



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การวิจัยวัสดุฐานชีวภาพเพื่อการยกระดับเศรษฐกิจสีเขียว

Research of the Biobased Materials derived from Agriculture
to Enhance the Green Economy

โดย

ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

วิไลวรรณ สีนะกุล

วรรณช ดีละมัน

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เดือน มีนาคม ปี พ.ศ. 2566

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

ชุดโครงการวิจัยนี้มีเป้าหมายในการวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัสดุชีวภาพด้วยองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ โดยชุดโครงการนี้มี 3 โครงการวิจัยย่อยดังนี้

โครงการวิจัยย่อยที่ 1 แกรนูลคอมโพสิตโครงสร้างระดับนาโนของแคลเซียมฟอสเฟต (CP) พอลิเอทิลีนไดออกไซด์ออกซิไดซ์-พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (PEDOT:PSS) และซิงค์เฟอร์ไรต์ (ZnFe_2O_4) สามารถเตรียมได้จากกระบวนการผสมเชิงกล การอัดแกนเดี่ยว และการเผาซินเทอริงแบบปราศจากแรงดัน สันฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS- ZnFe_2O_4 มีขนาดเกรนหลักอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีโครงสร้างแบบรูพรุน และจากการปรับปรุงทั้งสมบัติแม่เหล็กของแกรนูล CP ด้วย ZnFe_2O_4 และ การปรับปรุงสมบัติไฟฟ้าของแกรนูล CP ด้วย PEDOT:PSS บ่งชี้ได้ว่าสามารถเหนี่ยวนำการยึดเกาะของเซลล์ การเพิ่มจำนวนของเซลล์ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ได้ดีขึ้น

โครงการวิจัยย่อยที่ 2 งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ซิลิกาจากซีเถ้าแอลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (Silica CP) และทำการประดิษฐ์แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเถ้าแอลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้นด้วยวิธีการหลอมแล้วตกผลึกลงในแก้วขึ้นงาน AGGC มีความโปร่งแสงเล็กน้อย และขึ้นงาน CPGC มีความทึบแสง ขึ้นงาน CPGC ที่มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าขึ้นงาน AGGC สืบเนื่องมาจาก CPGC สังเคราะห์จาก Silica CP มีความบริสุทธิ์ต่ำ ขึ้นงาน CPGC มีรูพรุนสูงและมีความเสถียรต่ำกว่าขึ้นงาน AGGC จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิกทางทันตกรรมประเภทอื่นๆ ยังสามารถเทียบเท่าได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถประดิษฐ์แก้วเซรามิกทางทันตกรรมลิเทียมไดซิลิเกต โดยใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเถ้าแอลบเป็นสารตั้งต้นได้

โครงการวิจัยย่อยที่ 3 การศึกษาการพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากวัสดุพืชเศรษฐกิจ 3 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และขุยมะพร้าว โดยผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ในอัตราส่วนสูงสุดที่ 30% พบว่าสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดไฮดรอลิก การทำแผ่นด้วยกระบวนการอบร้อนซึ่งจะได้ขนาดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ และผลจากการจำลองการรดน้ำด้วยน้ำผสมจุลินทรีย์ชีวภาพทำให้เห็นว่าแผ่นปุ๋ยการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และแผ่นปุ๋ยที่ได้จากกระบวนการอบสามารถคงสภาพได้ดีเมื่อครบ 14 วันของการทดลอง ในขณะที่แผ่นปุ๋ยแบบอัดจากเยื่อฟางข้าวนั้นมีการเสื่อมจากการพองน้ำมากที่สุดซึ่งสังเกตเห็นรอยแตกของแผ่นขึ้นงานได้ตั้งแต่วันที่ 7 ของการทดลอง

Abstract

This research project aimed to add the economical values to bio-based materials with science and technology knowledge. The project was divided into 3 sections. The abstracts for each section were:

Section 1: Nanostructured composite granules of calcium phosphate (CP), Poly(ethylene Dioxythiophene)-Poly(Styrene Sulfonate) (PEDOT:PSS) and zinc ferrite (ZnFe_2O_4) can be prepared by mechanical mixing, uniaxial pressing and normal sintering. Composite granules of CP-PEDOT-PSS- ZnFe_2O_4 revealed nanosized morphology and porous structure. Improving both the magnetic properties of CP granules with ZnFe_2O_4 and the electrical properties of CP granules with PEDOT:PSS was indicated that the enhancement of cell adhesion, growth and proliferation.

Section 2: This research involves the synthesis of silica from rice husk ash through the calcination process (Silica CP) and the fabrication of lithium disilicate glass ceramics using silica synthesized from rice husk ash through the calcination process (CPGC) and silica from analytical grade chemical (AGGC) as starting materials. The process involves melting and quenching into glass. AGGC slightly translucent and CPGC opaque. CPGC exhibited lower mechanical properties than AGGC due to its lower purity and higher porosity resulting from the synthesis of Silica CP. It had higher porosity and lower stability. Nevertheless, when comparing the mechanical properties of these dental ceramics with other types, they are still comparable. Hence, it is feasible to fabricate lithium disilicate dental ceramics using synthesized silica from rice husk ash as a starting material.

Section 3: The study examined the development and effectiveness of bio-fertilizer compressed sheets from agricultural waste materials of three economic plant sources, namely rice husks, palm fruit branch, and coconut coir, mixed with organic fertilizer at a maximum ratio of 30%. It was found that these materials could be formed into sheets using hot pressing using hydraulic press machine and hot-baking method using hot air oven, resulting in sizes close to the mold. Furthermore, simulating watering with a solution mixed with biological organisms showed physical changes in the fertilizer sheets. Those produced through the baking process remained intact after a full 14 days of the experiment. However, the rice husk-based compressed fertilizer sheets displayed the highest water absorption rate, showing visible signs of cracking by the 7th day of the experiment.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 คณะวิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมสำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและมีส่วนช่วยทำให้การดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ ต้องขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์และเครื่องมือวิจัย

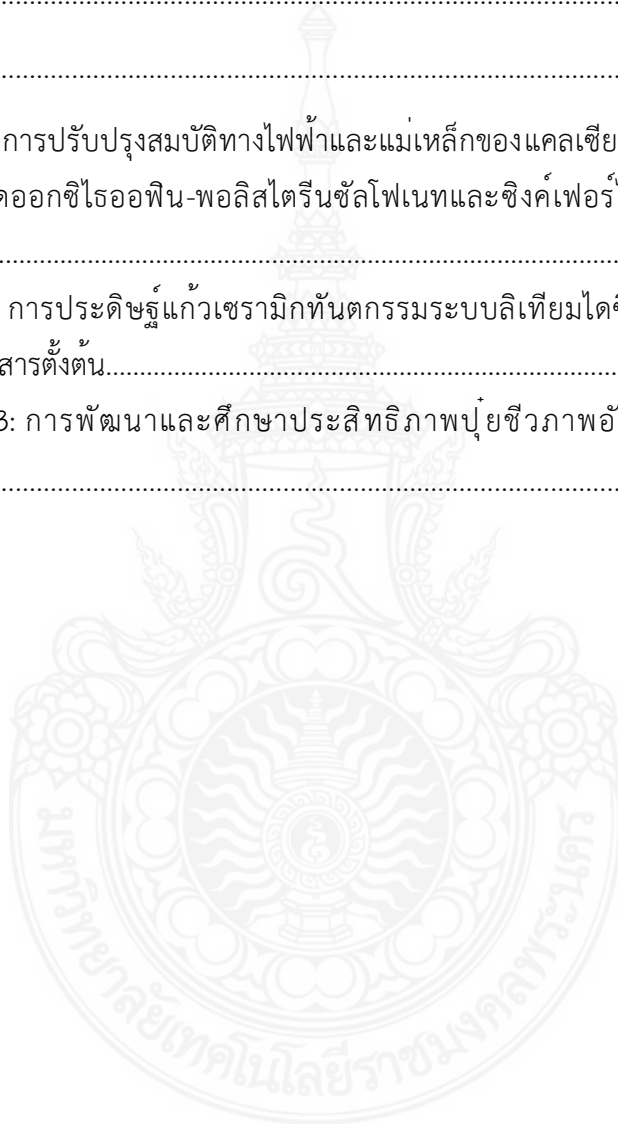
คณะวิจัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
โครงการย่อยที่ 1: การปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กของแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่ไก่ ด้วยพอลิเอทิลีนไดออกไซด์ออกซิไดซ์-พอลิสไตรีนซิลโฟเนทและซิงค์เฟอร์ไรต์เพื่อประยุกต์เป็นวัสดุ ทางการแพทย์.....	A1
โครงการย่อยที่ 2: การประดิษฐ์แก้วเซรามิกทนความร้อนระบบลิเทียมไดซิลิเกต/ลูไซต์โดยใช้ซิลิกา จากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น.....	A2
โครงการย่อยที่ 3: การพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นจากวัสดุเหลือทิ้ง ทางการเกษตร.....	A3





รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยย่อยที่ 1

การปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าและแม่เหล็กของแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือก

ไข่ไก่ด้วยพอลิเอทิลีนไดออกซิไรโออฟิน-พอลิสไตรีนซัลโฟเนท

และซิงค์เฟอร์ไรท์เพื่อประยุกต์เป็นวัสดุทางการแพทย์

Improvement of Electrical and Magnetic Properties of

Calcium Phosphate from Chicken Eggshell

with Poly(ethylene Dioxythiophene)-Poly(Styrene Sulfonate)

and Zinc Ferrite for Application as Medical Materials

โดย

ปิยะพงษ์ ปานแก้ว

อนุวัฒน์ หัสดี

สุนิศา จิตสุนทรชัยกุล

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เดือน มีนาคม ปี พ.ศ. 2566

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

ในการวิจัยนี้แกรนูลคอมโพสิตโครงสร้างระดับนาโนของแคลเซียมฟอสเฟต (CP) พอลิเอทิลีนไดออกไซด์ออกซิเจน-พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (PEDOT:PSS) และซิงค์เฟอร์ไรต์ (ZnFe_2O_4) สามารถเตรียมได้จากกระบวนการผสมเชิงกล การอัดแกนเดี่ยว และการเผาซินเทอร์ริงแบบปราศจากแรงดัน สัณฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS- ZnFe_2O_4 มีขนาดเกรนหลักอยู่ในระดับนาโนเมตร และมีโครงสร้างแบบรูพรุน และจากการปรับปรุงทั้งสมบัติแม่เหล็กของแกรนูล CP ด้วย ZnFe_2O_4 และการปรับปรุงสมบัติไฟฟ้าของแกรนูล CP ด้วย PEDOT:PSS บ่งชี้ได้ว่าแกรนูลน่าจะสามารถเหนี่ยวนำการยึดเกาะของเซลล์ การเพิ่มจำนวนของเซลล์ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ได้ดีขึ้น

คำสำคัญ: แคลเซียมฟอสเฟต, เปลือกไข่, วัสดุทางการแพทย์



Abstract

In this research, nanostructured composite granules of calcium phosphate (CP), Poly(ethylene Dioxythiophene)-Poly(Styrene Sulfonate) (PEDOT:PSS) and zinc ferrite (ZnFe_2O_4) can be prepared by mechanical mixing, uniaxial pressing and normal sintering. Composite granules of CP-PEDOT-PSS- ZnFe_2O_4 revealed nanosized morphology and porous structure. Improving both the magnetic properties of CP granules with ZnFe_2O_4 and the electrical properties of CP granules with PEDOT:PSS was indicated that the enhancement of cell adhesion, growth and proliferation.

Keywords: Calcium Phosphate, Chicken Eggshells, Medical Materials



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากความกรุณาจากคณาจารย์ และบุคคล ที่เกี่ยวข้องหลายฝ่ายด้วยกัน ที่คอยให้คำปรึกษา และร่วมทำโครงการวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่มอบเงินสนับสนุนงบประมาณการวิจัย ภายใต้ทุนงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

อนึ่งผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ ให้แก่เหล่าคณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และ ขอขอบคุณความกตัญญูกตเวทิตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆที่จะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และพร้อมที่จะรับคำแนะนำของทุกท่านเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
Abstract.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 คำสำคัญของการวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุทางการแพทย์.....	4
2.2 วัสดุชีวภาพการแพทย์ออร์โธปิดิกส์	5
2.3 วัสดุเซรามิกที่นำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์	7
2.4 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต	8
2.5 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	11
3.2 การเตรียมสารประกอบแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	12
3.3 การเตรียมสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต.....	14
3.4 การเตรียมแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต	15
3.5 การเตรียมซิงค์เฟอร์ไรท์	16
3.6 การเตรียมแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄	17
3.7 การศึกษาความเป็นพิษของวัสดุต่อเซลล์ ด้วยวิธี MTT assay	18

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต	19
4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต	21
4.3 สัณฐานวิทยาของแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต.....	23
4.4 สัณฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄	25
4.5 สมบัติแม่เหล็กและไฟฟ้าของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄	27
4.6 การตรวจสอบความเป็นพิษของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄	28

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย

31

เอกสารอ้างอิง.....

32

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบต่าง ๆ	9
ตารางที่ 4.1 แสดงตารางแสดงธาตุหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) และเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ในสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เฝ้าแคลไซน์ในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เวลา 3 h ตามลำดับ.....	23
ตารางที่ 4.2 ค่าการอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็ก (Saturation magnetization; M_s) และ ค่ากลับข้างความเป็นแม่เหล็ก (Coercivity; H_c) ของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄ ที่ PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄ ต่าง ๆ.....	28
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่า Optical density ที่ระยะเวลาเซลล์สัมผัสกับสิ่งทดสอบ 24 h	29
ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่า Optical density ที่ระยะเวลาเซลล์สัมผัสกับสิ่งทดสอบ 48 h	30



สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.1 การเตรียมผงเปลือกไข่ไก่.....	13
รูปที่ 3.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่ (a) ก่อนการแคลไซน์ และ (b) หลังการแคลไซน์ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 1,100 °C เวลา 4 h.....	14
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	16
รูปที่ 3.4 การเตรียมสารประกอบซิงค์เฟอร์ไรท์	16
รูปที่ 3.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซิงค์เฟอร์ไรท์	17
รูปที่ 3.6 การเตรียมแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄	17
รูปที่ 3.7 รูปแบบการทดสอบความเป็นพิษของวัสดุต่อเซลล์.....	18
รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตก่อน และหลังการเผา แคลไซน์ในบรรยากาศปกติช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เวลา 3 h.....	20
รูปที่ 4.2 สัดส่วนเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) และเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-TCP) ในสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เผาแคลไซน์ในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เวลา 3 h.....	21
รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบไบฟาลิกแคลเซียมฟอสเฟตก่อนและหลังการเผา แคลไซน์ในบรรยากาศปกติช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 1,100 °C เวลา 3 h	22
รูปที่ 4.4 สันฐานวิทยาของชิ้นงาน (A, B) ที่อุณหภูมิ 700 °C (C, D) ที่อุณหภูมิ 800 °C (E, F) ที่อุณหภูมิ 900 °C (G, H) ที่อุณหภูมิ 1,000 °C (I, J) ที่อุณหภูมิ 1,100 °C ที่กึ่งลึกลงไป x 1,000 และ x10,000 ตามลำดับ.....	24
รูปที่ 4.5 สันฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄ ที่สัดส่วน PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄ (A, F) 2wt% (B, G) 4wt% (C, H) 6wt% (D, I) 8wt% และ (E, J) 10wt% ใน CP ต่าง ๆ กำลังขยาย x5,000 และ x10,000.....	26
รูปที่ 4.6 ฮิสเทอรีซิสลูปของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄ ที่สัดส่วน PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄ ใน CP ที่เพิ่มขึ้นจาก 2 จนถึง 10wt% ตามลำดับ.....	28

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การประยุกต์ใช้สมบัติเชิงไฟฟ้าและแม่เหล็กของวัสดุเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุ อุปกรณ์และนวัตกรรมทางการแพทย์ต่างๆ กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน แคลเซียมฟอสเฟต (CP) มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องในวงการศัลยกรรมกระดูกและทันตกรรม ทั้งนี้เพราะสารประกอบเหล่านี้มีสมบัติการเข้ากันได้ทางชีวภาพและมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายคลึงกับสารอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดูกและฟัน [1-4] โดยเฉพาะไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$) และ เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) โดยถูกนำมาวิจัยและพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ และในอุตสาหกรรมต่างๆ ด้วย [5-8] เช่น เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี, วัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางเลเซอร์, วัสดุเรืองแสง, วัสดุที่มีสมบัติเป็นตัวนำไอออน, เซนเซอร์แก๊สและวัสดุดูดซับโลหะหนัก สำหรับวัสดุที่ที่ใช้ในการผลิตแคลเซียมฟอสเฟตมีราคาสูง ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะพัฒนาการเตรียมแคลเซียมฟอสเฟตเหล่านี้จากวัสดุธรรมชาติ อาทิ กระดุกวัว, กระดุกปลา หรือปะการัง โดยพบว่าแคลเซียมฟอสเฟตที่สังเคราะห์ได้จากวัสดุเหล่านี้จะมีคุณสมบัติเป็นโครงสร้างแบบรูพรุน แต่ยังเกิดปัญหาเกี่ยวกับความผันผวนของสมบัติเชิงฟิสิกส์และเชิงเคมีของวัสดุเหล่านี้ จึงมีการวิจัยโดยใช้เปลือกไข่ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ในครัวเรือนเป็นแหล่งวัตถุดิบของแคลเซียมในการผลิตแคลเซียมฟอสเฟตชนิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ และ เบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต เนื่องจากเปลือกไข่มีองค์ประกอบของแคลเซียมที่สูง จึงเป็นการลดต้นทุนในการจัดหาวัตถุดิบของแคลเซียมคุณภาพสูง [9, 10]

พอลิเอทิลีนไดออกซีไรโอพีน-พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (PEDOT:PSS) เป็นพอลิเมอร์ที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่โดดเด่นกว่าพอลิเมอร์อื่น ๆ ทั้งมีความเสถียรสูง สภาพการนำไฟฟ้าสูง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และเข้ากับร่างกายได้โดยไม่เกิดการเป็นพิษ ส่วนซิงค์เฟอร์ไรต์ (ZnFe_2O_4) เป็นวัสดุแม่เหล็กที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางแม่เหล็กและทางชีวภาพให้ดีขึ้น [11-14] จากผลการศึกษาทั้งหมดข้างต้น ดังนั้นทีมนักวิจัยมีความสนใจจะพัฒนาวัสดุทางการแพทย์ที่จะนำไปใช้กับร่างกาย โดยการวิจัยและปรับปรุงสมบัติเชิงไฟฟ้าและแม่เหล็กและศึกษาลักษณะเฉพาะของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เสริมสมบัติเชิงไฟฟ้าด้วย PEDOT-PSS และเสริมสมบัติเชิงแม่เหล็กด้วย ZnFe_2O_4

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการขึ้นรูปแกรนูลของแคลเซียมฟอสเฟตด้วย PEDOT-PSS และ ZnFe_2O_4
2. เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงไฟฟ้าและแม่เหล็กของแคลเซียมฟอสเฟตด้วย PEDOT-PSS และ ZnFe_2O_4
3. เพื่อศึกษาชนิดและสัดส่วนของแคลเซียมฟอสเฟต PEDOT-PSS และ ZnFe_2O_4 ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงไฟฟ้าและแม่เหล็กและการตอบสนองต่อเซลล์

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. เตรียมสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตจากปฏิกิริยาการตกตะกอน (precipitation method) โดยใช้เปลือกไข่ (CaCO_3) เป็นสารตั้งต้นของแคลเซียม, ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) เป็นสารตั้งต้นของฟอสฟอรัส และสารที่ใช้เป็นตัวปรับความเป็นกรดต่างคือ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)
2. เตรียม ZnFe_2O_4 จากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง (solid state reaction method) โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นสารตั้งต้น
3. ศึกษาสัดส่วนการผสม ZnFe_2O_4 และ PEDOT-PSS ต่อไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ 2-10wt%
4. ตรวจสอบความเป็นพิษด้วยวิธี MTT assay

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. เตรียมแคลเซียมฟอสเฟตจากเปลือกไข่จากปฏิกิริยาการตกตะกอน
2. เตรียม ZnFe_2O_4 จากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
3. เตรียมแกรนูลคอมโพสิตแคลเซียมฟอสเฟต ZnFe_2O_4 และ PEDOT-PSS
4. ศึกษาลักษณะเฉพาะของแกรนูลที่เตรียมขึ้น
5. ตรวจสอบสมบัติทางชีวภาพเบื้องต้น
6. สรุปผลและรายงานผลการดำเนินงาน

1.5 คำสำคัญของการวิจัย

แคลเซียมฟอสเฟต, เปลือกไข่, พอลิเอทิลีนไดออกไซด์ออกซิโพรอฟิน-พอลิสไตรีนซิลโฟเนท, ซิงค์เฟอร์ไรต์, วัสดุทางการแพทย์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมแกรนูลคอมโพสิตแคลเซียมฟอสเฟต ZnFe_2O_4 และ PEDOT-PSS ได้
2. สามารถนำไปศึกษาต่อยอดงานวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้
3. สามารถสร้างกลุ่มวิจัยวัสดุที่มีความพร้อมในการบูรณาการความรู้ทางด้านต่างๆ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุทางการแพทย์

1. ประวัติของวัสดุทางการแพทย์

การใช้วัสดุต่างๆเพื่อนำมาทดแทนอวัยวะในร่างกายที่ไม่สามารถทำหน้าที่ได้หรือสูญเสียไปนั้นได้เริ่มใช้กันมานานมาก นับตั้งแต่ที่เริ่มนำเทคโนโลยีมาใช้ทางการแพทย์ และเริ่มมีความรู้ทางเทคโนโลยีของวัสดุต่างๆ ประวัติการนำมาใช้ที่สำคัญได้แก่ การใช้โลหะเพื่อนำมายึดกระดูกที่หักให้ติดกันรวมทั้งนำโลหะหลายอย่างมาใช้ในศัลยกรรมดังต่อไปนี้

- เหล็ก ลวดที่จะทำจากเหล็กนั้นเป็นโลหะชนิดแรกที่ใช้ในการยึดกระดูกที่หัก
- ทองคำ โลหะชนิดนี้ได้ใช้ตั้งแต่ศตวรรษที่ 16 เพื่อซ่อมแซมภาวะเพดานโหว่
- แพลตตินัม ใช้เป็นลวดโลหะที่ทำให้เกิดการระคายเคืองได้น้อยที่สุด เมื่อได้ทดลองในสุนัข
- เงิน ได้ใช้ลวดเงินเพื่อยึดติดกระดูกที่หักให้ติดกัน แม้ว่าโลหะชนิดนี้จะไม่เป็นพิษต่อร่างกาย แต่เนื่องจากมีความยืดหยุ่นได้น้อย จึงไม่นิยมใช้
- นิกเกิล ได้ถูกนำมาใช้ในฐานะที่เป็นโลหะสำหรับเคลือบโลหะที่ใช้ฝังในร่างกาย
- แมกนีเซียม ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นในการเร่งสร้างกระดูก

2. คำจำกัดความและความหมาย

คำที่จำเป็นต้องทราบนั้นมีอยู่ 2 คำ ซึ่งต้องแยกความหมายให้ชัดเจนคือคำว่า biomaterials และ biological materials คำว่า biomaterials นั้นมีความหมายว่า เป็นวัสดุอย่างหนึ่งอย่างใดที่นำเข้าไปฝังอยู่ในร่างกาย เพื่อทำหน้าที่เป็นอวัยวะเทียมหรือเพื่อการรักษาบางอย่าง หรือเรียกได้ว่าเป็น “วัสดุชีวภาพ” ส่วนคำว่า biological materials เป็นวัสดุที่เป็นเนื้อเยื่อของร่างกาย เรียกว่า “วัสดุทางชีววิทยา” วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ซึ่งจำกัดความหมายโดย Clemson Advisory Board ในการประชุมวัสดุชีวภาพนานาชาติครั้งที่ 6 (The Sixth Annual International Biomaterial Symposium) ว่า “A biomaterials is a systemically, Pharmacologically inert substance designed for implantation within or incorporation with living system” ซึ่งมีความหมายว่าเป็นวัสดุที่มีความเฉื่อยต่อเนื้อเยื่อของร่างกายทั่วไป รวมทั้งความเฉื่อยทางเภสัชวิทยาด้วย หมายความว่า ต้องไม่มีคุณสมบัติเป็นยา เมื่อนำวัสดุนั้นฝังเข้าไปในร่างกายหรือให้วัสดุนั้นไปสัมผัสเป็นส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกาย วัสดุชีวภาพนี้รวมถึงวัสดุที่ใช้ในทางทันตกรรมเพราะวัสดุดังกล่าวนี้ย่อมต้องสัมผัสเนื้อเยื่อร่างกาย โดยมีโอกาสสัมผัสหรือซึมเข้าไปในเลือดได้ เนื่องจากว่าเป้าหมายของการใช้วัสดุชีวภาพคือ การทำให้เนื้อเยื่อตามธรรมชาติและอวัยวะต่างๆของร่างกายทำหน้าที่ขึ้นมาได้อย่างปกติ จึงมีความสำคัญมากที่ต้องเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ หน้าที่ และโครงสร้างของวัสดุทางชีววิทยา (biological materials) ดังนั้นต้องศึกษาเรื่องใหญ่ๆ 3 เรื่องด้วยกัน คือ วัสดุทาง

ชีววิทยา วัสดุที่ฝังเข้าไปในร่างกาย และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับเนื้อเยื่อร่างกายเรื่องที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องทำการศึกษาคือ สมบัติเชิงกลและไดนามิกของเนื้อเยื่อ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างคุณสมบัติทั้งสอง โดยทั่วไปการศึกษานี้เรียกว่า biomechanics เพื่อที่จะนำไปใช้ออกแบบของวัสดุที่สอดใส่เข้าไปในร่างกาย

3. การประยุกต์ชีวเชิงกลให้เข้ากับวัสดุที่ใช้ฝังในร่างกาย

สมรรถภาพของวัสดุที่สอดใส่ไปนั้นจะต้องพิจารณาในด้านความเชื่อถือได้ เช่น มีปัจจัยที่สำคัญ 5 ประการ ที่เกี่ยวข้องกับการยึดติดของห้วกระดูกพีเมอร์ คือการแตกหัก การสึกหรอ การหลวม การหลุด และการติดเชื้อโรคความสำเร็จของวัสดุชีวภาพนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ คุณสมบัติและความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อของวัสดุที่ฝังเข้าไป ความทนของเนื้อเยื่อต่อวัสดุที่ฝังเข้าไป และผู้ที่ทำการฝังวัสดุนั้นรวมทั้งการติดตามการเปลี่ยนแปลงของวัสดุนั้นด้วยความต้องการคุณสมบัติของการฝังแผ่นโลหะเพื่อทำการติดตามการเปลี่ยนแปลงของวัสดุนั้น

- การยอมรับแผ่นโลหะโดยเนื้อเยื่อนั้นๆซึ่งหมายถึงความเข้ากันได้ของเนื้อเยื่อ
- ต้องไม่มีพิษ และไม่ทำให้เกิดโรคมะเร็ง
- มีความเฉื่อยทางเคมี และมีความทนทานด้วย
- มีความแข็งแรงเชิงกลเพียงพอ
- มีช่วงการทำงานพอก่อนที่จะเกิดการล้า
- มีการออกแบบทางวิศวกรรมที่แข็งแรง
- มีน้ำหนักและความหนาแน่นที่เหมาะสม
- มีราคาค่อนข้างถูก สามารถสร้างได้ง่าย และเป็นจำนวนมาก

2.2 วัสดุชีวภาพการแพทย์ออร์โธปิดิกส์

วิวัฒนาการของวัสดุที่ใช้ในทางการแพทย์ ได้มีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากในตลอดระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา ในยุคแรกของวัสดุนี้จะเป็นเรื่องของแบบพิมพ์ต่างๆ ทางด้านวิศวกรรม วัสดุที่ใช้คือ โลหะไร้สนิม (stainless steel) แต่ในยุคปัจจุบันวัสดุที่ใช้ในทางการแพทย์มีมากถึงกว่า 40 ชนิดที่ผลิตเป็นวัสดุชีวภาพและเครื่องมือใช้ผู้ป่วย วัสดุยุคแรกๆมีคุณลักษณะคือ ขอให้เป็นแค่เพียงวัสดุที่ใช้แล้วไม่เกิดปฏิกิริยาต่อต้านจากเนื้อเยื่อข้างเคียงก็เพียงพอ แต่ปัจจุบันสิ่งสำคัญยิ่งยวดคือ ต้องดูถึงปฏิกิริยาผิวสัมผัส (interfacial reaction) ระหว่างวัสดุที่ใช้กับอวัยวะข้างเคียงที่รองรับ ในอดีตวัสดุที่เคยใช้นั้นขอเพียงให้อยู่คงทนได้นานแค่หลายปี ก็พอ แต่ปัจจุบันควรมีจุดมุ่งหมายที่จะสามารถใช้งานได้คงทนถึง 20 ปี ทั้งนี้เพื่อประโยชน์สูงสุดของผู้ป่วย ในยุคก่อนนี้การตรวจทดสอบวัสดุที่ใช้ในทางการแพทย์มีไม่มากนัก แต่ในปัจจุบันการที่จะได้มาซึ่งวัสดุใหม่ๆที่ใช้การได้ดีและมีประสิทธิภาพนั้น ต้องผ่านการทดสอบทั้งในแง่กลศาสตร์ ในสัตว์ทดลองและในแบบจำลองเหมือนอวัยวะของจริงในมนุษย์ เพื่อให้ได้มาซึ่งความแน่นอนว่าวัสดุนั้นมีพิษต่อร่างกายหรือเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อข้างเคียงหรือไม่

การศึกษาในห้องทดลองและจากร่างกายของผู้เสียชีวิตใหม่ๆ ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงของผิววัสดุที่ใช้หรือการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อระหว่างผิววัสดุและอวัยวะที่รองรับช่วยให้เกิดความเข้าใจกระจ่างขึ้นเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมีและปฏิกิริยาของอวัยวะที่มีต่อวัสดุที่ใช้จุดประสงค์ของการใช้วัสดุทางการแพทย์ก็คือ ใช้ทดแทนส่วนอวัยวะและหรือทำหน้าที่ของอวัยวะที่เสียไปในขณะเดียวกันต้องเป็นวิธีการที่ปลอดภัย เชื่อถือได้ ประหยัด และไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย การที่จะบรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวได้ก็ต้องขึ้นอยู่กับความมั่นคง ความคงทนถาวรของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างผิววัสดุที่ใช้กับอวัยวะที่รองรับ ต้องมีความเข้าใจว่าผิวสัมผัสของเนื้อเยื่อและวัสดุ (biomaterial-tissue interface) เปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ ฉะนั้นต้องมีการศึกษาถึงความเปลี่ยนแปลงทั้งในแง่เคมีและเซลล์ที่เกิดขึ้นเมื่อนำวัสดุไปฝังแทนอวัยวะส่วนนั้นๆ เช่นจำเป็นต้องเรียนรู้เคมีพื้นผิว (surface chemistry) การสึกกร่อนของโลหะ (metal corrosion) ปฏิกิริยาต่อพอลิเมอร์ (polymer reaction) ในปีหนึ่งๆจากตัวเลขที่ปรากฏ การใช้วัสดุทางการแพทย์ในอเมริกาและยุโรปมีรวมกันมีถึง 4-5 ล้านชิ้น ชิ้นส่วนจากวัสดุที่ต่างกันกว่า 40 ชนิดที่กำลังใช้อยู่ วัสดุทางการแพทย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิดใหญ่ๆ โดยพิจารณาในแง่ของปฏิกิริยาเนื้อเยื่อต่อการกระตุ้นที่ผิวสัมผัส (interfacial response)

ชนิดที่ 1 ปฏิกิริยาผิวสัมผัสเฉื่อย, พื้นผิวสัมผัสของวัสดุเรียบ (inert, smooth surface)

ชนิดที่ 2 ปฏิกิริยาผิวสัมผัสเฉื่อย, พื้นผิววัสดุมีรูพรุนเล็กๆ (inert, microporous surface)

ชนิดที่ 3 ปฏิกิริยาเคมีที่ผิวสัมผัสควบคุมได้ (controlled chemical reactive surface)

ชนิดที่ 4 ปฏิกิริยาดูดซึมที่ผิวสัมผัส (resorbable)

ชนิดที่ 1 ได้แก่ วัสดุทางการแพทย์ที่ใช้แพร่หลายในปัจจุบัน วัสดุในกลุ่มนี้สามารถเข้ากันได้ดีกับอวัยวะที่ยึดหรือทดแทนและเนื้อเยื่อข้างเคียง แต่อย่างไรก็ตามต้องเกิดมีปฏิกิริยาเนื้อเยื่อต่อวัสดุที่ใช้โดยเกิดเป็นเนื้อเยื่อแผ่นบางๆ (fibrous capsule) หนา 0.1-10 μm ขึ้นเสมอโดยแทรกระหว่างวัสดุที่ใช้กับอวัยวะที่รองรับ ถึงแม้ว่าเนื้อเยื่อ ดังกล่าวจะแนบชิดติดกับวัสดุก็ตาม แต่ก็ไม่ได้ต่อกันสนิท จึงเกิดมีการเคลื่อนไหวยระหว่างตัววัสดุที่ใช้กับอวัยวะรองรับโดยเฉพาะเมื่อมีแรงมากระทำ ลักษณะเช่นนี้ทำให้ความคงทนถาวรของวัสดุที่ฝังมีขีดจำกัด ตัวอย่างเช่น แผ่นโลหะและสกรูยึดกระดูก

ชนิดที่ 2 เป็นวัสดุที่เกิดขึ้นจากการวิจัยเพื่อให้มีคุณภาพดีกว่าชนิดที่ 1 ในแง่ของความมั่นคงผิวสัมผัส (interfacial stability) วัสดุในกลุ่มนี้มีรูพรุนเป็นตาข่ายที่กำหนดรูปแบบได้ (controlled network of porosity) ตรงบริเวณผิววัสดุเพื่อให้เนื้อเยื่อสามารถเจริญเติบโตเข้าไปในรูพรุนที่ผิววัสดุนี้คล้ายกับเนื้อเยื่อบริเวณเชื่อมต่อระหว่างเอ็นและกระดูก หรือพันกับเนื้อเยื่อหุ้มเหงือก ตัวอย่างเช่น ข้อสะโพกเทียมชนิดผิวโลหะมีรูพรุน

ชนิดที่ 3 เป็นวัสดุที่วิจัยขึ้นเมื่อใช้แล้วก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี บริเวณผิววัสดุกับเนื้อเยื่อรองรับ ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นคือผิวสัมผัสจะประสานกันได้สนิทเหมือนธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น glass ceramics hydroxyapatite

ชนิดที่ 4 เป็นวัสดุทางการแพทย์เมื่อใช้แทนหรือฝังในอวัยวะของส่วนร่างกายนั้นๆ แล้วเมื่อถึงเวลาที่ทำหน้าที่ครบถ้วนสมบูรณ์แล้วจะเกิดการเสื่อมสภาพของส่วนร่างกายนั้นๆ แล้วเมื่อถึงเวลาที่ทำหน้าที่ครบถ้วนสมบูรณ์แล้วจะเกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุและไม่ปรากฏร่องรอยของปฏิกิริยาระหว่างผิวพื้นวัสดุกับอวัยวะที่รองรับเลย วัสดุในกลุ่มนี้ถือว่าเป็นวัสดุที่ต้องการที่สุด แต่การผลิตทำได้ยากมาก และที่มีอยู่ในปัจจุบันก็มีน้อยชนิดมาก ตัวอย่างเช่น tricalcium phosphate ceramics วัสดุทางการแพทย์ทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตาม เมื่อใช้ฝังหรือทดแทน อวัยวะในร่างกายแล้วปฏิกิริยานี้เนื้อเยื่อระหว่างวัสดุและอวัยวะที่รองรับจะเป็นแบบใดก็ตามขึ้นกับชนิดของวัสดุนั้นๆ วัสดุนั้นจะคงไว้ซึ่งคุณสมบัติประจำของตัวมันเองไว้ เพื่อทำหน้าที่ต่อไปในร่างกายให้นานเท่าานที่จะเป็นไปได้ ทั้งนี้เพื่อประโยชน์และคุณสมบัติของการใช้วัสดุทางการแพทย์ในวิชาโรคกระดูกและข้อ

2.3 วัสดุเซรามิกที่นำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

วัสดุเซรามิกที่เป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เช่น วัสดุคาร์บอน ได้ถูกนำมาใช้ทำเป็นลิ้นหัวใจเทียม วัสดุสำหรับนำที่สอดผ่านผิวหนังเข้าไปในร่างกาย (percutaneous lead) และในทางทันตกรรม (dentistry) วัสดุคาร์บอนนี้ถึงแม้ว่าจะมีสีดำ แต่อย่างไรก็ตามก็มีข้อดีหลายอย่างที่ถูกเลือกนำมาใช้ก็คือ ทำได้ง่ายและสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อในร่างกายได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ที่กล่าวมายังได้มีการนำเอาอะลูมินา (alumina) มาใช้งานเกี่ยวกับกระดูกและข้อต่อเทียม เพราะเป็นวัสดุที่สามารถทนต่อแรงกดได้มาก และมีความแข็งแรงอย่างยิ่งวด ในเรื่องของกระดูกและข้อต่อเทียมนี้มีการพัฒนานำเอาซิลิกอนไนไตรด์ (silicon nitride) มาใช้แทนอะลูมินา เพราะมีความแข็งแรงที่สูงกว่า อะลูมินา และง่ายต่อการขึ้นรูปในแบบต่างๆ นอกจากนี้ยังมีไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) ที่มีรูพรุน ก็ได้ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุที่ฝังเข้าไปในร่างกาย ในกรณีที่กระดูกหักและสำหรับกระดูกใหม่ ที่สร้างสอดแทรกมาตามรูพรุนของวัสดุนี้เป็นการยึดที่มั่นคง แต่เมื่อได้นำมาใช้งานจริงก็พบว่าวัสดุเซรามิกอาจจะเปราะและความแข็งแรงลดลงได้เมื่อถูกแช่ในน้ำเกลือหรือถูกฝังไว้ในเนื้อเยื่ออ่อน ตัวอย่างการนำเซรามิกมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์

1. อะลูมินา (alumina, Al_2O_3) นำมาใช้เป็นกระดูกและข้อเทียม
2. ซิลิกอนไนไตรด์ (silicon nitride) นำมาใช้ในงาน turbine blade ที่มีอุณหภูมิสูง และถูกพิจารณานำมาใช้เป็นกระดูกและข้อเทียม เพราะมีความแข็งแรงกว่า อะลูมินา และขึ้นรูปได้ง่ายกว่าอะลูมินา

3. ซีโรเซียม (cerosium, ceramic-epoxy composite) ทำเป็นวัสดุที่มีรูพรุน เพื่อแก้ปัญหาที่เนื้อเยื่อจะไม่ยึดเกี่ยวกับวัสดุที่ฝัง โดยทำการทดลองในหนูและกระต่ายมาตั้งแต่ ปี ค.ศ.1963 แล้ว โดยฝังไว้ใต้ผิวหนัง ในกล้ามเนื้อลายและข้อเข่ามานานมากกว่า 20 เดือน ไม่พบปฏิกิริยาตอบสนองของเนื้อเยื่อชนิดที่ว่า การอักเสบเฉพาะที่หรือมีแนวโน้มว่าจะเป็นก้อนตุ่ม แต่เนื้อเยื่อสามารถสอดแทรกเข้าไปยังรูพรุนได้ ต่อมา Harold Voris ได้รายงานการใช้ข้อมกระดูกกะโหลกศีรษะในคน ปรากฏว่าได้ผลดี ยึดติดได้ดี ไม่มีปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อโดยรอบ

4. แคลเซียม อลูมินา (calcium aluminate, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) ทำมาจากอลูมิเนียมออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต กลุ่มที่คล้ายกัน ได้แก่ แคลเซียม ไททาเนต (calcium titanate, $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$) และแคลเซียมเซอร์โคเนต (calcium Zirconate, $\text{CaO} \cdot \text{ZrO}_2$) นำมาสร้างเป็นวัสดุที่มีรูพรุน ซึ่งมีขนาดของรูพรุนต่าง ๆ กันถึง 4 ระดับ ตั้งแต่ 45-200 ไมครอน

5. ไพโรไลติกคาร์บอน (pyrolytic carbon, omnicarbon) ใช้ทำลิ้นหัวใจเทียมที่มีข้อดีไม่ต้องใช้สารกันเลือดแข็งตัว (anticoagulant) เคลือบอีก จากการทดสอบมีอายุการใช้งานมากกว่า 100 ปี

6. แบเรียมไททาเนต (barium titanate, BaTiO_3) และควอตซ์ (Quartz, SiO_2) มีคุณสมบัติเป็นเพียโซอิเล็กทริกกำลังได้รับการศึกษาเพื่อพิจารณาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อธรรมชาติ

2.4 สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

แคลเซียมฟอสเฟต (calcium phosphate) เป็นแร่ธาตุที่มีน้ำหนักเบา มีความเสถียรทางเคมี และมีองค์ประกอบคล้ายกับเฟสที่เป็นแร่ธาตุในกระดูกจึงมักใช้ทำเป็นวัสดุสังเคราะห์ในรูปของกระดูกเทียม (artificial bone) สำหรับการฝังชนิดต่างๆ หรือสามารถใช้เป็นวัสดุพ่นสำหรับเคลือบ (porous coating) ลงไปบนวัสดุสำหรับการฝังชนิดอื่นๆ ด้วยความที่องค์ประกอบของไอออนพื้นฐานของแคลเซียมฟอสเฟตสามารถพบได้ตามทั่วร่างกายของมนุษย์ ทำให้มีความเข้ากันได้กับร่างกายนั้นมีสูงมาก (high compatible) นอกจากนี้เซรามิกชีวภาพในกลุ่มแคลเซียมฟอสเฟตยังมีความคงทนต่อความเสียหายอันเกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ (microbial attack), การเปลี่ยนแปลงค่า pH และสภาวะการเป็นตัวทำละลาย (solvent condition) สามารถอยู่ในรูปผลึกของเกลือได้หลากหลายชนิด เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) และเบต้าไวลอคโคไท์ (whitlockite) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมและฟอสเฟต (Ca:P ratio) การเข้าร่วมปฏิกิริยาของน้ำ สารเจือปน (impurities) และอุณหภูมิ (temperature) ในสภาวะที่มีน้ำเข้าร่วม (wet environment) นอกจากนั้นที่อุณหภูมิต่ำ ($< 900^\circ\text{C}$) แคลเซียมฟอสเฟตจะอยู่ในรูปของไฮดรอกซิล (hydroxyl-; OH) หรือไฮดรอกซีอะพาไทต์ ในขณะที่สภาวะที่ไม่มีน้ำเข้าร่วม (dry atmosphere) และที่อุณหภูมิสูง แคลเซียมฟอสเฟตจะอยู่ในรูปของเบตาไวลอคโคไท์ แคลเซียมฟอสเฟตทั้งสองรูปนี้มีสมบัติที่สามารถเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ (tissue compatible) ได้อย่างดีเยี่ยมและมักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกระดูกในรูปของเม็ดหรือบล็อกของแข็ง (granular or solid block) ส่วนแคลเซียมฟอสเฟตชนิดอื่นๆ ที่นิยมนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ ได้แก่ แอลฟาไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium phosphate; TCP) ไบเฟสิกแคลเซียมฟอสเฟต (biphasic calcium phosphate; BCP) โมโนแคลเซียมฟอสเฟตโมโนไฮเดรต (monocalcium phosphate monohydrate; MCPM) และอะพาไทต์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเผาซินเตอร์ (unsinter apatite; AP) ตารางที่ 2.1 แสดงสมบัติกายภาพของแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบต่างๆ ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมทางการแพทย์ ซึ่งในการประยุกต์ใช้นั้นจะพิจารณาจากสมบัติการสลายหรือการดูดซึม (biodegradable or resorbable) และอีกสมบัติคือการสร้างพันธะกับเนื้อเยื่อ

(bioactive or surface reactive) ของตัววัสดุเป็นหลัก ความนิยมในไฮดรอกซีอะพาไทต์เนื่องจาก ว่าจะมีความเสถียรอย่างดียิ่งที่ pH สูงกว่า 4.3 ซึ่งในเลือดมีค่า pH 7.3 โดยปกติแคลเซียมฟอสเฟต เซรามิกทั่วไป (conventional calcium phosphate) จะมีความสามารถในการเผาซินเตอร์ (sinterability) ที่ต่ำมาก เนื่องจากว่ามีพื้นที่ผิวที่ต่ำ ($\sim 2\text{-}5\text{ m}^2/\text{g}$) นอกจากนี้ยังพบอีกว่า ในกระบวนการดูดซึม (resorption process) ของแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิก โดยทั่วไปจาก กระบวนการสังเคราะห์ก็มีความแตกต่างจากแร่ธาตุในกระดูกอย่างสิ้นเชิง เพราะโดยทั่วไปแล้วแร่ธาตุ ในกระดูกจะมีขนาดในระดับนาโนเมตรและมีพื้นที่ผิวที่สูงมาก การเจริญของกระดูกจะอยู่ภายใต้เมทริก ที่เป็นสารอินทรีย์มีพันธะระหว่างผลึกอย่างหลวมๆ จึงทำให้มีการดูดซึม โดยเซลล์ขนาดใหญ่ที่มีหน้าที่ ทำลายหรือขจัดกระดูก (osteoclast) ที่สมบูรณ์และสม่ำเสมอ ดังนั้นแคลเซียมฟอสเฟตเซรามิกที่มีขนาด อนุภาคไมครอนจึงมีพื้นที่ผิวน้อย และพันธะระหว่างผลึกที่แข็งแรง กระบวนการดูดซึมสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือการแตกสลายของอนุภาคและการแตกตัวของผลึกวัสดุ สมบัติทางกล (mechanical properties) ต่างๆของแคลเซียมฟอสเฟตสังเคราะห์นั้นจะมีค่าต่างๆเป็นไปตาม ตารางที่ 2.1 สาเหตุที่ทำให้สมบัติเชิงกลของผลึกเชิงซ้อนของแคลเซียมฟอสเฟตมีค่าต่างๆที่กว้างนั้น เนื่องมาจากมีโครงสร้างที่แตกต่างกันและเป็นผลมาจากกระบวนการเตรียมนอกจากนี้กระบวนการเผา ในขั้นสุดท้ายยังส่งผลให้แคลเซียมฟอสเฟตนั้นสามารถออกมาอยู่ในรูปของแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ หรือเบตาไวลอคโคไท์ แต่ก็มีบางกรณีเมื่อเสร็จสิ้นทางกระบวนการแล้วอาจได้แคลเซียมฟอสเฟตทั้งสอง โครงสร้างอยู่ในชิ้นงานเดียวกันข้อเสียหลักของแคลเซียมฟอสเฟตก็คือมีความแข็งแรงเชิงกลที่ต่ำ (poor mechanical strength) ภายใต้สภาวะความเค้น จึงทำให้แคลเซียมฟอสเฟตสังเคราะห์ (อนุภาคขนาดไมครอน) มีสมบัติการสร้างพันธะกับเนื้อเยื่อที่ต่ำกว่ากระดูกตามธรรมชาติ เช่นเดียวกับ เซรามิกชนิดอื่นๆ ความแข็งแรงเชิงดึง (tensile strength) และความแข็งแรงเชิงอัด (compressive strength) ของแคลเซียมฟอสเฟตจะถูกควบคุมโดยรูพรุน (pores) ช่องว่าง (voids) และช่องแคบเล็กๆ (interstices) ซึ่งทั้งหมดนี้เกิดขึ้นหลังจากการทำให้แน่นตัวโดยกระบวนการเผาซินเตอร์ เนื่องจากว่าเซรามิกแคลเซียมฟอสเฟตแตกต่างจากเซรามิกขั้นสูง (advance ceramics) ทำให้การเผา ซินเตอร์นั้นกระทำได้ยากจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าต่ำ

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตในรูปแบบต่าง ๆ

เฟส	โครงสร้างเคมี	อัตราส่วน Ca/P
Hydroxyapatite (HAp)	$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	1.67
β - Tricalcium Phosphate	$\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	1.5
Calcium deficient Hydroxyapatite	$\text{Ca}_{10-x}(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{OH})_2$	1.5-1.67
Etracalcium Phosphate (TTCP)	$\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$	2

2.5 ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ

ความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) เป็นความสามารถของวัสดุที่มนุษย์พัฒนาขึ้น ที่คงอยู่ได้ภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตในช่วงเวลาหนึ่ง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อร่างกายของสิ่งมีชีวิตนั้นๆ วัสดุทุกชนิดที่นำมาใช้เป็นวัสดุในทางการแพทย์นั้นล้วนแล้วแต่มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ แต่จะมีมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับประเภทการใช้งาน คำว่าความเข้ากันได้ทางชีวภาพจะครอบคลุม คุณสมบัติค่อนข้างกว้าง ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

1. วัสดุสามารถมีพันธะยึดเกาะกัน โดยวัสดุจะต้องสามารถมีพันธะยึดเกาะกับส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย
2. วัสดุมีผลต่อการแบ่งตัวของเซลล์ ซึ่งจะทำให้เซลล์เจริญเติบโตผิดปกติ
3. วัสดุมีความเข้ากันได้เล็กน้อยหรือไม่มีเลย

ในการศึกษาไบโอแอคติวิตีของวัสดุ (การศึกษาความเข้ากันได้ของวัสดุกับร่างกายมนุษย์) จะมีการศึกษาแยกเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (*In vitro* study) และการศึกษาในสัตว์ทดลอง (*In vivo* study) โดยจะต้องทำการศึกษในห้องปฏิบัติการก่อน เพื่อเป็นการตรวจสอบเบื้องต้นก่อนการนำไปใช้ในสัตว์ทดลอง ซึ่งการศึกษวัสดุในห้องปฏิบัติการนั้นมีหลักการดังนี้ นำวัสดุมาไว้ในสภาวะจำลองทางชีวภาพของร่างกายในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ แล้วศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับวัสดุ ทั้งทางด้านเคมี ทางกายภาพ และโครงสร้างจุลภาค ทำให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นว่า วัสดุอยู่ในประเภทใด (ค่อนข้างเฉื่อย ไบโอแอทีฟ หรือละลายเมื่ออยู่ในร่างกาย) เพื่อที่จะช่วยในการทำนายผลที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำมาทดสอบในสัตว์ หลังจากนั้นจึงจะนำวัสดุนั้น ๆ มาศึกษาในสัตว์ทดลอง เช่น หนู กระต่าย ลิง เป็นต้น โดยศึกษาในผลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ และศึกษาผลในระยะยาว ผลการศึกษาเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยในการตัดสินใจว่าวัสดุนั้น ๆ เหมาะสมกับการใช้งานประเภทใด

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารเคมี วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. สารเคมี

- เปลือกไข่ไก่ (CaCO_3)
- แอมโมเนียไฮโดรเจนฟอสเฟต $((\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4)$
- แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH)
- กรดไนตริก (HNO_3)
- ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)
- เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3)
- พอลิเอทิลีนไดออกซีไรออพีน-พอลิสไตรีนซัลโฟเนท (PEDOT:PSS)

2. วัสดุอุปกรณ์

- ถังน้ำเกลือ
- ไม้บดสาร
- ช้อนตักสาร
- กระดาษกรอง
- ปีกเกอร์
- แผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์
- ถังสลิปขนาดต่างๆ
- เช็ดชุ
- คีมคีบสาร
- แมกเนติกบาร์

