภาคพบว่า ผลึกที่ได้มีรูปร่างเป็นแท่ง อย่างไรก็ตามหากเพิ่มปริมาณของ P_2O_5 มากเกินไปจะส่งผลทำให้ขนาดของผลึกลดลง และเมื่อทดสอบสมบัติทางกลวัสดุที่ได้ พบว่าชิ้นงานมีความโปร่งแสงและมีศักยภาพที่สามารถนำไปใช้ในทางทันตกรรมได้



รูปที่ 2.5 แสดงการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA [13]

Monmaturapoj และคณะ [13] ได้ทำการพัฒนาสูตรแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกตที่ยังขาดความทนต่อสารเคมีเพื่อใช้เป็นวัสดุบุผนังทางทันตกรรม โดยได้ทำการเติม MgO , Al_2O_3 และ K_2O ที่ปริมาณแตกต่างกัน เพื่อเพิ่มความทนต่อสารเคมี ผลการทดลองพบว่า เฟสองค์ประกอบของแก้วเซรามิกถูกระบุโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ได้ว่า P_2O_5 และ CaF_2 ทำหน้าที่เป็นกระตุ้นนิวเคลียสเพื่อให้เกิดเฟสองค์ประกอบชนิดลิเทียมฟอสเฟต Li_3PO_4 และฟลูออราพาไทต์ $Ca_5(PO_4)_3F$ ส่งผลให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กที่ทำให้โครงสร้างจุลภาคเชื่อมต่อกันของเกรน ในขณะที่ปริมาณ MgO ที่เติมเข้าไปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสและโครงสร้างของแก้ว แต่เพิ่มความเหนียวของแก้วที่หลอมละลายและค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน รวมถึงความสามารถในการละลายทางเคมีด้วย นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน $Si:Li$ ในองค์ประกอบแก้วเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของผลึก $Li_2Si_2O_5$ ที่มีลักษณะของผลึกเป็นรูปร่างคล้ายเข็มหรือคล้ายแผ่น ซึ่งในการศึกษานี้

นอกจากจะอธิบายถึงผลของออกไซด์ต่าง ๆ ที่เติมแล้วยังแสดงให้เห็นอีกว่า ตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 850 °C จะมีความเหนียวแตกหักได้ดีที่สุดที่ ~ 8 MPa นอกจากนี้ตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800 °C ยังมีความแข็งแรงดัดงอที่ดีที่สุดที่ ~ 490 MPa และมีความสามารถในการทนต่อการละลายทางเคมีที่ $28 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้คณะผู้วิจัยเล็งเห็นถึงกระบวนการในการสังเคราะห์โดยจะเริ่มจากการหาสูตรแก้วที่มีอัตราส่วนที่เหมาะสมและมีการกำหนดเงื่อนไขในการเจือองค์ประกอบออกไซด์ที่แตกต่างกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจการเติมสารออกไซด์ชนิดเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ปริมาณแตกต่างกัน รวมถึงศึกษากระบวนการควบคุมผลึกโดยอาศัยกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ที่สำคัญต่อการนำไปใช้งานในทางทันตกรรม เช่น สี ความแข็งแรง และความเข้ากันได้ของชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาวัสดุครอบฟันชนิดเซรามิก ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความคาดหวังว่าโครงการประดิษฐ์แก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกตนี้จะสามารถผลิตต้นแบบที่มีจุดขายที่โดดเด่น คือเป็นแก้วเซรามิกที่เตรียมด้วยเทคนิคที่ง่าย ใช้ต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถผลิตได้ในประเทศ เพื่อช่วยยกระดับคุณภาพของประชากร โดยเฉพาะกลุ่มประชากรผู้สูงอายุหรือผู้มีปัญหาทางด้านสุขภาพฟันให้มีทางเลือกในการใช้งานมากขึ้นต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียดสารเคมีที่ใช้ในการทดลองได้แสดงใน ตารางที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยชื่อสารเคมี สูตรทางเคมี มวลโมเลกุล

ตารางที่ 3.1 แสดงสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรทางเคมี
ลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium carbonate, ACS)	Li_2CO_3
ซิลิกาความบริสุทธิ์สูง 99.9% (Aldrich)	SiO_2
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide, activated, basic, Brockm)	Al_2O_3
โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate)	K_2CO_3
ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (Ammonium Phosphate, Dibasic)	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$
เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (Zirconium dioxide)	ZrO_2
ซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide)	CeO_2
เอทานอล	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$
สารเคมีอื่น ๆ	-
ผงขัดอะลูมินา 1 ไมครอน	-
ผงอะลูมินา	-

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมและวิเคราะห์

- 3.2.1 ถ้วยครุชีเบิล (Crucible)
- 3.2.2 เตาแผ่นความร้อนลองจิ้นงาน (Hot plate)
- 3.2.3 แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium Foil)
- 3.2.4 ช้อนตักสาร (Dispensing spoons)
- 3.2.5 โกร่งบดสาร (Mortar)
- 3.2.6 ปากคีบ (Forceps)
- 3.2.7 ปีกเกอร์ขนาดต่าง ๆ
- 3.2.8 เม็ดบด
- 3.2.9 กระดาษทราย
- 3.2.10 อุปกรณ์ป้องกันอันตรายจากความร้อน
- 3.2.11 ถุงมือกันความร้อน
- 3.2.12 ไม้เตา
- 3.2.13 เตาสำหรับปลูกผลึก
- 3.2.14 เตาเผาอุณหภูมิสูง สำหรับหลอมแก้ว
- 3.2.15 เครื่องชั่งระบบดิจิทัล (ความละเอียด 0.0001 กรัม)
- 3.2.16 เครื่องขัดเตรียมผิวชิ้นงานจานคู่ รุ่น Mataserv 250 ผลิตโดย BUEHLER
- 3.2.17 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์
(Differential Thermal Analysis : DTA)
- 3.2.18 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer : XRD)
- 3.2.19 เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test)
- 3.2.20 เครื่องวิเคราะห์สมบัติความดัดงอ (Bending Test)
- 3.2.21 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning
Electron Microscopy : SEM)

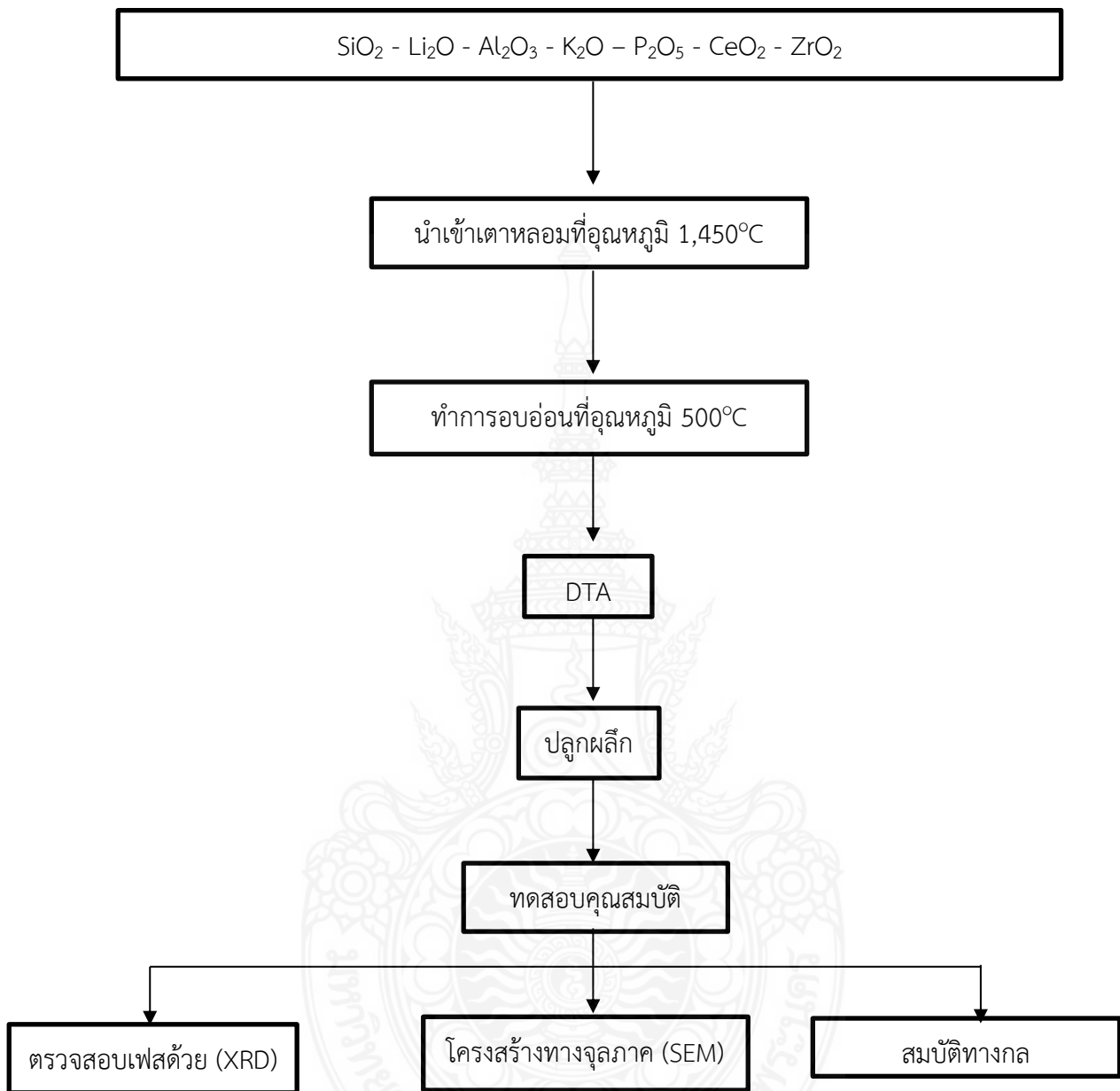
3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองนี้ขั้นตอนที่ 1 จะเป็นการเตรียมแก้วทั้งหมด 4 สูตร ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงปริมาณของสารเคมีของการเตรียมแก้ว

