

การพัฒนาไบโอเซรามิกจากกากแอสบีสต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาเข็นโดคองต์ ภาควิชาทันตกรรมหัตถการ

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE DEVELOPMENT OF BIOCERAMIC ROOT CANAL SEALER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Endodontics

Department of Operative Dentistry

FACULTY OF DENTISTRY

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาไบโอเซรามิกจากกากกาแฟและเปลือกกาแฟ
โดย	น.ส.สุรีย์พร โอฬารสกุลวงศ์
สาขาวิชา	วิทยาเอ็นโดไดรอนต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ทันทแพทย์ ดร.ไพโรจน์ หลินศุวรรณท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะทันตแพทยศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ทันทแพทย์ ดร.พรชัย จันศิษย์ยานนท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันทแพทย์หญิง ดร.ชุติมา ระติสุนทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ทันทแพทย์ ดร.ไพโรจน์ หลินศุวรรณท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ทันทแพทย์หญิง ดร.ธนิดา ศรีสุวรรณ)

สุรียพร โอฬารสกุลวงศ์ : การพัฒนาไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์. (THE DEVELOPMENT OF BIOCERAMIC ROOT CANAL SEALER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ทพ. ดร.ไพโรจน์ หลินสุวรรณนท์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ที่ผลิตจากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) กับไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ซึ่งมีจำหน่ายในท้องตลาด (ไอรูทเอสพี) โดยทำการสังเคราะห์ผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง และตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ผลการทดสอบพบว่าสารที่ผลิตได้ประกอบด้วยไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นส่วนประกอบหลัก จากนั้นจึงนำมาผสมกับสารเติมแต่งเพิ่มเติมเพื่อผลิตเป็นไบโอซีลเลอร์ ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของไบโอซีลเลอร์และไอรูทเอสพีตามมาตรฐานการทดสอบไอเอสโอ 6876/2012 ได้แก่ การไหลแผ่เวลาแห้งตัว ความหนาชั้นฟิล์ม การละลายตัว และความที่บ่งชี้ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน รวมถึงศึกษาองค์ประกอบทางเคมีหลังแห้งตัวเต็มที่ของซีลเลอร์ทั้งสอง คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอซีลเลอร์และไอรูทเอสพีมีค่าผ่านตามาตรฐานไอเอสโอ 6876/2012 ยกเว้นคุณสมบัติด้านการละลายตัว สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของไบโอซีลเลอร์และไอรูทเอสพีในช่วงระยะเวลาที่ทำการทดสอบพบว่ามีค่า 9.23-10.35 และ 8.83-10.39 ตามลำดับ ส่วนปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาพบว่าไอรูทเอสพีปล่อยแคลเซียมไอออนมากกว่าไบโอซีลเลอร์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงแรกแต่ไม่แตกต่างกันในช่วงระยะเวลา 14 และ 28 วัน นอกจากนี้การศึกษาร่องรอยองค์ประกอบทางเคมีของไบโอซีลเลอร์และไอรูทเอสพีหลังแห้งตัวเต็มที่พบองค์ประกอบที่ยืนยันการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าไบโอซีลเลอร์มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีและมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับไอรูทเอสพี

สาขาวิชา วิทยาเอ็นโดดอนต์

ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อ นิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6175851932 : MAJOR ENDODONTICS

KEYWORD: Bioceramic, Cockle shell, Physical properties, Root canal sealer, Tricalcium silicate

Sureeporn Oransakunwong : THE DEVELOPMENT OF BIOCERAMIC ROOT CANAL SEALER. Advisor: Assoc. Prof. PAIROJ LINSUWANONT, D.D.S., M.D.Sc., Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. THANAKORN WASANAPIARNPONG, Ph.D.

This study evaluated the physical and chemical properties of cockle shell derived bioceramic sealer (Biosealer) and compared it with commercial bioceramic sealer (iRoot SP). Cockle shell derived tricalcium silicate powder was manufactured. Then, it was subjected to X-ray diffraction (XRD), which confirmed that it was mainly composed of tricalcium silicate. The additives and medium were mixed with tricalcium silicate powder to complete the manufacture of Biosealer. The physical properties of flowability, setting time, film thickness, solubility, and radiopacity of the Biosealer and iRoot SP were investigated following a modified ISO 6876/2012 standard. Additionally, pH and calcium release were measured at various intervals. XRD and Fourier transform infrared spectrometer (FTIR) were performed to analyze the chemical composition of the set sealers. Biosealer exhibited acceptable flowability, setting time, film thickness, and radiopacity according to ISO6876/2012 requirements. The pH value of Biosealer and iRoot SP were in the range of 9.23-10.35 and 8.83-10.39 respectively. Initially, iRoot SP released higher amount of calcium ions than Biosealer but it was not significantly different at more than 2 weeks. XRD and FTIR analysis of set materials showed evidence of the occurrence of hydration reactions. Biosealer possessed good physical and chemical properties and were comparable to iRoot SP.

Field of Study: Endodontics

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณผู้มีส่วนร่วมให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ดังรายนามต่อไปนี้
รศ. ทพ. ดร. ไพโรจน์ หลินศวนนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทางและคำปรึกษาในการทำวิจัย ช่วยชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่พบในการทำวิจัย รวมถึงให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

ผศ. ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้แนวทางในเรื่องการสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง รวมถึงให้คำปรึกษาในการพัฒนาสูตรไบโอเซรามิกภูตคาแนลซีลเลอร์ และให้ความรู้ต่างๆ ในด้านวัสดุศาสตร์

ดร. เฉลิมขวัญ มกรพันธุ์ ที่เป็นกำลังสำคัญในการผลิตผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง รวมถึงให้คำปรึกษาต่างๆ ในด้านวัสดุศาสตร์

คณะกรรมการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ และสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์

อาจารย์สาขาวิชาเอ็นโดคอนต์ ภาควิชาทันตกรรมหัตถการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจด้านความมุ่งมั่นในการทำงานให้แก่ข้าพเจ้า

ทุนวิจัยจากโครงการแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาฯ สร้างเสริมพลังจุฬาฯ ก้าวสู่ศตวรรษที่ ๒ (Chulalongkorn Academic Advancement into Its Second Century Project)

เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยทันตวัสดุศาสตร์ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือวิจัย

คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นสถานที่ให้ความรู้ อบรมจริยธรรม และปลูกจิตสำนึกที่ดีแก่ข้าพเจ้า

บิดา มารดา และครอบครัว ที่อบรมสั่งสอนเลี้ยงดูข้าพเจ้ามาตั้งแต่กำเนิด

สุรียพร โอฟารสกุลวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	12
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	12
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
สมมติฐานการวิจัย.....	13
ข้อตกลงเบื้องต้น.....	14
ข้อจำกัดของการวิจัย.....	14
คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	15
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
แนวคิดและทฤษฎี.....	16
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
1. รุทคาแนลซีลเลอร์	16
1.1 ซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลซีลเลอร์ (Zinc oxide eugenol sealer)	17
1.2 อีพอกซีเรซินซีลเลอร์ (Epoxy resin sealer)	18
1.3 ไบโอเซรามิกซีลเลอร์ หรือแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ (Bioceramic sealer, Calcium silicate based sealer)	21

1.3.1 ไบโอรูทอาร์ซีเอส (Bioroot RCS)	24
1.3.2 ไอรูทเอสพี (iRoot SP) หรือเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ (Endosequence BC sealer) หรือโททอลฟิลบีซีซีลเลอร์ (Totalfill BC sealer).....	25
2. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate)	28
2.1 การสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ในทางอุตสาหกรรม.....	29
2.2 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตในทางการแพทย์.....	31
2.2.1 ปฏิกิริยาโซล-เจล (Sol-gel reaction)	31
2.2.2 ปฏิกิริยาโซลิดสเตท (Solid state reaction)	33
3. สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ	33
3.1 เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium oxide)	33
3.2 โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol)	34
3.3 ไมโครซิลิกา (Microsilica)	35
3.4 ผงพอลิเมอร์กระจายตัวคืนสภาพ (Re-dispersible polymer powder).....	37
3.5 ซิลิโคนออยล์ (Silicone oil).....	37
4. มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ	37
5. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี	39
5.1 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray powder diffraction หรือ XRD).....	39
5.2 ฟูเรียทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FTIR).....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	43
ประชากร.....	43
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	43
วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	43
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	43

การดำเนินการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	45
ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิติลิตเกิดจากเปลือกหอยแครง และทดสอบขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของผงไตรแคลเซียมซิติลิตเกิดจากเปลือกหอยแครง.....	45
1.1 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิติลิตเกิดจากเปลือกหอยแครง	45
1.2 การทดสอบขนาดอนุภาค	49
1.3 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี	49
ตอนที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพีและไบโอซีลเลอร์.....	49
2.1 การไหลแผ่	50
2.2 เวลาแข็งตัว	50
2.3 ความหนาชั้นฟิล์ม.....	51
2.4 การละลายตัว.....	51
2.5 ความที่บ่งสี.....	52
2.6 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมา.....	52
ตอนที่ 3 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไอรูทเอสพีและไบโอซีลเลอร์หลังจากแข็งตัว.....	53
การคำนวณทางสถิติ	53
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	54
ผลการวิเคราะห์และผลการศึกษาเปรียบเทียบ	54
ตอนที่ 1 ผลการทดสอบขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของผงไตรแคลเซียมซิติลิตเกิดจากเปลือกหอยแครง.....	54
ตอนที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพีและไบโอซีลเลอร์	55
ตอนที่ 3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไอรูทเอสพีและไบโอซีลเลอร์หลังจากแข็งตัว.....	56

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	59
อภิปรายผลการวิจัย	59
ข้อเสนอแนะ	69
สรุปผลการวิจัย.....	70
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	127



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบของซิงค์ออกไซด์ยูจินอลซีลเลอร์ (Grossman's formula).....	17
ตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบของเอเซพลัสซีลเลอร์.....	19
ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเอเซพลัสซีลเลอร์.....	20
ตารางที่ 4 แสดงส่วนประกอบของไบโอเซรามิกรูกาแนลซีลเลอร์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด.....	23
ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของไบโอรูทอาร์ซีเอส	25
ตารางที่ 6 แสดงส่วนประกอบของไอรูทเอสพี หรือเอนโดซีควอนซีซีลเลอร์ หรือโททอลฟิลปีซีลเลอร์.....	26
ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพี หรือเอนโดซีควอนซีซีลเลอร์ หรือโททอลฟิลปีซีลเลอร์	27
ตารางที่ 8 แสดงวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์.....	29
ตารางที่ 9 แสดงคุณสมบัติของรูกาแนลซีลเลอร์ตามมาตรฐานไอเอสโอ 6876/2012	38
ตารางที่ 10 แสดงคุณสมบัติของรูกาแนลซีลเลอร์ตามมาตรฐาน ANSI/ADA.....	38
ตารางที่ 11 แสดงตัวอย่างความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ.....	40
ตารางที่ 12 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพี และไบโอซีลเลอร์.....	55
ตารางที่ 13 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่างของไอรูทเอสพี และไบโอซีลเลอร์ ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน 14 วันและ 28 วัน.....	55
ตารางที่ 14 แสดงปริมาณแคลเซียมออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาจากไอรูทเอสพี และไบโอซีลเลอร์ ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน 14 วันและ 28 วัน	56

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 แสดงวัฏภาคของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Ca_3SiO_5) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Ca_2SiO_4) โดยมีซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิต่างๆ.....	31
ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตด้วยปฏิกิริยาไซล-เจล	32
ภาพที่ 3 แสดงเครื่องบด planetary ball mill	46
ภาพที่ 4 แสดงเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ (rotary evaporator)	47
ภาพที่ 5 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic pressing machine).....	47
ภาพที่ 6 แสดงเตาหลอมอุณหภูมิสูง (high temperature furnace)	48
ภาพที่ 7 แสดงเป้าหลอมอะลูมินาที่นำออกจากเตาเพื่อลดอุณหภูมิ	48
ภาพที่ 8 แสดงโถแก้วควบคุมความชื้น.....	49
ภาพที่ 9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพของผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครงจากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	54
ภาพที่ 10 แสดงดิฟแฟรคโทแกรมของไอรูทเอสพี.....	57
ภาพที่ 11 แสดงดิฟแฟรคโทแกรมของไบโอซิลเลอร์	57
ภาพที่ 12 แสดง FTIR pattern ของไอรูทเอสพี และไบโอซิลเลอร์.....	58
ภาพที่ 13 แสดงดิฟแฟรคโทแกรมของเอนโดซีควอนซ์บีซีซิลเลอร์จากการศึกษาของ Xuereb และคณะ	67
ภาพที่ 14 แสดงดิฟแฟรคโทแกรมของเอนโดซีควอนซ์บีซีซิลเลอร์จากการศึกษาของ Carvalho และคณะ	68
ภาพที่ 15 แสดง FTIR pattern ของเอนโดซีควอนซ์บีซีซิลเลอร์เมื่อแห้งตัวเต็มที่จากการศึกษาของ Abu Zeid และคณะ	68
ภาพที่ 16 แสดง FTIR pattern ของโททอลฟิลบีซีซิลเลอร์หลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆจากการศึกษาของ Donnermeyer และคณะ.....	69

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การรักษาคลองรากฟัน ประกอบด้วย การกำจัดเชื้อภายในระบบคลองรากฟัน และทำการอุดคลองรากฟันนั้น ให้แน่นเต็มทั้งสามมิติ (1) ขั้นตอนการอุดคลองรากฟัน จึงถือเป็นขั้นตอนสำคัญ ซึ่งความสำเร็จของการอุดคลองรากฟัน ขึ้นกับประสบการณ์ของทันตแพทย์ผู้ทำการรักษา (2) รวมถึงการเลือกใช้วัสดุอุดคลองรากฟันที่เหมาะสม ในปัจจุบันวัสดุอุดคลองรากฟัน ที่ได้รับความนิยมยังคงเป็นการใช้กัตตาเปอซาร่วมกับรูทคาแนลซีลเลอร์ ซึ่งรูทคาแนลซีลเลอร์ที่มีขายกันในท้องตลาดมีมากมายหลายประเภท แต่รูทคาแนลซีลเลอร์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงรูทคาแนลซีลเลอร์ ในอุดมคติที่สุดก็คือไบโอเซรามิกซีลเลอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติโดดเด่นในด้านความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ และสามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง ซึ่งอาจช่วยส่งเสริมการหายของรอยโรครอบปลายรากฟัน นอกจากนี้ไบโอเซรามิกซีลเลอร์ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี เหมาะสมกับการใช้งานทางคลินิก (3) อย่างไรก็ตามไบโอเซรามิกซีลเลอร์ที่มีขายในท้องตลาดปัจจุบันมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้การใช้งานในประเทศไทยปัจจุบันยังไม่แพร่หลายนัก

จากการค้นคว้าพบว่าส่วนประกอบหลักที่ให้ฤทธิ์ทางด้านชีวภาพในไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (4) ซึ่งเป็นที่น่าสนใจว่าวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น เปลือกหอยแครง อันประกอบด้วยโครงสร้างหลักเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (5) สามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไตรแคลเซียมซิลิเกต อย่างไรก็ตามเพื่อให้รูทคาแนลซีลเลอร์มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี เหมาะสมกับการใช้งานทางคลินิก จำเป็นต้องมีการใส่สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของรูทคาแนลซีลเลอร์ให้ได้ตามมาตรฐานสากล โดยที่ยังคงคุณสมบัติทางด้านชีวภาพที่ดี

การพัฒนาไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครงให้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี เหมาะสมกับการใช้งานทางคลินิกขึ้นใช้เองภายในประเทศ อาจเป็นแนวทางหนึ่งในการส่งเสริมให้ทันตแพทย์ได้เข้าถึงวัสดุทางทันตกรรมที่มีคุณภาพดี สามารถทำงานได้สะดวกขึ้น ลดอัตราการนำเข้าจากต่างประเทศ อีกทั้งยังเป็นการรีไซเคิลวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภค

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง สำหรับเป็นส่วนประกอบหลักในการผลิตไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์ (ไบโอซีลเลอร์)
2. ศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การไหลแผ่ เวลาแข็งตัว ความหนาชั้นฟิล์ม ค่าการละลายตัว ความที่บร้งสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง รวมถึงปริมาณแคลเซียมอิออนที่ถูกปล่อยออกมาของไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) กับไฮรูทเอสพี
3. ศึกษาและเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีหลังจากแข็งตัวของไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) กับไฮรูทเอสพี

สมมติฐานการวิจัย

1. สมมติฐานว่าง (H_0) : ไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีคุณสมบัติการไหลแผ่ไม่แตกต่างจากไฮรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)
สมมติฐานแย้ง (H_1) : ไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีคุณสมบัติการไหลแผ่แตกต่างจากไฮรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)
2. สมมติฐานว่าง (H_0) : ไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีเวลาแข็งตัวไม่แตกต่างจากไฮรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)
สมมติฐานแย้ง (H_1) : ไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีเวลาแข็งตัวแตกต่างจากไฮรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)
3. สมมติฐานว่าง (H_0) : ไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีความหนาชั้นฟิล์มไม่แตกต่างจากไฮรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)
สมมติฐานแย้ง (H_1) : ไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีความหนาชั้นฟิล์มแตกต่างจากไฮรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)
4. สมมติฐานว่าง (H_0) : ไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีค่าการละลายตัวไม่แตกต่างจากไฮรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)
สมมติฐานแย้ง (H_1) : ไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีค่าการละลายตัวแตกต่างจากไฮรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

5. สมมติฐานว่าง (H_0) : ไบโอะเซรามิกรูกทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอะซีลเลอร์) มีความที่บรังสีไม่แตกต่างจากไอรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

สมมติฐานแย้ง (H_1) : ไบโอะเซรามิกรูกทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอะซีลเลอร์) มีความที่บรังสีแตกต่างจากไอรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

6. สมมติฐานว่าง (H_0) : ไบโอะเซรามิกรูกทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอะซีลเลอร์) มีค่าความเป็นกรด-ด่างไม่แตกต่างจากไอรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

สมมติฐานแย้ง (H_1) : ไบโอะเซรามิกรูกทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอะซีลเลอร์) มีค่าความเป็นกรด-ด่างแตกต่างจากไอรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

7. สมมติฐานว่าง (H_0) : ไบโอะเซรามิกรูกทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอะซีลเลอร์) มีปริมาณแคลเซียมที่ออกมาที่ถูกลบออกไม่แตกต่างจากไอรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

สมมติฐานแย้ง (H_1) : ไบโอะเซรามิกรูกทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอะซีลเลอร์) มีปริมาณแคลเซียมที่ออกมาที่ถูกลบออกแตกต่างจากไอรูทเอสพี (ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

ขอบเขตของการวิจัย

เป็นการทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีหลังจากแข็งตัวของไบโอะเซรามิกรูกทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอะซีลเลอร์) กับไอรูทเอสพีในห้องปฏิบัติการ

ข้อตกลงเบื้องต้น

1. ในขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและดำเนินการวิจัย จะใช้ผู้ทดลองคนเดียวกัน
2. ใช้วัสดุจากกรอบการผลิตเดียวกันในการทดลองแต่ละกลุ่ม

ข้อจำกัดของการวิจัย

เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมี เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุอุดคลองรากฟัน ซึ่งต้องมีการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุก่อนนำไปทดสอบใช้งานทางคลินิก

คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

ไบโอเซรามิกซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (cockle shell derived bioceramic sealer) หรือไบโอซีลเลอร์ (Biosealer) : รุทคาแนลซีลเลอร์ซึ่งมีไตรแคลเซียมซิลิเกตที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยแครงเป็นส่วนประกอบหลัก

เวลาแข็งตัว (setting time) : ระยะเวลาตั้งแต่หลังผสมวัสดุเสร็จจนเซตของเครื่องมือทดสอบไม่ทำให้เกิดรอยกดของเข็มกดบนผิวของวัสดุ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง เพื่อเป็นองค์ประกอบในการผลิตไบโอเซรามิกรุทคาแนลซีลเลอร์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีหลังจากแข็งตัวที่เหมาะสมกับการนำไปใช้เป็นวัสดุอุดคลองรากฟัน เป็นผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบทางธรรมชาติที่ผลิตในประเทศ มีราคาไม่แพง รวมถึงเป็นการรีไซเคิลวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภค

วิธีดำเนินการวิจัย

วิจัยเชิงทดลอง

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

การดูดกลองรากฟันถือเป็นขั้นตอนสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จของการรักษาคลองรากฟัน ซึ่งรูทคาแนลซีลเลอร์ที่ดีช่วยส่งเสริมคุณภาพการดูดกลองรากฟัน ในปัจจุบันไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ได้รับความนิยมแพร่หลายมากขึ้น อันเนื่องมาจากคุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพที่ดี ได้แก่ มีความสามารถไหลแผ่ที่ดี มีการขยายตัวเล็กน้อยเมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายที่จำลองของเหลวในร่างกาย เกิดเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อในร่างกาย และมีคุณสมบัติกระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง รวมถึงการใช้งานที่สะดวกสบาย สามารถดูดร่วมกับแมทซ์โค่นด้วยซิงเกิลโค่นเทคนิค ทำให้การดูดกลองรากฟันเป็นไปโดยง่ายมากขึ้น(6) นอกจากนี้มีการศึกษาทางคลินิกพบว่า การดูดกลองรากฟันด้วยไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ร่วมกับแมทซ์โค่นให้ผลสำเร็จที่ดี(7)

จากการศึกษาพบว่าส่วนประกอบหลักในไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ซึ่งให้ผลทางด้านชีวภาพ คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต(8) ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากหลายวิธี หนึ่งในวิธีสังเคราะห์ ได้แก่ ไฮโดรเทอร์มอลแอคชัน มีสารตั้งต้นคือแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาทำปฏิกิริยากันภายใต้อุณหภูมิสูง 1450 องศาเซลเซียส(9) ขณะเดียวกันเป็นที่ทราบกันว่าวัสดุประเภทธรรมชาติ เช่น เปลือกหอยแครงมีโครงสร้างหลักมากกว่า 95% ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต(10) ในการศึกษาครั้งนี้จึงสนใจนำเปลือกหอยแครงมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งนำมาผสมกับสารเติมแต่งเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาเป็นไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพได้ตามมาตรฐานสากล ทั้งนี้เพื่อให้ทันตแพทย์มีไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์คุณภาพดีที่ผลิตภายในประเทศ มีราคาไม่แพง เอื้อประโยชน์ด้านความสะดวกในการใช้งาน ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ และส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภคกลับมาใช้ประโยชน์อีกครั้ง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. รูทคาแนลซีลเลอร์

รูทคาแนลซีลเลอร์ที่ใช้ในการดูดกลองรากฟันมีหลากหลายประเภท แบ่งตามส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์ยูจินอล ซาลิไซเลท กลาสไอโอโนเมอร์ ซิลิโคน อีพอกซีเรซิน

ไตรแคลเซียมซิลิเกต และเมทาคริลเลตเรซิน(11) โดยรูทคาแนลซีลเลอร์ที่ใช้กันแพร่หลายในประเทศไทย ได้แก่

1.1 ซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลซีลเลอร์ (Zinc oxide eugenol sealer)

เป็นกลุ่มที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายยาวนาน ซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลซีลเลอร์ถูกผลิตขึ้นครั้งแรกโดย Rickert และ Dixon ในปี 1931(12) ตั้งชื่อว่า Kerr sealer ต่อมาในปี 1936 Grossman ได้ปรับปรุงพัฒนาสูตรเป็น Procosol sealer ซึ่งไม่มีส่วนผสมของซิลเวอร์ (silver) ที่ทำให้เกิดการติดสีที่ตัวฟัน สูตรของ Grossman มีส่วนประกอบดังแสดงในตารางที่ 1(13)

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบของซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลซีลเลอร์ (Grossman's formula)

Powder	Zinc oxide 42%
	Stabelite resin 27%
	Bismuth subcarbonate 15%
	Barium sulfate 15%
	Sodium borate anhydrous 1%
Liquid	Eugenol (4-allyl-2-methoxyphenol)

ส่วนใหญ่แล้วซิงค์ออกไซด์ยูจีนอลซีลเลอร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมาจากสูตรของ Grossman โดยอาจมีการปรับส่วนผสมให้ต่างออกไปเล็กน้อย ตัวอย่างของซีลเลอร์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ โปรโคซอลซีลเลอร์ (Procosol sealer) พัลพคาแนลซีลเลอร์ (Pulp canal sealer) รอทซีลเลอร์ (Roth sealer) ซึยูซีลเลอร์ (CU sealer) เป็นต้น(14) ซีลเลอร์กลุ่มนี้ไม่ค่อยทำให้เกิดอาการแพ้ มีระยะเวลาการแข็งตัวที่ค่อนข้างนาน แต่จะแข็งตัวเร็วขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของเรซิน แคลเซียมฟอสเฟต หรือซิงค์อะซีเตท(15) เมื่อแข็งตัวแล้วไม่ค่อยแข็งแรงมากนักและมีรูพรุน(16) สามารถละลายได้ใน tissue fluid โดยเฉพาะเมื่อเกินออกนอกปลายราก(17)

จากการศึกษาของ Horning และ Kessler ในปี 1995 ได้มีการเปรียบเทียบการรั่วซึมบริเวณปลายรากของซีลเลอร์ 3 ชนิด ได้แก่ โปรโคซอลซีลเลอร์ (Procosol sealer) คีแทคเอ็นโด (Ketac Endo) และซีลเอเพ็กซ์ (Sealapex) โดยตรวจสอบการรั่วซึมด้วยหมึกอินเดียอินค (Indian ink) พบว่าโปรโคซอลซีลเลอร์ให้ผลการรั่วซึมที่ปลายรากล้นน้อยกว่าซีลเอเพ็กซ์ และคีแทคเอ็นโด แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ(18)

ในด้านคุณสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่าซีลเลอร์ในกลุ่มนี้ให้ผลในการฆ่าเชื้อในท่อเนื้อฟันได้ดีกว่าซีลเลอร์ในกลุ่มแคลเซียมไฮดรอกไซด์และกลาสไอโอโนเมอร์ แต่ด้อยกว่าอีพอกซีเรซินซีลเลอร์ การที่ซิงค์ออกไซด์ยูจินอลซีลเลอร์มีคุณสมบัติในการทำลายเชื้อได้ อาจเนื่องมาจากฤทธิ์ของยูจินอล(19)