3. เครื่องมือ

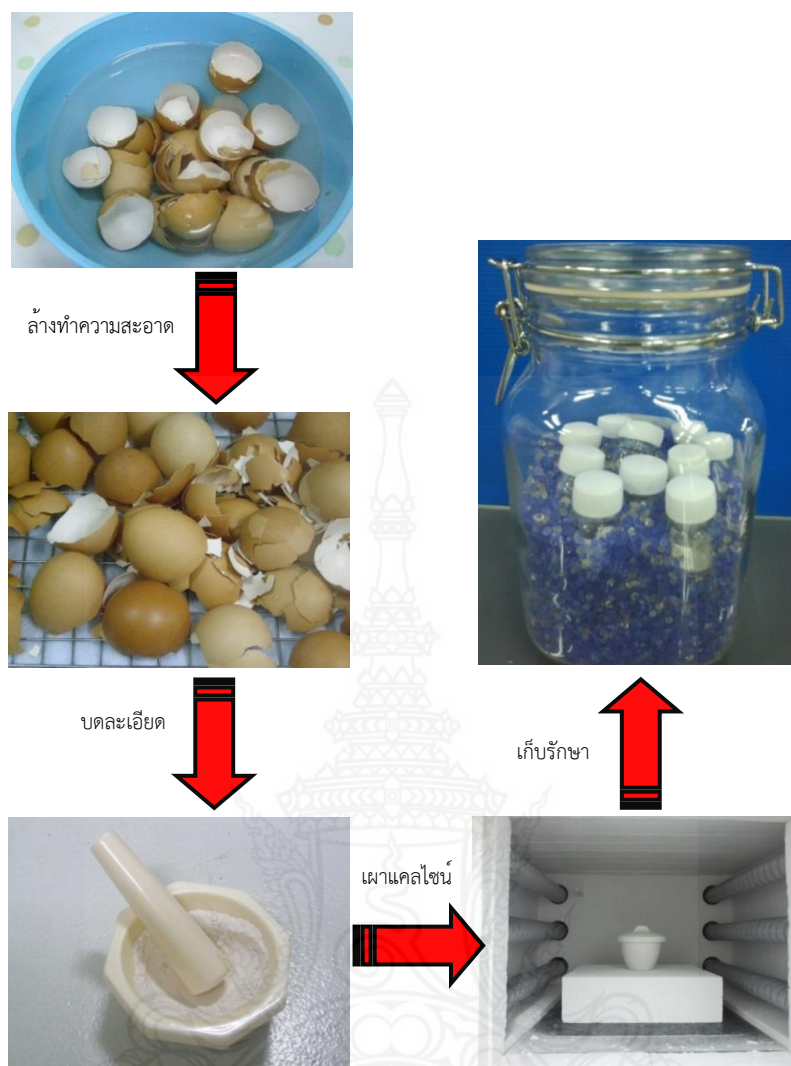
- เครื่องชั่งดิจิตอล ความละเอียด 0.0001 กรัม
- เตาอบสาร
- เตาเผาไฟฟ้า
- เครื่องอัดไฮดรอลิค
- เครื่องสเตอร์เลอร์

- เครื่องแวกคัม
- เครื่องซิงอาร์คิมิติส
- เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffract meter, XRD)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
- เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectroscopy, FTIR)
- เครื่องวัดคุณสมบัติแม่เหล็กแบบสั่นตัวอย่าง (Vibrating Sample magnetometer, VSM)
- เครื่องทดสอบมิเตอร์ 4 จุด (linear 4-Point Probe)
- เครื่องวัดแบบแวนเดอร์พาว์ (Van der Pauw)

3.2 การเตรียมสารประกอบแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่

การเตรียมผงเปลือกไข่เพื่อเป็นสารตั้งต้นของแคลเซียมในการสังเคราะห์อะพาไทต์มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนี้

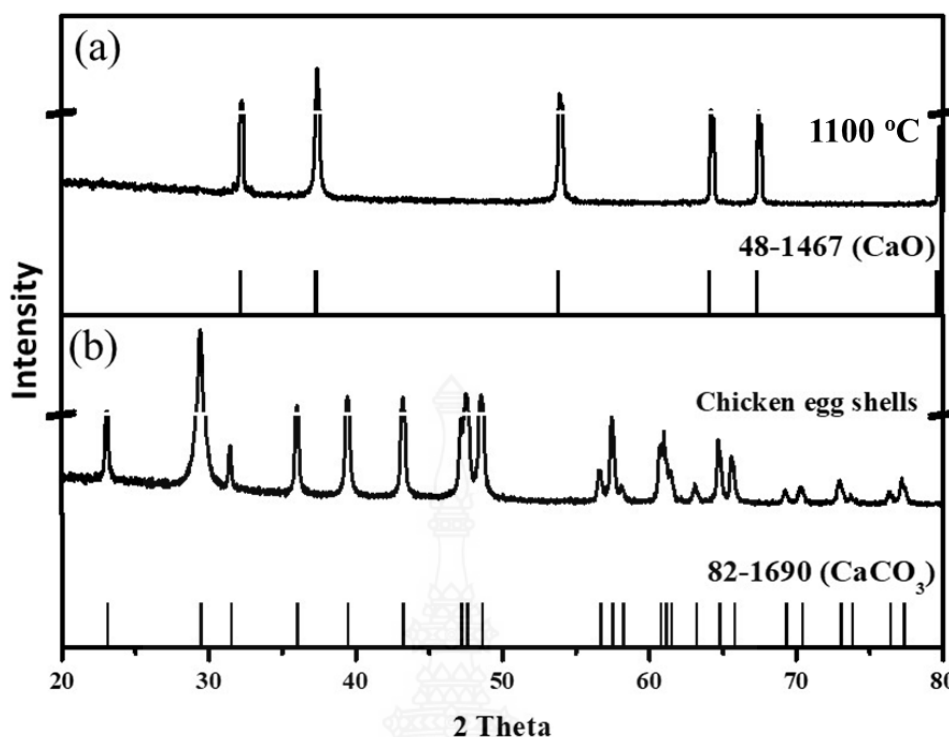
1. ทำความสะอาดเปลือกไข่ไก่ โดยการล้างน้ำและทำการลอกเยื่อที่ติดกับเปลือกไข่ไก่ออก แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดค้างออก
2. นำเปลือกไข่ไก่ไปตากให้แห้งและบดให้ละเอียด
3. นำผงเปลือกไข่ไก่ไปเผาที่ 1,100 °C เป็นเวลา 4 h ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ 5 °C/min
4. ปล่องให้เย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วเก็บไว้ในโถกันความชื้น
5. นำตัวอย่างผงเปลือกไข่ไก่ที่เผาได้มาตรวจสอบโครงสร้างของผลึก ด้วยเครื่อง XRD



รูป 3.1 การเตรียมผงเปลือกไข่ไก่

ปฏิกิริยาดังสมการที่ 1 :รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่ก่อนเผาและหลังเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C เป็นเวลา 4 h แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยพบว่า โครงสร้างผลึกของเปลือกไข่ไก่เป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดยมีโครงสร้างเฟสเป็นแคลไซต์ โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงของแฟ้ม Joint Committee on Powder Diffraction Standard (JCPDS) หมายเลข 12-1690 และเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C เฟสแคลไซต์หายไป และกลายเป็นเฟสแคลเซียมออกไซด์ (CaO) โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงของแฟ้ม JCPDS พบว่าตรงกับหมายเลข 48-1467 การเปลี่ยนแปลงนี้เป็น



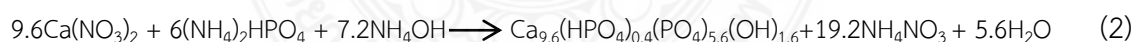


รูป 3.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงเปลือกไข่ (a) ก่อนการแคลไซน์ และ (b) หลังการแคลไซน์ในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 1,100 °C เวลา 4 h

3.3 การเตรียมสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟต

ประกอบด้วย 2 กระบวนการ

1. สังเคราะห์ calcium-deficient hydroxyapatite (Ca-dHAp: $\text{Ca}_{10-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{OH})_{2-x}$) โดย Ca-dHAp จะต้องมีส่วน Ca/P ที่อยู่ระหว่าง $1.5 < \text{Ca/P} < 1.67$ โดยเรากำหนดให้ Ca/P อยู่ที่ 1.6 เนื่องจาก $\text{Ca/P} = (10-x)/6$ ดังนั้น $x=0.4$ ดังนั้นเฟสที่ทำการสังเคราะห์จะมีสูตรเท่ากับ $\text{Ca}_{9.6}(\text{HPO}_4)_{0.4}(\text{PO}_4)_{5.6}(\text{OH})_{1.6}$ โดยมีสมการการสังเคราะห์คือ

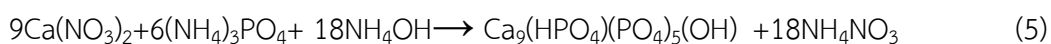


2. การเผาแคลไซน์ Ca-dHAp

เมื่อทำการเผาแคลไซน์จะได้เป็นไบฟอสเฟตแคลเซียมฟอสเฟต ดังนี้



สังเคราะห์ไบฟอสเฟตแคลเซียมฟอสเฟตจากปฏิกิริยาการตกตะกอน (precipitation method) โดยใช้เปลือกไข่เป็นสารตั้งต้นของแคลเซียมในรูป $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ เป็นสารตั้งต้นของฟอสฟอรัส และ NH_4OH เป็นตัวปรับความเป็นกรดด่างของสารละลาย เป็นไปตามสมการ

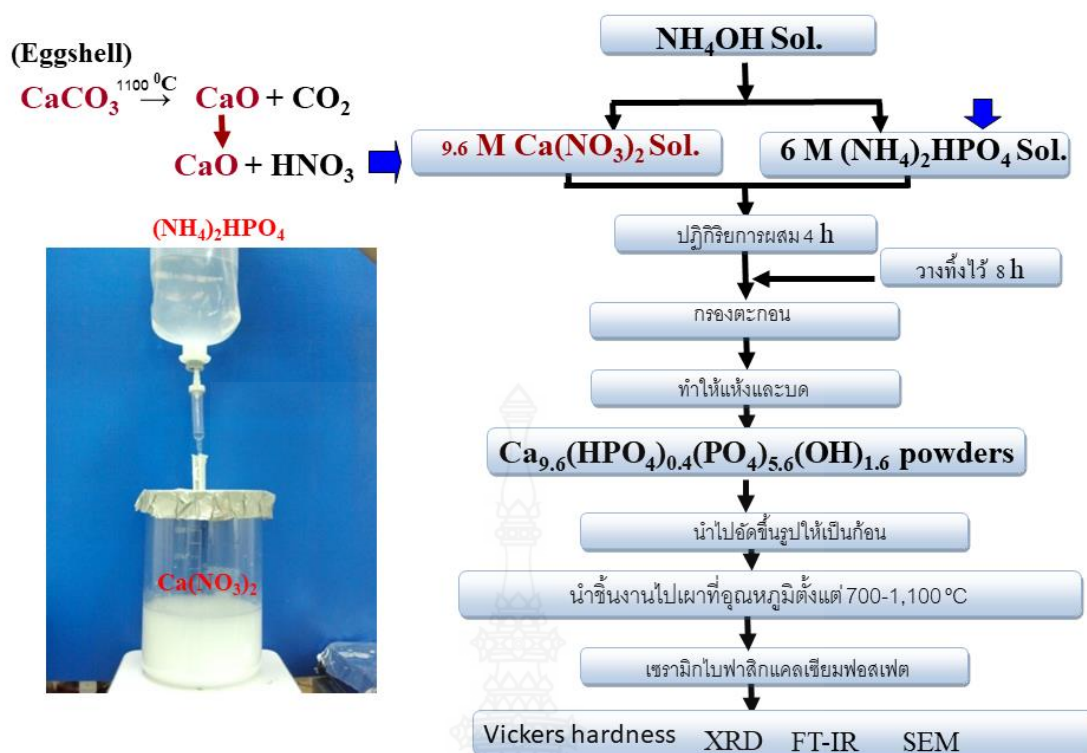


โดยที่ขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมสารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ เข้มข้น 9.6 โมลาร์ โดยนำผง CaO ละลายในกรด HNO_3 ที่มีความเข้มข้น 65% แล้วปรับ pH ของสารละลายเป็น 9 ด้วยใช้สารละลาย NH_4OH
2. เตรียมสารละลาย $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ เข้มข้น 6 โมลาร์ โดยนำผง $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ละลายในน้ำ แล้วปรับ pH ของสารละลายเป็น 9 ด้วยใช้สารละลาย NH_4OH
3. นำสารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ใส่ในบีกเกอร์ แล้วมาตั้งบนเครื่องกวนสารละลาย
4. นำสารละลาย $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ บรรจุในภาชนะที่ควบคุมการหยดได้ แล้วมาหยดใส่สารละลาย $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ โดยปรับอัตราการหยดเป็น 50 หยดต่อนาที
5. เมื่อสารละลาย $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ หยดหมด ทิ้งให้สารตกตะกอน เป็นเวลา 8 h
6. กรองตะกอน และทำการชะล้างด้วยน้ำสะอาด 5 ครั้ง
7. อบตะกอนให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 48 h
8. บดตะกอนให้เป็นผงละเอียด
9. นำผงเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 3 h

3.4 การเตรียมแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต

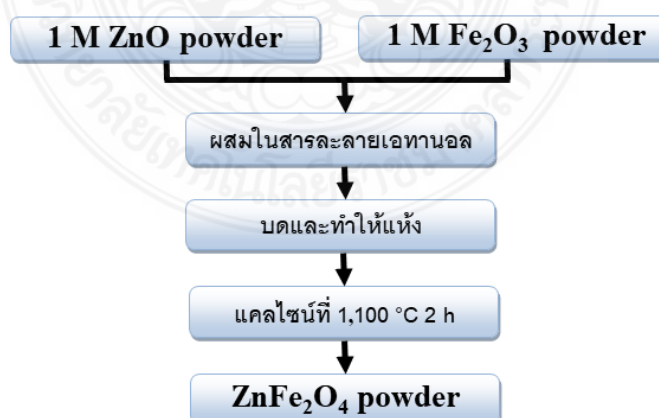
นำผง calcium-deficient hydroxyapatite มาอัดเป็นเม็ดโดยกำหนดสัดส่วนปริมาณในการอัด 1 เม็ด ต่อ 1 กรัม แล้วเทผงลงในโมลอัด นำมาขึ้นรูปแบบแกนเดียว พอทำการอัดชิ้นงานแล้วปล่อยให้ชิ้นงานที่ถูกอัดไว้ประมาณ 20-30 วินาที เพื่อให้ผงมันอัดกันแน่นเป็นก้อนแล้วค่อยนำชิ้นงานออกมาแล้วนำมาเผาขึ้นเตาที่อุณหภูมิ 700-1,100 °C ดังสรุปภาพรวมในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

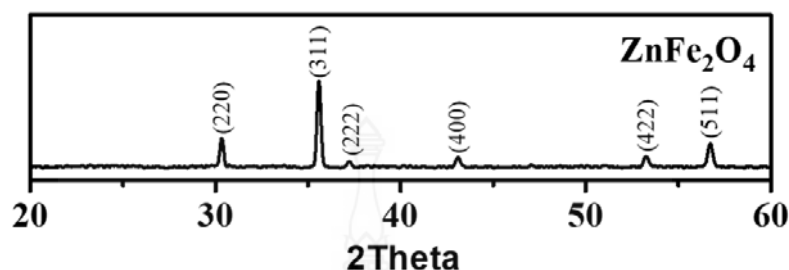
3.5 การเตรียมซิงค์เฟอร์ไรต์

การเตรียมซิงค์เฟอร์ไรต์ (ZnFe_2O_4) จากปฏิกิริยาสถานะของแข็ง เริ่มจากนำผงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มาผสมกันด้วยอัตราส่วน 1:1 ในสารละลายเอทานอล (ethanol) ดังรูปที่ 3.4 แล้วนำไปใส่ในกระบอกสแตนเลสที่บรรจุลูกบอลสแตนเลส จากนั้นนำไปติดตั้งในเครื่องผสม แล้วผสมเป็นเวลา 10 นาที เมื่อผสมกันเสร็จแล้ว นำผงของสารประกอบไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 2 h ซึ่งจะได้เป็นสารประกอบซิงค์เฟอร์ไรต์ (ZnFe_2O_4)



รูป 3.4 การเตรียมสารประกอบซิงค์เฟอร์ไรต์

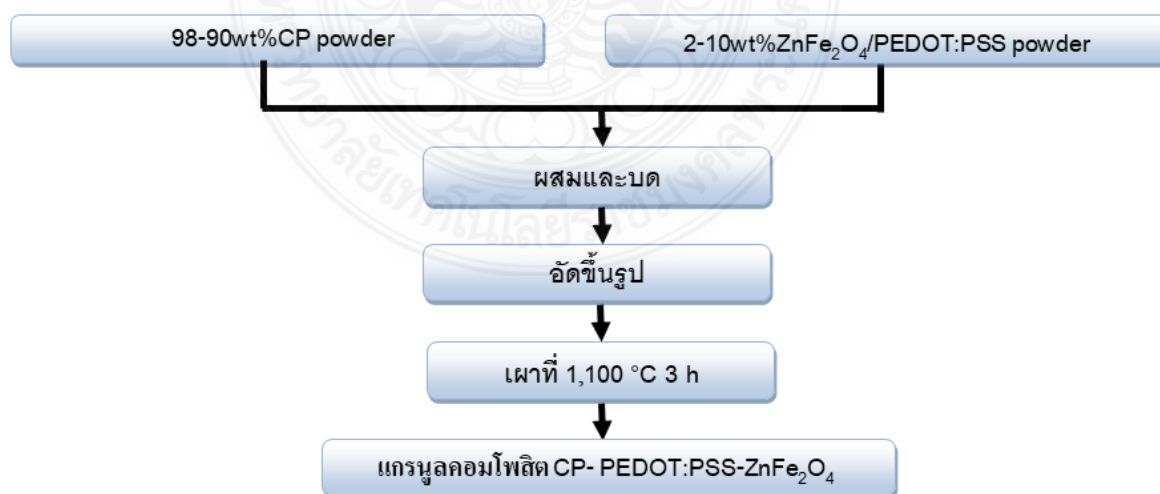
การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซิงค์เฟอร์ไรท์ที่เตรียมขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.5 โดยแสดงเอกลักษณ์เฉพาะของผลึกซิงค์เฟอร์ไรท์บริสุทธิ์ที่มีความเป็นผลึกของซิงค์เฟอร์ไรท์สูง และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไม่แสดงพีคอื่นๆ ที่แสดงโครงสร้างของสารประกอบอื่นๆ แสดงว่าผงซิงค์เฟอร์ไรท์ที่สังเคราะห์ขึ้น เป็นผลึกซิงค์เฟอร์ไรท์ที่มีโครงสร้างบริสุทธิ์ไม่มีสารประกอบอื่นปนเปื้อน



รูปที่ 3.5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของผงซิงค์เฟอร์ไรท์

3.6 การเตรียมแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄

การเตรียมแกรนูลคอมโพสิตของแคลเซียมฟอสเฟต (CP) พอลิเอทิลีนไดออกซีโรออฟิน-พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (PEDOT:PSS) และซิงค์เฟอร์ไรท์ (ZnFe₂O₄) เริ่มจากนำผง CP มาผสมกับ ZnFe₂O₄ และ PEDOT:PSS ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน โดยกำหนดอัตราส่วนของ ZnFe₂O₄/PEDOT:PSS ใน CP ที่ 2, 4, 6, 8 and 10wt% จากนั้นนำผงใส่ลงไปในกระบอกสแตนเลสที่บรรจุลูกบอลสแตนเลสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm โดยกำหนดให้อัตราส่วนของผงกับลูกบอลเป็น 1:10 แล้วนำไปติดตั้งในเครื่องผสมแล้วผสมเป็นเวลา 10 นาที นำผงคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ที่ได้ไปอัดให้เป็นชิ้นงานด้วยวิธีอัดแกนเดียวแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,100 °C เป็นเวลา 3 h ดังรูปที่ 3.6

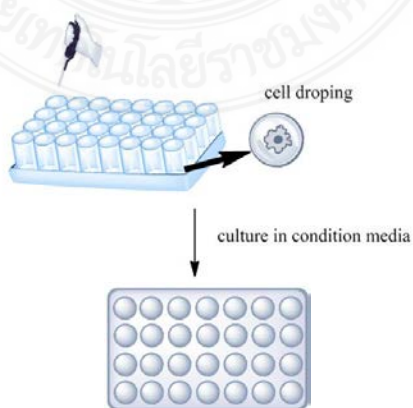


รูป 3.6 การเตรียมแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄

3.7 การศึกษาความเป็นพิษของวัสดุต่อเซลล์ ด้วยวิธี MTT assay

เซลล์ที่ใช้ในการทดสอบในการทดลองนี้คือ เซลล์ไฟโบรบลาสต์จากเหงือกมนุษย์ (Human gingival- fibroblast; HGF) เมื่อสกัดเซลล์ได้จากเนื้อเยื่อเหงือกมนุษย์แล้ว จะนำเซลล์เหล่านั้นมาเพาะเลี้ยงในฟลาस्कที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อ (culture flask) ที่มีอาหารเลี้ยงเซลล์อยู่ และจะถูกควบคุมในตู้เพาะเลี้ยงเซลล์ที่อุณหภูมิ 37 °C และมีการกำหนดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งระหว่างการเพาะเลี้ยงนั้นจะเปลี่ยนอาหารเลี้ยงเซลล์ แบบวันเว้นวัน โดยจะเลี้ยงเซลล์จนกระทั่งเพิ่มจำนวนมากพอที่จะใช้ในการทดสอบ และเลี้ยงจนถึงรุ่นที่ 6 (6th passage)

สำหรับการทดสอบนี้จะตรวจสอบความเป็นพิษของแกรนูโลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ สัดส่วน ต่างๆ ได้แก่ 2, 4, 6, 8 และ 10wt % ซึ่งนิยามสัญลักษณ์เป็น 2wt%CP, 4wt%CP, 6wt%CP, 8wt%CP และ 10wt%CP ตามลำดับ รูปแบบการทดสอบความเป็นพิษของวัสดุต่อเซลล์แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยเตรียมให้อยู่ในรูปสารละลายที่มีความเข้มข้น 0.5 และ 3 mg/ml โดยใช้เวลาทดสอบ 24 และ 48 h เริ่มต้นนำสารแต่ละเงื่อนไขมาใส่ในถาดหลุมเลี้ยงเซลล์ชนิด 24 หลุม (24-well-plate) และฆ่าเชื้อโรคด้วยวิธีการอบแก๊ส จากนั้นผสมผงสารใน culture medium ให้เข้ากันเป็นเวลา 1 h ก่อนดูด culture medium ไปเลี้ยงเซลล์ที่เพาะเลี้ยงไว้ล่วงหน้า โดยใช้เซลล์จำนวนตั้งต้น 30,000 เซลล์ต่อหลุม บ่มเซลล์เป็นเวลา 24 และ 48 h ในตู้ CO₂ incubator ที่มี 5% CO₂ อุณหภูมิ 37 °C จากนั้นดูดสารละลายจากหลุมออก 1 ml เติม MTT ปริมาณ 0.5 ml/well (ความเข้มข้น 0.7 mg/ml) ลงในทุกหลุม หลุมละ 50 µl บ่มในที่มืด 30 นาที ในเครื่อง CO₂ Incubator จากนั้นเทสารละลายทุกหลุมทิ้ง แล้วคว่ำลงบนกระดาษทิชชู รอสีตกจนแห้ง เติม DMSO ปริมาณ 0.8 ml ลงในทุกหลุม หลุมละ 1 ml ผสมโดยดูด-ปล่อย DMSO ขึ้นลง ด้วยปิเปต แล้วบ่มในที่มืด 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายจากแต่ละหลุม มาใส่หลอดแก้ว cuvette แล้ววัดค่า OD (optical density) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ค่าความยาวคลื่น 570 nm เพื่อคำนวณหา %cell viability (เปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเซลล์)



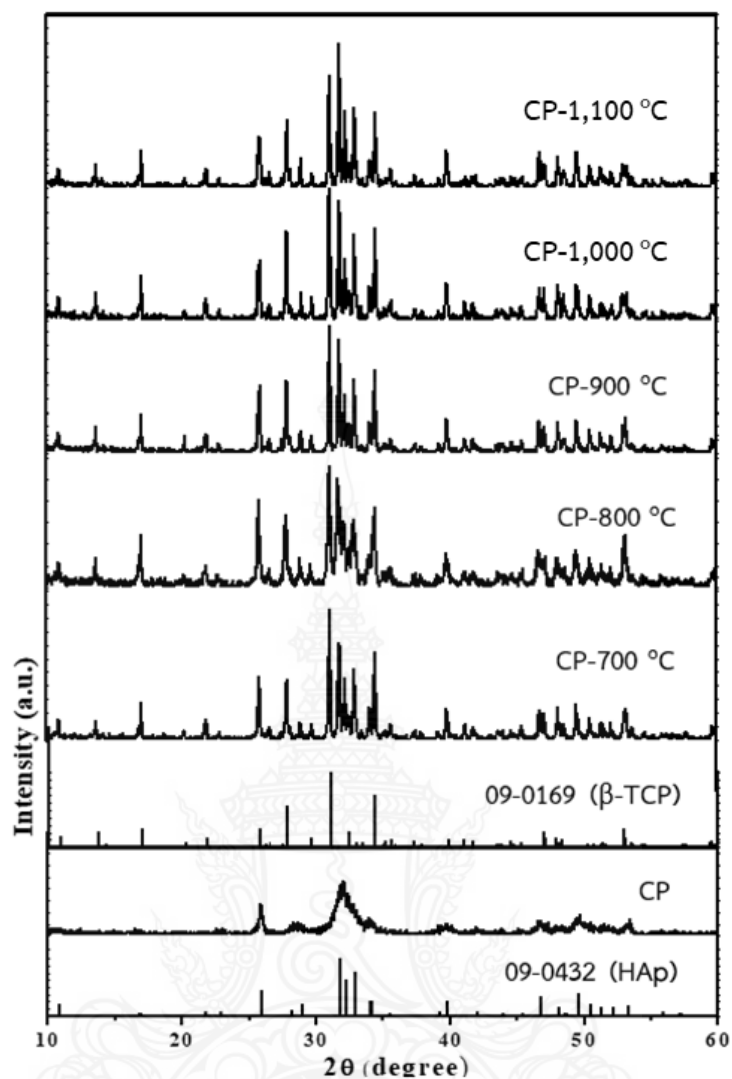
รูป 3.7 รูปแบบการทดสอบความเป็นพิษของวัสดุต่อเซลล์

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

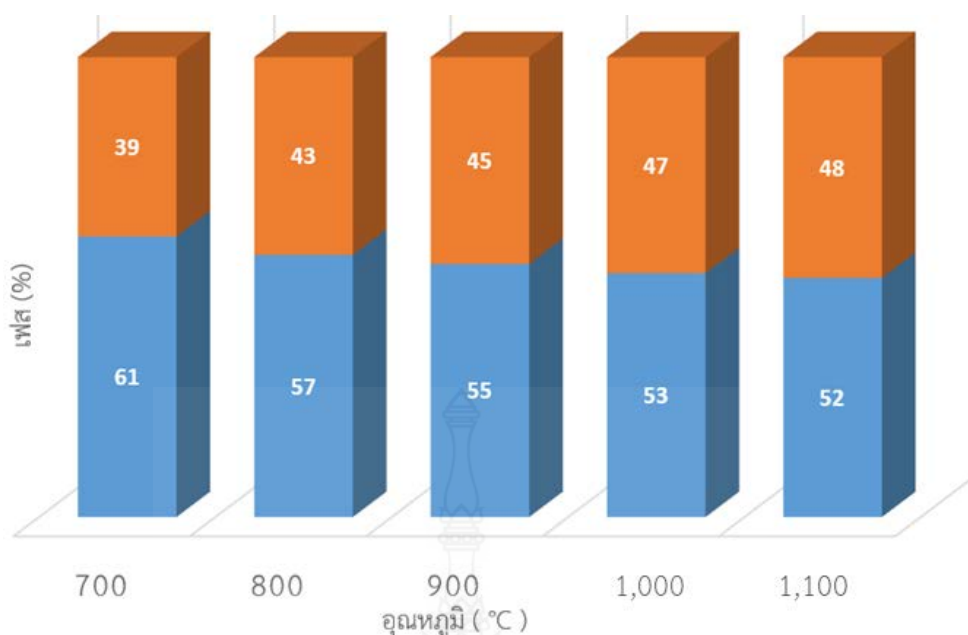
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต

รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟตก่อน และหลัง การเผาแคลไซน์ในบรรยากาศปกติช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เป็นเวลา 3 h สารประกอบ แคลเซียมฟอสเฟตที่สัดส่วนโมลาร์ของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.6 จะเรียกว่า calcium deficient hydroxyapatite (Ca-dHAp) ซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกของสารประกอบแคลเซียม ฟอสเฟต (CP) ก่อนการแคลไซน์โดยจะแสดงเอกลักษณ์เฉพาะของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์บริสุทธิ์ ซึ่งสอดคล้องตาม JCPDS file number 09-0432 โดยแสดงพีคเอกลักษณ์ของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่สำคัญบนระนาบต่างๆ ได้แก่ ระนาบ (002), (102), (201), (211), (112), (300), (202), (130), (222), (132), (213), (321), (140), (402) และ (004) และมีความเป็นผลึกที่น้อย เมื่อทำการเผาแคลไซน์ ในช่วงอุณหภูมิ 700 °C พบว่าเปลี่ยนเฟสจาก Calcium deficient hydroxyapatite (Ca-dHAp) เป็นเฟสผสมระหว่างเฟสไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) และเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) โดยเอกลักษณ์เฉพาะของผลึกเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) บริสุทธิ์ จะสอดคล้องตาม JCPDS file number 09-0169 ซึ่งแสดงพีคที่สำคัญบนระนาบต่างๆ ได้แก่ ระนาบ (104), (202), (300), (0210), (220) และ (404) นอกจากนั้นเมื่อทำการเผาแคลไซน์ในอุณหภูมิที่ระดับสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 1,100 °C พบว่า ความเข้มของพีคหลักของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) มีค่าลดลงตามลำดับ



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตก่อน และหลังการเผาแคลไซน์ในบรรยากาศปกติช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เป็นเวลา 3 h

รูปที่ 4.2 แสดงสัดส่วนเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) และเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ในสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เผาแคลไซน์ในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เวลา 3 h โดยพบว่าสัดส่วนเฟสของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) มีค่าเป็น 61, 57, 55, 53 และ 52 เมื่ออุณหภูมิการเผาแคลไซน์เพิ่มขึ้นจาก 700 ถึง 1,100 °C ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 สัดส่วนเฟสของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) และเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-TCP) ในสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เผาแคลไซน์ในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เวลา 3 h

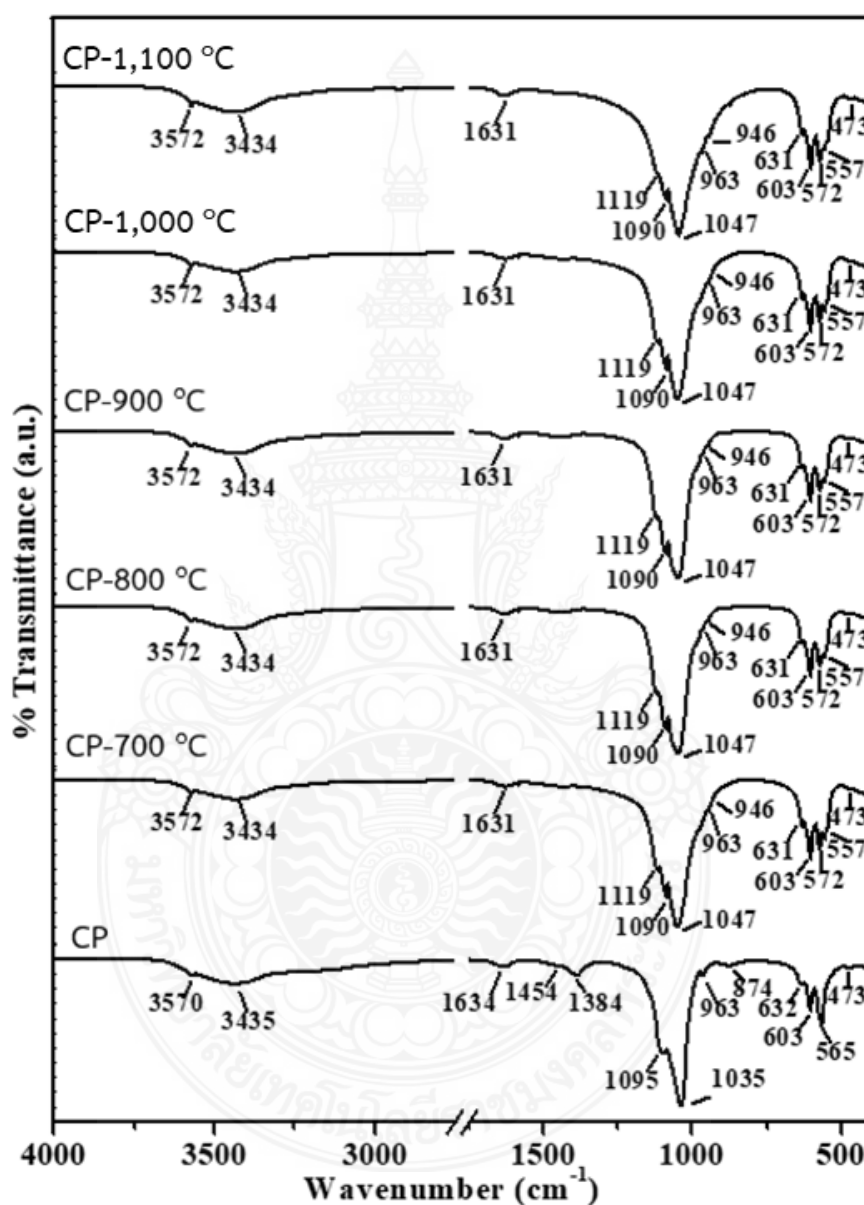
เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะพบว่าสัดส่วนของเฟสเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-TCP) ลดลง ซึ่งอาจเนื่องมาจาก กลไกการแพร่กระจายของสถานะของแข็ง (solid-state diffusion) และการเกิดผลึกใหม่ (recrystallization) ของสารประกอบ BCP ระหว่างกระบวนการเผาแคลไซน์ โดยไอออน Ca^{2+} และ OH^- จะถูกปล่อยออกมามากขึ้นจากโครงสร้างผลึกของ HAp เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและไอออนเหล่านี้จะแพร่เข้าสู่โครงสร้างของ β-TCP และเปลี่ยนเฟสไปเป็น HAp ดังสมการที่ 6



4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต

เมื่อพิจารณาอินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตก่อน และหลังการเผาแคลไซน์ในบรรยากาศปกติช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เป็นเวลา 3 h ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.1 พบว่าตำแหน่งเลขคลื่น (wave numbers) หลักของสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตก่อนเผาแคลไซน์จะแสดงหมู่ฟังก์ชัน HPO_4^{2-} ที่ตำแหน่ง 874 and 1095 cm^{-1} ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ที่ สอดคล้องกับเฟส Ca-dHAp นอกจากนั้น หมู่ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) และเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β-TCP) ที่อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ตั้งแต่ 700 ถึง 1,100 °C จะแสดง

ตำแหน่งดังนี้คือ ที่ตำแหน่ง 565-572, 603, 963 และ 1035-1095 cm^{-1} แสดงหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-} group) พีคเล็กๆ ที่ตำแหน่ง 874-1454 cm^{-1} แสดงหมู่คาร์บอเนต (CO_3^{2-} group) หมู่ไฮดรอกซิล (OH^- group) จะแสดงตำแหน่งพีคที่ประมาณเลขคลื่น 3570 cm^{-1} และ 631-632 cm^{-1} ในส่วนของตำแหน่งเลขคลื่นในช่วง 1631-1634 cm^{-1} และ 3434-3435 cm^{-1} จะสอดคล้องกับตำแหน่งการดูดซับความถี่ของผลึกไฮดรอกซีอะพาไทต์ และหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-} group) ที่แสดงโครงสร้างของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) จะแสดงพีคที่ตำแหน่ง 557, 946, 1119 cm^{-1} ตามลำดับ



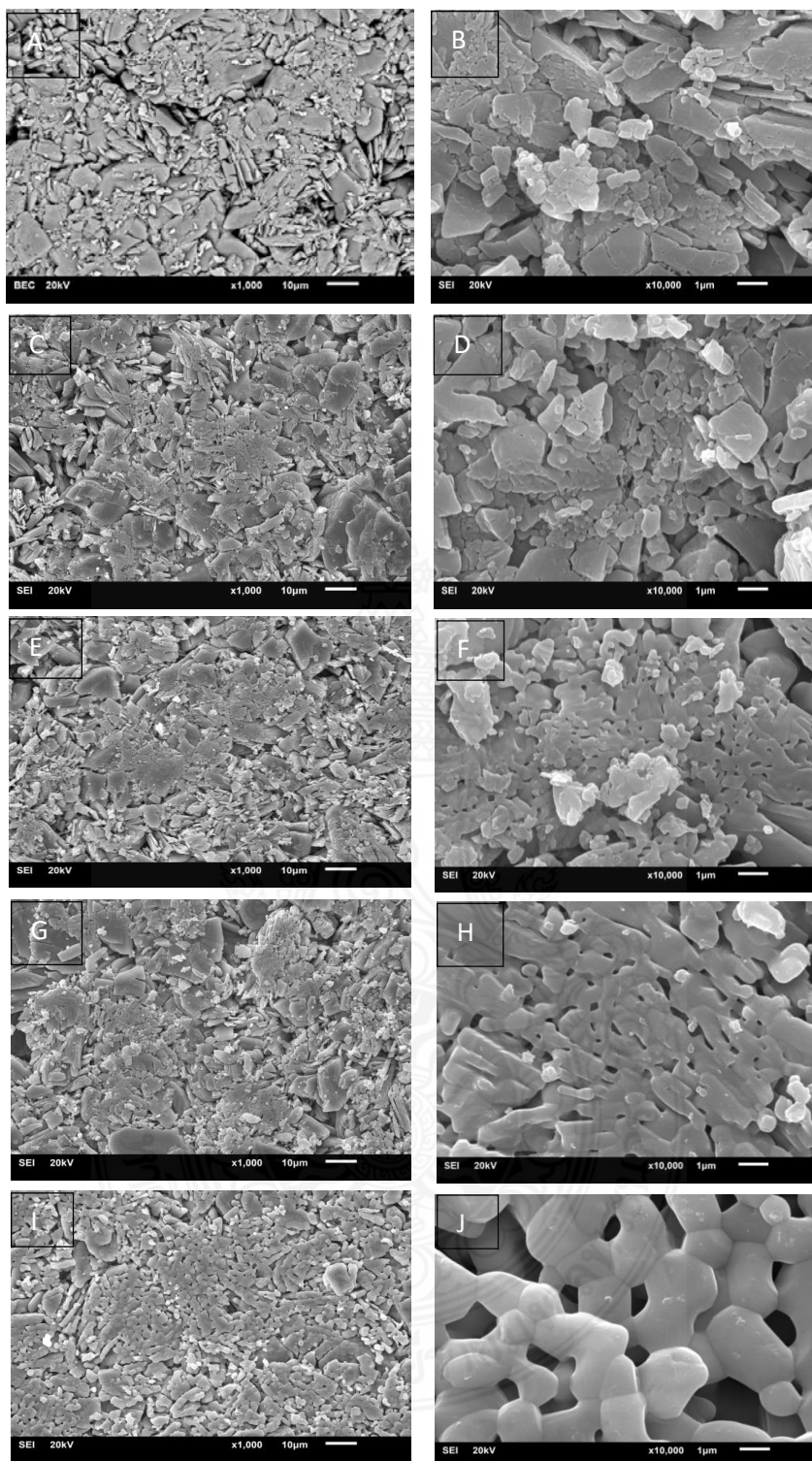
รูปที่ 4.3 อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบไบฟาสิกแคลเซียมฟอสเฟตก่อน และหลังการเผาแคลไซน์ในบรรยากาศปกติช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เวลา 3 h

ตารางที่ 4.1 แสดงตารางแสดงธาตุหมู่ฟังก์ชันของไฮดรอกซีอะพาไทต์ (HAp) และเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต (β -TCP) ในสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่เผาแคลไซน์ในช่วงอุณหภูมิ 700 ถึง 1,100 °C เวลา 3 h ตามลำดับ

หมู่ฟังก์ชัน	ช่วงความยาวคลื่น					
	CP	CP 700 °C	CP 800 °C	CP 900 °C	CP 1,000 °C	CP 1,100 °C
PO_4^{3-} ของ β -TCP	-	557	557	557	557	557
PO_4^{3-} bend U_4	565	572	572	572	572	572
PO_4^{3-} bend U_4	603	603	603	603	603	603
Structural OH^-	632	631	631	631	631	631
CO_3^{2-} group	874	946	946	946	946	946
HPO_4^{2-}	874	-	-	-	-	-
PO_4^{3-} ของ β -TCP	-	946	946	946	946	946
PO_4^{3-} stretch U_1	963	963	963	963	963	963
PO_4^{3-} bend U_3	1035	1047	1047	1047	1047	1047
PO_4^{3-} bend U_3	1095	1090	1090	1090	1090	1090
HPO_4^{2-}	1095	1090	1090	1090	1090	1090
PO_4^{3-} ของ β -TCP	-	1119	1119	1119	1119	1119
CO_3^{2-} group (U_3)	1384	-	-	-	-	-
CO_3^{2-} group (U_3)	1454	-	-	-	-	-
H_2O adsorbed (U_2)	1634	1631	1631	1631	1631	1631
H_2O adsorbed	3435	3434	3434	3434	3434	3434
Structural OH^-	3570	3572	3572	3572	3572	3572

4.3 สันฐานวิทยาของแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต

รูปที่ 4.4 แสดงสันฐานวิทยาของแกรนูลแคลเซียมฟอสเฟต โดย (A, B) ที่อุณหภูมิ 700 °C (C, D) ที่อุณหภูมิ 800 °C (E, F) ที่อุณหภูมิ 900 °C (G, H) ที่อุณหภูมิ 1,000 °C (I, J) ที่อุณหภูมิ 1,100 °C ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดเกรนมีแนวโน้มเล็กลง นอกจากนั้น ลักษณะโครงสร้างมีความพรุนมากขึ้นและมีการเชื่อมโยงกันดีระหว่างรูพรุน ซึ่งลักษณะรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างจะเป็นช่องทางในการส่งผ่านส่วนประกอบอินทรีย์ต่างๆ และเพิ่มพื้นผิวสัมผัสในการยึดเกาะของเซลล์ให้สูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตที่ดีของเซลล์

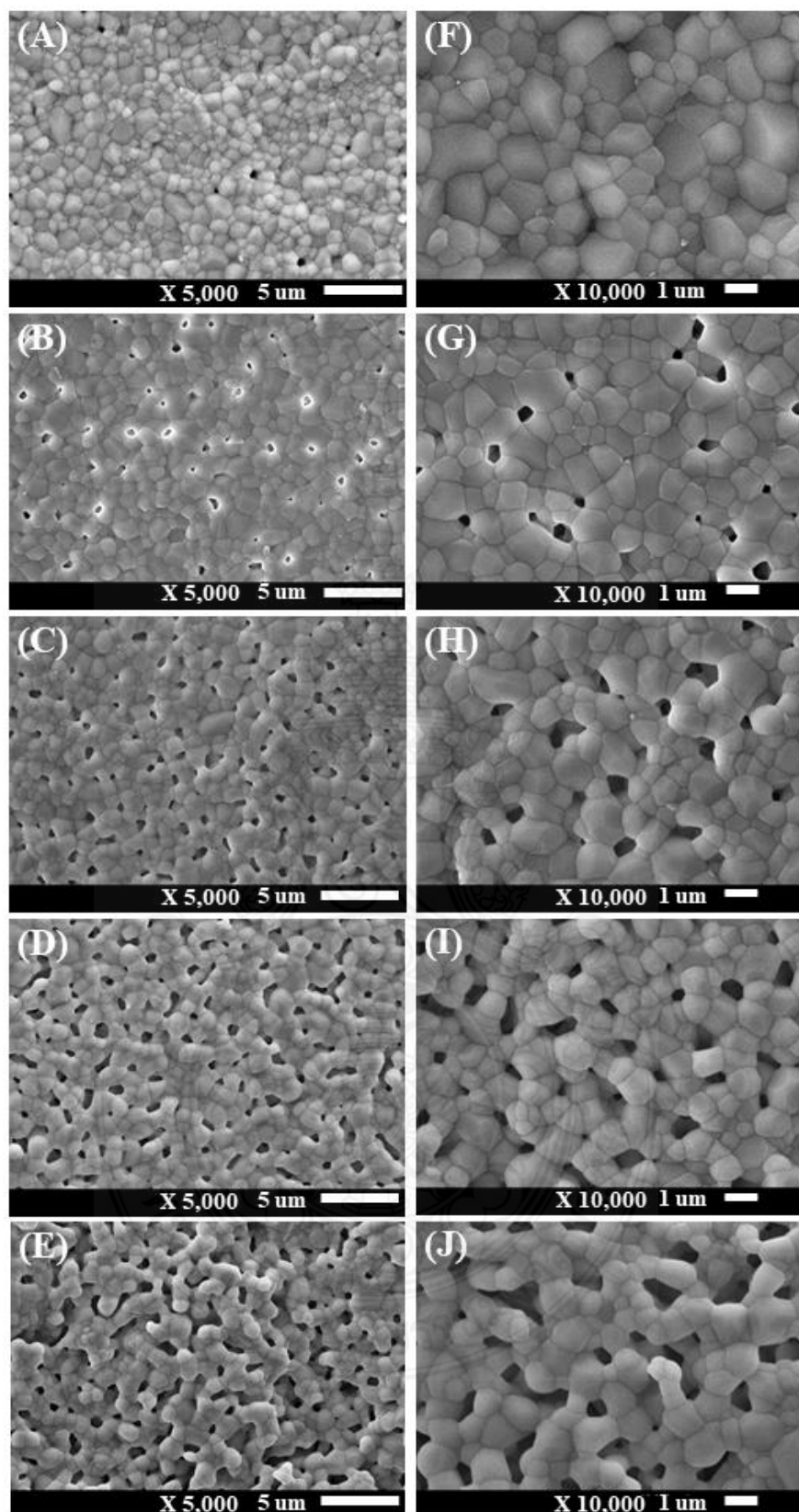


รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของชิ้นงาน (A, B) ที่อุณหภูมิ 700 °C (C, D) ที่อุณหภูมิ 800 °C (E, F) ที่อุณหภูมิ 900 °C (G, H) ที่อุณหภูมิ 1,000 °C (I, J) ที่อุณหภูมิ 1,100 °C ที่กำลังขยาย $\times 1,000$ และ $\times 10,000$ ตามลำดับ

4.4 สัณฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄

สัณฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ แสดงในรูปที่ 4.5 โดยพบว่าขนาดเกรนหลักอยู่ในระดับนาโนเมตรระหว่าง 600 จนถึง 900 นาโนเมตร และมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของ PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ใน CP ที่เพิ่มขึ้นจาก 2 จนถึง 10wt% นอกจากนี้ยังพบโครงสร้างรูพรุนระดับไมโครเมตรขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2 ไมโครเมตร จากภาพรวมของสัณฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ สรุปได้ว่าเซรามิกคอมโพสิตมีโครงสร้างระดับนาโนเมตร จึงสามารถเหนี่ยวนำการยึดเกาะของเซลล์และอันตรกิริยาของเซลล์ได้ดีเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง และสนับสนุนการเพิ่มจำนวนและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ได้ดี [15, 16]





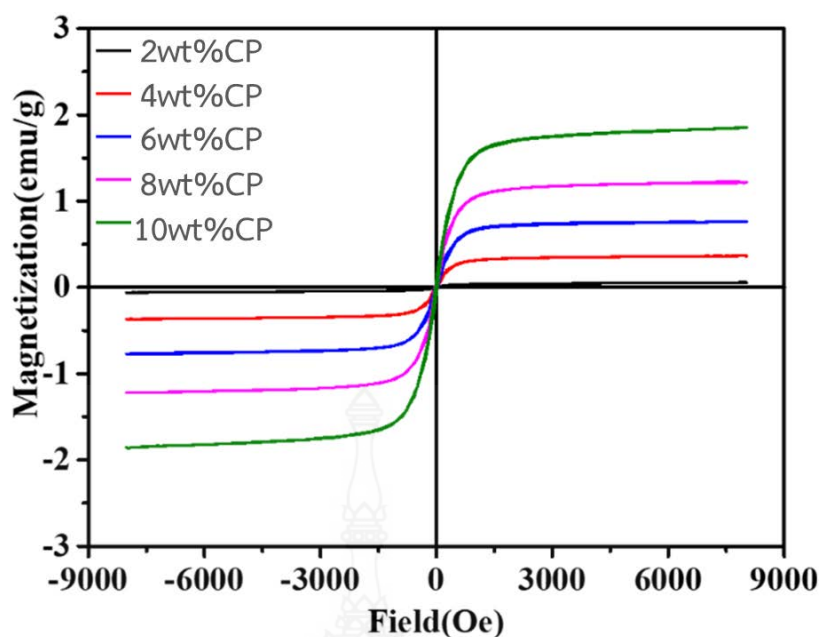
รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ที่สัดส่วน PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ (A, F) 2wt% (B, G) 4wt% (C, H) 6wt% (D, I) 8wt% และ (E, J) 10wt% ใน CP ต่าง ๆ กำลังขยาย x5,000 และ x10,000

4.5 สมบัติแม่เหล็กและไฟฟ้าของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄

รูปที่ 4.6 แสดงฮิสเทอรีซิสลูปของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ที่อัตราส่วน PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ต่าง ๆ และตารางที่ 4.2 สรุปค่าการอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็ก (Saturation magnetization; M_s) และ ค่าลบล้างความเป็นแม่เหล็ก (Coercivity; H_c) โดยพบว่าค่า M_s เพิ่มขึ้นจาก 0.06 จนถึง 1.88 emu/g เมื่อ PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ใน CP ที่เพิ่มขึ้นจาก 2 จนถึง 10wt% ตามลำดับ อธิบายได้จากการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (Unpaired electrons) ซึ่งเป็นผลให้โมเมนต์แม่เหล็กโดยรวม (total magnetic moments) เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่า H_c ที่ลดจาก 44.05 Oe สู่ 24.14 Oe โดยสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงนี้จากการที่ขนาดของวัสดุแม่เหล็กลดลงอยู่ในระดับนาโนเมตร ก็จะเหลือเพียงโดเมนเดี่ยว (Single domain) ในอนุภาค ที่ทำให้อันไอโซโทปของแม่เหล็กดั้งเดิม (Local magnetic anisotropy) อ่อนอำนาจลง ส่งผลต่อการลดลงของค่า H_c ในวัสดุแม่เหล็กที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร [15]

ค่า M_s ของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ที่เตรียมขึ้นการงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ Wakiya (2010) และ Zeng (2012) จากงานวิจัยของ Zeng ได้เปรียบเทียบพฤติกรรมทางชีวภาพระหว่างโครงร่างเลี้ยงเซลล์ของคอมโพสิตวัสดุแม่เหล็กกับ HAp และโครงร่างเลี้ยงเซลล์ของ HAp โดยพบว่าสามารถเหนี่ยวนำการยึดเกาะของเซลล์ การเพิ่มจำนวนของเซลล์ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ได้ดีกว่า โครงร่างเลี้ยงเซลล์ของ HAp ยิ่งไปกว่านั้น โครงร่างเลี้ยงเซลล์ของคอมโพสิตวัสดุแม่เหล็กกับ HAp ยังสามารถตอบสนองต่อการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กภายนอกได้ดีกว่า ดังนั้นจึงสามารถบ่งบอกได้ว่า แกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ที่เตรียมขึ้นการงานวิจัยนี้ ถึงจะมีค่า M_s ที่ไม่สูงแต่ก็มีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมเนื้อเยื่อกระดูก และสามารถควบคุมค่า M_s จากการเพิ่มสัดส่วนของ PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ใน CP