Condition	SiO ₂	Li ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	CeO ₂	ZrO ₂
ZrO ₂ 0wt%	72	35.5	3	3	5	1.5	0
ZrO ₂ 0.5wt%	72	35.5	3	3	5	1.5	0.5
ZrO ₂ 1wt%	72	35.5	3	3	5	1.5	1
ZrO ₂ 1.5wt%	72	35.5	3	3	5	1.5	1.5

ขั้นตอนที่ 2 จะนำแก้วเซรามิกไปทำการหลอมที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำแก้วทดลองบนเตาแผ่นความร้อนลงชิ้นงาน จากนั้นนำแก้วไปทำการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และนำแก้วเซรามิกที่ได้ไปทำการตรวจสอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ทางความร้อน (Differential Thermal Analysis : DTA) การวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบโดยอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) การวัดความแข็งไมโครวิกเกอร์ (Vickers Hardness Test) เครื่องทดสอบสมบัติความดัดงอ (Bending Test) และการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM) ขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานและการวิเคราะห์ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมแก้วเซรามิก

3.4 ตัวอย่างเครื่องมือที่เกี่ยวข้องในการเตรียมชิ้นงานและการวิเคราะห์

3.4.1 เครื่องมือในการหลอมแก้ว

เครื่องมือที่ใช้ในการหลอมแก้วมีหลายประเภท ขึ้นอยู่กับขนาดของการผลิตและประเภทของแก้วที่ต้องการผลิต โดยในงานวิจัยนี้ใช้เตาหลอมแก้วแบบเตาไฟฟ้า ซึ่งเป็นเตาหลอมที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการให้ความร้อนแทนเชื้อเพลิง โดยใช้ขดลวดความร้อน (Heating Elements) หรือตัวนำไฟฟ้าต้านทานสูงเป็นแหล่งกำเนิดความร้อน ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำ ทำให้เหมาะสำหรับการผลิตแก้วที่ต้องการคุณภาพสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องมือในการหลอมแก้ว (ก) เตาหลอม (ข) เตาอบอ่อน (ค) เตาแผ่นความร้อน

3.4.2 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential Thermal Analysis: DTA)

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของสารประกอบลิเทียมไดซิลิเกต ซึ่งมีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์หาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปลูกผลึกของลิเทียมไดซิลิเกต อีกทั้งยังเป็นการหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปลูกผลึกชิ้นงานที่มีความหนาแน่นดีที่สุด ซึ่งเทคนิคในการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermal analysis) ที่ใช้คือ เทคนิค Differential thermal analysis (DTA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมในการใช้ตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของวัสดุที่มีลักษณะเป็นผง โดยใช้เงื่อนไขในการทดสอบอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 1,200 °C เช่น การเพิ่มอุณหภูมิของสารตัวอย่างด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่แน่นอนแล้วตรวจสอบความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงที่อาจเกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของสารตัวอย่าง โดยจะปรากฏออกมาในรูปของความร้อน ถ้าอุณหภูมิของตัวอย่างต่ำกว่าสารอ้างอิงแสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน (Endothermic) แต่ถ้าอุณหภูมิของตัวอย่างสูงกว่าสารอ้างอิงแสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน (Exothermic) ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงเฟส (Phase transition) หรือการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Chemical reaction) ซึ่งในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการวิเคราะห์เพื่อประเมินค่าพารามิเตอร์ของการตกผลึกของแก้วเซรามิก เช่น อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิการตกผลึก (T_c) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

3.4.3 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction Analysis : XRD)

การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐาน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในกระบวนการควบคุมคุณภาพการผลิต ใช้สำหรับตรวจสอบสมบัติของวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตตามขั้นตอนต่าง ๆ ทฤษฎีพื้นฐานของ XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของลำรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีตกกระทบวัตถุหรืออนุภาคจะเกิดการหักเหของลำรังสีที่สะท้อนทำมุมกับระนาบของอนุภาคเท่ากับมุมของลำรังสีตกกระทบ ผลการวิเคราะห์จาก XRD ทำให้สามารถแยกแยะประเภทและชนิดของวัสดุที่พบในธรรมชาติว่ามีรูปแบบโครงสร้างผลึกแบบใด หรือจำแนกได้ว่าวัสดุที่พบเห็นนั้นเป็นแร่ชนิดใด โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร JCPDs (Joint Committee on Powder Diffraction Standard)

เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกแตกต่างกัน และระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมที่จัดเรียงกันอย่างเป็นระเบียบก็แตกต่างกันไปด้วย โดยที่ขนาดและประจุของอะตอมของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบเฉพาะตัว (XRD pattern) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.4.4 เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers Hardness Tester (HV))

เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์เป็นเครื่องมือทดสอบความแข็งที่ใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม (Diamond Pyramid Indenter) กดลงบนพื้นผิววัสดุภายใต้แรงที่กำหนดและวัดรอยกดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปคำนวณค่าความแข็ง วิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุที่มีขนาดเล็ก บาง หรือเปราะ เช่น เหล็กชุบแข็ง เซรามิก กระดาษ พลาสติกและวัสดุโลหะผสม เป็นต้น

หลักการทำงานของ Vickers Hardness Tester

1. ใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยม กดลงบนวัสดุภายใต้แรงที่กำหนด (ตั้งแต่ 1 gf ถึง 100 kgf)
2. เกิดรอยกดรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ที่มีเส้นทแยงมุมชัดเจน
3. วัดความยาวของเส้นทแยงมุม ของรอยกดผ่านกล้องจุลทรรศน์

4. คำนวณค่าความแข็ง Vickers (HV) โดยใช้สมการ:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

โดยที่ F = แรงกด (kgf)

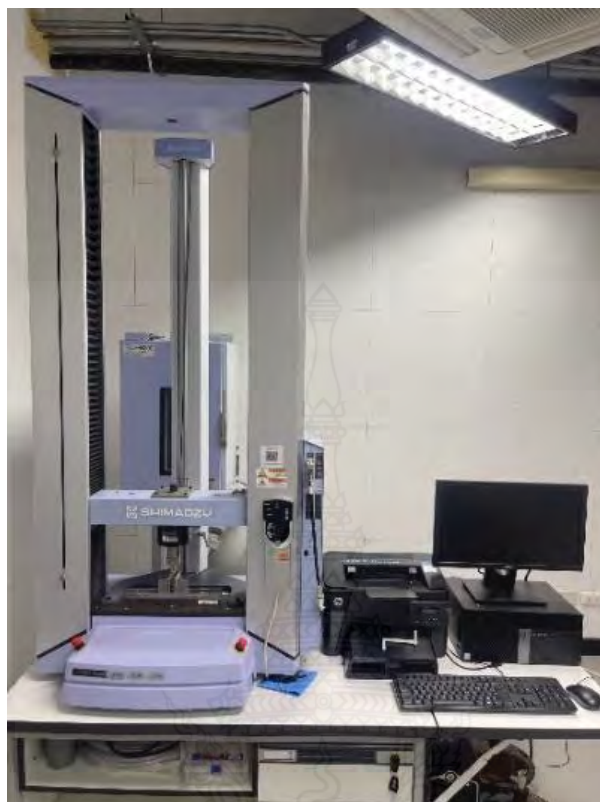
d = ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมรอยกด (mm)



รูปที่ 3.5 เครื่องมือทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์

3.4.5 เครื่องวิเคราะห์สมบัติความดัดงอ (Bending Test หรือ Flexural strength)