ซีลเลอร์ในกลุ่มนี้ทุกตัวมีความเป็นพิษต่อเซลล์และทำให้เกิดผลต่อเซลล์ได้นานกว่าซีลเลอร์ในกลุ่มอื่น(20) โดยเฉพาะอันที่มีส่วนผสมของพาราฟอร์มัลดีไฮด์ (paraformaldehyde) จะทำให้เกิดการอักเสบบริเวณรอบปลายรากอย่างรุนแรง (severe periapical inflammation) แม้เวลาจะผ่านไปนาน 6 เดือน(21) เนื่องจากซิงค์ออกไซด์ยูจินอลซีลเลอร์ทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ฟีนอลยูจินอลซึ่งเป็นสารประกอบของฟีนอล (phenol) ที่เป็นพิษและทำให้เกิดผลเสียต่อเซลล์ได้(22)

ซิงค์ออกไซด์ยูจินอลซีลเลอร์ได้รับความนิยมมานานเนื่องจากคุณสมบัติแข็งตัวช้า ราคาถูก มีคุณสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย และใช้งานง่าย

1.2 อีพอกซีเรซินซีลเลอร์ (Epoxy resin sealer)

เอเอชอีลีบหก (AH 26) ถูกพัฒนาขึ้นในปี 1955 โดยบริษัท de Trey ของประเทศสวีตเซอร์แลนด์ ต่อมาในปี 1993 มีรายงานว่าเอเอชอีลีบหกมีการปลดปล่อยฟอร์มัลดีไฮด์(23) ทำให้ทางบริษัท de Trey มีการปรับปรุงพัฒนาสูตรและในปี 1995 ได้ออกวางจำหน่ายเอเอชพลัส (AH Plus) ซึ่งประกอบด้วยอีพอกซีเรซิน (low molecular weight epoxy resin) กับเอมีน (amines) แข็งตัวด้วยปฏิกิริยาการเติม (addition) ระหว่างอีพอกไซด์ (epoxide groups) ของอีพอกซีเรซินกับเอมีนเกิดการแข็งตัวเป็นพอลิเมอร์ ส่วนประกอบของเอเอชพลัสแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงส่วนประกอบของเอเอชพลัสซีลเลอร์

Epoxide paste	Diepoxide Calcium tungstate Zirconium oxide Aerosil Pigment
Amine paste	1-adamantane amine N,N'-dibenzyl-5-oxa-nonandiamine-1,9 TCD-Diamine Calcium tungstate Zirconium oxide Aerosil Silicone oil

เอเอชพลัสมีลักษณะเด่นคือมีความสามารถในการซีล (seal) ที่ดี สามารถไหลแผ่เข้าไปในท่อเนื้อฟันที่กำลังจัดเสมีียร์แลร์ (smear layer) ออกแล้วได้ ทำให้ซีลเลอร์ในกลุ่มนี้มีการยึดติดที่ดี นอกจากนี้ยังไม่ค่อยทำให้เกิดอาการแพ้ ภายหลังจากแข็งตัวจะมีการหดตัวเล็กน้อย และมีความเป็นพิษลดลง ดังจะเห็นได้จากการศึกษาของ Azar และคณะในปี 2000 ที่ทำการศึกษาค้นคว้าต่อเซลล์ (cytotoxic effect) ของเอเอชพลัสเปรียบเทียบกับเอเอชอีซีบิฮก พบว่าพิษของเอเอชพลัสจะพบใน 4 ชั่วโมงแรก หลังจากวันที่ 5 พบพิษของเอเอชพลัสน้อยมาก เนื่องมาจากตัวมันมีฟอร์มาลดีไฮด์ในปริมาณที่น้อย จึงทำให้มีการแตกตัวได้สารพิษที่น้อยกว่ามาก ดังนั้นจึงดูเหมือนว่าเอเอชพลัสจะมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพค่อนข้างดี(24) นอกจากนี้สิ่งที่แตกต่างกันของเอเอชอีซีบิฮกและเอเอชพลัสคือ เอเอชอีซีบิฮกมีส่วนประกอบของซิลเวอร์ (silver) ทำให้ฟันเปลี่ยนสีเนื่องจากมีซิลเวอร์ซัลไฟด์ซึ่งมีสีดำเกิดขึ้น แต่เอเอชพลัสไม่มีซิลเวอร์ เอเอชพลัสใช้เวลาในการแข็งตัวประมาณ 8 ชั่วโมง และเอเอชพลัสมีความหนาชั้นฟิล์ม (film thickness) ที่บางกว่า การละลายตัวต่ำกว่าเอเอชอีซีบิฮก คุณสมบัติทางกายภาพของเอเอชพลัสจากการศึกษาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเอเซพพลัสซีลเลอร์

	The physical properties of AH plus reported by previous studies (25-30)					
Flow	21.17 ± 0.39	21.2 ± 0.27	21.41 ± 1.14	-	-	-
Working time	-	240 ± 40 min	-	-	-	-
Setting time	-	11.5 ± 1.5 h	384 min	-	-	-
Film thickness (µm)	-	16.07 ± 4.5	-	-	-	-
Solubility (%)	-	0.06 ± 0.04	0.041 ± 0.05 (7 days)	0.0 ± 0.0	1.37 ± 1.46	0.28 ± 0.08
Radiopacity (mm of Al)	6.936 ± 0.462	-	9.42 ± 0.39	-	-	-

ในด้านความเป็นพิษต่อเซลล์ พิษจะเกิดเมื่อผสมเสร็จใหม่ๆ แต่เมื่อแข็งตัวแล้วความเป็นพิษจะลดลงจนเหลือน้อยมากหรือไม่มีเลย พบว่าเอเซพพลัสก็มีความสามารถในการเป็นสารก่อกลายพันธุ์ (mutagenicity) ได้(31) แต่เกิดเฉพาะหลังผสมทันที หลังจากที่แข็งตัวแล้วไม่มีความเป็นสารก่อกลายพันธุ์เหลืออยู่(32) นอกจากนี้จากรายงานการศึกษาวรรณกรรมอย่างเป็นระบบของ Kaur และคณะในปี 2015 พบว่าหลังจากแข็งตัว 3 วัน เรซินเบสซีลเลอร์มีความเป็นพิษน้อยกว่าซิงค์ออกไซด์ยูจินอลและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซีลเลอร์(33)

ในด้านคุณสมบัติด้านเชื้อแบคทีเรีย พบว่าซีลเลอร์กลุ่มนี้มีคุณสมบัติการฆ่าเชื้อที่ดี โดยมีการศึกษาเทียบกับซิงค์ออกไซด์ยูจินอล แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซีลเลอร์และกลาสไอโอโนเมอร์ซีลเลอร์ในรากฟันที่ติดเชื้อ (infected root dentin) พบว่าเอเซพพลัสมีความสามารถในการฆ่าเชื้อที่ดีกว่าทั้งสามกลุ่ม(19) รวมทั้งเอเซพพลัสสามารถฆ่าเชื้อ E. faecalis ได้ดีกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซีลเลอร์(34)

จากการศึกษาของ Wenberg และคณะในปี 1990 เกี่ยวกับการยึดติดของซีลเลอร์ต่างๆ บนฟันวัว (bovine dentin) ก็พบว่าซีลเลอร์กลุ่มนี้มีการยึดติดกับเนื้อฟันได้ดี มีการหดตัวหลังการอุดเพียงเล็กน้อย จึงให้การซีลที่ดี โดยเฉพาะหากสามารถกำจัดเสมียร์แลวได้หมด ซีลเลอร์สามารถแทรกเข้าไปในท่อเนื้อฟันได้ดี รวมทั้งมีความแข็งแรงด้านการฉีก (tensile strength) ที่สูงกว่าซีลเลอร์กลุ่มอื่น(35) โดยการยึดติดกับผนังคลองรากฟันที่ดีทำให้เกิดการซีลบริเวณปลายรากได้ดี ซึ่ง

สนับสนุนโดยการศึกษาของ Limkangwalmonkol และคณะในปี 1992 ที่ทำการเปรียบเทียบการรั่วซึม (apical dye penetration) ของซีลเลอร์ 4 ชนิด ได้แก่ เอเอชอีดีบหก (AH 26) ซีลเอเพ็กซ์ (Sealapex) เอเพ็กซ์ทิท (Apexit) และทูปิซีล (Tubiseal) ที่ใช้ร่วมกับการอุดคลองรากฟันแบบเลเทอรัลคอนเดนชันเซชัน (lateral condensation) ผลปรากฏว่าเอเอชอีดีบหกเกิดการรั่วซึมของสีบริเวณปลายรากน้อยที่สุด(36) นอกจากนี้ยังพบว่าซีลเลอร์กลุ่มนี้ยังยึดติดกับกัตตาเปอร์ชาได้ดีกว่าซิงค์ออกไซด์ยูจินอล แคลเซียมไฮดรอกไซด์ซีลเลอร์และกลาสไอโอโนเมอร์ซีลเลอร์อีกด้วย (37)

1.3 ไบโอเซรามิกซีลเลอร์ หรือแคลเซียมซิลิเกตเบสซีลเลอร์ (Bioceramic sealer, Calcium silicate based sealer) แบ่งตามรูปแบบการใช้งานได้ 2 แบบ คือ ระบบผง-น้ำ (powder-liquid system) ซึ่งต้องมีการผสมใหม่ทุกครั้งที่ใช้ งาน ส่งผลต่อเทคนิคเซนซิทีฟ (technique sensitive) มากกว่าอีกแบบที่เป็นแบบพร้อมฉีดใช้งาน (premixed bioceramic sealer) ซึ่งอาศัยความชื้นในคลองรากฟันในการแข็งตัว ไบโอเซรามิกซีลเลอร์แบบพร้อมฉีดใช้งาน มีข้อดีคือมีความหนืดคงที่ (uniform consistency) ใช้งานสะดวก และไม่เปลี่ยนแปลงหากใช้ไม่หมดในครั้งเดียว(38)

จุดเด่นของไบโอเซรามิกซีลเลอร์คือคุณสมบัติทางชีวภาพ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีการปลดปล่อยแคลเซียมไอออน ซึ่งเมื่อสัมผัสกับสารน้ำในร่างกายจะเกิดเป็นสารประกอบอะพาไทต์(39) กลไกที่ทำให้ซีลเลอร์ยึดติดกับคลองรากฟันยังคงไม่ทราบแน่ชัด แต่มีข้อสันนิษฐานที่เป็นไปได้ดังนี้

- การแพร่ (diffuse) ของอนุภาคซีลเลอร์เข้าไปในท่อเนื้อฟัน เพื่อสร้างการยึดติดทางกล (mechanical interlocking bonds)(40)
- การแทรกซึม (infiltration) ของแร่ธาตุในส่วนประกอบของซีลเลอร์ (mineral content) เข้าไปที่ intertubular dentin ทำให้เกิด mineral infiltration zone ซึ่งถูกสร้างหลังจากมีการ denaturing คอลลลาเจนไฟเบอร์ด้วยซีลเลอร์ซึ่งมีความเป็นด่างสูง(41, 42)
- เป็นปฏิกิริยาระหว่างฟอสเฟตกับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ถูกสร้างขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกตในสภาวะที่เนื้อฟันมีความชื้น เป็นผลให้เกิดไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่รอยต่อระหว่างซีลเลอร์กับเนื้อฟัน (mineral infiltration zone)(40)

ในด้านคุณสมบัติการซีลของไบโอเซรามิกซีลเลอร์พบว่าเป็นที่น่าพอใจเทียบเท่ากับซีลเลอร์ชนิดอื่นๆ จากการศึกษาคำวิจัยที่มีบริเวณปลายรากของ Zhang และคณะในปี 2009 พบว่าการซีลบริเวณปลายรากฟันของไอรูทเอสพี (iRoot SP) และเอเซพลัสส์ ไม่มีความแตกต่างกัน(40)

กรอสแมนได้กำหนดคุณสมบัติของรูทคาแนลซีลเลอร์ในอุดมคติไว้ดังนี้(43)

- 1) มีความหนืดซึ่งส่งเสริมให้เกิดการยึดติดที่ตีระหว่างเนื้อฟันและผนังคลองรากฟัน
- 2) ให้การปิดผนึก (seal) ที่ดี
- 3) มีความที่บร้งดี
- 4) ผสมเพื่อใช้งานและนำเข้าสู่คลองรากฟันได้ง่าย
- 5) มีความคงตัวเมื่อแข็งตัว ไม่ขยายหรือหดตัว
- 6) ไม่ทำให้ฟันเปลี่ยนสี
- 7) แข็งตัวช้า เพื่อให้มีระยะเวลาทำงานที่เพียงพอ
- 8) สามารถละลายออกได้ด้วยสารละลายปกติ
- 9) มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย
- 10) มีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ
- 11) เป็นสารที่ไม่ก่อให้เกิดมะเร็ง หรือการกลายพันธุ์ระดับพันธุกรรม
- 12) ไม่ระคายเคืองเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังไม่มีรูทคาแนลซีลเลอร์ที่ประกอบด้วยคุณสมบัติข้างต้นทั้งหมด แต่จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์มีคุณสมบัติที่ครอบคลุมหลายประการ มีความสามารถในการไหลแผ่ที่ดี มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) มีการขยายตัวเล็กน้อยเมื่อสัมผัสกับของเหลวจำลองสารน้ำในร่างกาย นอกจากนี้ขณะแข็งตัวจะมีการปลดปล่อยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่งเสริมการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง รวมถึงสามารถทำปฏิกิริยากับสารน้ำในร่างกายเกิดเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ กล่าวคือเป็นรูทคาแนลซีลเลอร์ที่มีคุณสมบัติดีทั้งในด้านกายภาพและชีวภาพ นอกจากนี้ยังสะดวกต่อการใช้งานเนื่องจากสามารถใช้ชุดด้วยเทคนิคซิงเกิลโคน (single cone technique) หรือไฮดรอลิกคอนเดนชัน (hydraulic condensation)(44) ส่วนประกอบของไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงส่วนประกอบของไบโอเซรามิกเรซินเคลือบฟันที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

Materials	Company	Powder	Radiopacifier	Additives	Vehicle	Mixing
BioRoot RCS	Septodont, France	- Tricalcium silicate - Dicalcium silicate	- Zirconium oxide	- Calcium chloride - Povidone - Water soluble polymer	Water	Manual
ProRoot Endo Sealer	Dentsply, Switzerland	Portland cement	- Bismuth oxide	- Water soluble polymer	Water	Manual
EndoSequence BC Sealer/ iRoot SP/ Totalfill BC sealer	Brasseler, US /Innovative Bioceramix, Canada/ FKG Dentaire, Switzerland	- Tricalcium silicate - Dicalcium silicate	- Zirconium oxide	- Colloidal silica - Calcium phosphate monobasic - Calcium hydroxide - Filler	-	Premix
Ceraseal	Meta Biomed, Cheongju, Korea	- Calcium silicate	- Zirconium oxide	- Thickening agent	-	Premix

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะไบโอเซรามิกซีลเลอร์ที่มีรายงานการศึกษาและมีจำหน่ายในประเทศไทย

1.3.1 ไบโอรูทอาร์ซีเอส (Bioroot RCS)

เป็นไบโอเซรามิกซีลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท Septodont ส่วนผสมประกอบด้วยไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate) โปวิดอน (povidone) และเซอร์โคเนียมออกไซด์ (zirconium oxide) ส่วนน้ำประกอบด้วยน้ำ แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) ซึ่งช่วยให้แข็งตัวเร็วขึ้น และพอลีคาร์บอกซีเลต (polycarboxylate) ซึ่งเป็นสารลดน้ำ (water reducing agent)

ไบโอรูทอาร์ซีเอสมีคุณสมบัติส่งเสริมปฏิกิริยาทางชีวภาพ (bioactivity) กล่าวคือมีคุณสมบัติกระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง (mineralization) ส่งเสริมการหายของรอยโรครอบปลายราก โดยบริษัทผู้ผลิตระบุระยะเวลาทำงานประมาณ 15 นาที และระยะเวลาแข็งตัวน้อยกว่า 4 ชั่วโมง(45) คุณสมบัติทางกายภาพของไบโอรูทอาร์ซีเอสแสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของไบโอโรทอาร์ซีเอส

The physical properties of Bioroot RCS reported by previous studies (8, 46-49)					
Flow	-	-	-	-	16 ± 1.6 mm
Setting time	324 ± 1 min	immersed in HBSS : 15.8 ± 0.6 h Dry : 1.3 ± 0.05 h	-	Initial : 55 ± 5 min Final : 300 ± 5 min	27.4 ± 2.8 min
Film thickness	-	-	-	-	52 ± 17 µm
Solubility (%)	- In DI water 1 day: 1.174 ± 0.184%, 28 days :1.78 ± 0.21% - In PBS 1 day: 0.958 ± 0.168% 28 days: 0.885 ± 0.086%	-	- In DI water 14 days: 1.6 ± 0.193% 1 month: 1.999 ± 0.318% - In PBS : 14 days: 0.936 ± 0.183 % 1 month: 0.99 ± 0.174%	- Incubated for 1.5 times of Setting Solubility = 37.6 ± 3.2% - Incubated for 7 days Solubility = 14.2 ± 2%	-
Radiopacity (mm of Al)	6.85 ± 0.12	8.9	-	5.2 ± 0.3	8.3 ± 0.99

ข้อเสียของไบโอโรทอาร์ซีเอสคือเป็นซีลเลอร์ที่เป็นระบบผง-น้ำ การผสมแต่ละครั้งอาจได้ความข้นหนืดไม่คงที่ขึ้นกับอัตราส่วนน้ำและผง นอกจากนี้ยังมีเวลาทำงานค่อนข้างสั้น และการไหลแผ่ค่อนข้างน้อย

1.3.2 ไอรูทเอสพี (iRoot SP) หรือเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์

(Endosequence BC sealer) หรือโททอลฟิลบีซีซีลเลอร์ (Totalfill BC sealer)

ไอรูทเอสพี (iRoot SP) หรือเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ (Endosequence BC sealer) หรือโททอลฟิลบีซีซีลเลอร์ (Totalfill BC sealer) เป็นไบโอเซรามิกซีลเลอร์ (pure

bioceramic sealer) ที่ถูกพัฒนาและออกจำหน่ายในท้องตลาดเป็นแบรนด์แรกตั้งแต่ปี 2007 โดยทั้งสามตัวมีส่วนประกอบเหมือนกัน แตกต่างกันที่บริษัทรวมถึงภูมิภาคที่จัดจำหน่ายดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงส่วนประกอบของไอรูทเอสพี หรือเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ หรือโททอลฟิลลิปซีซีลเลอร์

Sealer	Company	Composition
iRoot SP	Innovative Bioceramix, Vancouver, Canada	Tricalcium silicate,
Endosequence BC sealer	Brasseler US, Savannah, GA, US	dicalcium silicate,
Totalfill BC sealer	FKG Dentaire SA, La-Chaux-de-fonds, Switzerland	zirconium oxide, colloidal silica, calcium phosphate monobasic, calcium hydroxide

คุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพี (iRoot SP) หรือเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ (Endosequence BC sealer) หรือโททอลฟิลลิปซีซีลเลอร์ (Totalfill BC sealer) จากหลายการศึกษาแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพี หรือเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ หรือ โททอลฟิลบีซีซีลเลอร์

	iRoot SP(30)	Endosequence BC sealer(8, 25, 26, 28)				Total fill BC sealer(27)
Flow	-	-	26.96 ± 0.68	23.1 ± 0.69	-	24.83 ± 0.79
Working time	-	-	-	>1440 min	-	-
Setting time	-	-	-	2.7 ± 0.3 h	22.3 ± 0.9 (in HBSS)	581.4 ± 27.18 min (9.69 h)
Film thickness (µm)	-	-	-	22 ± 4.58	-	-
Solubility (%)	20.64 ± 1.42	9.4 ± 6.3	-	2.9 ± 0.5	-	7.444 ± 0.86 (7 days)
Radiopacity (mm Al)	-	-	3.834 ± 0.346	-	10.8	6.15 ± 0.39

เมื่อเปรียบเทียบกับรูทคาแนลซีลเลอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น เอเซพลัส พบว่าไอรูทเอสพีหรือเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์มีความที่บ่งสีน้อยกว่าเอเซพลัส(25, 27) แต่มีค่าการไหลแผ่และความหนาชั้นฟิล์มมากกว่าเอเซพลัส(25-27) ขณะเดียวกันการศึกษาล่าสุดพบว่าการละลายตัวมากกว่าเอเซพลัส

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากวัสดุ จากการศึกษาคงของ Candeiro และคณะ ในปี 2012 ซึ่งศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน และ 10 วันพบว่าในช่วงเวลาดังกล่าวไอรูทเอสพีมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงระหว่าง 10.31-11.21(25) ส่วนการศึกษาของ Zhou และคณะ ในปี 2013 พบว่าเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 12 ตลอดช่วงระยะเวลาการทดลองทั้ง 5 สัปดาห์(26) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเอเซพลัส พบว่าไอรูทเอสพีและเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ มีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่าเอเซพลัส(25, 26, 50)

จากการศึกษาปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากวัสดุของ Borges และคณะ ในปี 2012 พบว่าไอรูทเอสพีปลดปล่อยแคลเซียมไอออนออกมาจากวัสดุมากกว่าเอเซพลัสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ(30) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Candeiro และคณะ ในปี 2012 ซึ่ง

พบว่าแอนโดซีควอนซ์บิซิลเลอ์ปลดปล่อยแคลเซียมออกซิเจนออกมาจากวัสดุมากกว่าเอเซพพลัส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ(25)

2. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต หรือเอไลต์ (alite) เป็นสารประกอบซึ่งมีโครงสร้างเป็น nesosilicate (โครงสร้างอันประกอบด้วยซิลิกอนหนึ่งอะตอมซึ่งจับกับออกซิเจนสี่อะตอม) เกิดเป็นโครงสร้างเตตระฮีดรอล (tetrahedral) โครงสร้างของไตรแคลเซียมซิลิเกตมี 3 รูปแบบ ได้แก่ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) และรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ซึ่งเปลี่ยนรูปแบบกลับไปมาได้ขึ้นกับอุณหภูมิ

ไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นส่วนประกอบหลักที่พบในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยพบได้มากถึง 68%(51) นอกจากนี้ไตรแคลเซียมซิลิเกตยังถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบหลักในไบโอเดนทีน (Biodentine)(52) และไบโอรูทอาร์ชีเอส (Bioroot RCS)(48) จากการศึกษาพบว่าไตรแคลเซียมซิลิเกตเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์กว่าพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (53) โดยเมื่อไตรแคลเซียมซิลิเกตทำปฏิกิริยากับน้ำ ออกซิเจนบริเวณพื้นผิวซีเมนต์จะละลายตัวออก สารละลายจะเต็มไปด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล และเมื่อสารละลายถึงจุดอิ่มตัวจะเกิดการตกตะกอนของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH)

นอกจากนี้จะมีแคลเซียมออกซิเจนบางส่วนที่ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งตกผลึกเป็นพอร์ตแลนด์ โดยรวมจึงสรุปได้ว่าเมื่อไตรแคลเซียมเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะได้ผลเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจลและแคลเซียมไฮดรอกไซด์(54) ดังสมการ



การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตอันประกอบด้วยการละลายของไตรแคลเซียมซิลิเกต การตกตะกอนของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล และการตกผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถตรวจสอบได้จากเทคนิคทางห้องปฏิบัติการ ได้แก่ X-ray powder diffraction, Calorimetry, Small-angle neutron scattering, Advanced electron microscopy เป็นต้น โดยเทคนิคที่พบได้บ่อยในวารสารทางทันตกรรม ได้แก่ X-ray powder diffraction (XRD) และ Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

2.1 การสังเคราะห์ปูนซีเมนต์ในทางอุตสาหกรรม

กรรมวิธีการผลิตปูนซีเมนต์ในทางอุตสาหกรรมจะใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นปกติ เช่น หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทรายมาบดผสมในสภาพที่แห้งและในระหว่างการบดจะใช้ลมร้อนที่เหลือจากระบบหม้อเผาช่วยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ วัตถุดิบที่เตรียมเสร็จแล้วจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ หลังจากนั้นนำไปบดเข้าหม้อเผาในสภาพที่แห้งเพื่อให้ได้ปูนเม็ดออกมา

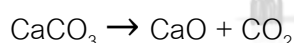
ตารางที่ 8 แสดงวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์

ประเภทของวัตถุดิบ	รายละเอียด
Calcareous material	เป็นวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate หรือ CaCO_3) ตั้งแต่ 80% ขึ้นไป เช่น หินปูน (limestone) ดินขาว (marl) และดินสอพอง (chalk) เป็นต้น
Argillaceous material	เป็นวัตถุดิบที่ประกอบด้วยออกไซด์ของซิลิกา (silicon dioxide หรือ SiO_2) อลูมินา (aluminum oxide หรือ Al_2O_3) และเหล็ก (iron oxide หรือ Fe_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ เช่น หินดินดาน (shale) และดินดำหรือดินเหนียว (clay) เป็นต้น
Corrective material	เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมองค์ประกอบทางเคมีบางตัวซึ่งในหินดินดานหรือดินดำมีปริมาณไม่เพียงพอ เช่น เพิ่ม SiO_2 : ทราย เพิ่ม Al_2O_3 : ดินแดง เพิ่ม Fe_2O_3 : แร่เหล็ก (iron Ore) และดินลูกรัง (laterite)
Additive material	เป็นสารผสมเพิ่มที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่สำคัญคือการเติมยิปซัมเพื่อช่วยยืดระยะเวลาการแข็งตัว ปรับปรุงคุณสมบัติการหดตัว และพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ กรณีปูนซีเมนต์ผสม มีการเติมหินปูน เพื่อช่วยลดการหดตัว ซึ่งจะช่วยลดการแตกร้าว นอกจากนี้ยังอาจมีการผสมสารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ เช่น สารปอซโซลาน สารลดน้ำ