จากการเติม PEDOT:PSS ในแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ในสัดส่วนที่น้อยจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhattacharjee Ahearne (2020) ซึ่งจะสามารถปรับปรุงการนำไฟฟ้าได้ และมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อคุณสมบัติของวัสดุอื่นๆ และพฤติกรรมของเซลล์ที่มีต่อวัสดุนั้น



รูปที่ 4.6 ฮิสเทอรีซิสลูปของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ที่สัดส่วน PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ใน CP ที่เพิ่มขึ้นจาก 2 จนถึง 10wt% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าการอิ่มตัวของวัสดุแม่เหล็ก (Saturation magnetization; M_s) และ ค่าลบล้างความเป็นแม่เหล็ก (Coercivity; H_c) ของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ที่ PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ต่าง ๆ

wt%PEDOT-PSS-ZnFe ₂ O ₄	H_c (Oe)	M_s (emu/g)
2	44.05	0.06
4	36.19	0.38
6	34.40	0.77
8	29.33	1.25
10	24.14	1.88

4.6 การตรวจสอบความเป็นพิษของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄

การทดสอบความเป็นพิษของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ที่อัตราส่วน PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ จาก 2 จนถึง 10wt% ตามลำดับ ภายใต้เงื่อนไขความเข้มข้นของคอมโพสิต 0.5 และ 3 mg/ml ระยะเวลาที่เซลล์สัมผัสกับสิ่งที่ทดสอบเป็นเวลา 24 และ 48 h โดยพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ความอยู่รอดของเซลล์ สามารถสรุปดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

จากผลการตรวจสอบพบว่า แกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ ไม่มีความเป็นพิษ ภายใต้การตรวจสอบทางสถิติทั้งวิธีของดันแคน (Duncan's multiple range test) และ วิธีของเชฟเฟ (Scheffe') ซึ่งเป็นสถิติที่ถูกใช้เพื่อทดสอบค่าเฉลี่ยของความยู่รอดของเซลล์ของกลุ่มตัวอย่างทดสอบว่ามีความแตกต่างกับกลุ่มตัวอย่างควบคุมหรือไม่ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า แกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS-ZnFe₂O₄ สามารถเข้ากับเนื้อเยื่อร่างกายได้โดยไม่ก่อให้เกิดการแพ้ หรืออักเสบกับเนื้อเยื่อ

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดค่า Optical density ที่ระยะเวลาเซลล์สัมผัสกับสิ่งทดสอบ 24 h

Sample	OD1	OD2	OD3	ค่าเฉลี่ย OD	อัตราค่าเฉลี่ย OD /Control OD
2wt%CP 0.5 mg/ml	0.254	0.235	0.235	0.241	0.818
2wt%CP 3 mg/ml	0.251	0.234	0.238	0.241	0.817
4wt%CP 0.5 mg/ml	0.222	0.221	0.228	0.224	0.758
4wt%CP 3 mg/ml	0.242	0.236	0.233	0.237	0.803
6wt%CP 0.5 mg/ml	0.242	0.248	0.244	0.245	0.829
6wt%CP 3 mg/ml	0.238	0.241	0.233	0.237	0.805
8wt%CP 0.5 mg/ml	0.240	0.249	0.254	0.248	0.840
8wt%CP 3 mg/ml	0.233	0.236	0.231	0.233	0.791
10wt%CP 0.5 mg/ml	0.219	0.229	0.220	0.223	0.755
10wt%CP 3 mg/ml	0.238	0.230	0.235	0.234	0.794
Control	0.297	0.290	0.298	0.295	1.000

ตารางที่ 4.4 ผลการวัดค่า Optical density ที่ระยะเวลาเซลล์สัมผัสกับสิ่งทดสอบ 48 h

Sample	OD1	OD2	OD3	ค่าเฉลี่ย OD	อัตราค่าเฉลี่ย OD /Control OD
2wt%CP 0.5 mg/ml	0.356	0.353	0.328	0.346	0.903
2wt%CP 3 mg/ml	0.351	0.352	0.322	0.342	0.892
4wt%CP 0.5 mg/ml	0.341	0.358	0.320	0.340	0.887
4wt%CP 3 mg/ml	0.357	0.346	0.327	0.343	0.896
6wt%CP 0.5 mg/ml	0.354	0.322	0.314	0.330	0.862
6wt%CP 3 mg/ml	0.332	0.314	0.298	0.315	0.822
8wt%CP 0.5 mg/ml	0.372	0.355	0.346	0.358	0.934
8wt%CP 3 mg/ml	0.394	0.393	0.405	0.397	1.037
10wt%CP 0.5 mg/ml	0.358	0.351	0.346	0.352	0.918
10wt%CP 3 mg/ml	0.356	0.361	0.347	0.355	0.926
Control	0.388	0.385	0.377	0.383	1.000

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย

ในการวิจัยนี้แกรนูลคอมโพสิตของแคลเซียมฟอสเฟต (CP) พอลิเอทิลีนไดออกซีไรออฟีน-พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (PEDOT:PSS) และซิงค์เฟอร์ไรท์ (ZnFe_2O_4) สามารถเตรียมได้จากกระบวนการการผสมเชิงกล การอัดแกนเดี่ยว และการเผาซินเทอริงแบบปราศจากแรงดัน CP ถูกเตรียมที่สัดส่วนโมลาร์ของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 1.6 ซึ่งเรียกว่า calcium deficient hydroxyapatite (Ca-dHAp) โดยเมื่อทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 700°C จะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงเฟสจาก Ca-dHAp เป็นเฟสผสมระหว่างเฟสไฮดรอกซีอะพาไทต์และเฟสเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต นอกจากนั้นเมื่อเผาแคลไซน์ในอุณหภูมิที่สูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิ $1,100^\circ\text{C}$ โดยจะพบว่าความเข้มของพีคหลักของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟต มีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนเฟสของเบต้าไตรแคลเซียมฟอสเฟตตามลำดับ สันฐานวิทยาของแกรนูลคอมโพสิต CP-PEDOT-PSS- ZnFe_2O_4 มีขนาดเกรนหลักอยู่ในระดับนาโนเมตรและมีโครงสร้างแบบรูพรุน และจากการปรับปรุงทั้งสมบัติแม่เหล็กของแกรนูล CP ด้วย ZnFe_2O_4 และ การปรับปรุงสมบัติไฟฟ้าของแกรนูล CP ด้วย PEDOT:PSS บ่งชี้ได้ว่าสามารถสามารถเข้ากับเนื้อเยื่อร่างกายได้โดยไม่ก่อให้เกิดการแพ้ หรืออักเสบกับเนื้อเยื่อ รวมทั้งมีแนวโน้มที่จะเหนี่ยวนำการยึดเกาะของเซลล์ การเพิ่มจำนวนของเซลล์ และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ได้ดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. Dorozhkin, S.V.: Nanosized and nanocrystalline calcium orthophosphates. *Acta Biomater.* 6, 715-734 (2010).
2. Trombelli, L., Simonelli, A., Pramstraller, M., Wikesjo, U.M.E., Farina, R.: Single flap approach with and without guided tissue regeneration and a hydroxyapatite biomaterial in the management of intraosseous periodontal defects. *J Periodontol.* 81, 1256-1263 (2010).
3. Seol, Y.J., Kim, J.Y., Park E.K., Kim S.Y., Cho, D.W.: Fabrication of a hydroxyapatite scaffold for bone tissue regeneration using microstereolithography and molding technology. *Microelectron Eng.* 86, 1443-1446 (2009).
4. Itokazu, M., Yang, W., Aoki, T., Ohara, A., Kato, N.: Synthesis of antibiotic-loaded interporous hydroxyapatite blocks by vacuum method and in vitro drug release testing. *Biomaterials.* 19, 817-819 (1998).
5. Zahouily, M., Abrouki, Y., Bahlaouan, B., Rayadh, A., Sebti, S.: Hydroxyapatite: new efficient catalyst for the Michael addition. *Catal Commun.* 4, 521-524 (2003).
6. Li, L., Liu, Y., Tao, J., Zhang, M., Pan, H., Xu, X., Tang, R.: Surface modification of hydroxyapatite nanocrystallite by a small amount of terbium provides a biocompatible fluorescent probe. *J. Phys. Chem. C.* 112, 12219-12224 (2008).
7. Mahabole, M., Aiyer, R., Ramakrishna, C., Sreedhar, B., Khairnar, R.: Synthesis, characterization and gas sensing property of hydroxyapatite ceramic. *Bull. Mater. Sci.* 28, 535-545 (2005).
8. Mousa, S.M., Ammar, N.S., Ibrahim, H.A.: Removal of lead ions using hydroxyapatite nano-material prepared from phosphogypsum waste. *J. Saudi Chem Soc* (2015). doi: 10.1016/j.jscs.2014.12.006.
9. Kamalanathan, P., Ramesh, S., Bang, L.T., Niakan, A., Tan, C.Y., Purbolaksono, J., Chandran, Hari., Teng, W.D.: Synthesis and sintering of hydroxyapatite derived from eggshells as a calcium precursor. *Ceram. Int.* 40, 16349-16359 (2014).
10. Lee, S.W., Kim, S.G., Balázsi, C., Chae, W.S., Lee, H.O.: Comparative study of hydroxyapatite from eggshells and synthetic hydroxyapatite for bone regeneration. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 113, 348-355 (2012).

11. Panseri, S., Cunha, C., Alessandro, T.D., Sandri, M., Russo, A., Giavaresi, G., Marcacci, M., Hung, C.T., Tampieri, A.: Magnetic hydroxyapatite bone substitutes to enhance tissue regeneration: evaluation in vitro using osteoblast-like cells and in vivo in a bone defect. *PLoS One* (2012). doi:10.1371/journal.pone.0038710.
12. Panseri, S., Russo, A., Giavaresi, G., Sartori, M., Veronesi, F., Fini, M., Salter, D.M., Ortolani, A., Strazzari, A., Visani, A.: Innovative magnetic scaffolds for orthopedic tissue engineering. *J. Biomed. Mater. Res A*. 100, 2278-2286 (2012).
13. Zeng, X.B., Hu, H., Xie, L.Q., Lan, F., Jiang, W., Wu, Y., Gu, Z.W.: Magnetic responsive hydroxyapatite composite scaffolds construction for bone defect reparation. *Int. J. Nanomed.* 7, 3365-3378 (2012).
14. Tampieri, A., D'Alessandro, T., Sandri, M., Sprio, S., Landi, E., Bertinetti, L., Panseri, S., Pepponi, G., Goettlicher, J., Bañobre-López, M., Rivas, J.: Intrinsic magnetism and hyperthermia in bioactive Fe-doped hydroxyapatite. *Acta Biomater.* 8, 843-851 (2012).
15. Lin, K.S., Adhikari, A.K., Tsai, Z.Y., Chen, Y.P., Chien, T.T., Tsai, H.B.: Synthesis and characterization of nickel ferrite nanocatalysts for CO₂ decomposition. *Catal. Today*. 174, 88-96 (2011).
16. Sezgin, N., Sahin, M., Yalcin, A., Koseoglu, Y.: Synthesis, characterization and the heavy metal removal efficiency of MFe₂O₄ (M=Ni, Cu) nanoparticles. *Ekoloji* 22, 89-96 (2013).



รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยย่อยที่ 2

การประดิษฐ์แก้วเซรามิกทันตกรรมระบบลิเทียมไดซิลิเกต/ลูไซต์โดยใช้ซิลิกา
จากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น

Fabrication of Dental Glass-ceramic Based Lithium Disilicate/
Leucite Glass Systems using Silica from Rice Husk Ash
as Raw Material

โดย

นางสาววิไลวรรณ สีนะกุล
นางสาวปรารณา อินตะวิน
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
เดือน มีนาคม ปี พ.ศ. 2566

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (Silica CP) และทำการประดิษฐ์แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากขี้เถ้าแกลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น ด้วยวิธีการหลอมแล้วตกผลึกลงในแก้ว จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางแสง เฟสองค์ประกอบ และสมบัติเชิงกล พบว่าจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ Silica CP พบว่ามีปริมาณร้อยละ SiO_2 สูงถึง 98.4743 ค่า ΔT ซึ่งบ่งบอกถึงความเสถียรของแก้วเซรามิกของชิ้นงาน CPGC และ AGGC คือ 58 และ 93 °C ตามลำดับ ชิ้นงาน AGGC และ CPGC มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงประมาณ 8 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงาน AGGC มีความโปร่งแสงเล็กน้อย และชิ้นงาน CPGC มีความทึบแสง จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า ทุกชิ้นงานมีเฟสเสริมแรงลักษณะเป็นแบบเข็ม ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าเป็นผลึกของเฟสลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) ซึ่งกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอในเฟสพื้น และยังพบว่าชิ้นงาน CPGC มีปริมาณรูพรุนมากที่สุด ชิ้นงาน CPGC มีความหนาแน่นน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละความพรุนมากที่สุด ทุกชิ้นงานมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมีเฟสหลักคือ เฟสลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) และมีเฟสรองคือ เฟสลิเทียมซิลิเกต (Li_2SiO_3) แต่ชิ้นงาน CPGC มีเฟสรองอีกหนึ่งเฟสคือ เฟสลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) ซึ่งเป็นเฟสแปลกปลอม ชิ้นงาน CPGC ที่มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าชิ้นงาน AGGC สืบเนื่องมาจาก CPGC สังเคราะห์จาก Silica CP มีความบริสุทธิ์ต่ำ ชิ้นงาน CPGC มีรูพรุนสูง และมีความเสถียรต่ำกว่าชิ้นงาน AGGC จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่า แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิกทางทันตกรรมประเภทอื่น ๆ ยังสามารถเทียบเท่าได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถประดิษฐ์แก้วเซรามิกทางทันตกรรมลิเทียมไดซิลิเกต โดยใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นได้

คำสำคัญ : ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบ, วัสดุทางทันตกรรม, แก้วเซรามิกทางชีวภาพ

Abstract

This research involves the synthesis of silica from rice husk ash through the calcination process (Silica CP) and the fabrication of lithium disilicate glass ceramics using silica synthesized from rice husk ash through the calcination process (CPGC) and silica from analytical grade chemical (AGGC) as starting materials. The process involves melting and quenching into glass, followed by the study of physical properties, chemical composition, optical properties, phase constituents, and mechanical properties. It was found that the chemical composition of Silica CP has a high SiO_2 content of up to 98.4743%. The ΔT values, indicating the stability of the resulting lithium disilicate glass ceramics (CPGC and AGGC), are 58 and 93 °C, respectively. AGGC has an approximate light transmission percentage of 8%, while CPGC has 0%, making AGGC slightly translucent and CPGC opaque. Upon studying the microstructure, it was discovered that all samples exhibited needle-like reinforcement phases, which is indicative of lithium disilicate ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) evenly dispersed in the bulk phase. Additionally, CPGC had the highest number of pores, and it had the lowest density, aligning with the highest porosity percentage. All samples exhibited X-ray diffraction patterns with a major phase being lithium disilicate ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) and a minor phase being lithium silicate (Li_2SiO_3). However, CPGC had an additional minor phase, lithium aluminum silicate ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), which is an impurity phase. CPGC exhibited lower mechanical properties than AGGC due to its lower purity and higher porosity resulting from the synthesis of Silica CP. It had higher porosity and lower stability. Nevertheless, when comparing the mechanical properties of these dental ceramics with other types, they are still comparable. Hence, it is feasible to fabricate lithium disilicate dental ceramics using synthesized silica from rice husk ash as a starting material.

Keywords: silica from rice husk ash, dental materials, bioglass-ceramics

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยในโครงการการประดิษฐ์แก๊วเซรามิกทันตกรรมระบบลิเทียมไดซลิเกต/ลูไซต์โดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น ขอขอบคุณ ทูสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ภายใต้กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัย และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยและมีส่วนช่วยทำให้การดำเนินการสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่อำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และอำนวยความสะดวกในขั้นตอนต่าง ๆ ของการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้คงเป็นประโยชน์สำหรับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และผู้ที่สนใจศึกษาต่อไป

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1.1 แกลบ	4
2.1.2 ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์	5
2.1.3 สมบัติทางเคมีของซิลิกา	6
2.1.4 รูปแบบของซิลิกา	7
2.1.5 การสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการซอล-เจล	9
2.1.6 การสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการแคลไซน์ (Calcination process)	11
2.1.7 แก้ว (Glasses)	11
2.1.8 แก้วเซรามิก	15
2.1.9 การตกผลึก	15
2.1.10 วัสดุทางทันตกรรม	17
2.1.11 แก้วเซรามิกทันตกรรม	18
2.2 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	19
2.2.1 สมบัติทางกายภาพ	19
2.2.2 สมบัติเชิงกล	19
2.2.3 เฟสองค์ประกอบโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)	23
2.2.4 โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5 สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (Differential thermal analysis; DTA)	25
2.2.6 สมบัติทางแสง (Optical property)	27
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 3 วิธีดำเนินการโครงการ	30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	30
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	30
3.3 วิธีการสังเคราะห์ซิลิกา (SiO ₂) จากซีเมนต์	31
3.3.1 กระบวนการแคลไซน์ (Calcination process; CP)	31
3.4 วิธีการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกเคลือบไดซิลิเกต	32
3.4.1 การเตรียมแก้วเคลือบไดซิลิเกต	34
3.4.2 การเตรียมแก้วเซรามิกเคลือบไดซิลิเกต	36
3.5 วิธีการวัดและการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแก้วเซรามิกเคลือบไดซิลิเกต	37
3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (Difference thermal analysis; DTA)	37
3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าความหนาแน่น	37
3.5.3 การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	38
3.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	39
3.5.5 การวิเคราะห์ขนาดและสัดส่วนปริมาณรูพรุน	39
3.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล	40
3.5.7 การตรวจสอบสมบัติความโปร่งแสง (Translucency)	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	43
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสี (X-ray fluorescence ; XRF)	43
4.2 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (DTA)	43
4.3 ลักษณะปรากฏ (Appearance)	45
4.4 ผลการวิเคราะห์ความโปร่งแสง	45
4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	46
4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของชิ้นงาน	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.7 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	48
4.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	57
ประวัติผู้วิจัย	63



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมต่อของ SiO_4 Tetrahedral ในโครงสร้างพื้นฐานของซิลิกา	6
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอสัณฐานซิลิกา	7
รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกา	8
รูปที่ 2.4 โครงสร้าง Crystalline Silica	8
รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการซอล-เจล	10
รูปที่ 2.6 ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก (Crystal structures) ของทรายและแก้วแบบสองมิติ	12
รูปที่ 2.7 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของอะตอมของแก้วหลังจากการทำให้เย็นตัวลงแบบช้า (Slow cool) และแบบเร็ว (Fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน	13
รูปที่ 2.8 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอนทัลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวในการเกิดแก้ว	13
รูปที่ 2.9 ชนิดของการเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation)	16
รูปที่ 2.10 หัวกดและรอยกดแบบวิกเกอร์	20
รูปที่ 2.11 รอยกดแบบนูน	21
รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์	24
รูปที่ 2.13 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	25
รูปที่ 2.14 หลักการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง	26
รูปที่ 2.15 ลักษณะของผลการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential thermal analysis, DTA)	26
รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer)	28
รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์ซิลิกาจากซีเมนต์ด้วยกระบวนการแคลไซน์ (Silica CP)	32
รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตใช้ซิลิกาจากกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น	33
รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งระบบดิจิทัล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง	35
รูปที่ 3.4 เต้าเผาไฟฟ้า	35
รูปที่ 3.5 แผนผังเงื่อนไขอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้วลิเทียมไดซิลิเกต	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงเงื่อนไขของกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่ใช้ในการปลูกผลึกลงในแก้วลิเทียมไดซิลิเกต	36
รูปที่ 3.7 แผนผังการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	37
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (DTA) โดยใช้ผงอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นสารอ้างอิง	44
รูปที่ 4.2 ลักษณะปรากฏของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	45
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงกับความยาวคลื่นของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	46
รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	46
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	47
รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	48
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (E) และสัมประสิทธิ์ความหนาแน่นต่อการแตกหัก (K_{IC}) ของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	49

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ร้อยละของสารประกอบในแกลบข้าว	4
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบขาว (White rice husk ash, WRHA) ขี้เถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash; BRHA)	5
ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานแก้วลิเทียมไดซิลิเกต	34
ตารางที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	36
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา ที่สังเคราะห์จากขี้เถ้าแกลบผ่าน กระบวนการแคลไซน์ (Silica CP) และสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (Silica AG)	43
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) อุณหภูมิเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลง (T_o) อุณหภูมิการตกผลึกขั้นที่ 1 (T_{c1}) อุณหภูมิการตกผลึกขั้นที่ 2 (T_{c2}) อุณหภูมิลอมเหลว (T_m) และ $\Delta T = T_o - T_g$	44
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นและค่าร้อยละความพรุนของชิ้นงาน แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต	48
ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานแก้วเซรามิก ซึ่งได้แก่ ความแข็งแบบวิกเกอร์ ค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น สัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก และดัชนีความเปราะ	50
ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิกทนความร้อนประเภทต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ความแข็งแบบวิกเกอร์และสัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก	50

บทที่ 1

บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และขอบเขตของการศึกษา

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สามารถผลิตข้าวได้เป็นอันดับต้น ๆ ของโลก จะเห็นได้ว่า กลายเป็นวัสดุเหลือจากกระบวนการสีข้าวเปลือกที่มีปริมาณมากในแต่ละปี [1] เมื่อนำกลบมาผ่านกระบวนการเผาจะทำให้เกิดของเสียเป็นซีเถ้ากลบ จึงได้มีความพยายามที่จะนำซีเถ้ากลบไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมโลหะ วัสดุก่อสร้างน้ำหนักเบา สารดูดซับน้ำมัน และสารปรับปรุงดิน แต่ก็มีซีเถ้ากลบอีกจำนวนมากที่ต้องนำไปกำจัดโดยใช้วิธีการฝังกลบทำให้เกิดปัญหามลภาวะ ดังนั้นการใช้ซีเถ้ากลบจึงเป็นการเพิ่มมูลค่าสิ่งที่เหลือใช้อย่างแท้จริง จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของซีเถ้ากลบพบว่า ซีเถ้ากลบมีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 70-90 และออกไซด์ของโลหะ โซเดียม แคลเซียม เหล็ก ตลอดจนธาตุโลหะอีกเล็กน้อย [2] เนื่องจากในซีเถ้ากลบมีปริมาณซิลิกาสูง จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้เป็นแหล่งซิลิกา (Silica source) หรือสารที่ทำให้เกิดแก้ว (Glass former) ได้

ความต้องการใช้ฟันปลอมในทางทันตกรรมในแต่ละปีมีจำนวนมากขึ้น ตามสังคมผู้สูงอายุที่เพิ่มขึ้น แต่ฟันปลอมสำเร็จรูปและวัสดุทำฟันปลอมในประเทศไทยยังไม่สามารถผลิตใช้เองได้ จึงจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมด นอกจากนี้ขนาด และสีฟันก็ไม่ได้เหมาะกับคนไทยอีกด้วย เพื่อลดการนำเข้าและเพิ่มประสิทธิภาพการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมทางการแพทย์ จึงต้องมีการพัฒนาวัสดุทางทันตกรรมเพื่อตอบสนองความต้องการ และการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีที่กำลังจะเกิดขึ้นเพื่อการแข่งขันทางอุตสาหกรรมและคุณภาพชีวิตของคนไทย ความต้องการของวัสดุทันตกรรมในยุคปัจจุบันนี้ นอกจากการคำนึงถึงความคงทนของการใช้งานแล้ว สิ่งที่มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากัน นั่นคือความสวยงามของวัสดุ สำหรับวัสดุทางทันตกรรมที่มีคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ได้แก่ วัสดุเซรามิก เฟลด์สปาร์ ซึ่งเป็นเซรามิกในกลุ่มที่ให้ความสวยคล้ายฟันธรรมชาติ แต่มีข้อเสียในด้านความแข็งแรง จึงต้องมีโครงโลหะเป็นตัวช่วยรับแรง หรือที่เรียกว่า ครอบฟันชนิดโลหะผสมเซรามิก (Porcelain-fused-to-metal crown) ซึ่งเป็นการบูรณะฟันแบบหนึ่งที่ได้รับนิยมนิยมและให้ผลการรักษาดี อย่างไรก็ตาม วัสดุชนิดนี้มีข้อจำกัด คือ มีโครงโลหะภายในจึงเป็นเหตุให้วัสดุขาดความโปร่งแสง จึงไม่สามารถทะลุผ่านออกมาได้ ดังนั้น เมื่อผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลานาน จึงส่งผลให้ตามขอบของชิ้นงานมีสีดำคล้ำ เกิดความไม่สวยงามเหมือนฟันธรรมชาติ อีกทั้งอาจมีการสึกกร่อนของเซรามิกเคลือบผิว ทำให้เห็นรอยต่อของครอบฟันที่เป็นโลหะชัดเจน ซึ่งหากเป็นครอบฟันหน้า

ก็จะเห็นข้อตำหนิน้อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเซรามิกให้มีความแข็งแรงมากขึ้น เพื่อสามารถสร้างตัวครอบฟันที่ไร้โครงโลหะ หรือที่เรียกว่าครอบฟันเซรามิกทั้งซี่ (All-ceramic crown)

วัสดุเซรามิกล้วน (All-ceramic material) เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกนำมาใช้สำหรับงานทันตกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ ไม่เกิดปฏิกิริยาในสภาวะแวดล้อมในช่องปากมีความสวยงามและความแข็งแรง แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตเป็นวัสดุเซรามิกล้วนกลุ่มหนึ่ง ซึ่งนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการทำฟันปลอมชนิดครอบฟันหน้าและสะพานฟัน วัสดุในกลุ่มนี้ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นกลุ่มที่มีคุณสมบัติทางกลที่ดีมาก ผลึกในกลุ่มนี้ได้แก่ ลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_2$) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเหมือนจริงใกล้เคียงฟันธรรมชาติ สำหรับในประเทศไทยวัสดุทางทันตกรรมกลุ่มนี้ยังคงเป็นวัสดุทางการแพทย์ที่ถูกนำเข้าทั้งหมด ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเป็นวัสดุทางการค้า ได้แก่ ไอพีเอส เอ็มเพรสทู ไอพีเอสอีแมคเพรส (IPS Empress II; Ivoclar Vivadent, IPS e.max press) เป็นต้น [3] วัสดุทางการค้ากลุ่มนี้จึงมีราคาที่สูง ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญทำให้ต้นทุนในการรักษามีราคาแพง และเป็นปัญหาที่ส่งผลต่อกลุ่มผู้ป่วยซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วมักจะเป็นกลุ่มผู้สูงอายุที่ต้องอดทนต่อสภาวะเจ็บป่วย มีผลทำให้คุณภาพชีวิตของประชากรลดลง

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ผู้ศึกษามีความสนใจที่จะเตรียมซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบ แล้วนำซิลิกาที่เตรียมได้มาสังเคราะห์แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต โดยใช้วิธีการหลอมแล้วตกผลึกลงในแก้ว พร้อมทั้งทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ เฟสองค์ประกอบ โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติเชิงกล และสมบัติความโปร่งแสงของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตโดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าสิ่งเหลือใช้จากการเกษตร และลดการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 สังเคราะห์แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต/ลูไซต์โดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นด้วยวิธีการหลอมแล้วตกผลึกลงในแก้ว
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ เฟสองค์ประกอบ โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติเชิงกล และสมบัติความโปร่งแสงของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต/ลูไซต์โดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น
- 1.2.3 ขึ้นรูปต้นแบบฟันเทียมจากแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต/ลูไซต์โดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น
- 1.2.4 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้ไปใช้จริงทางด้านทันตกรรมบูรณะ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 สังเคราะห์ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์สูงจากขี้เถ้าแกลบ
- 1.3.2 สังเคราะห์แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต/ลูไซต์โดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นด้วยวิธีการหลอมแล้วตกผลึกลงในแก้ว
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เฟสองค์ประกอบ โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติเชิงกล และสมบัติทางแสงของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตโดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น
- 1.3.4 อภิปราย และสรุปหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด สำหรับการประดิษฐ์แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต/ลูไซต์โดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้น
- 1.3.5 ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติซึ่งอยู่ในฐาน scopus



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 แกลบ [3-5]

2.1.1.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแกลบ [3-5]

ในภาคการเกษตรซึ่งเป็นอาชีพหลักของคนไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ภายหลังจากการสีข้าวเปลือกแล้วจะได้ผลผลิตออกมาเป็น “ข้าวสารและแกลบ” โดยปริมาณแกลบที่ได้คิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาณข้าวเปลือกที่ผลิตได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปีหนึ่ง ๆ จะมีปริมาณแกลบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสีข้าวในปริมาณมาก ซึ่งบางส่วนนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นในโรงเลี้ยงไก่ ใช้ผสมดินเป็นปุ๋ยช่วยในการเจริญเติบโตของพืช ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนในอุตสาหกรรมการเกษตร และใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งภายหลังจากการเผาร้อยละ 75 ของซี้แกลบ (Rice husk ash, RHA) นั่นคือ ซิลิกาที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous silica) [3] ดังนั้นด้วยเหตุนี้จึงถูกนำไปใช้เป็นแหล่งในการเตรียมซิลิกอนและสารประกอบซิลิกอนจำนวนหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ และซิลิกอนไนไตรด์ ซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมให้เป็นวัสดุที่มีประโยชน์ เพื่อหลีกเลี่ยงการทำลายสิ่งแวดล้อม

องค์ประกอบหลักของแกลบข้าวแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 [4] ซี้แกลบที่ได้มีอนุภาคสีดำปนเทาซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ของคาร์บอนของซี้แกลบในอากาศ โดยทั่วไปจะก่อให้เกิดเถ้าซิลิกาซึ่งมีตั้งแต่สีเทาจนถึงสีดำขึ้นอยู่กับสารเจือปนอินทรีย์และสารที่ไม่เกิดการเผาไหม้ แบ่งประเภทของเถ้าแกลบเป็นซี้เถ้าที่มีคาร์บอนสูง ซี้เถ้าที่มีคาร์บอนต่ำ และซี้เถ้าสีขาวที่ไม่มีคาร์บอน แกลบข้าวประกอบด้วยเส้นใย Floristic โปรตีน และหมู่ฟังก์ชันของ Carboxyl hydroxy และ Amidogen เป็นต้น ทำให้สามารถใช้เป็นตัวดูดซับได้ และเมื่อเผาแกลบข้าวโดยควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ซี้เถ้าที่ได้จะมีสีดำ (Black rice husk ash: BRHA) นั้นจะประกอบด้วย Amorphous silica แต่ถ้าทำการเผาเกิน 850 °C แล้วซี้เถ้าที่ได้จะมีสีขาว (White rice husk ash: WRHA) จะประกอบด้วยซิลิกาที่มีโครงสร้างผลึก (Crystalline silica) โดยซิลิกาที่มีโครงสร้างอสัณฐานมีขนาดอนุภาค 25 μm มีสีเทาและค่า pH เท่ากับ 8 และเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างกันจะทำให้เกิดส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ต่างกันไปตามตารางที่ 2.2 [5]

ตารางที่ 2.1 ร้อยละของสารประกอบในแกลบข้าว [4]

ชนิด	Cellulose	Lignin	Silica
แกลบขาว	ร้อยละ 50	ร้อยละ 30	ร้อยละ 20

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าแกลบขาว (White rice husk ash, WRHA) ขี้เถ้าแกลบดำ (Black rice husk ash; BRHA) [5]

ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมี	ขี้เถ้าแกลบขาว (WRHA)	ขี้เถ้าแกลบดำ (BRHA)
CaO	0.1	0.1
MgO	0.4	0.2
Fe ₂ O ₃	0.1	0.0
K ₂ O	1.6	1.1
Na ₂ O	0.1	0.1
Al ₂ O ₃	ปริมาณน้อย	ปริมาณน้อย
P ₂ O ₅	ปริมาณน้อย	ปริมาณน้อย
SiO ₂ (ซิลิกา)	96.2	54.1
น้ำหนักที่หายไปจากการเผา	1.6	44.5

2.1.2 ซิลิกา หรือ ซิลิกอนไดออกไซด์ [6-7]

2.1.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับซิลิกา [6]

ซิลิกา หรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) เป็นสารประกอบที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างซิลิกอนและออกซิเจน เป็นผลึกไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความถ่วงจำเพาะในช่วง 2.2-2.6 จุดหลอมเหลว 1,713 °C ขึ้นกับรูปแบบของซิลิกา ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้เล็กน้อย ไม่ละลายในกรดทุกชนิดยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก แต่สามารถละลายได้โดยการหลอมกับด่าง และรวมตัวกับออกไซด์ของโลหะส่วนใหญ่ได้ ไม่ลู่ติดไฟ สามารถหลอมเป็นแก้วที่มีสมบัติการแตกตัวต่ำมีค่าการนำความร้อนประมาณครึ่งหนึ่งของแก้ว ค่า Dielectric constant สูง ในทางการค้า ซิลิกาเป็นแหล่งผลิตซิลิกอน และถูกใช้ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นส่วนของวัสดุก่อสร้าง ส่วนซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) ถูกใช้เป็นสารดูดความชื้นดูดซับสาร สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

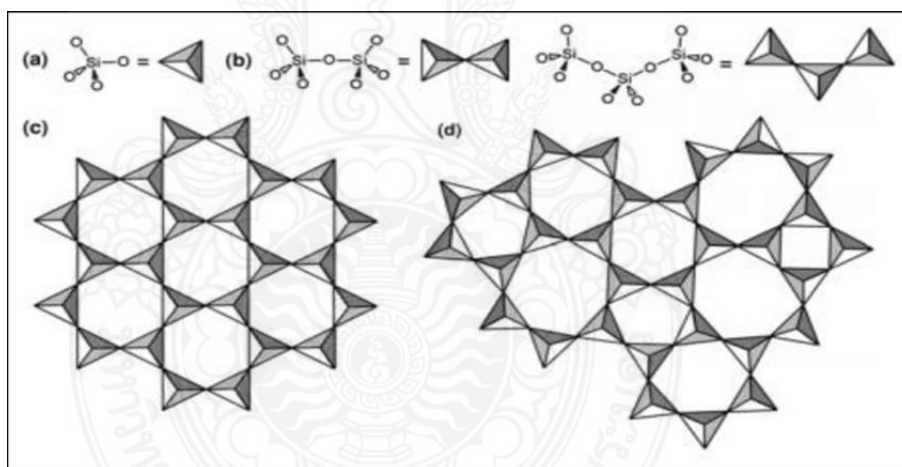
2.1.2.2 สมบัติทางกายภาพทั่ว ๆ ไปของซิลิกา [7]

ชื่อทั่วไป	Silica, Quartz, Free Crystalline Silica, Silica flour, Silica
สูตรโมเลกุล	SiO ₂
น้ำหนักโมเลกุล	60.1
สถานะ	ของแข็งสีขาวไม่มีกลิ่น
ความถ่วงจำเพาะ	2.2

จุดเดือด	> 2,200 °C
จุดหลอมเหลว	1,713 °C

2.1.2.3 โครงสร้างและพันธะทางเคมี [8]

ซิลิกาเป็นสารประกอบที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุคือซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ลักษณะที่พบอาจอยู่ในรูปซิลิเกต โครงสร้างพื้นฐานของซิลิกาและซิลิเกต จะมีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) ซิลิกอนนี้เป็นอะตอมกลางและล้อมด้วยออกซิเจน 4 อะตอม เป็น SiO_4 ซึ่งมีอะตอมของออกซิเจนเป็นตัวเชื่อมต่อกับออกซิเจน เป็นตัวเชื่อมต่อกับตัวซิลิกอนที่อยู่ใน SiO_4 ที่อยู่ใกล้เคียงกัน โดยทางโครงสร้างซิลิกาจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จบ (Infinite tree dimensional network) การเปลี่ยนแปลงรูปของซิลิกาจะเกิดขึ้นได้ช้ามากเนื่องจากการจัดเรียงตัวของ SiO_4 ซึ่งเป็นรูปแบบเตตระฮีดรอลแต่จะเกิดขึ้นได้เร็วมากเมื่อหลอมรวมด้วย Alkali vanadate chloride หรือ Borate การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของซิลิกาจะไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพของซิลิกาเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

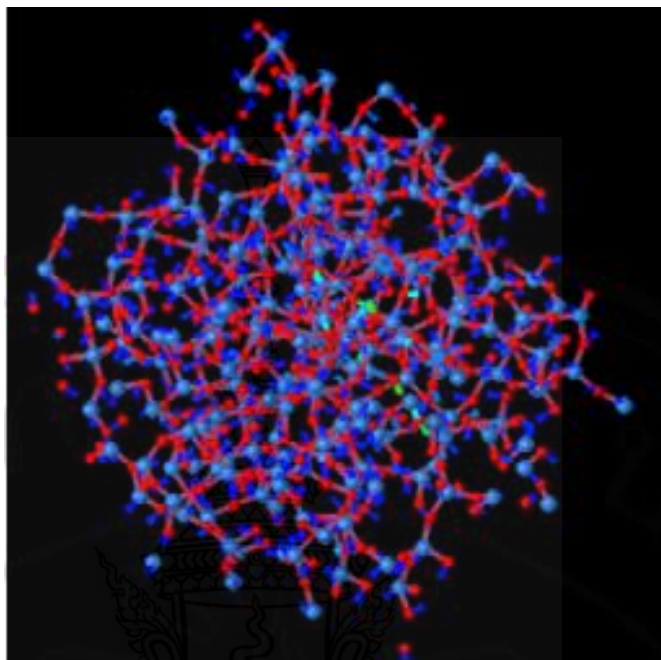


รูปที่ 2.1 รูปแบบต่าง ๆ ของการเชื่อมต่อของ SiO_4 Tetrahedral ในโครงสร้างพื้นฐานของซิลิเกต [8]

2.1.3 สมบัติทางเคมีของซิลิกา [8]

ซิลิกามีสมบัติที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติและไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิด แต่อย่างไรก็ตามไม่ได้หมายความว่า ซิลิกาจะไม่ทำปฏิกิริยาใด ๆ เลย เพราะซิลิกาสามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ และอุณหภูมิสูงความว่องไวในปฏิกิริยาของซิลิกาจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของซิลิกา การเตรียม

และสถานะของซิลิกาชนิดอสัณฐาน (Amorphous silica) จะว่องไวมากกว่าผลึกซิลิกา (Crystalline silica) ที่เป็นเช่นนั้นเพราะอสัณฐานซิลิกามีพื้นที่ผิวมาก



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของอสัณฐานซิลิกา [8]

ปกติแล้วสารละลายกรดจะไม่มีผลต่อซิลิกายกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับซิลิกาแล้วเปลี่ยนเป็น H_2SiF_6 ซิลิกาในรูปแบบต่าง ๆ จะเกิดปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้ไม่เท่ากัน ขึ้นกับความหนาแน่น (σ) รูปแบบของซิลิกาที่มีความหนาแน่นสูง จะเกิดปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้ไม่มากนัก รูปแบบของซิลิกาที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีเรียงลำดับจากน้อยไปมากดังนี้

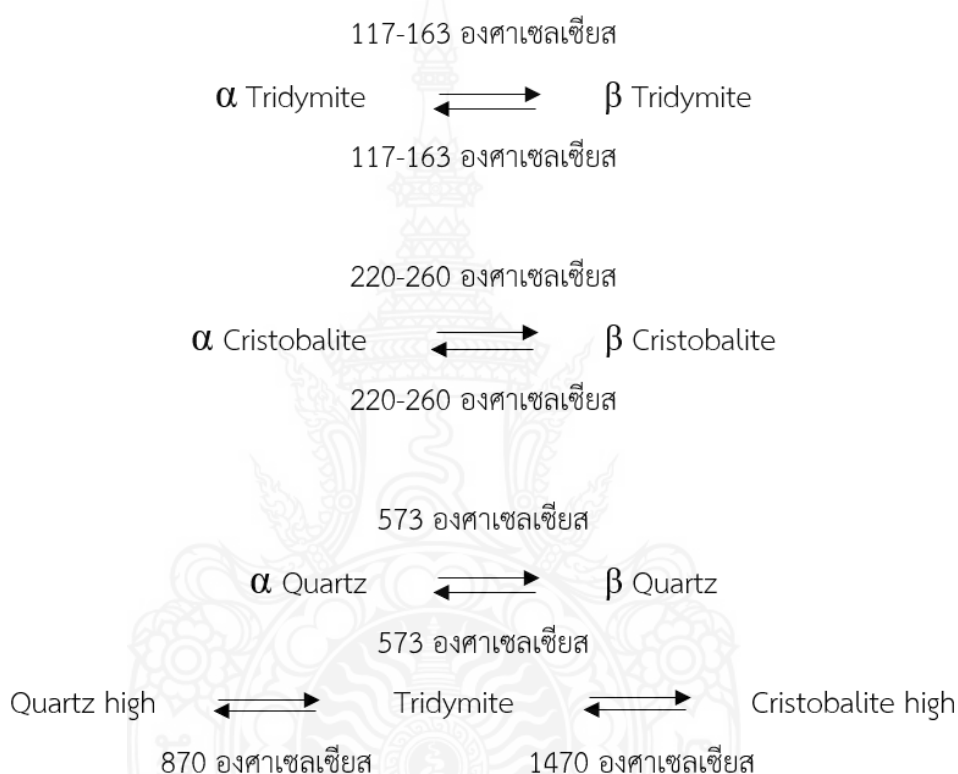
Vitreous silica ($\sigma = 2.2 \text{ g/cm}^3$) < Tridymite ($\sigma = 2.22 \text{ g/cm}^3$) $\cong$ Cristobalite ($\sigma = 2.33 \text{ g/cm}^3$) < Quartz ($\sigma = 2.65 \text{ g/cm}^3$) ส่วน Coesite ($\sigma = 3.01 \text{ g/cm}^3$) จะไม่ละลายในกรดไฮโดรฟลูออริกและ Stishovite ($\sigma = 4.35 \text{ g/cm}^3$) จะละลายได้น้อยมาก

2.1.4 รูปแบบของซิลิกา [9-10]

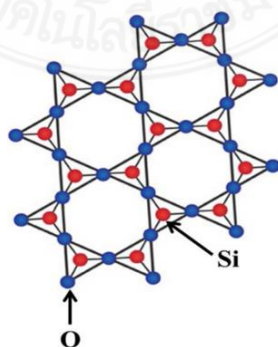
2.1.4.1 Crystalline Silica [9-10]

ที่ความดันบรรยากาศ Crystalline Silica มี 3 รูปแบบ คือ Quartz เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870 องศาเซลเซียส Tridymite เสถียรที่อุณหภูมิประมาณ 870 - 1,470 °C และ

Cristobalite เสถียรที่อุณหภูมิ 1,470 °C ถึงจุดหลอมเหลวที่ประมาณ 1,723 °C ซึ่งรูปแบบทั้งหมดทุกโครงสร้างมีพื้นฐานนี้เป็น SiO_4 Tetrahedral ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับออกซิเจนทุกอะตอม โดยเป็นการใช้ออกซิเจนร่วมกันระหว่างซิลิกอน 2 อะตอม แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างเหล่านั้นจะมีความแตกต่างกันในรายละเอียดทั้ง Quartz Tridymite และ Cristobalite เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ สำหรับ Cristobalite เป็นรูปแบบที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ สำหรับ Cristobalite Silica ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่ Keatite Coesite Stishovite และ Silica



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงเฟสของซิลิกา [9]



รูปที่ 2.4 โครงสร้าง Crystalline Silica [10]

2.1.5 การสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการซอล-เจล (Sol-gel process) [13]

พื้นฐานของการสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการซอล-เจลจะเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาคอนเดนเซชันของโลหะแอลคอกไซด์

ซอล คือสารของแข็งแขวนลอยกระจัดกระจายในของเหลว ส่วนเจลเป็นของเหลวแขวนลอยชนิดหนึ่งซึ่งจับตัวแข็งเป็นวุ้น ทำให้มีความหนืด และความยืดหยุ่นสูง ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากโครงข่าย (Net work) ของเฟสที่ กระจาย (Dispersed phase) และสารตัวกลางทำกระจาย (Dispersion medium) วนเวียนอยู่ทั่วโครงข่ายนั้น การเปลี่ยนจากซอลเป็นเจลจะทำให้ความหนืดสูงขึ้น ในระบบของซอล-เจลจะอธิบายได้เป็นสองแบบซึ่งแตกต่างกัน

- 1) ระบบอนุภาคที่แขวนลอย จะเกี่ยวข้องกับการกระจายของโลหะออกไซด์หรืออนุภาคของไฮดรอกไซด์ในของเหลวจะเป็นซอลและซอลจะรวมตัวเป็นเจล
- 2) ในระบบของพอลิเมอร์จะเกี่ยวข้องกับการเกิดพอลิเมอร์ของสารเคมีอินทรีย์ของโลหะแอลคอกไซด์ที่จะผลิตเจลได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงข่าย

สำหรับระบบของพอลิเมอร์โมเลกุลขนาดใหญ่ที่เป็นโครงข่ายที่ได้จากการเกิดพอลิเมอร์ของโลหะอินทรีย์ เช่น โลหะแอลคอกไซด์ โลหะแอลคอกไซด์จะประกอบด้วยอะตอมโลหะกับหมู่แอลคิล ที่ต่อกับออกซิเจน เช่น $-\text{CH}_3$ (เมทิล) $-\text{C}_2\text{H}_5$ (เอทิล) ปฏิกิริยาข้างล่างนี้เป็นโลหะแอลคอกไซด์สายสั้นๆ สำหรับ $\text{M}(\text{OR})_x$ ที่ถูกไฮโดรไลซิสทั้งหมด



ปฏิกิริยาต่อมาเป็นการต่อสายโซ่ (Chain) จากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ (Polycondensation reaction)

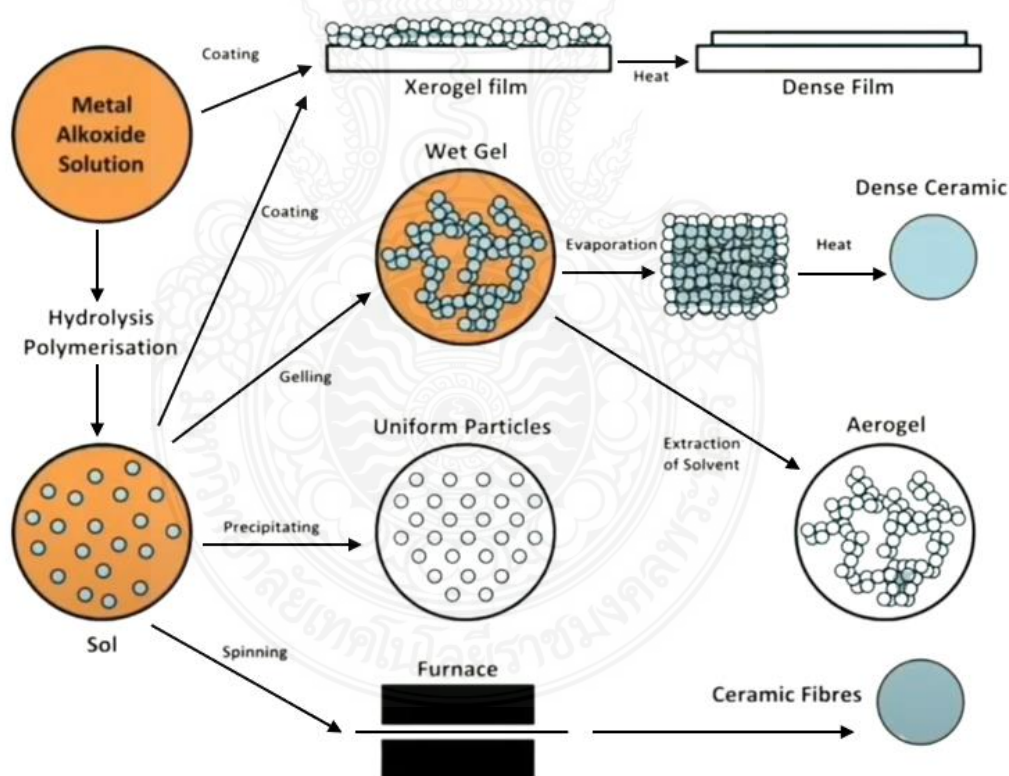


ในระบบนี้จะมีเจลเลชัน (Gelation) เกิดขึ้นเมื่อมีสารที่มีโมเลกุลเป็นสายยาวเป็นผลิตภัณฑ์จากการเกิดไฮโดรไลซิสและพอลิคอนเดนเซชันของแอลคอกไซด์ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเป็นโครงข่ายขึ้นอย่างรวดเร็ว จุดที่เริ่มเป็นเจลเป็นเวลาซึ่งจะเกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ล้อมรอบซอลสามารถสังเกตได้จาก

การทดลอง พบว่าความหนืดเพิ่มขึ้น พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการไหลของเจลที่เหมาะสมสามารถทำเป็นฟิล์มไฟเบอร์หรือการขึ้นรูปต่าง ๆ

ขั้นตอนการทำแห้งเจลที่เปียก เมื่อทำแห้งจะเกิดมีรูพรุน และเป็นของแข็งอสังฐานที่อนุภาคของเจล ตัวอย่างการทำให้แห้งโดยการระเหยเจลจะอยู่ในรูปของเซโรเจล (Xerogel) ซึ่งจะมีการยุบตัวของผิวหน้าเจลเท่านั้น แต่การทำให้เจลแห้งภายใต้สภาวะวิกฤติเช่น ที่ความดันวิกฤติและอุณหภูมิวิกฤติเมื่อของเหลวและไออยู่ในสมดุลซึ่งกันและกัน สามารถกำจัดของเหลวและไอที่อยู่ระหว่างผิวทั้งสองผลทำให้เกิดรูพรุนทั่วทั้งหมด ซึ่งเรียกว่าแอโรเจล (Aerogel)

ในกระบวนการซอล-เจลได้ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ เช่น เตตระเอทิลโทซิลิเกต (TEOS) $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ Geffcken และ Berger [12] ได้ใช้ในกระบวนการซอล-เจลแบบจุ่มเพื่อเคลือบ โดยออกไซด์อิสระจากโลหะแอลคอกไซด์ในสารละลาย และทำเป็นฟิล์มโดยใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นตัวเคลือบแก้ว การเคลือบไม่ทำให้เกิดการสะท้อนแสงและการเตรียมอนุภาคทรงกลมของออกไซด์ที่เป็นพวงรังสีสำหรับหลอดพลังงานนิวเคลียร์



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการซอล-เจล [13]

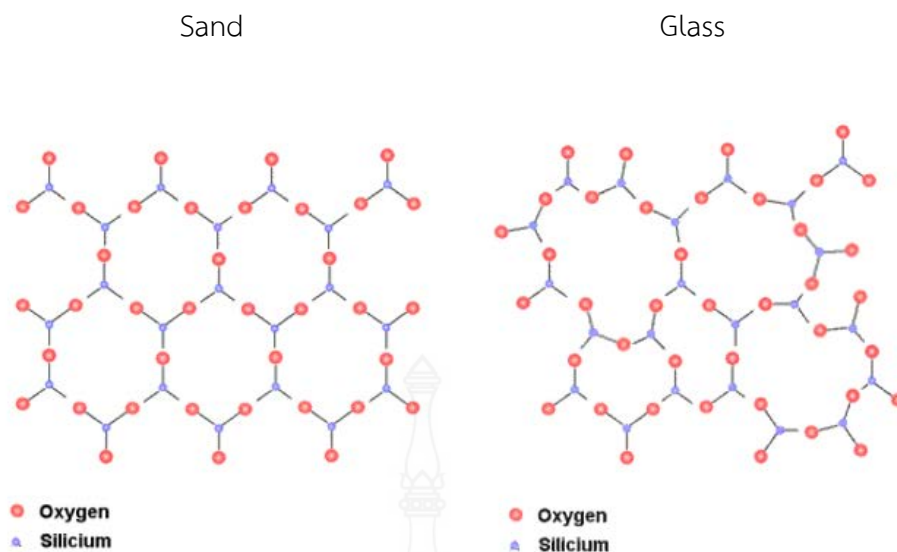
2.1.6 การสังเคราะห์วัสดุด้วยกระบวนการแคลไซน์ (Calcination process) [13]

Calcination คือกระบวนการนำอนุภาคหรือสารบางอย่างไปเผาภายใต้อุณหภูมิสูง ในระดับที่ยังไม่ถึงอุณหภูมิจุดหลอมเหลวของอนุภาคหรือสารนั้น กระบวนการนี้ถูกใช้ในหลายวัตถุประสงค์ เช่น กำจัดความชื้นสารอินทรีย์และแก๊สต่างๆ หรืออาจใช้เพื่อการเติมออกซิเจน นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการที่ใช้ในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและทางเคมีของสารได้อีกด้วย [7-8] ดังนั้นกระบวนการ Calcination จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่ออุตสาหกรรม เช่น ในการเผาดินดิบ การผลิตเซรามิก การปรับปรุงสมบัติของสารดูดซับจากวัสดุชีวภาพและวัสดุอนินทรีย์ เป็นต้น

2.1.7 แก้ว (Glasses) [10-11]

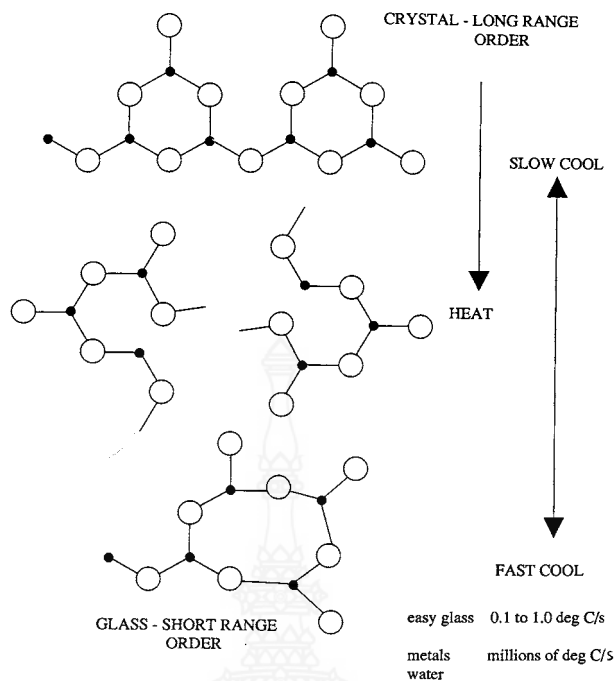
แก้วเป็นของแข็งที่ไม่มีความเป็นผลึกเหมือนของแข็งทั่วไปและมีโครงสร้างที่ไม่ต่อเนื่องเหมือนของเหลว นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มจึงถือว่าแก้วเป็นอีกสถานะหนึ่งของสาร นอกเหนือจากของเหลว (Liquid) ของแข็ง (Solid) และก๊าซ (Gas) ดังรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของทราย (Sand) ที่เป็นผลึกของสารซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งแตกต่างจากแก้วที่ประกอบไปด้วยอะตอมของ Si และ O ที่เรียงตัวกันแบบสุ่ม (Random disordered arrangement)

นักวิทยาศาสตร์ผู้มีความเชี่ยวชาญทางด้านแก้วหลายท่านพยายามหาคำนิยามที่เหมาะสมที่สุดของแก้ว ตามพื้นฐานความรู้ และมุมมองที่ต่างกัน จนสรุปคำนิยามของแก้วไว้เป็นมาตรฐานตาม ASTM standards ไว้ว่า “แก้วคือผลิตภัณฑ์สารอนินทรีย์ของการหลอมซึ่งได้ถูกทำให้เย็นตัวลงเป็นภาวะแข็งเกร็ง (Rigid condition) โดยไม่มีการตกผลึก” สมบัติสำคัญที่สุดของแก้วคือ ความโปร่งใส ซึ่งเกิดเนื่องจากแก้วปราศจากขอบของเกรน (Grain boundary) และสิ่งแปลกปลอม (Inclusion) ที่เป็นเหตุของการกระเจิงของแสง (Scattering of light) ซึ่งแตกต่างจากเซรามิก (Ceramic) โดยทั่วไปที่มีขอบเกรนและรูพรุน ทำให้เซรามิกทึบแสง ถึงแม้ว่าเซรามิกส่วนใหญ่จะมีความเป็นฉนวนเหมือนแก้วซึ่งมีค่าช่องว่างของพลังงาน (Energy gap) ระหว่างแถบการนำ (Conduction band) และแถบวาเลนซ์ (Valence band) ที่มากกว่า 1 อิเล็กตรอนโวลต์เหมือนกันก็ตาม

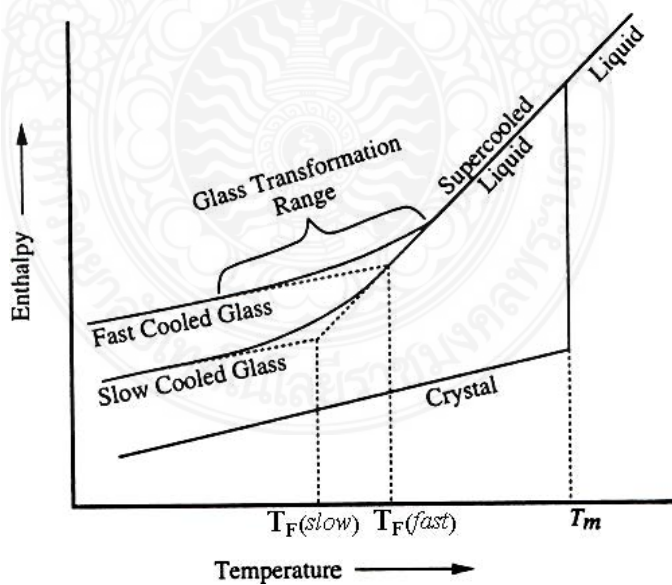


รูปที่ 2.6 ภาพการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึก (Crystal structures) ของทรายและแก้วแบบสองมิติ [11]

การทำให้เกิดแก้ว (Glass formation) มาจากการหลอมของแข็งที่เป็นผลึกที่อุณหภูมิสูง และ เมื่อทำให้เย็นตัวลงแบบรวดเร็วอะตอมของแก้วจะถูกล็อกให้อยู่ในสถานะแบบไม่มีระเบียบหรือแบบสุ่ม ดังรูปที่ 2.7 และอะตอมจะเรียงตัวกันอย่างเป็นผลึกที่สมบูรณ์ (Perfect crystal arrangement) เมื่อทำให้เย็นตัวลงแบบช้า นอกจากนี้ แก้วยังมีพฤติกรรมที่ไม่ขึ้นอยู่กัเวลา คือ พฤติกรรมการเปลี่ยนเฟสของแก้ว (Glass transformation behavior) ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ เรียกว่า บริเวณการแปลงเฟสของแก้ว (Glass transformation region) ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.7 ภาพการเรียงตัวของอะตอมของผลึกและการเรียงตัวของแก้วหลังจากการทำให้เย็นตัวลงแบบช้า (Slow cool) และแบบเร็ว (Fast cool) จากของเหลวเมื่อได้รับความร้อน [10]



รูปที่ 2.8 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อเอนทัลปี (Enthalpy) ของการหลอมเหลวในการเกิดแก้ว [10]

บริเวณการแปลงเฟสของแก้วเป็นช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกับการตกผลึก (Crystallization) ของของแข็งโดยทั่วไปที่เกิดขึ้นที่จุดหลอมเหลวของสาร (Melting point; T_m) การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีกับอุณหภูมิมักมีพฤติกรรมเหมือนกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกับอุณหภูมิ เป็นที่ทราบกันดีว่าของเหลวส่วนใหญ่ เมื่อได้รับความร้อนจะขยายตัว นั่นคือ ทั้งเอนทัลปีและปริมาตรจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิด้วย เมื่อของเหลวถูกลดอุณหภูมิลง เอนทัลปีก็จะลดลงจนเมื่อมาถึงจุดหลอมเหลวก็จะเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็ง ถ้าของแข็งมีการตกผลึก การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีหรือปริมาตรของสารก็จะเกิดขึ้นอย่างฉับพลันแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous change) ซึ่งจะเกิดขึ้น ณ จุด T_m ของสาร หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงก็จะเริ่มช้าลงอย่างคงที่ จนถึงอุณหภูมิห้อง (Room temperature) และสารที่ได้จะกลายเป็นผลึกของแข็ง (Crystalline solid) แต่ถ้าของเหลวถูกทำให้เย็นตัวลงโดยที่ไม่มีการตกผลึก ณ จุด T_m ของเหลวจะกลายเป็นของเหลวที่เย็นตัวแบบยิ่งยวด (Supercooled liquid) ที่มีความหนืดสูง (High viscosity) เนื่องจากการเปลี่ยนสถานะของแก้วเกิดขึ้นเป็นช่วงของอุณหภูมิ ไม่ใช่จุดอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง แต่เพื่อความสะดวกในการใช้athomที่เหมาะสม จึงมีการนิยามอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะของแก้ว (Glass transformation temperature หรือ Glass transition temperature; T_g) ขึ้น ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวคือ อุณหภูมิที่เส้นกราฟของการวิเคราะห์เชิงความร้อน หรือเส้นกราฟของการขยายตัวทางความร้อนของแก้วที่มีการเปลี่ยนแปลงนั่นเอง

ส่วนประกอบหลักทางเคมี (Chemical composition) ของแก้วมาจากวัตถุดิบหลัก 3 ชนิดคือ ฟอเมอร์ (Former) ฟลักซ์ (Flux) และสารช่วยให้เสถียร (Stabilizer) ซึ่งมีความสำคัญในการสร้างแก้วและโครงสร้างของแก้ว

1. ฟอเมอร์ เป็นส่วนประกอบพื้นฐานของแก้ว ได้แก่ สารเคมีชนิดใดก็ตามที่สามารถหลอมและเย็นตัวลงกลายเป็นแก้วได้จะเรียกว่าเป็นฟอเมอร์ทั้งหมด เช่น ดินจากเปลือกโลก ถ้าหลอมด้วยความร้อนที่เหมาะสมก็สามารถเย็นตัวกลายเป็นแก้วได้และทราย เป็นต้น

2. ฟลักซ์ คือสารช่วยหลอม ซึ่งจะเป็นตัวช่วยให้ฟอเมอร์หลอมในอุณหภูมิที่ต่ำลงเพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต หรือเถ้าโซดา (Soda ash) โพแทช (Potash, K_2O) และลิเทียมคาร์บอเนต (Lithium carbonate, Li_2CO_3) เป็นต้น แต่การใส่ฟลักซ์ก็มีข้อเสียคือจะทำให้แก้วไม่เสถียรทางเคมี กล่าวคือละลายน้ำได้ง่ายขึ้น หรือมีการตกผลึกที่ไม่ต้องการ

3. สารช่วยให้เสถียร เป็นสารที่เมื่อผสมกับฟอเมอร์และฟลักซ์แล้วจะช่วยให้แก้วที่ผลิตได้ไม่ละลาย ไม่ร่วน และไม่แตกออกจากกัน โดยจะไปช่วยยึดให้โครงสร้างของแก้วคงอยู่ไม่บับสลาย และผสมเป็นเนื้อเดียว ได้แก่ หินปูน (Limestone) ตะกั่วเหลือง (Litharge) อะลูมินา (Alumina) และแมกนีเซีย (Magnesia) เป็นต้น

ความสามารถในการทำให้เกิดแก้ว (Glassforming ability) และความเสถียรของแก้ว (Glass stability) ขึ้นอยู่กับเรื่องของการตกผลึก ถ้าแก้วมีความสามารถในการจะเกิดแก้วได้ดี จะต้องมีความต้านทานในการตกผลึกในขั้นตอนที่น้ำแก้วหลอมเย็นตัวลงได้ดี ในขณะที่ความเสถียรของแก้วนั้นขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อการตกผลึกของแก้วในขั้นตอนที่ให้ความร้อนแก่แก้วจนหลอม ดังนั้น

ความสามารถในการเกิดแก้วได้ดีจะมีความสำคัญต่อกระบวนการการหลอมแก้วในเบื้องต้น ส่วนความเสถียรของแก้วจะมีความสำคัญในกระบวนการการขึ้นรูปใหม่ของแก้วที่มีอยู่แล้ว (Reforming of an existing glass)

2.1.8 แก้วเซรามิก [10]

กระบวนการสำคัญที่ทำให้เกิดแก้วเซรามิก คือ กระบวนการเกิดนิวเคลียสและการเติบโตของผลึก เนื่องจากน้ำแก้วที่ได้จากการหลอมนั้นจะมีความหนืดที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการแพร่และกระบวนการจัดเรียงตัวอะตอมใหม่จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยลักษณะนี้ทำให้เราสามารถควบคุมกระบวนการตกผลึก และการเติบโตของผลึกได้ การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วของน้ำแก้ว (Quenching) จะนำมาใช้ช่วยลดการเกิดผลึกขึ้นในระหว่างการเย็นตัวอย่างที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ การเย็นตัวอย่างช้า ๆ จะทำให้แก้วสามารถจัดระเบียบโครงสร้าง และทำให้เกิดผลึกภายในแก้วที่จะนำไปสร้างเป็นแก้วเซรามิกที่ดีจึงควรเป็นแก้วที่โครงสร้างไม่เป็นระเบียบมาก

ปรากฏการณ์ที่สำคัญที่พบได้ในแก้วเซรามิก คือ การแยกชั้นของเฟสสองชนิดในเนื้อแก้ว (Phase separation) ที่จะส่งผลอย่างมากต่อการเกิดแก้วเซรามิก และความเสถียรของแก้ว เนื่องจากแก้วหลอมเป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับสารออกไซด์ จึงทำให้เราสามารถสร้างระบบแก้วเซรามิกได้จากสารหลายชนิด เกิดเป็นแก้วเซรามิกหลากหลายระบบให้เลือกศึกษา และยังทำให้ได้แก้วเซรามิกที่ผลึกหลากหลายชนิด เช่น เฟสกึ่งเสถียร (Metastable phase) และสารละลายของแข็ง (Solid solution) เป็นต้น โดยแก้วเซรามิกที่มีขนาดเกรนที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตร จะทำให้แก้วเซรามิกที่มีคุณสมบัติที่ดีเพิ่มขึ้นด้วย เช่น มีความแข็งแรงเชิงกลที่สูงและทนต่อการแตกหักได้ดีเกรนที่มีความเล็กละเอียดนี้เองที่ทำให้แก้วเซรามิกมีความแข็งแรงมากกว่าแก้วปกติกับเซรามิกแบบดั้งเดิม ด้วยเหตุผลดังกล่าว การควบคุมปริมาณการเกิดผลึกในแก้วก็ได้นำไปสู่การศึกษาถึงความเสียหายเชิงกล (Mechanical failure) และการศึกษาถึงคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ เช่น การพาของไอออน (Ionic conductivity) ในแก้วเซรามิก เป็นต้น โดยปกติแล้วแก้วเซรามิกจะไม่โปร่งใสในช่วงแสงขาว (Visible light) แต่อย่างไรก็ตามสามารถสร้างแก้วเซรามิกที่มีความใสได้ ถ้าผลึกในเนื้อแก้วมีขนาดที่เล็กกว่าความยาวคลื่นของช่วงแสงขาวหรือมีค่าความแตกต่างของดัชนีหักเหแสงของแก้วใสและผลึกที่ต่ำมาก ๆ นั่นเอง

2.1.9 การตกผลึก [11]

ทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของการทำให้เกิดแก้ว ระบุว่าวัสดุทุกชนิดสามารถทำให้เกิดแก้วได้ ถ้าสามารถทำให้เย็นตัวลงได้อย่างรวดเร็วพอที่จะหลีกเลี่ยงการตกผลึก ดังนั้นทฤษฎีนี้จึงให้ความสำคัญกับกลไกในการตกผลึกของสาร ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญสองกระบวนการเข้าด้วยกัน คือ

2.1.9.1 การเกิดนิวเคลียส (Nucleation)

การเกิดนิวเคลียสผลึกแบ่งออกเป็นสองชนิดหลัก คือ

1. การเกิดนิวเคลียสผลึกปฐมภูมิ (Primary nucleation) คือ กรณีของการเกิดนิวเคลียสผลึกทุกกรณีในระบบที่ไม่ประกอบไปด้วยสารที่เป็นผลึก ซึ่งแบ่งออกเป็นสองชนิดย่อย คือ

ก. การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous nucleation) การเกิดนิวเคลียสผลึกโดยไม่อาศัยสิ่งที่มีอยู่ก่อนที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำแก้วหลอม

ข. การเกิดนิวเคลียสผลึกแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous nucleation) นิวเคลียสผลึกเกิดจากสิ่งที่มีอยู่ก่อนไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำแก้วหลอม อาทิ ผนังเตา (Furnace wall) สิ่งแปลกปลอมที่ไม่ละลาย (Insoluble inclusions) หรือแม้กระทั่งพื้นผิวอิสระ (Free surface)

2. การเกิดนิวเคลียสผลึกทุติยภูมิ (Secondary nucleation) คือ การที่มีผลึกปรากฏอยู่ในระบบที่อิมิตยงวดเพื่อสร้างนิวเคลียสทุติยภูมิต่อไป แผนภาพแสดงการเกิดนิวเคลียสได้แสดงไว้ ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ชนิดของการเกิดนิวเคลียสผลึก (Nucleation) [10]

ในการศึกษาการเกิดนิวเคลียสผลึก คำว่านิวเคลียสในที่นี้คือ นิวเคลียสของผลึก (Crystal nucleus) ซึ่งแตกต่างจากนิวเคลียสของอะตอม (Atomic nucleus) โดยจะพบว่าการเกิดนิวเคลียสผลึกนั้นจะถูกต่อต้านด้วยเครื่องขวางกั้นสองชนิด คือ

1. เครื่องขวางกั้นอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics barrier) ซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานอิสระ (Free energy) ที่เปลี่ยนไปในระบบเมื่อมีการเกิดนิวเคลียสขึ้น

2. เครื่องขวางกั้นจลนพลศาสตร์ (Kinetic barrier) เกิดขึ้นเนื่องจากความต้องการในการเคลื่อนที่ของมวลหรือการจัดเรียงตัวใหม่ในช่องว่าง เพื่อให้การเติบโตของอนุภาคที่เป็นระเบียบ (หรือผลึก) เกิดขึ้นได้จากของเหลวที่ไม่เป็นระเบียบ

ดังนั้นระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงของพลังงานสองชนิด คือ

- พลังงานอิสระ (Free energy)
- พลังงานพื้นผิว (Surface energy)

2.1.9.2 การเติบโตของผลึก (Crystal growth)

เมื่อนิวเคลียสเสถียรเกิดขึ้นในระบบอิ่มตัวยิ่งยวด (Supersaturated system) หรือระบบเย็นตัวยิ่งยวด (Supercooled system) นิวเคลียสเสถียรเหล่านั้นจะเริ่มเติบโตเป็นผลึกในขนาดที่มองเห็นได้

ได้มีการเสนอความคิดเกี่ยวกับกลไกของการเติบโตของผลึก (Crystal growth mechanisms) หลายกลไก ดังจะยกตัวอย่างต่อไปนี้

1. ทฤษฎีพลังงานพื้นผิว (Surface energy theories) มีพื้นฐานมาจากสมมติฐานที่ว่า ผลึกจะเติบโตในรูปร่างที่มีพลังงานพื้นผิวต่ำที่สุด

2. ทฤษฎีชั้นดูดซับ (Adsorption layer theories) แนวคิดหลักของกลไกการเติบโตของผลึกขึ้นอยู่กับ “การเกิดขึ้นของชั้นดูดซับของอะตอมของตัวละลาย (Solute) หรือโมเลกุลบนหน้าสัมผัสของผลึก (Crystal face)”

3. ทฤษฎีจลน์ (Kinematic theories) จะมีความเกี่ยวข้องกับ 2 กระบวนการในชั้นของผลึกที่เติบโต คือ

- การให้กำเนิดชั้น (Steps) จากแหล่งกำเนิดบางอย่างบนหน้าสัมผัสของผลึก
- มีการเคลื่อนที่ของชั้นผ่านหน้าสัมผัสของผลึก

4. ทฤษฎีปฏิกิริยาการแพร่ (Diffusion reaction theories) ได้มีการสันนิษฐานในเรื่องของการเติบโตของผลึกว่าเกิดจากการที่สสารที่ตกสะสมอย่างต่อเนื่องบนหน้าสัมผัสผลึกด้วยอัตราเร็วที่แปรผันตามกับความเข้มข้นระหว่างจุดที่เกิดการตกสะสมกับเนื้อของสารละลาย (Bulk of the solution)

2.1.10 วัสดุทางทันตกรรม [12]

ฟันของมนุษย์มี 2 ชุด คือ ฟันน้ำนมและฟันแท้ เมื่อฟันน้ำนมหลุดออกไป ก็จะมีฟันแท้ขึ้นมาแทนที่ แต่หลังจากฟันแท้แล้ว หากฟันของเราเกิดปัญหาขึ้น ไม่ว่าจะเป็นฟันผุ อุบัติเหตุ หรือ

การเสื่อมสภาพไปตามอายุ ก็จะไม่สามารถงอกขึ้นมาใหม่ได้อีก ดังนั้นเราจึงต้องนำเอาวัสดุหรืออุปกรณ์การแพทย์เข้ามาช่วยในการรักษา เสริมสร้าง ทดแทนส่วนที่เสียหาย หรือสูญเสียไป ตัวอย่างของวัสดุการแพทย์ในงานนี้ ได้แก่ ฟันปลอม ครอบฟัน รากฟันเทียม วัสดุอุดฟัน วัสดุเคลือบหลุมร่องฟัน และลวดดัดฟันซึ่งวัสดุที่สามารถนำมาใช้งานทางทันตกรรมมีทั้งเซรามิก โลหะ พอลิเมอร์ และวัสดุผสม ซึ่งหน้าที่ของฟัน คือ การบดเคี้ยวอาหารต่าง ๆ ดังนั้นวัสดุที่จะสามารถนำมาใช้งานได้นั้นจำเป็นที่จะต้องมีความแข็งแรงสูง ทนทานต่อสารเคมี และการสึกหรอได้ดี ตัวอย่างของวัสดุทางทันตกรรมที่พบเห็นทั่วไปได้แก่ โลหะ และเซรามิก เป็นต้น

2.1.11 แก้วเซรามิกทันตกรรม (Dental glass-ceramics) [13]

เนื่องจากสมบัติเฉพาะของแก้วเซรามิก จึงได้มีการนำไปพัฒนาใช้งานทางด้านการบูรณะทางทันตกรรม (Dental restorative) ไม่ว่าจะเป็นวัสดุครอบฟัน (Crown) ทันตกรรมเคลือบผิวฟัน (Dental veneer) สะพานฟัน (Dental bridge) หรือฟันปลอม (Denture) เป็นต้น ซึ่งวัสดุทันตกรรมนี้ต้องมีสมบัติเชิงกลและทนต่อการกัดกร่อนทางเคมีที่ดี นอกจากนี้ยังต้องมีสมบัติเชิงแสงที่ใกล้เคียงฟันธรรมชาติ ทั้งในเรื่องของสีและความโปร่งแสง (Translucency) เป็นต้น ซึ่งแก้วเซรามิกเป็นวัสดุที่สามารถตอบสนองข้อข้างต้นได้เป็นอย่างดี ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้จริงในปัจจุบัน การที่จะออกแบบแก้วเซรามิกให้มีสมบัติในการใช้งานด้านทันตกรรม ต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นชนิดของเฟส อัตราส่วนระหว่างผลึกและแก้วเมทริกซ์ ขนาด และรูปร่างของผลึก ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของแก้วเซรามิกเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงแสง โดยส่วนใหญ่การประดิษฐ์แก้วเซรามิกเพื่อใช้งานทางทันตกรรม แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ๆ คือ แก้วเซรามิกหลอมลงบนกรอบโลหะ (Glass-ceramics fused to metal frameworks) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ แก้วเซรามิกที่มีลูไซต์ (Leucite) หรืออะพาไทต์-ลูไซต์ (Apatite-leucite) เป็นองค์ประกอบหลัก อีกวิธีหนึ่งคือแก้วเซรามิกไร้โลหะ (Metal-free glass-ceramics) ซึ่งแก้วเซรามิกชนิดนี้ต้องการความแข็งแรงเชิงกล และความทนต่อการแตกที่ดี แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต (Lithium disilicate glass-ceramics) จึงเป็นตัวเลือกที่ดี เนื่องจากมีสมบัติที่ดีกว่าแก้วเซรามิกลูไซต์ จึงได้มีการนำมาใช้ในทางการค้ากันอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังมีการนำแก้วเซรามิกหลอมลงบนเซรามิกเผาผนึกจนมีความแข็งแรงสูง (Glass-ceramics fused to high-strength sintered ceramics) เช่น การหลอมแก้วเซรามิกที่มีเซอร์โคเนียเป็นองค์ประกอบที่ผ่านการเผาผนึกจนมีความแข็งแรงสูง เป็นต้น ถึงแม้วิธีนี้จะเพิ่มความแข็งแรงให้แก่วัสดุได้แต่ยังพบปัญหาของความไม่โปร่งแสงของชิ้นงาน จึงมักใช้เป็นฟันปลอมที่ไม่ต้องการความโปร่งแสง เช่น ฟันกราม เพื่อการบดเคี้ยว เป็นต้น

แก้วเซรามิกที่ใช้ในงานด้านบูรณะทางทันตกรรมจะต้องมีมาตรฐานในการใช้งานเป็นวัสดุชีวภาพ (Biomaterial use) ได้ เช่น มีความเข้ากันได้กับสภาพในช่องปาก (Oral environment) ที่สำคัญ ๆ คือ สมบัติของพื้นผิวแก้วเซรามิก เช่น โทนสี ความโปร่งแสง ความทนต่อการแตก ควรจะเข้ากันได้กับฟันธรรมชาติ และเนื่องจากปัญหาที่พบส่วนใหญ่ในการดูแลรักษาช่องปากของคนไข้

เกี่ยวข้องกับการยึดติดของฟันปลอม มีผลทำให้เกิดช่องระหว่างฟันปลอมและฟันจริง ทำให้เกิดการผุกร่อนของฟันเนื่องมาจากแบคทีเรียในช่องปาก และพบการหลุดออกของวัสดุทันตกรรม [8-27] หลังจากการได้เซรามิกพอร์ซเลนหรือแก้วเซรามิกมาใช้งานทางด้านทันตกรรมบูรณะ พบว่าปัญหาการเข้ากันไม่ได้กับเนื้อเยื่อในช่องปากนั้นน้อยลง จึงได้นำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

2.2 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

2.2.1 สมบัติทางกายภาพ [28]

2.2.1.1 ความหนาแน่น (Density) [28]

สสารที่อยู่ในทุกสภาวะ ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ จะมีความหนาแน่นเป็นสมบัติเฉพาะที่เปลี่ยนแปลงได้ตามสภาพแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิหรือความดัน การคำนวณหาความหนาแน่นใช้หลักของอาร์คิมิดีส (Archimedes' principle) หลักการว่า “วัตถุใด ๆ ที่จมอยู่ในของไหลทั้งก้อน หรือจมอยู่บางส่วน จะถูกแรงลอยตัวกระทำ และขนาดของแรงลอยตัวนั้นจะเท่ากับขนาดของน้ำหนักของของไหลที่ถูกวัตถุแทนที่” แต่เนื่องจากความหนาแน่นของของเหลวแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ซึ่งในการชั่งทุกครั้งจะต้องบันทึกอุณหภูมิของเหลวขณะทำการชั่ง และคำนวณความหนาแน่นของของเหลว การหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน ได้ดังสมการ

$$\rho_s = \left(\frac{w_1}{w_1 - w_2} \right) \rho_{st} \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ_{st} คือ ความหนาแน่นของน้ำปราศจากประจุ มีหน่วยเป็น g/cm^3

ρ_s คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น g/cm^3

w_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ มีหน่วยเป็น g

w_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ มีหน่วยเป็น g

2.2.2 สมบัติเชิงกล [29-30]

ความแข็ง คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทาน หรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึงความต้านทานต่อการดัด การขีด การขีด และการตัด ความแข็งไม่ใช่คุณสมบัติเนื้อแท้ของวัสดุที่กำหนดได้ด้วยค่าจำกัด ความที่แน่นอนหน่วยพื้นฐานของมวล ความยาว และเวลา ค่าคุณสมบัติความแข็ง คือ ผลกระบวนกรวัดที่กำหนด

การทดสอบความแข็งโดยปกติจะทำการวัดจากความลึก หรือพื้นที่ของรอยกดที่เหลือทิ้งไว้จากหัวกดที่มีรูปร่าง Load และเวลาที่เจาะจง ซึ่งมีอยู่ 2 มาตรฐานสำหรับการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างของแข็ง และขนาดของรอยกด คือ วิกเกอร์ (Vickers) และนูป (Knoop) แต่ละวิธีของมาตรฐานได้ถูกแบ่งเป็นสเกล กำหนดโดยภาระ (Load) ที่ใช้ และลักษณะของหัวกด ด้วยเหตุผลของการใช้งาน และการสอบเทียบ

2.2.2.1 การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ (Vickers hardness test)

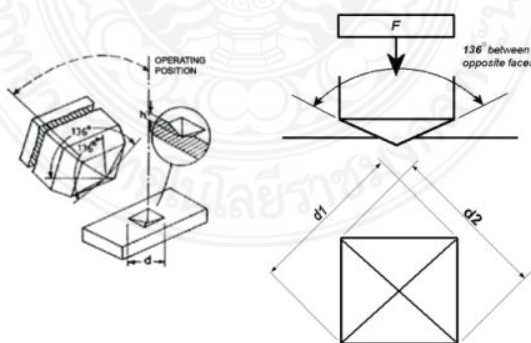
วิธีทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ประกอบด้วยการกดวัสดุทดสอบด้วยหัวเพชรรูปปิระมิดฐานสี่เหลี่ยม และมุม 136 องศา ระหว่างหน้าตรงกันข้ามภายใต้ Load 1-100 kg แรงเป็นระยะเวลา 10-15 วินาที เส้นทแยงที่หลงเหลือบนผิวหน้าของวัสดุภายหลังการนำ Load ออก จะถูกวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์ และคำนวณค่าเฉลี่ยของเส้นทแยง พื้นที่ผิวเอียงของรอยกดจะถูกคำนวณจากผลการ Load ต่อพื้นที่สี่เหลี่ยมของรอยกด

$$H_V = \frac{2F \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad \text{หรือ} \quad H_V = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ F คือ load มีหน่วยเป็น kg

d คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้งสอง มีหน่วยเป็น mm

H_V คือ ความแข็งแบบวิกเกอร์ มีหน่วยเป็น GPa



รูปที่ 2.10 หัวกดและรอยกดแบบวิกเกอร์ [29]

เมื่อหาค่าเฉลี่ยเส้นทแยงมุมได้ ค่าความแข็งของวิกเกอร์คำนวณได้จากสูตร โดยการให้ Load ที่ต่างกันจะให้ค่าความแข็งเท่ากันบนวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งดีกว่าการเปลี่ยนสเกล ด้วยวิธีการทดสอบความแข็งแบบอื่น ข้อได้เปรียบของการทดสอบแบบวิกเกอร์ คือการอ่านค่าแม่นยำสูง และหัวกดแบบเดียวสามารถใช้ได้กับวัสดุทุกประเภท และการชุบแข็งผิว แม้ว่าความแม่นยำ และการปรับเปลี่ยนได้สะดวกสำหรับการทดสอบวัสดุที่แข็งมากและอ่อนมาก ภายใต้ Load ที่เปลี่ยนแปลงได้ แต่เครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์มีราคาแพงกว่าแบบบริเนลและร็อคเวลล์

2.2.2.2 การทดสอบความแข็งแบบนูป (Knoop)

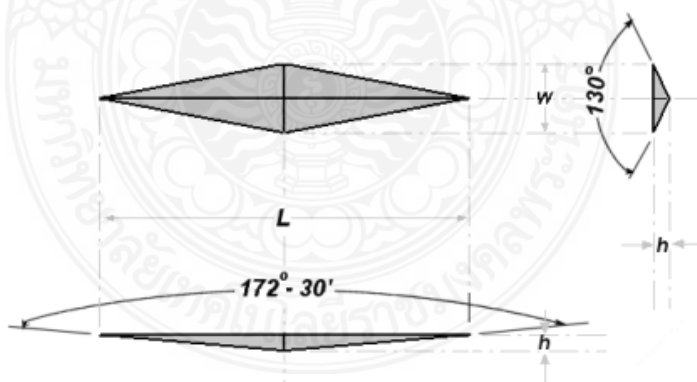
การทดสอบความแข็งแบบนูป (Knoop) คล้ายกับแบบวิกเกอร์จะใช้หัววัดที่ทำจาก เพชร ที่เป็นฐานรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ที่เรียกว่า พีระมิดแนวยาว (Elongated pyramid) อัตราส่วนของเส้นทแยงมุมคือ 7 ต่อ 1 และความลึกของรอยกดอยู่ที่ 1 ใน 30 ส่วนของความยาวส่วนที่ยาวที่สุด ในการทดสอบจะวัดเฉพาะด้านที่ยาวที่สุดของรอยกด แล้วคำนวณดังสมการ

$$H_k = 14.229 \frac{P}{L^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ H_k คือ ค่าความแข็งแบบนูป มีหน่วยเป็น GPa

P คือ แรงที่กดทดสอบ มีหน่วยเป็น kg

L คือ ความยาวแนวยาว มีหน่วยเป็น mm



รูปที่ 2.11 รอยกดแบบนูป [29]

2.2.2.3 โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) [31]

วัสดุที่มีพฤติกรรมยืดหยุ่น อัตราระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity, E) หรือยังโมดูลัส มักจะมีหน่วยเป็น จิกะปาสคาล ถ้าแรงมากระทำเป็นแรงเฉือนจะเรียกว่า โมดูลัสแรงเฉือน (Shear modulus, S) หรือ โมดูลัสของความคงรูป (Modulus of rigidity, G) ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Rigidity) ถ้า ค่า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นได้น้อย แต่ถ้าค่า E และ G ต่ำ วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องการรับแรงต่าง ๆ สมการในการคำนวณหาค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น คือ

$$E = \frac{0.45H_k}{0.1406 \frac{b}{a}} \quad (2.4)$$

เมื่อ H_k คือ ค่าความแข็งแบบนูน มีหน่วยเป็น mm

a คือ ค่าความยาวที่ยาวที่สุดของเส้นทแยงของค่าความแข็งแบบนูน มีหน่วยเป็น mm

b คือ ค่าความยาวที่สั้นที่สุดของเส้นทแยงของค่าความแข็งแบบนูน มีหน่วยเป็น mm

2.2.2.4 สัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก (Critical stress intensity factor, K_{Ic}) [32]

สมบัติของแก้วเซรามิกทางทันตกรรมที่พึงประสงค์ คือ ต้องมีความแข็งแรงควบคู่กับความเหนียว โดยที่ความเหนียว สำหรับแก้วเซรามิกมักนิยมเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความต้านทานต่อการแตกหัก (Fracture toughness) ซึ่งเป็นกลไกการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของอะตอม ณ ตำแหน่งปลายสุดของการผิดรูปว่ามีความสามารถในการส่งผ่านของความเค้นและความเครียดระหว่างเนื้อแก้วเซรามิก หากการส่งผ่านความเค้นและความเครียดเกิดขึ้นง่าย วัสดุจะมีความเปราะ ในทางกลับกัน หากการส่งผ่านของความเค้นและความเครียดเกิดขึ้นได้ยาก วัสดุจะเปลี่ยนพลังงานสำหรับการส่งผ่านนั้นเป็นพลังงานความร้อน เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก (Critical stress intensity factor, K_{Ic}) ของแก้วเซรามิก สามารถปรับปรุงได้จากการตกผลึกลงในแก้ว เพื่อปรับปรุงการส่งผ่านความเค้นและความเครียดภายในแก้วเซรามิก สมการในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก คือ

$$K_{ic} = 0.0016 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น มีหน่วยเป็น GPa

H_v คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ มีหน่วยเป็น mm

P คือ แรงที่ทำการทดสอบ มีหน่วยเป็น kg

c คือ ค่าครึ่งความยาวของรอยร้าว มีหน่วยเป็น mm

2.2.2.5 ดัชนีความเปราะ (Brittleness index, BI) [33]

ข้อกำหนดหลักประการหนึ่งสำหรับแก้วเซรามิกที่ใช้ในด้านทันตกรรมคือ ความสามารถในการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก กล่าวคือ ความสามารถในการตัด ตกแต่งวัสดุให้เป็นรูปร่างที่ต้องการโดยไม่ทำให้เกิดรอยแตกหรือชำรุด สิ่งนี้ต้องการความสมดุลในความแข็งและความเหนียวของวัสดุ ดัชนีความเปราะ (BI) มักใช้ในการประเมินความสามารถในการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของวัสดุ ก่อนที่จะลองใช้เทคนิคการขึ้นรูป สมการดัชนีความเปราะ คือ

$$BI = \frac{H_v}{K_{ic}} \quad (2.6)$$

เมื่อ H_v คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ มีหน่วยเป็น GPa

K_{ic} คือ สัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก มีหน่วยเป็น MPa^{1/2}

2.2.3 เฟสองค์ประกอบโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) [34]

เทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาใช้วิเคราะห์ และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative) และเชิงปริมาณ (Quantitative)

หลักการทำงานอาศัยหลักการยิงรังสีเอกซ์ไปกระทบกับชิ้นงานทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาที่มุมต่าง ๆ โดยมีหัววัดสัญญาณเป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมองเห็นในการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในมุมที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างผลึก ซึ่งผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกสารตัวอย่างนั้น ๆ

กฎของแบรกก์อาศัยหลักการการแทรกสอดของคลื่นรังสีเอกซ์ ใช้อธิบายโครงสร้างของผลึก ภายในตารางธาตุการกระเจิงรังสีเอกซ์ต้องอาศัยกฎของแบรกก์ เมื่อรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวตกกระทบ ผลึกหรือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมอย่างมีระเบียบจะเกิดการสะท้อนบนระนาบของผลึก ดังแสดงรูปที่ 2.12 และเกิดการแทรกสอด เมื่อใดที่ผลต่างของระยะทางเดินของรังสีเอกซ์มีค่าเท่ากับจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ จะทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสี

กฎของแบรกก์เป็นไปตามสมการที่ 2.7

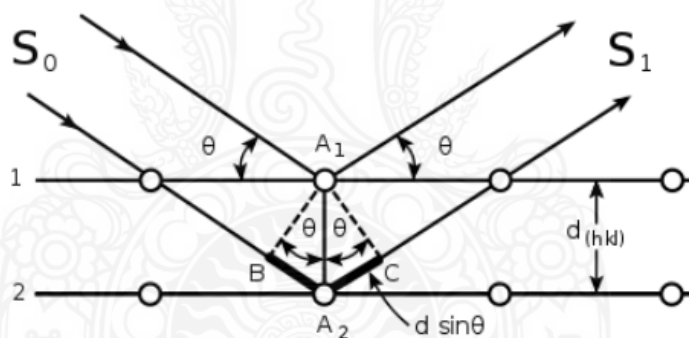
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.7)$$

เมื่อ θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบของผลึก มีหน่วยเป็น องศา

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก มีหน่วยเป็น Å

n คือ 1, 2, 3, ...

λ คือ ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็น nm

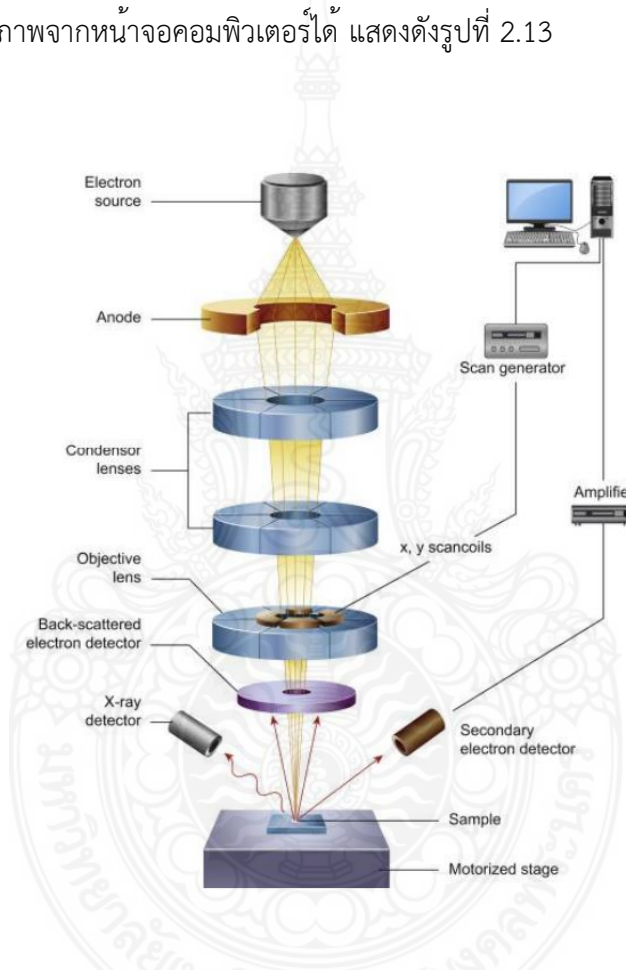


รูปที่ 2.12 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ [34]

2.2.4 โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) [36]

การสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะเป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ ดังนั้นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างสัณฐาน และรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อ และพื้นที่หน้าตัดของโลหะ เป็นต้น

หลักการทำงานจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุลงไปยังผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิจะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ ถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอคอมพิวเตอร์ และสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้ แสดงดังรูปที่ 2.13

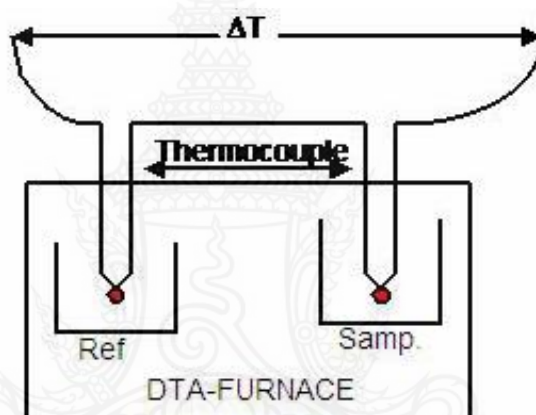


รูปที่ 2.13 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [36]

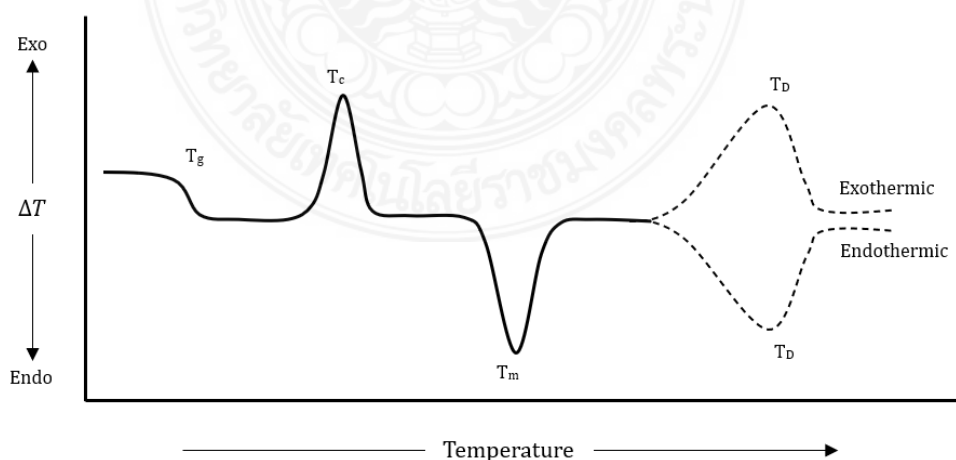
2.2.5 สมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (Differential thermal analysis; DTA) [37-38]

หลักการทำงานโดยจะเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง โดยที่สารอ้างอิงนี้ต้องมีความเฉื่อยต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในย่านที่จะทำการศึกษา

ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ต้องควบคุมสารตัวอย่าง และสารอ้างอิงให้อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน เช่น การเพิ่มอุณหภูมิของสารด้วยการเพิ่มอุณหภูมิที่แน่นอน แล้วตรวจสอบความแตกต่างของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของสารตัวอย่างเทียบกับสารอ้างอิงที่อาจเกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของสารตัวอย่าง โดยจะปรากฏออกมาในรูปของความร้อน ถ้าอุณหภูมิของสารตัวอย่างต่ำกว่าสารอ้างอิง แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบดูดความร้อน (Endothermic) แต่ถ้าอุณหภูมิของตัวอย่างสูงกว่าสารอ้างอิง แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบคายความร้อน (Exothermic) ซึ่งเป็นผลของการเปลี่ยนเฟส (Phase transition) การละลาย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึก การเดือด การเผาไหม้ การระเหย การคายน้ำ การแตกตัว กระบวนการลดออกซิเดชัน (Oxidation reduction) หรือ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่าง ๆ (Chemical reaction) โดยสามารถพิจารณาในรูป 2.14 และ 2.15



รูปที่ 2.14 หลักการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของสารตัวอย่างกับสารอ้างอิง [37]



รูปที่ 2.15 ลักษณะของผลการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (Differential thermal analysis, DTA) [37]

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตรวจวัดจากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิตัวอย่างและสารอ้างอิง แล้วจะบันทึกเป็นกราฟ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการวิเคราะห์ [38] ได้แก่

1. อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง มักจะอยู่ในช่วง $2-20\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ การเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะเพิ่มพื้นที่ของกราฟ (Peak) ส่วนการลดอัตราในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะลดพื้นที่ของกราฟ

2. ปริมาณ และสภาพของตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองการวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ การเปลี่ยนแปลงปริมาณของตัวอย่างที่ใช้การทดลอง จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และปฏิกิริยาทางฟิสิกส์แตกต่างกัน นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณของตัวอย่างทำให้พื้นที่ใต้กราฟเพิ่มขึ้นด้วย รวมถึงขนาดอนุภาค (Particle size) การอัดแน่น (Packing) และความหนาแน่น (Density) ของตัวอย่าง มีผลต่อความสามารถในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของตัวอย่าง หรือความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างตัวอย่างกับสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็งและแก๊ส (Solid-gas reaction)

3. การเลือกสารอ้างอิง สารอ้างอิงควรมีสมบัติทางด้านความร้อน (Specific heat, conductivity) ใกล้เคียงกับสารตัวอย่าง และควรเป็นสารเฉื่อยในทุกช่วงอุณหภูมิของการทดลอง การเลือกสารอ้างอิงผิดประเภทอาจนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนของเส้นอ้างอิง (Base line) อะลูมินา (Alumina) จึงเป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นสารอ้างอิง

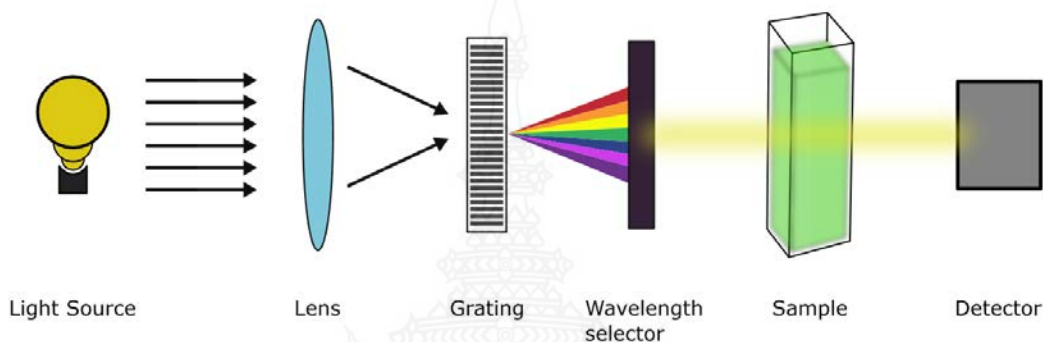
2.2.6 สมบัติทางแสง (Optical property)

สมบัติทางแสง หมายถึง การตอบสนองการรับต่อการแผ่รังสีของแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น แสงที่สามารถมองเห็นได้ สมบัติทางแสงสัมพันธ์ต่อการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสิ่งที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ เช่น การดูดซับแสง (Absorption) การสะท้อนแสง (Reflection) และการส่องผ่านแสง (Transmission)

2.2.6.1 เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer) [39]

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า Intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบ

เชิงซ้อนและสารอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสียูวีหรือแสงขาวที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงใช้เทคนิคนี้ในการระบุชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS spectrophotometer) [40]

ข้อดีและข้อเสียเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงแบบลำแสงเดี่ยว [41]

ข้อดี

1. เครื่องมือมีราคาไม่แพง
2. สามารถเลือกความยาวคลื่นที่สนใจที่จะวัดได้ง่าย

ข้อเสีย

1. สามารถเลือกวัดได้เพียง 1 ครั้งต่อความยาวคลื่น
2. ต้องใช้ค่าแบล็ก (Blank) ทุกครั้งที่เปลี่ยนความยาวคลื่น

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แก้วเซรามิกชนิดแรกที่น่ามาประยุกต์ในงานด้านบูรณะทางทันตกรรม ผลิตมาจากระบบแก้ว $\text{Li}_2\text{O}-\text{ZnO}-\text{SiO}_2$ หลังจากนั้นระบบแก้วที่มีผลิกูไซต์ (Leucite) และไมกา (Mica) ได้ถูกพัฒนาตามกันมาเป็นลำดับ [42] ระบบแก้วที่ใช้ผลิตแก้วเซรามิกลูไซต์มีองค์ประกอบทางเคมีคือ $59-63\text{SiO}_2$ $19-23.5\text{Al}_2\text{O}_3$ $10-14\text{K}_2\text{O}$ $3.5-6.5\text{Na}_2\text{O}$ $0-1\text{B}_2\text{O}_3$ และ $0-3\text{CaO}$ ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยแก้วที่เตรียมจะผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อทำให้เกิดนิวเคลียสและการตกผลึกที่ผิว (Surface nucleation

and crystallization) แก้วเซรามิกชนิดนี้มีปริมาณผลึกต่อแก้วเมทริกซ์สูงถึงร้อยละ 35 โดยปริมาตร ซึ่งมีผลให้แก้วชนิดนี้มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี จึงสามารถนำไปประยุกต์เป็นฟันปลอมที่ไม่มีกรอบโลหะได้ อย่างไรก็ตามมีการรายงานว่าแก้วเซรามิกลูไซต์ยังมีสมบัติเชิงกลค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับแก้วเซรามิกทางการค้าชนิดแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต เนื่องด้วยสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยมจึงได้มีการวิจัยและพัฒนาแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตกันอย่างต่อเนื่อง