เป็นการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุหลังจากทำการดัดงอ โดยพิจารณาว่าที่ผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ทำการดัดงอเกิดรอยแตกขึ้นหรือไม่ หลังจากทำการดัดงอชิ้นทดสอบด้วยรัศมีความงอที่กำหนดจนได้มุมตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการทดสอบ โดยทิศทางของแรงที่ใช้ในการดัดงอต้องคงที่ และการให้แรงในการดัดงอต้องเป็นไปอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกันการเกิดการเคลื่อนที่ของชิ้นทดสอบในแนวข้าง หลังจากชิ้นทดสอบโค้งงอไปตามที่กำหนดแล้ว ทำการตรวจสอบดูว่าที่พื้นผิวด้านนอกของชิ้นทดสอบตรงบริเวณที่ดัดงอ ซึ่งจะเป็นบริเวณที่รับความเค้นแรงดึงในระหว่างการดัดงอมีรอยแตกเกิดขึ้นหรือไม่ ผลลัพธ์ที่ได้จะออกมาในเชิงปริมาณ คือ ได้ค่าสมบัติเชิงกลออกมาเป็นตัวเลข เช่น ค่าความแข็งความเค้นจุดคราก เครื่องวิเคราะห์สมบัติความดัดงอแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์สมบัติความดัดงอ

3.4.6 เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนในการสร้างภาพพื้นผิวของตัวอย่างที่ความละเอียดสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope) หลายพันเท่า โดยสามารถขยายได้ตั้งแต่ $10\times$ ถึง $1,000,000\times$ และสามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของวัสดุได้อย่างละเอียด เป็นการสร้างภาพโดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษา สัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง นิยมนำมาตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง นอกจากนั้นแล้วยังมี Energy Dispersive Spectrometry (EDS) เครื่องตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ใน SEM ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้อีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy : SEM)



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการวิจัยและอภิปรายผลจากการศึกษาแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกต ที่ทำการสังเคราะห์ขึ้น โดยส่วนแรกจะเป็นการเตรียมแก้วเซรามิกระบบลิเทียมไดซิลิเกตที่มีการเติมปริมาณ ZrO_2 ที่แตกต่างกันด้วยกระบวนการหลอมแบบดั้งเดิมต่อสมบัติต่าง ๆ ของแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมซิลิเกต รวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างทางจุลภาค และองค์ประกอบต่าง ๆ ของเฟสแก้ว โดยทำการหลอมเพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารออกไซด์ คือ (ZrO_2) ที่แตกต่างกัน โดยแบ่งการเตรียมเป็น 4 ส่วน คือ ZrO_2 0wt%, ZrO_2 0.5wt%, ZrO_2 1wt% และ ZrO_2 1.5wt% ตามลำดับ และในส่วนที่สองจะเป็นการศึกษาแก้วระบบลิเทียมไดซิลิเกตที่มีการให้เงื่อนไขการให้ความร้อนที่แตกต่างกันต่อสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ โครงสร้างผลึก สมบัติทางความร้อน รวมไปถึงสมบัติทางกลที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานโดยมีรายละเอียดผลของการวิจัยดังนี้

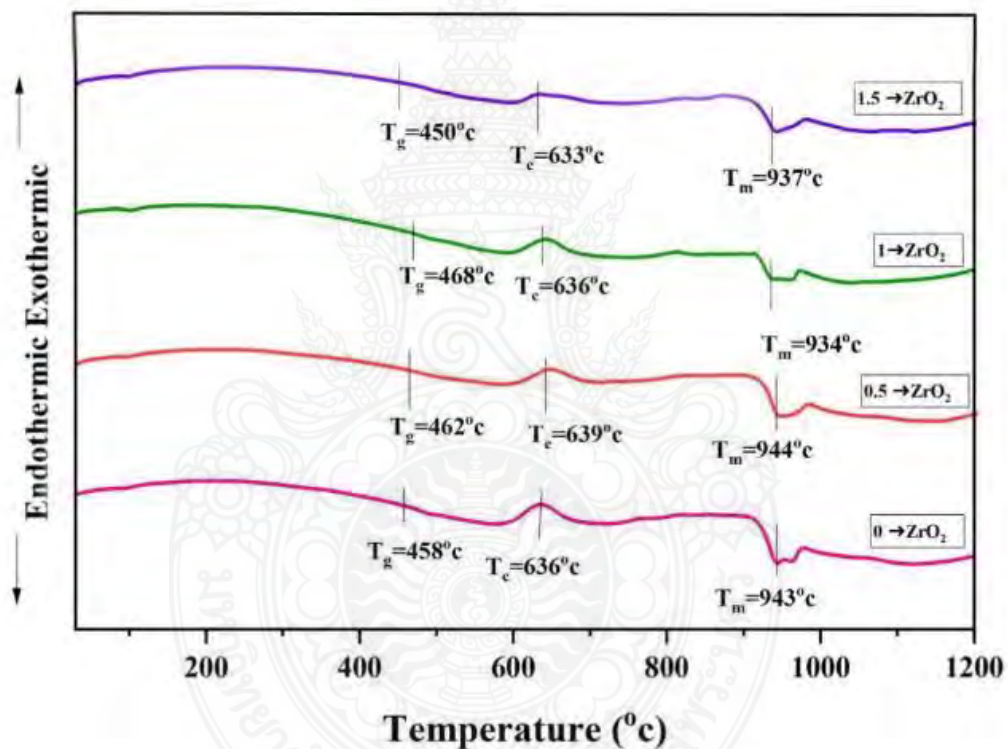
4.1 แก้วเซรามิกที่มีการเติมปริมาณของเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน

4.1.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนด้วยเทคนิค DTA

ในการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกต เริ่มจากการหลอมแก้วตามสูตร ทั้ง 4 สูตร โดยทำการหลอมแก้วที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการให้ความร้อน (Heat treatment) จากนั้นนำแก้วที่ได้ไปทำการบดให้เป็นผงเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง (Differential thermal analysis : DTA) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมแก้วเซรามิกชนิดลิเทียม-ไดซิลิเกตสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรม

จากการวิเคราะห์เชิงความร้อนของแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกตโดยใช้เทคนิค DTA โดยมีเงื่อนไขอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาทีก โดยการใช้ผงอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นตัวเปรียบเทียบมาตรฐานดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงความร้อนทั้งการดูดความร้อนและการคายความร้อน โดยพบว่ามีช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบการดูดความร้อนอยู่ในช่วง 450-468 องศาเซลเซียส ซึ่งจุดยอดนี้แสดงถึง

อุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงเฟสของแก้ว (Glass Transformation: T_g) อยู่ระหว่าง 450-468 องศาเซลเซียส และพบช่วงการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการตกผลึก (Crystallization: T_c) อยู่ระหว่าง 633-639 องศาเซลเซียส พบว่า มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงของเฟสแก้วและอุณหภูมิการเกิดผลึก มีแนวโน้มลดลงและเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เติมสาร ZrO_2 เข้าไป ดังสรุปได้ตามตารางที่ 4.1 สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นอาจเป็นผลมาจาก ZrO_2 แสดงถึงพฤติกรรมของรีฟลักซ์ในการลดอุณหภูมิ ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ ZrO_2 ที่ใส่เข้าไปดังนั้นอุณหภูมิในการเกิดผลึก จึงมีแนวโน้มลดลงด้วยตามลำดับ



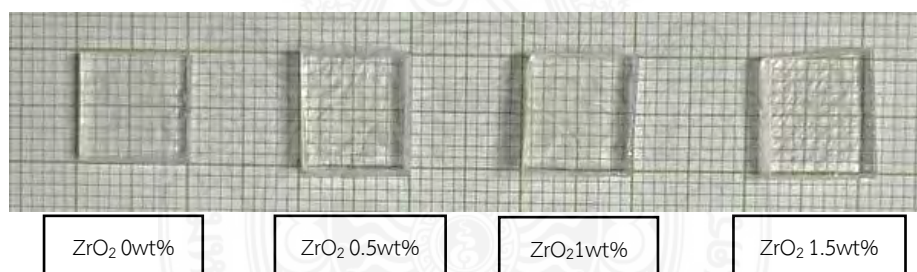
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA ของแก้วที่ผ่านการหลอมด้วยเงื่อนไขต่าง ๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงตัวแปรทางความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DTA

Condition	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$T_m(^{\circ}\text{C})$	Area
ZrO ₂ 0wt%	458	636	943	14.02
ZrO ₂ 0.5wt%	462	639	944	91.92
ZrO ₂ 1wt%	468	636	934	16.83
ZrO ₂ 1.5wt%	450	633	937	78.80