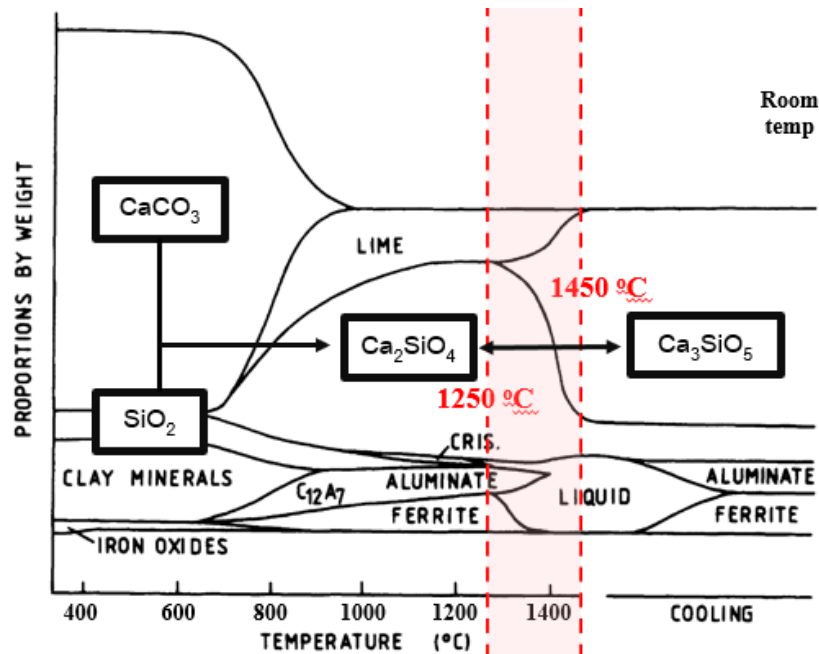
การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ ส่วนใหญ่จะใช้หินปูนและหินดินดาน ย่อยให้มีขนาดเล็กลงใกล้เคียงกัน เพื่อให้ได้วัตถุดิบที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ จากนั้นนำมาบดด้วยหม้อบดวัตถุดิบ (raw mill) ซึ่งจะบดวัตถุดิบทั้งหมดให้ละเอียด โดยในระหว่างบดจะใช้ลมร้อนที่เหลือจากระบบหม้อเผา ช่วยไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ ส่งผลให้วัตถุดิบที่ผ่านการบดแล้วมีความชื้นต่ำลงมาก วัตถุดิบที่ถูกลบละเอียดแล้วจะถูกคัดแยกด้วยเครื่องคัดแยก ซึ่งวัตถุดิบที่ผ่านการบดและการคัดแยกจนได้ขนาดตามต้องการจะมีลักษณะเป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเรียกว่า วัตถุดิบสำเร็จ จากนั้นจะลำเลียงวัตถุดิบสำเร็จไปเก็บในไซโลเพื่อป้อนเข้าหม้อเผาต่อไป

การเผาปูนเม็ดมีขั้นตอนดังนี้คือ เริ่มจากการลำเลียงวัตถุดิบสำเร็จที่ได้เข้าสู่ระบบหม้อเผา ซึ่งในปัจจุบันก่อนจะป้อนวัตถุดิบสำเร็จเข้าสู่หม้อเผาจะต้องป้อนวัตถุดิบสำเร็จผ่าน Preheater เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนจะป้อนเข้าสู่ Burning zone ภายในหม้อเผา (klin) วัตถุดิบสำเร็จที่ถูกเผาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เกิดเป็นปูนเม็ด (clinker) และถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วในบริเวณที่เรียกว่า Cooling zone โดยการเป่าผ่านปูนเม็ดที่ร้อนจัดเพื่อดึงความร้อนดังกล่าวออกไป

กระบวนการเผาสารผสมระหว่างหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต) และแร่ซิลิกาเกิดจากดินที่อุดมหมู่สูง จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้คือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอเนชัน (decarbonation) ของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิระหว่าง 700-1000 องศาเซลเซียส ดังสมการ



เมื่อกระบวนการ decarbonation เกิดสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 1100 องศาเซลเซียส แคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเกิดเป็นไดแคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยาจนเริ่มหมดที่อุณหภูมิประมาณ 1250 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิประมาณ 1300 องศาเซลเซียส ไดแคลเซียมซิลิเกตจะเริ่มเปลี่ยนเป็นไตรแคลเซียมซิลิเกต กระบวนการผลิตไตรแคลเซียมซิลิเกตจะสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 1(55)



ภาพที่ 1 แสดงวิวัฒนาการของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Ca_3SiO_5) และไดแคลเซียมซิลิเกต (Ca_2SiO_4) โดยมีซิลิกา (SiO_2) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตั้งต้นที่อุณหภูมิต่างๆ

ปูนเม็ดที่ผ่านการเผาและการทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วของระบบหม้อเผาแล้ว จะถูกลำเลียงผ่านเครื่องย่อย เพื่อย่อยปูนเม็ดให้มีขนาดเล็กลงและอยู่ในพิกัดควบคุม จากนั้นจะถูกลำเลียงไปเก็บยังไซโลเก็บปูนเม็ด

การบดเม็ดปูน หม้อบดปูนซีเมนต์จะประกอบไปด้วยห้องบด 2 ห้อง ได้แก่ ห้องบดที่ 1 ทำหน้าที่บดวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปให้มีขนาดเล็กลงโดยการกระแทกหรือเป็นการบดหยาบ ลูกบด (grinding ball) ที่ใช้ในห้องบดที่ 1 จะมีขนาดใหญ่กว่าห้องที่ 2 สำหรับห้องบดที่ 2 ทำหน้าที่บดละเอียดโดยมีลูกบอลขนาดเล็กทำหน้าที่ขัดสีให้มีขนาดละเอียดมากขึ้น ทั้งนี้ในขณะทำการบด อาจมีการฉีดน้ำสำหรับหล่อเย็นภายในหม้อบดเพื่อไม่ให้มีอุณหภูมิภายในหม้อบดสูงเกินไป

2.2 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตในทางการแพทย์

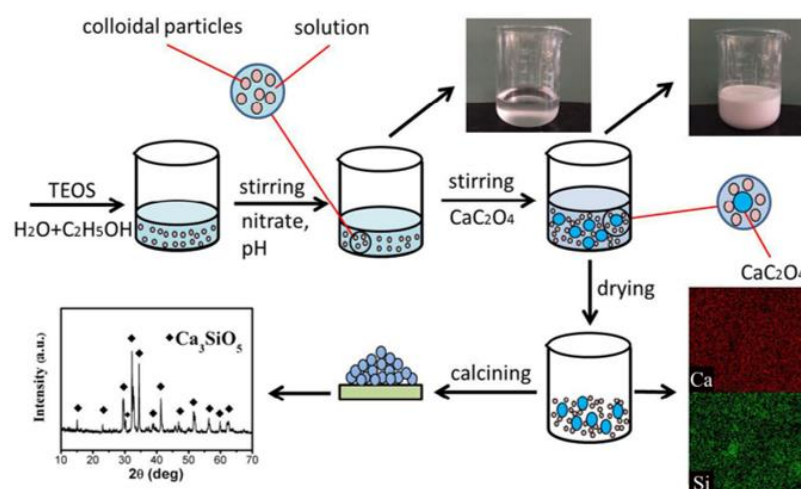
ไตรแคลเซียมซิลิเกตสามารถสังเคราะห์ได้จากหลายวิธี ได้แก่ ปฏิกริยาโซล-เจล (sol-gel reaction)(56) การเผาผลึกแบบโซลิดสเตท (solid-state reaction)(9)

2.2.1 ปฏิกริยาโซล-เจล (Sol-gel reaction)

โซล หมายถึง อนุภาคของแข็งที่เป็นคอลลอยด์กระจายตัวอยู่ในของเหลวอย่างมีเสถียรภาพ ส่วนเจลหมายถึงของแข็งที่มีโครงสร้างร่างแหใน 3 มิติ และเต็มไปด้วยรูพรุน ใน

กระบวนการโซลเจลนั้น เมื่ออนุภาคคอลลอยด์ในโซลเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) จะได้ของแข็งที่มีรูพรุนที่เรียกว่าเจล สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจลมักเป็นพวกอัลคอกไซด์ของโลหะหรือกึ่งโลหะ ผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้คือแอลกอฮอล์ (R-OH) ที่สามารถระเหยออกไปได้ สารตั้งต้นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมาก คือสารจำพวกอัลคอกซีไฮเลน (alkoxysilane) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮเลนที่มีพันธะ Si-O-R ตัวอย่างเช่น เตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต (tetraethyl orthosilicate หรือ $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ หรือเรียกโดยย่อว่า TEOS) เป็นสารที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากสามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย และมีราคาถูก ในกระบวนการโซล-เจลของสารประเภทนี้สามารถใช้กรดหรือเบส เพื่อเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันก็ได้ แต่ในระบบจะต้องมีน้ำซึ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการไฮโดรไลซิส และอาจผสมแอลกอฮอล์เพื่อช่วยในการละลายสารตั้งต้น

ในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแคลเซียมซิลิเกตด้วยปฏิกิริยาโซล-เจล(56) มีขั้นตอนคือนำเตตระเอทิลออร์โธซิลิเกต ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ หรือ TEOS) มาผสมกับสารละลายเอทานอล โดยมีกรดไนตริก (Nitric acid) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นำไปเคี่ยวระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้เกิดเป็นสารละลายที่มีซิลิกา จากนั้นเติมแคลเซียมออกซาลेट (CaC_2O_4) ลงในสารละลายเพื่อเป็นแหล่งของแคลเซียม เคี่ยวสารละลายผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปอบความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุภาคผงแคลเซียมซิลิเกต วิธีนี้มีข้อดีคือทำให้ได้สารอนุภาคเล็กและมีขนาดใกล้เคียงกันมากกว่า แต่ขั้นตอนการทำค่อนข้างยุ่งยาก และใช้เวลานาน



ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮดรอกซีแคลเซียมซิลิเกตด้วยปฏิกิริยาโซล-เจล

2.2.2 ปฏิกิริยาโซลิดสเตท (Solid state reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ผงแคลเซียมออกไซด์และซิลิกาซึ่งเป็นของแข็งเป็นสารตั้งต้น ซึ่งให้ได้สัดส่วนตามที่ต้องการ บดผสมให้เข้ากันโดยไม่ต้องมีตัวทำละลาย และใช้ความร้อนเผาให้เกิดปฏิกิริยา วิธีนี้มีข้อดีคือเตรียมได้ง่าย ต้นทุนไม่สูง ใช้สารเคมีน้อย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เหมาะกับการผลิตปริมาณมาก โดยแคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสามารถสังเคราะห์ได้จากการเผาวัสดุซึ่งมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นส่วนประกอบ(55) อันได้แก่

- หินปูน คือหินตะกอนชนิดหนึ่งซึ่งมีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตมากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปหินตะกอนชนิดคาร์บอเนตประกอบด้วยแคลไซต์ร้อยละ 95 หินปูนอาจเกิดจากการทับถมของเปลือกหอย หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ที่อาศัยอยู่ในทะเล หรือการตกตะกอนทางเคมี การตกผลึก การเกิดผลึกใหม่ หินปูนที่พบส่วนมากจะมีซากดึกดำบรรพ์ปรากฏอยู่ หินปูนมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของส่วนประกอบ ปริมาณแร่ธาตุ และอายุ

- หินอ่อน คือหินแปรชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยแคลไซต์ และ/หรือโดโลไมต์ ที่เกิดผลึกใหม่ มีขนาดละเอียดถึงหยาบ โดยปกติจะมีเนื้อผลึกสม่ำเสมอ โดยมีต้นกำเนิดจากหินปูนซึ่งได้รับความร้อนและความกดดันทำให้เกิดการแปรสภาพ

- เปลือกหอย ได้มาจากหอยซึ่งเป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในไฟลัมมอลลัสกา (phylum mollusca) มีร่างกายอ่อนนุ่ม แต่สามารถสร้างเปลือกแข็งที่เป็นสารประกอบพวกหินปูนหุ้มอยู่รอบตัว เปลือกของหอยที่เป็นหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนตมีการจัดเรียงเป็นชั้น ชั้นนอกมักมีสีส้มและลวดลายต่างๆ ส่วนชั้นในมีลักษณะเป็นมุกเคลือบมัน เปลือกหอยที่นำมาผลิตเป็นแคลเซียมออกไซด์ได้มีหลายชนิด เช่น หอยนางรม หอยมุก หอยแครง หอยกาบ หอยโข่ง เป็นต้น

3. สารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ

3.1 เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Zirconium oxide)

กระดูกและฟันมนุษย์ประกอบด้วยแคลเซียมและฟอสฟอรัสซึ่งมีเลขอะตอม 20 และ 15 ตามลำดับ วัสดุที่บ่งชี้จึงควรเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมมากกว่าเพื่อให้แยกความแตกต่างของวัสดุทางภาพรังสีออก โดยระดับความที่บ่งชี้ นอกจากจะแปรผันตรงกับเลขอะตอมที่สูงแล้ว ขนาดและความหนาแน่นของปริมาณสารที่บ่งชี้ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่เพิ่มความที่บ่งชี้ได้ วัสดุที่บ่งชี้ที่ใช้ในทางทันตกรรมมักอยู่ในรูปสารประกอบ เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เซอร์โคเนียม

ออกไซด์ (ZrO_2) แบเรียมซัลเฟต ($BaSO_4$) บิสมัทออกไซด์ (Bi_2O_3) เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบ มีความเสถียรสูง ปลอดภัย สามารถปรับระดับความทึบรังสีได้จากปริมาณของสารประกอบที่ได้

ในช่วงแรกของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ประเภทเอ็มทีเอ สารทึบรังสีที่ใช่มักเป็นบิสมัทออกไซด์ จากการศึกษาของ Coomaraswamy และคณะ ในปี 2008 ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความทึบรังสีของบิสมัทออกไซด์ แบเรียมซัลเฟต แลนทานัมออกไซด์ และแทนทาลัมเพนทอกไซด์ เมื่อใช้เป็นสารให้ความทึบรังสีในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยใส่สารทึบรังสี 20% ลงในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พบว่าบิสมัทออกไซด์ให้ความทึบรังสีสูงสุด คือเทียบเท่าความทึบรังสีของอลูมิเนียมหนา 3.71 มิลลิเมตร ในขณะที่แทนทาลัมเพนทอกไซด์ แลนทานัมออกไซด์ และแบเรียมซัลเฟตให้ความทึบรังสีเทียบเท่าอลูมิเนียมหนา 2.76, 1.85 และ 1.48 ตามลำดับ(57) อย่างไรก็ตามแม้บิสมัทออกไซด์ จะมีความสามารถในการให้ความทึบรังสีที่สูง ในปี 2014 Marciano และคณะรายงานว่าเมื่อ บิสมัทออกไซด์สัมผัสกับโซเดียมไฮโปคลอไรท์จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีน้ำตาลเข้ม แตกต่างจากเซอร์โคเนียมออกไซด์และแคลเซียมทั้งสเตรทที่เมื่อสัมผัสกับโซเดียมไฮโปคลอไรท์ ไม่เกิดการเปลี่ยนสีแต่อย่างใด นอกจากนี้พบว่าเอ็มทีเอแองเจิลัส (MTA angelus) ซึ่งมีสารทึบรังสีเป็นบิสมัทออกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของฟัน แตกต่างจากไบโอเดนทีน (Biodentine) ซึ่งใช้ เซอร์โคเนียมออกไซด์เป็นสารให้ความทึบรังสีไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของฟัน(58)

เซอร์โคเนียมออกไซด์ยังเป็นสารทึบรังสีที่ใส่ในวัสดุทันตกรรมหลายชนิด เช่น กลาสไอโอโนเมอร์ซีเมนต์ เอเซพพลัสซีลเลอร์ (AH Plus) ไบโอเดนทีน (Biodentine) เป็นต้น จากการศึกษาของ Camilleri และคณะ ในปี 2011 พบว่าเมื่อใช้เซอร์โคเนียมออกไซด์ 30% เป็นสารทึบรังสีแทนบิสมัทออกไซด์ในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ พบว่าเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และมีการปลดปล่อย แคลเซียมออกไซด์ซึ่งทำปฏิกิริยากับสารละลายฟอสเฟตในสารน้ำจำลองได้ปกติเหมือนกับเอ็มทีเอ จึงกล่าวได้ว่าเซอร์โคเนียมออกไซด์มีฤทธิ์เฉื่อย ไม่รบกวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของพอร์ตแลนด์ ซีเมนต์(53) นอกจากนี้จากการศึกษาของ Li และคณะ ในปี 2013 พบว่าเซอร์โคเนียมออกไซด์ ให้ผลการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดีกับเซลล์เนื้อเยื่อกระดูก(26)

3.2 โพรพิลีนไกลคอล (Propylene glycol)

โพรพิลีนไกลคอลเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ละลายน้ำได้ สูตรทางเคมีคือ $C_3H_8O_2$ มีโครงสร้างเป็นหมู่ไฮดรอกซิล 2 ตำแหน่ง โพรพิลีนไกลคอลถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร โดยทำหน้าที่เป็นสารเคลือบผิว (glazing agent) สารช่วยทำ

ละลายหรือช่วยพา (carrier solvent) สารช่วยเก็บความชื้น (humectant) อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ช่วยป้องกันการแยกชั้นของอาหาร นอกจากนี้ยังมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยา และเครื่องสำอางค์ โดยใช้เป็นตัวทำละลาย (solvent) ช่วยให้ความหล่อลื่น ในทางทันตกรรมโพรฟิชั่น ไกลคอลลูกนำมาใช้เป็นกระสายยาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์สำเร็จรูปแบบไม่แข็งตัว สำหรับใช้ฉีดลงในคลองรากฟันเพื่อฆ่าเชื้อระหว่างวิธิต นอกจากนี้ยังถูกแนะนำให้ใช้ร่วมกับ Macroglol สำหรับเป็นกระสายยาของยาปฏิชีวนะสามชนิด (three mixed antibiotic) ในการฆ่าเชื้อสำหรับรีเจนเนอเรทีฟเอ็นโดดอนติกทรีทเมนต์ (Regenerative endodontic treatment)(59)

ในปี 2017 Holland และคณะพบว่าเอ็มทีเอที่ผสมกับน้ำกลั่นหรือโพรฟิชั่นไกลคอลลให้ผลทดสอบทางชีวภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ขณะเดียวกันพบว่าเอ็มทีเอที่ผสมกับโพรฟิชั่นไกลคอลลสามารถใส่ลงในคลองรากฟันได้ง่ายกว่าเอ็มทีเอที่ผสมด้วยน้ำกลั่น(60)

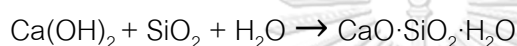
เช่นเดียวกับการศึกษาของ Duarte พบว่าเมื่อเติมโพรฟิชั่นไกลคอลลในเอ็มทีเอแองเจิลัส (MTA angelus) จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติการไหลแผ่ และยืดเวลาการแข็งตัวของวัสดุ นอกจากนี้ยังปรับปรุงเนื้อสัมผัส ทำให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น ช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาในช่วงแรก(25) อย่างไรก็ตามขัดแย้งกับการศึกษาของ Natu และคณะซึ่งพบว่า การเติมโพรฟิชั่นไกลคอลลในไวท์เอ็มทีเอช่วยส่งเสริมคุณสมบัติการไหลแผ่ แต่ไม่ได้ส่งเสริมให้ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากวัสดุสูงขึ้น(61)

จากการศึกษาของ Milani และคณะ ในปี 2013 พบว่าเมื่อผสมเอ็มทีเอกับโพรฟิชั่นไกลคอลลจะเพิ่ม push-out bond strength ของวัสดุกับเนื้อฟัน โดยคณะผู้วิจัยได้แนะนำสัดส่วนการผสมส่วนเหลวไว้คืออัตราส่วนน้ำกลั่น 80% โพรฟิชั่นไกลคอลล 20% จะยังคงคุณสมบัติทางกายภาพเดิมของเอ็มทีเอไว้ โดยปริมาณของโพรฟิชั่นไกลคอลลที่ใส่ลงในเอ็มทีเอส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของเอ็มทีเอ คือทำให้เวลาแข็งตัวยาวนานขึ้น เนื่องจากโพรฟิชั่นไกลคอลลรบกวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน(62)

3.3 ไมโครซิลิกา (Microsilica)

ไมโครซิลิกา หรือซิลิกาฟุ้ง เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่งซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิต silicon metal และ ferrosilicon alloy โดยทั่วไปซิลิกาฟุ้งจะมีขนาดอนุภาคเล็กมากๆ จึงมีพื้นที่ผิวสูงมากและอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก ทำให้ซิลิกาฟุ้งมีคุณสมบัติเป็นสารที่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก

วัสดุปอซโซลานหมายถึงวัสดุที่มีซิลิกาหรืออลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ว วัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน โดยเมื่อปูนซีเมนต์เจอกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) และเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญคือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาปอซโซลาน (pozzolanic reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดขึ้นเป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานคือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ดังสมการ



ซึ่ง C-S-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดการซึมผ่านของอิออน โดยปฏิกิริยาปอซโซลานนี้จะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม ดังนั้นวัสดุประเภทปอซโซลาน เช่น ไมโครซิลิกาจึงถูกใส่ลงในปูนซีเมนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของปูน(55)

จากการศึกษาของ Akbari และคณะ ในปี 2013 พบว่าการเติม nano-SiO₂ 8-10% ลงในเอมทีเอ ช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ลดเวลาแข็งตัว และไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง (compressive and flexural strength) ของเอมทีเอ(63) ขณะเดียวกันในปี 2018 Ashraf และคณะทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของเอมทีเอเปรียบเทียบกับเอมทีเอที่เติมซิลิกาฟุ่ม 10%, 15% และ 20% พบว่าการเติมซิลิกาฟุ่ม (condensed silica fume) ลงในเอมทีเอให้ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ไม่แตกต่างจากเอมทีเอปกติ(64)

บริษัทมารูชิ (Maruchi) ของประเทศเกาหลีใต้ได้มีการผลิตเอ็นโดเซมเอมทีเอ ซึ่งเป็นเอมทีเอซีเมนต์ที่มีส่วนประกอบของวัสดุปอซโซลานอนุภาคเล็กๆ โดยไม่ได้ใส่ตัวเร่งการแข็งตัวใดๆ พบว่าเอ็นโดเซมเอมทีเอ (Endocem MTA) มีเวลาแข็งตัวที่ 2 นาที 30 วินาทีถึง 4 นาที 30 วินาที ซึ่งเร็วกว่าโปรรูทเอมทีเอ (ProRoot MTA) ซึ่งมีเวลาแข็งตัวเริ่มต้นที่ 78.5 นาที และเวลาแข็งตัวสุดท้ายที่ 126.21 นาที โดยที่เอ็นโดเซมเอมทีเอยังคงคุณสมบัติด้านความเข้ากันได้ทางชีวภาพและกระตุ้นการเกิดเนื้อเยื่อแข็งได้เหมือนโปรรูทเอมทีเอ นอกจากนี้ทางบริษัทยังได้ผลิตเอ็นโดซิล

เอ็มทีเอ (Endoseal MTA) ซึ่งเป็นรูทคาแนลซีลเลอร์ที่มีส่วนผสมหลักเป็นปอซโซลานเบสซีเมนต์ (pozzolan-based cement) ออกจำหน่ายด้วย(65)

3.4 ผงพอลิเมอร์กระจายตัวคืนสภาพ (Re-dispersible polymer powder)

เป็นผงพอลิเมอร์ที่เมื่อสัมผัสกับน้ำจะกระจายตัวและคืนสภาพเป็นพอลิเมอร์อิมัลชัน ในทางอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ใช้เป็นสารเติมแต่งซึ่งใส่เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการยึดอยู่ (adhesion) เพิ่มความแข็งแรงต้านต่อการโค้งงอ (flexural strength) และเพิ่มความทนทานต่อการสึกกร่อน ในทางอุตสาหกรรมมักใส่เติมในปูนยาแนวกระเบื้อง ช่วยเพิ่มแรงยึดอยู่(66) จากการทดลองของ Zhao และคณะ ในปี 2018 พบว่าเมื่อใส่ผงพอลิเมอร์กระจายตัวคืนสภาพ (ไวนิลคลอไรด์-เอทิลีน-ไวนิลลอเรตพอลิเมอร์) ลงในไตรแคลเซียมซิลิเกต เกิดการสร้าง Hybrid intergrowth zone ระหว่างพอลิเมอร์กับผงไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งน่าจะมีส่วนช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติซีเมนต์(67) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาของ Zhang และคณะพบว่าการใส่พอลิเมอร์ของไวนิลคลอไรด์-เอทิลีน-ไวนิลลอเรตลงในพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ทำให้องค์กรเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน(68)

3.5 ซิลิโคนออยล์ (Silicone oil)

ซิลิโคนออยล์ หรือพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane) มีสูตรเคมีเป็น $(C_2H_5OSi)_n$ โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นของเหลวสีใสหนืด มีคุณสมบัติเฉื่อย ไม่เป็นพิษ ซิลิโคนออยล์ มีแรงตึงผิวต่ำ ทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารลดฟอง มักใช้ในของใช้อุปโภค เช่น ครีมนวดผม เป็นต้น (69)

4. มาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

วัสดุทางทันตกรรมแต่ละชนิดมีวัตถุประสงค์การใช้งานที่แตกต่างกัน วัสดุแต่ละชนิดจึงควรประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันไป การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุมีวัตถุประสงค์เพื่อคาดการณ์ถึงพฤติกรรมของวัสดุเมื่อใช้งานจริงในทางคลินิก การทดสอบทางชีวภาพและการทดลองทางคลินิกเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อประเมินคุณสมบัติทั้งหมดของวัสดุ การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุซึ่งกำหนดขึ้นโดยองค์กรสากลที่ได้รับการยอมรับจากนานาชาติ ได้แก่ ไอเอสโอ (ISO) หรือ International Organization for Standardization ซึ่งเป็นองค์การระหว่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับการออกมาตรฐานต่างๆ ทั้งด้านวัสดุ การบริการ และการจัดการสิ่งแวดล้อมของธุรกิจและอุตสาหกรรม สำหรับใช้เป็นมาตรฐานระหว่างประเทศ มีสมาชิกมากมายจากประเทศต่างๆ ทั่วโลก ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของ

วัสดุอุดคลองรากฟัน คือ ไอเอสโอ 6876/2012(70) ซึ่งกำหนดวิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ อันได้แก่ การไหลแผ่ เวลาแข็งตัว เวลาทำงาน ความหนาชั้นฟิล์ม การละลายตัว และความทึบรังสี โดยได้กำหนดมาตรฐานคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของวัสดุอุดคลองรากฟันดังแสดงไว้ตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 แสดงคุณสมบัติของรูทคาแนลซีลเลอร์ตามมาตรฐานไอเอสโอ 6876/2012

คุณสมบัติทางกายภาพ	ISO 6876/2012
การไหลแผ่	มากกว่าหรือเท่ากับ 17 มิลลิเมตร
เวลาแข็งตัว	อยู่ในช่วงเวลาที่บริษัทผู้ผลิตรายใด
เวลาทำงาน	เป็นเวลา 15 วินาทีก่อนหมดเวลาทำงานที่บริษัทผู้ผลิตรายใด วัสดุต้องยังสามารถไหลแผ่ได้มากกว่า 17 มิลลิเมตร
ความหนาชั้นฟิล์ม	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 50 ไมครอน
การละลายตัว	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3%
ความทึบรังสี	ทึบรังสีมากกว่าหรือเท่ากับอลูมิเนียมหนา 3 มิลลิเมตร