ในปี 2014 Zhang และคณะ ได้ทำการศึกษาอิทธิพลความร้อนต่อโครงสร้างทางจุลภาค และสมบัติของลิเทียมไดซิลิเกต พบว่า การให้อุณหภูมิการเกิดผลึกที่ 650 °C ทำให้แก้วมีสมบัติที่ดี โดยเฉพาะการเพิ่มเวลาในการหลอม ซึ่งไม่ทำให้แก้วเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส แต่มีการเพิ่มปริมาณของผลึกที่ใหญ่ขึ้น และเมื่อลดขนาดของผลึกแก้วลิเทียมไดซิลิเกตทำให้มีความโปร่งแสงเพิ่มขึ้น และเวลาที่ใช้ในกระบวนการทางความร้อน 48 h ในระยะแรกพบว่าเป็นช่วงที่สมบูรณ์ที่สุด มีค่าแรงดัดสูงถึง 581 ± 25 MPa [43]

ในปี 2015 Zhao และคณะ ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการเผาที่ใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวต่อโครงสร้างผลึกของลิเทียมไดซิลิเกต และความโปร่งแสงของชิ้นงาน ซึ่งที่อุณหภูมิเผาจะเกิดขึ้นทั้งกระบวนการหลอมเหลวและกระบวนการตกผลึก จากการทดลองเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเผาที่สูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานมีขนาดผลึก ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และความโปร่งแสงสูงขึ้น [43]

ในปี 2018 Khamnong และคณะ ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและโครงสร้างทางจุลภาคของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตระบบ $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O}$ โดยใช้วิธีการหลอมแล้วตกผลึกลงในแก้ว โดยเริ่มจากหลอมแก้วที่ 1,450 °C เป็นเวลา 2 h แล้วเทลงในแม่พิมพ์โลหะที่มีอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสก่อนนำไปอบอ่อน (Annealing) ที่ 500 °C เป็นเวลา 2 h เพื่อกำจัดความเค้นภายใน การวิเคราะห์ความร้อนเชิงอนุพันธ์ (DTA) ศึกษาจากอุณหภูมิห้องถึง 1,200 °C ภายใต้บรรยากาศปกติ ในอัตรา 10 °C/min จากผล DTA ทำให้ได้เงื่อนไขกระบวนการทางความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการทางความร้อน จาก 650 °C เป็น 850 °C เกิดการเปลี่ยนเฟสของลิเทียมเมตาซิลิเกต (Li_2SiO_3) เป็นลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 850 °C มีเฟสลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) เป็นหลัก ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่อุณหภูมินี้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม [44]

ร้อนเชิงอนุพันธ์ (DTA) ศึกษาจากอุณหภูมิห้องถึง 1,200 °C ภายใต้บรรยากาศปกติในอัตรา 10 °C/min จากผล DTA ทำให้ได้เงื่อนไขกระบวนการทางความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการทางความร้อน จาก 650 °C เป็น 850 °C เกิดการเปลี่ยนเฟสของลิเทียมเมตาซิลิเกต (Li_2SiO_3) เป็นลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิ 850 °C มีเฟสลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) เป็นหลัก ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่อุณหภูมินี้มีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม [36]

บทที่ 3

วิธีดำเนินการโครงการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับสารเคมีที่ใช้ อุปกรณ์ต่าง ๆ วิธีการสังเคราะห์ ซิลิกา (SiO_2) จากซีเถ้าแกลบด้วยกระบวนการแคลไซน์ และการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียม ไดซิลิเกตโดยใช้ซิลิกาที่ได้จากกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น ระบบแก้วที่เลือกใช้คือ $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O-K}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ รวมถึงขั้นตอนในการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต คือ สมบัติทางความร้อน สมบัติทางกายภาพ เฟสองค์ประกอบ โครงสร้างทางจุลภาค สมบัติเชิงกล และสมบัติทางแสง เป็นต้น

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ความบริสุทธิ์ 99.99 ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.2 โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.8 ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.3 ลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.0 ผลิตโดยบริษัท Alfa Aesar
- 3.1.4 อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ความบริสุทธิ์ 99.8 ผลิตโดยบริษัท Alorich Chemical
- 3.1.5 ไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) ความบริสุทธิ์ 99.0 ผลิตโดยบริษัท Fluka
- 3.1.6 แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_2) ความบริสุทธิ์ 99.8 ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.7 ซีเรียมไดออกไซด์ (CeO_2) ความบริสุทธิ์ 99.9 ผลิตโดยบริษัท Alorich Chemical
- 3.1.8 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความบริสุทธิ์ 99.99 ผลิตโดยบริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.9 กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ความบริสุทธิ์ 98.08 ผลิตโดยบริษัท Qrec
- 3.1.10 เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{O}_5\text{OH}$)
- 3.1.11 ซีเถ้าแกลบ

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

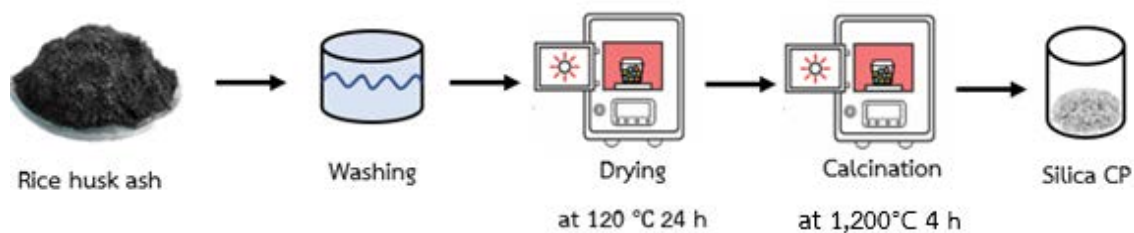
- 3.2.1 ปีกเกอร์
- 3.2.2 ซ้อนตักสาร
- 3.2.3 กระดาษชั่งสาร
- 3.2.4 กระดาษกรองสาร
- 3.2.5 อลูมิเนียมฟอยล์

- 3.2.6 ถุงชิปลือค
- 3.2.7 แทงแกว
- 3.2.8 เครื่องซังระบบดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.2.9 เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์แบบดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 3.2.10 น้ำปราศจากประจุ
- 3.2.11 น้ำกลั่น
- 3.2.12 ฝาแกว
- 3.2.13 อ่างตม้นน้ำ
- 3.2.14 เครื่องขัดชิ้นงาน
- 3.2.15 เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง
- 3.2.16 กระดาษทรายเบอร์ 100 240 600 800 และ 1,000
- 3.2.17 ผงขัดอะลูมินา
- 3.2.18 ถ้วยอะลูมินา
- 3.2.19 ขวดบีบสำหรับใส่เอทิลแอลกอฮอล์
- 3.2.20 ผ้าสักหลาด
- 3.2.21 ปากคืบสแตนเลสปลายมน
- 3.2.22 แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel plate)
- 3.2.23 เครื่องวัดความหนาแน่น (Density tester)
- 3.2.24 เครื่องวัดความแข็ง (Hardness tester)
- 3.2.25 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
- 3.2.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 3.2.27 เครื่องวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (DTA)
- 3.2.28 เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-VIS)
- 3.2.29 เครื่องวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)

3.3 วิธีการสังเคราะห์ซิลิกา (SiO_2) จากซีเถ้าแอลบ

3.3.1 กระบวนการแคลไซน์ (Calcination process; CP)

ล้างซีเถ้าแอลบให้สะอาด จากนั้นอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 24 h แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C เป็นเวลา 4 h ภายใต้บรรยากาศปกติ ด้วยอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิ 5 °C/min



รูปที่ 3.1 การสังเคราะห์ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบด้วยกระบวนการแคลไซน์ (Silica CP)

3.4 วิธีการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

วิธีการเตรียมชิ้นงาน เป็นการเตรียมแก้วลิเทียมไดซิลิเกต โดยใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการแคลไซน์ (CPG) และสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGG) เป็นสารตั้งต้น ระบบแก้วที่เลือกใช้คือ $\text{SiO}_2\text{-Li}_2\text{O-K}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-CeO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (mol%) และขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการปลุกผลึกลงในแก้วโดยใช้กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาจากกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น

3.4.1 การเตรียมแก้วลิเทียมไดซิลิเกต

การเตรียมแก้วลิเทียมไดซิลิเกต โดยใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการแคลไซน์ (CPG) และ สารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGG) เป็นสารตั้งต้น โดยวิธีการหลอมแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Melt quenching method) ระบบแก้วลิเทียมไดซิลิเกต ที่เลือกใช้คือ $67\text{SiO}_2\text{-}26\text{Li}_2\text{O-}2\text{K}_2\text{O-}2\text{P}_2\text{O}_5\text{-}1.5\text{CeO}_2\text{-}1.5\text{Al}_2\text{O}_3$ ในอัตราส่วนร้อยละโดยโมล (mol%) เริ่มจากการนำสารตั้งต้น ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ไดแอมโมเนียม ไฮโดรเจนฟอสเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$) ซีเรียมไดออกไซด์ (CeO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งตาม อัตราส่วนที่กำหนดดังตารางที่ 3.1 ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง (รูปที่ 3.3) ผสมสารตั้งต้น แล้วใส่ในถ้วยครุชีเบิลอะลูมินา จากนั้นหลอมแก้วด้วยเตาเผาไฟฟ้า (รูปที่ 3.4) ที่อุณหภูมิ $1,450\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 h ภายใต้บรรยากาศปกติ โดยมีอัตราการขึ้นของอุณหภูมิที่ $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ตามแผนผังเงื่อนไข การหลอม ดังในรูปที่ 3.5 แล้วทำให้แก้วเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) โดยการเทน้ำแก้วลงบนแผ่น เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel plate) กดทับอย่างรวดเร็วและทำการอบอ่อน (Annealing) ชื้นงาน เพื่อเป็นการไล่ความเค้นภายในออกจากชิ้นงานที่อุณหภูมิ $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 h โดยมีอัตราการลงของอุณหภูมิ $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ภายใต้บรรยากาศปกติ

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานแก้วลิเทียมไดซิลิเกต

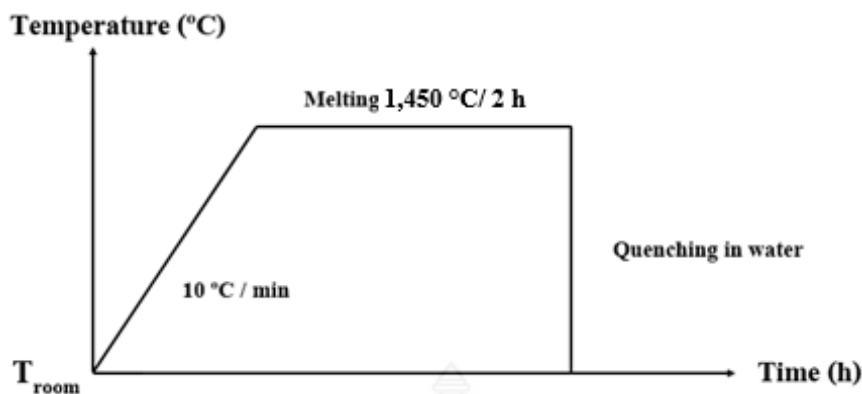
สารตั้งต้น	มวลโมเลกุล	จำนวนโมล	มวลโมเลกุล $\times$ จำนวนโมล	wt%	100 g
SiO_2	60.08	67	4,025.36	56.20	56.2023
Li_2CO_3	73.891	26	1,921.166	26.82	26.8234
K_2CO_3	138.205	2	276.41	3.86	3.8592
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	132.0562	4	528.2248	7.38	7.3751
CeO_2	172.115	1.5	258.1725	3.60	3.6046
Al_2O_3	101.96	1.5	152.94	2.14	2.1354
รวม		100	7,113.26	100.00	100.00



รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งระบบดิจิทัล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.4 เตาเผาไฟฟ้า



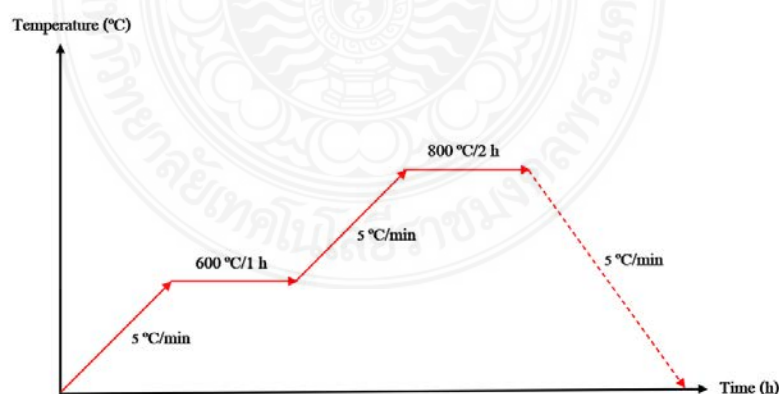
รูปที่ 3.5 แผนผังเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมแก้วลิเทียมไดซิลิเกต

3.4.2 การเตรียมแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

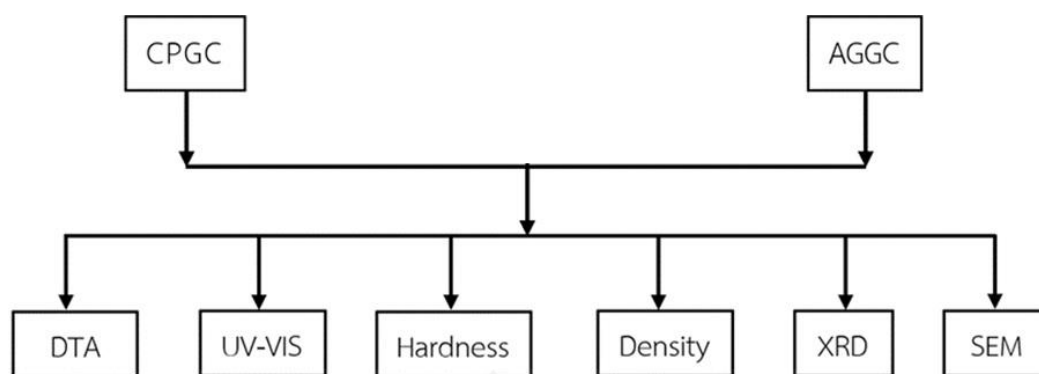
การเตรียมชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต CPGC และ AGGC ด้วยกระบวนการความร้อน (Heat treatment) เพื่อตกผลึกลงในแก้ว เริ่มจากการนำแก้วลิเทียมไดซิลิเกต CPG และ AGG ที่เตรียมได้จากขั้นตอนข้างต้น มาปลูกผลึกที่อุณหภูมิขั้นที่ 1 คือ 600 °C เป็นเวลา 1 h มีอัตราการขึ้นของอุณหภูมิ 5 °C/min แล้วตามด้วยอุณหภูมิตกผลึกขั้นที่ 2 คือ 800 °C เป็นเวลา 2 h และมีอัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิที่ 5 °C/min ภายใต้บรรยากาศปกติ

ตารางที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการปลูกผลึกชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

ลำดับชิ้นงานตัวอย่าง	อุณหภูมิตกผลึกขั้นที่ 1 (T_{c1})	อุณหภูมิตกผลึกขั้นที่ 2 (T_{c2})
CPGC	600 °C/1 h	800 °C/2 h
AGGC	600 °C/1 h	800 °C/2 h



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงเงื่อนไขของกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่ใช้ในการปลูกผลึกลงในแก้วลิเทียมไดซิลิเกต



รูปที่ 3.7 แผนผังการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

3.5 วิธีการวัดและการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

3.5.1 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อนด้วยการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (Difference thermal analysis; DTA)

การวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์เป็นการศึกษาถึงรายละเอียดของพฤติกรรมทางความร้อนของชิ้นงานแก้ว มีจุดประสงค์ในการตรวจสอบหาสถานะอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกด้วยกระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้เทคนิคการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (Difference thermal analysis; DTA) นำชิ้นงานแก้วลิเทียมไดซิลิเกต CPG SPG และ AGG ที่เตรียมได้มาทำการบดเป็นผงละเอียดเพื่อที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ต่อไป จากนั้นใช้เครื่อง High temperature DTA cell adaptor ทำการตรวจสอบผงที่ได้จากการบดชิ้นงานแก้ว โดยเงื่อนไขในการทดสอบนี้คือ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 1,200 °C ใช้ผงอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นตัวเทียบมาตรฐาน ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถประมาณช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนเป็นแก้ว (Glass transition temperature, T_g) อุณหภูมิตกผลึก (Crystallization temperature, T_c) และอุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ของวัสดุ

3.5.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพด้วยการหาค่าความหนาแน่น

การหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน โดยใช้หลักการแทนที่ของอาร์คิมิดีสในการวัดหาค่าความหนาแน่น โดยการชั่งน้ำหนักชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต ที่ผ่านการปลูกผลึกด้วย

กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ที่อุณหภูมิ 600 และ 800 °C ซึ่งน้ำหนักชิ้นงานในอากาศ (w_1) ซึ่งน้ำหนักชิ้นงานในน้ำ (w_2) และคำนวณหาความหนาแน่นของชิ้นงาน จากสมการ 3.1

$$\rho_s = \left(\frac{w_1}{w_1 - w_2} \right) \rho_{st} \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_s คือ ความหนาแน่นของชิ้นงาน มีหน่วยเป็น g/cm^3

ρ_{st} คือ ความหนาแน่นของน้ำปราศจากไอออน มีหน่วยเป็น g/cm^3

w_1 คือ น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งในอากาศ มีหน่วยเป็น g

w_2 คือ น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งในน้ำ มีหน่วยเป็น g

3.5.3 การตรวจสอบเฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบและปริมาณที่เกิดขึ้น โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบลงบนผิววัสดุซึ่งมีโครงสร้างเป็นรูปผลึกและมีการจัดเรียงตัวของอะตอมอย่างมีระเบียบที่มีลักษณะเป็นระนาบ (hkl) ที่รังสีตกกระทบภายในวัสดุ โดยรูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของวัสดุแต่ละชนิดก็จะมีเฉพาะเจาะจงกับวัสดุนั้น ๆ ดังนั้น เมื่อนำเครื่องมือตรวจวัด (Detector) มารองรับรังสีเอกซ์ที่กระเจิงออกมาจากวัสดุในตำแหน่งต่าง ๆ ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุหรือสารชนิดใด มีโครงสร้างแบบไหน โดยพิจารณาจากข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างค่าของมุมแบรกก์ (Bragg's angle) กับความเข้มฟลักของรังสีเอกซ์ (Intensity) ซึ่งสารแต่ละชนิดจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนที่แตกต่างกันไป ตามลักษณะของโครงสร้าง สำหรับการวิเคราะห์ขั้นต้นในการเตรียมชิ้นงานดังนี้

ก. นำชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 240 600 800 และ 1,000 ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดงานละเอียด ทำการขัดชิ้นงานให้มีความหนา 2 mm

ข. ทำการติดตั้งชิ้นงานที่ขัดแล้วที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่อง X-ray diffraction

ค. เริ่มทำการทดสอบโดยให้มุมเริ่มต้นที่ 2 θ เท่ากับ 10 องศา และมุมสุดท้าย 2 θ เท่ากับ 60 องศา

ง. นำผลที่ได้จากการทดสอบที่แสดงผลออกมาในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มกับมุม 2 θ จากนั้นนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS เพื่อตรวจสอบเฟสองค์ประกอบและโครงสร้างผลึกของชิ้นงานที่เกิดขึ้น โดยนำค่ามุม 2 θ ที่ได้มาไปหารค่าระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) จากกฎของแบรกก์ ดังสมการที่ 3.2

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (3.2)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 1.54439 Å

3.5.4 การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

การตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อศึกษาโครงสร้างภายในแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต โดยมีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างดังนี้

ก. นำชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 240 600 800 และ 1,000 ตามลำดับ แล้วนำไปขัดต่อด้วยผงขัดอะลูมินา ขนาด 0.1 ไมโครเมตร จนผิวหน้าของชิ้นงานมีความมันวาว จากนั้นนำไปกัดกรดโดยใช้สารละลายกรดกัดแก้วความเข้มข้นร้อยละ 3 แช่ชิ้นงานเป็นเวลา 30 s

ข. ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน แล้วนำไปเข้าตู้อบ เพื่อทำการกำจัดความชื้นออกจากชิ้นงานแก้ว หลังจากนั้นติดตั้งชิ้นงานบนแท่งทองเหลือง (Stub) ด้วยเทปคาร์บอน

ค. ทำการเคลือบผิวชิ้นงานที่เตรียมได้ด้วยทองคำ โดยใช้เทคนิค Sputtering เป็นเวลา 45 วินาที ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในโหมดต่าง ๆ ตามความเหมาะสม เพื่อการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานต่อไป

3.5.5 การวิเคราะห์ขนาดและสัดส่วนปริมาณรูพรุน

การวิเคราะห์ขนาดและสัดส่วนปริมาณรูพรุนของชิ้นงานแก้วเซรามิก โดยใช้วิธีการ Linear intercept method เพื่อหาขนาดและปริมาณรูพรุนภายในชิ้นงานแก้วเซรามิก โดยมีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานดังนี้

ก. นำภาพที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต มาหาขนาดและสัดส่วนปริมาณรูพรุนของชิ้นงาน

ข. ทำการลากเส้นผ่านภาพในแนวตั้ง แนวนอน และแนวทแยง ให้ครอบคลุมภาพมากที่สุด จำนวน 10 เส้น

ค. วัดความยาวของภาพมีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm) ที่ลากผ่านภาพ (X) วัดความยาวของเส้นที่ลากผ่านรูพรุน (Y) และนับจำนวนของรูพรุน (Z)

ง. นำค่าทั้ง 3 ที่ได้ มาคำนวณหาขนาดของรูปพรุน และปริมาณสัดส่วนของรูปพรุน ดังสมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$\text{ขนาดรูปพรุน} = \frac{Y}{Z} \times L \quad (3.3)$$

เมื่อ L คือ สัดส่วนจริงของภาพต่อความยาวที่วัดโดยไม้บรรทัด

Y คือ ความยาวของเส้นที่ลากผ่านรูปพรุน มีหน่วยเป็น cm

Z คือ จำนวนรูปพรุน

$$\text{สัดส่วนปริมาณรูปพรุน} = \frac{Y}{X} \times 100 \quad (3.4)$$

เมื่อ X คือ ความยาวของภาพ มีหน่วยเป็น cm

Y คือ ความยาวของเส้นที่ลากผ่านรูปพรุน มีหน่วยเป็น cm

3.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานแก้วเซรามิก เป็นการตรวจสอบถึงความสามารถของชิ้นงานที่จะรับหรือทนทานต่อแรงกระทำในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งในการนำวัสดุต่าง ๆ ไปใช้งานจำเป็นต้องทราบถึงสมบัติเชิงกลเหล่านี้ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ประกอบการออกแบบ และคัดเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ ความแข็งแรงแบบนูน โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น สัมประสิทธิ์ความทนทานการแตกหัก และดัชนีความเปราะ โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้

ก. นำชิ้นงานแก้วเซรามิกที่ได้ มาทำการขัดชิ้นงานด้วยเครื่องขัดชิ้นงานละเอียด ขัดที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานทั้งสองด้าน โดยใช้กระดาษเบอร์ 100 240 600 800 และ 1,000 ตามลำดับ

ข. ขัดชิ้นงานให้เป็นระนาบเดียวกัน และขัดต่อด้วยผงอะลูมินาจนผิวเรียบเป็นเงา โดยให้ความหนาของชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร

ค. ทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานแบบวิกเกอร์ โดยใช้หัวกดวัดแบบวิกเกอร์ ซึ่งใช้ load ที่ 1 กิโลกรัม กดที่ตัวชิ้นงานเป็นเวลา 15 s จำนวนชิ้นงานละ 5 จุด ซึ่งรอยกดจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และทำการหาค่าความแข็งแรง โดยการวัดเส้นทแยงมุมทั้งสอง และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความแข็งแรงแบบวิกเกอร์ ดังสมการที่ 3.5

$$H_V = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (3.5)$$

เมื่อ F คือ Load มีหน่วยเป็น kg

d คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นทแยงมุมทั้งสอง มีหน่วยเป็น mm

H_v คือ ความแข็งวิกเกอร์ มีหน่วยเป็น GPa

ง. ทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงานแบบนูน โดยใช้หัวกดวัดคล้ายกับแบบวิกเกอร์ ซึ่งใช้ load ที่ 1 kg กดที่ตัวชิ้นงานเป็นเวลา 15 s จำนวนชิ้นงานละ 5 จุด ซึ่งรอยกดจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน และทำการหาค่าความแข็งแบบนูน โดยการวัดเส้นความยาวที่ยาวที่สุด และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความแข็งแบบนูน ดังสมการที่ 3.6

$$H_k = 14.229 \frac{P}{L^2} \quad (3.6)$$

เมื่อ H_k คือ ความแข็งแบบวิกเกอร์ มีหน่วยเป็น GPa

P คือ แรงที่กดทดสอบ มีหน่วยเป็น N

L คือ ความยาวตามแนวยาว มีหน่วยเป็น mm

จ. นำผลที่ได้จากการทดสอบความแข็งแรงทั้ง 2 แบบ หาค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (E) สัมประสิทธิ์การแตกหัก (K_{ic}) และค่าดัชนีความเปราะ (BI) ดังสมการ 3.7 -3.9 ตามลำดับ ดังนี้

$$E = \frac{0.45H_k}{0.1406 \frac{b}{a}} \quad (3.7)$$

เมื่อ H_k คือ ค่าความแข็งแบบนูน มีหน่วยเป็น GPa

a คือ ค่าความยาวที่ยาวที่สุดของเส้นทแยงของค่าความแข็งแบบนูน มีหน่วยเป็น mm

b คือ ค่าความยาวที่สั้นที่สุดของเส้นทแยงของค่าความแข็งแบบนูน มีหน่วยเป็น mm

$$K_{ic} = 0.0016 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (3.8)$$

เมื่อ E คือ ค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น มีหน่วยเป็น GPa

H_v คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ มีหน่วยเป็น GPa

P คือ แรงที่ทำการทดสอบ มีหน่วยเป็น kg

c คือ ค่าครึ่งความยาวของรอยร้าว มีหน่วยเป็น mm

$$BI = \frac{H_v}{K_{ic}} \quad (3.9)$$

เมื่อ H_v คือ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ มีหน่วยเป็น GPa

K_{ic} คือ ความต้านทานต่อการแตกหัก มีหน่วยเป็น MPam^{1/2}

3.5.7 การตรวจสอบสมบัติความโปร่งแสง (Transclency)

ทำการตรวจสอบสมบัติความโปร่งแสงของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต ซึ่งใช้เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง (UV-Visible spectrophotometer) โดยทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ตามกฎ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ขั้นตอนการเตรียมทดสอบมีดังนี้

ก. นำชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 240 600 800 และ 1,000 ตามลำดับ โดยใช้เครื่องขัดงานละเอียดทำการขัดชิ้นงานให้มีความหนา 2 มิลลิเมตร และทำการวัดด้วยดิจิตอลเวอร์เนียร์คาลิเปอร์

ข. ทำการติดตั้งชิ้นงานที่ขัดแล้วที่บริเวณช่องสำหรับวางชิ้นงานในเครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสง

ค. กำหนดช่วงของแสงยูวีและวิสิเบิล ที่ความยาวคลื่น 200-700 nm

ง. นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงผลออกมาในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการส่องผ่าน (T%) กับค่าความยาวคลื่น (Wavelength)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิคการเรืองรังสี (X-ray fluorescence ; XRF)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเถ้าเคลือบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (Silica CP) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGG) โดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเถ้าเคลือบทุกตัวอย่าง มีปริมาณ SiO_2 มากที่สุดเมื่อเทียบกับธาตุอื่น ๆ โดยที่ Silica CP และ Silica AG มีปริมาณร้อยละ SiO_2 คือ 98.4743 และ 99.9800 ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่า Silica AG มีความบริสุทธิ์สูงกว่า Silica CP

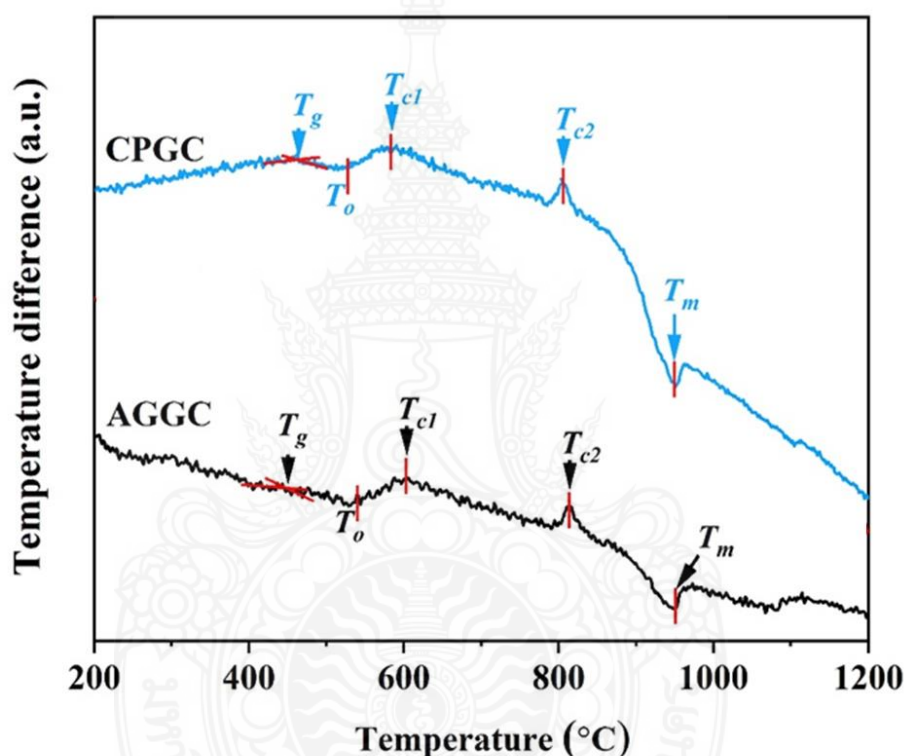
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา ที่สังเคราะห์จากซีเถ้าเคลือบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (Silica CP) และสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (Silica AG)

ตัวอย่างที่พบ (wt%)	Silica CP	Silica AG
SiO_2	98.4743	99.9800
Fe_2O_3	0.0656	-
CaO	1.4601	-

4.2 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (DTA)

จากการศึกษาการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (DTA) ของแก้วลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาสังเคราะห์จากซีเถ้าเคลือบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPG) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGG) เป็นสารตั้งต้น โดยมีเงื่อนไขการทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง $1,200^\circ\text{C}$ ที่อัตราการขึ้นลงของอุณหภูมิที่ 5°C และใช้ผงอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นสารอ้างอิง มีรูปแบบกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าเส้นกราฟเกิดการเปลี่ยนแปลงความชัน ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (Glass transition temperature; T_g) ของชิ้นงาน CPG และ AGG ที่อุณหภูมิ 468 และ 447°C ตามลำดับ และพบเส้นกราฟที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความชันซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลง (Onset temperature; T_o) ชิ้นงาน CPG และ AGG ที่อุณหภูมิ 526 และ 540°C ตามลำดับ พบช่วงการคาย

พลังงาน (Exothermic) ทั้งหมด 2 ช่วง ซึ่งอุณหภูมิการตกผลึก (Crystallization temperature; T_c) ได้แก่ อุณหภูมิการตกผลึกขั้นที่ 1 (T_{c1}) ของชิ้นงาน CPG และ AGG ที่อุณหภูมิ 583 และ 602 °C ตามลำดับ และอุณหภูมิการตกผลึกขั้นที่ 2 (T_{c2}) ชิ้นงาน CPG และ AGG ที่อุณหภูมิ 805 และ 815 °C ตามลำดับ และพบช่วงของการดูดพลังงาน (Endothermic) ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิการหลอมเหลว (Melting temperature, T_m) ของชิ้นงานทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 950 °C นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า ΔT ($\Delta T = T_o - T_g$) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเสถียรของแก้ว จากการทดลองพบว่าค่า ΔT ของชิ้นงาน CPG และ AGG คือ 58 และ 93 °C ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่า ชิ้นงาน AGG มีความเสถียรมากกว่าชิ้นงาน CPG จึงส่งผลให้ชิ้นงาน CPGC มีปริมาณรูพรุนมากที่สุด และมีปริมาณเฟสแปลกปลอมมากกว่า



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (DTA) โดยใช้ผงอะลูมินา (Al_2O_3) เป็นสารอ้างอิง

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะแก้ว (T_g) อุณหภูมิเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลง (T_o) อุณหภูมิการตกผลึกขั้นที่ 1 (T_{c1}) อุณหภูมิการตกผลึกขั้นที่ 2 (T_{c2}) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) และ $\Delta T = T_o - T_g$

ชิ้นงาน	T_g °C	T_o °C	T_{c1} °C	T_{c2} °C	T_m °C	ΔT °C
CPGC	468	526	583	805	950	58
AGGC	447	540	602	815	950	93

4.3 ลักษณะปรากฏ (Appearance)

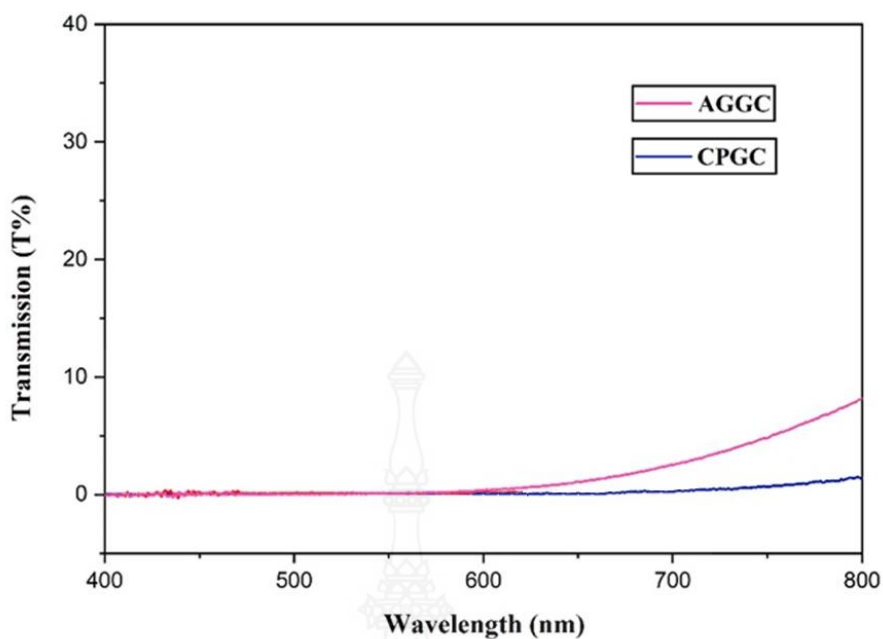
จากการศึกษาลักษณะปรากฏของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเถ้าแกลบผ่านการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่า ชิ้นงาน AGGC มีลักษณะเป็นสีขาว แต่ชิ้นงาน CPGC มีลักษณะเป็นขาวนวลหรือสีขาวเหลือง เป็นผลเนื่องมาจากองค์ประกอบของทางเคมีของซิลิกาจากซีเถ้าแกลบที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการแคลไซน์มีความบริสุทธิ์น้อยกว่า จึงทำให้ชิ้นงาน CPGC มีสีเป็นขาวนวลหรือสีขาวเหลือง



รูปที่ 4.2 ลักษณะปรากฏของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

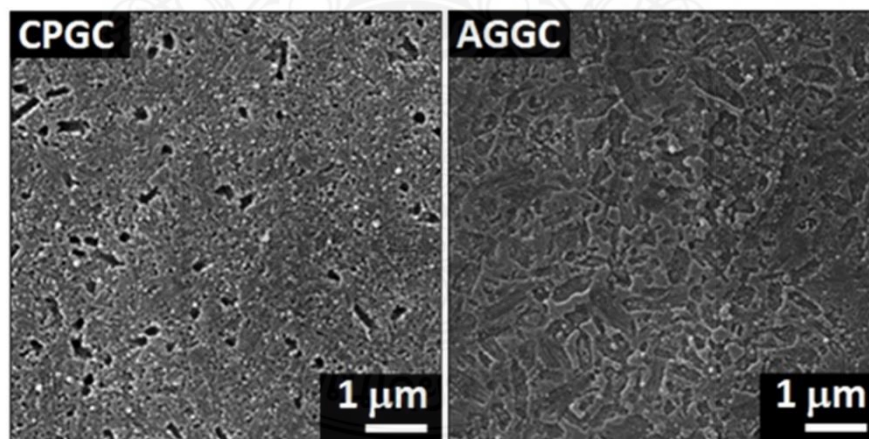
4.4 ผลการวิเคราะห์ความโปร่งแสง

จากรูปที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการส่องผ่านและความยาวคลื่นของแสงของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเถ้าแกลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น ใช้เครื่อง UV-VIS ในการวิเคราะห์ความโปร่งแสงของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงาน AGGC และ CPGC มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงประมาณ 8 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลทำให้ชิ้นงาน AGGC มีความโปร่งแสงเล็กน้อยคล้ายคลึงกับลักษณะฟันจริง แต่ชิ้นงาน CPGC มีความทึบแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงกับความยาวคลื่นของชิ้นงาน แก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

4.5 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



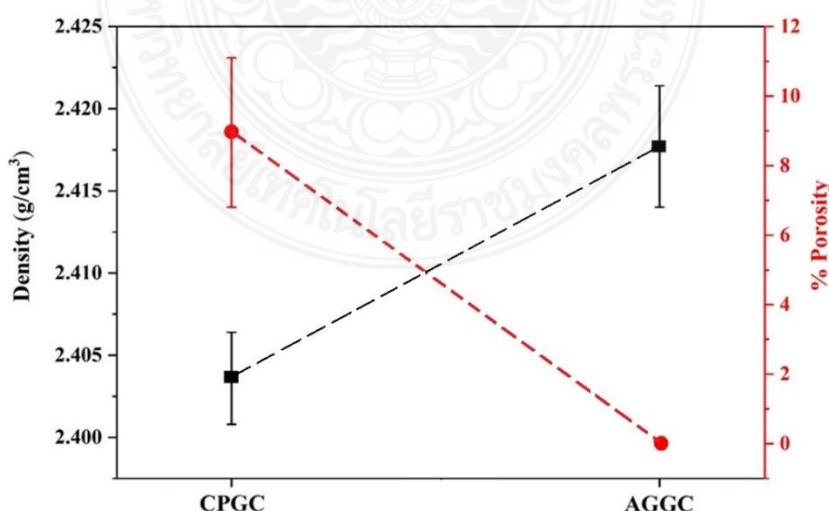
รูปที่ 4.4 โครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเมนต์ผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็น

สารตั้งต้น โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าทุกชิ้นงานมีเฟสเสริมแรง (Dispersed phase) ลักษณะเป็นแบบเข็ม (Needle-like crystals) ซึ่งบ่งบอกได้ว่าเป็นผลึกของเฟสลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) กระจายตัวอยู่ในเฟสพื้นหรือเมทริกซ์เฟสอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าชิ้นงาน CPGC มีปริมาณรูพรุนมากที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากองค์ประกอบทางเคมีของ Silica CP มีความบริสุทธิ์น้อย และชิ้นงาน CPGC มีความเสถียรต่ำ

4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของชิ้นงาน

จากการศึกษาการหาค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเถ้าแอลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น โดยใช้หลักการแทนที่ของอาร์คิมิดีสในการวัดหาค่าความหนาแน่นชิ้นงานและการหาร้อยละความพรุนของชิ้นงานโดยใช้วิธีการคำนวณจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่า ชิ้นงาน AGGC มีความหนาแน่นมาก ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละความพรุนที่น้อย และชิ้นงาน CPGC มีความหนาแน่นน้อย และสอดคล้องกับร้อยละความพรุนที่มาก ดังแสดงในตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความบริสุทธิ์ของซิลิกาที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์แก้วเซรามิก ซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (Silica AG) มีความบริสุทธิ์สูงจึงทำให้ชิ้นงาน AGGC มีความหนาแน่นสูง แต่ซิลิกาจากซีเถ้าแอลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (Silica CP) มีความบริสุทธิ์น้อยจึงส่งผลทำให้ชิ้นงาน CPGC มีความหนาแน่นต่ำตามไปด้วย



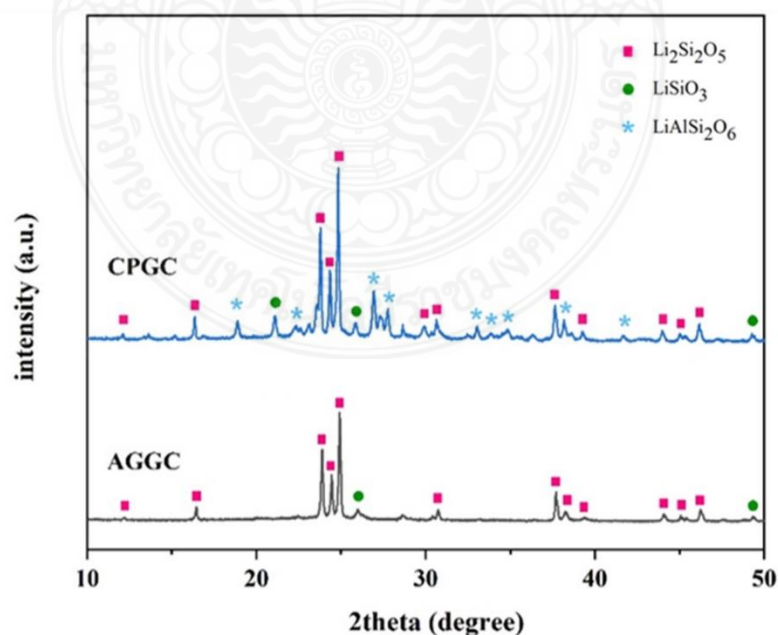
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นและร้อยละความพรุนของแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความหนาแน่นและค่าร้อยละความพรุนของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

ชิ้นงาน	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ร้อยละความพรุน (%ความพรุน)
CPGC	2.4036±0.0058	8.95±3.15
AGGC	2.4177±0.0077	0.00±0.00

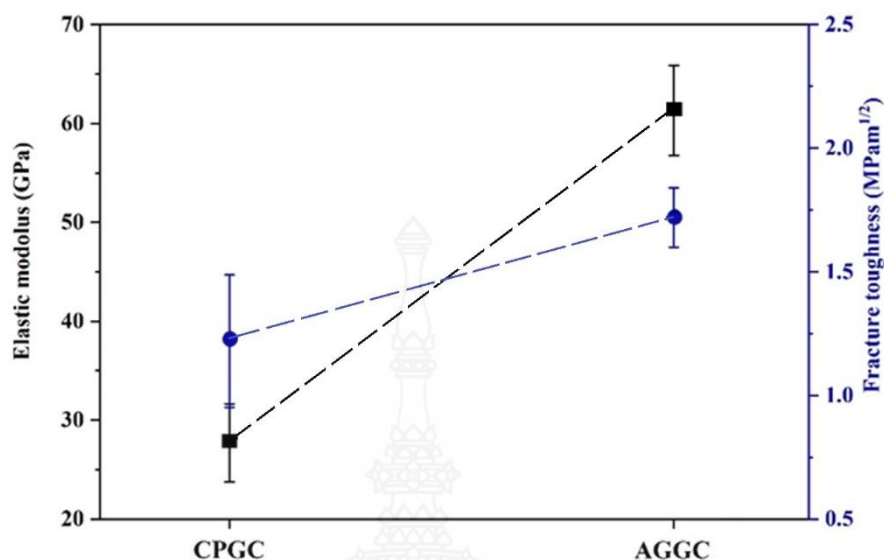
4.7 ผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

จากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากซีเถ้าแอลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ มีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าทุกชิ้นงานมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมีเฟสหลักคือ เฟสลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) ซึ่งตรงกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-082-2396 และมีเฟสรองคือ เฟสลิเทียมซิลิเกต (Li_2SiO_3) ซึ่งตรงกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 00-004-0273 แต่ชิ้นงาน CPGC มีเฟสรองอีกหนึ่งเฟสคือ เฟสลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) ซึ่งตรงกับฐานข้อมูล JCPDS หมายเลข 01-074-1095 ที่เป็นเฟสแปลกปลอม ซึ่งอาจเป็นผลทำให้ชิ้นงาน CPGC มีปริมาณรูพรุนมาก มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

4.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (E) และสัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC}) ของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกต

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานแก้วเซรามิกลิเทียมไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น ซึ่งได้แก่ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (H_V) ค่าโมดูลัสสภาพยืดหยุ่น (E) ค่าสัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC}) และค่าดัชนีความเปราะ (BI) ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.7 ซึ่งค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (E) บ่งบอกถึงความแข็งแรงของชิ้นงาน และค่าสัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC}) บ่งบอกถึงความเหนียวทนทานต่อการแตกหักของชิ้นงาน และสอดคล้องกับค่าดัชนีความเปราะที่มีค่าสวนทางกัน จากการทดลองพบว่า ชิ้นงาน AGGC มีค่า H_V E และ K_{IC} สูง และมีค่า BI ต่ำ และชิ้นงาน CPGC มีค่า H_V E และ K_{IC} ต่ำกว่า และมีค่า BI สูง สืบเนื่องมาจากปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน CPGC มีปริมาณมากจึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่าชิ้นงาน AGGC แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทั้งหมดกับสมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิกที่กรรมประเภทอื่น ๆ ตารางที่ 4.5 พบว่า ค่า H_V และ K_{IC} ของชิ้นงานทั้งหมดมีค่าเทียบเท่าได้กับแก้วเซรามิกทางทันตกรรมประเภทต่าง ๆ ดังนั้น แสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะประดิษฐ์แก้วเซรามิกทางทันตกรรมโดยใช้ซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบเป็นสารตั้งต้นได้

ตารางที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของชิ้นงานแก้วเซรามิก ซึ่งได้แก่ ความแข็งแบบวิกเกอร์ ค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น สัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก และดัชนีความเปราะ

ชิ้นงาน	ค่าความแข็ง แบบวิกเกอร์, H_V (GPa)	ค่าโมดูลัสของ สภาพยืดหยุ่น, E (GPa)	สัมประสิทธิ์ ความทนทานต่อ การแตกหัก, K_{Ic} (MPam ^{1/2})	ค่าดัชนี ความเปราะ, BI ($\mu\text{m}^{-1/2}$)
CPGC	6.39±0.423	27.70±3.962	1.22±0.268	5.24±1.149
AGGC	7.43±0.126	61.31±4.566	1.72±0.220	4.32±0.573

ตารางที่ 4.5 สมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิกทันตกรรมประเภทต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ความแข็งแบบวิกเกอร์ และสัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก

ชนิดแก้วเซรามิกทันตกรรม	ค่าความแข็ง แบบวิกเกอร์ (GPa)	สัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการ แตกหัก, K_{Ic} (MPam ^{1/2})
ลิเทียมไดซิลิเกต ^{[45],[46]}	4-6.5	0.8-4.07
ลูไซต์ ^{[45],[46]}	6.2-6.5	0.7-1.3
เซอร์โคเนีย เสริมแรงลิเทียม ไดซิลิเกต ^{[45],[46]}	6-7	2.31±0.17
ฟลูโรไมกา ^{[45],[46]}	4-6.5	0.8-1.5

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสังเคราะห์ซิลิกาจากชี้เถาผ่านกระบวนการแคลไซน์ (Silica CP) ได้สำเร็จ และยังสามารถประดิษฐ์แก้วเซรามิกพอลิเมอร์ไดซิลิเกตที่ใช้ซิลิกาที่สังเคราะห์จากชี้เถาผ่านกระบวนการแคลไซน์ (CPGC) และซิลิกาจากสารเคมีเกรดวิเคราะห์ (AGGC) เป็นสารตั้งต้น ด้วยวิธีการหลอมแล้วตกผลึกลงในแก้วได้สำเร็จ จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ Silica CP พบว่ามีปริมาณ SiO_2 สูงร้อยละ 98.4743 จากการศึกษาการวิเคราะห์เชิงความร้อนแบบอนุพันธ์ (DTA) พบว่า ΔT ซึ่งบ่งบอกถึงความเสถียรของแก้วเซรามิกของชิ้นงาน CPGC และ AGGC คือ 58 และ 93 °C ตามลำดับ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าชิ้นงาน AGGC มีความเสถียรมาก และชิ้นงาน CPGC มีความเสถียรน้อย จากการศึกษาลักษณะปรากฏ พบว่า ชิ้นงาน AGGC มีลักษณะเป็นสีขาว และชิ้นงาน CPGC มีลักษณะเป็นสีขาวนวล (สีขาวเหลือง) จากการศึกษาความโปร่งแสงพบว่าชิ้นงาน AGGC และ CPGC มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงประมาณ 8 และ 0 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงาน AGGC มีความโปร่งแสงเล็กน้อย และชิ้นงาน CPGC มีความทึบแสง จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค พบว่า ทุกชิ้นงานมีเฟสเสริมแรงลักษณะเป็นแบบเข็ม (Needle-like crystals) ซึ่งบ่งชี้ว่าเป็นผลึกเฟสลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) ซึ่งกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอในเฟสพื้นหรือเมตริกซ์เฟส และยังพบว่า ชิ้นงาน CPGC มีปริมาณรูพรุนที่มาก จากการศึกษาความหนาแน่นและร้อยละความพรุน พบว่า ชิ้นงาน CPGC มีความหนาแน่นน้อยซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละความพรุนที่มาก จากการศึกษาเฟสองค์ประกอบ พบว่า ทุกชิ้นงานมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยมีเฟสหลักคือ เฟสลิเทียมไดซิลิเกต ($\text{Li}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) และมีเฟสรองคือ เฟสลิเทียมซิลิเกต (Li_2SiO_3) แต่ CPGC มีเฟสรองอีกหนึ่งเฟสคือ เฟสลิเทียมอะลูมิเนียมซิลิเกต ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) ซึ่งเป็นเฟสแปลกปลอม จากการศึกษาสมบัติเชิงกล ซึ่งได้แก่ ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ (H_V) ค่าโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (E) ค่าสัมประสิทธิ์ความทนทานต่อการแตกหัก (K_{IC}) และค่าดัชนีความเปราะ (BI) พบว่า ชิ้นงาน CPGC มีค่า H_V E และ K_{IC} ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับค่า BI สูงสืบเนื่องมาจากปริมาณรูพรุนในชิ้นงาน CPGC ที่สังเคราะห์จาก Silica CP ที่มีความบริสุทธิ์ต่ำจึงทำให้ชิ้นงาน CPGC มีสมบัติเชิงกลต่ำกว่าชิ้นงาน AGGC อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานทั้งหมดกับสมบัติเชิงกลของแก้วเซรามิกทางทันตกรรมประเภทต่าง ๆ แล้ว พบว่า ค่า H_V และ K_{IC} ของชิ้นงานทั้งหมดสามารถเทียบเท่ากับค่าของแก้วเซรามิกทางทันตกรรมประเภทต่าง ๆ ดังนั้นจึงมี

ความเป็นไปได้ที่จะใช้แก้วเซรามิกเคลือบผิวที่ผลิตจากซิลิกาที่สังเคราะห์ได้จากซีเมนต์เป็นสารตั้งต้นในการใช้จริงทางด้านทันตกรรมบูรณะ

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาเรื่องการทนทานต่อกรด-เบส การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ การทดสอบความสามารถยึดติด และศึกษาความเข้ากันได้ทางชีวภาพเพิ่มเติม เนื่องจากเป็นวัสดุที่ใช้ในทาง การแพทย์



เอกสารอ้างอิง

- [1] ข้าว [Online]. Available: <http://www.riceproduct.org>
- [2] ปริญญา จินดาประเสริฐ อินทรชัย หอวิจิตร และ สมนึก ประภาธนากร, “ปูนซีเมนต์เถ้าแกลบ, วารสารที่อยู่อาศัย การเคหะแห่งชาติ ปี 3 เล่มที่ 2, 2529.
- [3] M. Schweiger, W. Höland, M. Frank, H. Drescher, and V. Rheinberger, “IPS Empress® 2: A new pressable high strength glass-ceramic for esthetic all ceramic restoration,” Quintessence Dent Technol, Vol. 22, pp. 143–52, 1999.
- [4] P. Narayan, S. Singhanian and S. Consultants. Adding to the mix [online]. Available: <http://www.ricehuskash.com/index.htm>
- [5] Z.A.M. Ishak and A.A. Baker. “An investigating on the potential of rice husk ash as fillers for epoxidized natural rubber (ENR)”. Polymer, Vol 31, PP 259-269, 1995.
- [6] อีรศักดิ์ พรหมเทพ. รายงานการวิจัยเรื่องการศึกษาพฤติกรรมการกระจายตัวของซิลิกาจากเถ้าแกลบข้าว สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พฤษภาคม 2548, หน้า 3-9.
- [7] “ซิลิกอนไดออกไซด์” ศูนย์ข้อมูลวัสดุอันตรายและเคมีภัณฑ์ 2544. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา <http://www.pcd.go.th>. (2 May 2544).
- [8] Visualization Gallery. 1996. “Amorphous silica” [Online] <http://www.core.ecu/phys/flurchickk/visualization/gallery/index.html>. (19 October 2006)
- [9] ไพจิตร อังศิริวัฒน์ “เนื้อดินเซรามิก” , พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์ . 2541. หน้า 77"
- [10] Tectosilicates. 2005 “Cristoba” [Online] <http://www.geoclassroom.com/mineralo/Tectosilicates.html>. (28 November 2006)
- [11] สุคนธ์พานิชพันธ์. “การสังเคราะห์วัสดุตัวกรองระดับไมครอนและวัสดุนาโนด้วยกระบวนการทางเคมี”, ภาควิชาเคมีคณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2549.
- [12] W. Geffecken and E. Berger, Deutsch Reichs Patent 736411, 1939.
- [13] Chemat technology Co.Ltd. 1998. “Sol gel technology” [Online]. Available http://www.chemat.com/html/sol_gel.html.gif. (19 September 1998).
- [14] Jeon, E.; Ryu, S.; Park, S.; Wang, L.; Tsang, D.C.W., & Baek, K. (2018). Enhanced Adsorption of Arsenic onto Alum Sludge Modified by Calcination. Journal of Cleaner Production, 176, 54-62.

- [15] Kim, B.K.; Lee, D.Y.; Gwak, G.H.; Han, Y.S., & Oh, J.M. (2019). Zn-Fe Mixed Metal Oxides from Metal Hydroxide Precursor : Effect of Calcination Temperature on Phase Evolution, Porosity, and Catalytic Acidity. *Journal of Solid State Chemistry*, 269, 454-458.
- [16] กมลพรรณ เพ็งพัฑ. “วิทยาศาสตร์ของกลาสส์,” เอกสารประกอบการสอนประมวลรายวิชา ว.วศ. 308, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2538.
- [17] Michel Prassas. 2009. “Silica Glass from Aerogels,” [Online]. Available <http://www.solgel.com/articles/april01/aerog1.htm> (31 August 2010).
- [18] P. Prapitpongwanich, “Fabrication of glass-ceramics containing ferroelectric nanocrystals,” Doctor of philosophy in materials science, Chiangmai university, 2552.
- [19] W. S. Piestrzak and B. L. Eppley, “Resorbable Polymer Fixation for Craniomaxillofacial Surgery: Development and Engineering Paradigms,” *J. Craniomaxillofac. Surg.*, vol. 11, pp. 575-585, 2000.
- [20] วัสดุการแพทย์ [ออนไลน์] Available: <http://www.kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book.php?book=30&chap=9&page=9.html>.
- [21] W. HÖLAND and W. RHEINBERGER, Chapter 24 Dental glass-ceramics, *Bioceramics and their Clinical Applications*. New York Washington: WoodHead Publishing Limited, 2008.
- [22] F. H. ElBatal, M. A. Azooz and Y. M. Hamdy “Preparation and characterization of some multicomponent silicate glasses and their glass–ceramics derivatives for dental applications,” *Ceram. Int.*, vol. 5, pp. 1211-1218, 2008.
- [23] R. Ravarian, F. Moztarzadeh, M. S. Hashjin, S. M. Rabiee, P. Khoshakhlagh and M. Tahiri, “Synthesis characterization and bioactivity investigation of bioglass hydroxyapatite composite,” *Ceram. Int.*, vol. 36, pp. 291–297, 2009.
- [24] V. Decock, K. De Nayer and J. A. De Boever, “18 - Year longitudinal study of cantilevered fixed restorations,” *Int J Prosthodont*, vol. 9, pp. 331, 1996.
- [25] D. Felton, B. Kanoy, S. Bayne and G. Wirthman, “Effect of in vivo crown margin discrepancies on periodontal health,” *J. Prosthet. Dent.*, vol. 65, pp. 357–364, 1991.

- [26] J. L. Wickens, "Tooth surface loss: dealing with failures," Br. Dent. J., vol. 186, pp. 443–446, 1999.
- [27] M. Kokoti, A. Sivropoulou, P. Koidis and P. Garefis, "Comparison of cell proliferation on modified dental ceramics," J. Oral Rehabil., vol. 28, pp. 880–887, 2001.
- [28] กอบวุฒิ รุจิจินากุล. การวิเคราะห์ของแข็งเชิงฟิสิกส์. เชียงใหม่: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2553.
- [29] ความแข็ง (Hardness) [ออนไลน์] Available: http://www.dss.go.th/images/st-article/pep_5_2550_hardness.pdf
- [30] วิลเลียมส์ ดีม คาลิสเตอร์. เจ อาร์ . วัสดุศาสตร์และวิศวกรรมวัสดุพื้นฐาน -Materials Science and Engineering. กรุงเทพฯ : ท็อป, 2548; 120-125
- [31] Modulus of Elasticity [ออนไลน์] Available: http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/2/material/1Material_Properties.pdf
- [32] ความทนต่อการแตกหัก (2010, ตุลาคม) [ออนไลน์] Available: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=KTS&NM=291>
- [33] E. A. Tsiou, S. E. Northeast and R. V. Noort, "Brittleness index of machinable dental materials and its relation to the marginal chipping factor," J. Dent., vol.35, pp. 897-902, 2007.
- [34] X-ray Reflection according to W. L. Bragg, CHAPTER 6th Principles of X-ray Diffraction. [ออนไลน์] Available:
- [35] Geochemical Instrumentation and Analysis Scanning. Electron Microscope (SEM). [ออนไลน์] Available:
- [36] ธิติ มหาเจริญ, "การตรวจลักษณะทางพื้นผิวและธาตุองค์ประกอบ" คณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ, ปี ค.ศ. 2018.
- [37] DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS (DTA) [ออนไลน์] Available: [http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=31&id=44\(29](http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=31&id=44(29)
- [38] กิ่งดาว แผนสมบุญ. การวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential Thermal Analysis [ออนไลน์] Available: https://www.dss.go.th/images/st-article/ct_12_2544_dta.pdf

- [39] UV-VIS Spectroscopy [ออนไลน์] Available: [https:// www.nanotec.or.th/th/งานบริการ/ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์/uvvis-spectroscopy](https://www.nanotec.or.th/th/งานบริการ/ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์/uvvis-spectroscopy)
- [40] UV-VIS Spectroscopy [ออนไลน์] Available: <https://psiberg.com/wp-content/uploads/2021/09/uv-instrument-pathed.svg>
- [41] UV-VIS Spectroscopy [ออนไลน์] Available: <http://fulltext.rmu.ac.th/fulltext/2550/79734/79734-1.pdf>
- [42] P. H. Kumar, V. K. Singh, A. Srivastava, S. K. Hira and P. P. Manna, “Mechanochemically synthesized leucite based bioactive glass ceramic composite for dental veneering,” *Ceram. Int.*, vol. 41, pp. 11161–11168, 2005.
- [43] วรณรดา สุวรรณกาญจน์ และ อานนท์ นุชอนงค์, “การผลิตแก้วเซรามิกชนิดลิเทียมไดซิลิเกตสำหรับประยุกต์ใช้ทางทันตกรรม,” *มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, กรุงเทพฯ*, 2562.
- [44] เกศรินทร์ คำกันธา, “ผลของอุณหภูมิในกรรมวิธีทางความร้อนและอุณหภูมิการเผาผนึกที่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของไอพีเอส อีแม็ก เพรส ที่นำกลับมาใหม่สำหรับการบูรณะทางทันตกรรม,” *มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่*, 2562.
- [45] I. Denry and J. A. Holloway, “Ceramics for dental applications: a review,” *Mater.*, vol.3, pp. 351-368, 2010.
- [46] L.Fu, H. Engqvist and W. Xia, “Glass-Ceramics in dentistry: A review,” *Mater.*, vol.13, pp. 1-23, 2020.

ภาคผนวก



1. การคำนวณสารตั้งต้นในการสังเคราะห์แก้วลิเทียมไดซิลิเกต

1.1 คำนวณหาปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์

$$\text{มวลโมเลกุลของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO}_2\text{)} = 28.0855 + (2 \times 15.9994)$$

$$= 60.0843 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 1.1883 = \frac{m}{60.0843}$$

$$m = 71.4000 \text{ กรัม}$$

1.2 คำนวณหาปริมาณของโพแทสเซียมคาร์บอเนต

$$\text{มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K}_2\text{CO}_3\text{)} = (2 \times 39.0983) + 12.0107 + (3 \times 15.9994)$$

$$= 138.2055 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.0332 = \frac{m}{138.2055}$$

$$m = 4.5923 \text{ กรัม}$$

1.3 คำนวณหาปริมาณของลิเทียมคาร์บอเนต

$$\text{มวลโมเลกุลของลิเทียมคาร์บอเนต (LiCO}_3\text{)} = 6.941 + 12.0107 + (3 \times 15.9994)$$

$$= 66.9499 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.4946 = \frac{m}{66.9499}$$

$$m = 33.1373 \text{ กรัม}$$

1.4 คำนวณหาปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์

$$\begin{aligned}\text{มวลโมเลกุลของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al}_2\text{O}_3) &= (2 \times 26.9815) + (3 \times 15.9994) \\ &= 101.9612 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.0334 = \frac{m}{101.9612}$$

$$m = 3.41 \text{ กรัม}$$

1.5 คำนวณหาปริมาณของไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต

$$\begin{aligned}\text{มวลโมเลกุลของไดแอมโมเนียมไฮโดรเจนฟอสเฟต} \\ (\text{N}_2\text{H}_9\text{PO}_4) &= (2 \times 14.0067) + (9 \times 1.00784) + 30.9737 + (4 \times 15.9994) \\ &= 132.0553 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.0453 = \frac{m}{132.0553}$$

$$m = 5.9913 \text{ กรัม}$$

1.6 คำนวณหาปริมาณของเซอร์โคเนียมออกไซด์

$$\begin{aligned}\text{มวลโมเลกุลของเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO}_2) &= 91.224 + (2 \times 15.9994) \\ &= 123.2238 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.0328 = \frac{m}{123.2238}$$

$$m = 4.05 \text{ กรัม}$$

2. การคำนวณสารตั้งต้นในการสังเคราะห์แก้วลูไซต์

2.1 คำนวณหาปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์

$$\text{มวลโมเลกุลของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO}_2\text{)} = 28.0855 + (2 \times 15.9994)$$

$$= 60.0843 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 1.0891 = \frac{m}{60.0843}$$

$$m = 65.4378 \text{ กรัม}$$

2.2 คำนวณหาปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์

$$\text{มวลโมเลกุลของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al}_2\text{O}_3\text{)} = (2 \times 26.9815) + (3 \times 15.9994)$$

$$= 101.9612 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.1609 = \frac{m}{101.9612}$$

$$m = 16.4055 \text{ กรัม}$$

2.3 คำนวณหาปริมาณของโพแทสเซียมคาร์บอเนต

$$\text{มวลโมเลกุลของโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K}_2\text{CO}_3\text{)} = (2 \times 39.0983) + 12.0107 + (3 \times 15.9994)$$

$$= 138.2055 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.1231 = \frac{m}{138.2055}$$

$$m = 17.0131 \text{ กรัม}$$

2.4 คำนวณหาปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนต

$$\begin{aligned}\text{มวลโมเลกุลของโซเดียมคาร์บอเนต (Na}_2\text{CO}_3) &= (2 \times 22.9897) + 12.0107 + (3 \times 15.9994) \\ &= 125.9883 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.0707 = \frac{m}{125.9883}$$

$$m = 7.4934 \text{ กรัม}$$

2.5 คำนวณหาปริมาณของลิเทียมคาร์บอเนต

$$\begin{aligned}\text{มวลโมเลกุลของลิเทียมคาร์บอเนต (LiCO}_3) &= 6.941 + 12.0107 + (3 \times 15.9994) \\ &= 66.9499 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.0222 = \frac{m}{66.9499}$$

$$m = 1.4863 \text{ กรัม}$$

2.6 คำนวณหาปริมาณของไทเทเนียมไดออกไซด์

$$\begin{aligned}\text{มวลโมเลกุลของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO}_2) &= (47.867) + (2 \times 15.9994) \\ &= 79.8658 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

$$\text{จากสูตร} \quad n = \frac{m}{M}$$

$$\text{แทนค่า} \quad 0.0051 = \frac{m}{79.8658}$$

$$m = 0.4073 \text{ กรัม}$$

2.7 คำนวณหาปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนต

$$\begin{aligned}\text{มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO}_3\text{)} &= (40.078) + (12.0107) + (3 \times 15.9994) \\ &= 100.0869 \text{ กรัมต่อโมล}\end{aligned}$$

จากสูตร
$$n = \frac{m}{M}$$

แทนค่า
$$0.0309 = \frac{m}{100.0869}$$

$$m = 3.0927 \text{ กรัม}$$



ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
	formation 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 $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ 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 $\text{Li}_2\text{O-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-CaO}$ 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

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
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
12	Fabrication of SrFe ₁₂ O ₁₉ -P ₂ O ₅ -CaO-Na ₂ O 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 BaFe ₁₂ 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 ₂ O-P ₂ O ₅ containing BaO-Fe ₂ O 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	นานาชาติ	2013

6. ประสบการณ์ทำงาน/การสอน

ปี พ.ศ.	ชื่อหน่วยงาน	ตำแหน่ง
2563 – ปัจจุบัน	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์

7. ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

7.1 งานวิจัย

- บทความวิจัย

เผยแพร่ในรูปแบบบทความวิจัยลงในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ (ช่วง ปี 2019-2023)

S. Inthong, M. Kamnoy, U. Intatha, P. Intawin, K. Pengpat, T. Tunkasiri, S. Eitssayeam, Phase, mechanical and bioactivity properties of hydroxyapatite-calcium titanate composite, Materials Research Express, Vol. 6, 2019, Page 025405.

PS Owuor, S Inthong, SM Sajadi, P. Intawin, AC Chipara, CF Woellner, FN Sayed, HH Tsang, A Stender, R Vajtai, K Pengpat, S Eitssayeam, DS Galvão, J Lou, CS Tiwary, PM Ajayan, Elastic and ‘transparent bone’ as an electrochemical separator, Materials Today Chemistry, Vol. 12, 2019, Page 132-138.

P. Intawin, S Panyata, A Kraipok, T Tunkasiri, S Eitssayeam, K Pengpat, Effects of TiO_2 content and thermal parameters on crystallization kinetics and mechanical properties of phosphate based glass system, Thermochimica Acta, Vol. 690, 2020, Page 178699

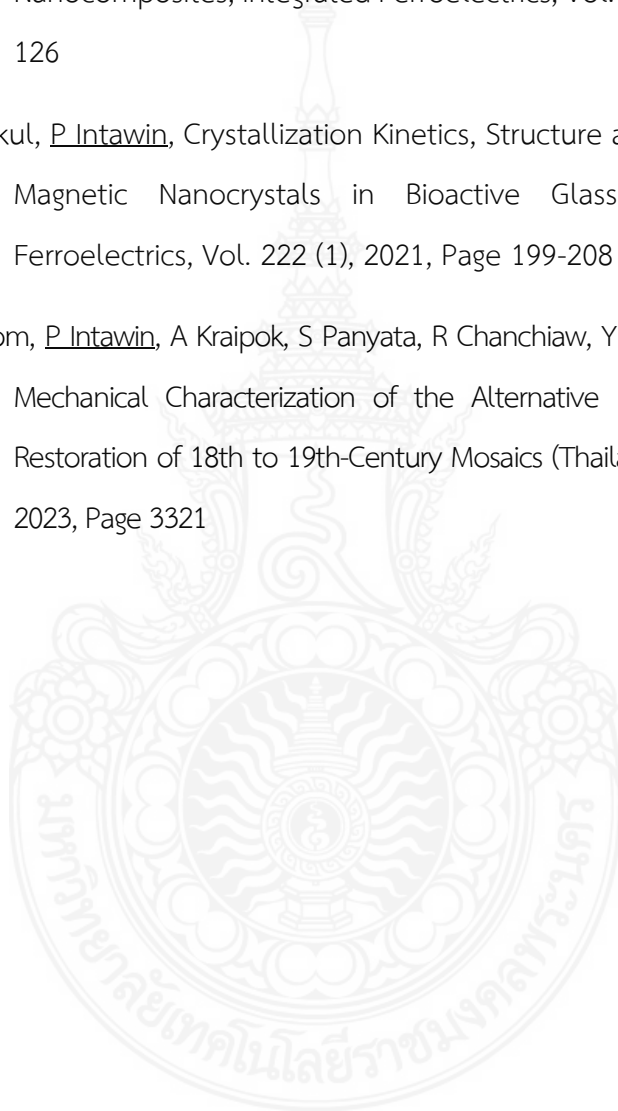
A Kraipok, P. Intawin, M Kamnoy, S Inthong, W Leenakul, P Bintachitt, Effect of PEG-based binder concentration on the mechanical properties of lithium disilicate glass-ceramics prepared by low-pressure injection moulding, Processing and Application of Ceramics, Vol.15 (3), 2021, Page 238-245

A Kraipok, P. Intawin, P Bintachitt, W Leenakul, O Khamman, Influence of heat treatment temperature on the properties of the lithium disilicate-fluorcanasite glass-ceramics, International Journal of Applied Ceramic Technology, 2021

P. Intawin, K Pengpat, Fabrication and Properties of Transparent BST Glass Ceramic Nanocomposites, Integrated Ferroelectrics, Vol. 223 (1), 2021, Page 118-126

W Leenakul, P. Intawin, Crystallization Kinetics, Structure and Phase Formation of Magnetic Nanocrystals in Bioactive Glass Systems, Integrated Ferroelectrics, Vol. 222 (1), 2021, Page 199-208

T Ounjaijom, P. Intawin, A Kraipok, S Panyata, R Chanchiaw, Y Teeranun, Chemical and Mechanical Characterization of the Alternative Kriab-Mirror Tesserae for Restoration of 18th to 19th-Century Mosaics (Thailand), Materials, Vol.16 (9), 2023, Page 3321





รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยย่อยที่ 3

การพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นจากวัสดุเหลือทิ้งทาง
การเกษตร

The Development and Efficiency of Bio-fertilizer Sheet Forming
by Machine Press from Agricultural Waste

โดย

วรณัฐ ดิละมัน

สิริมาภรณ์ วัชรกุล

นิติพันธุ์ วิทย์ผดุง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

งบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

บทคัดย่อ

การศึกษการพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จากวัสดุพืชเศรษฐกิจ 3 ชนิด ได้แก่ฟางข้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และขุยมะพร้าว โดยผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ ในอัตราส่วนสูงสุดที่ 30% พบว่าสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดไฮดรอลิก การทำแผ่นด้วยการอบร้อนซึ่งจะได้ขนาดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์

นอกจากนี้ การทดสอบการขึ้นรูปแผ่นปุ๋ยจากวัสดุต่าง ๆ พบว่าแผ่นปุ๋ยที่อบจากเยื่อฟางข้าว และทะลายปาล์มน้ำมันมีความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกดีกว่าแผ่นปุ๋ยที่อบจากเยื่อขุยมะพร้าว การตกแบบอิสระแสดงให้เห็นว่าแผ่นปุ๋ยแบบอบนั้นทนต่อแรงกระแทกได้ดีกว่าแผ่นปุ๋ยขึ้นรูปด้วยการอัดไฮดรอลิก นอกจากนี้สูตรที่มีการผสมปุ๋ย ลงไปทำให้ความแข็งแรงลดลงตามอัตราส่วนผสมปุ๋ยอินทรีย์

และผลจากการจำลองการรดน้ำด้วยน้ำผสมจุลินทรีย์ชีวภาพทำให้เห็นว่าแผ่นปุ๋ย การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและแผ่นปุ๋ยที่ได้จากกระบวนการอบสามารถคงสภาพได้ดีเมื่อครบ 14 วัน ของการทดลอง ในขณะที่แผ่นปุ๋ยแบบอัดจากเยื่อฟางข้าวนั้นมีการเสื่อมจากการพองน้ำมากที่สุด ซึ่งสังเกตเห็นรอยแตกของแผ่นขึ้นงานได้ตั้งแต่วันที่ 7 ของการทดลอง



Abstract

The study examined the development and effectiveness of bio-fertilizer compressed sheets from agricultural waste materials of three economic plant sources, namely rice husks, palm fruit branch, and coconut coir, mixed with organic fertilizer at a maximum ratio of 30%. It was found that these materials could be formed into sheets using hot pressing using hydraulic press machine and hot-baking method using hot air oven, resulting in sizes close to the mold.

Moreover, the testing of fertilizer sheet formation from different materials revealed that sheets made from rice husks and palm fruit branch were stronger and more resilient to impact than those made from coconut coir. Free fall tests indicated that the baked sheets had better impact resistance compared to the hydraulically compressed ones. Additionally, the formulations with mixed organic fertilizer resulted in decreased structural strength.

Furthermore, simulating watering with a solution mixed with biological organisms showed physical changes in the fertilizer sheets. Those produced through the baking process remained intact after a full 14 days of the experiment. However, the rice husk-based compressed fertilizer sheets displayed the highest water absorption rate, showing visible signs of cracking by the 7th day of the experiment.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากความกรุณาจากคณาจารย์ และบุคคล ที่เกี่ยวข้อง หลายฝ่ายผู้วิจัยขอขอบคุณ ดร.สิริมาภรณ์ วัชรกุล และอาจารย์นิติพันธุ์ วิทย์ผดุง ผู้ร่วมจัดทำ โครงการวิจัยเป็นอย่างยิ่งที่คอยให้คำปรึกษา และร่วมทำการวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ และกลุ่มวิจัย Rubber Engineering Research Group คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่อำนวยความสะดวกและให้ความอนุเคราะห์ ในการใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิเคราะห์ตัวอย่างในการทำงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือ ในด้านต่างๆ และขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่มอบเงินสนับสนุนงบประมาณการวิจัย ภายใต้ทุนงบประมาณงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปี งบประมาณ พ.ศ. 2566 ทำให้สามารถดำเนินงานได้อย่างลุล่วง ประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์

อนึ่งผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบส่วนดีทั้งหมดนี้ ให้แก่เหล่า คณาจารย์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาทำให้ผลงานวิจัยเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอแสดงความกตัญญูตเวทีตาคุณ แต่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้น นั้นผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงผู้เดียว และพร้อมที่จะรับคำแนะนำจากทุกท่านเพื่อเป็นประโยชน์ ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 แผนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แนวคิด และวัสดุชีวภาพเหลือทิ้งจากการเกษตร	5
2.2 องค์ประกอบทางชีวมวลของพืชที่จำเป็นต่อการขึ้นรูปทางกล	8
2.3 หลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก	11
2.4 หลักการขึ้นรูปด้วยการอบร้อน	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	16
3.1 การเตรียมวัสดุเศษเหลือใช้จากการเกษตร	16
3.2 การเตรียมสูตรวัสดุแผ่นปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพ	21
3.3 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก	22
3.4 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอบ	23
3.5 การทดสอบการคงสภาพในสถานการณ์จำลองการรดน้ำต้นไม้	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	26
4.1 ผลการขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก	26
4.2 ผลการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีการอบ	32
4.3 การคงสภาพในสถานการณ์จำลองการรดน้ำต้นไม้	38
4.4 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุอาหารหลัก	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการวิจัย	45
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	48
ประวัตินักวิจัย	50



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงคุณลักษณะของปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพที่ใช้	21
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงระยะเวลาขึ้นรูปด้วยการอัดไฮดรอลิก.....	26
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยผลการขึ้นรูปขึ้นงานแผ่นด้วยวิธีการอัดไฮดรอลิก	27
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบตกจากที่สูงของแผ่นปุ๋ยอัดไฮดรอลิก	31
ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการอบขึ้นรูปสำหรับเยื่อวัสดุแต่ละชนิด.....	32
ตารางที่ 4.5 ขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการอบ	33
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการตกของชิ้นงานแผ่นปุ๋ยอบ	37
ตารางที่ 4.7 คุณลักษณะองค์ประกอบธาตุอาหารหลักก่อนการทดสอบ.....	44
ตารางที่ 4.8 คุณลักษณะองค์ประกอบธาตุอาหารหลักเมื่อจำลองการรดด้วยน้ำผสมจุลินทรีย์ชีวภาพ .	44



สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย	4
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส.....	9
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส.....	9
ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างฟิสิกัลนินสูง	10
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน	11
ภาพที่ 2.5 ภาพแสดงองค์ประกอบของเครื่องอัดไฮดรอลิก	12
ภาพที่ 2.6 เครื่องอัดร้อนแม่พิมพ์ยางไฮดรอลิก SYR-20LL	13
ภาพที่ 2.7 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา.....	14
ภาพที่ 3.1 กระบวนการเตรียมเยื่อฟางข้าว.....	17
ภาพที่ 3.2 กระบวนการเตรียมเยื่อขุยมะพร้าว	19
ภาพที่ 3.3 กระบวนการเตรียมเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน	20
ภาพที่ 3.4 ก่อนเยื่อฟางข้าวที่ผ่านการคืนรูป	21
ภาพที่ 3.5 ก่อนเยื่อขุยมะพร้าวที่ผ่านการคืนรูป	22
ภาพที่ 3.6 ก่อนเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านการคืนรูป	22
ภาพที่ 3.7 การบรรจุเยื่อขุยมะพร้าวลงแม่พิมพ์	23
ภาพที่ 3.8 การขึ้นรูปแผ่นด้วยกระบวนการอบความร้อน	24
ภาพที่ 3.9 สารละลายจุลินทรีย์ชีวภาพ.....	25
ภาพที่ 4.1 แผ่นอัดเยื่อฟางผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1 (ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3	28
ภาพที่ 4.2 แผ่นอัดเยื่อขุยมะพร้าวผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1 (ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3	29

หน้า

ภาพที่ 4.3 แผ่นอัดเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1 (ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3.....	30
ภาพที่ 4.4 แผ่นอบเยื่อฟางผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1 (ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3.....	34
ภาพที่ 4.5 แผ่นอบเยื่อขุยมะพร้าวผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1 (ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3	35
ภาพที่ 4.6 แผ่นอบเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1 (ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3.....	36
ภาพที่ 4.7 สภาพการคงตัวของแผ่นปุ๋ยเยื่อฟางข้าว	39
ภาพที่ 4.8 สภาพการคงตัวของแผ่นปุ๋ยเยื่อขุยมะพร้าว.....	40
ภาพที่ 4.9 สภาพการคงตัวของแผ่นปุ๋ยเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน.....	41
ภาพที่ 4.10 แผ่นอบเยื่อฟางข้าวผสมปุ๋ยรดน้ำด้วยจุลินทรีย์ชีวภาพ.....	42
ภาพที่ 4.11 แผ่นอบเยื่อขุยมะพร้าวผสมปุ๋ยรดน้ำด้วยจุลินทรีย์ชีวภาพ	43
ภาพที่ 4.12 แผ่นอบเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันผสมปุ๋ยรดน้ำด้วยจุลินทรีย์ชีวภาพ	43



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชากรประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นหลัก มีการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจมากมายเช่น ข้าว ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว และอื่น ๆ เมื่อมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้วมักมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมากมายที่ถูกทิ้งและมีการเผาทำลายเป็นจำนวนมาก เช่น ทะลายปาล์ม ฟางข้าว ชังข้าวโพด และขุยมะพร้าว ปัจจุบันพบว่าการเผาทำลายวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรทำให้เกิดหมอกควันและปัญหามลภาวะทางอากาศอย่างมาก โดยเฉพาะประเทศเกษตรกรรมอย่างประเทศไทยซึ่งปัญหาเหล่านี้ส่งผลต่อปัญหาสุขภาพของประชาชนและมีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่มีผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อนและเหนี่ยวนำให้สิ่งแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางที่เสื่อมโทรมมากยิ่งขึ้น [1] ดังนั้นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเข้าสู่กระบวนการจัดให้เหมาะสมหรือมีการแปรรูปให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าและมีประโยชน์นอกจากสามารถกำจัดวัสดุเหล่านี้แล้วยังช่วยเพิ่มคุณค่าและมูลค่าของวัสดุเหล่านี้ทั้งยังลดต้นทุนในการทำการเกษตรและช่วยเพิ่มรายได้ให้อีกด้วย

ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีเพื่อการเกษตรและมีการใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มผลผลิตเพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพซึ่งมีทั้งการใช้ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยชีวภาพและปุ๋ยอินทรีย์ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนที่สูงขึ้นในการทำเกษตร เมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตทางการเกษตรที่มีราคาไม่แน่นอนและมักจะประสบปัญหาราคาตกต่ำ ปุ๋ยจึงนับได้ว่าเป็นต้นทุนส่วนหนึ่งของการผลิตที่มีราคาสูง ดังนั้นการใช้ปุ๋ยชีวภาพจากวัตถุดิบที่หาง่ายและเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรนอกจากจะช่วยลดต้นทุนทางการเกษตรแล้วยังช่วยลดการใช้สารเคมีหรือปุ๋ยเคมีที่ทำให้ดินเสื่อมสภาพ ขาดความอุดมสมบูรณ์และส่งผลกระทบยาวทำให้โครงสร้างดินไม่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกอีกด้วย ปัจจุบันสินค้าเกษตรแบบชีวภาพกำลังได้รับความนิยมมากในท้องตลาดโดยเฉพาะสินค้าจากเกษตรอินทรีย์ชีวภาพที่มีราคาค่อนข้างสูงในท้องตลาดเมื่อเทียบกับสินค้าทางด้านการเกษตรอื่น ๆ เนื่องจากความนิยมในการบริโภคผลิตภัณฑ์ปลอดสารเคมีและการเพาะปลูกแบบเกษตรอินทรีย์โดยการใช้ปุ๋ยชีวภาพ ดังนั้นการใช้ปุ๋ยชีวภาพจึงเป็นหนึ่งทางเลือกที่เป็นที่นิยมและมีแนวโน้มเป็นความต้องการของตลาดมากยิ่งขึ้น ปุ๋ยชีวภาพนอกจากจะเป็นทางเลือกใหม่ให้กับเกษตรกรแล้วยังพบว่า มีคุณสมบัติสำคัญคือการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของดินให้มีความร่วนซุยมากยิ่งขึ้น การช่วยรักษากูลินทรีย์ในดินที่มีประโยชน์ต่อพืช [2] และมีราคาไม่สูง ปุ๋ยชีวภาพที่ใส่ให้กับพืชก็เพื่อเป็นการปลดปล่อยธาตุอาหารให้พืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตทั้งยังเป็นการรักษาหน้าดิน และคงความอุดมสมบูรณ์ให้กับดินอีกด้วย เนื่องจากปุ๋ยชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่มีจุลินทรีย์ที่มีชีวิตช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์และส่งเสริมการเจริญของพืช ซึ่งพบว่ายังมีการสร้างฮอโมนพืชบางชนิดและกระตุ้นการเจริญของพืช

และบริเวณรากพืชให้สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดสารอาหาร และแร่ธาตุทั้งจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพบางชนิดยังสามารถตรึงก๊าซไนโตรเจนในอากาศเปลี่ยนเป็นธาตุไนโตรเจนให้พืชสามารถนำไปใช้ได้อีกด้วย [3]

แต่อย่างไรก็ตามปุ๋ยชีวภาพที่มีการผลิตและจำหน่ายในท้องตลาดมีความหลากหลายและบางชนิดก็ไม่ได้มาตรฐาน ทั้งยังมีสูตรและองค์ประกอบที่ไม่แน่นอน ในบางชนิดอาจมีการปนเปื้อนโลหะหนักหรือพบจุลินทรีย์ก่อโรคมกกว่าจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ทั้งยังยากต่อการใช้งาน ในหลายพื้นที่ได้มีการนำวัสดุเกษตร เช่นใบไม้แห้งหรือฟางข้าวคลุมโคนต้นไม้เพื่อรักษาความชื้นหน้าดินและรอให้ย่อยสลายซึ่งใช้เวลานานและอาจจะเกิดเชื้อราทำให้ต้นไม้เป็นโรคได้ ดังนั้นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้มาทำเป็นปุ๋ยชีวภาพที่มีการผสมกับจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายวัตถุดิบหรือเพื่อเร่งอัตราในการย่อยสลายวัสดุทางธรรมชาติให้เร็วมากขึ้นและกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลงให้พืชสามารถดูดซึมนำไปใช้ในการเจริญได้เร็ว นอกจากนี้การอัดเป็นแผ่นปุ๋ยชีวภาพเพื่อให้เหมาะสมและง่ายกับการใช้งาน มากยิ่งขึ้นและใช้เป็นแผ่นปุ๋ยชีวภาพรักษาความชื้นบริเวณโคนต้นไม้และป้องกันการแย่งพื้นที่การเจริญและแย่งอาหารของวัชพืช เป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียเหลือทิ้ง ลดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อมและเป็นแนวทางในการลดการใช้ปุ๋ยเคมีของเกษตรกรเพื่อการเกษตรที่ยั่งยืน

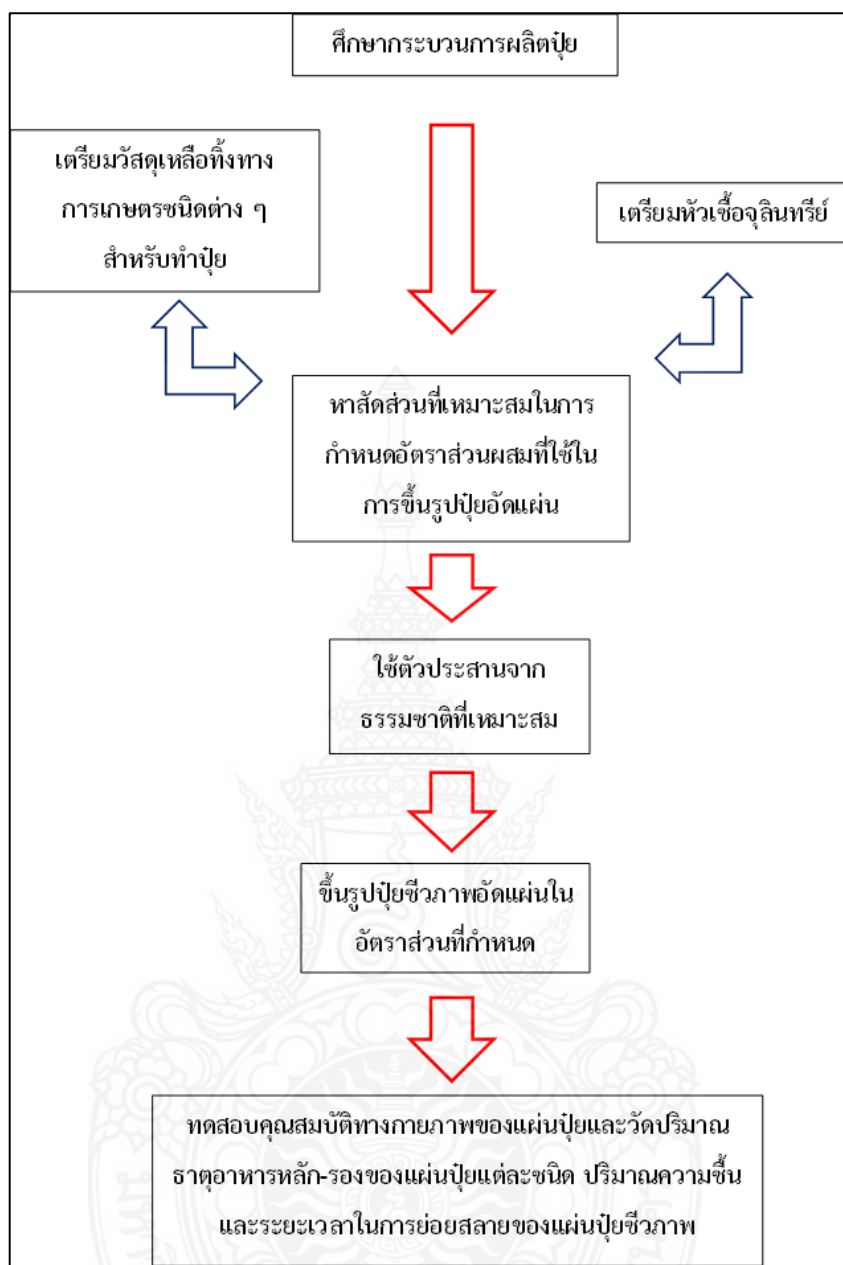
1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ผลิตปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากฟางข้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และ ขุยมะพร้าว
- 1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพ ปริมาณสารอาหาร ความสามารถในการรักษาความชื้น และระยะเวลาในการย่อยสลายของปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพอัดแผ่นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจาก ฟางข้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และขุยมะพร้าว
- 1.2.3 เพื่อเป็นแนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และสามารถเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งได้

1.3 แผนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการทำวิจัยแบบบูรณาการโดยการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ฟางข้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และขุยมะพร้าว มาทำการศึกษาเพื่อพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นที่มีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์มีประโยชน์ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุและเสริมการเจริญพืช ทั้งเป็นปุ๋ยอัดแผ่นที่สามารถรักษาความชื้นหน้าดินบริเวณโคนต้นไม้และค้อย ๆ มีการปลดปล่อยปุ๋ยออกมาช้า ๆ ดังแสดงแผนภาพการดำเนินการภาพที่ 1.1 โดยเริ่มจากการกำหนดอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถขึ้นรูปปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นจากวัสดุแต่ละชนิด ได้แก่ ฟางข้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และขุยมะพร้าว จากนั้นนำอัตราส่วนที่กำหนดไว้ทั้งหมดไปทำการอัดขึ้นรูปแผ่นปุ๋ยและนำแผ่นปุ๋ยที่ผ่านการขึ้นรูปอัดแผ่นแต่ละชนิดไปศึกษาเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติและปริมาณธาตุอาหารที่เหมาะสมสำหรับพืช ปริมาณและความสามารถในการกักเก็บความชื้น และศึกษาระยะเวลาในการย่อยสลายของปุ๋ยอัดแผ่นชีวภาพเพื่อให้ได้มาซึ่งปุ๋ยอัดแผ่นชีวภาพที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน





ภาพที่ 1.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิด และวัสดุชีวภาพเหลือทิ้งจากการเกษตร

การประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหลายชนิดเช่น ทะลายปาล์ม ฟางข้าว และขุยมะพร้าวมาทำการศึกษาเพื่อพัฒนาเป็นปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นที่มีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุและเสริมการเจริญของพืชทั้งยังเป็นปุ๋ยอัดแผ่นที่สามารถรักษาความชื้นหน้าดินบริเวณโคนต้นไม้และค้อย ๆ มีการปลดปล่อยปุ๋ยและธาตุอาหารหลักออกมาช้า ๆ

2.1.1 ฟางข้าว

ฟางข้าว เป็นผลผลิตพลอยได้จากเกษตรกรรม คือลำต้นแห้งเป็นส่วนที่แข็งของลำต้นพืช หลังจากการเก็บเกี่ยวไม่สามารถบริโภคได้ ซึ่งในปีหนึ่ง ประเทศไทยปลูกข้าวประมาณ 61 ล้านไร่ และจะมีฟางข้าวรวมทั้งส่วนที่เป็นตอซังไม่น้อยกว่า 40 ล้านตัน โดยฟางข้าวนี้มีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลส ทำให้มีความแข็งแรง และมีซิลิกาสูงซึ่งทำให้ทนต่อการบดงอได้ดี

ฟางข้าวสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตกระสอบข้าว การขึ้นรูปอัดแท่งเป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษหรือสกัดส่วนที่เป็นเซลลูโลสไปใช้เป็นวัตถุดิบทางอุตสาหกรรมอื่นๆ

2.1.2 ขุยมะพร้าว

ขุยมะพร้าวเป็นส่วนที่มีความสำคัญในการนำมะพร้าวมาใช้ในการผลิตเส้นใยมะพร้าว ซึ่งมีลักษณะที่เบาและมีความละเอียด ลักษณะเช่นนี้ทำให้ขุยมะพร้าวเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเส้นใย และนำมาใช้ในหลายด้านต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีที่ทำให้ขุยมะพร้าวมีการเก็บความชื้นและการรักษาความชื้นได้ดี ซึ่งมีประโยชน์ในการใช้ในการปรับปรุงดิน และเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ให้กับดินในการเกษตร

การนำขุยมะพร้าวมาใช้ในการผลิตเส้นใยมะพร้าวสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับท้องถิ่น แต่ก็พบว่าปัญหาเกี่ยวกับปริมาณของขุยมะพร้าวที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความยุ่งยากในการจัดการ โดยทั่วไปปัญหาเกิดจากการมีขุยมะพร้าวที่มากเกินไปจากกระบวนการผลิตเส้นใยมะพร้าว จึงต้องมีการจัดการให้

เหมาะสมเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น การนำขุยมะพร้าวใช้เป็นวัสดุทางการเกษตร การใช้ในการปรับปรุงดิน หรือนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เป็นต้น โดยทั้งนี้การนำขุยมะพร้าวมาใช้งานต่าง ๆ ยังต้องพิจารณาถึงปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ไม่เกิดปัญหาด้านการจัดการที่ซับซ้อนขึ้นต่อไป

การนำขุยมะพร้าวมาใช้เป็นวัสดุปลูกพืชต้องให้ความสำคัญกับปัญหาที่อาจเกิดจากสารแทนนิน (Tannin) ที่อาจมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะต่อการดูดซึมแคลเซียมไอออนที่สำคัญต่อพืช นอกจากนี้พิจารณาการปรับคุณภาพขุยมะพร้าว เช่น การหมักขุยมะพร้าวก่อนการนำไปใช้ในการปลูกพืชสามารถลดปริมาณสารแทนนินได้ โดยการหมักทำให้สารที่ไม่ละลายน้ำละลายได้มากขึ้น หรือการล้างขุยมะพร้าวด้วยน้ำหลายรอบเพื่อลดปริมาณสารแทนนินที่อาจมีอยู่

และสามารถปรับปรุงคุณภาพด้วยการใส่ปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยอินทรีย์เพื่อเพิ่มสารอินทรีย์ในดินและลดผลกระทบจากสารแทนนิน และการเพิ่มแคลเซียม ซึ่งเป็นธาตุอาหารรองเพื่อปรับปรุงความสมดุลของสารอาหารในดิน และช่วยให้พืชดูดซึมแคลเซียมได้ดี

2.1.3 ทะลายปาล์ม

เป็นวัสดุอินทรีย์ที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยเป็นส่วนของทะลายปาล์มที่สกัดผลปาล์มออกแล้ว ปัจจุบันมีการนำมาใช้ประโยชน์ในการเกษตร เช่น ใช้เป็นวัสดุทำปุ๋ยหมัก เพาะเห็ดนางฟ้า ใช้เป็นวัสดุปลูก มีคุณสมบัติของธาตุอาหารพืชประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน 0.8 % ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 0.08 % โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ 2.41 %

2.1.4 การปรับปรุงบำรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพ

ปุ๋ยอินทรีย์และหรือปุ๋ยชีวภาพ ใช้เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ด้านธาตุอาหารพืชในดินเป็นหลัก การใช้ปุ๋ยอินทรีย์โดยทั่ว ๆ ไปมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินเป็นสำคัญจะมีผลดีทั้งในแง่ของการบำรุงดินเพื่อเพิ่มพูนธาตุอาหารพืชในดินและการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินไปด้วยพร้อม ๆ กัน การใช้ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพทำให้เพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์บางชนิดลงดินหรือส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในดินมากกว่าการใช้เพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชโดยตรงมีที่สำคัญได้แก่

2.1.4.1 ปุ๋ยหมัก

ปุ๋ยหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการนำชิ้นส่วนของพืชมาหมักในรูปของการกองซ้อนกันบนพื้นดินหรือในหลุมเศษชิ้นส่วนของพืชที่นำมาหมักจะต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายจนแปรสภาพไปจากรูปเดิมโดยกิจกรรมจุลินทรีย์จนกระทั่งได้สารอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทนไม่มียีสน้ำตาลปนดำ และมีอัตราส่วนของสารประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ ซึ่งกรมพัฒนาที่ดินได้ผลิตสารเร่งทำปุ๋ยคือสารเร่ง พด.1 เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเศษพืชประกอบด้วยเชื้อราและแอคติโนมัยซีสที่ย่อยสารประกอบเซลลูโลสและแบคทีเรียย่อยไขมันใส่ลงในกองปุ๋ยหมักเพื่อลดระยะเวลาการทำปุ๋ยหมักให้สั้นลง ซึ่งคุณภาพและมาตรฐานของปุ๋ยหมักมีดังนี้ อัตราส่วนสารประกอบคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ไม่มากกว่า 20 ต่อ 1 เกรดปุ๋ยไม่ต่ำกว่า 0.5-0.5-1.0 (% ของ N-P₂O₅-K₂O) ตามลำดับ ความชื้นของปุ๋ยหมักไม่ควรมากกว่าร้อยละ 35 ถึง 40 โดยน้ำหนัก มีปริมาณอินทรีย์วัตถุประมาณร้อยละ 25 ถึง 50 โดยน้ำหนัก ความเป็นกรดเป็นด่างประมาณ 6.0 ถึง 7.5 และไม่มีวัสดุเจือปนอื่นๆ

2.1.4.2 ปุ๋ยพืชสด

ปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการตัดสับหรือไถกลบลงไปในดินในขณะที่พืชยังเขียวอยู่มีชื่อเรียกทางวิทยาศาสตร์ว่า "ปุ๋ยสด" หรือ "ปุ๋ยพืชสด" หรือ "Green Manure" ซึ่งมีจุดประสงค์หลักเพื่อการปรับปรุงบำรุงดิน โดยการนำปุ๋ยสดลงไปในดินช่วงที่พืชยังเขียวอยู่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของดิน เช่น โครงสร้างดิน การระบายน้ำ และการเก็บรักษาความชื้นของชั้นดินได้ การย่อยสลายและปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยพืชสดที่ถูกไถกลบลงไปในดินจะถูกจุลินทรีย์ในดินย่อยสลาย ทำให้ปลดปล่อยธาตุอาหารเพิ่มขึ้น ทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ ทั้งการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารในช่วงเวลาที่พืชยังอยู่ในระยะการเจริญเติบโต การไถกลบปุ๋ยสดจะช่วยปล่อยธาตุอาหารที่พืชต้องการ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เป็นต้น

2.1.4.3 ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ

ปุ๋ยอินทรีย์น้ำหมายถึงปุ๋ยอินทรีย์ในรูปของเหลวที่ได้จากการหมักวัสดุอินทรีย์มีลักษณะเป็นน้ำหลายชนิดที่มีความหลากหลายขึ้นอยู่กับวัสดุอินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก โดยส่วนมากจะเน้นการใช้วัสดุอินทรีย์ที่มีลักษณะสดหรืออวบน้ำ เช่น พืชที่มีลักษณะสดหรืออวบน้ำ เช่น ต้นพืชที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการแห้ง น้ำหลังจากการปรุงอาหาร มูลสัตว์ และวัสดุอินทรีย์อื่น ๆ ที่มีลักษณะดังกล่าว ซึ่งในกระบวนการหมักนี้ จุลินทรีย์เป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจากมีหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในวัสดุอินทรีย์ เป็น

ไอออนที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ยังสร้างสารอินทรีย์ประโยชน์อื่น ๆ ได้ เช่น กรดอินทรีย์ ฮอร์โมน วิตามิน กรดแลคติก และอื่น ๆ

กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการย่อยสลายคือกลุ่มยีสต์ (Yeasts) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์เชื้อเดี่ยวที่สามารถเจริญเติบโตโดยการแตกหน่อ (Budding) และมีหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้ในการหมัก โดยส่วนใหญ่จะใช้น้ำตาลเป็นแหล่งอาหาร และกระบวนการนี้จะทำให้น้ำตาลเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากกลุ่มยีสต์แล้ว ยังมีกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) ที่เป็นจุลินทรีย์แกรมบวกและไม่สร้างสปอร์ (Endospore) ซึ่งทำหน้าที่ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน และมีการใช้น้ำตาลเป็นแหล่งอาหาร ซึ่งผลิตกรดแลคติกที่มีความเป็นกรดมาก มีสภาพความเป็นกรด (pH) อยู่ระหว่าง 2 ถึง 3.5 ซึ่งมีผลต่อการย่อยสลายโปรตีนให้เป็นกรดอะมิโน จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้มีความทนทานต่อสภาพความเป็นกรดสูง

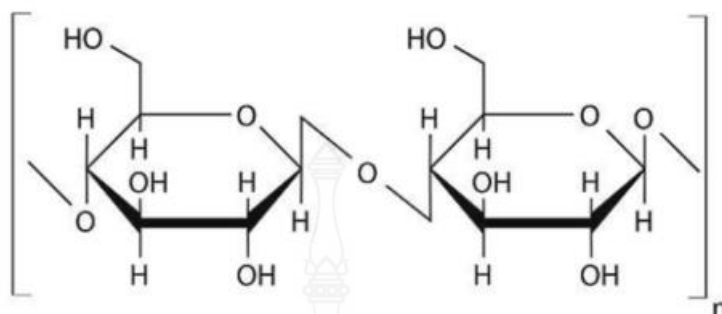
2.2 องค์ประกอบทางชีวมวลของพืชที่จำเป็นต่อการขึ้นรูปทางกล

โดยพืชชีวมวลแต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของพางข้าว ซึ่งพืชที่มีลิกนินมากจะมีความแข็งแรงสูง ในการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน จะเป็นดั่งภาพ เซลลูโลสแต่ละโมเลกุลจะเกิดการรวมตัวเป็นมัด (cellulose bundles) โดยมีเฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างเซลลูโลสกับลิกนินเข้าไว้ด้วยกัน จึงทำให้เส้นใยภายในผนังเซลล์มีความแข็งแรง

2.2.1 เซลลูโลส

เป็นสารพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส ประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุลที่ต่อกันเป็นเส้นยาวด้วยพันธะแบบ $\beta(1-4)$ -glycosidic ดังภาพ สายพอลิเมอร์แต่ละสายจะเรียงขนานกันและสร้างพันธะไฮโดรเจน เชื่อมต่อกัน ซึ่งอาจสูงถึง 3 พันธะ ต่อหน่วยกลูโคสแต่เมื่อรวมกันหลายสายจะเรียกว่าไมโครไฟบริล (Microfibril) ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบโครงผลึกสามมิติ ส่วนที่เป็นเซลลูโลสจะเป็นโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline) จะมีความคงทนต่อเอนไซม์และกรดมาก ส่วนที่ไม่ได้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนจะมีการเรียงตัวแบบสุ่มจะเรียกว่า เซลลูโลสแบบหลวม (Amorphous) โดยทั่วไปเซลลูโลสในธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลสแบบผลึกหรือโครงสร้างแบบระเบียบ ซึ่งเรียงแน่นเป็นมัดไมโครไฟบริล

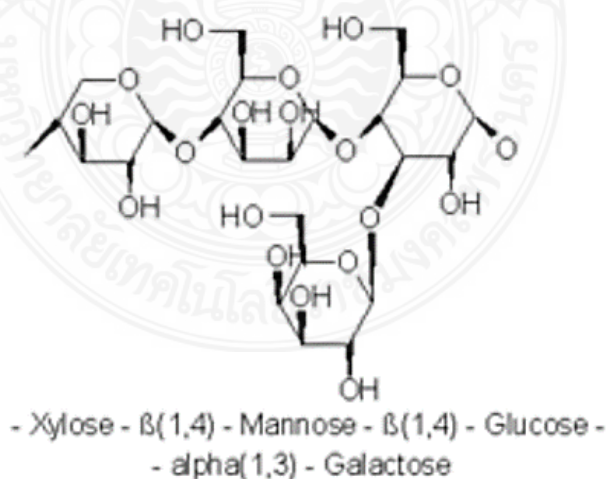
มีความแข็งแรงและไม่ละลายน้ำหรือสารอินทรีย์ใดๆ เซลลูโลสจะพบบริเวณผนังเซลล์ของพืชประมาณ 40-50% จะไม่ละลายน้ำและในตัวทำละลายอินทรีย์หรือสารละลายต่างอ่อน แต่จะละลายในกรดและด่างแก่ ในการปรับสภาพเพื่อทำลายโครงสร้างจะต้องใช้กรดเข้มข้นและอุณหภูมิสูง



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

2.2.2 เฮมิเซลลูโลส

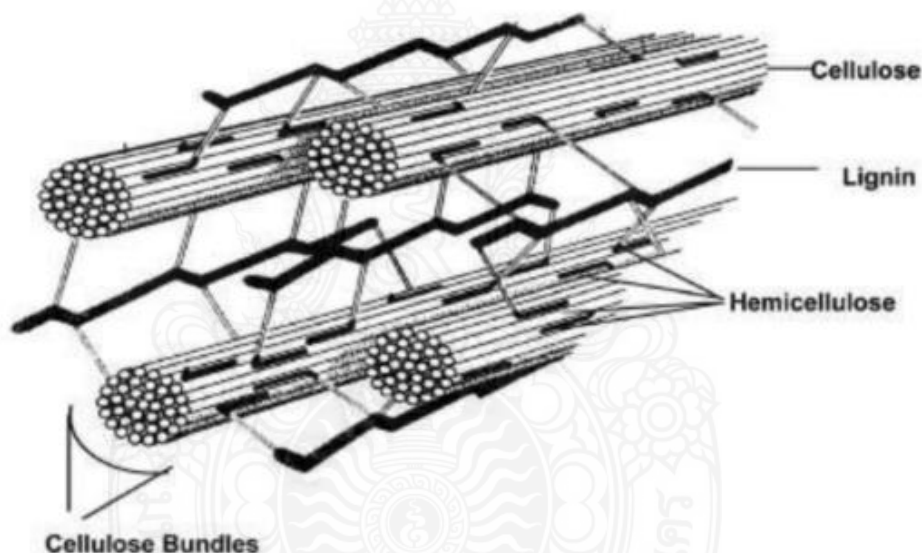
เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซคคาไรด์ (Amorphous polymeric carbohydrate) พบมากในไม้ใบกว้างและพวกพืชตระกูลหญ้า ดังภาพที่ 2.2 ซึ่งเป็นอินทรีย์สารในเนื้อเยื่อของพืชที่พบมากเป็นอันดับสองรองมาจากเซลลูโลส และมักรวมตัวอยู่กับลิกนิน โดยส่วนใหญ่จะพบในผนังเซลล์ประมาณ 20-30% เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 หรือ 6 โมเลกุล เฮมิเซลลูโลสสามารถถูกย่อยด้วยสารละลายกรดเจือจาง ที่อุณหภูมิสูง และสามารถละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17% (w/v)



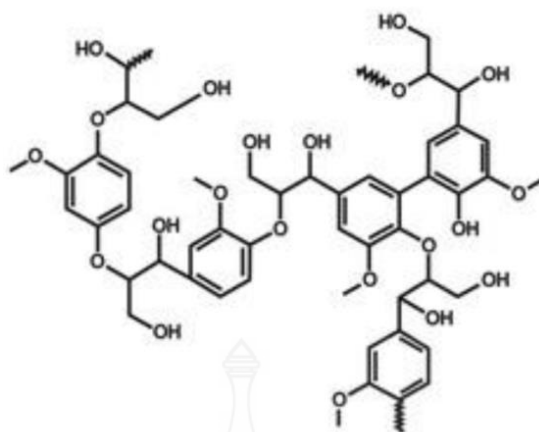
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส

2.2.3 ลิกนิน

เป็นสารประกอบที่มีอยู่ในพืชรองลงมาจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจน รวมตัวกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินไม่มีสมบัติทางการยืดหยุ่นและไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เมทานอล หรือเอทานอล และในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น โดยในไม้ใบแคบจะมีลิกนินอยู่ประมาณ 26-32% และไม้ใบกว้างจะมีลิกนินอยู่ประมาณ 20-28% ซึ่งลิกนินพบได้ในส่วนผนังเซลล์ชั้นที่สอง และ middle lamella ของพืชชั้นสูง โมเลกุลของลิกนินจะแทรก อยู่ในช่องว่างระหว่าง cellulose fibrils และเฮมิเซลลูโลสจะทำหน้าที่เสริมสร้างความแข็งแรงโดยการเชื่อมระหว่างเซลลูโลสและลิกนิน ในผนังเซลล์เข้าไว้ด้วยกัน จึงทำให้โครงสร้างของลิกนิน มีความต้านทานต่อจุลินทรีย์ส่งผลให้จุลินทรีย์ ต้องใช้เวลาในการเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อย่อยสลายโครงสร้าง



ภาพที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างพืชลิกนินสูง



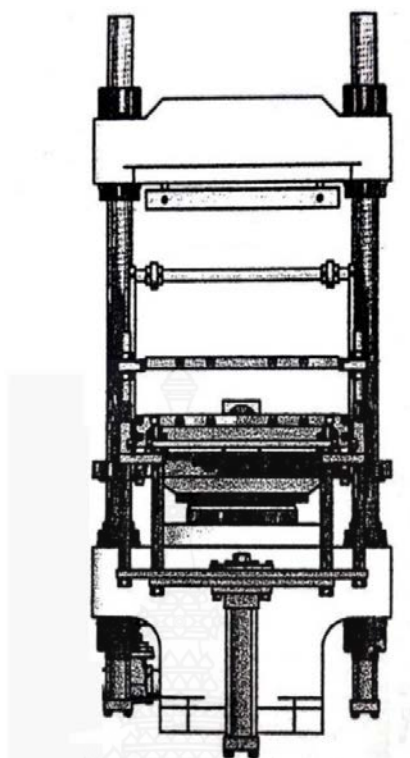
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน

2.3 หลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิก

ระบบไฮดรอลิก คือ การขับเคลื่อนโดยการใช้ของไหลเพื่อทำให้สามารถเคลื่อนย้ายพลังงานจากมอเตอร์ไฟฟ้าไปยังอุปกรณ์การทำงาน (Actuator) โดยจะมีของไหลเป็นตัวขับเคลื่อนพลังงานที่อยู่ภายใน ของไหลในทางทฤษฎีนั้นในตัวมันเองจะมีความหนาแน่นคงตัว ทำให้ไม่สามารถถูกบีบอัดได้ ด้วยการใช้งานที่ง่ายและความหลากหลาย ระบบไฮดรอลิกจึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ รวมถึงการใช้งานทั่วไปที่อยู่รอบๆตัวเราเอง เช่น ยานพาหนะ อุปกรณ์ก่อสร้าง เป็นต้น

การทำงานของระบบไฮดรอลิกจะเริ่มต้นที่ระบบไฮดรอลิก จะนำของไหล (Fluid) อย่างน้ำมันไฮดรอลิกเพื่อสร้างความดันอนุภาคของไหลที่อัดแน่นมากน้ำมันไม่สามารถบีบอัดได้ ความดันในของไหลจะถ่ายเทในระดับที่เท่ากันจากทุกทิศทางของแรงที่กระทำ ณ จุดบนพื้นที่หน้าตัดของไหลจะผลักให้กระบอกไฮดรอลิกเคลื่อนที่ออกแรงเป็นแรงกล

สำหรับเครื่องอัดไฮดรอลิกนั้นเป็นเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการอัดแปรรูปที่ไม่ได้มีความซับซ้อน โดยหลักการทำงานของเครื่องอัดไฮดรอลิกคือการนำวัสดุมาอัดในแม่พิมพ์ ภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อให้วัสดุที่นำมาอัดเข้าสู่ช่องว่างภายในแม่พิมพ์ ส่วนประกอบหลักของเครื่องอัดขึ้นรูประบบ ไฮดรอลิก คือ แผ่นเหล็ก (Platens) จำนวนสองชุด ซึ่งแผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ ส่วนอีกแผ่นหนึ่งถูกยึดติดกับที่ แม่พิมพ์สำหรับการแปรรูปทั้งตัวผู้และตัวเมียจะถูกยึดติดกับแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นนี้ดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ภาพแสดงองค์ประกอบของเครื่องอัดไฮดรอลิก

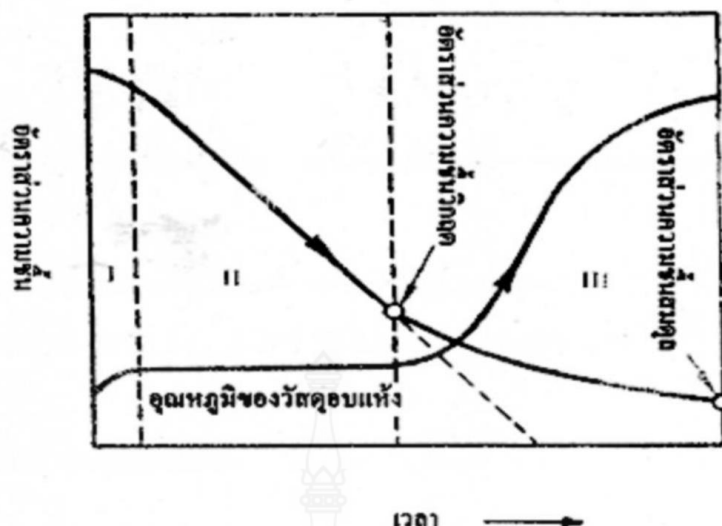
จากภาพที่ 2.5 เครื่องอัดประกอบด้วยอุปกรณ์และตัวทำงานหลักได้แก่กระบอกไฮดรอลิก มอเตอร์ไฮดรอลิก ระบบท่อน้ำมันไฮดรอลิก และแผ่นเหล็กจับยึดแม่พิมพ์ ซึ่งเครื่องจักรที่ใช้สำหรับการวิจัยนี้คือ เครื่องอัดร้อนแม่พิมพ์ยางไฮดรอลิก ผลิตในประเทศไทย โดย บริษัท ลีอี (ประเทศไทย) จำกัด ชื่อรุ่น SYR-20LL ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งเครื่องจักรใช้ระบบไฮดรอลิกในการออกแรงอัดแม่พิมพ์ และให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าแผ่นขดลวดความร้อน สามารถสร้างความดันอัดสูงสุด 200 ตัน สามารถติดตั้งแม่พิมพ์ขนาดสูงสุด 62x62 cm และมีระยะเคลื่อนที่เท่ากับ 40 cm โดยเป็นเครื่องจักรที่ใช้ขึ้นรูปยางคอมปาวด์ในอุตสาหกรรมยางและแม่พิมพ์ยาง [4]



ภาพที่ 2.6 เครื่องอัลตรอนแม่มัพิมพ์ยางไฮดรอลิก SYR-20LL

2.4 หลักการขึ้นรูปด้วยการอบร้อน

การอบแห้ง คือ กระบวนการลดความชื้น โดยทั่วไปจะใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการอบแห้ง ความร้อนส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการระเหยน้ำออกจากผิววัสดุ ถ้าผิววัสดุมีปริมาณน้ำอยู่เป็นจำนวนมาก อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวก็จะคงที่ ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งคงที่ถ้า อุณหภูมิความชื้น และความเร็วลมของอากาศมีค่าคงที่ เมื่อผิวของวัสดุมีปริมาณน้ำลดลง อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิววัสดุเปลี่ยนแปลงไป โดยที่อุณหภูมิที่ผิวจะสูงขึ้น และความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวจะลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและอัตราการอบแห้งลดลงดังภาพที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้งเทียบกับเวลาภายใต้อุณหภูมิความชื้น และความเร็วของอากาศคงที่ความชื้นที่อยู่ระหว่างช่วงอัตรา การอบแห้งคงที่และช่วงอัตราการอบแห้งลดลงเรียกว่า “ความชื้นวิกฤต”



ภาพที่ 2.7 อัตราการอบแห้งเทียบกับเวลา

จากภาพที่ 2.7 แสดงช่วงเวลาต่าง ๆ ของการอบดังนี้

2.4.1 ช่วงการเพิ่มอุณหภูมิแก๊วสดู

เป็นช่วงที่วัสดุซึ่งยังมีความชื้นสูง เมื่อเข้าสู่กระบวนการอบแห้ง วัสดุจะถูกทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเมื่อทำการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยอัตราการระเหยของน้ำจากเนื้อวัสดุจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง ก่อนที่จะเข้าสู่ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่หรืออัตราการอบแห้งลดลงต่อไป

2.4.2 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่

การอบแห้งในช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลระหว่างวัสดุกับอากาศจะเกิดขึ้นเฉพาะที่รอบๆ ผิววัสดุเท่านั้น และน้ำจะเกาะอยู่ที่ผิววัสดุเป็นจำนวนมากในการอบแห้งซึ่งจะเกิดที่บริเวณผิวของวัสดุก่อน ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการอบแห้ง คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม เมื่อเพิ่มความเร็วลมที่ไหลผ่านวัสดุจะทำให้ฟิล์มของอากาศนิ่งมีความหนาเป็นผลให้ความต้านทานต่อการไหลของความร้อนและมวลลดลงด้วยเมื่ออุณหภูมิของอากาศอบแห้งจะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างที่ผิววัสดุและของกระแสอากาศที่ไหลอิสระมีมากขึ้นเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนและมวลดีขึ้น เมื่อลดค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศอบแห้งจะเป็นผลให้ความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนความชื้นอิมิตที่ผิววัสดุและอัตราส่วนความชื้นของเกชตรอากาศที่ไหลอิสระมีมากขึ้นทำให้เกิดการถ่ายเทมวลดีขึ้น การถ่ายเทมวลเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้นของไอน้ำที่ผิวของกระเปาะเปียกและที่อากาศรอบนอก

2.4.3 ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง

หน้าปริมาณความชื้นของวัสดุมีค่าต่ำกว่าความชื้นวิกฤต การถ่ายเทความร้อนและมวล ไม่ได้เกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของวัสดุเท่านั้น แต่จะเกิดภายในผิวและเนื้อวัสดุด้วยการเคลื่อนที่ของน้ำในวัสดุ มายังผิวช้ากว่าการพาความชื้นจากผิวไปยังอากาศ ทำให้อัตราการอบแห้งลดลง อัตราการละเหยนน้ำ จะถูกควบคุม โดยการต้านทานของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำในวัสดุ ในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุ มีค่าสูงขึ้นและสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกตัวแปรที่มีผลต่อการอบแห้งช่วงนี้คืออุณหภูมิของอากาศ อบแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศรูปที่ แสดงการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอัตราการอบแห้ง เทียบกับเวลาภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งคงที่ (อุณหภูมิ ความชื้นความสัมพัทธ์และความเร็ว)

การอบแห้งด้วยอากาศร้อน หรือลมร้อนเป็นการใช้อากาศร้อนเป็นตัวกลางในการทำแห้ง โดย อากาศร้อนจะไหลผ่านอุปกรณ์ให้ความร้อนเป็นตัวให้ความร้อน แล้วไหลผ่านชิ้นงานเพื่อทำให้แห้ง เมื่ออากาศไหลผ่านผิวหน้าของชิ้นงานความร้อนจากอากาศร้อนถ่ายโอนไปที่ผิวของชิ้นงาน ทำให้น้ำ ในชิ้นงานละเหยนออกมาสภาวะดังกล่าวทำให้เกิดความแตกต่างของความดันไอระหว่างผิวหน้า ของชิ้นงานและภายในชิ้นงาน โดยภายในชิ้นงานมีความดันไอสุงกว่าความดันที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ทำให้เกิดแรงดันเพื่อไล่น้ำออกจากชิ้นงาน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปและทดสอบคุณสมบัติของปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นที่สามารถนำไปใช้งานทดแทนแผ่นคลุมดินจากพลาสติก โดยการขึ้นรูป ทดสอบ รวบรวมและเก็บข้อมูล ทั้งจากห้องปฏิบัติการและการทดสอบภาคสนาม โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.1 การเตรียมวัสดุเศษเหลือใช้จากการเกษตร

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเพาะปลูกผลผลิตทางการเกษตรในท้องถิ่นจังหวัดสงขลา พัทลุง และสตูล จำนวน 3 ชนิด ได้แก่เศษฟางข้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และขุยมะพร้าว โดยนำเศษวัสดุทั้งสามชนิดมาผ่านกระบวนการเตรียมเยื่อวัสดุเพื่อใช้ในกระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นต่อไป โดยที่การเตรียมเยื่อวัสดุแต่ละชนิดจะเริ่มกระบวนการด้วยการแช่ด้วยโซดาไฟ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากนั้นจึงนำไปต้มให้เยื่อวัสดุเปื่อยและกรองขนาดของเยื่อให้ได้ตามต้องการ จากนั้นจึงนำไปอบด้วยเตาอบลมร้อนให้แห้ง จะได้เศษเยื่อวัสดุสำหรับนำไปขึ้นรูปด้วยวิธีการต่าง ๆ ต่อไป โดยที่วัสดุแต่ละชนิดมีรายละเอียดและกระบวนการเตรียมเยื่อดังนี้

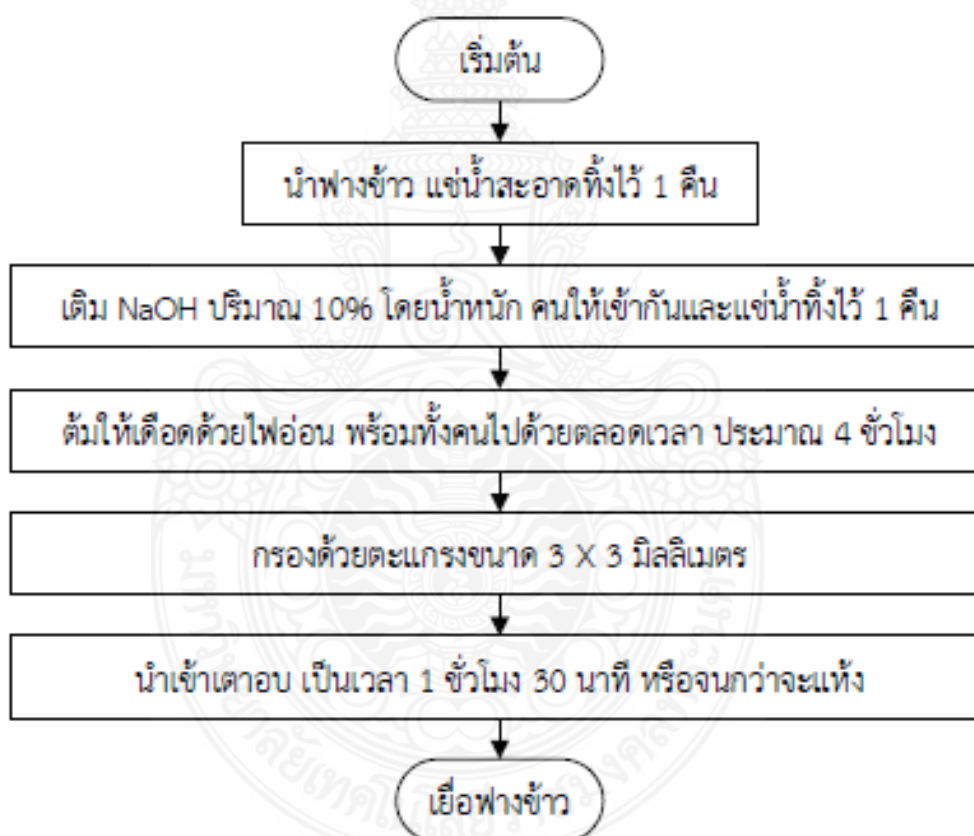
3.1.1 การเตรียมเยื่อฟางข้าว

จากภาพที่ 3.1 เป็นลำดับขั้นตอนและกระบวนการเตรียมเยื่อฟางข้าวเพื่อให้ได้เยื่อฟางข้าวที่มีความละเอียดเหมาะสมในการขึ้นรูปซึ่งกระบวนการเตรียมเยื่อฟางข้าวเริ่มจากการนำเศษฟางข้าวสับเป็นชิ้นเล็ก ๆ ให้มีขนาดความยาวเส้นฟางข้าวประมาณ 3-5 เซนติเมตร จากนั้นจึงชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกข้อมูลใช้สำหรับการเตรียมสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยการเตรียมฟางข้าว จะเตรียมที่น้ำหนักครั้งละประมาณ 500 กรัม จากนั้นจึงนำไปใส่ภาชนะและเติมน้ำสะอาดปริมาตร 20 ลิตร คลุมภาชนะด้วยผ้าขาวบางและแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน (16-20 ชั่วโมง)

ต่อมาจะทำการตวงโซเดียมไฮดรอกไซด์รูปแบบเกร็ดโดยเตรียมเป็นจำนวน 10 % ของน้ำหนักเศษฟางข้าว ซึ่งการเตรียมเยื่อฟางข้าวจะใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวนครั้งละ 50 กรัม จากนั้นจึงเติมลงในภาชนะแช่เศษฟางข้าว คนให้เข้ากัน และคลุมภาชนะด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นจึงแช่ทิ้งไว้เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง

เมื่อผ่านกระบวนการแช่น้ำ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วฟางข้าวจะมีลักษณะเปื่อย และมีเยื่อเมือก น้ำจะมีสีเข้ม และมีฟองเล็กน้อย จากนั้นจึงนำเศษฟางข้าวและน้ำเทลงหม้อสำหรับการต้มให้เดือดโดยจะใช้ระยะเวลาต้มครั้งละ 4 ชั่วโมง โดยระหว่างการต้มจะต้องใช้ไฟอ่อนและทำการคนให้เข้ากันและป้องกันการไหม้ติดกันหม้อ จากนั้นจึงนำเยื่อที่ได้ไปทำการกรองแยกขนาดด้วยตะแกรงที่มีรูขนาด 3 X 3 มิลลิเมตร เพื่อกรองเยื่อขนาดเล็กและนำไปล้างน้ำจนกว่าน้ำจะใส เยื่อเมือกไม่ลื่นมือ และปรับค่า pH ให้ได้ประมาณ pH 7

จากนั้นจึงนำเยื่อที่ล้างเสร็จแล้วใส่ถาดสำหรับนำเข้าเตาอบ โดยอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที หรือจนกว่าจะแห้งโดยมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของเยื่อฟางข้าวไม่เกิน 10 % จะได้เยื่อฟางข้าวแห้งเป็นวัสดุสำหรับกระบวนการขึ้นรูปต่อไป



ภาพที่ 3.1 กระบวนการเตรียมเยื่อฟางข้าว

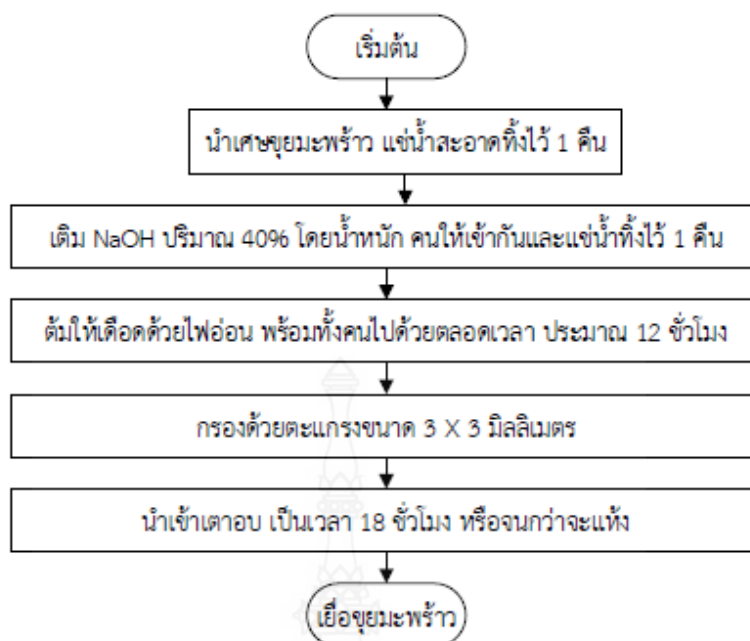
3.1.2 การเตรียมเยื่อขุยมะพร้าว

เยื่อขุยมะพร้าวที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเศษขุยมะพร้าวที่เหลือจากโรงงานแยกเส้นใยมะพร้าว จึงมีลักษณะเป็นเส้นสั้น ขนาดความยาวประมาณ 0.5-2 เซนติเมตร ซึ่งไม่จำเป็นต้องทำการสับละเอียดในกระบวนการเตรียมเยื่อขุยมะพร้าวโดยมีกรรมวิธีดังภาพที่ 3.2 สามารถนำไปชั่งน้ำหนักครั้งละประมาณ 500 กรัม จากนั้นจึงเติมน้ำสะอาดปริมาตร 20 ลิตร คลุมภาชนะด้วยผ้าขาวบางและแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 1 คืน (16-20 ชั่วโมง)

ต่อมาจะทำการตวงโซเดียมไฮดรอกไซด์รูปแบบเกร็ดโดยเตรียมเป็นจำนวน 40 % ของน้ำหนักขุยมะพร้าวแห้ง ซึ่งการเตรียมเยื่อมะพร้าวจะใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน ครั้งละ 200 กรัม จากนั้นจึงเติลงในภาชนะแช่เศษขุยมะพร้าว คนให้เข้ากัน และคลุมภาชนะด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นจึงแช่ทิ้งไว้ เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง

เมื่อผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วขุยมะพร้าวที่ได้จะมีลักษณะเปื่อยและมีเยื่อเมือกเล็กน้อย น้ำที่ได้จะมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ และมีฟองเล็กน้อย จากนั้นจึงนำเศษขุยมะพร้าวและน้ำทั้งหมดเทลงหม้อสำหรับการต้มให้เดือดโดยจะใช้ระยะเวลาต้มครั้งละ 12 ชั่วโมง โดยระหว่างการต้มจะต้องใช้ไฟอ่อนและทำการคนให้เข้ากันและป้องกันการไหม้ติดก้นหม้อ จากนั้นจึงนำเยื่อที่ได้ไปทำการกรองแยกขนาดด้วยตะแกรงที่มีรูขนาด 3 X 3 มิลลิเมตร เพื่อกรองเยื่อขนาดเล็กและนำไปล้างน้ำจนกว่าน้ำล้างจะใสและปรับค่า pH ให้ได้ค่าเป็นกลางที่ประมาณ pH 7 ด้วยการเปรียบเทียบกับกระดาษทดสอบความความเป็นกรด-ด่าง

จากนั้นจึงนำเยื่อที่ล้างเสร็จแล้วใส่ถาดสำหรับนำเข้าเตาอบ โดยอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้งโดยมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของเยื่อไม่เกิน 10 % จะได้เยื่อขุยมะพร้าวแห้งเป็นวัสดุสำหรับกระบวนการขึ้นรูปต่อไป



ภาพที่ 3.2 กระบวนการเตรียมเยื่อขุยมะพร้าว

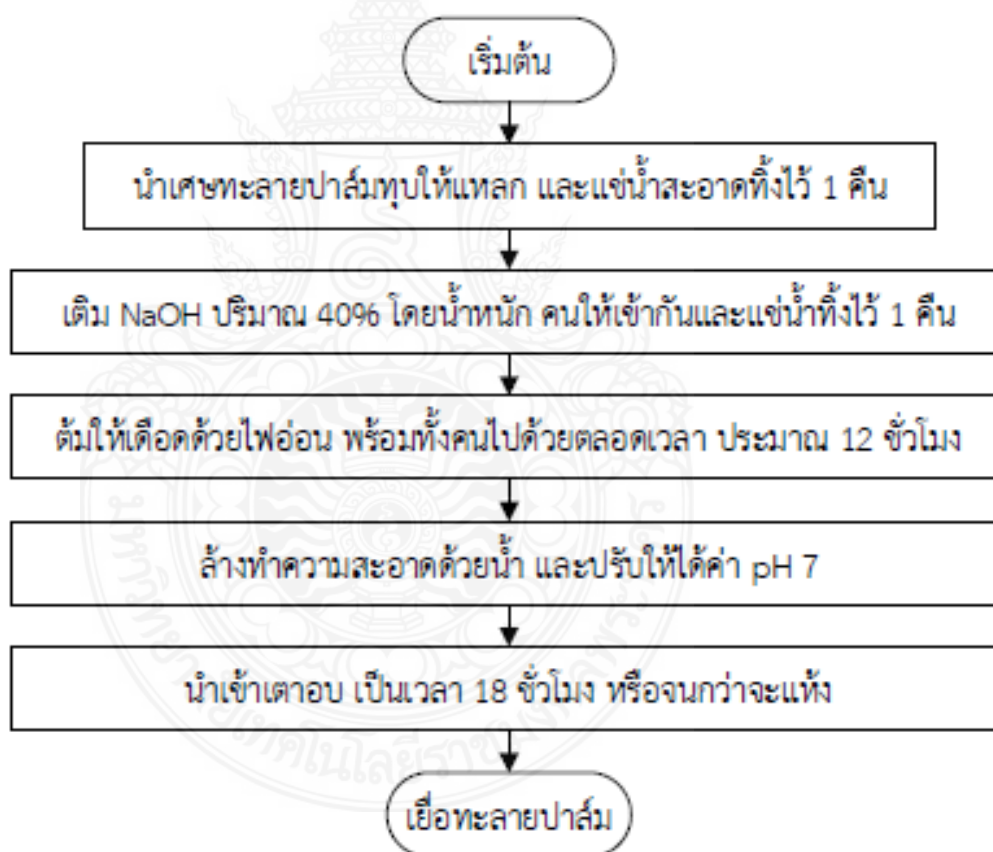
3.1.3 การเตรียมเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน

ทะเลลายปาล์มน้ำมันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้เก็บรวบรวมจากบริเวณจังหวัดสงขลาและพัทลุง ซึ่งเป็นทะเลลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านการหีบเปียกหรือแบบมาตรฐานการผลิตแบบสกัดแยกเมล็ด ซึ่งจะได้เศษเหลือจากกระบวนการเป็นทะเลลายปาล์มน้ำมันเปล่า และเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมัน เมื่อนำมาเตรียมเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันจำเป็นต้องทำการทุบให้แหลกด้วยครกหินเพื่อให้เส้นใยของทะเลลายปาล์มอ่อนตัว จากนั้นจึงนำเศษที่ได้ใส่ในภาชนะพร้อมเติมน้ำสะอาดปริมาตร 20 ลิตร ต่อเศษทะเลลายปาล์มน้ำมันน้ำหนัก 500 กรัม ปิดฝาภาชนะด้วยผ้าขาวบางและแช่น้ำทิ้งไว้เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง

จากนั้นจึงเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์รูปแบบเกร็ดโดยเตรียมเป็นจำนวน 40% ของน้ำหนักเศษทะเลลายปาล์มน้ำมันแห้ง ซึ่งการเตรียมเยื่อจะใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวนครั้งละ 200 กรัม จากนั้นจึงเติมลงในภาชนะแช่เศษทะเลลายปาล์มน้ำมัน คนให้เข้ากัน และคลุมภาชนะด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นแช่ทิ้งไว้เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง

เมื่อผ่านการแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วละลายปาล์มน้ำมันที่ได้จะมีลักษณะเปื่อยเล็กน้อยและมีเยื่อเมือก น้ำที่ได้จะมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ และมีฟองเล็กน้อย จากนั้นจึงนำเศษละลายปาล์มน้ำมัน และน้ำสารละลายทั้งหมดเทลงหม้อสำหรับการต้มให้เดือดโดยจะใช้ระยะเวลาต้มครั้งละ 12 ชั่วโมง โดยระหว่างการต้มจะต้องใช้ไฟอ่อนและทำการคนให้เข้ากันและป้องกันการไหม้ติดกันหม้อ จากนั้นจึงนำเยื่อที่ได้นำไปล้างน้ำจนกว่าน้ำล้างจะใส โดยไม่ต้องผ่านการกรองคัดแยกขนาด และปรับค่า pH ให้ได้ค่าเป็นกลางที่ประมาณ pH 7 ด้วยการเปรียบเทียบกับกระดาษทดสอบความเป็นกรด-ด่าง

จากนั้นจึงนำเยื่อที่ล้างเสร็จแล้วใส่ถาดสำหรับนำเข้าเตาอบ โดยอบที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะแห้งโดยมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของเยื่อขุยมะพร้าวไม่เกิน 10 % จะได้เยื่อฟางข้าวแห้งเป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับกระบวนการขึ้นรูปต่อไป



ภาพที่ 3.3 กระบวนการเตรียมเยื่อละลายปาล์มน้ำมัน

3.2 การเตรียมสูตรวัสดุแผ่นปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพ

เมื่อได้เตรียมเยื่อวัสดุทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เยื่อฟางข้าว เยื่อทะลายปาล์มน้ำมัน และ เยื่อขุยมะพร้าว เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงนำมาผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ที่มีปริมาณธาตุอาหารหลักดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยผสมที่อัตราส่วนระหว่างเยื่อวัสดุ และปุ๋ยอินทรีย์ที่อัตราส่วน 7:3 8:2 และ 9:1 ตามลำดับ จากนั้นจึงบรรจุลงภาชนะจัดเก็บเพื่อใช้ในกระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่น

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงคุณลักษณะของปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพที่ใช้

คุณลักษณะ	ปุ๋ยอินทรีย์
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7
ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%OC)	15.35
ไนโตรเจน (N) (% by wt.)	0.91
ฟอสฟอรัส (P_2O_5) (% by wt.)	0.58
โพแทสเซียม (K_2O) (% by wt.)	1.24

เมื่อชั่งน้ำหนักสัดส่วนต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก่อนเริ่มกระบวนการผสมจะต้องทำการคั้นสภาพ และความชื้นให้เยื่อวัสดุทั้งสามชนิดด้วยการเติมน้ำสะอาดและคลุกเคล้าเข้าด้วยกัน จนเยื่อวัสดุจับตัวเป็นก้อนดังแสดงในภาพที่ 3.4 ถึงภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.4 ก้อนเยื่อฟางข้าวที่ผ่านการคั้นรูป



ภาพที่ 3.5 ก้อนเยื่อขุยมะพร้าวที่ผ่านการคั้นรูป



ภาพที่ 3.6 ก้อนเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันที่ผ่านการคั้นรูป

3.3 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

แสดงขั้นตอนการอัดขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยการชั่งน้ำหนักแห้งของเยื่อผสมปุ๋ย ครั้งละ 50 กรัม ผสมน้ำสะอาดปริมาตร 100 มิลลิลิตร คลุกเคล้าให้เข้ากันเพื่อคืนสภาพให้เยื่อเศษวัสดุ และปุ๋ยเกาะติดกัน จากนั้นจึงห่อด้วยผ้าขาวบางและบีบน้ำออกจนหมด จากนั้นจึงนำเยื่อวัสดุบรรจุเข้า

แม่พิมพ์ขนาด 13x13x0.3 cm และนำเข้าเครื่องอัดระบบไฮดรอลิก กำหนดแรงอัดกระบอกไฮดรอลิกที่แรงดัน 200 kg/cm² หรือแรงดันประมาณ 14.7 MPa ใช้ระยะเวลาการอัดขึ้นรูปต่อแผ่นที่เหมาะสมระหว่าง 20-30 นาที โดยกำหนดอุณหภูมิของแผ่นแม่พิมพ์ขณะอัดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

ซึ่งในภาพที่ 3.7 เป็นตัวอย่างการบรรจุเยื่อขุยมะพร้าวลงในแม่พิมพ์ขนาด 13X13X0.3 เซนติเมตร โดยจัดรูปแบบของก้อนให้ฐานบริเวณกึ่งกลาง และทำการกดแม่พิมพ์ลงเพื่อให้เยื่อวัสดุกระจายลงบนแม่พิมพ์อัดอย่างสม่ำเสมอและป้องกันการไหม้ที่ขอบของชิ้นงาน



ภาพที่ 3.7 การบรรจุเยื่อขุยมะพร้าวลงแม่พิมพ์

โดยที่ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปไฮดรอลิกนั้นจะได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นเป็นแผ่นแข็งและ มีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 3-3.5 มิลลิเมตร

3.4 กระบวนการขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอบ

นำเยื่อวัสดุที่ผสมตามสูตรนำไปใส่แม่พิมพ์แล้วทำการอัดด้วยมือจนเข้าแม่พิมพ์ แล้วจากนั้นจึงนำไปเข้าเตาอบ ดังภาพที่ 3.8 ด้วยอุณหภูมิ 160 องศา



ภาพที่ 3.8 การขึ้นรูปแผ่นด้วยกระบวนการอบความร้อน

โดยใช้เวลาในการอบ 4-16 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับชนิดของเยื่อวัสดุ โดยได้มีการทดสอบเพื่อศึกษาระยะเวลาการอบขั้นต่ำที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ดีดังรายงานผลไว้ในบทที่ 4

3.5 การทดสอบการคงสภาพในสถานการณ์จำลองการรดน้ำต้นไม้

การทดลองเป็นการทดสอบลักษณะทางกายภาพแผ่นปุ๋ยที่จำลองการใช้งานเป็นแผ่นคลุมดินหรือแผ่นปุ๋ยซึ่งวางไว้ยังโคนต้นไม้ โดยที่ทำการทดลองเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มที่ 1 จะทำการฉีดพ่นน้ำสะอาด และกลุ่มที่ 2 จะทำการฉีดพ่นน้ำผสมสารละลายจุลินทรีย์ชีวภาพดังแสดงในภาพที่ 3.9 ลงยังแผ่นปุ๋ยทั้งแบบแผ่นอัดและแผ่นอบ โดยทำการฉีดพ่นน้ำครั้งละ 50 มิลลิลิตรต่อแผ่น วันละ 2 ครั้ง ต่อเนื่องเป็นเวลา 14 วัน และบันทึกลักษณะทางกายภาพและการคงสภาพด้วยการสังเกต และทำการบันทึกผลดังแสดงในผลการทดสอบในบทที่ 4



ภาพที่ 3.9 สารละลายจุลินทรีย์ชีวภาพ



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก

4.1.1 ขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานอัดไฮดรอลิก

จากการศึกษาขึ้นรูปแผ่นด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยตั้งค่าแรงอัดไว้ที่ 14.7 MPa และกดลงบนแม่พิมพ์ขนาด 13X13X0.3 cm โดยใช้ปริมาณตั้งต้นของเยื่อวัสดุผสมตามสูตรต่างๆ โดยแต่ละสูตรนั้น จะใช้เวลาในการอัดที่เหมาะสมแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงระยะเวลาขึ้นรูปด้วยการอัดไฮดรอลิก

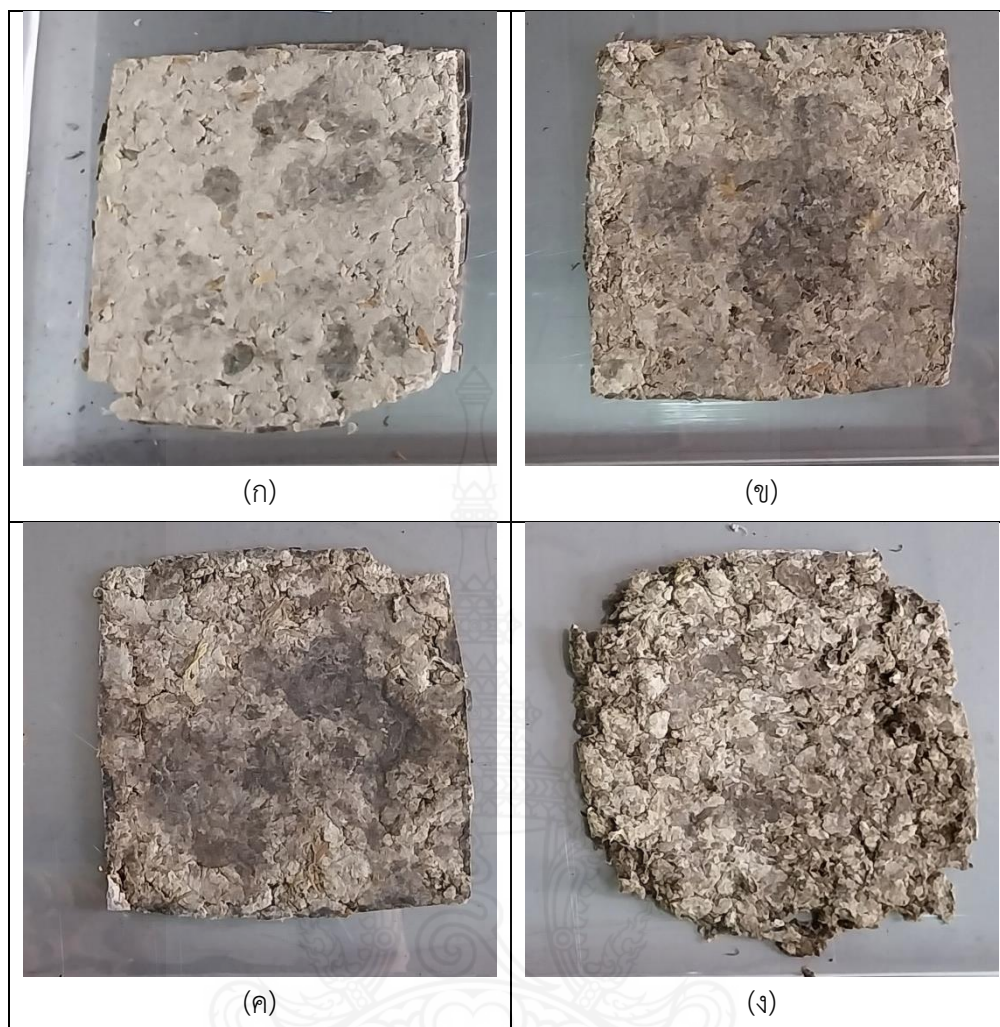
สูตรผสมเยื่อวัสดุ : ปุ๋ยอินทรีย์	ระยะเวลาที่ใช้ (นาที)
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	20
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	24
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	26
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	30
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	22
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	24
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	25
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	28
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	24
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	25
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	25
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	26

เมื่อผ่านการขึ้นรูปด้วยการอัดแล้วจึงทำการวัดขนาดชิ้นงานและบันทึกผลขนาดเฉลี่ยด้านกว้าง ด้านยาว และขนาดความหนาของชิ้นงาน พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักแผ่นชิ้นงานแต่ละแผ่น ดังแสดงข้อมูล ขนาดและน้ำหนักเฉลี่ยในตารางที่ 4.2 โดยขนาดใกล้เคียงกับขนาดของแม่พิมพ์ และมีความเป็นแผ่น ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ถึง ภาพที่ 4.3

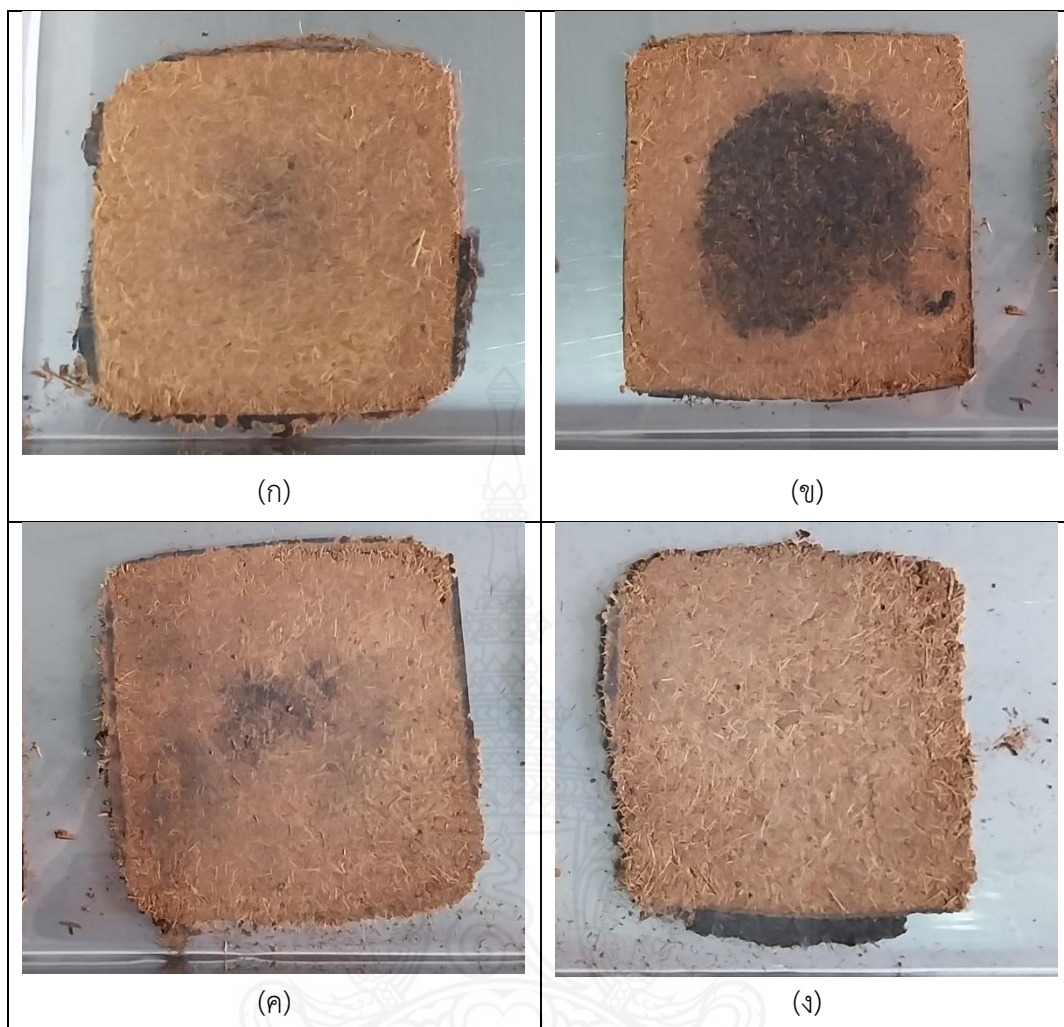
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าเฉลี่ยผลการขึ้นรูปชิ้นงานแผ่นด้วยวิธีการอัดไฮดรอลิก

สูตรผสมเยื่อวัสดุ : ปุ๋ยอินทรีย์	มิติความกว้าง (mm)	มิติความยาว (mm)	มิติความหนา (mm)	น้ำหนัก (gram)
เยื่อฟางข้าว สูตร 10:0	134.85	133.92	3.51	43.57
เยื่อฟางข้าว สูตร 9:1	133.74	134.78	3.46	48.01
เยื่อฟางข้าว สูตร 8:2	133.74	134.78	3.48	43.83
เยื่อฟางข้าว สูตร 7:3	135.21	135.01	3.45	45.64
เยื่อขุยมะพร้าว สูตร 10:0	135.27	134.95	3.49	50.21
เยื่อขุยมะพร้าว สูตร 9:1	134.78	133.62	3.48	48.92
เยื่อขุยมะพร้าว สูตร 8:2	134.73	135.26	3.56	48.04
เยื่อขุยมะพร้าว สูตร 7:3	134.78	135.44	3.52	46.93
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน สูตร 10:0	134.07	134.60	3.50	44.95
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน สูตร 9:1	135.36	135.11	3.52	46.24
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน สูตร 8:2	135.12	134.87	3.48	45.26
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน สูตร 7:3	134.89	135.08	3.53	46.22

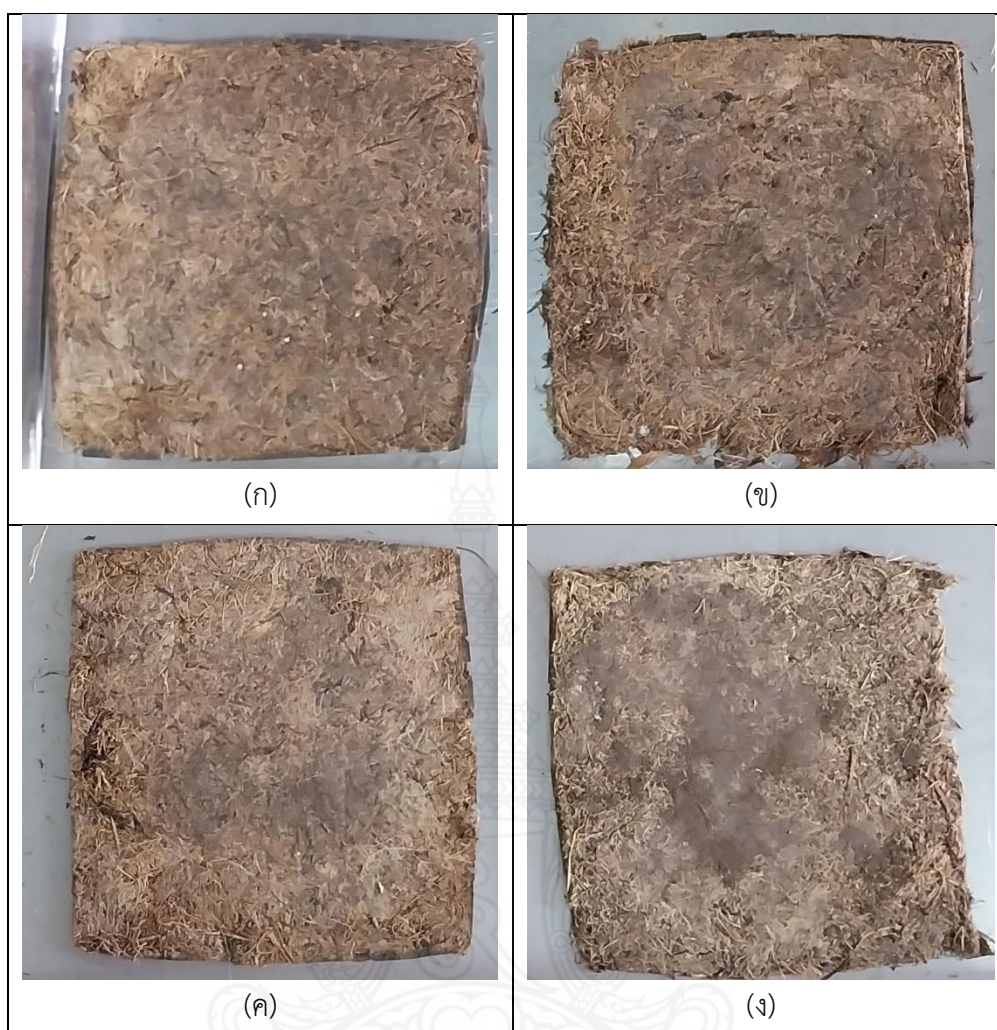
พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์แผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 13 เซนติเมตร ซึ่งจากการขึ้นรูปชิ้นงานเป็นแผ่นนั้นจะได้ขนาดใหญ่กว่าแม่พิมพ์เล็กน้อย ในส่วนของมิติด้านความหนา จะมีความหนามากกว่าแม่พิมพ์ กล่าวคือแม่พิมพ์มีความหนา 3 มิลลิเมตร แต่แผ่นปุ๋ยที่ขึ้นรูปได้นั้น มีความหนาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.45-3.56 มิลลิเมตร โดยแต่ละแผ่นจะมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 43.57-50.21 กรัม โดยที่แผ่นอัดจากเยื่อฟางข้าวนี้จะมีน้ำหนักเบาที่สุด (43.57-48.01 กรัม) และแผ่นอัดจากเยื่อขุยมะพร้าวจะมีน้ำหนักมากที่สุด (46.93-50.21 กรัม)



ภาพที่ 4.1 แผ่นอัดเยื่อฟางข้าวผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1
(ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3



ภาพที่ 4.2 แผ่นอัดเยื่อขุยมะพร้าวผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1
(ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3



ภาพที่ 4.3 แผ่นอัดเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1 (ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3

4.1.2 การทดสอบการตกจากที่สูง

จากการทดสอบปล่อยตกแบบอิสระ ที่ทำการปล่อยแผ่นอัดเยื่อวัสดุจากความสูงตั้งแต่ 50 100 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับ ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความสูง 150 เซนติเมตร แผ่นปุ๋ยแบบอัดไฮดรอลิก ตกกระทบพื้นและมีรอยแตกทุกสูตร โดยที่แผ่นปุ๋ยอัดจากเยื่อฟางข้าว และเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน มีความสามารถในการตกกระทบได้ดีกว่าแผ่นปุ๋ยอัดจากเยื่อขุยมะพร้าว โดยที่จะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตก และลักษณะการแตกเป็นขุยเล็ก ๆ ได้ที่ระดับความสูงการตกตั้งแต่ 50 เซนติเมตรเป็นต้นไป

และมีข้อสังเกตของสูตรที่มีการผสมปุ๋ยลงไปทำให้ความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกลดลงตามอัตราส่วนผสมปุ๋ยอินทรีย์ และที่อัตราส่วนผสมปุ๋ยอินทรีย์ 30% นั้นจะมีลักษณะการแตกมากที่สุด

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบตกจากที่สูงของแผ่นปุ๋ยอัดไฮดรอลิก

สูตรผสมเยื่อวัสดุ : ปุ๋ยอินทรีย์	ความสูงการตก (cm)		
	50	100	150
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	ผ่านการทดสอบ	ผ่านการทดสอบ	ขอบแตกเป็นทางยาว
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย	ขอบแตกเป็นทางยาว
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย	แตกเป็นสองแผ่น
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	ผ่านการทดสอบ	แตกเป็นสองแผ่น	แตกเป็นแผ่นเล็ก
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	ผ่านการทดสอบ	ผ่านการทดสอบ	แตกเป็นแผ่น
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	ผ่านการทดสอบ	แตกเป็นแผ่นเล็ก	แตกเป็นขุยเล็ก
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	ขอบปริเล็กน้อย	แตกเป็นแผ่นเล็ก	แตกเป็นขุยเล็ก
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	ขอบปริเล็กน้อย	แตกเป็นแผ่นเล็ก	แตกเป็นขุยเล็ก
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	ผ่านการทดสอบ	ผ่านการทดสอบ	แตกเป็นแผ่น
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	ขอบปริเล็กน้อย	ขอบแตกเป็นทางยาว	แตกเป็นแผ่นเล็ก
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	ขอบปริเล็กน้อย	ขอบแตกเป็นทางยาว	แตกเป็นแผ่นเล็ก
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	ขอบปริเล็กน้อย	แตกเป็นแผ่นเล็ก	แตกเป็นแผ่นเล็ก

4.2 ผลการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยวิธีการอบ

จากกระบวนการขึ้นรูปด้วยเตาอบ กำหนดอุณหภูมิการอบที่ 160 องศาเซลเซียส และกำหนดระยะเวลาการอบสำหรับวัสดุแต่ละชนิดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการขึ้นรูปและน้ำหนักแห้งคงเหลือ โดยที่จะได้ระยะเวลาในการอบดังแสดงในตารางที่ 4.4 โดยที่เยื่อฟางข้าวจะใช้เวลาน้อยที่สุดเพียง 4 ชั่วโมง ในขณะที่เยื่อขุยมะพร้าวและเยื่อทะเลลายปาล์มนั้นใช้เวลาในการอบ 12 และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการอบขึ้นรูปสำหรับเยื่อวัสดุแต่ละชนิด

เยื่อวัสดุหลัก	ระยะเวลาการอบ (ชั่วโมง)
เยื่อฟางข้าว	4
เยื่อขุยมะพร้าว	12
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน	16

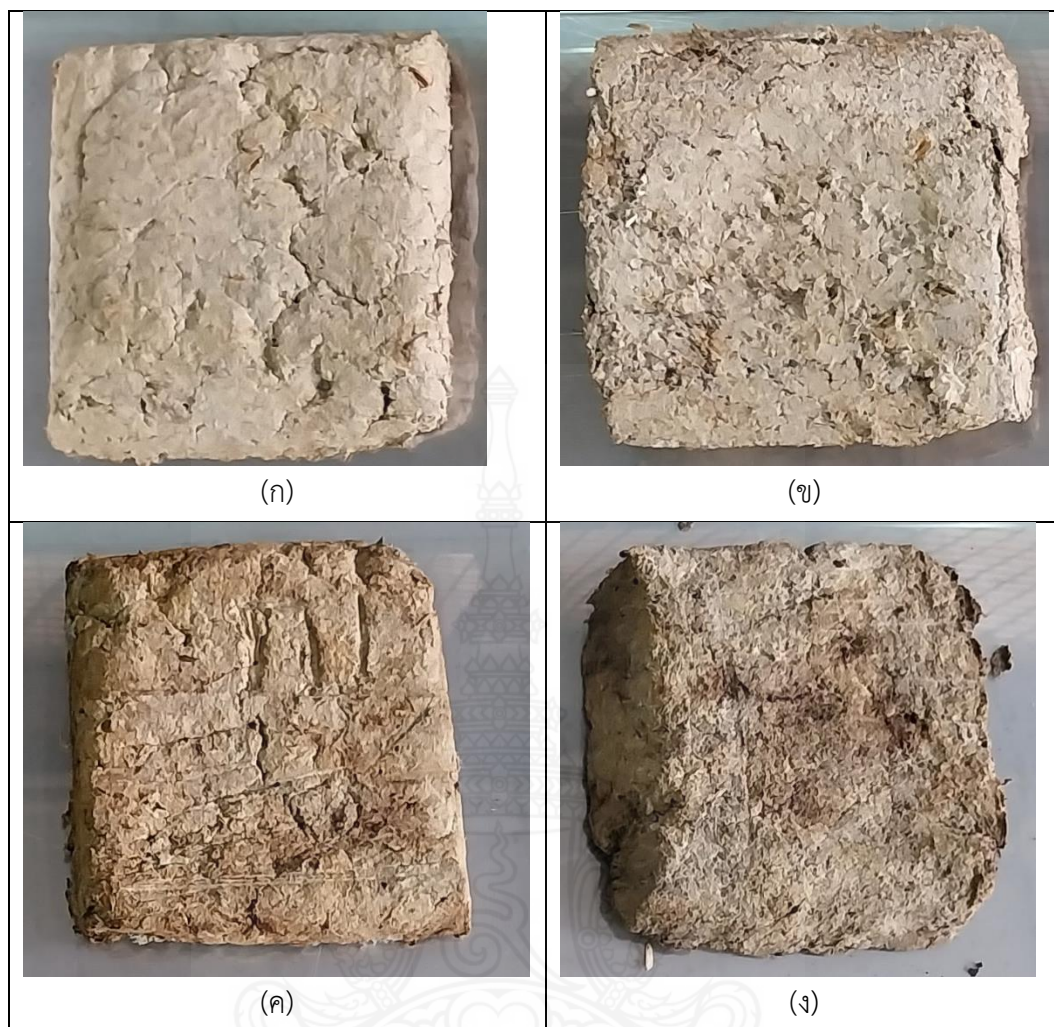
จากผลการทดสอบระยะเวลาในการอบนั้นพบว่าเวลาที่ใช้สอดคล้องกับเวลาที่ใช้ในการเตรียมเยื่อวัสดุชนิดนั้นๆ และหากใช้ระยะเวลานานเกินไปจะทำให้แผ่นปุ๋ยมีคราบรอยไหม้ที่บริเวณฐานด้านล่างของแผ่นที่วางบนถาดอบ

4.2.1 ขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานจากกระบวนการอบ

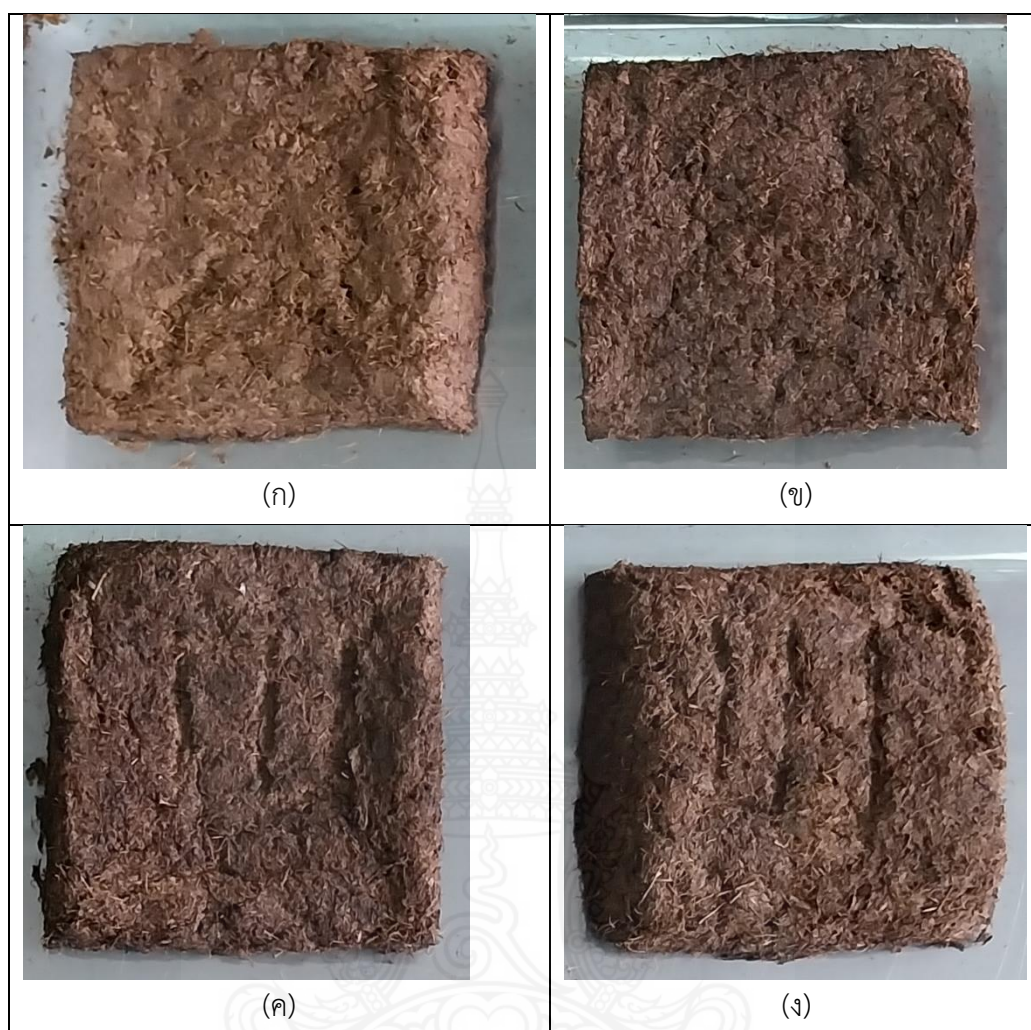
จากการทดสอบการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการอบ พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์แผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 เซนติเมตร ซึ่งจากการขึ้นรูปขึ้นงานเป็นแผ่นนั้นจะได้ขนาดใหญ่กว่าแม่พิมพ์เล็กน้อย ในส่วนของมิติด้านความหนาจะมีความหนามากกว่าแม่พิมพ์ กล่าวคือแม่พิมพ์มีความหนา 20 มิลลิเมตร แต่ผ่านปุ๋ยที่ขึ้นรูปได้นั้นมีความหนาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 21.83-22.08 มิลลิเมตร โดยแต่ละแผ่นจะมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 45.76-49.76 กรัม โดยสรุปพบว่าแผ่นปุ๋ยอบจากวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นมีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.5 ขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยการอบ

สูตรผสมเยื่อวัสดุ : ปุ๋ยอินทรีย์	มิติความกว้าง (mm)	มิติความยาว (mm)	มิติความหนา (mm)	น้ำหนัก (gram)
เยื่อฟางข้าว สูตร 10:0	117.85	116.72	22.08	47.35
เยื่อฟางข้าว สูตร 9:1	117.48	119.12	21.86	48.83
เยื่อฟางข้าว สูตร 8:2	118.12	117.90	21.95	47.57
เยื่อฟางข้าว สูตร 7:3	117.02	118.40	22.01	46.87
เยื่อขุยมะพร้าว สูตร 10:0	116.52	118.44	21.96	47.50
เยื่อขุยมะพร้าว สูตร 9:1	117.60	117.81	22.21	48.10
เยื่อขุยมะพร้าว สูตร 8:2	118.44	117.94	21.83	48.92
เยื่อขุยมะพร้าว สูตร 7:3	117.40	118.32	21.83	46.67
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน สูตร 10:0	116.87	117.35	21.86	45.76
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน สูตร 9:1	117.43	117.90	21.83	49.76
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน สูตร 8:2	116.57	118.89	21.94	47.47
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน สูตร 7:3	116.89	117.33	21.98	48.26



ภาพที่ 4.4 แผ่นอบเยื่อฟางข้าวผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1
(ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3



ภาพที่ 4.5 แผ่นอบเยื่อขุยมะพร้าวผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1
(ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3



ภาพที่ 4.6 แผ่นอบเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันผสมปุ๋ยอัตราส่วน (ก) ไม่ผสม (ข) อัตราส่วน 9:1 (ค) อัตราส่วน 8:2 และ (ง) อัตราส่วน 7:3

4.2.2 ผลทดสอบการตกจากที่สูง

จากการทดสอบปล่อยตกแบบอิสระ ที่ทำการปล่อยแผ่นอบเยื่อวัสดุจากความสูงตั้งแต่ 50 100 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับ ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4. พบว่าที่ความสูง 150 เซนติเมตร แผ่นปุ๋ยแบบอบนั้นตกกระทบพื้นและมีรอยแตกทุกสูตร โดยที่แผ่นปุ๋ยขึ้นรูปแบบอบจากเยื่อฟางข้าว และเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมันมีความสามารถในการตกกระทบได้ดีกว่าแผ่นปุ๋ยแบบอบจากเยื่อขุยมะพร้าว โดยที่จะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตกและลักษณะการแตกเป็นก้อนเล็ก ๆ ได้ที่ระดับความสูงการตกตั้งแต่ 100 เซนติเมตรเป็นต้นไป

และมีข้อสังเกตของสูตรที่มีการผสมปุ๋ยลงไปทำให้ความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทกลดลงตามอัตราส่วนผสมปุ๋ยอินทรีย์ และที่อัตราส่วนผสมปุ๋ยอินทรีย์ 30% นั้นจะมีลักษณะการแตกมากที่สุด

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการตกของชิ้นงานแผ่นปุ๋ยอบ

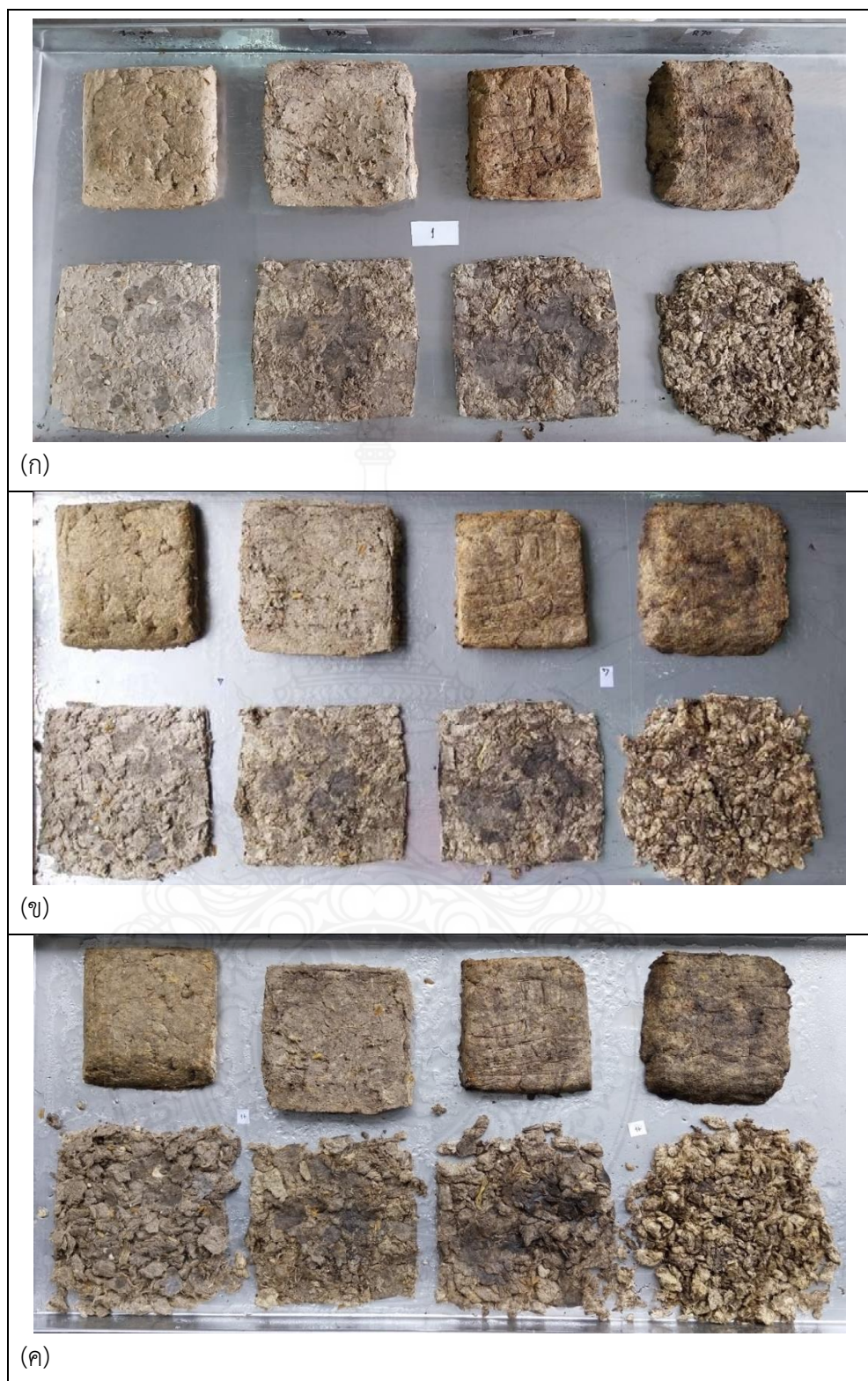
สูตรผสมเชื้อวัสดุ : ปุ๋ยอินทรีย์	ความสูงการตก (cm)		
	50	100	150
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	ผ่านการทดสอบ	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	ผ่านการทดสอบ	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	ผ่านการทดสอบ	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย
เยื่อฟางข้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย	ขอบปริเล็กน้อย
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย	แตกเป็นก้อน
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย	แตกเป็นก้อน
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริเล็กน้อย	แตกเป็นก้อน
เยื่อขุยมะพร้าว : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	ผ่านการทดสอบ	ขอบปริและแตกเป็นก้อนเล็ก	แตกเป็นก้อน
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 10:0	ผ่านการทดสอบ	ผ่านการทดสอบ	แตกเป็นก้อน
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 9:1	ผ่านการทดสอบ	ผ่านการทดสอบ	แตกเป็นก้อน
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 8:2	ผ่านการทดสอบ	ขอบแตกเป็นก้อน	แตกเป็นก้อน
เยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน : ปุ๋ยอินทรีย์ สูตร 7:3	ผ่านการทดสอบ	ขอบแตกเป็นก้อน	แตกเป็นก้อน

4.3 การคงสภาพในสถานการณ์จำลองการรดน้ำต้นไม้

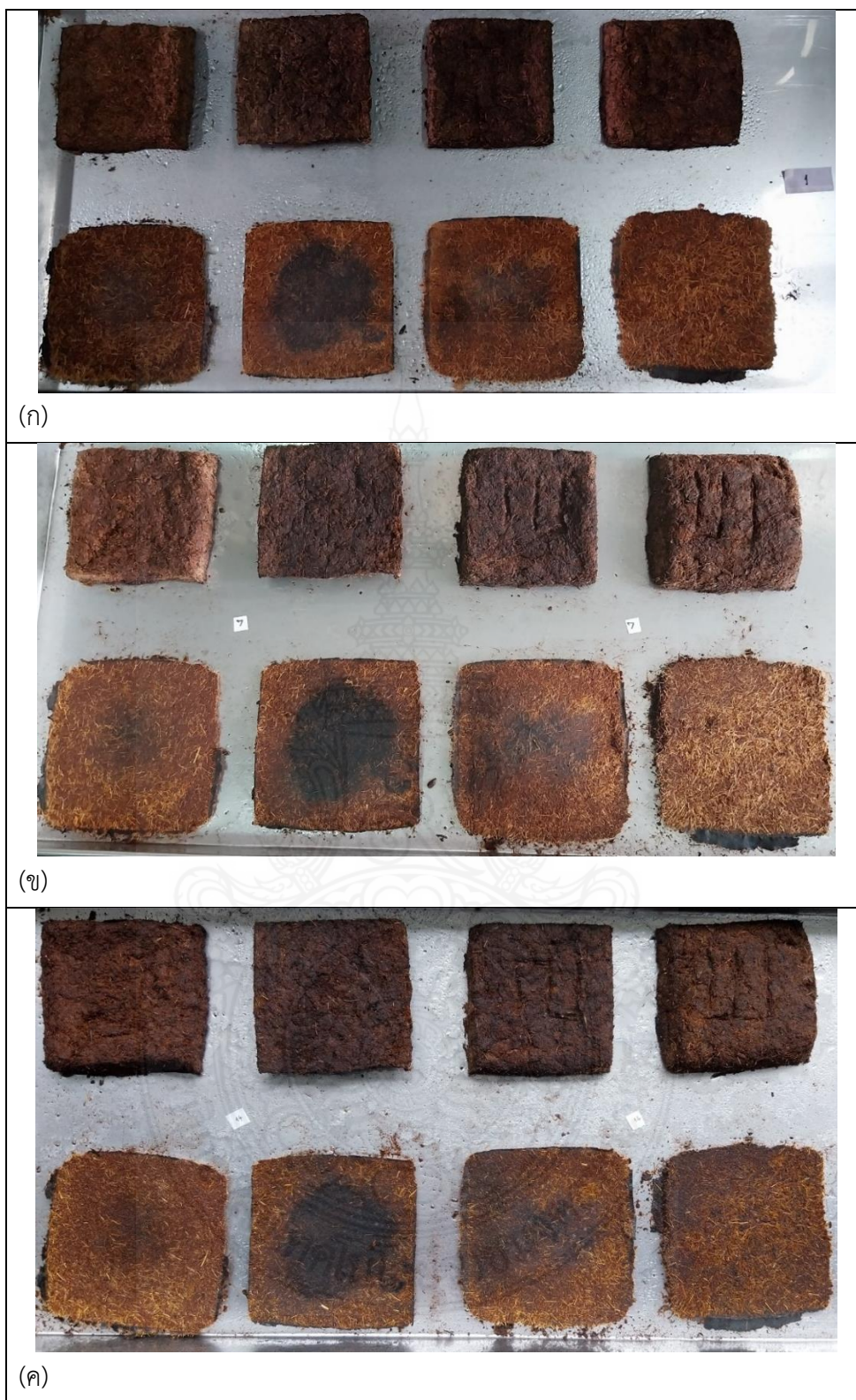
การจำลองการใช้งานเป็นแผ่นคลุมดินซึ่งทดสอบความสามารถในการคงสภาพขึ้นงานในสถานการณ์จำลองโดยวางเรียงแผ่นขึ้นงานบนถาดและทำการฉีดพ่นน้ำปริมาตรแผ่นละ 50 มิลลิลิตร ทุกวัน ๆ ละ 2 ครั้งต่อเนื่องเป็นเวลานาน 14 พบว่า

ผลการทดสอบแผ่นปุ๋ยขึ้นรูปจากเยื่อฟางข้าว ทำการทดลองถึงวันที่ 7 แผ่นอัดจากเยื่อฟางข้าว มีรอยแตกเป็นแผ่น และรอยดังกล่าวจะเด่นชัดที่สุดในแผ่นอัดเยื่อฟางข้าวสูตรผสมปุ๋ย 30% ดังแสดงในภาพที่ 4.7 สภาพการคงตัวของแผ่นปุ๋ยเยื่อฟางข้าว (ข) และเมื่อครบ 14 วัน แผ่นปุ๋ยเยื่อฟางข้าวที่ได้จากกระบวนการอัดมีรอยแตกทุกสูตร และไม่สามารถคงตัวเป็นแผ่นได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 (ค)

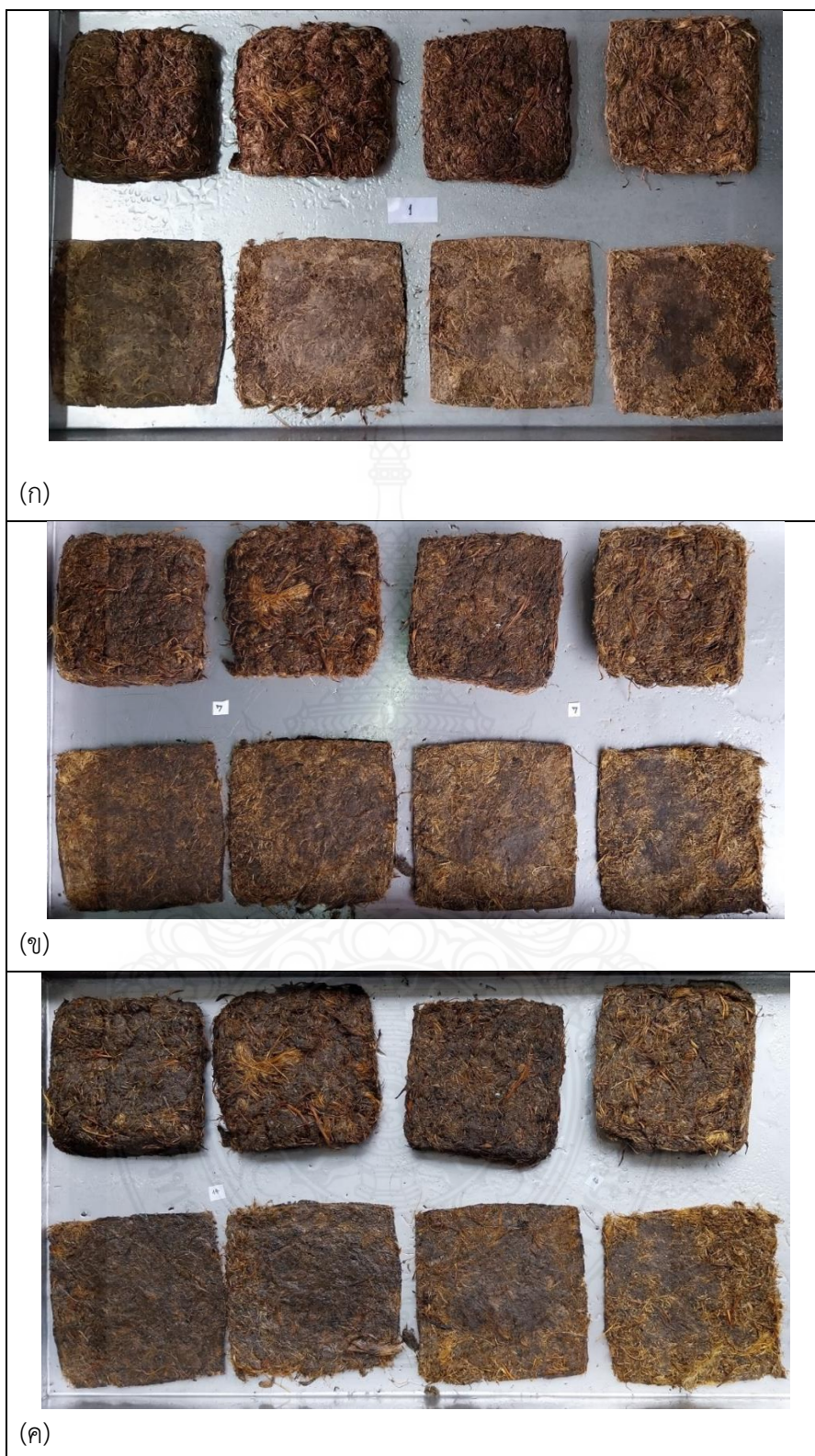
ผลการทดสอบแผ่นปุ๋ยขึ้นรูปจากเยื่อขุยมะพร้าว และเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน เมื่อทำการทดลองถึงวันที่ 7 แผ่นปุ๋ยขึ้นรูปจะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีเข้มขึ้น และเมื่อครบ 14 วัน แผ่นปุ๋ยทั้ง 2 แบบจากวัสดุทั้งสองชนิดสามารถคงสภาพความเป็นแผ่นไว้ได้ โดยที่แผ่นปุ๋ยอัดจากเยื่อขุยมะพร้าวนั้นเกิดการเสียรูปโค้งงอที่กลางแผ่นเล็กน้อยเนื่องจากความชื้นสะสม



ภาพที่ 4.7 สภาพการคงตัวของแผ่นปุยเยื่อฟางขาว



ภาพที่ 4.8 สภาพการคงตัวของแผ่นใยเยื่อขุยมะพร้าว



ภาพที่ 4.9 สภาพการคงตัวของแผ่นปุยเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน

ทั้งนี้จากการทดสอบเชิงกลพบว่าชิ้นงานแผ่นปุ๋ยที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอบนั้นสามารถคงตัวได้ดีกว่าแบบแผ่นอัด รวมไปถึงการทนต่อแรงตกแบบอิสระที่ระดับความสูงมากกว่าแบบแผ่นอัด มีข้อได้เปรียบหลักคือสามารถคงสภาพหลังการจำลองสถานการณ์รตน้ำเป็นเวลา 14 วันได้ทุกสูตรผสม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เป็นแผ่นขนาดใหญ่ได้ง่ายกว่าแบบแผ่นอัด

4.4 การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบธาตุอาหารหลัก

นอกจากการทดสอบการรตน้ำด้วยน้ำเปล่าซึ่งพบว่าแผ่นปุ๋ยแบบอบทุกสูตรสามารถคงตัวได้ดีกว่าแบบอัดแผ่นนั้น จึงนำตัวอย่างแผ่นปุ๋ยแบบอบที่มีส่วนผสมผสมของปุ๋ยอินทรีย์ 30 % มาทำการทดลองจำลองสถานการณ์รตน้ำด้วยน้ำผสมจุลินทรีย์ชีวภาพเพื่อศึกษาผลการหมักและการเปลี่ยนแปลงสภาพของแผ่นปุ๋ยแบบอบจากเยื่อวัสดุทั้ง 3 ชนิด จากการทดสอบจำลองการรตน้ำด้วยสารละลายจุลินทรีย์ชีวภาพ เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงได้ผลแสดงธาตุอาหารหลักของแผ่นปุ๋ยขึ้นรูปด้วยการอบ พบว่า การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ 4.3 การคงสภาพในสถานการณ์จำลองการรตน้ำต้นไม้ โดยที่สีของแผ่นปุ๋ยมีสีเข้มขึ้นตามวันที่ทำการทดลอง และคงสภาพเป็นแผ่นได้จนครบ 14 วัน ดังภาพที่ 4.10 ถึงภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.10 แผ่นอบเยื่อฟางข้าวผสมปุ๋ยรตน้ำด้วยจุลินทรีย์ชีวภาพ



ภาพที่ 4.11 แผ่นอบเห็ดขุยมะพร้าวผสมปุ๋ยรดน้ำด้วยจุลินทรีย์ชีวภาพ



ภาพที่ 4.12 แผ่นอบเห็ดทะลายปาล์มน้ำมันผสมปุ๋ยรดน้ำด้วยจุลินทรีย์ชีวภาพ

จากผลการทดสอบพบว่าเมื่อจำลองการรดน้ำด้วยสารละลายผสมจุลินทรีย์ชีวภาพจะทำให้มีการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนของแผ่นปุ๋ยและเกิดการเพิ่มขึ้นของธาตุไนโตรเจน โดยที่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากระยะเวลาทำการทดลองในการรดน้ำเพียง 14 วัน ซึ่งอาจจะไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนสภาพสารอาหารในแผ่นให้เป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นของพืช

ตารางที่ 4.7 คุณลักษณะองค์ประกอบธาตุอาหารหลักก่อนการทดสอบ

คุณลักษณะ	แผ่นอบฟางข้าว	แผ่นอบขุยมะพร้าว	แผ่นอบทะเลสาบปาล์ม
	ผลสม	ผลสม	น้ำมันผลสม
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8	7	7
ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%OC)	39.94	47.48	38.63
ไนโตรเจน (N) (% by wt.)	0.58	0.53	0.87
ฟอสฟอรัส (P_2O_5) (% by wt.)	0.28	0.21	0.35
โพแทสเซียม (K_2O) (% by wt.)	1.98	2.45	2.54

ตารางที่ 4.8 คุณลักษณะองค์ประกอบธาตุอาหารหลักเมื่อจำลองการรดด้วยน้ำผสมจุลินทรีย์ชีวภาพ

คุณลักษณะ	แผ่นอบฟางข้าว	แผ่นอบขุยมะพร้าว	แผ่นอบทะเลสาบปาล์ม
	ผลสม	ผลสม	น้ำมันผลสม
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7	7	7
ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (%OC)	36.52	45.94	36.22
ไนโตรเจน (N) (% by wt.)	0.63	0.54	0.88
ฟอสฟอรัส (P_2O_5) (% by wt.)	0.27	0.21	0.35
โพแทสเซียม (K_2O) (% by wt.)	1.85	2.44	2.39

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการศึกษาการพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพปุ๋ยชีวภาพอัดแผ่นจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากวัสดุพืชเศรษฐกิจ 3 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว ทะลายปาล์มน้ำมัน และขุยมะพร้าว โดยผสมกับปุ๋ยอินทรีย์ในอัตราส่วนสูงสุดที่ 30% พบว่าสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยวิธีการอัดไฮดรอลิก ได้ขนาดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์แผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 13 เซนติเมตร จากการขึ้นรูปขึ้นงานเป็นแผ่นนั้นจะได้ขนาดใหญ่กว่าแม่พิมพ์เล็กน้อย ในส่วนของมิติด้านความหนาจะมีความหนามากกว่าแม่พิมพ์ กล่าวคือแม่พิมพ์มีความหนา 3 มิลลิเมตร แต่แผ่นปุ๋ยที่ขึ้นรูปได้นั้นมีความหนาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 3.45-3.56 มิลลิเมตร โดยแต่ละแผ่นจะมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 43.57-50.21 กรัม โดยที่แผ่นอัดจากเยื่อฟางข้าวนั้นจะมีน้ำหนักเบาที่สุด (43.57-48.01 กรัม) และแผ่นอัดจากเยื่อขุยมะพร้าวจะมีน้ำหนักมากที่สุด (46.93-50.21 กรัม)

ผลการขึ้นรูปขึ้นงานด้วยกระบวนการอบ พบว่าสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นขนาดใกล้เคียงกับแม่พิมพ์แผ่นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 10 เซนติเมตร จากการขึ้นรูปขึ้นงานเป็นแผ่นนั้นจะได้ขนาดใหญ่กว่าแม่พิมพ์เล็กน้อย ในส่วนมิติด้านความหนาจะมีความหนามากกว่าแม่พิมพ์ กล่าวคือแม่พิมพ์มีความหนา 20 มิลลิเมตร แต่แผ่นปุ๋ยที่ขึ้นรูปมีความหนาโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 21.83-22.08 มิลลิเมตร โดยแต่ละแผ่นจะมีน้ำหนักอยู่ในช่วง 45.76-49.76 กรัม โดยสรุปพบว่าแผ่นปุ๋ยอบจากวัสดุชนิดต่าง ๆ นั้นมีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน

การทดสอบปล่อยตกแบบอิสระ ที่ทำการปล่อยแผ่นอัดเยื่อวัสดุจากความสูงตั้งแต่ 50 100 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับ ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความสูง 150 เซนติเมตร แผ่นปุ๋ยแบบอัดไฮดรอลิก ตกกระทบพื้นและมีรอยแตกทุกสูตร โดยที่แผ่นปุ๋ยอัดจากเยื่อฟางข้าวและเยื่อทะลายปาล์มน้ำมัน มีความสามารถในการตกกระทบได้ดีกว่าแผ่นปุ๋ยอัดจากเยื่อขุยมะพร้าว โดยที่จะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตก และลักษณะการแตกเป็นขุยเล็ก ๆ ได้ที่ระดับความสูงการตกตั้งแต่ 50 เซนติเมตรเป็นต้นไป

การทดสอบปล่อยตกแบบอิสระ ที่ทำการปล่อยแผ่นอบเยื่อวัสดุจากความสูงตั้งแต่ 50 100 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับ ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่าที่ความสูง 150 เซนติเมตร

แผ่นปุ๋ยแบบอบนึ่งนึ่งตกกระทบพื้นและมีรอยแตกทุกสูตร โดยที่แผ่นปุ๋ยขึ้นรูปแบบอบจากเยื่อฟางข้าว และเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน มีความสามารถในการตกกระทบได้ดีกว่าแผ่นปุ๋ยแบบอบจากเยื่อขุยมะพร้าว โดยที่จะเริ่มสังเกตเห็นรอยแตก และลักษณะการแตกเป็นก้อนเล็ก ๆ ได้ที่ระดับความสูงการตกตั้งแต่ 100 เซนติเมตรเป็นต้นไป

ผลทดสอบแผ่นปุ๋ยขึ้นรูปจากเยื่อฟางข้าว เมื่อทำการทดลองถึงวันที่ 7 แผ่นอัดจากเยื่อฟางข้าว มีรอยแตกเป็นแผ่น และรอยดังกล่าวจะเด่นชัดที่สุดในแผ่นอัดเยื่อฟางข้าวสูตรผสมปุ๋ย 30% ดังแสดง ในภาพที่ 4.7(ข) และเมื่อครบ 14 วัน แผ่นปุ๋ยเยื่อฟางข้าวที่ได้จากกระบวนการอัด มีรอยแตกทุกสูตร และไม่สามารถคงตัวเป็นแผ่นได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.7(ค)

ผลการทดสอบแผ่นปุ๋ยขึ้นรูปจากเยื่อขุยมะพร้าว และเยื่อทะเลลายปาล์มน้ำมัน เมื่อทำการทดลองถึงวันที่ 7 แผ่นปุ๋ยขึ้นรูปจะมีการเปลี่ยนสีเป็นสีเข้มขึ้น และเมื่อครบ 14 วัน แผ่นปุ๋ยทั้ง 2 แบบ จากวัสดุทั้งสองชนิดสามารถคงสภาพความเป็นแผ่นไว้ได้ โดยที่แผ่นปุ๋ยอัดจากเยื่อขุยมะพร้าวนั้น เกิดการเสียรูปโค้งงอที่กลางแผ่นเล็กน้อยเนื่องจากความชื้นสะสม

นอกจากการทดสอบการรดน้ำด้วยน้ำเปล่าซึ่งพบว่าแผ่นปุ๋ยแบบอบทุกสูตรสามารถคงตัวได้ดีกว่าแบบอัดแผ่นนั้น จึงนำตัวอย่างแผ่นปุ๋ยแบบอบที่มีส่วนผสมของปุ๋ยอินทรีย์ 30% มาทำการทดลองจำลองสถานการณ์รดน้ำด้วยน้ำผสมจุลินทรีย์ชีวภาพเพื่อศึกษาผลการหมัก และการเปลี่ยนแปลงสภาพของแผ่นปุ๋ยแบบอบจากเยื่อวัสดุทั้ง 3 ชนิด จากการทดสอบจำลองการรดน้ำด้วยสารละลายจุลินทรีย์ชีวภาพ เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงได้ผลแสดงธาตุอาหารหลักของแผ่นปุ๋ยขึ้นรูปด้วยการอบ พบว่า การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ 4.3 การคงสภาพในสถานการณ์จำลองการรดน้ำต้นไม้ โดยที่สีของแผ่นปุ๋ยมีสีเข้มขึ้นตามวันที่ทำการทดลอง และคงสภาพเป็นแผ่นได้จนครบ 14 วัน ดังภาพที่ 4.10 ถึงภาพที่ 4.12

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากการทดสอบเชิงกลพบว่าชิ้นงานแผ่นปุ๋ยที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการอบนั้นสามารถคงตัวได้ดีกว่าแบบแผ่นอัด รวมไปถึงการทนต่อแรงตกแบบอิสระที่ระดับความสูงมากกว่าแบบแผ่นอัด และมีข้อได้เปรียบหลักคือสามารถคงสภาพหลังการจำลองสถานการณ์ร่นน้ำเป็นเวลา 14 วันได้ทุกสูตรผสม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์เป็นแผ่นขนาดใหญ่ได้ง่ายกว่าแบบแผ่นอัด

5.2.2 และมีข้อสังเกตของสูตรที่มีการผสมปุ๋ยลงไปทำให้ความแข็งแรงทนต่อแรงกระแทก ลดลงตามอัตราส่วนผสมอินทรีย์ และที่อัตราส่วนผสมอินทรีย์ 30% นั้นจะมีลักษณะการแตกมากที่สุด

5.2.3 เมื่อจำลองการร่นน้ำด้วยสารละลายผสมจุลินทรีย์ชีวภาพจะทำให้มีการย่อยสลายอินทรีย์คาร์บอนของแผ่นปุ๋ยและเกิดการเพิ่มขึ้นของธาตุไนโตรเจน โดยที่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากระยะเวลาทำการทดลองในการร่นน้ำเพียง 14 วัน ซึ่งอาจจะไม่เพียงพอต่อการเปลี่ยนสภาพสารอาหารในแผ่นให้เป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นของพืช

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Y. Elbasiouny, B. A. Elbanna, E. Al-Najoli, A. Alsherief, S. Negm, E. A. El-Nour, A. Nofal and S. Sharabash, "Agricultural Waste Management for Climate Change Mitigation: Some Implications to Egypt," in *Waste Management in MENA Regions*, Springer Cham, 2020.
- [2] ส. ปัญจพรรค์, เทคโนโลยีปุ๋ย, ภาควิชาทรัพยากรที่ดินและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2545.
- [3] N. T. H. Nhu, N. L. Chuen and N. Riddech, "The Effects Bio-fertilizer and Liquid Organic Fertilizer on the Growth of Vegetables in the Pot Experiment," *Chiang Mai J. Sci.*, pp. 1257-1273, 2018.
- [4] T. Petdee, T. Naemsai, E. Pianhanuruk, W. Boonchouytan and C. Homkhiew, "Effects of blowing agents and curing temperatures on physical and mechanical properties of natural rubber foam for laminated floor tiles," *Polymers and Polymer Composites*, p. 30, 2022.
- [5] พ. ชนะพันธุ์, ป. วงศ์จันทร์ และ ก. สุขงาม, "การอนุรักษ์ทรัพยากรดินโดยการหมักดินตามศาสตร์พระราชา," *วารสารวิทยาการสิ่งแวดล้อมไทย*, pp. 81-97, 2562.
- [6] R. Dey, K. Pal and K. Tilak, "Plant growth promoting rhizobacteria in crop protection and challenges," in *Future Challenges in Crop Protection Against Fungal Pathogens*, A. Goyal and C. Manoharachary, Eds., New York, Springer Science+Business Media, 2014, pp. 31-59.
- [7] L. Nortoualee, การเพิ่มมูลค่าฟางข้าวโดยการผลิตเป็นกระดาษบรรจุภัณฑ์, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2564.
- [8] ธ. บุญยรัตกลิน, "การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษฟางข้าว," สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต โขติเวช, 2546.
- [9] ก. วงษ์ชุม, "การจัดการทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม: ทรัพยากรดินและการใช้ที่ดิน," *วารสารรัฐาภิรักษ์*, pp. 12-28, 2561.

- [10] สำนักวิจัยและพัฒนาการจัดการที่ดิน, “การไถกลบตอซังเพื่อปรับปรุงดินและเพิ่มผลผลิตข้าว,” [ออนไลน์]. Available: https://www.ddd.go.th/menu_moc/POSTER/rice/rice.htm. [%1 ที่เข้าถึง 1 มิถุนายน 2566].



ประวัตินักวิจัย

ข้อมูลหัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): ดร.วรณูช ดีละมัน

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Dr.Woranuch Deelaman

2. หน่วยงาน หมายเลขโทรศัพท์มือถือ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาตรี	วิทยาศาสตรบัณฑิต ม.ทักษิณ	2550
ปริญญาโท	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ม.สงขลานครินทร์	2553
ปริญญาเอก	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต ม.สงขลานครินทร์	2563

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

- ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	Source appointment and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in paddy grain from Thailand and Laos	Environmental Science and Pollution Research (Q1)	นานาชาติ	2022

2	Concentrations and source identification of priority polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment cores from south and northeast Thailand	Heliyon (Q1)	นานาชาติ	2022
3	Ecological and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediment core of Phayao Lake, Thailand	Journal of Environmental Exposure Assessment	นานาชาติ	2022
4	Spatial distribution, sources and quantitative human health risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban and suburban soils of Chile	Environ Geochem Health (Q1)	นานาชาติ	2021
5	Ecotoxicological risk and health risk characterization of polycyclic	Polar Science (Q2)	นานาชาติ	2021
6	Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Terrestrial Soils in Chile	Journal of South American Earth Sciences (Q2)	นานาชาติ	2020

7	Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the terrestrial soils of King George Island, Antarctica.	Journal of South American Earth Sciences (Q2)	นานาชาติ	2020
8	Effects of agricultural waste burning on pm2.5 - bound polycyclic aromatic hydrocarbons, carbonaceous compositions, and water-soluble ionic species in the ambient air of Chiang-Mai, Thailand	Polycyclic Aromatic Compound (Q3)	นานาชาติ	2020
9	Long-range Transboundary Atmospheric Transport of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Carbonaceous Compositions, and Water-soluble Ionic Species in Southern Thailand.	Aerosol and Air Quality Research (Q2)	นานาชาติ	2020
10	Impacts of PM2.5 sources on variations in particulate chemical compounds in ambient air of Bangkok, Thailand.	Atmospheric Pollution Research (Q1)	นานาชาติ	2020

11	Vertical profile of organic and elemental carbon in sediments of Songkhla Lake, Thailand	Limnology (Q2)	นานาชาติ	2019
12	Data relating to spatial distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in terrestrial soils of Pakistan and King George Island, Antarctica.	Journal data in brief (Q4)	นานาชาติ	2019
13	Effect of Banana Fibers on Mechanical and Physical Properties of Light Weight Concrete Blocks.	Applied Mechanics and Materials	นานาชาติ	2018
14	Development Plant Pots from Carbon Powder and Oil Palm Fiber	Applied Mechanics and Materials	นานาชาติ	2017
15	Risk assessment of the presence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coastal areas of Thailand affected by the 2004 tsunami.	Marine Pollution Bulletin (Q1)	นานาชาติ	2013
16	Using Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) as a chemical proxy to indicate Tsunami 2004 backwash in	Natural Hazards and Earth System Sciences (Q1)	นานาชาติ	2012

Khao Lak coastal area,
Thailand.



ข้อมูลผู้ร่วมวิจัยคนที่ 1

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): ดร.สิริมาภรณ์ วัชรกุล

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Dr.Sirimaporn Watcharakul

2. หน่วยงาน หมายเลขโทรศัพท์มือถือ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาตรี	วท.บ.(จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ม.สงขลานครินทร์	2552
ปริญญาโท	วท.ม.(จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ม.สงขลานครินทร์	2555
ปริญญาเอก	ปร.ด.(จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ม.สงขลานครินทร์	2560

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

- ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	ฤทธิ์ของสารสกัดหยาบจากต้นตะไคร้ บ้านในจังหวัดสงขลาต้านเชื้อ แบคทีเรียก่อโรค	รายงานสืบเนื่องการ ประชุมวิชาการ ระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏ ภูเก็ต ครั้งที่ 14 มหาวิทยาลัยราชภัฏ ภูเก็ต	ชาติ	2021
2	ฤทธิ์ของสารสกัดสมุนไพรต้านเชื้อ แบคทีเรียก่อโรคในช่องปาก	รายงานสืบเนื่องการ ประชุมวิชาการ ระดับชาติด้าน	ชาติ	2021

		วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และ นวัตกรรม ครั้งที่ 3 ประจำปี 2564 มหาวิทยาลัยราชภัฏ เลย		
3	ฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย <i>Staphylococcus aureus</i> และ <i>Escherichia coli</i> ของสารสกัดหยาบ จากดอกกระเจียวแดง	รายงานสืบเนื่องการ ประชุมวิชาการ ระดับชาติด้าน วิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี เครือข่าย สถาบันอุดมศึกษา ภาคใต้ครั้งที่ 5 มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลศรี วิชัย	ชาติ	2020
4	การคัดแยกแบคทีเรียผลิตพอลิไฮดรอก ซีอัลคาโนเอตจากดินบริเวณที่มีการ ปนเปื้อนน้ำมันในจังหวัดสงขลา	วารสารวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ บุรีรัมย์	ชาติ	2019
5	Biodegradation of rubber based polymer using bacterial consortium ST608	The 7th international conference on bio- based polymers (ICBP)	นานาชาติ	2019
6	Biochemical and spectroscopic characterization of purified Latex	BMC Microbiology	นานาชาติ	2016

Clearing Protein (Lcp) from
newly isolated rubber degrading
Rhodococcus rhodochrous strain
RPK1 reveals novel properties of
Lcp



ข้อมูลผู้ร่วมวิจัยคนที่ 2

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย): นายนิติพันธุ์ วิทยผดุง

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ): Mr.Nitipan Vittayaphadung

2. หน่วยงาน หมายเลขโทรศัพท์มือถือ และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

- หน่วยงาน: สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ nitipan.v@psu.ac.th

3. ประวัติการศึกษา

ระดับการศึกษา	คุณวุฒิและสถานศึกษา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาตรี	วศ.บ.(เมคาทรอนิกส์) ม.สงขลานครินทร์	2551
ปริญญาโท	วศ.ม.(เครื่องกล) ม.สงขลานครินทร์	2553

4. สมรรถนะด้านการวิจัย

- ผลงานตีพิมพ์

ลำดับ	ชื่อบทความ	ชื่อวารสาร	ระดับชาติ/ นานาชาติ	ปีที่ตีพิมพ์
1	Modeling and Tuning of Electronic Throttle Control System in Formula Student Car	International Journal of Automotive and Mechanical Engineering	นานาชาติ	2023
2	An Optimized Design of the Soft Bellow Actuator Based on the Box-Behnken Response Surface Design	Actuators	นานาชาติ	2023

3	Bending Angle Effect of the Cross-Section Ratio for a Soft Pneumatic Actuator	International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research	นานาชาติ	2020
4	Effects of Vibration on the off- Track Positioning of the Piezoelectric Head Gimbal Assembly in Hard Disk Drive	Engineering and Applied Science Research	ชาติ	2012