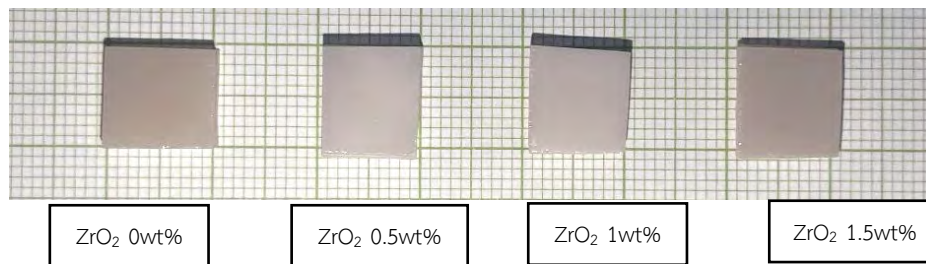
จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA สามารถสรุปผลการเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากตารางแสดงข้อมูลที่ได้จากกราฟ DTA จะเห็นได้ว่า ช่วงอุณหภูมิในการเกิดผลึกอยู่ในช่วงระหว่างอุณหภูมิ 633-639 องศาเซลเซียส ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการเลือกอุณหภูมิในการปลูกผลึกที่เหมาะสมคือ นั่นคือทำการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เนื่องจากที่อุณหภูมินี้เป็นอุณหภูมิที่เชื่อได้ว่าจะเกิดผลึกที่สมบูรณ์ที่สุดทั้งสี่เงื่อนไขนั่นเอง

4.1.2 ผลของการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานด้านสี ก่อนและหลังการปลูกผลึก



รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของแก้วที่มีปริมาณการเติม ZrO₂ ที่แตกต่างกัน ก่อนการปลูกผลึก

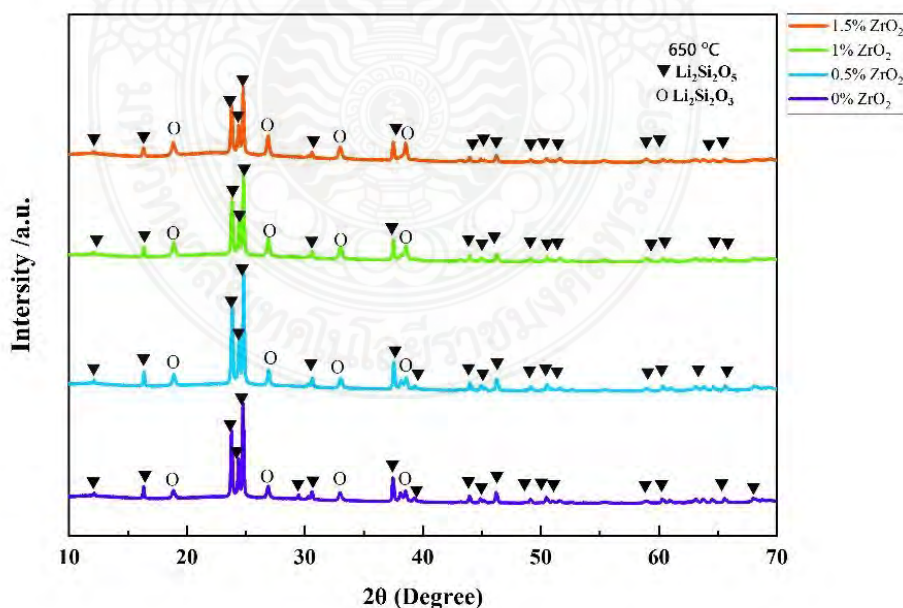
จากการเตรียมชิ้นงานด้วยวิธีการหลอมแก้วแบบดั้งเดิมพบว่า ลักษณะของชิ้นงานแก้วทั้ง 4 สูตร คือ ZrO₂ 0wt%, ZrO₂ 0.5wt%, ZrO₂ 1wt% และ ZrO₂ 1.5wt% ที่เงื่อนไขแตกต่างกัน เมื่อนำไปหลอมที่อุณหภูมิ 1,450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำแก้วที่ได้ไปทำการอบอ่อน (Annealing) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อัตราการขึ้นลง 2 องศาเซลเซียส/นาที พบว่า ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะโปร่งใส แวววาว ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเติมปริมาณสาร ZrO₂ ลงไป ดังที่แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของแก้วที่มีปริมาณการเติม ZrO_2 ที่แตกต่างกัน หลังการปลุกผลึก

หลังจากทำการปลุกผลึกที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานที่ได้มีสีที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 นั่นคือ ชิ้นงานที่เติมเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ปริมาณร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก มีสีออกเหลือง และเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีการเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ปริมาณมากขึ้น สีที่ได้เปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่นและมีความขุ่นมากที่สุดจนออกสีเหลืองน้ำตาลที่ชิ้นงานที่มีการเติมปริมาณเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเป็นผลมาจากการเกิดผลึกขึ้นภายในโครงสร้างของชิ้นงานแก้ว โดยสีที่ต่างกันเป็นผลมาจากปริมาณผลึกและชนิดของผลึกที่เกิดขึ้นในแต่ละเงื่อนไข ซึ่งต้องพิจารณาผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบต่อไป

4.1.3 ผลการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิค XRD



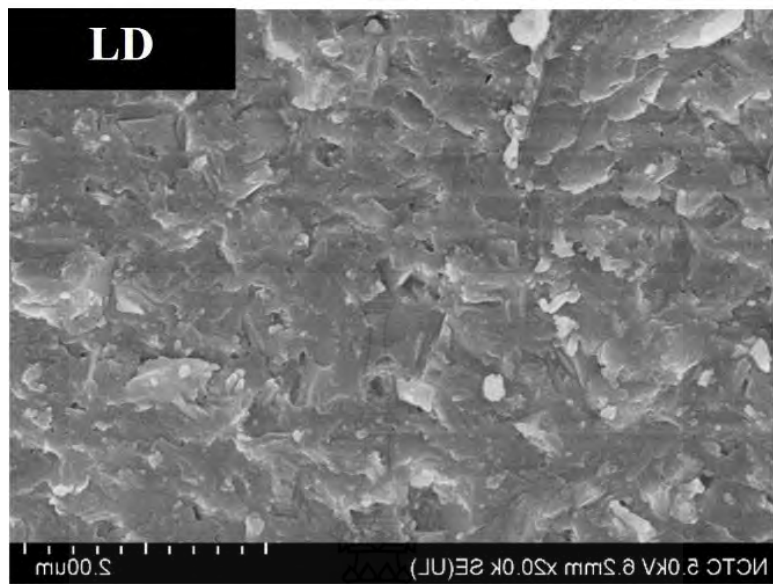
รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแก้วเซรามิกที่มีการเติมปริมาณ ZrO_2 ที่ปริมาณแตกต่างกัน

หลังผ่านการปลุกผลึกที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

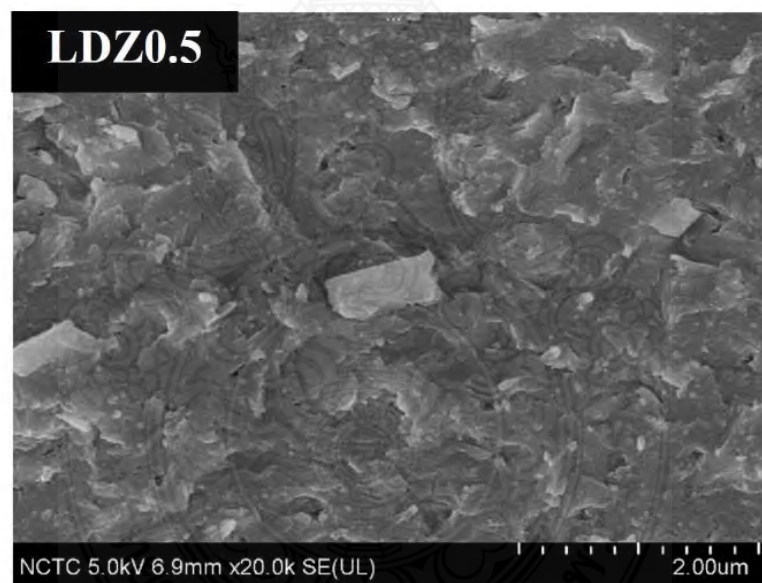
จากรูปที่ 4.4 แสดงเฟสองค์ประกอบหลังผ่านการปลูกผลึกในช่วงอุณหภูมิของการเกิดผลึก ซึ่งเลือกที่ 650 องศาเซลเซียส พบว่า ผลของการตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ แก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกต เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีเฟสองค์ประกอบหลักที่เกิดขึ้น คือ ลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) และเฟสรองคือ $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_3$ โดยทุกเงื่อนไขจะมีลักษณะการเกิดโครงสร้างที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่ม ZrO_2 มากขึ้น จะพบปริมาณของเฟส $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงการเติม ZrO_2 ที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ ZrO_2 ที่ร้อยละ 1.0 ไปจนถึงร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ผลที่ได้ พบว่า เฟสองค์ประกอบหลักของลิเทียมไดซิลิเกตมีแนวโน้มลดลงในขณะที่เฟสขององค์ประกอบรองยังมีปริมาณ ไม่เปลี่ยนแปลง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะเป็นผลมาจากการเลือกอุณหภูมิในการเกิดผลึก ดังพิจารณาได้จากกราฟ การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค DTA ตามรูปที่ 4.1 เนื่องจากในงานวิจัยนี้อุณหภูมิที่เลือกคือ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเกิดผลึกที่ตัวอย่างการเติม ZrO_2 ที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เงื่อนไขอื่นนั้นอุณหภูมิในการเกิดผลึกจะต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จึงเป็นไปได้ว่าผลึก ลิเทียมไดซิลิเกตจึงอาจจะเกิดไม่สมบูรณ์เท่า ทำให้เมื่อพิจารณาผลเฟสองค์ประกอบที่ได้จึงมีแนวโน้มของเฟส ดังกล่าวน้อยลงนั่นเอง