นอกจากนี้ยังมีมาตรฐานอื่นๆ เช่น ANSI/ADA ซึ่งเป็นมาตรฐานที่จัดทำร่วมกันของสถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (American National Standards Institute) ซึ่งมีหน้าที่กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ และสมาคมทันตกรรมอเมริกัน (American dental association) ซึ่งเป็นสมาคมวิชาชีพทันตกรรมของอเมริกา มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับวัสดุอุดคลองรากฟัน คือ ANSI/ADA standard No.57-Endodontic sealing material : 2000 (Reaffirmed 2012) ซึ่งดัดแปลงมาจากมาตรฐานไอเอสโอ 6876/2001 โดยได้กำหนดมาตรฐานคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุอุดคลองรากฟันดังแสดงไว้ตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงคุณสมบัติของรูทคาแนลซีลเลอร์ตามมาตรฐาน ANSI/ADA

คุณสมบัติทางกายภาพ	ANSI/ADA
การไหลแผ่	มากกว่าหรือเท่ากับ 20 มิลลิเมตร
เวลาแข็งตัว	อยู่ในช่วงเวลาที่บริษัทผู้ผลิตรายใด (แตกต่างกันไม่เกิน 10%)
การละลายตัว	น้อยกว่าหรือเท่ากับ 3% โดยมวล
ความทึบรังสี	ทึบรังสีมากกว่าหรือเท่ากับอลูมิเนียมหนา 3 มิลลิเมตร
ความเปลี่ยนแปลงทางมิติ	หดตัวน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1% (ใน 30 วัน) ขยายตัวน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.01% (ใน 30 วัน)

5. การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมี

5.1 การทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray powder diffraction หรือ XRD)

เทคนิคการวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆ กัน ซึ่งในปี 1912 W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบระนาบของอะตอมภายในผลึกที่มุมตกกระทบ รังสีเอกซ์บางส่วนจะเกิดการสะท้อนกลับ (เลี้ยวเบน) ที่มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ จากหลักการของ W.L. Bragg ทำให้มีการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึก จนมีการประดิษฐ์คิดค้นเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ขึ้นในปีค.ศ. 1948 และพัฒนาจนกระทั่งมีการนำเอาคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงาน และวิเคราะห์ประมวลผล เพื่อให้เกิดความรวดเร็วแม่นยำยิ่งขึ้น นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนักเคมีวิทยา วัสดุศาสตร์ธรณีวิทยา และโลหวิทยา เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystalline structure) ของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ทั้งในรูปแบบผง (powder) และแบบฟิล์มบาง (thin Film) ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึก และระนาบผลึกของสารตัวอย่าง โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานที่ทำการตรวจวัดโดยองค์กร ICSS (International center for diffraction data) เนื่องจากสารประกอบแต่ละชนิดมีรูปแบบโครงสร้างผลึกและระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอมสารประกอบแต่ละชนิดจะมีรูปแบบ (XRD pattern) เฉพาะตัวเปรียบเสมือนลายนิ้วมือของคนที่แตกต่างกัน(71)

5.2 ฟิวรีทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer หรือ FTIR)

เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบ โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงกลางอินฟราเรด (middle infrared region) ประมาณ $400-4000\text{ cm}^{-1}$ เมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่น (stretching) หรือการหมุน (bending) ของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุล จะทำให้โมเลกุลดังกล่าวเกิดการดูดกลืนแสงอินฟราเรด และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น (wave number) ได้

เป็น Interferogram ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปแบบของสเปกตรัมได้โดยสมการ Fourier transform ซึ่งในแต่ละพันธะของหมู่ฟังก์ชันจะแสดงค่าความยาวคลื่นเฉพาะต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงตัวอย่างความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

cm ⁻¹	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm ⁻¹ (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ
		3400-3200 cm ⁻¹ แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน
		3400-2400 cm ⁻¹ (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm ⁻¹ (m) 1° เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ
		3200-3400 cm ⁻¹ 2° เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 cm ⁻¹ อัลคีนที่มี =C-H ที่ปลายโซ่
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH ₃ , CH ₂ และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C≡N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลคีน โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ มี 2 แถบ
1800	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735	C=O stretching	เอสเทอร์
1725	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715	C=O stretching	คีโตน
1710	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1° เอมีน

1650-1550	N-H bending	2° เอมีน
1620-1590	N-H bending	1° เอมีน
1550-1510	N-H bending	2° เอมีน
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มไม่แน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 และ 1350	NO ₂ bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH ₂
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH ₃
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300-1150	CH ₂ -X	สารประกอบเฮโลเจน
1300-1000	C-O stretching	อีเทอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟินอล
1150	C-O stretching	3° แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2° แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1° แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH ₂)
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R ₂ C=CH ₂)
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, R ₂ C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบออกโท)

780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบเมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบพารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรมൈด์

คำย่อ: s = ความเข้มสูง, vs = ความเข้มสูงมาก, m = ความเข้มปานกลาง, w = ความเข้มต่ำ, vw = ความเข้มต่ำมาก, sh = แหยมคม, b = กว้าง, vb = กว้างมาก, OOP = out of plane (การสั่นนอกระนาบ)

จากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นได้ว่าไบโอเซรามิกรูทาคาแนลซีลเลอร์ เป็นซีลเลอร์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงรูทาคาแนลซีลเลอร์ในอุดมคติที่สุดในปัจจุบัน มีคุณสมบัติโดดเด่นในด้านชีวภาพ มีความเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ และสามารถกระตุ้นให้เกิดการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง ซึ่งอาจช่วยส่งเสริมการหายของรอยโรครอบปลายรากฟัน นอกจากนี้ไบโอเซรามิกรูทาคาแนลซีลเลอร์ยังมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี สามารถใช้ชุดด้วยซิงเกิลโคเนเทคนิค ช่วยเพิ่มความสะดวกสบายในการทำงานของทันตแพทย์ อย่างไรก็ตามไบโอเซรามิกซีลเลอร์ที่มีขายในท้องตลาดปัจจุบันมีราคาค่อนข้างสูง ทำให้การใช้งานในประเทศไทยปัจจุบันยังไม่แพร่หลายนัก

จากการศึกษาพบว่าส่วนประกอบหลักในไบโอเซรามิกรูทาคาแนลซีลเลอร์ซึ่งให้ผลทางด้านชีวภาพ คือไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้จากหลายวิธี หนึ่งในวิธีสังเคราะห์ได้แก่ไฮลิตสเตรทีแอกชัน มีสารตั้งต้นคือแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาทำปฏิกิริยากันภายใต้อุณหภูมิสูง ซึ่งสารตั้งต้นแคลเซียมคาร์บอเนตสามารถหาได้จากวัตถุดิบทางธรรมชาติ เช่น เปลือกหอยแครงอันมีโครงสร้างหลักมากกว่า 95% ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ในการศึกษาครั้งนี้จึงสนใจนำเปลือกหอยแครงซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภคมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นการรีไซเคิลวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ลดต้นทุนในการผลิตผงไตรแคลเซียมซิลิเกต สามารถนำมาผสมกับสารเติมแต่งเพิ่มเติม เพื่อพัฒนาเป็นไบโอเซรามิกรูทาคาแนลซีลเลอร์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพได้ตามมาตรฐานสากลต่อไป

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

ประชากร

ไอรูทเอสพี (iRoot SP) และไบโอซีลเลอร์ (Biosealer)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เปลือกหอยแครง
- 2) ผงเซอร์คอน (Minechem, Samut Sakhon, Thailand)
- 3) สารละลายอะซิติก (Acetic acid solution) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร
- 4) อะซิโตน (Acetone)
- 5) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (Inframat, CT, US)
- 6) ไวนิลคลอไรด์-เอทิลีน-ไวนิลลอร์เรทพอลิเมอร์ (Vinnapas® 8031 H, Wacker, Germany)
- 7) ไมโครซิลิกา (Labchem, Ajax Finechem, Australia)
- 8) โพรพีลีนไกลคอล (Labchem, Ajax Finechem, Australia)
- 9) ซิลิโคนออกไซด์ (Labchem, Ajax Finechem, Australia)
- 10) ผลิตภัณฑ์ไอรูทเอสพี (iRoot SP, Innovative Bioceramix, Vancouver, Canada)
- 11) น้ำกลั่น
- 12) น้ำปราศจากคลอรีน
- 13) เม็ดดูดความชื้น
- 14) กระดาษฟอยล์
- 15) พาราฟิล์ม
- 16) หลอดฉีดยาพลาสติก (Plastic syringe)

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องบดอัดแบบสั่นสะเทือน (Double disc vibratory mill)

2. เครื่องบดแบบลูกบอลเซอริโคเนีย (Zirconia planetary ball mill, Pulverisette 6, Fritsch, Germany)
3. เครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ (Rotary evaporator, Laborota 4000, Heidolph, Germany)
4. ตะแกรงร่อนความถี่ 30 ช่องต่อ 1 นิ้ว (30 mesh) หรือ 595 ไมครอน
5. เครื่องกดไฮดรอลิก (Hydraulic pressing machine, Desktop Newton Press NT-100H, Japan)
6. ภาชนะหลอมอะลูมินา (Alumina crucible)
7. เตาหลอมอุณหภูมิสูง (High temperature furnace, k1700, Heraeus, Germany)
8. พัดลม
9. โกร่งอะลูมินา (Alumina mortar)
10. โถแก้วดูดความชื้น
11. เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser particle size distribution analyzer, Malvern panalytical, Malvern, UK)
12. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, Bruker AXS Model D8 discover, Karlsruhe, Germany)
13. เครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, Nicolet iS50, Thermo Fisher, Madison, US)
14. เครื่องถ่ายภาพรังสีภายในช่องปาก (X-MIND DC, Satelec Acteon, UK)
15. แผ่นรับรังสีขนาดเบอร์ 4 (CS 7600 imaging plate No.4, Carestream, US)
16. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer, Mitutoyo, Japan)
17. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter, PH550, Clean Leau, Taiwan)
18. เครื่องวัดการแข็งตัว
19. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
20. เครื่องปั้นอะมัลกัม (Satelec Softly, Acteon, UK)
21. ตู้ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น
22. ตู้ดูดความชื้น

23. ตู้อบความร้อน
24. แม่พิมพ์บีบอัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร
25. แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 1.5 มิลลิเมตร
26. แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร
27. แผ่นแก้วผสมสาร ขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร น้ำหนักประมาณ 20 กรัม
28. แผ่นแก้วผสมสาร หนา 5 มิลลิเมตร พื้นที่หน้าตัดประมาณ 200.0 ± 25 ตาราง มิลลิเมตร
29. ตูมน้ำหนักมาตรฐาน 100 กรัม
30. ตูมน้ำหนักมาตรฐาน 150 ± 3 นิวตัน
31. เซ็ทกดชนิดกิลมอร์ (Gilmore-type metric indenter) ขนาดหน้าตัด 2.0 ± 0.1 มิลลิเมตร น้ำหนัก 100.0 ± 0.5 กรัม
32. ท่อพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร
33. อลูมิเนียมสเตปเวดจ์ (Aluminum stepwedge) ความหนาชั้นละ 0.5 มิลลิเมตร
34. เวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier caliper)
35. ปีกเกอร์แก้ว
36. ช้อนตวงสาร
37. นาฬิกาจับเวลา

การดำเนินการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง และทดสอบขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง

1.1 การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง

การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตจากสารตั้งต้นคือแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) จากเปลือกหอยแครง และเซอร์โคเนียมซิลิเกตหรือเซอร์คอน (ZrSiO_4) ด้วยวิธีไฮลิดสเตรท มีขั้นตอนดังนี้

1) นำเปลือกหอยแครงที่ขัดทำความสะอาดแล้วไปต้มในน้ำกลั่น 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปต้มต่อในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 5% โดยปริมาตร (V/V) อีก 1 ชั่วโมง แล้วนำเปลือกหอยแครงไปต้มด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ ทบเปลือกหอยให้มีขนาดเล็กลง ก่อนนำไปอบที่ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำมาบดด้วยเครื่องบดอัดแบบ สั่นสะเทือน (double disc vibrating mill)

2) นำผงจากเปลือกหอยแครงที่ได้จากข้อ 1 ผสมกับเซอร์คอน บดผสมด้วย เครื่องบด planetary ball mill (Pulverisette 6, Fritsch, Germany) ดังภาพที่ 3 โดยใช้บอลเซอร์ โคนีเยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร เป็นลูกบด บดด้วยอัตรา 400 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เอทานอลเป็นสารตัวกลาง



ภาพที่ 3 แสดงเครื่องบด planetary ball mill

3) ทำการระเหยน้ำออกจากสารผสมด้วยเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้ สูญญากาศ (rotary evaporator, Laborota 4000, Heidolph, Germany) ดังภาพที่ 4 ที่อุณหภูมิ การระเหย 90 องศาเซลเซียส กระทั่งสารแห้งสนิทโดยใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 4 แสดงเครื่องกลั่นระเหยแบบหมุนภายใต้สุญญากาศ (rotary evaporator)

4) กรองส่วนผสมผ่านตะแกรงความถี่ 30 mesh (30 ช่องต่อ 1 นิ้ว หรือ 595 ไมครอน)

5) อัดขึ้นรูปชิ้นงานโดยการอัดแบบแห้ง (dry pressing) ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic uniaxial pressing machine, Desktop Newton Press NT-100H, Japan) ดังภาพที่ 5 ด้วยแรงกด 10 เมกะปาสคาล ให้ชิ้นงานมีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร



ภาพที่ 5 แสดงเครื่องอัดไฮดรอลิก (hydraulic pressing machine)

6) วางชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วในเบ้าหลอมอะลูมินา (alumina crucible) โดยมีผงวัตถุบรอนที่กั้นเบ้าหลอมเพื่อไม่ให้ชิ้นงานสัมผัสกับเบ้าหลอมโดยตรง นำไปเผาในเตาหลอมอุณหภูมิสูง (high temperature furnace, k1700, Heraeus, Germany) ดังภาพที่ 6 ตั้งอุณหภูมิ

1450 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อให้ชิ้นงานที่เป็นส่วนผสมของสารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาเป็น ไตรแคลเซียมซิลิเกต



ภาพที่ 6 แสดงเตาหลอมอุณหภูมิสูง (high temperature furnace)

7) นำเบ้าหลอมอะลูมินาออกจากเตาแล้วทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว (air quenching) ด้วยพัคลม ดังภาพที่ 7



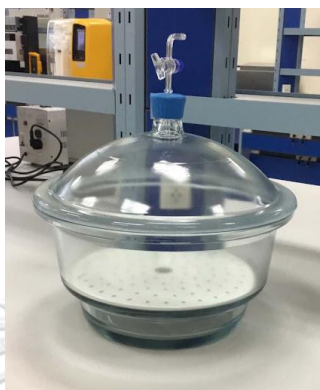
ภาพที่ 7 แสดงเบ้าหลอมอะลูมินาที่นำออกจากเตาเพื่อลดอุณหภูมิ

8) บดชิ้นสารตัวอย่างให้เป็นผงด้วยโกร่งอะลูมินา (alumina mortar) แล้วคัดขนาดด้วยตะแกรงความถี่ 30 mesh

9) บดสารให้ละเอียดมากขึ้นด้วยการบดลดขนาดด้วยเครื่องบด planetary ball mill โดยใช้บอลเซอริโคเนียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร เป็นลูกบด ที่อัตรา 500 รอบต่ออนาที เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้อะซิโตนเป็นตัวกลางในการบด

10) อบสารหลังการบดด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดอะซิโตนออก จากนั้นทำการบดสารที่แห้งสนิทแล้วด้วยโกร่งอะลูมินาอีกครั้งได้เป็นผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง

11) เก็บผงไตรแคลเซียมซิลิเกตซีเมนต์ในโถแก้วควบคุมความชื้น ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แสดงโถแก้วควบคุมความชื้น

1.2 การทดสอบขนาดอนุภาค

นำผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครงที่ผลิตได้มาแขวนลอยในสารละลายเอทานอล จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาคด้วยลำแสงเลเซอร์ (Laser particle size distribution analyzer, Malvern panalytical, Malvern, UK) โดยแสดงผลในรูปแบบการกระจายของขนาดอนุภาค D50 ซึ่งหมายถึงขนาดอนุภาคที่มีอนุภาคร้อยละ 50 มีขนาดใหญ่กว่าหรือเล็กกว่า

1.3 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมี

นำผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครงที่ผลิตได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, Bruker AXS Model D8 Discover, Karlsruhe, Germany)

ตอนที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของไฮรุธเอสพีและไบโอซีลเลอร์

การแบ่งกลุ่มการทดลอง แบ่งกลุ่มการทดลองเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ไฮรุธเอสพี (iRoot SP) เป็นกลุ่มควบคุม

กลุ่มที่ 2 ไบโอซีลเลอร์ (Biosealer)

การเตรียมตัวอย่างไบโอซีลเลอร์

การผสมไบโอซีลเลอร์ 1 แคปซูลมีสูตรดังต่อไปนี้ คือ ส่วนผงประกอบด้วยผงไตรแคลเซียม ซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง 0.71 กรัม เซอร์โคเนียมออกไซด์ 0.29 กรัม ไวนิลคลอไรด์-เอธิลีน-ไวนิลลอเรตพอลิเมอร์ 0.01 กรัม และไมโครซิลิกา 0.04 กรัม ส่วนน้ำประกอบด้วยโพรพิลีนไกลคอล 0.35 กรัม และซิลิโคนออยล์ 0.006 กรัม ทำการใส่ส่วนผงและส่วนน้ำลงในแคปซูลพลาสติกและปั่นด้วยเครื่องปั่นอะมัลกัมที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 วินาที จากนั้นนำซีลเลอร์ที่ผสมได้ใส่ลงในหลอดฉีดยาพลาสติก

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การไหลแผ่ เวลาแข็งตัว ความหนาชั้นฟิล์ม การละลายตัว และความทึบรังสี ทดสอบตามวิธีที่กำหนดโดยมาตรฐาน ISO 6876/2012 ดังนี้

2.1 การไหลแผ่

ฉีดซีลเลอร์ 0.05 ± 0.005 มิลลิลิตรลงกลางแผ่นแก้วสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 40 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร หนักประมาณ 20 กรัม จากนั้น 180 วินาที นำแผ่นแก้วที่สองซึ่งมีรูปร่างและน้ำหนักเหมือนแผ่นแก้วแผ่นแรกมาวางทับบนซีลเลอร์ พร้อมกับวางตุ้มน้ำหนัก 100 กรัมลงบนแผ่นแก้วที่สอง รวมน้ำหนักทั้งหมด 120 ± 2 กรัม จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีหลังจากฉีดซีลเลอร์ลงบนแผ่นแก้วแผ่นที่หนึ่ง นำตุ้มน้ำหนักออก และใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์วัดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่กว้างและแคบที่สุดของแผ่นวัสดุที่เกิดขึ้น หาค่าเฉลี่ยของบริเวณที่กว้างและแคบที่สุดบันทึกเป็นค่าการไหลแผ่ของวัสดุ ทำการทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง แต่หากบริเวณที่กว้างและแคบที่สุดมีความต่างกันมากกว่า 1 มิลลิเมตร จะต้องทำการทดสอบใหม่

2.2 เวลาแข็งตัว

สร้างแม่พิมพ์ที่ทำจากปูนยิปซัมรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน 10 มิลลิเมตร สูง 1 มิลลิเมตร นำไปแช่ในน้ำกลั่น เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดำเนินการทดสอบเวลาการแข็งตัวภายในตู้ใส่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้น โดยกำหนดอุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 95

ฉีดซีลเลอร์ลงในแม่พิมพ์ยิปซัมที่วางเตรียมไว้บนแผ่นแก้ว ทำการเคาะแผ่นแก้วเล็กน้อยเพื่อให้วัสดุมีหน้าตัดเรียบเสมอกัน เมื่อใกล้เวลาแข็งตัวโดยประมาณของวัสดุ ขยับเข็มกิโลมอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 ± 0.1 มิลลิเมตร น้ำหนัก 100 ± 0.5 กรัมซึ่งติดอยู่กับตัวเครื่อง

ตรวจการแข็งตัวในแนวตั้งให้หน้าตัดของเข็มสัมผัสกับพื้นผิววัสดุ บันทึกเวลาที่เข็มกลิ่มอร์ไม่ทำให้เกิดรอยใดๆ บนพื้นผิวของวัสดุเป็นเวลาแข็งตัวของวัสดุ ทำการทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง

2.3 ความหนาชั้นฟิล์ม

นำแผ่นแก้วสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดพื้นที่หน้าตัด 200 ± 25 ตารางมิลลิเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตรสองแผ่นมาประกบกันและวัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ บันทึกค่าความหนาไว้ ซีดซีลเลอร์ 0.05 ± 0.005 มิลลิตรลงกลางแผ่นแก้วแผ่นแรก และวางแผ่นแก้วแผ่นที่สองทับลงบนซีลเลอร์ จากนั้น 180 วินาที นำตุ้มน้ำหนัก 150 ± 3 นิวตันวางลงบนแผ่นแก้วที่สอง จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาทีหลังจากซีดซีลเลอร์ลงบนแผ่นแก้วแผ่นที่หนึ่ง นำตุ้มน้ำหนักออก และใช้ไมโครมิเตอร์วัดความหนาของแผ่นแก้วสองแผ่นซึ่งมีชั้นซีลเลอร์อยู่ระหว่างกลาง คำนวณความหนาชั้นฟิล์มของวัสดุโดยคิดจากความแตกต่างของความหนาแผ่นแก้วสองแผ่นซึ่งมีชั้นซีลเลอร์อยู่ระหว่างกลางลบกับความหนาแผ่นแก้วสองแผ่นซึ่งบันทึกไว้ก่อนหน้า ทำการทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง

2.4 การละลายตัว

เตรียมตัวอย่างโดยผสมน้ำ 0.02 มิลลิตรกับซีลเลอร์ 2 กรัมใส่ลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.0 ± 0.1 มิลลิเมตร สูง 1.5 ± 0.1 มิลลิเมตรซึ่งวางอยู่บนแผ่นแก้ว นำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่า 95% เมื่อครบเวลา 7 วัน นำตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์ และนำตัวอย่าง 2 ชิ้นไปชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่า

นำตัวอย่าง 2 ชิ้นใส่ลงในบีกเกอร์แก้วซึ่งใส่น้ำปราศจากอิออน 50.0 ± 1 มิลลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยแผ่นพลาสติกใส แล้วนำบีกเกอร์ไปใส่ไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำบีกเกอร์ทั้งสองมาชั่งน้ำหนักก่อนทำการทดลองพร้อมบันทึกค่า เทน้ำและตัวอย่างจากบีกเกอร์ที่หนึ่งลงในบีกเกอร์ที่สองโดยเทผ่านกระดาษกรอง จากนั้นใช้น้ำปราศจากอิออน 5 มิลลิตร ล้างบีกเกอร์แรก 3 ครั้ง และเทน้ำที่ล้างลงในบีกเกอร์ที่สองโดยเทผ่านกระดาษกรองเช่นกัน นำบีกเกอร์ที่สองไปทำการระเหยน้ำออกด้วยตู้อบความร้อน ซึ่งตั้งอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำระเหยจนหมด จากนั้นนำบีกเกอร์ใส่ในตู้ดูดความชื้นจนกระทั่งอุณหภูมิลดลงเท่าอุณหภูมิห้อง นำบีกเกอร์ที่สองไปชั่งน้ำหนัก คำนวณเปอร์เซ็นต์การละลายตัวของวัสดุโดยคำนวณจากความแตกต่างของน้ำหนักบีกเกอร์ที่สองก่อนและหลังทดลอง (คิดเป็น

ปริมาณวัสดุที่ละลายตัวออกมา) หาดด้วยน้ำหนักตัวอย่างก่อนเริ่มทดสอบและคูณด้วย 100 ทำการทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง

2.5 ความทึบรังสี

เตรียมตัวอย่างทดสอบโดยผสมน้ำ 0.01 มิลลิลิตรกับซีลเลอร์ 1 กรัม โหลดซีลเลอร์ลงในแม่พิมพ์ซิลิโคนรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.0 ± 0.1 มิลลิเมตร สูง 1.0 ± 0.1 มิลลิเมตรซึ่งวางอยู่บนแผ่นแก้ว ปิดส่วนบนของแม่พิมพ์ด้วยแผ่นแก้ว เก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 จนกระทั่งตัวอย่างแข็งตัว นำตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์

วางตัวอย่างและอลูมิเนียมสเต็ปเวดจ์ (aluminum stepwedge) บนแผ่นรับรังสีขนาดเบอร์ 4 (CS 7600 imaging plate No.2, Carestream, US) โดยอลูมิเนียมสเต็ปเวดจ์มีลักษณะเป็นขั้นบันได มีความหนาตั้งแต่ 1.5 ถึง 10 ± 0.01 มิลลิเมตร โดยแต่ละขั้นมีความหนาต่างกัน 0.5 ± 0.01 มิลลิเมตร ตั้งปลายกระบอกรังสีห่างจากฟิล์ม 300 มิลลิเมตร ทำการถ่ายภาพรังสีด้วยเครื่องถ่ายภาพรังสี (X-MIND DC, Seletec Acteon, UK) โดยตั้งค่าการถ่ายภาพรังสีที่ 65 กิโลโวลต์ (kV) กระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ (mA) ระยะเวลาสัมผัสรังสี (exposure time) 0.25 วินาที สแกนแผ่นรับรังสีด้วยเครื่องอ่านภาพรังสีดิจิทัล (CS 7600 Digital Imaging System, Carestream, US) และวัดความทึบรังสีเป็นค่าเกรย์สเกลเฉลี่ยในพื้นที่ที่เลือกด้วยโปรแกรม CS Imaging software คำนวณความทึบรังสีโดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเกรย์สเกลของตัวอย่างกับค่าเฉลี่ยเกรย์สเกลของอลูมิเนียมสเต็ปเวดจ์ระดับขั้นที่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด จากนั้นคำนวณเทียบบัญญัติไตรยางค์ว่าความทึบรังสีของตัวอย่างมีค่าเท่ากับความทึบรังสีของอลูมิเนียมที่มีความหนามีลิเมตร ทำการทดสอบทั้งหมด 6 ครั้ง

2.6 ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณแคลเซียมอิสระที่ถูกละลายออกมา

เตรียมตัวอย่างโดยการฉีดซีลเลอร์ลงในท่อพลาสติกใสเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร นำท่อดังกล่าวไปถ่ายภาพรังสี เพื่อดูความแน่นเต็มของซีลเลอร์ในท่อ จากนั้นนำตัวอย่างใส่ในหลอดทดลองพลาสติกที่มีน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร จำนวน 1 ตัวอย่างต่อ 1 หลอด ปิดฝาหลอดทดลองพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมงหลังจากแช่ตัวอย่างลงในหลอดทดลองพลาสติก ทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่แช่ตัวอย่างไว้ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง โดยทำการ

เปรียบเทียบเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่างด้วยสารมาตรฐานตามคำแนะนำของบริษัทก่อนการวัด จากนั้นทำการย้ายตัวอย่างลงในหลอดทดลองพลาสติกอันใหม่ที่มีน้ำปราศจากไอออน 10 มิลลิลิตร แล้วนำไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ส่วนสารละลายเดิมที่เคยแช่ตัวอย่าง ให้นำไปตรวจวัดปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (atomic absorption spectrophotometer, AAS) ทำเช่นเดียวกันนี้ซ้ำอีกที่ระยะเวลา 1 วัน 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน โดยทำการทดลองกลุ่มละ 6 ตัวอย่าง

ตอนที่ 3 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไฮดรอกซีอะลิวมิโนซิลิเกตและไบโอซิลิเกต หลังจากแข็งตัว

ทำการเตรียมตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์เช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบการละลายตัว นำตัวอย่างไปเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 37 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 จนกระทั่งตัวอย่างแข็งตัว นำตัวอย่างไปตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer, Bruker AXS Model D8 Discover, Karlsruhe, Germany) และเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer, Nicolet iS50, Thermo Fisher, Madison, US)

การคำนวณทางสถิติ

ทำการทดสอบทางสถิติโดยใช้โปรแกรม IBM SPSS Statistics version 22 (IBM Corporation, Armonk, NY, US) วิเคราะห์ข้อมูล โดยแสดงค่าเฉลี่ยของการไหลผ่าน เวลาแข็งตัว ความหนาชั้นฟิล์ม การละลายตัว ความที่บรังสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลาต่างๆ ของวัสดุทั้ง 2 กลุ่ม ด้วยสถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics)

ทำการทดสอบการกระจายของข้อมูลด้วยการทดสอบ Shapiro-Wilk และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าการไหลผ่าน เวลาแข็งตัว ความหนาชั้นฟิล์ม การละลายตัว ความที่บรังสี ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาของวัสดุ 2 กลุ่ม ด้วยการทดสอบ independent *t*-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

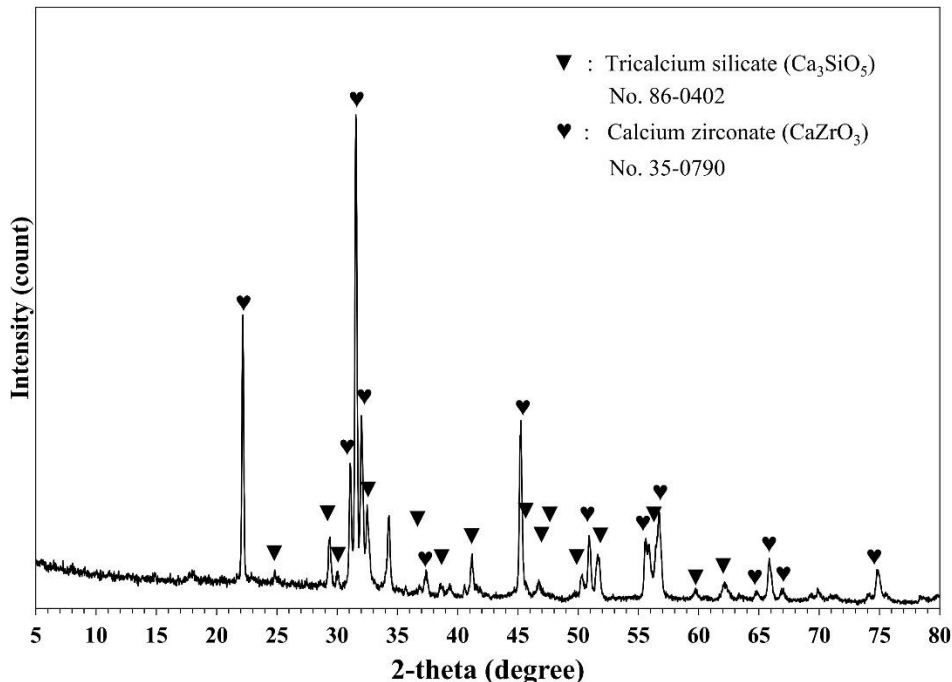
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิเคราะห์และผลการศึกษาเปรียบเทียบ

ตอนที่ 1 ผลการทดสอบขนาดอนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครง

การสังเคราะห์ไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครงด้วยวิธีโซลิดสเตทได้ผงไตรแคลเซียมซิลิเกตที่มีสีขาว เมื่อนำผงดังกล่าวไปทดสอบองค์ประกอบทางเคมี และวัดขนาดอนุภาคได้ผลดังต่อไปนี้

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพจากเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครงที่ผลิตขึ้นมีส่วนประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (Ca_3SiO_5) และแคลเซียมเซอร์โคเรเนต (CaZrO_3) โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงองค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพของผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครงจากการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของผงไตรแคลเซียมซิลิเกตจากเปลือกหอยแครงพบว่าการกระจายของอนุภาค D50 มีค่าเท่ากับ 5.32 ไมโครเมตร

ตอนที่ 2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพีและไบโอซิลเลอร์

คุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพี และไบโอซิลเลอร์ ได้แก่ การไหลแผ่ เวลาแข็งตัว ความหนาชั้นฟิล์ม การละลายตัว ความที่บร้งสี แสดงดังตารางที่ 12 โดยพบว่าเวลาแข็งตัวของไบโอซิลเลอร์ยาวนานกว่าไอรูทเอสพีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของซิลเลอร์ทั้งสองมีค่าผ่านตามาตรฐานไอเอสโอ 6876/2012 ยกเว้นคุณสมบัติด้านการละลายตัวซึ่งซิลเลอร์ทั้งสองมีค่าการละลายตัวมากกว่า 3%

ตารางที่ 12 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพี และไบโอซิลเลอร์

คุณสมบัติทางกายภาพ	ไอรูทเอสพี	ไบโอซิลเลอร์
การไหลแผ่ (มิลลิเมตร)	24.58 ± 0.92 ^a	24.83 ± 1.17 ^a
เวลาแข็งตัว (ชั่วโมง)	7 ± 0.15 ^a	29 ± 0.083 ^b
ความหนาชั้นฟิล์ม (ไมครอน)	23.33 ± 3.33 ^a	25.67 ± 4.08 ^a
การละลายตัว (%)	5.85 ± 0.75 ^a	4.68 ± 1.06 ^a
ความที่บร้งสี (มิลลิเมตรอลูมิเนียม)	7.61 ± 0.26 ^a	7.25 ± 0.34 ^a

ตัวอักษรยกที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ค่าความเป็นกรด-ด่างของไอรูทเอสพี และไบโอซิลเลอร์ ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่างของไอรูทเอสพี และไบโอซิลเลอร์ ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน

วัสดุ	3 ชั่วโมง	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
ไอรูทเอสพี	10.39 ± 0.19 ^a	10.15 ± 0.26 ^a	10.12 ± 0.31 ^a	9.97 ± 0.18 ^a	8.83 ± 0.73 ^a	9.06 ± 0.23 ^a
ไบโอซิลเลอร์	10.07 ± 0.43 ^a	10.13 ± 0.37 ^a	10.35 ± 0.09 ^a	9.6 ± 0.33 ^b	9.88 ± 0.40 ^b	9.23 ± 0.45 ^a

ตัวอักษรยกที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยพบว่าไบโอซีลเลอร์และไอรูทเอสพี มีความเป็นต่างตลอดระยะเวลาที่ทำการทดสอบ โดยไบโอซีลเลอร์และไอรูทเอสพี มีค่าความเป็นกรด-ต่างตลอดช่วงเวลาที่ทดสอบ 9.23-10.35 และ 8.83-10.39 ตามลำดับ และซีลเลอร์ทั้งสองมีค่าความเป็นกรด-ต่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะเวลา 7 วัน และ 14 วัน ($p < 0.05$)

ปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากไอรูทเอสพี และไบโอซีลเลอร์ ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน 14 วันและ 28 วัน แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 แสดงปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจากไอรูทเอสพี และไบโอซีลเลอร์ ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน 14 วันและ 28 วัน

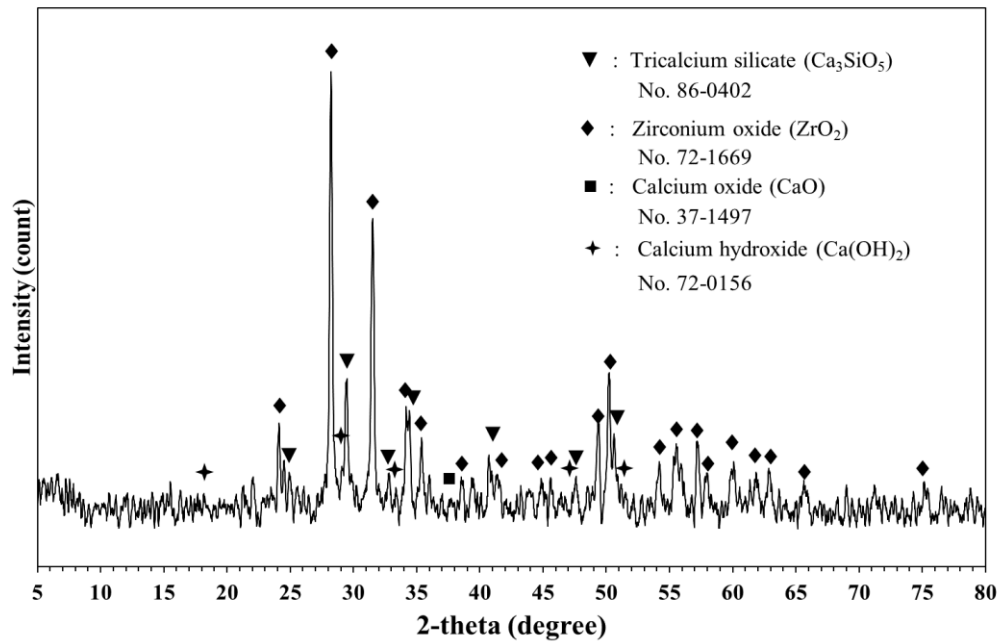
วัสดุ	3 ชั่วโมง	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
ไอรูทเอสพี	16.43 ± 4.79 ^a	11.05 ± 2.94 ^a	10.12 ± 1.08 ^a	8.73 ± 1.46 ^a	9.25 ± 1.00 ^a	13.96 ± 3.34 ^a
ไบโอซีลเลอร์	8.27 ± 3.26 ^b	7.47 ± 1.91 ^b	9.38 ± 0.83 ^a	5.47 ± 0.64 ^b	8.26 ± 0.59 ^a	13.70 ± 1.75 ^a

ตัวอักษรยกที่ต่างกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

โดยพบว่าไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครงและไอรูทเอสพี มีปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน และ 7 วัน ($p < 0.05$)

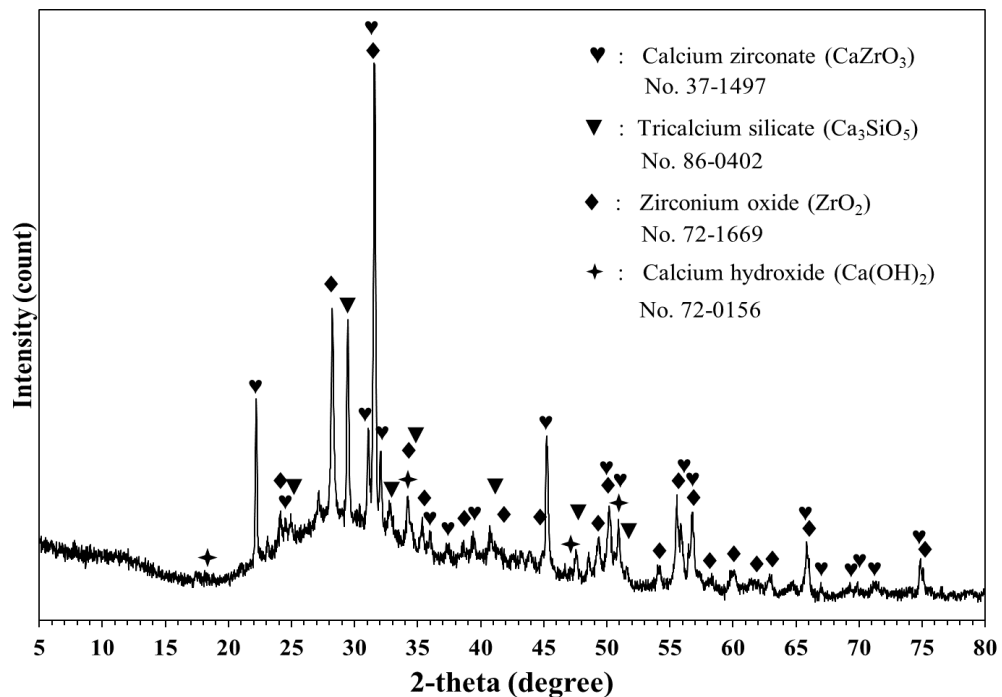
ตอนที่ 3 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไอรูทเอสพีและไบโอซีลเลอร์ หลังจากแข็งตัว

ผลการทดสอบขององค์ประกอบทางเคมีเชิงคุณภาพจากเครื่องทดสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าไอรูทเอสพีประกอบด้วยผลึกของไตรแคลเซียมซิลิเกต (Ca_3SiO_5) เซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังภาพที่ 10



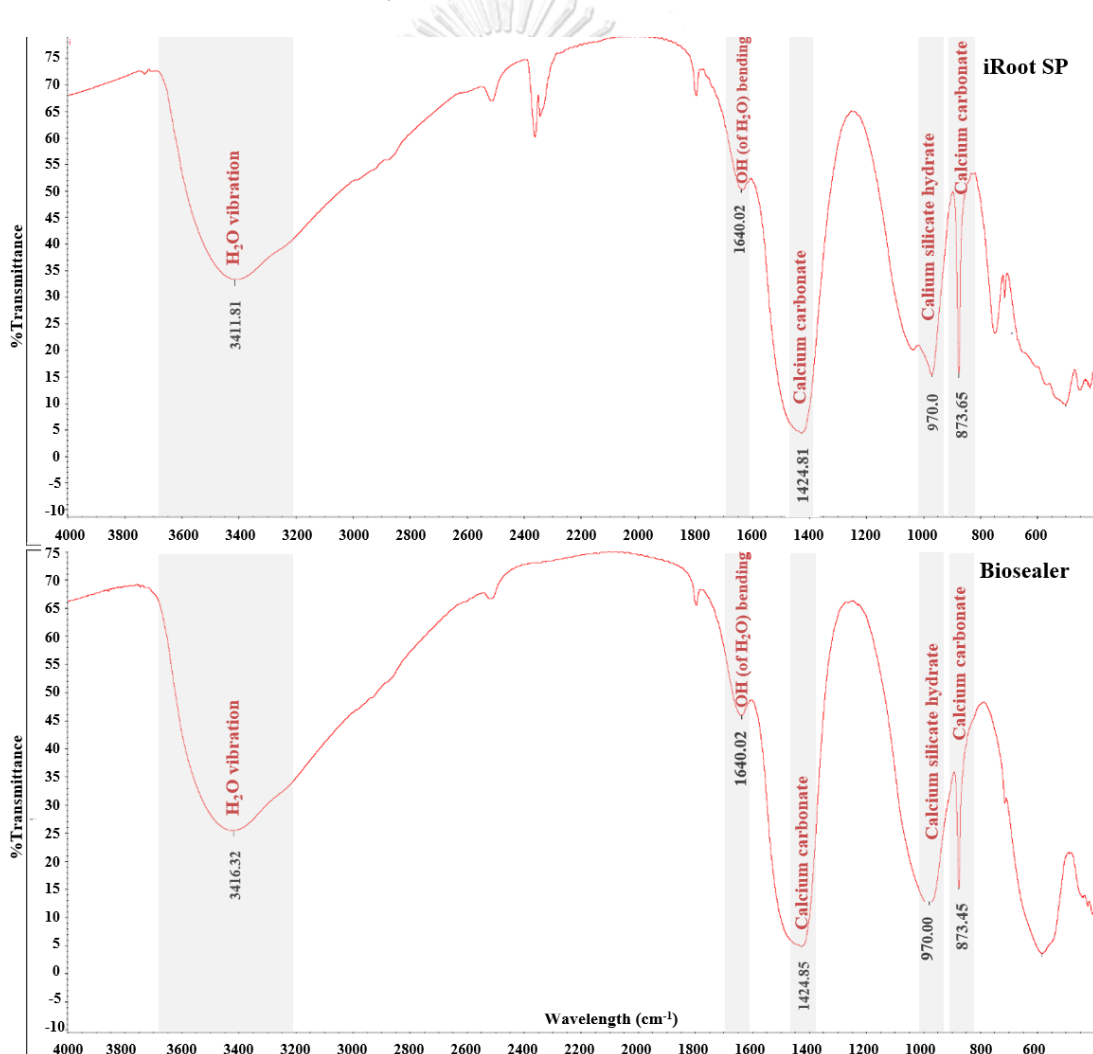
ภาพที่ 10 แสดงดิฟแฟรคโทแกรมของไอรูทเอสพี

ส่วนไบโอซิลเลออร์ ประกอบด้วยผลึกของแคลเซียมเซอร์โคเนต (CaZrO_3) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Ca_3SiO_5) เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงดิฟแฟรคโทแกรมของไบโอซิลเลออร์

ผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลสารด้วยเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR) พบว่าไอรูทเอสพี และไบโอซิลเลอร์มี FTIR pattern รูปแบบใกล้เคียงกัน โดยพบแถบกว้างในช่วงความถี่ $3,200-3,600\text{ cm}^{-1}$ และพีคในช่วงความถี่ 1640 cm^{-1} แสดงถึงการมีน้ำในตัวอย่างทดสอบ พบพีคในช่วงความถี่ 970 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงโครงสร้าง Si-O ที่พบได้ในสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) อันเป็นผลที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต นอกจากนี้ยังพบพีคในช่วงความถี่ 875 และ 1425 cm^{-1} ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้าง CO_3^{2-} แสดงถึงสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) โดย FTIR pattern ของทั้งสองวัสดุ แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แสดง FTIR pattern ของไอรูทเอสพี และไบโอซิลเลอร์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

อภิปรายผลการวิจัย

ไตรแคลเซียมซิลิเกตสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีไฮลิดสเตทรีแอคชัน โดยการเผาสารตั้งต้นแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส(9, 72) ซึ่งปฏิกิริยาการเกิดไตรแคลเซียมซิลิเกตจากสารตั้งต้นดังกล่าวเป็นดังสมการ $3\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 3\text{CO}_2$

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครง ส่วนซิลิกาได้จากเซอร์คอน ดังสมการ $4\text{CaCO}_3 + \text{ZrSiO}_4 \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{CaZrO}_3 + 4\text{CO}_2$ เนื่องจากมีรายงานพบว่าขยะเหลือทิ้งจากการบริโภค เช่น เปลือกหอย สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งของแคลเซียมสำหรับการผลิตสารชีววัสดุเพื่อใช้ในการแพทย์ โดยมีรายงานพบว่าเปลือกของสัตว์ในไฟลัมมอลลัสกา เช่น หอยฝาเดียว (gastropod) และหอยสองฝา (bivalvia) ประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต 95-99%(10) ซึ่งจากการศึกษาของ Bharatham และคณะ ในปี 2014 ที่ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหอยชนิดต่างๆ ได้แก่ หอยชักตีน หอยทากทะเล และหอยแครง พบว่าหอยแครงประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมมากที่สุด (95.7%) ขณะเดียวกันตรวจพบโลหะหนัก ได้แก่ อาร์เซนิก แคดเมียม ปรอท และตะกั่ว ต่ำกว่าขีดจำกัดการตรวจจับ (ตรวจพบได้น้อยกว่าหนึ่งในร้อยล้านส่วน)(73) ซึ่งได้ตามมาตรฐานที่ American society for testing and materials กำหนดไว้สำหรับวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของไฮดรอกซีอะพาไทต์สังเคราะห์ที่จะใช้ในร่างกายมนุษย์(74) ขณะเดียวกันมีรายงานองค์ประกอบทางเคมีของเปลือกหอยแครงในประเทศมาเลเซียพบว่าประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมคาร์บอน 98.7% แมกนีเซียม 0.05% โซเดียม 0.9% ฟอสฟอรัส 0.02% และอื่นๆ (เหล็ก ทองแดง นิกเกิล โบรอน สังกะสี และซิลิกอน) 0.2%(75) ในทางการแพทย์มีความพยายามผลิตสารชีววัสดุจากเปลือกหอยแครง เช่น Kamba และคณะสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครง และนำไปทดสอบคุณสมบัติทางชีวภาพกับเซลล์สร้างกระดูก พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยช่วยกระตุ้นการทำงานของเซลล์สร้างกระดูก (76) ส่วนในทางทันตกรรมมีการนำเปลือกหอยแครงมาแปรรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์ โดยมี

วัตถุดิบประสงคืใช้เป็นสารบรรเทาอาการเสียวฟัน(77) นอกจากนี้ยังมีความพยายามผลิตเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ เพื่อใช้เป็น remineralizing agent อีกด้วย(78)

นอกจากวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภคแล้ว ยังพบความพยายามที่จะผลิตแคลเซียมซิลิเกตจากวัสดุเหลือใช้อื่น ดังเช่นรายงานของ Yamaguchi และคณะ ในปี 2015 ซึ่งได้ทำการทดลองผลิตไดแคลเซียมซิลิเกตจากวัสดุเหลือทิ้งดังสมการ $2\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CO}_2$ โดยใช้ซอล์กเขียนกระดาษเป็นแหล่งของแคลเซียมคาร์บอเนต และอัลจิเนตซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกอนไดออกไซด์ 70% เป็นแหล่งของซิลิกา มีขั้นตอนคือสกัดเอาซิลิกอนไดออกไซด์จากผงอัลจิเนตด้วยการนำผงอัลจิเนตไปผสมน้ำและนำไปเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปบดและนำมาผสมกับผงซอล์ก นำสารผสมทั้งสองมาเผาต่อที่อุณหภูมิสูงสุด 800 หรือ 1,000 องศาเซลเซียส โดยพบว่าเมื่อนำผงที่ผลิตได้จากการเผาที่อุณหภูมิสูงสุด 1,000 องศาเซลเซียสมาทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบไดแคลเซียมซิลิเกตเช่นเดียวกับการเผาผงแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาสำเร็จรูป(79)

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้แหล่งของซิลิกาจากผงเซอร์คอน (ZrSiO_4) สาเหตุที่เลือกใช้ผงเซอร์คอนเป็นแหล่งของซิลิกาในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเซอร์คอนเป็นแร่ที่พบได้มากในธรรมชาติ มีสีขาว มีราคาไม่สูง มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และมีคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ที่เหมาะสม(80) ซึ่งเมื่อผ่านการเผาพร้อมกับแคลเซียมคาร์บอเนตจะได้สารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมเซอร์โคเนตดังสมการ $4\text{CaCO}_3 + \text{ZrSiO}_4 \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_5 + \text{CaZrO}_3 + 4\text{CO}_2$ ซึ่งในช่วงแรกของการวิจัยนำร่องมีความตั้งใจให้แคลเซียมเซอร์โคเนตเป็นสารให้ความที่บร้งสี โดยแคลเซียมเซอร์โคเนตมีความคงตัวทางเคมีสูง และต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะต่าง ในปี 2019 Vassal และคณะรายงานว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่เจือปนด้วยแคลเซียมเซอร์โคเนตมีคุณสมบัติไม่เป็นพิษต่อเซลล์ สามารถพัฒนาเป็นวัสดุชีวภาพสำหรับใช้ทางการแพทย์ได้(81)

ในปี 2018 ได้มีรายงานถึงการสังเคราะห์สารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต ผสมกับแคลเซียมเซอร์โคเนต (CaZrO_5) ด้วยวิธีโซลิดสเตทรีแอคชัน เพื่อจุดประสงค์ทางการใช้งานเป็นซีเมนต์อุดคลองรากฟันทดแทนวัสดุประเภทเอ็มทีเอ โดยคณะผู้วิจัยใช้แคลเซียมเซอร์โคเนตเป็นสารให้ความที่บร้งสีทดแทนการใส่เซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2)(82)

อย่างไรก็ตามจากการศึกษานำร่องพบว่าแคลเซียมเซอริโคเนตแม้จะให้ความที่บร้งสีมากกว่าลูมิเนียมที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร แต่เมื่อเทียบกับความที่บร้งสีของไอรูทเอสพีพบว่ายังมีความที่บร้งสีน้อยกว่า ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเติมสารเซอริโคเนียมออกไซด์ซึ่งมีฤทธิ์เฉื่อย มีรายงานว่าจะไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางชีวภาพของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์(83) และไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของเนื้อฟัน(84) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติความที่บร้งสีของไบโอซิลเลอร์

การพัฒนาสูตรของไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครงหรือไบโอซิลเลอร์ประกอบด้วยสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ โพรพิลีนไกลคอล ซึ่งช่วยเรื่องการไหลแผ่ เซอริโคเนียมออกไซด์ช่วยเพิ่มความที่บร้งสี ไวนิลคลอไรด์-เอธิลีน-ไวนิลลอเรตพอลิเมอร์ ช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของวัสดุ รวมถึงช่วยส่งเสริมการยึดติด ไมโครซิลิกาช่วยส่งเสริมการกระจายตัวของเนื้อปูนให้มีความสม่ำเสมอ และเติมเติมช่องว่าง ช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของวัสดุ ส่วนซิลิโคนออยล์ใส่เพื่อเป็นสารลดฟอง

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป็นขั้นตอนแรกในการพัฒนาวัสดุ โดยมีการกำหนดมาตรฐานการทดสอบและค่ามาตรฐานสำหรับวัสดุทางทันตกรรมจากองค์กรต่างๆ การวิจัยนี้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การไหลแผ่ ความหนาชั้นฟิล์ม เวลาแข็งตัว การละลายตัว และความที่บร้งสี โดยอ้างอิงจากมาตรฐานไอเอสโอ 6876/2012(70) ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่มีการศึกษาอ้างอิงมากมาย นอกจากนี้ยังมีการทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณแคลเซียมที่ถูกละลายออกมา เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านชีวภาพของวัสดุ