4.1.4 ผลของการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM)

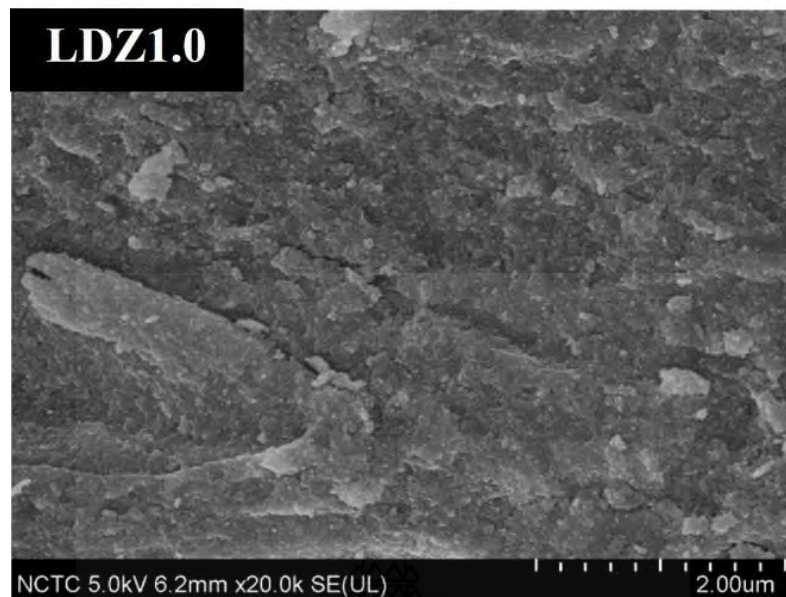
โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วเซรามิกหลังผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและผ่านการกัดกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร เป็นเวลา 30 วินาที แสดงดังรูป 4.5 แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวของตัวอย่างทั้งหมดมีการก่อตัวของเฟสลิเทียมไดซิลิเกต (LD) ที่มีลักษณะ คล้ายแท่ง ซึ่งกระจายแบบสุ่ม โดยขนาดของผลึกที่เงื่อนไขการเติม ZrO_2 ที่ร้อยละ 0 และร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก มีขนาดผลึกค่อนข้างใหญ่ แต่เมื่อมีการเติมปริมาณของ ZrO_2 ที่ร้อยละ 1.0 และร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ผลึก LD ที่เป็นผลึกหลักนี้มีปริมาณลดลง และมีลักษณะรูปร่างของผลึกค่อย ๆ เปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งมีลักษณะคล้ายแท่ง เปลี่ยนรูปไปเป็นทรงกลม มน ซึ่งเป็นรูปร่างของผลึกชนิดลิเทียมเมตาซิลิเกต (LM) ส่งผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาค แบบหลายรูปแบบ (polymorphic microstructure) [19]



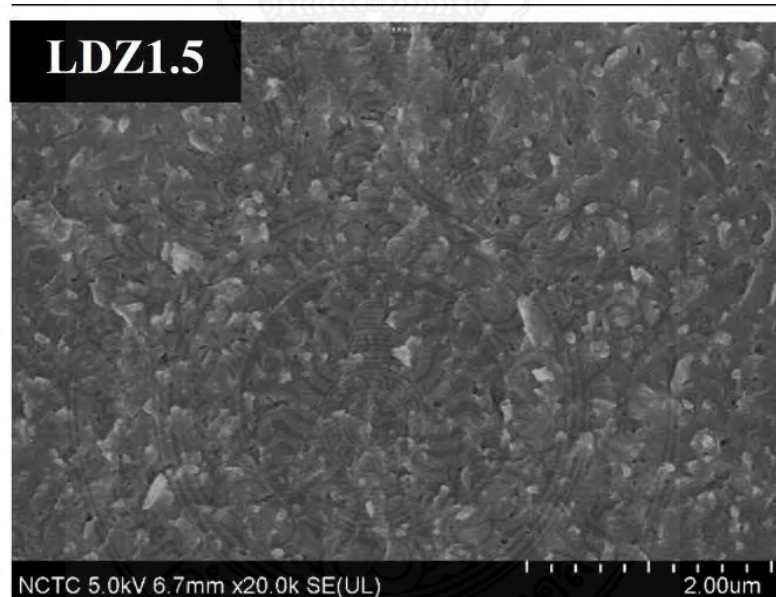
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

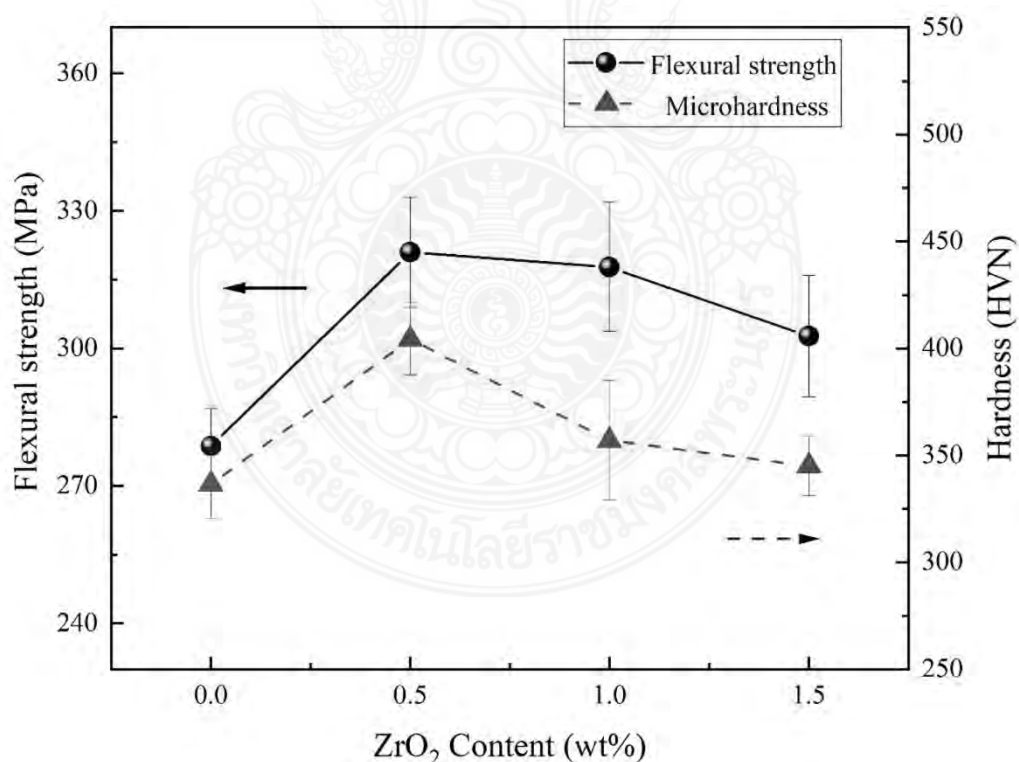
รูปที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของแก้วเซรามิกที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ

650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (ก) ZrO_2 0wt% (ข) ZrO_2 0.5wt%

(ค) ZrO_2 1wt% และ (ง) ZrO_2 1.5wt%

4.1.5 ผลของการศึกษาสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical properties)

การเพิ่มขึ้นของสมบัติทางกลของวัสดุแก้วเซรามิกนั้น ส่วนใหญ่แล้วเป็นผลมาจากการมีความพรุนต่ำภายใน โครงสร้างฐานวิทยาที่เหมาะสมของผลึกที่ปรากฏ รวมไปถึงปริมาณของความเป็นผลึกที่มากขึ้น รูปที่ 4.6 แสดง ค่าความแข็งแรงและความต้านทานแรงดัดงอของตัวอย่างแก้วเซรามิกที่มีการเติม ZrO_2 ที่ปริมาณแตกต่างกัน ตัวอย่าง แก้วเซรามิกแสดงค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์และความต้านทานแรงดัดสูงสุดเมื่อมีการเติมใช้ ZrO_2 ที่ความเข้มข้น ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ ZrO_2 เป็นร้อยละ 1.5 % โดยน้ำหนัก พบว่าความสมบัติ ทางกลมีแนวโน้มลดลง คำอธิบายที่เป็นไปได้ประการหนึ่งก็คือ ตัวอย่าง LDZ 0.5 มีเฟสผลึกสูงสุดของ LD ที่มีลักษณะคล้ายแท่ง ซึ่งส่งผลให้เกิดโครงสร้างจุลภาคที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการแตกหักภายในตัวอย่าง นอกจากนี้ความหนาแน่นของผลึกลดลงตามการเพิ่มขึ้นของ ZrO_2 ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนืดและปริมาณของ เฟสอสัณฐาน ซึ่งสมบัติเชิงกลที่ได้นี้เป็นอิทธิพลจากการขัดขวางการก่อตัวของเฟส LD และการก่อตัวของเฟส LM ซึ่งเป็นผลมาจากการเติม ZrO_2 [19]



รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงและสมบัติการต้านทานการดัดงอของชิ้นงานที่ผ่านการปลูกผลึกที่อุณหภูมิ 650

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ความต้านทานแรงดัดงอและค่าความแข็งของวิกเกอร์จากวัสดุแก้วเซรามิกที่มีจำหน่ายในท้องตลาดและการศึกษาวิจัยอื่น ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งเปรียบเทียบกับค่าสูงสุดที่ได้รับในการศึกษาปัจจุบัน ความต้านทานแรงดัดงอและค่าความแข็งของวิกเกอร์ของแก้วเซรามิกอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้ ค่าความต้านทานแรงดัดงอของเรายังเทียบได้กับค่าของวัสดุที่มีจำหน่ายทั่วไป แม้ว่าค่าความแข็งวิกเกอร์จะค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าสมบัติการดัดงอและค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ของชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับวัสดุแก้วเซรามิกทางทันตกรรมทางการค้าและงานวิจัยอื่น ๆ

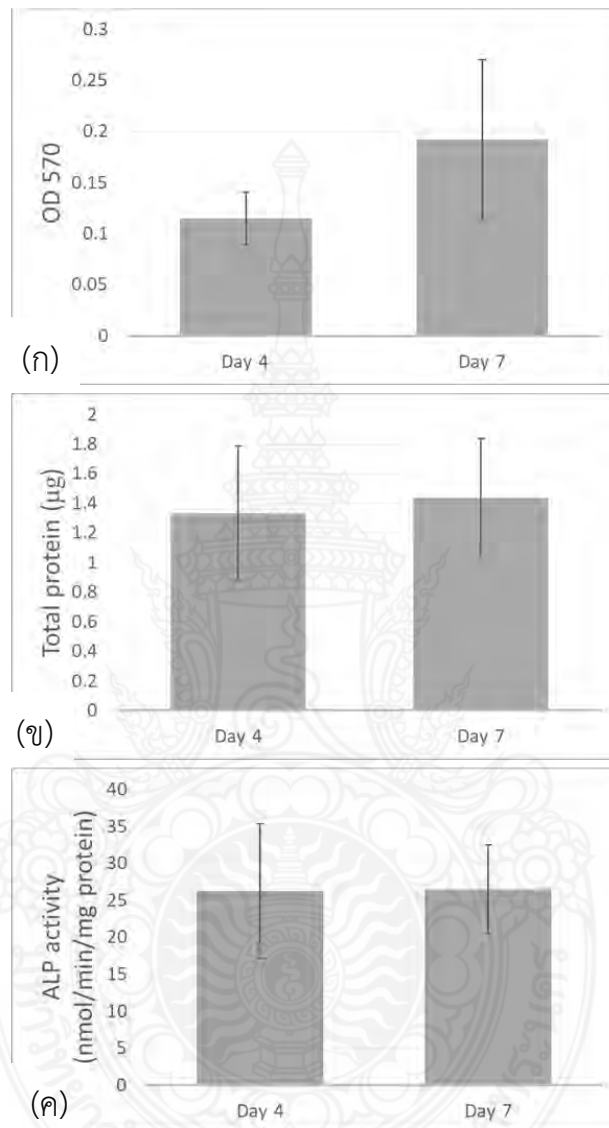
ชิ้นงาน	ค่าสมบัติการดัดงอ (Flexural strength (MPa))	ค่าสมบัติการทดสอบ ความแข็งแบบ (Vickers hardness (HVN))
Fluormica [2,20]	90-150	408-663
Leucite [2, 20]	80-160	663
Lithium silicate [2,11,20]	288-460	408-663
Zirconia reinforced lithium silicate [2, 21]	444 ± 39	663
This study	325	390

4.6 การทดสอบความเข้ากันได้ของเซลล์ (Cellular compatibility test)

เนื่องจากค่าที่ดีที่สุดของผลการทดสอบทางกายภาพและทางกลได้มาจากชิ้นงานที่มีการเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์ที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ทางคณะผู้วิจัยจึงได้เลือกชิ้นงานดังกล่าวมาทำการทดสอบสมบัติทางชีวภาพหรือความเข้ากันได้ของเซลล์ จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงาน LDZ0.5 ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อเซลล์ MG63 ถึงแม้ว่าผลการทดสอบ MTT assay ระหว่างวันที่ 4 และวันที่ 7 จะไม่มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p = 0.055$) (รูปที่ 4.7 (ก)) แต่เป็นที่สังเกตว่าแนวโน้มของการมีชีวิตของเซลล์เพิ่มขึ้นจากวันที่ 4 ไปถึงวันที่ 7

ในทำนองเดียวกัน LDZ0.5 ไม่ได้กระตุ้นการผลิตโปรตีน (รูปที่ 4.7 (ข)) และไม่เพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์อัลคาไลน์ฟอสฟาเตส (ALP) (รูปที่ 4.7 (ค)) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของกระบวนการสร้างกระดูก ผลลัพธ์เหล่านี้สามารถยืนยันได้ว่า LDZ0.5 มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเซลล์ อย่างไรก็ตาม มันไม่มีผลกระตุ้นกระบวนการ

สร้างกระดูก เช่นเดียวกับวัสดุเฉื่อยทางชีวภาพอื่น ๆ ที่ใช้เป็นวัสดุอุดฟันทางทันตกรรม เช่น อมัลกัม เซอร์โคเนีย และวัสดุผสมระหว่างเซรามิกกับพลาสติก [21-22]



รูปที่ 4.7 การทดสอบในหลอดทดลอง (In vitro) เพื่อประเมินความเข้ากันได้ทางชีวภาพของ ZrO_2 0.5 wt%

ใน $\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (LDZ0.5) กับเซลล์ MG63 เป็นระยะเวลา 4 วัน (Day 4) และ 7 วัน (Day 7)

(ก) ความมีชีวิตของเซลล์ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับ LDZ0.5 ประเมินโดยการทดสอบ MTT assay

(ข) ปริมาณโปรตีนทั้งหมดของเซลล์ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับ LDZ0.5 ประเมินโดย Bradford assay

(ค) กิจกรรมของเอนไซม์อัลคาไลน์ฟอสฟาเตส (ALP) ของเซลล์ที่เพาะเลี้ยงร่วมกับ LDZ0.5 ประเมินโดยการทดสอบ p-nitrophenolphosphate conversion assay

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาแก้วเซรามิกทางทันตกรรมระบบลิเทียมและซิลิกา โดยจะทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติทางกล สมบัติทางกายภาพของระบบแก้ว โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบผลการเติม ZrO_2 ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของระบบแก้ว $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-CeO}_2$ ที่ปริมาณการเจือที่แตกต่างกันสี่เงื่อนไข ได้แก่ 0, 0.5, 1.0 และ 1.5 ร้อยละโดยน้ำหนัก องค์ประกอบเฟสที่เกิดขึ้นรวมไปถึงปริมาณความเป็นผลึกเป็นผลมาจากการเติมเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังเป็นผลมาจากการเลือกอุณหภูมิในการเกิดผลึกด้วยเช่นกัน โดยที่การเลือกอุณหภูมิการเกิดผลึกที่เหมาะสมที่ 650 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดเฟสองค์ประกอบที่ต้องการ ได้แก่ เฟสของลิเทียมไดซิลิเกตปริมาณที่สูง ส่งผลต่อการเกิดสมบัติทางกลที่สำคัญ เนื่องจากชนิดผลึกที่มีลักษณะคล้ายแท่ง (Rod-like structure) เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงของชิ้นงาน ชัดขวางการแตกหัก และชิ้นงานที่ได้มีสมบัติทางกลใกล้เคียงกับชิ้นงานที่จำหน่ายในท้องตลาด นอกไปจากนั้นเมื่อทำการทดสอบสมบัติทางชีวภาพด้านความเป็นพิษยังพบว่า ชิ้นงานที่มีการเติมเซอร์โคเนียมออกไซด์แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์อีกด้วย