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกทำการทดลองเปรียบเทียบกับไอรูทเอสพีเนื่องจากเป็นไบโอเซรามิกรูทคานัลซีลเลอร์ชนิดพร้อมฉีดใช้งาน สามารถใช้งานได้สะดวก มีคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางชีวภาพที่ดี(74) มีการศึกษาทางคลินิกที่รายงานว่าการอุดคลองรากฟันด้วยเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ร่วมกับเทคนิคซิงเกิลโคนให้ผลสำเร็จทางคลินิกสูงถึง 90.0% ในรอยโรคที่มีขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร เมื่อติดตามผลที่ระยะเวลาเฉลี่ย 30 เดือน(7) อย่างไรก็ตามเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ ไม่มีการนำเข้าจำหน่ายในประเทศไทย มีเพียงไอรูทเอสพี ซึ่งมีส่วนประกอบเหมือนกับเอนโดซีควอนซ์บีซีซีลเลอร์ แต่ผลิตและนำเข้าโดยบริษัท FKG Dentaire

สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพี ในการศึกษาครั้งนี้ผลการทดสอบการไหลแผ่ของไอรูทเอสพี มีค่าประมาณ 24.58 มิลลิเมตร พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาอื่นๆ ก่อนหน้าซึ่งรายงานค่าการไหลแผ่ของไอรูทเอสพีประมาณ 23-26 มิลลิเมตร(25, 26, 85) เช่นเดียวกันกับความหนาชั้นฟิล์ม ซึ่งในการศึกษานี้วัดได้ 23.33 ไมครอน มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาก่อนหน้าซึ่งรายงานค่าความหนาชั้นฟิล์มของไอรูทเอสพีประมาณ 22 ไมครอน(26)

อย่างไรก็ตามสำหรับค่าเวลาแข็งตัว การละลายตัว และความที่บรังสีของไอรูทเอสพี จากการศึกษาอื่นๆ ก่อนข้างมีค่ารายงานหลากหลาย เช่น การศึกษาของ Zhou และคณะรายงานเวลาแข็งตัวที่ประมาณ 2.7 ชั่วโมง(26) ซึ่งเร็วกว่าการศึกษาของ Tanomaru-Filho และ Xuereb ซึ่งรายงานไว้ 9.69 และ 22.3 ชั่วโมงตามลำดับ(8, 85) เช่นเดียวกันกับการละลายตัวที่มีรายงานค่อนข้างแตกต่างหลากหลาย ตั้งแต่ 0.9-20%(86, 87) และความที่บรังสีซึ่งมีค่ารายงาน 3.8, 6.15, 10.8 มิลลิเมตรลูมิเนียม(8, 25, 85) ความแตกต่างของผลรายงานต่างๆ น่าจะเนื่องมาจากรายละเอียดที่แตกต่างกันในวิธีการทดสอบ กล่าวคือในการทดสอบการแข็งตัว มีความแตกต่างของการออกแบบการทดลอง เช่น ความแตกต่างของแม่พิมพ์ที่ใช้ใส่รูทคาแนลซิลเลอร์ ปริมาณน้ำสำหรับให้วัสดุเกิดการแข็งตัว หรือค่าจำกัดความของเวลาแข็งตัวที่แตกต่างกันซึ่งไม่ได้ระบุชัดเจนในมาตรฐานการทดสอบไอเอสไอ การทดสอบการละลายตัวซึ่งต้องมีการเตรียมวัสดุให้แข็งตัวก่อนนำมาทดสอบ ซึ่งแต่ละการศึกษากำหนดระยะเวลาในการรอให้วัสดุแข็งตัวนานแตกต่างกัน นอกจากนี้บางการศึกษามีวิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การละลายตัวที่แตกต่างจากการศึกษาอื่นๆ เช่นเดียวกับความที่บรังสีซึ่งในมาตรฐานไอเอสไอกำหนดวิธีการทดสอบให้วางตัวอย่างห่างจากปากกระบอกรังสีช่วงระหว่าง 300-400 มิลลิเมตร รวมถึงเครื่องถ่ายภาพรังสี และชนิดฟิล์มที่แตกต่างกัน ความแตกต่างในวิธีการทดสอบเหล่านี้ น่าจะมีผลต่อความผันผวนของผลการทดสอบซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละการศึกษา

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของไอรูทเอสพีในการศึกษาครั้งนี้ พบว่ามีค่าเป็นด่าง (8.83-10.39) ตลอดระยะเวลาทดสอบเหมือนกับการศึกษาอื่นๆ ก่อนหน้า แต่พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่างของไอรูทเอสพีในการศึกษาครั้งนี้มีค่าความเป็นด่างต่ำกว่าการศึกษาก่อนหน้า เช่น การศึกษาของ Candeiro และคณะ ในปี 2012 ซึ่งศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของวัสดุที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 7 วัน และ 10 วันพบว่าในช่วงเวลาดังกล่าวไอรูทเอสพีมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง

ระหว่าง 10.31-11.21(25) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Zhou และคณะ ในปี 2013 ซึ่งทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่างของเอนโดซีเคอนซิปซีซิลเลอร์ได้สูงถึง 12 เกือบตลอดระยะเวลา 5 สัปดาห์ โดย Zhou และคณะทำการเตรียมตัวอย่างโดยใช้ซิลเลอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร แช่ในน้ำปราศจากอ็อกซิเจน และไม่มีการเปลี่ยนน้ำปราศจากอ็อกซิเจนตลอดช่วงเวลาทดสอบ (26) ตัวอย่างทดสอบจึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมาก ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดได้มีค่าสูงกว่าในงานวิจัยนี้ ส่วนปริมาณแคลเซียมที่ถูกปลดปล่อยออกมา เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Candeiro และคณะ ในปี 2012 ปริมาณแคลเซียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาของไอรูทเอสพีในการศึกษานี้มีปริมาณมากกว่า ทั้งนี้น่าจะมาจากท่อพลาสติกที่ใช้ใส่วัสดุในการทดลองนี้มีปลายเปิดสองด้าน เทียบกับการทดลองก่อนหน้านี้ซึ่งมีปลายเปิดเพียงด้านเดียว(25) แต่ในขณะเดียวกันปริมาณแคลเซียมที่ถูกปลดปล่อยออกมาของไอรูทเอสพีในการศึกษานี้มีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการศึกษาของ Borges และคณะ ในปี 2012 ซึ่งการศึกษาดังกล่าวมีวิธีการทดสอบที่แตกต่างออกไป ทั้งขนาดของตัวอย่างที่ทำการแช่ในน้ำกลั่น ปริมาณน้ำกลั่นที่แช่ และระยะเวลาทดสอบ (30)

ความสามารถในการไหลแผ่ของรูทคาแนลซิลเลอร์เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่ช่วยส่งเสริมการอุดคลองรากฟันให้แน่นเต็มทั้งสามมิติ เนื่องจากคลองรากฟันมีลักษณะซับซ้อน มีชอกหลืบซึ่งอาจไม่ได้รับการขยายทำความสะอาด ต้องอาศัยการล้างด้วยน้ำยา และการไหลแผ่ของซิลเลอร์เข้าไปขณะอุด จึงจะเกิดการซีลที่ดี ส่งผลดีต่อผลการรักษาในระยะยาว ในการศึกษานี้ผลการทดสอบการไหลแผ่ของไบโอซิลเลอร์ พบว่ามีค่าการไหลแผ่ 24.83 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไอรูทเอสพี ซึ่งทดสอบได้ค่าการไหลแผ่ 24.58 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของไอเอสโอ 6876/2012 วิเคราะห์ทางสถิติแล้วพบว่ารูทคาแนลซิลเลอร์ทั้งสองมีค่าการไหลแผ่ไม่แตกต่างกัน ขณะเดียวกันค่าการไหลแผ่ดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับรูทคาแนลซิลเลอร์ที่เป็นที่นิยมใช้กัน เช่น เอเอสพลัส(25, 26, (27) พบว่าทั้งไอรูทเอสพี และไบโอซิลเลอร์มีคุณสมบัติการไหลแผ่ที่ดีกว่า

เช่นเดียวกับความหนาชั้นฟิล์ม ผลการทดสอบความหนาชั้นฟิล์มในการศึกษานี้พบว่าไอรูทเอสพี มีค่าความหนาชั้นฟิล์ม 23.33 ไมครอน ขณะที่ไบโอซิลเลอร์ทดสอบได้ค่าความหนาชั้นฟิล์ม 25.67 มิลลิเมตร ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของไอเอสโอ 6876/2012 และมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามค่าความหนาชั้นฟิล์มอาจไม่ใช่คุณสมบัติที่สำคัญสำหรับ

การทดสอบไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ซึ่งใช้ร่วมกับเทคนิคการอุดไฮดรอลิกคอนเดนเซชัน (hydraulic condensation) หรือซิงเกิลโคนเทคนิค (single cone technique) เนื่องจากเป็นเทคนิคการอุดที่ไม่ได้อาศัยหลักการทำให้ชั้นของซีลเลอร์บางที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ดังเช่นเทคนิคสมัยก่อน

เวลาแข็งตัวถือเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญในด้านการใช้งานทางคลินิกของวัสดุทางทันตกรรม เวลาแข็งตัวควรมีความเหมาะสมต่อลักษณะการใช้งาน หากวัสดุมีระยะเวลาแข็งตัวที่นาน วัสดุอาจไม่สามารถคงรูปหรือคงคุณสมบัติทางกายภาพไว้ได้ หากวัสดุที่แข็งตัวอยู่ในบริเวณที่มีความชื้นมักถูกละลายได้ง่าย ส่งผลเสียต่อความแนบสนิทของวัสดุได้ ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าเวลาแข็งตัวของไบโอซีลเลอร์มีค่า 29 ชั่วโมง ซึ่งค่อนข้างนานเมื่อเทียบกับไอรูทเอสพี โดยพบว่าเวลาแข็งตัวของรูทคาแนลซีลเลอร์ทั้งสองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งความแตกต่างของเวลาการแข็งตัวของไบโอซีลเลอร์และไอรูทเอสพี น่าจะมาจากขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยของไอรูทเอสพีซึ่งมีขนาดเล็กประมาณ 0.2 ไมครอน(88) จากรายงานของ William พบว่าขนาดอนุภาคของแคลเซียมซิลิเกตมีผลต่อความเร็วในการแข็งตัว เนื่องจากอนุภาคที่เล็กจะมีพื้นที่ผิวให้น้ำเข้าทำปฏิกิริยาได้มาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างรวดเร็ว(33, 89) อนุภาคของผงไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอซีลเลอร์วัดได้ประมาณ 5.32 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าอนุภาคโดยเฉลี่ยของไอรูทเอสพีประมาณ 25 เท่า ขณะเดียวกันสารเติมแต่งที่ใส่เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของไบโอซีลเลอร์ เช่น โพรพิลีนไกลคอล พอลิเมอร์ของไวนิลลอไรด์-เอทิลีน-ไวนิลลอเรต อาจจะมีผลหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน(25), (90) ทำให้การแข็งตัวของไบโอซีลเลอร์ช้ากว่าไอรูทเอสพีมาก

ขณะเดียวกันเวลาแข็งตัวที่นาน ขนาดอนุภาคที่เล็ก และคุณสมบัติของน้ำของไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ส่งผลให้ซีลเลอร์มีการละลายตัวที่สูง(30) ซึ่งส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปลดปล่อยออกมา มีการรายงานการละลายตัวของไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 0.9-20%(86, 87) ซึ่งส่วนใหญ่ผลการทดสอบจะได้ค่าเกินมาตรฐาน 3% ที่ไอเอสโอ 6876/2012 กำหนด เช่นเดียวกับในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งพบว่าค่าการละลายตัวของไอรูทเอสพี และไบโอซีลเลอร์เท่ากับ 5.85 และ 4.68 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามแม้ว่าโดยปกติแล้วการละลายตัวของรูทคาแนลซีลเลอร์ส่งผลต่อความแนบสนิทในระยะยาวของวัสดุอุดคลองรากฟัน แต่ในกรณีของไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ยังคงเป็น

ที่ถกเถียงกันเนื่องจากมีรายงานพบว่าเมื่อสารแคลเซียมซิติลเกิดสัมผัสกับสารน้ำในร่างกายจะเกิดปฏิกิริยา เกิดเป็นสารไฮดรอกซีอะพาไทต์(30, 91) ซึ่งส่งผลดีต่อความหนาแน่นของกระดูก ส่งเสริมความเข้ากันได้ทางชีวภาพกับเซลล์และเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ยังมีรายงานถึงการกระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง(92) ซึ่งอาจส่งผลดีในด้านการส่งเสริมการหายของรอยโรคปลายราก(93) กล่าวได้ว่าคุณสมบัติการละลายตัวนี้อาจเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านชีวภาพ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่โดดเด่นของไบโอเซรามิกซิลิเคตเมื่อเทียบกับซิลิเคตชนิดอื่น

ค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมา สามารถนำมาใช้พยากรณ์คุณสมบัติด้านชีวภาพของวัสดุ เนื่องจากเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเนื้อเยื่อแข็งจะทำงานได้ดีในสภาวะที่เป็นด่าง และค่าความเป็นด่างที่สูงของวัสดุจะช่วยส่งเสริมคุณสมบัติด้านแบคทีเรีย ส่วนแคลเซียมไอออนเป็นไอออนบวกที่มีส่วนในการควบคุมการทำงานของเซลล์สร้างกระดูกและเซลล์สลายกระดูก ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง เมื่อแคลเซียมไอออนสัมผัสกับน้ำในเนื้อเยื่อเกิดการสร้างไฮดรอกซีอะพาไทต์ ส่งเสริมความเข้ากันได้ทางชีวภาพของวัสดุ(94)

ในการศึกษานี้ค่าความเป็นกรด-ด่างของไฮดรอกซีอะพาไทต์และไบโอซิลิเคตอยู่ในช่วงระหว่าง 8.83-10.39 และ 9.23-10.35 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความเป็นด่างตลอดระยะเวลาการทดสอบ 28 วัน คุณสมบัติความเป็นด่างเป็นระยะเวลานานเป็นคุณสมบัติที่พบได้ในไบโอเซรามิกทาคาแนลซิลิเคต จากการศึกษาของ Zhang และคณะ ในปี 2009 พบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์มีค่าความเป็นด่างสูงถึง 10.8-12 และมีคุณสมบัติฆ่าเชื้อ E. faecalis ได้ดีกว่าซิลิเคตอื่นๆ ได้แก่ เอนโดเรซ (Endorez) ซิลิเคต (Sealapex) อีพิฟานีเอสอี (Epiphany SE) ทูบลิซีล (Tubli Seal) และเอเอชพลัส (AH Plus)(50)

ไฮดรอกซีอะพาไทต์ปลดปล่อยแคลเซียมไอออนออกมามากที่สุดในช่วงแรกคือที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นปริมาณแคลเซียมที่ถูกปล่อยออกมาค่อยๆ ลดลง ซึ่งน่าจะมาจากอนุภาคของไฮดรอกซีอะพาไทต์มีขนาดเล็กมาก ทำให้วัสดุเกิดการละลายตัวออกมาในช่วงแรกค่อนข้างมากกว่าจะค่อยๆ แข็งตัว ในการศึกษานี้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ปลดปล่อยแคลเซียมไอออนออกมามากกว่าไบโอซิลิเคตในช่วงแรก จนกระทั่งเมื่อที่ระยะเวลา 14 และ 28 วัน ปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาของทั้งสองวัสดุมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามแม้ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณ

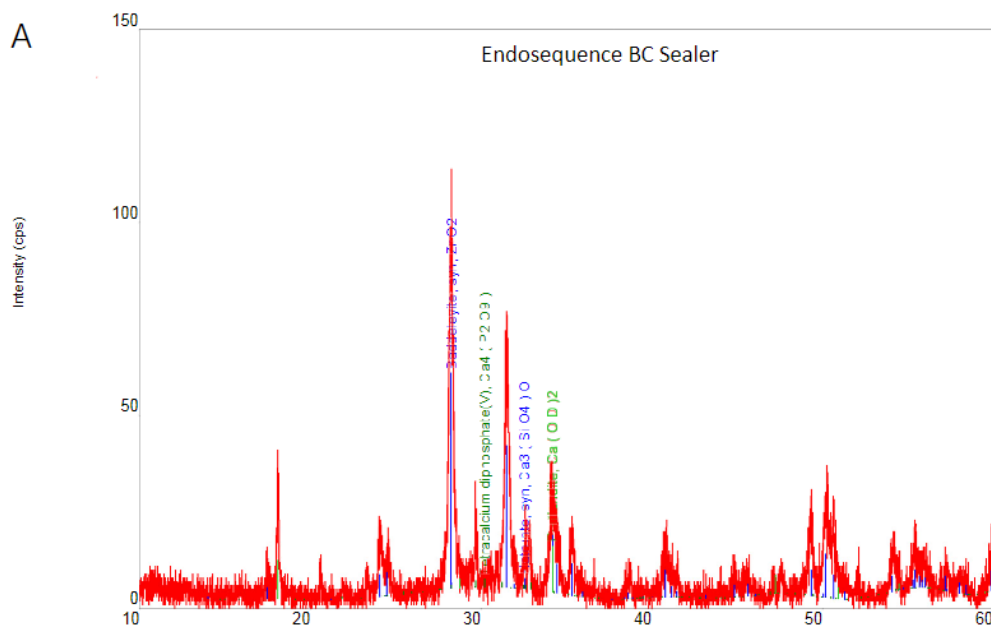
แคลเซียมออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมาดูมีแนวโน้มที่ดีต่อคุณสมบัติทางด้านชีวภาพของวัสดุ การทดสอบในเซลล์และในเนื้อเยื่อยังคงจำเป็นสำหรับการทดสอบเพื่อยืนยันคุณสมบัติทางด้านชีวภาพของวัสดุ

ความทึบรังสีเป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติสำคัญของรูทคาแนลซิลิเคต เนื่องจากการประเมินคุณภาพการดูดคลองรากฟันในทางคลินิกทำได้จากการประเมินภาพรังสี วัสดุดูดคลองรากฟันจึงมีความจำเป็นต้องทึบรังสีมากกว่าเนื้อฟัน เพื่อให้ทันตแพทย์จะสามารถแยกขอบเขตของคลองรากฟันและวัสดุอุดคลองรากฟันได้ ในการศึกษาครั้งนี้ค่าความทึบรังสีของไฮดรอกซีอะพาไทต์ และไบโอซิลิเคตมีค่าเทียบเท่าความทึบรังสีของอลูมิเนียมหนาประมาณ 7 มิลลิเมตร ซึ่งเพียงพอสำหรับการประเมินคุณภาพการดูดคลองรากฟัน และผ่านมาตรฐานไอเอสโอ 6876/2012 ซึ่งกำหนดให้ความทึบรังสีของซีเมนต์ทางทันตกรรมมีค่าเทียบเท่ากับ 3 มิลลิเมตรของอลูมิเนียมหรือมากกว่า

คุณสมบัติที่โดดเด่นของไบโอเซรามิกรูทคาแนลซิลิเคตเมื่อเทียบกับรูทคาแนลซิลิเคตประเภทอื่นก็คือ คุณสมบัติด้านชีวภาพ ไม่ว่าจะเป็นความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อปลายรากฟัน และความสามารถในการออกฤทธิ์ทางชีวภาพในการส่งเสริมการสร้างเนื้อเยื่อแข็ง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ส่งผลดีต่อการหายของเนื้อเยื่อรอบปลายรากฟัน โดยคุณสมบัติดังกล่าวมาจากการที่วัสดุประเภทแคลเซียมซิลิเกตเมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับน้ำจะเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เจล และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีการปลดปล่อยแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งเป็นไบโอแอคทีฟโมเลกุลกระตุ้นการทำงานของเซลล์สร้างเนื้อเยื่อแข็ง รวมถึงส่งเสริมสภาวะความเป็นด่าง ซึ่งเป็นปัจจัยส่งเสริมการสร้างเนื้อเยื่อแข็งด้วยเช่นกัน(93, 95) ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของรูทคาแนลซิลิเคตทั้งสองชนิดหลังแข็งตัวเต็มที่ ด้วยวิธีทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบและฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโมเลกุลของสาร ผลการทดสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (พอร์ตแลนด์ต์) เช่นเดียวกับผลการทดสอบเอพทีไออาร์ที่ตรวจพบหมู่ฟังก์ชันของน้ำ แคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งช่วยยืนยันการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในซิลิเคตทั้งสองชนิด

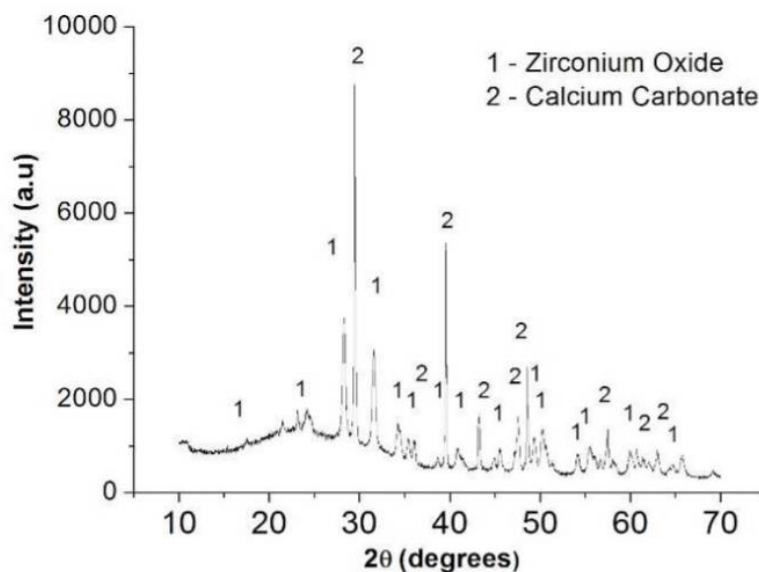
ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาก่อนหน้านี้ ได้แก่ การศึกษาของ Xuereb และคณะ ในปี 2015 พบว่าเอนโดซีควอนซ์บีซีซิลิเคตหลังแข็งตัวแล้วประกอบด้วยไตรแคลเซียมซิลิเกต

เซอริโคเนียมออกไซด์ เตตระแคลเซียมไดฟอสเฟต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์(8) ซึ่งเตตระแคลเซียมไดฟอสเฟตที่พบน่าจะมาจากการทำปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์กับฟอสเฟต เนื่องจาก Xuereb และคณะทำการแช่ซีลเลอร์ที่แข็งตัวแล้วในสารจำลองสารน้ำในร่างกายเป็นเวลา 2 สัปดาห์ก่อนนำมาทดสอบ FTIR แตกต่างจากในงานวิจัยนี้ที่ใช้เพียงน้ำกลั่นในการเตรียมตัวอย่าง



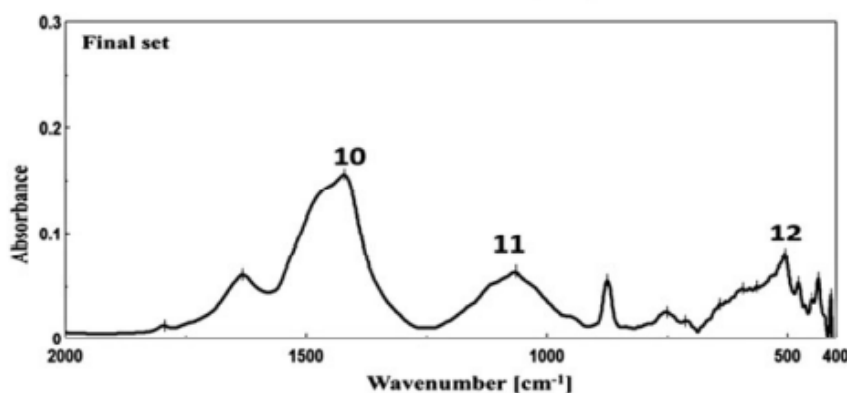
ภาพที่ 13 แสดงดิฟแฟรคโทแกรมของเอนโดซีควนซีซีซีลเลอร์จากการศึกษาของ Xuereb และคณะ

ส่วนการศึกษาของ Carvalho และคณะ ในปี 2017 รายงานว่าเอนโดซีควนซีซีซีลเลอร์ประกอบด้วยเซอริโคเนียมออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนต(96) โดยแคลเซียมคาร์บอเนตน่าจะเกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ



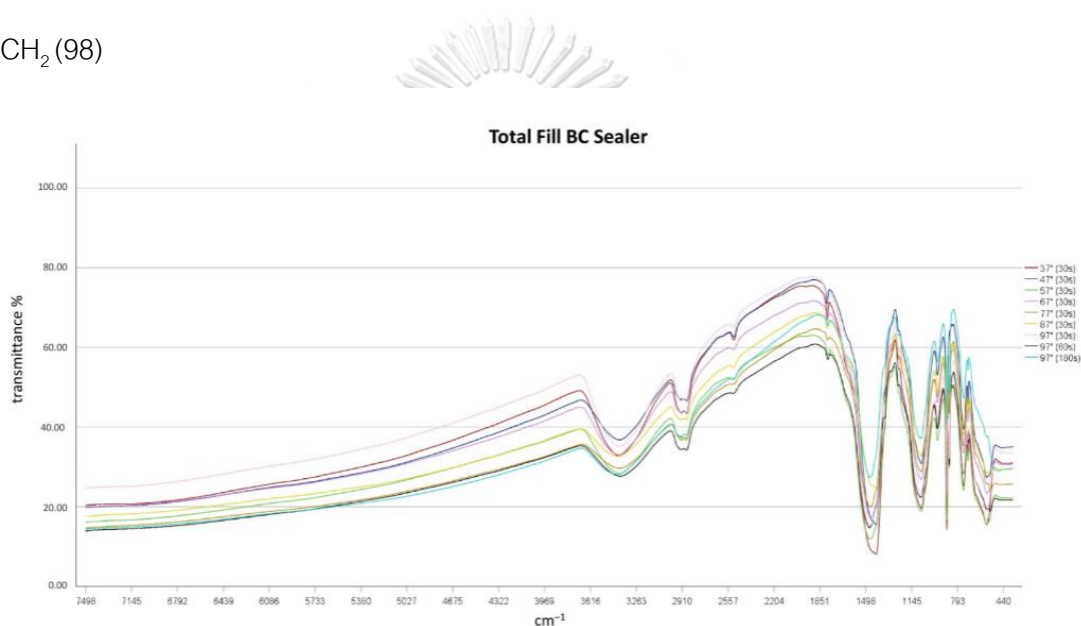
ภาพที่ 14 แสดงดิฟแฟรคโทแกรมของเอนโดซีควอนซ์บีซีซีแอลเลอร์จากการศึกษาของ Carvalho และคณะ

สำหรับการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วย FTIR นั้น จากรายงานของ Abu Zeid และคณะ ในปี 2018 พบว่าเมื่อตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของเอนโดซีควอนซ์บีซีซีแอลเลอร์เมื่อแข็งตัวเต็มที่ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโตรมิเตอร์ พบว่า FTIR spectrum แสดงพีคที่ 1420, 1064, 400-600 cm^{-1} (97) เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้ แต่มีความแตกต่างคือในงานวิจัยนี้พบพีคที่ 970 cm^{-1} ด้วย ซึ่งพีคที่ความถี่ดังกล่าวแสดงถึง Si-O stretching สัมพันธ์กับสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต



ภาพที่ 15 แสดง FTIR pattern ของเอนโดซีควอนซ์บีซีซีแอลเลอร์เมื่อแข็งตัวเต็มที่จากการศึกษาของ Abu Zeid และคณะ

จากการศึกษาของ Donnermeyer และคณะ ในปี 2021 ได้ทำการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโททอลฟิลบีซีซีลเลอร์หลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ และนำไปเก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 100% เป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่า FTIR spectrum แสดง broad band ที่ 3400 และพีคที่ 1650 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการมีน้ำอยู่ในตัวอย่างทดสอบ พบแถบที่แสดงถึงสารประกอบคาร์บอนที่ 878 และ 1400-1500 cm^{-1} และพบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ 970-1000 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการฟอร์มของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต นอกจากนี้ยังพบพีคที่ 2874 และ 2923 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการยืดแบบสมมาตรของ $-\text{CH}_3$ และการยืดของ C-H ใน CH_2 (98)



ภาพที่ 16 แสดง FTIR pattern ของโททอลฟิลบีซีซีลเลอร์หลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ จากการศึกษาคณะ Donnermeyer และคณะ

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับในงานวิจัยนี้ พบว่า FTIR spectrum ที่ตรวจสอบได้มีรูปแบบคล้ายกัน และพบพีคที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผงไตรแคลเซียมซิลิเกตที่ผลิตจากเปลือกหอยแครง เพื่อนำมาพัฒนาเป็นไบโอเซรามิกฐุทคาแนลซีลเลอร์ โดยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของไบโอเซรามิกฐุทคาแนลซีลเลอร์ที่ผลิตได้ เปรียบเทียบกับไบโอเซรามิกฐุทคาแนลซีลเลอร์ที่เป็นที่นิยมใช้ในวงการทันตแพทย์ เพื่อเป็นแนวทางในการ

พัฒนาไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ที่มีคุณสมบัติที่ดี อย่างไรก็ตามควรมีการทดสอบความเข้ากันได้ทางชีวภาพทั้งในเซลล์และสัตว์ทดลอง ก่อนจะทำการทดลองทางคลินิกต่อไป

สรุปผลการวิจัย

ไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครง (ไบโอซีลเลอร์) มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี และมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์ที่จำหน่ายในท้องตลาด (ไอรูทเอสพี) มีเพียงค่าเวลาแข็งตัวซึ่งไบโอซีลเลอร์มีค่าเวลาแข็งตัวยาวนานกว่า นอกจากนี้พบว่ารูทคาแนลซีลเลอร์ทั้งสองชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีหลังแข็งตัวใกล้เคียงกัน คุณสมบัติโดยรวมของไบโอเซรามิกรูทคาแนลซีลเลอร์จากเปลือกหอยแครงมีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้ที่จะศึกษาคุณสมบัติด้านชีวภาพ เพื่อพัฒนาเป็นรูทคาแนลซีลเลอร์สำหรับนำมาใช้ในการอุดคลองรากฟันต่อไป



บรรณานุกรม

1. Ng YL, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K. Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature -- Part 2. Influence of clinical factors. *Int Endod J.* 2008;41(1):6-31.
2. Ribeiro DM, Reus JC, Felipe WT, Pacheco-Pereira C, Dutra KL, Santos JN, et al. Technical quality of root canal treatment performed by undergraduate students using hand instrumentation: a meta-analysis. *Int Endod J.* 2018;51(3):269-83.
3. Al-Haddad A, Che Ab Aziz ZA. Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Review. *Int J Biomater.* 2016;2016:9753210.
4. Wang Z. Bioceramic materials in endodontics. *Endodontic Topics.* 2015;32(1):3-30.
5. Mailafiya MM, Abubakar K, Danmaigoro A, Chiroma SM, Rahim EB, Moklas MAM, et al. Cockle Shell-Derived Calcium Carbonate (Aragonite) Nanoparticles: A Dynamite to Nanomedicine. *Appl Sci-Basel.* 2019;9(14).
6. Zhejun W. Bioceramic materials in endodontics. *Endodontic Topics.* 2015;32(1):3-30.
7. Chybowski EA, Glickman GN, Patel Y, Fleury A, Solomon E, He J. Clinical Outcome of Non-Surgical Root Canal Treatment Using a Single-cone Technique with Endosequence Bioceramic Sealer: A Retrospective Analysis. *J Endod.* 2018;44(6):941-5.
8. Xuereb M, Vella P, Damidot D, Sammut CV, Camilleri J. In situ assessment of the setting of tricalcium silicate-based sealers using a dentin pressure model. *J Endod.* 2015;41(1):111-24.
9. Song J, Lee DW, Cho YH, Ok KM. Solid State Synthesis, Characterization, and Nonlinear Optical Properties of a Monoclinic Tricalcium Silicate, Ca_3SiO_5 . *B Korean Chem Soc.* 2012;33(7):2423-6.
10. Meredith White MC, Bernard Fried, Joseph Sherma. The concentration of calcium carbonate in shells of freshwater snails. *American Malacological Bulletin* 2007;22:139-42.

11. Komabayashi T, Colmenar D, Cvach N, Bhat A, Primus C, Imai Y. Comprehensive review of current endodontic sealers. *Dent Mater J.* 2020;39(5):703-20.
12. Rickert U. DC. The control of root surgery. *Congress Dentaire International* 1931:15-22.
13. Grossman LI. An improved root canal cement. *J Am Dent Assoc.* 1958;56(3):381-5.
14. Orstavik D. Materials used for root canal obturation: technical, biological and clinical testing. *Endodontic topics.* 2005;12(1):25-38.
15. Gunnar Bergenholtz PH-B, Claes Reit. *Textbook of Endodontology.* 2 ed: Wiley-Blackwell; 2010.
16. Mutal L, Gani O. Presence of pores and vacuoles in set endodontic sealers. *Int Endod J.* 2005;38(10):690-6.
17. Tronstad L, Barnett F, Flax M. Solubility and biocompatibility of calcium hydroxide-containing root canal sealers. *Endod Dent Traumatol.* 1988;4(4):152-9.
18. Horning TG, Kessler JR. A comparison of three different root canal sealers when used to obturate a moisture-contaminated root canal system. *J Endod.* 1995;21(7):354-7.
19. Heling I CN. The antimicrobial effect within dentinal tubules of four root canal sealers. *Journal of Endodontics.* 1996.
20. Orstavik D, Mjour I. Histopathology and x-ray microanalysis of the Subcutaneous tissue response to endodontic sealers. *Journal of Endodontics.* 1988;14(1):13-23.
21. Hong YC, Wang JT, Hong CY, Brown WE, Chow LC. The periapical tissue reactions to a calcium phosphate cement in the teeth of monkeys. *J Biomed Mater Res.* 1991;25(4):485-98.
22. Bratel J, Jontell M, Dahlgren U, Bergenholtz G. Effects of root canal sealers on immunocompetent cells in vitro and in vivo. *Int Endod J.* 1998;31(3):178-88.
23. Spangberg LS, Barbosa SV, Lavigne GD. AH 26 releases formaldehyde. *J Endod.* 1993;19(12):596-8.
24. Azar NG, Heidari M, Bahrami ZS, Shokri F. In vitro cytotoxicity of a new epoxy resin root canal sealer. *J Endod.* 2000;26(8):462-5.

25. Candeiro GT, Correia FC, Duarte MA, Ribeiro-Siqueira DC, Gavini G. Evaluation of radiopacity, pH, release of calcium ions, and flow of a bioceramic root canal sealer. *J Endod.* 2012;38(6):842-5.
26. Zhou HM, Shen Y, Zheng W, Li L, Zheng YF, Haapasalo M. Physical properties of 5 root canal sealers. *J Endod.* 2013;39(10):1281-6.
27. Tanomaru M, Torres FFE, Chavez-Andrade GM, de Almeida M, Navarro LG, Steier L, et al. Physicochemical Properties and Volumetric Change of Silicone/Bioactive Glass and Calcium Silicate-based Endodontic Sealers. *J Endodont.* 2017;43(12):2097-101.
28. Elyassi Y, Moinzadeh AT, Kleverlaan CJ. Characterization of Leachates from 6 Root Canal Sealers. *J Endod.* 2019;45(5):623-7.
29. Ersahan S, Aydin C. Solubility and apical sealing characteristics of a new calcium silicate-based root canal sealer in comparison to calcium hydroxide-, methacrylate resin- and epoxy resin-based sealers. *Acta Odontol Scand.* 2013;71(3-4):857-62.
30. Borges RP, Sousa-Neto MD, Versiani MA, Rached-Junior FA, De-Deus G, Miranda CE, et al. Changes in the surface of four calcium silicate-containing endodontic materials and an epoxy resin-based sealer after a solubility test. *Int Endod J.* 2012;45(5):419-28.
31. Schweikl H, Schmalz G, Federlin M. Mutagenicity of the root canal sealer AHPlus in the Ames test. *Clin Oral Investig.* 1998;2(3):125-9.
32. Miletic I, Jukic S, Anic I, Zeljezic D, Garaj-Vrhovac V, Osmak M. Examination of cytotoxicity and mutagenicity of AH26 and AH Plus sealers. *Int Endod J.* 2003;36(5):330-5.
33. Kaur A, Shah N, Logani A, Mishra N. Biototoxicity of commonly used root canal sealers: A meta-analysis *Journal of conservative dentistry.* 2015;18(2):483-8.
34. Kayaoglu G, Erten H, Alacam T, Orstavik D. Short-term antibacterial activity of root canal sealers towards *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J.* 2005;38(7):483-8.
35. Wennberg A, Orstavik D. Adhesion of root canal sealers to bovine dentine and gutta-percha. *Int Endod J.* 1990;23(1):13-9.
36. Limkangwalmongkol S, Abbott PV, Sandler AB. Apical dye penetration with four root canal sealers and gutta-percha using longitudinal sectioning. *J Endod.* 1992;18(11):535-9.

37. Lee KW, Williams MC, Camps JJ, Pashley DH. Adhesion of endodontic sealers to dentin and gutta-percha. *J Endod.* 2002;28(10):684-8.
38. Gilberto D, Martin T. The use of premixed bioceramic materials in endodontics. *Giornale Italiano di Endodonzia.* 2016;30(2).
39. Chandler N. *Harty's endodontics in clinical practice.* 6 ed: Elsevier; 2010.
40. Zhang W, Li Z, Peng B. Assessment of a new root canal sealer's apical sealing ability. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2009;107(6):79-82.
41. Han L, Okiji T. Uptake of calcium and silicon released from calcium silicate-based endodontic materials into root canal dentine. *Int Endod J.* 2011;44(12):1081-7.
42. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement interfacial interaction: calcium silicates and polyalkenoates. *J Dent Res.* 2012;91(5):454-9.
43. Grossman LI, Oliet S, Del Rio CE. *Endodontic practice.* 11th ed. Phila.,: Lea & Febiger; 1988. 371p., p.
44. Trope M, Bunes A, Debelian G. Root filling materials and techniques: bioceramics a new hope? *Endodontic Topics.* 2015;32:86-96.
45. Simon S. BioRoot™ RCS, a new biomaterial for root canal filling.
46. Prullage RK, Urban K, Schafer E, Dammaschke T. Material Properties of a Tricalcium Silicate-containing, a Mineral Trioxide Aggregate-containing, and an Epoxy Resin-based Root Canal Sealer. *J Endod.* 2016;42(12):1784-8.
47. Urban K, Neuhaus J, Donnermeyer D, Schafer E, Dammaschke T. Solubility and pH Value of 3 Different Root Canal Sealers: A Long-term Investigation. *J Endod.* 2018;44(11):1736-40.
48. Siboni F, Taddei P, Zamparini F, Prati C, Gandolfi MG. Properties of BioRoot RCS, a tricalcium silicate endodontic sealer modified with povidone and polycarboxylate. *Int Endod J.* 2017;50 Suppl 2:e120-e36.
49. Khalil I, Naaman A, Camilleri J. Properties of Tricalcium Silicate Sealers. *J Endod.* 2016;42(10):1529-35.

50. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M. Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis*. *J Endod*. 2009;35(7):1051-5.
51. Camilleri J, Cutajar A, Mallia B. Hydration characteristics of zirconium oxide replaced Portland cement for use as a root-end filling material. *Dent Mater*. 2011;27(8):845-54.
52. Malkondu O, Karapinar Kazandag M, Kazazoglu E. A review on biodentine, a contemporary dentine replacement and repair material. *Biomed Res Int*. 2014;2014:160951.
53. Camilleri J. Characterization and hydration kinetics of tricalcium silicate cement for use as a dental biomaterial. *Dent Mater*. 2011;27(8):836-44.
54. Camilleri J. Hydration mechanisms of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J*. 2007;40(6):462-70.
55. Newman J, Choo BS. *Advanced concrete technology* Elsevier; 2003.
56. Zhao WY, Chang J. Sol-gel synthesis and in vitro bioactivity of tricalcium silicate powders. *Mater Lett*. 2004;58(19):2350-3.
57. Coomaraswamy K, Lumley P, Shelton R, Hofmann M. Evaluation of Different Radiopacifiers for an MTA-Like Dental Cement. *Key Engineering Materials - KEY ENG MAT*. 2008.
58. Marciano MA, Costa RM, Camilleri J, Mondelli RF, Guimaraes BM, Duarte MA. Assessment of color stability of white mineral trioxide aggregate angelus and bismuth oxide in contact with tooth structure. *J Endod*. 2014;40(8):1235-40.
59. Cruz EV, Kota K, Huque J, Iwaku M, Hoshino E. Penetration of propylene glycol into dentine. *Int Endod J*. 2002;35(4):330-6.
60. Holland R, Mazuqueli L, de Souza V, Murata SS, Junior ED, Suzuki P. Influence of the type of vehicle and limit of obturation on apical and periapical tissue response in dogs' teeth after root canal filling with mineral trioxide aggregate. *J Endodont*. 2007;33(6):693-7.

61. Natu VP, Dubey N, Loke GCL, Tan TS, Ng WH, Yong CW, et al. Bioactivity, physical and chemical properties of MTA mixed with propylene glycol. *J Appl Oral Sci.* 2015;23(4):405-11.
62. Salem Milani A, Banifateme A, Reyhani M, Rahimi S, Zand V. The effect of using propylene glycol as a vehicle on the flexural strength of mineral trioxide aggregate. *International Journal of Clinical Dentistry.* 2017;10(4):307-14.
63. Akbari M, Zebarjad SM, Nategh B, Rouhani A. Effect of nano silica on setting time and physical properties of mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2013;39(11):1448-51.
64. Pirzadeh-Ashraf A, Lotfi M, Zarandi A, Yazdani E, Mozafari A, Pornasrollah A. Effect of containing silica fume on cytotoxicity of white mineral trioxide aggregate. *Dent Res J (Isfahan).* 2018;15(2):146-9.
65. Choi Y, Park SJ, Lee SH, Hwang YC, Yu MK, Min KS. Biological effects and washout resistance of a newly developed fast-setting pozzolan cement. *J Endod.* 2013;39(4):467-72.
66. Tarannum N, Pooja K, Khan R. Preparation and applications of hydrophobic multicomponent based redispersible polymer powder: A review. *Constr Build Mater.* 2020;247.
67. Zhao GR, Wang PM, Zhang GF. Principles of polymer film in tile adhesive mortars at early ages. *Mater Res Express.* 2019;6(2).
68. Zhang GF, Wang YW, Wang PM, Xu LL. Calorimetric study on the influence of redispersible E/V/C/VL terpolymer on the early hydration of Portland cement. *J Therm Anal Calorim.* 2016;124(3):1229-41.
69. Zaman Q, Zia KM, Zuber M, Mabkhot YN, Almalki F, Hadda TB. A comprehensive review on synthesis, characterization, and applications of polydimethylsiloxane and copolymers. *Int J Plast Technol.* 2019;23(2):261-82.
70. Organization IS. ISO 6876. Dentistry–Root canal sealing materials. 2012.
71. Ameh ES. A review of basic crystallography and x-ray diffraction applications. *Int J Adv Manuf Tech.* 2019;105(7-8):3289-302.

72. Lea FM, Hewlett PC, Liska M. *Lea's chemistry of cement and concrete*. Fifth edition. ed. Oxford England ; Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann; 2019. xxxvii, 858 pages p.
73. Hemabarathy Bharatham MZABZ, Enoch Kumar Perimal, Loqman Mohamad Yusof, Muhajir Hamid. Mineral and physiochemical evaluation of cockle shell (*Anadara granosa*) and other selected molluscan shell as potential biomaterials. *Sains Malaysiana*. 2014;43(7):1023-9.
74. ASTM F1185-03(2014), Standard Specification for Composition of Hydroxylapatite for Surgical Implants. ASTM international. West Conshohocken, PA,2014.
75. A.J. Awang-Hazmi ABZZ, M.M. Noordin , A. Jalila, Y. Norimah. Mineral Composition of the Cockle (*Anadara granosa*) Shells of West Coast of Peninsular Malaysia and Its Potential as Biomaterial for Use in Bone Repair. *Journal of Animal and Veterinary Advances*. 2007;6(5):591-4.
76. Shafiu Kamba A, Zakaria ZAB. Osteoblasts Growth Behaviour on Bio-Based Calcium Carbonate Aragonite Nanocrystal. *BioMed Research International*. 2014;2014:215097.
77. Tram N. Synthesis and characterization of calcite nano-particle derived from cockle shell for clinical application. *ASEAN Engineering Journal*. 2020;10:49-54.
78. Nugroho J, Natsir N, Trilaksana A, Rovani C, Atlanta M. The increase of tooth enamel surface hardness after application blood cockle shells (*Anadara granosa*) paste as remineralization agent. *International Journal of Applied Pharmaceutics*. 2019;11:26-9.
79. Nobuaki Yamaguchi YM, Yoshishige Yamada, Hideaki Narusawa, Cho Han-Cheol, Yukimichi Tamaki, Takashi Miyazaki. Synthesis of CaO-SiO₂ Compounds Using Materials Extracted from Industrial Wastes. *Open Journal of Inorganic Non-metallic Materials*. 2015;5(1):1-10.
80. C. Piconi GM. Zirconia as a ceramic biomaterial. *Biomaterials*. 1999;20(1):1-25.
81. Vassal MF, Nunes-Pereira J, Miguel SP, Correia IJ, Silva AP. Microstructural, mechanical and biological properties of hydroxyapatite - CaZrO₃ biocomposites. *Ceram Int*. 2019;45(7):8195-203.

82. Soram O, Sung-In C, Hiran P, Jinsu Y, Seong-Hyeon H, Yeon-Jee Y, et al. Novel Calcium Zirconate Silicate Cement Biomaterialize and Seal Root Canals. *Materials (Basel)*. 2018;11(4):588.
83. Camilleri J. Characterization and hydration kinetics of tricalcium silicate cement for use as a dental biomaterial. *Dent Mater*. 2011;27(8):836-44.
84. Marina Angélica Marciano MAHD, Josette Camilleri Dental discoloration caused by bismuth oxide in MTA in the presence of sodium hypochlorite. *Clinical Oral Investigation*. 2015;19(9):2201-9.
85. Tanomaru-Filho M, Torres FFE, Chavez-Andrade GM, de Almeida M, Navarro LG, Steier L, et al. Physicochemical Properties and Volumetric Change of Silicone/Bioactive Glass and Calcium Silicate-based Endodontic Sealers. *J Endod*. 2017;43(12):2097-101.
86. Silva Almeida LH, Moraes RR, Morgental RD, Pappen FG. Are Premixed Calcium Silicate-based Endodontic Sealers Comparable to Conventional Materials? A Systematic Review of In Vitro Studies. *J Endod*. 2017;43(4):527-35.
87. Silva E, Cardoso ML, Rodrigues JP, De-Deus G, Fidalgo T. Solubility of bioceramic- and epoxy resin-based root canal sealers: A systematic review and meta-analysis. *Aust Endod J*. 2021.
88. Josette C. *Mineral Trioxide Aggregate in Dentistry: From Preparation to Application*: Springer--Verlag Berlin Heidelberg; 2014.
89. Saghiri MA, Asgar K, Lotfi M, Garcia-Godoy F. Nanomodification of mineral trioxide aggregate for enhanced physicochemical properties. *Int Endod J*. 2012;45(11):979-88.
90. Guofang Z, Wang P-M. Effects of ethylene/vinyl chloride/vinyl laurate redispersible terpolymer on pore structure and properties of cement mortar. *Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials*. 2013;16(1):111-4.
91. Reyes-Carmona JF, Felipe MS, Felipe WT. Biomaterialization ability and interaction of mineral trioxide aggregate and white portland cement with dentin in a phosphate-containing fluid. *J Endod*. 2009;35(5):731-6.
92. Zhang W, Li Z, Peng B. Effects of iRoot SP on mineralization-related genes expression in MG63 cells. *J Endod*. 2010;36(12):1978-82.

93. Zhu X, Yuan Z, Yan P, Li Y, Jiang H, Huang S. Effect of iRoot SP and mineral trioxide aggregate (MTA) on the viability and polarization of macrophages. *Arch Oral Biol.* 2017;80:27-33.
94. Maeno S, Niki Y, Matsumoto H, Morioka H, Yatabe T, Funayama A, et al. The effect of calcium ion concentration on osteoblast viability, proliferation and differentiation in monolayer and 3D culture. *Biomaterials.* 2005;26(23):4847-55.
95. Wu L, Xue K, Hu G, Du H, Gan K, Zhu J, et al. Effects of iRoot SP on osteogenic differentiation of human stem cells from apical papilla. *BMC Oral Health.* 2021;21(1):407.
96. Carvalho CN, Grazziotin-Soares R, de Miranda Candeiro GT, Gallego Martinez L, de Souza JP, Santos Oliveira P, et al. Micro Push-out Bond Strength and Bioactivity Analysis of a Bioceramic Root Canal Sealer. *Iran Endod J.* 2017;12(3):343-8.
97. Abu Zeid ST, Saleh AAM, Khafagi MGE, Abou Neel EA. Setting reaction of new bioceramic root canal sealers. *Spectrosc Lett.* 2018;51(8):426-30.
98. Donnermeyer D, Ibing M, Burklein S, Weber I, Reitze MP, Schafer E. Physico-Chemical Investigation of Endodontic Sealers Exposed to Simulated Intracanal Heat Application: Hydraulic Calcium Silicate-Based Sealers. *Materials (Basel).* 2021;14(4).