บรรณานุกรม

- [1] Doremus, R. H. (1994). Glass science. John Wiley & Sons Inc.
- [2] Shelby, J. E. (1997). Introduction to glass science and technology. The Royal Society of Chemistry.
- [3] Holland, D. (1995). Hand out in Physical methods of materials characterisation. Physics department, Warwick University.
- [4] กมลพรรณ เฟื่องพัฑ. (2561). แก้วและการประยุกต์. เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [5] ณัฐพล เล่าห์รอดพันธุ์. (2558). อุตสาหกรรมการผลิตแก้ว. เชียงใหม่ : คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [6] สุคนธ์ทิพย์ อาวีชนาการ. (2008). ว.ทันต. ปีที่ 58 ฉบับที่ 4 ต.ค.-ธ.ค. 2551.
- [7] Beall, G. H. (1992). Annu. Rev. Mater. Sci., 22, 212.
- [8] Holland, D. (1995). Hand out in Physical methods of materials characterisation. Physics department, Warwick University.
- [9] Zhang, P., Li, X., Yang, J., & Xu, S. (2014). Journal of Non-Crystalline Solids, 402, 101.
- [10] Zheng, X., Wen, G., & Song, L. (2008). Acta Materialia, 56, 549.
- [11] Höland, W., Rheinberger, V., Apel, E., van 't Hoen, C., Höland, M., Dommann, A., Obrecht, M., Mauth, C., & Graf-Hausner, U. (2006). Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 17, 1037–1042.
- [12] Bai, Y., Peng, L., & Zhu, Q. (2017). Journal of Non-Crystalline Solids, 457, 129.
- [13] Monmaturapoj, N., Lawita, P., & Thepsuwan, W. (2013). Characterisation and properties of lithium disilicate glass ceramic in the $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O-K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3$ system for dental application. National Metal and Materials Technology Center, Thailand Science Park, 2–9.

- [14] Höland, W., Apel, E., Hoen, C., & Rheinberger, V. (2006). *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352, 4041.
- [15] Chamer, C. S., & Schweiger, H. (2000). *Journal of Non-Crystalline Solids*, 263-264, 88.
- [16] Wen, G., Zheng, X., & Song, L. (2007). *Acta Materialia*, 55, 3583–3591.
- [17] Wang, F., Gao, J., Wang, H., & Chen, J. (2010). *Materials and Design*, 31, 3270.
- [18] Höland, W., Rheinberger, V., Apel, E., van 't Hoen, C., Höland, M., Dommann, A., Obrecht, M., Mauth, C., & Graf-Hausner, U. (2006). *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 17, 1037–1042.
- [19] Satyanarayana, P., Deshpande, A., Deshpande, V., & Singh, S. (2023). Influence of ZrO_2 and P_2O_5 addition on phase formation, optical transmittance, and microhardness in lithium disilicate-based glass-ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 600, 122023.
- [20] Denry, I., & Holloway, J. A. (2010). Ceramics for dental applications: A review. *Materials*, 3(1), 351–368. <https://doi.org/10.3390/ma3010351>
- [21] Elsaka, S. E., & Elnaghy, A. M. (2016). Mechanical properties of zirconia reinforced lithium silicate glass-ceramic. *Dental Materials*, 32, 908–914. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.03.013>
- [22] Beall, G. H. (1993). Glass-ceramics: Recent developments and applications in nucleation and crystallization in glasses and liquids. *American Ceramic Society*, 30, 241–266.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ข้อมูลหัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): รองศาสตราจารย์ ดร.วิไลวรรณ ลีณะกุล.....
 ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Associate Professor Dr. Wilaiwan Leenakul.....

2. หน่วยงาน หมายเลขโทรศัพท์มือถือ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.....
- หมายเลขโทรศัพท์: 0 2836 3000.....
- หมายเลขโทรศัพท์มือถือ: 08 9266 2485.....
- E-mail: wilaiwan.l@rmutp.ac.th.....

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาเอก	วท.ด. วัสดุศาสตร์ (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)	2556
ปริญญาโท	วศ.ม. วิศวกรรมพลังงาน (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)	2552
ปริญญาตรี	วท.บ. วัสดุศาสตร์ (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)	2550

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

- ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	Investigation of phase formation and mechanical properties of lithium disilicate glass-ceramic doped CeO ₂ , Journal of Non-Crystalline Solids	Journal of Non-Crystalline Solids	นานาชาติ	2022
2	Influence of heat treatment temperature on the properties of the lithium disilicate-fluorcanasite glass-ceramics	INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED CERAMIC TECHNOLOGY	นานาชาติ	2021
3	Effect of increasing the Al ₂ O ₃ content on the phase formation	Materials Research Express	นานาชาติ	2021

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
	and mechanical properties of lithium disilicate glass-ceramics			
4	, Effect of PEG-based binder concentration on the mechanical properties of lithium disilicate glass-ceramics prepared by low-pressure injection moulding	Processing and Application of Ceramics	นานาชาติ	2021
5	Phase Formation Study of BaFe ₁₂ O ₁₉ in Bioactive Glass by Modified Processing Technique	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	นานาชาติ	2020
6	Effect of Heat Treatment Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of Li ² O-SiO ₂ -P ² O ₅ -Al ² O ₃ -K ² O-CaO Glass-Ceramics	Science of Advanced Materials	นานาชาติ	2018
7	Effect of Heat Treatment Temperature Variations on the Structure and Mechanical Strength of Lithium Disilicate-Based Glass-Ceramics	JOURNAL OF BIOMATERIALS AND TISSUE ENGINEERING	นานาชาติ	2018
8	Fabrication and characterization of BNLT-BHF lead-free ceramics	Ferroelectrics	นานาชาติ	2017
9	Synthesis, structural and electrical properties of granular BT-NZF nanocrystals in silicate glass	Ceramics International	นานาชาติ	2017
10	Fabrication and characterization of BaTiO ₃ -Ni _{0.8} Zn _{0.2} Fe ₂ O ₄ -B ₂ O ₃ -Na ₂ O-SiO ₂ multiferroic glass ceramics	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	นานาชาติ	2016
11	Effect of sintering temperature variations on fabrication of 45S5 bioactive glass-ceramics using rice husk as a source for silica	MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING C-MATERIALS FOR BIOLOGICAL APPLICATIONS	นานาชาติ	2016

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
12	Fabrication of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ - P_2O_5 - CaO - Na_2O Bioactive Glass-Ceramics at Various Sintering Temperatures	Ferroelectrics	นานาชาติ	2015
13	Preparation of Ferroelectric KNbO_3 Based Borate Glass System	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	นานาชาติ	2015
14	Preparation of ferrimagnetic BF based silicate glass system	Ceramics International	นานาชาติ	2015
15	Influence of $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ on Structure, Sintering and Bioactivity Behavior in Bioactive Glass	JOURNAL OF COMPUTATIONAL AND THEORETICAL NANOSCIENCE	นานาชาติ	2015
16	Structural and magnetic properties of SiO_2 - CaO - Na_2O - P_2O_5 containing BaO - Fe_2O_3 glass ceramics	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	นานาชาติ	2013
17	Effects of Rice Husk as a Precursor on Crystallization Kinetic of 45S5 Bioactive Glass-Ceramics	Characterization and Development of Biosystems and Biomaterials Advanced Structured Materials: Springer Link	นานาชาติ	2013
18	Fabrication and characterization of ferrimagnetic bioactive glass-ceramic containing $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	Ceramics International	นานาชาติ	2013
19	Characteristics of 45S5 Bioglass-ceramics Using Natural Raw Materials	Advanced Materials Research	นานาชาติ	2012
20	Fabrication and Magnetic Properties of P_2O_5 - CaO - Na_2O Bioactive Glass Ceramic Containing $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	Integrated Ferroelectrics	นานาชาติ	2013
21	Enhanced Electrical Properties of Lead-Free Bi_2GeO_5 Ferroelectric	Ferroelectrics	นานาชาติ	2011

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
	Glass Ceramics by Thermal Annealing			

- ผลงานทรัพย์สินทางปัญญา ที่ได้รับและที่อยู่ระหว่างยื่นจด (ระบุชื่อผลงาน ประเภท และสถานะ

ลำดับ	ชื่อผลงาน	ประเภท	สถานะ	ปีที่ยื่น
1	แก้วชีวภาพจากแคลสและกระดูกสัตว์ เพื่อให้เป็นกระดูกเทียม	สิทธิบัตร	เผยแพร่	2554

5. ระบุประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อโครงการ / แผนงาน	ปีงบประมาณ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	หน้าที่ความรับผิดชอบ (หัวหน้าโครงการ/ผู้ร่วมวิจัย)
1	การเพิ่มมูลค่าของเหลือใช้ทางการเกษตรจากแคลสข้าวและกระดูกสัตว์เพื่อผลิตเป็นแก้วคริสตัลสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี	2564	กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กสว.)	547,500	หัวหน้าโครงการ
2	การพัฒนาคุณสมบัติของเซรามิกครอบฟันชนิดลิเทียมไดซิลิเกตตามมาตรฐานการค้าสำหรับใช้งานในทางทันตกรรม	2564	เทคโนโลยีเพื่ออุตสาหกรรมด้านวัสดุ นาโนและนาโนเทคโนโลยี ปี 2564	587,000	หัวหน้าโครงการ
3	การผลิตแก้วคริสตัลสีจากของเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องประดับ	2563	กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กสว.)	500,000	หัวหน้าโครงการ
4	การสังเคราะห์และพัฒนาแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกตสำหรับประยุกต์ใช้ในทางทันตกรรม โดยใช้เทคโนโลยีการพิมพ์แบบสามมิติ	2562	งบบูรณาการวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	1,300,000	หัวหน้าโครงการ
5	การประดิษฐ์เซรามิกเฟรโร-อิเล็กทริกไร้ตะกั่วในระบบ	2561	ทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี	381,600	หัวหน้าโครงการ

ลำดับ	ชื่อโครงการ / แผนงาน	ปีงบประมาณ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	หน้าที่ความรับผิดชอบ (หัวหน้าโครงการ/ผู้ร่วมวิจัย)
	ปิสัมทโซเดียมโพแทสเซียมไททาเนตเป็นองค์ประกอบหลัก		2561 (งบบูรณาการวิจัยและนวัตกรรม)		
6	การประดิษฐ์แก้วเซรามิกเฟอร์โรอิเล็กทริกไร้ตะกั่วในระบบลิเทียมไนโอเบตและโพแทสเซียมโซเดียมไนโอเบตเป็นองค์ประกอบหลักด้วยวิธีอินคอปอเรชัน	2561	ทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2561 (งบบูรณาการวิจัยและนวัตกรรม)	381,500	หัวหน้าโครงการ
	ทุนส่งเสริมพัฒนาศักยภาพอาจารย์รุ่นใหม่ ปี 2559 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เรื่อง การศึกษาจลศาสตร์ของแก้วและการแปลงเฟสแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยเฟอร์โร/เฟอร์รีแมกเนติกคริสตัลระดับนาโนโดยกระบวนการวิธีโมดิฟายด์อินคอปอเรชัน Crystallization Kinetic and Phase Formation Studies of Ferro/ferrimagnetic Nano-Crystals in Bioactive Glasses by Modified Incorporation Method	2560	สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) เดิม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)	600,000	หัวหน้าโครงการ
	การศึกษาแก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยผลึกเฟอร์โรแมกเนติกระดับนาโนจากระบบที่มีและไม่มี ซิลิกาเป็นองค์ประกอบด้วยวิธีอินคอปอเรชัน	2559	ทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2559 (เป้าหมาย 2)	451,800	หัวหน้าโครงการ

ลำดับ	ชื่อโครงการ / แผนงาน	ปีงบประมาณ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	หน้าที่ความ รับผิดชอบ (หัวหน้า โครงการ/ผู้ ร่วมวิจัย)
	ทุนส่งเสริมนักวิจัยรุ่นใหม่ ปี 2557 สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เรื่อง การประดิษฐ์แก้วเซรามิกชีวภาพที่ประกอบด้วยเฟอร์ไรต์/ เฟอร์แมกเนติกคริสตัลระดับนาโน Fabrication of bioactive glass-ceramics containing ferro/ferrimagnetic nanocrystals	2557	สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) เดิม สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)	480,000	หัวหน้าโครงการ



ข้อมูลผู้ร่วมวิจัยคนที่ 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): ..นางธนาพร บุญชู.....

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ):..Thanaporn Boonchoo.....

2. หน่วยงาน หมายเลขโทรศัพท์มือถือ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.....

- หมายเลขโทรศัพท์มือถือ: 08 6514 4625.....

- E-mail:thanaporn.b@rmutp.ac.th.....

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาโท	วท.ม. เคมี (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)	2545
ปริญญาตรี	วท.บ. เคมี (มหาวิทยาลัยศิลปากร)	2536

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

- ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	Fabrication and characterization of BNLT-BHF lead-free ceramics	Ferroelectrics	นานาชาติ	2560
2	Effect of MnFe_2O_4 and the heat treatment temperature on the Bioactive Glass Properties	Key Engineering Materials	นานาชาติ	2559
3	Effect of Welding on Hardness and Deformation Behavior of Polypropylene by Scratch Test	Applied Mechanics and Materials	นานาชาติ	2559
4	Protonation and Energetical Investigations of Calix [4]-cyclen-benzo-crown-6 and Its Complexes with Zinc and Copper	Bulletin of the Korean Chemical Society	นานาชาติ	2547

5. ระบุประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อโครงการ / แผนงาน	ปีงบประมาณ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	หน้าที่ความรับผิดชอบ (หัวหน้าโครงการ/ผู้ร่วมวิจัย)
1	การเพิ่มมูลค่าของเหลือใช้ทางการเกษตรจากแกลบข้าวและกระดุกสัตว์เพื่อผลิตเป็นแก้วคริสตัลสำหรับอุตสาหกรรมอัญมณี	2564	งบประมาณรายจ่ายประจำปี	547,550	ผู้ร่วมวิจัย
2	การวิจัยและพัฒนาการใช้ประโยชน์จากของเหลือทิ้งทางการเกษตร; แกลบและฟางข้าว	2564	งบประมาณรายจ่ายประจำปี	200,000	ผู้ร่วมวิจัย

ข้อมูลผู้ร่วมวิจัยคนที่ 2

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมเดช พลเยี่ยม.....

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Asst.Prof.Dr.Udomdeja Polyium.....

2. หน่วยงาน หมายเลขโทรศัพท์มือถือ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.....

- หมายเลขโทรศัพท์มือถือ: 09-3419-5919.....

- E-mail: udomdeja.p@rmutp.ac.th.....

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาเอก	ปร.ด. วิทยาศาสตร์ศึกษา(เคมี) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	2563
ปริญญาโท	วท.ม. เคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2544
ปริญญาตรี	ค.บ. เคมี สถาบันราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา	2538

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

- ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	Characterization of physical and mechanical properties of bleaching paper from rice straw	Applied Mechanics and Materials	นานาชาติ	2019
2	Fuel Briquettes from Sisal waste in Thailand	Applied Mechanics and Materials	นานาชาติ	2017

5. ระบุประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อโครงการ / แผนงาน	ปีงบประมาณ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	หน้าที่ความรับผิดชอบ (หัวหน้าโครงการ/ผู้ร่วมวิจัย)
1	การวิจัยและพัฒนานวัตกรรมสมุนไพรพื้นบ้าน และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อเพิ่มศักยภาพการ พัฒนาสมุนไพรที่ใช้เป็นอาหาร ยารักษาโรค และเครื่องสำอางในเขตจังหวัดภาคกลาง สู่การแข่งขันเชิง พาณิชย์ อย่างยั่งยืน มทร. พระนคร	2564	กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และ นวัตกรรม (กสว.)	500,000	หัวหน้าโครงการ
2	การพัฒนาระดาศและผลิตภัณฑระดาศจากเศษของปาศร นารายณของชุมชนหุบกระพง จังหวัด เพชรบุรี เพื่อส่งเสริม วิสาหกิจชุมชน มทร. พระนคร (ววน.)	2563	กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และ นวัตกรรม (กสว.)	500,000	หัวหน้าโครงการ
3	ศักยภาพของมะคูกพืชสมุนไพรพื้นบ้านของไทยในการรักษาโรค เพื่อพัฒนาองคความรุของภูมิปัญญา ท้องถิ่นไปสู่ การใช ประโยชนอยางยั่งยืน	2562	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	305,500	หัวหน้าโครงการ
4	การใช้ประโยชน์จากพืชในท้องถิ่นสำหรับการพัฒนาเป็นเครื่องดื่มสมุนไพร: กรณีศึกษาพืชในท้องถิ่น ชุมชนแพรกหนามแดง อำเภอมัวพวา จังหวัดสมุทรสงคราม เพื่อความมั่นคงด้านอาหารอยางยั่งยืน	2561	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	267,100	หัวหน้าโครงการ

ลำดับ	ชื่อโครงการ / แผนงาน	ปีงบประมาณ	แหล่งทุน	งบประมาณ (บาท)	หน้าที่ความ รับผิดชอบ (หัวหน้า โครงการ/ผู้ ร่วมวิจัย)
5	การศึกษาพฤษเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดจากมะพอกที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของวัชพืช ในนาข้าวเพื่อสนับสนุนการใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าความหลากหลายทางชีวภาพอย่างมั่นคงและยั่งยืน	2561	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	312,800	หัวหน้าโครงการ