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายละเอียดการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

คุณสมบัติทางกายภาพของไอรูทเอสพีและไบโอซีลเลอร์

1. การไหลผ่าน

1.1 ข้อมูลดิบแสดงระยะการไหลผ่าน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	25	23
2	24	24
3	26	26
4	25	26
5	24	25
6	23.5	25
ค่าเฉลี่ย	24.58	24.83

1.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของระยะการไหลผ่าน

Descriptive Statistics

Sealer	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
iRoot SP Flow	6	23	26	24.58	.920
Valid N (listwise)	6				
Biosealer Flow	6	23	26	24.83	1.169
Valid N (listwise)	6				

1.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลระยะการไหลผ่าน

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Flow	.236	6	.200 [*]	.929	6	.576

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Sealer = iRoot SP

b. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Flow	.223	6	.200 [*]	.908	6	.421

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Sealer = Biosealer

b. Lilliefors Significance Correction

1.4 การวิเคราะห์การไหลผ่านของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี independence t-test

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
Flow Equal variances assumed	.193	.670	-.414	10	.687	-.252	.607	-1.605	1.101
Flow Equal variances not assumed			-.414	9.475	.688	-.252	.607	-1.615	1.112

2. เวลาการแข็งตัว

2.1 ข้อมูลดิบแสดงเวลาการแข็งตัว

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	423 (7.05)	1737 (28.95)
2	429 (7.15)	1741 (29.02)
3	410 (6.83)	1737 (28.95)
4	419 (6.98)	1738 (28.96)
5	430 (7.17)	1749 (29.15)
6	409 (6.82)	1736 (28.93)
ค่าเฉลี่ย	7	29

2.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของเวลาการแข็งตัว

Descriptive Statistics

Sealer	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
iRoot SP Settingtime	6	6.82	7.17	7.0000	.15205
Valid N (listwise)	6				
Biosealer Settingtime	6	28.93	29.15	28.9933	.08262
Valid N (listwise)	6				

2.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลเวลาการแข็งตัว

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Settingtime	.202	6	.200*	.892	6	.327

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Sealer = iRoot SP

b. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Settingtime	.323	6	.049	.769	6	.030

a. Sealer = Biosealer

b. Lilliefors Significance Correction

2.4 การวิเคราะห์การไหลผ่านของตัวอย่างที่ศึกษาด้วยวิธี independence t-test

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
Settingtime Equal variances assumed	3.221	.103	-311.310	10	.000	-21.99333	.07065	22.15075	21.83592
Settingtime Equal variances not assumed			-311.310	7.716	.000	-21.99333	.07065	22.15730	21.82937

3. ความหนาชั้นฟิล์ม

3.1 ข้อมูลดิบแสดงความหนาชั้นฟิล์ม

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	24	24
2	22	31
3	18	27
4	23	23
5	25	29
6	28	20
ค่าเฉลี่ย	23.33	25.67

3.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของความหนาชั้นฟิล์ม

Descriptive Statistics

Sealer		N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
iRoot SP	Filmthickness	6	18	28	23.33	3.327
	Valid N (listwise)	6				
Biosealer	Filmthickness	6	20	31	25.67	4.082
	Valid N (listwise)	6				

3.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลความหนาชั้นฟิล์ม

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Filmthickness	.178	6	.200 [*]	.979	6	.946

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Sealer = iRoot SP

b. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Filmthickness	.158	6	.200 [*]	.977	6	.934

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Sealer = Biosealer

b. Lilliefors Significance Correction

3.4 การวิเคราะห์ความหนาชั้นฟิล์มของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี independence t-test

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances	t-test for Equality of Means								
		F	Sig.	t	df	Sig. (2- tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Filmthickness	Equal variances assumed	.763	.403	- 1.085	10	.303	-2.333	2.150	-7.124	2.457
	Equal variances not assumed			- 1.085	9.608	.304	-2.333	2.150	-7.150	2.484

4. การละลายตัว

4.1 ข้อมูลดิบแสดงการละลายตัว

ตัวอย่างที่	ไครูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	6.041	3.77
2	5.639	6.26
3	5.996	3.27
4	7.00	5.22
5	4.68	4.74
6	5.74	4.79
ค่าเฉลี่ย	5.85	4.68

4.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของการละลายตัว

Descriptive Statistics

Sealer	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
iRoot SP Solubility	6	4.68	7.00	5.8500	.74927
Valid N (listwise)	6				
Biosealer Solubility	6	3.27	6.26	4.6750	1.06017
Valid N (listwise)	6				

4.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลการละลายตัว

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Solubility	.233	6	.200*	.944	6	.688

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Sealer = iRoot SP

b. Lilliefors Significance Correction

Test of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Solubility	.191	6	.200*	.969	6	.888

a. Sealer = Biosealer

b. Lilliefors Significance Correction

4.4 การวิเคราะห์การละลายตัวของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี independence *t*-test

Independent Samples Test

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Solubility	Equal variances assumed	.660	.435	2.217	10	.051	1.17500	.52999	-.00590	2.35590
	Equal variances not assumed			2.217	8.998	.054	1.17500	.52999	-.02398	2.37398

5. ความทึบรังสี

5.1 ข้อมูลดิบแสดงความทึบรังสี

ตัวอย่างที่	ไครูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	7.957	7.58
2	7.334	7.33
3	7.582	6.84
4	7.334	6.84
5	7.873	7.33
6	7.582	7.58
ค่าเฉลี่ย	7.61	7.25

5.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของความทึบรังสี

Descriptive Statistics

Sealer	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
iRoot SP Radiopacity	6	7.33	7.96	7.6103	.26211
Valid N (listwise)	6				
Biosealer Radiopacity	6	6.84	7.58	7.25	.33991
Valid N (listwise)	6				

5.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลความที่บ่งชี้

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Radiopacity	.210	6	.200*	.887	6	.301

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Sealer = iRoot SP

b. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality^a

	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Radiopacity	.264	6	.200*	.823	6	.093

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Sealer = Biosealer

b. Lilliefors Significance Correction

5.4 การวิเคราะห์ความที่บ่งชี้ของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี independence t-test

Independent Samples Test

	Levene's Test for Equality of Variances	t-test for Equality of Means								
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Radiopacity	Equal variances assumed	.757	.405	2.056	10	.067	.36033	.17523	-.03011	.75077
	Equal variances not assumed			2.056	9.393	.069	.36033	.17523	-.03355	.75422

6. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

6.1 ที่เวลา 3 ชั่วโมง

6.1.1 ข้อมูลดิบแสดงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 3 ชั่วโมง

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	10.45	10.25
2	10.24	10.05
3	10.73	9.62
4	10.41	9.50
5	10.21	10.50
6	10.31	10.50
ค่าเฉลี่ย	10.39	10.07

6.1.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 3 ชั่วโมง

Descriptives^a

	Sealer		Statistic	Std. Error
pH	iRoot SP	Mean	10.3917	.07765
		95% Confidence Interval for Lower Bound	10.1921	
		Mean Upper Bound	10.5913	
		5% Trimmed Mean	10.3830	
		Median	10.3600	
		Variance	.036	
		Std. Deviation	.19020	
		Minimum	10.21	
		Maximum	10.73	
		Range	.52	
		Interquartile Range	.29	
		Skewness	1.260	.845
		Kurtosis	1.654	1.741

Biosealer	Mean	10.0700	.17607	
	95% Confidence Interval for Lower Bound	9.6174		
	Mean	Upper Bound	10.5226	
	5% Trimmed Mean	10.0778		
	Median	10.1500		
	Variance	.186		
	Std. Deviation	.43128		
	Minimum	9.50		
	Maximum	10.50		
	Range	1.00		
	Interquartile Range	.91		
	Skewness	-.417	.845	
	Kurtosis	-1.880	1.741	

a. Time = 3h

6.1.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 3 ชั่วโมง

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pH	iRoot SP	.213	6	.200 [*]	.894	6	.339
	Biosealer	.185	6	.200 [*]	.886	6	.297

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 3h

b. Lilliefors Significance Correction

6.1.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 3 ชั่วโมงของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี

independence *t*-test

Independent Samples Test^a

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
pH									
Equal variances assumed	4.735	.055	1.672	10	.126	.32167	.19243	-.10709	.75043
Equal variances not assumed			1.672	6.874	.139	.32167	.19243	-.13505	.77839

a. Time = 3h



6.2 ที่เวลา 1 วัน

6.2.1 ข้อมูลดิบแสดงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 1 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	10.4	10.39
2	10.27	10.03
3	9.97	9.97
4	9.79	9.50
5	10.01	10.40
6	10.45	10.49
ค่าเฉลี่ย	10.15	10.13

6.2.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 1 วัน

Descriptives^a

	Sealer		Statistic	Std. Error	
pH	iRoot SP	Mean	10.1483	.10778	
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound 9.8713	Upper Bound 10.4254	
		5% Trimmed Mean	10.1515		
		Median	10.1400		
		Variance	.070		
		Std. Deviation	.26400		
		Minimum	9.79		
		Maximum	10.45		
		Range	.66		
		Interquartile Range	.49		
		Skewness	-.149	.845	
		Kurtosis	-1.873	1.741	

Biosealer	Mean		10.1300	.15304
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	9.7366	
		Upper Bound	10.5234	
	5% Trimmed Mean		10.1450	
	Median		10.2100	
	Variance		.141	
	Std. Deviation		.37486	
	Minimum		9.50	
	Maximum		10.49	
	Range		.99	
	Interquartile Range		.57	
	Skewness		-.975	.845
	Kurtosis		.307	1.741

a. Time = 1d

6.2.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 1 วัน

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pH	iRoot SP	.200	6	.200 [*]	.926	6	.548
	Biosealer	.256	6	.200 [*]	.886	6	.298

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 1d

b. Lilliefors Significance Correction

6.2.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 1 วันของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี

independence *t*-test

Independent Samples Test^a

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
pH									
Equal variances assumed	.703	.421	.098	10	.924	.01833	.18718	-.39873	.43539
Equal variances not assumed			.098	8.981	.924	.01833	.18718	-.40523	.44190

a. Time = 1d



6.3 ที่เวลา 3 วัน

6.3.1 ข้อมูลดิบแสดงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 3 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	10.55	10.40
2	10.19	10.36
3	10.35	10.30
4	10.08	10.39
5	9.79	10.45
6	9.76	10.19
ค่าเฉลี่ย	10.12	10.35

6.3.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 3 วัน

Descriptives^a

	Sealer		Statistic	Std. Error	
pH	iRoot SP	Mean	10.1200	.12686	
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound 9.7939	Upper Bound 10.4461	
		5% Trimmed Mean	10.1161		
		Median	10.1350		
		Variance	.097		
		Std. Deviation	.31074		
		Minimum	9.76		
		Maximum	10.55		
		Range	.79		
		Interquartile Range	.62		
		Skewness	.094	.845	
		Kurtosis	-1.320	1.741	

Biosealer	Mean		10.3483	.03754
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	10.2518	
		Upper Bound	10.4448	
	5% Trimmed Mean		10.3515	
	Median		10.3750	
	Variance		.008	
	Std. Deviation		.09196	
	Minimum		10.19	
	Maximum		10.45	
	Range		.26	
	Interquartile Range		.14	
	Skewness		-1.088	.845
	Kurtosis		1.100	1.741

a. Time = 3d

6.3.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 3 วัน

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pH	iRoot SP	.189	6	.200 [*]	.943	6	.686
	Biosealer	.217	6	.200 [*]	.926	6	.551

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 3d

b. Lilliefors Significance Correction

6.3.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 3 วันของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี
independence *t*-test

Independent Samples Test^a

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
pH Equal variances assumed	6.459	.029	-1.726	10	.115	-.22833	.13230	-.52311	.06645
Equal variances not assumed			-1.726	5.869	.136	-.22833	.13230	-.55381	.09715

a. Time = 3d



6.4 ที่เวลา 7 วัน

6.4.1 ข้อมูลดิบแสดงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 7 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	10.03	9.91
2	9.85	9.94
3	9.72	9.69
4	10.19	9.47
5	10.13	9.06
6	9.87	9.52
ค่าเฉลี่ย	9.97	9.60

6.4.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 7 วัน

Descriptives^a

	Sealer		Statistic	Std. Error
pH	iRoot SP	Mean	9.9650	.07402
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound 9.7747	Upper Bound 10.1553
		5% Trimmed Mean	9.9661	
		Median	9.9500	
		Variance	.033	
		Std. Deviation	.18130	
		Minimum	9.72	
		Maximum	10.19	
		Range	.47	
		Interquartile Range	.33	
		Skewness	-.047	.845
		Kurtosis	-1.597	1.741

Biosealer	Mean		9.5983	.13350
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	9.2552	
		Upper Bound	9.9415	
	5% Trimmed Mean		9.6093	
	Median		9.6050	
	Variance		.107	
	Std. Deviation		.32701	
	Minimum		9.06	
	Maximum		9.94	
	Range		.88	
	Interquartile Range		.55	
	Skewness		-.752	.845
	Kurtosis		.326	1.741

a. Time = 7d

6.4.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 7 วัน

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pH	iRoot SP	.200	6	.200 [*]	.949	6	.732
	Cockle shell sealer	.181	6	.200 [*]	.928	6	.563

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 7d

b. Lilliefors Significance Correction

6.4.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 7 วันของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี

independence *t*-test

Independent Samples Test^a

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
pH Equal variances assumed	1.468	.254	2.402	10	.037	.36667	.15265	.02655	.70679
Equal variances not assumed			2.402	7.808	.044	.36667	.15265	.01315	.72018

a. Time = 7d



6.5 ที่เวลา 14 วัน

6.5.1 ข้อมูลดิบแสดงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 14 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	10.06	10.40
2	9.07	10.20
3	9.00	9.28
4	8.64	9.59
5	8.26	9.86
6	7.97	9.93
ค่าเฉลี่ย	8.83	9.88

6.5.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 14 วัน

Descriptives^a

	Sealer		Statistic	Std. Error	
pH	iRoot SP	Mean	8.8333	.30000	
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	8.0622	
			Upper Bound	9.6045	
		5% Trimmed Mean	8.8131		
		Median	8.8200		
		Variance	.540		
		Std. Deviation	.73484		
		Minimum	7.97		
		Maximum	10.06		
		Range	2.09		
		Interquartile Range	1.13		
		Skewness	.775	.845	
		Kurtosis	.791	1.741	

Biosealer	Mean		9.8767	.16530
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	9.4517	
		Upper Bound	10.3016	
	5% Trimmed Mean		9.8807	
	Median		9.8950	
	Variance		.164	
	Std. Deviation		.40490	
	Minimum		9.28	
	Maximum		10.40	
	Range		1.12	
	Interquartile Range		.74	
	Skewness		-.265	.845
	Kurtosis		-.535	1.741

a. Time = 14d

6.5.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 14 วัน

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pH	iRoot SP	.207	6	.200 [*]	.952	6	.754
	Biosealer	.150	6	.200 [*]	.983	6	.964

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 14d

b. Lilliefors Significance Correction

6.5.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 14 วันของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี

independence *t*-test

Independent Samples Test^a

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
pH Equal variances assumed	1.470	.253	-3.046	10	.012	-1.04333	.34252	-1.80652	-.28014
Equal variances not assumed			-3.046	7.780	.016	-1.04333	.34252	-1.83710	-.24957

a. Time = 14d



6.6 ที่เวลา 28 วัน

6.6.1 ข้อมูลดิบแสดงค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 28 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีดเลอร์
1	8.23	9.92
2	8.80	9.22
3	9.64	9.60
4	8.68	8.96
5	9.53	8.79
6	9.47	8.86
ค่าเฉลี่ย	9.06	9.23

6.6.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 28 วัน

Descriptives^a

	Sealer	Statistic	Std. Error		
pH	iRoot SP	Mean	9.0583	.23283	
		95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound 8.4598	Upper Bound 9.6568	
		5% Trimmed Mean	9.0720		
		Median	9.1350		
		Variance	.325		
		Std. Deviation	.57031		
		Minimum	8.23		
		Maximum	9.64		
		Range	1.41		
		Interquartile Range	.99		
		Skewness	-.434	.845	
		Kurtosis	-1.695	1.741	

Biosealer	Mean		9.2250	.18406
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	8.7519	
		Upper Bound	9.6981	
	5% Trimmed Mean		9.2106	
	Median		9.0900	
	Variance		.203	
	Std. Deviation		.45085	
	Minimum		8.79	
	Maximum		9.92	
	Range		1.13	
	Interquartile Range		.84	
	Skewness		.782	.845
	Kurtosis		-.971	1.741

a. Time = 28d

6.6.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 28 วัน

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
pH	iRoot SP	.265	6	.200 [*]	.892	6	.328
	Biosealer	.222	6	.200 [*]	.902	6	.383

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 28d

b. Lilliefors Significance Correction

6.6.4 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เวลา 28 วันของตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี

independence *t*-test

Independent Samples Test^a

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
pH Equal variances assumed	1.159	.307	-.562	10	.587	-.16667	.29680	-.82797	.49464
Equal variances not assumed			-.562	9.494	.587	-.16667	.29680	-.83278	.49944

a. Time = 28d



7. ปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมา

7.1 ที่เวลา 3 ชั่วโมง

7.1.1 ข้อมูลดิบแสดงปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 3 ชั่วโมง

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	18.125	6.084
2	19.1602	4.7266
3	23.9063	5.5273
4	11.4844	11.8848
5	12.7539	9.4531
6	13.1641	11.9727
ค่าเฉลี่ย	16.4323	8.2747

7.1.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 3 ชั่วโมง

Descriptives^a

	Sealer	Statistic	Std. Error
Calciumrelease	iRoot SP	Mean	16.432317
		95% Confidence Interval for Mean	
		Lower Bound	11.402447
		Upper Bound	21.462187
		5% Trimmed Mean	16.291980
		Median	15.644550
		Variance	22.972
		Std. Deviation	4.7929285
		Minimum	11.4844
		Maximum	23.9063
		Range	12.4219
		Interquartile Range	7.9102
		Skewness	.645
			.845
		Kurtosis	-.837
			1.741

Biosealer	Mean		8.274750	1.3295744
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	4.856970	
		Upper Bound	11.692530	
	5% Trimmed Mean		8.266428	
	Median		7.768550	
	Variance		10.607	
	Std. Deviation		3.2567788	
	Minimum		4.7266	
	Maximum		11.9727	
	Range		7.2461	
	Interquartile Range		6.5796	
	Skewness		.203	.845
	Kurtosis		-2.534	1.741

a. Time = 3h

7.1.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่
เวลา 3 ชั่วโมง

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Calciumrelease	iRoot SP	.252	6	.200 [*]	.910	6	.436
	Biosealer	.249	6	.200 [*]	.857	6	.179

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 3h

b. Lilliefors Significance Correction

7.1.4 การวิเคราะห์ค่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 3 ชั่วโมงของ ตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี independence t -test

Independent Samples Test^a

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Calciumrelease	Equal variances assumed	1.515	.247	3.448	10	.006	8.1575667	2.3656843	2.8864937	13.4286397
	Equal variances not assumed			3.448	8.806	.008	8.1575667	2.3656843	2.7879748	13.5271586

a. Time = 3h



7.2 ที่เวลา 1 วัน

7.2.1 ข้อมูลดิบแสดงปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 1 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	16.6992	6.2012
2	10.1563	7.5
3	10.0781	5.625
4	7.9883	8.2031
5	10.7813	10.8594
6	10.625	6.416
ค่าเฉลี่ย	11.0547	7.4374

7.2.1 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 1 วัน

Descriptives^a

Sealer		Statistic	Std. Error	
Calciumrelease	iRoot SP	Mean	11.054700	
		95% Confidence Interval for Mean		
		Lower Bound	7.967024	
		Upper Bound	14.142376	
		5% Trimmed Mean	10.911472	
		Median	10.390650	
		Variance	8.657	
		Std. Deviation	2.9422253	
		Minimum	7.9883	
		Maximum	16.6992	
		Range	8.7109	
		Interquartile Range	2.7051	
		Skewness	1.758	.845
		Kurtosis	4.073	1.741

Biosealer	Mean		7.467450	.7778415
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	5.467945	
		Upper Bound	9.466955	
	5% Trimmed Mean		7.381367	
	Median		6.958000	
	Variance		3.630	
	Std. Deviation		1.9053149	
	Minimum		5.6250	
	Maximum		10.8594	
	Range		5.2344	
	Interquartile Range		2.8100	
	Skewness		1.300	.845
	Kurtosis		1.610	1.741

a. Time = 1d

7.2.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่

เวลา 1 วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Calcium release	iRoot SP	.370	6	.010	.788	6	.046
	Biosealer	.209	6	.200*	.892	6	.327

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 1d

b. Lilliefors Significance Correction

7.2.4 การวิเคราะห์ค่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 1 วันของตัวอย่าง
ศึกษาด้วยวิธี independence *t*-test

Independent Samples Test^a

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2- tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
Calciumrelease Equal variances assumed	.256	.624	2.507	10	.031	3.5872500	1.4310203	.3987381	6.7757619
Equal variances not assumed			2.507	8.566	.035	3.5872500	1.4310203	.3249051	6.8495949

a. Time = 1d



7.3 ที่เวลา 3 วัน

7.3.1 ข้อมูลดิบแสดงปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 3 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	11.2793	10.4688
2	10.3516	9.6191
3	8.3398	9.0039
4	9.3945	7.9883
5	10.957	9.4922
6	10.3906	9.7168
ค่าเฉลี่ย	10.1188	9.3815

7.3.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 3 วัน

Descriptives^a

Sealer		Statistic	Std. Error
Calciumrelease	iRoot SP	Mean	10.118800
		95% Confidence Interval for Mean	
		Lower Bound	8.982027
		Upper Bound	11.255573
		5% Trimmed Mean	10.153161
		Median	10.371100
		Variance	1.173
		Std. Deviation	1.0832232
		Minimum	8.3398
		Maximum	11.2793
		Range	2.9395
		Interquartile Range	1.9067
		Skewness	-.903
	Kurtosis	.160	1.741

Biosealer	Mean	9.381517	.3389663
	95% Confidence Interval Lower Bound for Mean	8.510176	
	Upper Bound	10.252857	
	5% Trimmed Mean	9.398513	
	Median	9.555650	
	Variance	.689	
	Std. Deviation	.8302944	
	Minimum	7.9883	
	Maximum	10.4688	
	Range	2.4805	
	Interquartile Range	1.1548	
	Skewness	-.744	.845
	Kurtosis	1.411	1.741

a. Time = 3d

7.3.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณแคลเซียมที่ปล่อยออกมาที่เวลา 3 วัน



Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Calcium release	iRoot SP	.252	6	.200*	.927	6	.557
	Biosealer	.220	6	.200*	.946	6	.712

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 3d

b. Lilliefors Significance Correction

7.3.4 การวิเคราะห์ค่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 3 วันของตัวอย่าง
ศึกษาด้วยวิธี independence t -test

Independent Samples Test^a

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Calciumrelease	Equal variances assumed	.587	.461	1.323	10	.215	.7372833	.5571895	-.5042123	1.9787790
	Equal variances not assumed			1.323	9.368	.217	.7372833	.5571895	-.5156669	1.9902336

a. Time = 3d



7.4 ที่เวลา 7 วัน

7.4.1 ข้อมูลดิบแสดงปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 7 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	8.3008	5.4688
2	9.4141	5.1855
3	10.2734	4.8633
4	10.1367	6.3574
5	7.6563	4.8535
6	6.6016	6.1133
ค่าเฉลี่ย	8.7304	5.4736

7.4.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 7 วัน

Descriptives^a

	Sealer	Statistic	Std. Error
Calciumrelease	iRoot SP	Mean	8.730483
		95% Confidence Interval for Mean	
		Lower Bound	7.195578
		Upper Bound	10.265389
		5% Trimmed Mean	8.763037
		Median	8.857450
		Variance	2.139
		Std. Deviation	1.4626012
		Minimum	6.6016
		Maximum	10.2734
		Range	3.6718
		Interquartile Range	2.7782
		Skewness	-.402
	Kurtosis	-1.401	1.741

Biosealer	Mean		5.473633	.2601495
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	4.804898	
		Upper Bound	6.142369	
	5% Trimmed Mean		5.458987	
	Median		5.327150	
	Variance		.406	
	Std. Deviation		.6372336	
	Minimum		4.8535	
	Maximum		6.3574	
	Range		1.5039	
	Interquartile Range		1.3135	
	Skewness		.536	.845
	Kurtosis		-1.703	1.741

a. Time = 7d

7.4.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่
เวลา 7 วัน



Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Calcium release	iRoot SP	.180	6	.200 [*]	.931	6	.587
	Biosealer	.176	6	.200 [*]	.888	6	.309

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 7d

b. Lilliefors Significance Correction

7.4.4 การวิเคราะห์ค่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 7 วันของตัวอย่าง
ศึกษาด้วยวิธี independence *t*-test

Independent Samples Test^a

	Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
	F	Sig.	t	df	Sig. (2- tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
								Lower	Upper
Calciumrelease Equal variances assumed	6.228	.032	5.000	10	.001	3.2568500	.6513152	1.8056293	4.7080707
Equal variances not assumed			5.000	6.832	.002	3.2568500	.6513152	1.7090330	4.8046670

a. Time = 7d



7.4 ที่เวลา 14 วัน

7.5.1 ข้อมูลดิบแสดงปริมาณแคลเซียมที่ปล่อยออกมาที่เวลา 14 วัน

ตัวอย่างที่	ไอรูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	8.7988	8.0664
2	10.1563	8.8379
3	8.2422	8.3105
4	8.9746	8.9453
5	10.8203	8.0664
6	8.5352	7.3242
ค่าเฉลี่ย	9.2545	8.2584

7.5.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของปริมาณแคลเซียมที่ปล่อยออกมาที่เวลา 14 วัน

Descriptives^a

Sealer		Statistic	Std. Error	
Calciumrelease	iRoot SP	Mean	9.254567	
		95% Confidence Interval for Mean		
		Lower Bound	8.195403	
		Upper Bound	10.313730	
		5% Trimmed Mean	9.223824	
		Median	8.886700	
		Variance	1.019	
		Std. Deviation	1.0092694	
		Minimum	8.2422	
		Maximum	10.8203	
		Range	2.5781	
		Interquartile Range	1.8604	
		Skewness	.889	.845
		Kurtosis	-.827	1.741

Biosealer	Mean	8.258450	.2419934
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	7.636386
		Upper Bound	8.880514
	5% Trimmed Mean	8.272194	
	Median	8.188450	
	Variance	.351	
	Std. Deviation	.5927603	
	Minimum	7.3242	
	Maximum	8.9453	
	Range	1.6211	
	Interquartile Range	.9839	
	Skewness	-.448	.845
	Kurtosis	-.014	1.741

a. Time = 14d

7.5.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณแคลเซียมที่ปล่อยออกมาที่
เวลา 14 วัน



Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Calcium release	iRoot SP	.276	6	.171	.889	6	.315
	Biosealer	.206	6	.200*	.933	6	.605

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 14d

b. Lilliefors Significance Correction

7.5.4 การวิเคราะห์ค่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 14 วันของ ตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี independence t-test

Independent Samples Test^a

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Calciumrelease	Equal variances assumed	2.697	.132	2.085	10	.064	.9961167	.4778405	-.0685784	2.0608117
	Equal variances not assumed			2.085	8.083	.070	.9961167	.4778405	-.1038280	2.0960614

a. Time = 14d



7.6 ที่เวลา 28 วัน

7.6.1 ข้อมูลดิบแสดงปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 28 วัน

ตัวอย่างที่	ไครูท เอสพี	ไบโอซีลเลอร์
1	15.332	10.3516
2	9.8633	14.8828
3	13.8672	14.1504
4	16.1328	15.1563
5	10.2734	14.2773
6	18.2813	13.3594
ค่าเฉลี่ย	13.9583	13.6963

7.6.2 ข้อมูลสถิติเชิงพรรณนาของปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 28 วัน

Descriptives^a

	Sealer	Statistic	Std. Error	
Calciumrelease	iRoot SP	Mean	13.958333	
		95% Confidence Interval for Mean		
		Lower Bound	10.456939	
		Upper Bound	17.459728	
		5% Trimmed Mean	13.945670	
		Median	14.599600	
		Variance	11.132	
		Std. Deviation	3.3364545	
		Minimum	9.8633	
		Maximum	18.2813	
		Range	8.4180	
		Interquartile Range	6.4990	
		Skewness	-.202	.845
		Kurtosis	-1.501	1.741

Biosealer	Mean		13.696300	.7160929
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	11.855525	
		Upper Bound	15.537075	
	5% Trimmed Mean		13.801006	
	Median		14.213850	
	Variance		3.077	
	Std. Deviation		1.7540621	
	Minimum		10.3516	
	Maximum		15.1563	
	Range		4.8047	
	Interquartile Range		2.3437	
	Skewness		-1.800	.845
	Kurtosis		3.499	1.741

a. Time = 28d

7.6.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่

เวลา 28 วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Tests of Normality^a

	Sealer	Kolmogorov-Smirnov ^b			Shapiro-Wilk		
		Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Calciumrelease	iRoot SP	.199	6	.200*	.928	6	.564
	Biosealer	.269	6	.200*	.809	6	.071

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Time = 28d

b. Lilliefors Significance Correction

7.6.4 การวิเคราะห์ค่าปริมาณแคลเซียมไอออนที่ถูกปล่อยออกมาที่เวลา 28 วันของ
ตัวอย่างศึกษาด้วยวิธี independence t -test

Independent Samples Test^a

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
									Lower	Upper
Calcium release	Equal variances assumed	2.826	.124	.170	10	.868	.2620333	1.5388666	-3.1667751	3.6908418
	Equal variances not assumed			.170	7.568	.869	.2620333	1.5388666	-3.3221932	3.8462599

a. Time = 28d



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุรีย์พร โอฟารสกุลวงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	17 กุมภาพันธ์ 2532
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	83/380 วิลล่าราชเทวี ถนนพญาไท แขวงถนนพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY