



การประยุกต์การกระตุ้นเชิงกลในระบบอัลจินเตไฮโดรเจล

โดย

นางสาวจันจิรา จินโนรส



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แบบ 1.1 ระดับปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

# การประยุกต์การกระตุ้นเชิงกลในระบบอัลจินเตไฮโดรเจล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร แบบ 1.1 ระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต

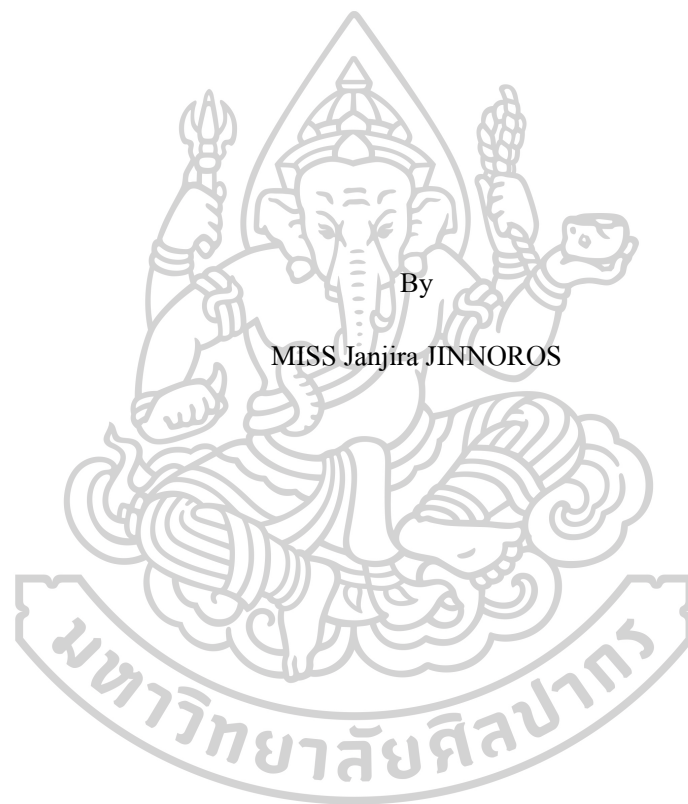
ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

APPLICATION OF MECHANICAL STIMULATIONS IN ALGINATE  
HYDROGEL SYSTEM



By  
MISS Janjira JINNOROS

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Doctor of Philosophy (FOOD TECHNOLOGY)

Department of FOOD TECHNOLOGY

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การประยุกต์การกระตุ้นเชิงกลในระบบอัลจินเตไฮโดรเจล  
โดย จันจิรา จิน โนรส  
สาขาวิชา เทคโนโลยีอาหาร แบบ 1.1 ระดับปริญญาตรีบัณฑิต  
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อินดวงศ์

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

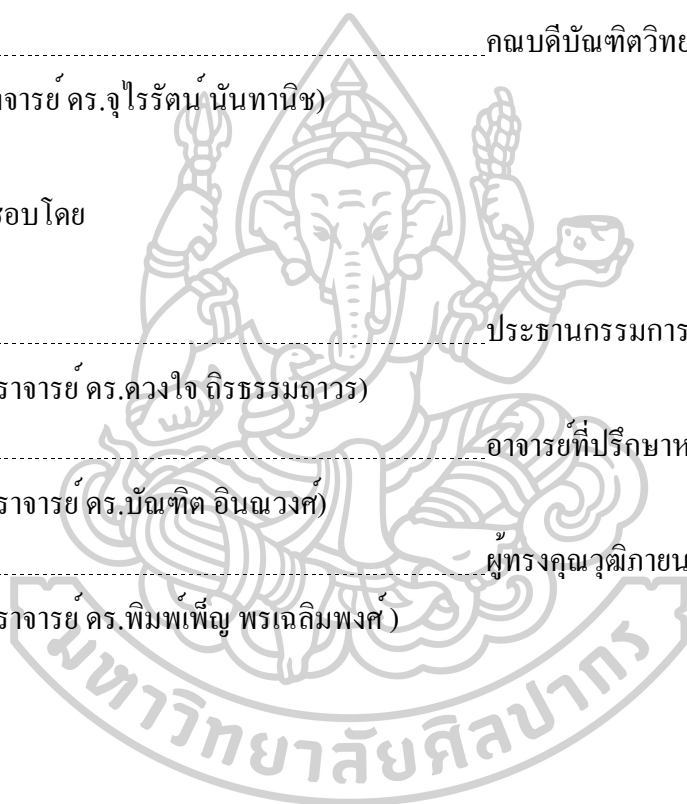
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงใจ ธีรธรรมถาวร)

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินดวงศ์)

ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)



59403801 : เทคโนโลยีอาหาร แบบ 1.1 ระดับปริญญาตรีบัณฑิต

คำสำคัญ : ไฮโดรเจล, ผลไม้ขึ้นรูป, โยอาหาร, สุนัข, นาโนบับเบิล, นวัตกรรม

นางสาว จันจิรา จินโนรส: การประยุกต์การกระตุ้นเชิงกลในระบบอัลจินตไฮโดรเจล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต อินดวงศ์

การศึกษาในครั้งนี้มีเป้าหมายสูงสุดเพื่อค้นหาแนวทางใหม่ในการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของอัลจินตไฮโดรเจล ตลอดจนศึกษาวิธีใหม่ในการเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดเจลแบบ External gelation ทั้งนี้เพื่อประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรมเลียนแบบผลไม้ต่อไปในอนาคต ดังนั้น จึงแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ตอน ได้แก่ 1) การปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของอัลจินตไฮโดรเจลด้วยเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำและประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูป 2) การประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคสุนัขอากาศแบบจิ้งหะ (PVS) ในระบบอัลจินตไฮโดรเจล และ 3) การศึกษาผลของการประยุกต์ใช้อัลตราโซนิกบับเบิล (UFB) ต่อการเกิดเจลและคุณลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอัลจินตไฮโดรเจล ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากหลักคิดที่ว่า “เส้นใยอาหาร” เป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญและมีผลต่อคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสของผลไม้ตามธรรมชาติ ดังนั้น หากต้องการปรับปรุงอัลจินตไฮโดรเจลให้มีเนื้อสัมผัสเหมือนหรือใกล้เคียงผลไม้จริง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาผลของเส้นใยอาหารต่อคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้น งานวิจัยส่วนแรกจึงศึกษาผลของชนิดและปริมาณเส้นใยอาหารต่อคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลที่เปลี่ยนแปลงไป จากผลการทดลองพบว่า เส้นใยอาหารที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีเป็นเส้นใยอาหารที่เหมาะสมต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์เลียนแบบผลไม้ แต่สำหรับเส้นใยอาหารที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้นั้นสามารถช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของอัลจินตไฮโดรเจลให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นได้

แม้ว่าอัลจินตไฮโดรเจลจะถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ แต่กระบวนการเกิดเจลของอัลจินตไฮโดรเจลยังคงต้องใช้เวลานานและพลังงาน รวมทั้งมีค่าใช้จ่ายที่สูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดสำคัญในการใช้งานจริง ซึ่งการเกิดเจลของอัลจินตมีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับอัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเกิดเจลแบบ External gelation โดยปัจจุบันพบว่าได้มีการใช้เทคนิค PVS เพื่อปรับปรุงการแพร่ของสารต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การใช้ PVS จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจเพราะอาจช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนในกระบวนการเกิดอัลจินตไฮโดรเจลได้ ด้วยเหตุนี้ จึงทำการศึกษาผลของการกระตุ้นด้วย PVS ที่ระดับความดัน

แตกต่างกัน (8, 35, 61 kPa) ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน (D) ลักษณะเนื้อสัมผัส และโครงสร้างจุลภาคของอัลจินเตไฮโดรเจล จากการศึกษ พบว่า PVS สามารถปรับปรุงค่า D ของแคลเซียมไอออนให้เพิ่มขึ้น 1-3 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่เกิดเจลภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ (~101 kPa) นอกจากนี้ การกระตุ้นด้วย PVS ยังทำให้ค่า hardness, breaking deformation และ Young's modulus ของอัลจินเตไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ค่า rupture strength และการหดตัวมีค่าลดลง, ยกเว้นตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วย PVS ที่ระดับความดัน 8 kPa เนื่องจากการเกิดเจลภายใต้สภาวะสุญญากาศนั้น ฟองอากาศภายในจะเคลื่อนที่จากบริเวณตรงกลางไปยังบริเวณผิวด้านนอกของอัลจินเตไฮโดรเจล ซึ่งทำให้บริเวณตรงกลางมีความหนาแน่นมากกว่า ในขณะที่ความหนาแน่นของฟองอากาศที่เคลื่อนที่ไปยังบริเวณผิวด้านนอก ทำให้ผิวด้านนอกมีรูพรุนเกิดขึ้น ดังนั้นความแข็งแรงของอัลจินเตไฮโดรเจลบริเวณตรงกลางจึงเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความแข็งแรงของเจลบริเวณผิวด้านนอกกลับมีค่าลดลง นอกจากนี้ภาพที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัลจินเตไฮโดรเจลถูกกระตุ้นด้วย PVS จะแสดงพื้นผิวที่ขรุขระและการเกิดขึ้นของเปลือกด้านนอกคล้ายกับเปลือกของผลไม้ ซึ่งการกระตุ้นด้วย PVS ที่ระดับความดัน 61 kPa เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการกระตุ้นด้วย PVS ที่มีการลดระดับความดันมากกว่านี้จะทำให้ค่า D ของแคลเซียมไอออนมีแนวโน้มลดลง และยังสร้างโพรงอากาศขนาดใหญ่ภายในโครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจลอีกด้วย ซึ่งโพรงอากาศเหล่านี้เกิดจากการรวมตัวของก๊าซที่ละลายอยู่ในสารละลายอัลจินเตจากการค้นพบที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นจะเห็นได้ว่า การกระตุ้นด้วย PVS เป็นเทคนิคที่ช่วยเร่งกระบวนการเกิดเจลแบบ External gelation ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้ในการสร้างผลิตภัณฑ์เลียนแบบผลไม้ที่มีคุณภาพเหมือนผลไม้จริงและใช้ในการผลิตวัสดุทางวิศวกรรมอื่นๆ ได้อีกด้วย

งานวิจัยในส่วนสุดท้าย เป็นการศึกษาผลของอัลตราโซนิค (UFB) ต่อการเกิดเจลของอัลจินเต จากผลการทดลอง พบว่า UFB สามารถปรับปรุงอัตราการเกิดเจลของอัลจินเตที่เกิดแบบ external gelation ได้ ซึ่งวิธีที่ดีที่สุดคือ การใช้ก๊าซออกซิเจนเป็นแหล่งของ UFB และใช้เวลาในการสร้าง UFB นาน 60 นาที โดยภาพถ่ายที่วิเคราะห์ด้วย SEM แสดงให้เห็นรูพรุนที่มีอยู่ในอัลจินเตไฮโดรเจล ซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจลที่ถูกปรับปรุงและเวลาในการเกิดเจลที่ลดลง

59403801 : Major (FOOD TECHNOLOGY)

Keyword : Hydrogel, Simulated fruit, Dietary Fiber, Vacuum, Nano-bubbles, Innovation

MISS JANJIRA JINNOROS : APPLICATION OF MECHANICAL STIMULATIONS  
IN ALGINATE HYDROGEL SYSTEM THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR  
BHUNDIT INNAWONG, Ph.D.

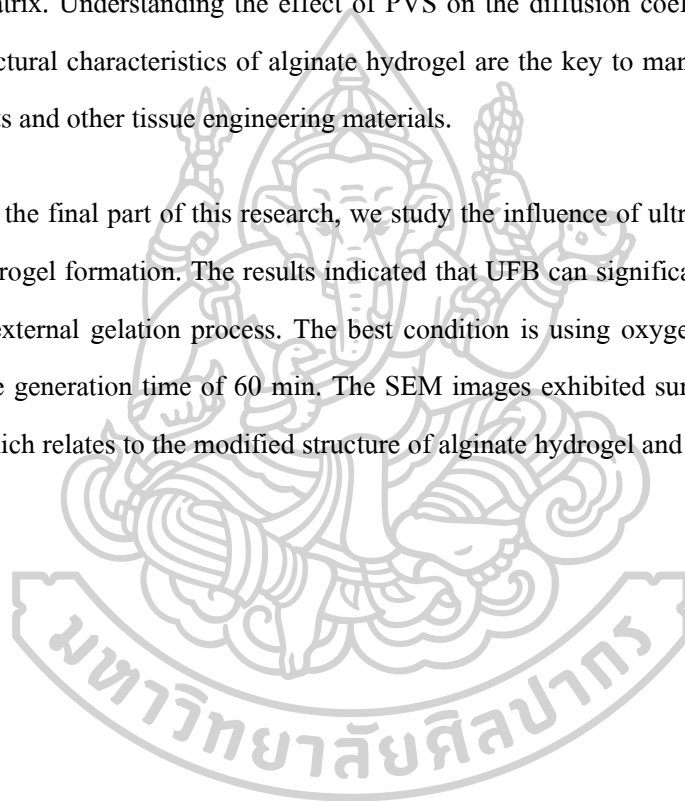
The ultimate goal of this study is to find new methods for modifying the functional properties of alginate hydrogel and improving the gelling process. This study was divided into 3 parts as follows: (1) modification of physical properties of alginate hydrogel using insoluble dietary fiber, (2) feasibility assessment of applying pulsed vacuum technique in stimulating alginate hydrogel, and (3) a study on the effect of ultra-fine bubbles (UFB) on gelling mechanism and morphology of alginate hydrogel.

Because “Dietary fiber” is the main component affecting the textures of the actual fruit, to mimic that is to understand the effect of dietary fiber on the properties of alginate hydrogel. This study showed that dietary fiber with a high water-holding capacity was able to imitate real fruit products and dietary fiber with a low water-holding capacity was able to enhance the mechanical strength of alginate hydrogel.

Although alginate hydrogel has been used in various industries, the gelation process of alginate hydrogel still has a high cost because of the time and energy-consuming process. Thus there are limited practical applications. The calcium ion diffusion rate was found partially affect to external gelation. Presently, the pulled vacuum stimulation (PVS) technique has been applied as an alternative treatment to effectively improve the diffusion behavior. Therefore, the utilization of PVS could be a promising strategy to enhance the rate of calcium ion diffusion in alginate hydrogel formation. In this study, we investigated the effect of PVS at the different depressurization levels (at 8, 35, 61 kPa) on the diffusion coefficients of calcium ion ( $D$ ), and the textural and micro-structural characteristics of alginate hydrogel. The results showed that PVS improved  $D$  by 1-3 times compared with the control sample processed under ambient pressure ( $\sim 101$  kPa). Also, increasing depressurization levels resulted in a significant increase in hardness, breaking deformation, and Young's modulus of the alginate hydrogel, on the other hand, surface rupture strength and shrinkage were decreased, except for depressurization levels at 8 kPa.

Explain that under PVS, the internal air bubbles tend to move from the core toward the outer crust of the alginate hydrogel, leading to a more compact and denser core but a more porosity inside the outer crust of the alginate hydrogel. The scanning electron microscope (SEM) indicates the surface roughness and multiple layer formation in the outer crust of PVS treated alginate hydrogel. For optimal performance, the application of PVS at the depressurization level was recommended at 61 kPa, seeing that a more intense stimulation showed extremely poor D and created huge internal voids, which were caused by a merging of soluble gas in the alginate hydrogel matrix. Understanding the effect of PVS on the diffusion coefficients of calcium ions, and the structural characteristics of alginate hydrogel are the key to manufacturing the simulated fruit products and other tissue engineering materials.

In the final part of this research, we study the influence of ultra-fine bubbles (UFB) on alginate hydrogel formation. The results indicated that UFB can significantly improve the gelling rate in the external gelation process. The best condition is using oxygen as the gas source and spending the generation time of 60 min. The SEM images exhibited surface porosity in alginate hydrogel which relates to the modified structure of alginate hydrogel and reduced gelation time.





## กิตติกรรมประกาศ

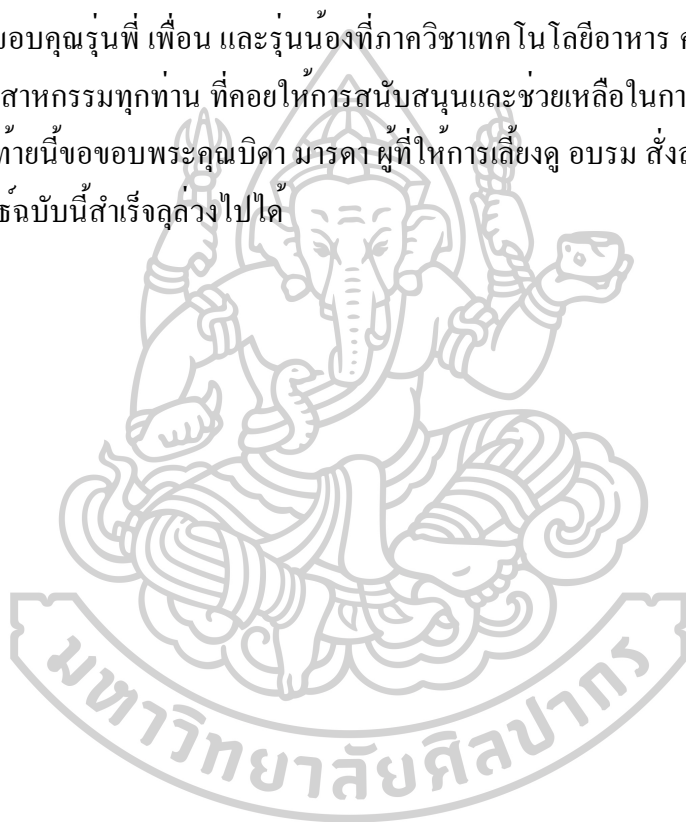
ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต อินดวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนดูแลเอาใจใส่จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนให้วิชาความรู้ต่างๆ เพื่อเป็นพื้นฐานในการต่อยอดความรู้จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณรุ่นพี่ เพื่อน และรุ่นน้องที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่าน ที่คอยให้การสนับสนุนและช่วยเหลือในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ที่ให้การเลี้ยงดู อบรม สั่งสอน และให้กำลังใจจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

นางสาว จันจิรา จิน โนรส



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	7
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 อัลจินต.....	8
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของอัลจินต .....	9
2.3 การประยุกต์ใช้อัลจินตในอุตสาหกรรม.....	10
2.4 กระบวนการเกิดอัลจินตไฮโดรเจล.....	12
2.5 การปรับปรุงคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจล .....	15
บทที่ 3 การปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของอัลจินตไฮโดรเจลด้วยเส้นใยอาหาร แบบไม่ละลายน้ำ.....	23

บทที่ 4 การประเมินความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสุญญากาศแบบจิ้งหะในระบบอัลจินตไฮโดรเจล .....	38
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้ Ultra-Fine Bubble (UFB) ในระบบอัลจินตไฮโดรเจล .....	57
บทที่ 6 การประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัย .....	77
รายการอ้างอิง .....	82
ประวัติผู้เขียน .....	99



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของอัลจินต .....	9
ตารางที่ 2 ค่าคงที่การแตกตัวของ โมโนเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในอัลจินต.....	10
ตารางที่ 3 การเกิดอัลจินตไฮโดรเจลด้วยไอออนที่มีประจุบวก (cation) ที่แตกต่างกัน .....	18
ตารางที่ 4 ผลของรังสีแกมมาต่อความหนืดและเวลาในการเกิดอัลจินตไฮโดรเจล .....	21
ตารางที่ 5 ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ของเส้นใยอาหารแต่ละชนิด.....	30
ตารางที่ 6 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อความคงตัวของอัลจินตไฮโดรเจลเมื่อผ่านการแช่แข็งและละลาย.....	35
ตารางที่ 7 ผลของสภาวะสุญญากาศและจำนวนรอบในการกระตุ้นต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน (D), อัตราการลดลงของน้ำหนัก (Rate of WR) และอัตราการหดตัว (Rate of S <sub>v</sub> ) ของอัลจินตไฮโดรเจล .....	48
ตารางที่ 8 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ จำนวน 3 รอบ <sup>1</sup> (180 นาที) ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอัลจินตไฮโดรเจล .....	53
ตารางที่ 9 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกันต่อขนาดเฉลี่ยและปริมาณของฟองอากาศในน้ำกั้น .....	67
ตารางที่ 10 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน.....	72

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของอัลจินเต: (ก) อัลจินเตโมโนเมอร์, (ข) โครงสร้างของอัลจินเตพอลิเมอร์, (ค) การกระจายตัวของกลุ่มอัลจินเตโมโนเมอร์ .....	8
ภาพที่ 2 โมเดล Egg-Box .....	13
ภาพที่ 3 การเกิดเจลของอัลจินเตแบบ Internal gelation .....	14
ภาพที่ 4 การเกิดเจลของอัลจินเตแบบ External gelation .....	15
ภาพที่ 5 รูปแบบและโครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจลที่เป็นไปได้เมื่อความเข้มข้นของไอออนแคลเซียมและปริมาณ G blocks อิสระ (เส้นสีแดง) แตกต่างกัน .....	16
ภาพที่ 6 ความหนืดของสารละลายอัลจินเตต่อรูปร่างของอัลจินเตไฮโดรเจลที่เกิดด้วยวิธี External gelation .....	17
ภาพที่ 7 คุณสมบัติเชิงกลของอัลจินเตไฮโดรเจลที่ผสมเซลลูโลสไฟเบอร์ร่วมกับ Polyethylene Glycol (PEG) .....	19
ภาพที่ 8 กราฟผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analysis) .....	27
ภาพที่ 9 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อการลดลงของน้ำหนักของอัลจินเตไฮโดรเจล...30	
ภาพที่ 10 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อค่าแรงกดตัวของอัลจินเตไฮโดรเจล .....	31
ภาพที่ 11 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุโครงสร้างบริเวณผิว .....	32
ภาพที่ 12 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุโครงสร้างด้านใน 32	
ภาพที่ 13 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อคุณสมบัติเชิงกล (mechanical characteristic) ของอัลจินเตไฮโดรเจล .....	34
ภาพที่ 14 อัลจินเตไฮโดรเจลผสมกับเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำชนิดต่างๆ ที่ 1.0% (w/w).....36	

ภาพที่ 15 ลักษณะปรากฏภายนอกและภาพตัดขวางของอัลจินเตไฮโดรเจล ซึ่งเกิดเจลภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน โดย (ก) คือตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ นาน 20 นาที และ (ข) คือตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ นาน 180 นาที .....50

ภาพที่ 16 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ จำนวน 3 รอบ (180 นาที) ต่อค่าการลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction) ของอัลจินเตไฮโดรเจล .....51

ภาพที่ 17 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ จำนวน 3 รอบ (180 นาที) ต่อค่าการหดตัว (%volume shrinkage) ของอัลจินเตไฮโดรเจล.....51

ภาพที่ 18 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะจำนวน 3 รอบ (180 นาที) ต่อลักษณะสัณฐานวิทยา (โครงสร้างภายนอก) ของอัลจินเตไฮโดรเจลที่วิเคราะห์ด้วย SEM โดยใช้ (ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า .....54

ภาพที่ 19 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะจำนวน 3 รอบ (180 นาที) ต่อลักษณะสัณฐานวิทยา (ภาพตัดขวาง) ของอัลจินเตไฮโดรเจลซึ่งวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 25 เท่า ...55

ภาพที่ 20 อุปกรณ์สำหรับสร้างอัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles, UFB).....60

ภาพที่ 21 ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมอัลจินเตไฮโดรเจล .....62

ภาพที่ 22 ฟองอากาศขนาดเล็กหรืออัลตราไฟน์บับเบิล (UFB) ที่กระจายตัวในน้ำกลั่น .....65

ภาพที่ 23 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกันต่อการกระจายตัวของฟองอากาศในน้ำกลั่น : (ก) อากาศในสภาวะปกติ (Air); (ข) ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) .....66

ภาพที่ 24 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเซตาของน้ำกลั่น .....69

ภาพที่ 25 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกันต่อค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำกลั่น.....69

ภาพที่ 26 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ต่อความหนาของอัลจินเตไฮโดรเจล (%)...71

ภาพที่ 27 ผลของการใช้ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ในการสร้าง UFB ที่เวลาต่างๆ.....74

ภาพที่ 28 ผลของการใช้ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ในการสร้าง UFB ที่เวลาต่างๆ.....75

ภาพที่ 29 การประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเพื่อสร้างผลไม้ขึ้นรูปส่วนเนื้อ (fruit pulp)..78

ภาพที่ 30 อัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดเจลในสภาวะปกติและเกิดเจลภายใต้สภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วย สูญญากาศแบบจังหวะ .....	79
ภาพที่ 31 อัลจินตไฮโดรเจลที่มีฟองอากาศ .....	81



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เทคนิคการขึ้นรูป (restructuring techniques) ถูกประยุกต์ใช้ในการผลิตอาหารเพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่วัตถุดิบที่ตกเกรดหรือวัตถุดิบที่มีราคาถูกมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 จนถึงปัจจุบัน (McHugh และ Huxsoll, 2000) เนื่องจากเทคนิคดังกล่าวสามารถผลิตอาหารให้มีส่วนผสม รูปทรง และขนาดตามความต้องการของผู้บริโภคได้ จึงทำให้สามารถพัฒนาสินค้าที่มีความหลากหลายได้อย่างไรก็ได้ ซึ่งในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคนิคการขึ้นรูปในผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลากหลายชนิด ได้แก่ เนื้อสัตว์ขึ้นรูป (Ensor และคณะ, 1989; Moreno และคณะ, 2013; Reddy และคณะ, 2014; Trout และคณะ, 1990) ผักขึ้นรูป (De Paula และคณะ, 2021; S. S. Manjunatha และ D. K. Das Gupta, 2006) และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้ในการผลิตผลไม้ขึ้นรูป (Azoubel และคณะ, 2011; Britnell, 1989; Mouquet และคณะ, 1997; Nussinovitch และ Peleg, 1990; Siritwongwilaichat และ Koedcharoenporn, 2019)

จากการศึกษาข้อมูล พบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับผลไม้ขึ้นรูปมักใช้อัลจิเนต (alginate) เป็นสารก่อเจล (gelling agent) หรือสารช่วยในการยึดเกาะ (binding agent) เนื่องจากอัลจิเนตสามารถเกิดโครงสร้างที่มีเนื้อสัมผัสใกล้เคียงกับผลไม้จริง (Glicksman, 1987) นอกจากนี้ อัลจิเนตยังสามารถละลายได้ในน้ำเย็น และเกิดเจลที่ทนร้อนได้ (thermo-irreversible gel) (Draget, 2009) ดังนั้น อัลจิเนตจึงเหมาะสมเป็นอย่างยิ่งที่จะใช้ในการขึ้นรูปผลไม้สดที่ต้องการถนอมคุณค่าทางโภชนาการ สี กลิ่น และรสชาติให้คงเดิม (Kaletunc และคณะ, 1990; Mancini และ McHugh, 2000; Raharjo, 2002)

การเกิดเจลของอัลจิเนตจำเป็นต้องอาศัยไอออนของโลหะที่เป็นพอลิวาเลนตและเป็นชนิดประจุบวก (cation) เช่น  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Ba}^{2+}$   $\text{Cu}^{2+}$  และ  $\text{Al}^{3+}$  เป็นต้น โดยไอออนชนิดประจุบวกที่นิยมใช้มากที่สุด คือ  $\text{Ca}^{2+}$  เนื่องจากสามารถเข้าไปจับกับสายโมเลกุลของอัลจิเนตและเกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า “egg box” ได้เป็นอย่างดี (Yalpani, 2013) ซึ่งกระบวนการเกิดเจลของอัลจิเนต มีอยู่ 2 วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ วิธี Internal gelation และ วิธี External gelation



การเกิดเจลแบบ Internal gelation เป็นวิธีที่มักใช้ในการขึ้นรูปผลไม้ที่มีรสเปรี้ยวเป็นพื้นฐานเดิม เช่น สับปะรด มะม่วง และเสาวรส เป็นต้น เนื่องจากวิธีนี้ต้องใช้สารประกอบแคลเซียมที่ไม่ละลายน้ำ (inactive form หรือ inert calcium source) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) หรือ แคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{CaHPO}_4$ ) หรือ แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ผสมรวมกับสารละลายอัลจินต ซึ่งแคลเซียมไอออนจะถูกควบคุมการแตกตัวด้วยกรดที่ถูกเติมลงไปในระบบ เช่น กลูโคโนเดลต้าแลคโตน (GDL) หรือ กรดอะซิติก (acetic acid) เป็นต้น ดังนั้น ประสิทธิภาพการเกิดเจลของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการแตกตัวของเกลือแคลเซียมที่กระจายอยู่ในสารละลายอัลจินต ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลานานมากกว่า 24 ชั่วโมง เพื่อให้เจลเซตตัวได้อย่างสมบูรณ์ และส่วนใหญ่จะมีการควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเสื่อมเสียของผลไม้สดที่เติมลงไป โดยเจลที่เกิดจากวิธี Internal gelation จะมีลักษณะสม่ำเสมอ (homogeneous) ยกเว้นในกรณีที่สารละลายมีความหนืดต่ำจนเกิดการตกตะกอนหรือแยกชั้น (Azoubel และคณะ, 2011; Draget, 2009; Grizotto และคณะ, 2007; Kaletunc และคณะ, 1990; Lin และคณะ, 2014; S. Manjunatha และ D. Das Gupta, 2006; Mouquet และคณะ, 1997; Nussinovitch และคณะ, 1989; Raharjo, 2002; Truong และคณะ, 1995)

สำหรับการเกิดเจลด้วยวิธี External gelation นั้น แม้ว่าจะนิยมใช้เป็นเทคนิคในการห่อหุ้ม (encapsulation) ยาหรือเซลล์เพื่อชะลอการปลดปล่อย (Chan และคณะ, 2006) แต่ก็มีมีการประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปอาหารด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปเซอริเทียม การขึ้นรูปไข่ปลาเคียว การขึ้นรูปพริกพืเมียนโท (pimiento) และการขึ้นรูปหัวหอม (onion rings) เป็นต้น (Onsoyen, 1997) การเกิดเจลแบบ External gelation เป็นการเกิดเจลแบบรวดเร็วและเกิดเจลขึ้นทันทีเมื่อสารละลายอัลจินตสัมผัสกับสารละลายแคลเซียม ซึ่งคุณลักษณะที่โดดเด่นของวิธีนี้คือ เจลที่ได้จะมีความแข็งแรงมากกว่าเจลที่เกิดแบบ Internal gelation แต่จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (inhomogeneous) เนื่องจากเมื่อสารละลายอัลจินตสัมผัสกับสารละลายแคลเซียม (แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) หรือแคลเซียมแลคเตท) แคลเซียมไอออนจะเข้าจับกับสายโมเลกุลของอัลจินตทันทีทำให้สายพอลิเมอร์เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันเกิดเป็นเจลชั้นนอกสุดที่แคลเซียมไอออนสามารถซึมผ่านได้น้อยลง จากนั้นแคลเซียมไอออนที่อยู่บริเวณด้านนอกจะแพร่ผ่าน (diffusion) เจลชั้นนอกสุดเข้าสู่บริเวณตรงกลางของอัลจินต ทำให้เจลที่อยู่ด้านนอกมีความแข็งแรงมากกว่าเจลที่อยู่ด้านใน นอกจากนี้ วิธีเกิดเจลแบบ External gelation ยังเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้สารประกอบอื่นๆ เพื่อช่วยในการเกิดเจล เช่น กรด หรือ สารจับโลหะ (EDTA) เป็นต้น (Draget, 2009; Lee และ Mooney, 2012; Pelaez และ Karel, 1981; Qin และคณะ, 2018) ยิ่งไปกว่านั้น Smidsrod และ Draget (1997) ยังได้ค้นพบว่า เจลที่ผลิตด้วยวิธี External gelation จะเกิดการหดตัวและมีของเหลวแยกตัวออกมา

(syneresis) น้อยกว่าเจลที่ผลิตด้วยวิธี Internal gelation ดังนั้น วิธีเกิดเจล แบบ External gelation จึงเป็นวิธีที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่งสำหรับประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่หลากหลาย ไม่ว่าจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการสร้างมิติของโครงสร้างที่แปลกใหม่และเสมือนจริงมากขึ้น หรือผลิตภัณฑ์ที่ต้องการลดหรือหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีหลายชนิด ตลอดจนวิธีการเกิดเจล แบบ External gelation ยังมีความเป็นไปได้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตให้ดียิ่งขึ้นได้อีกด้วย (Smidsrud และ Draget, 1997)

สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูปนั้น แม้ว่าการผสมอัลจินเตกับเนื้อผลไม้บดละเอียด (fruit puree) หรือน้ำผลไม้เข้มข้นจะสามารถสร้างผลิตภัณฑ์ทางเลือกในกลุ่มผลไม้ขึ้นรูปที่มีความแปลกใหม่ให้แก่ผู้บริโภคได้นั้น แต่กลับพบว่าลักษณะเนื้อสัมผัสของผลไม้ขึ้นรูปยังมีความแตกต่างกับผลไม้จริงเป็นอย่างมาก (Uchida และ Asai, 2008) เนื่องจากในปัจจุบันวิธีการผลิตผลไม้ขึ้นรูปโดยทั่วไปจะมีส่วนผสมหลักเพียง 2 ชนิด ได้แก่ เนื้อผลไม้บดละเอียดหรือน้ำผลไม้เข้มข้น และไฮโดรคอลลอยด์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารก่อเจล (da Silva Costa และคณะ, 2020; Mouquet และคณะ, 1992) นอกจากนี้ Nussinovitch และ Peleg (1990) ใ้รายงานว่าการใช้ปริมาณผลไม้มากขึ้น ทำให้เจลมีความแข็งแรงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งความแข็งแรงของเจลที่ลดลงนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผลไม้ที่ใช้ และการทำปฏิกิริยากันระหว่างองค์ประกอบแต่ละชนิด เช่น น้ำตาล และไฮโดรคอลลอยด์ เป็นต้น (Mancini และ McHugh, 2000; S. S. Manjunatha และ D. K. Das Gupta, 2006; Nussinovitch และ Peleg, 1990) ด้วยเหตุนี้ คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลไม้ขึ้นรูปในปัจจุบันจึงแปรผันตรงกับโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของไฮโดรคอลลอยด์ที่เลือกใช้เป็นหลัก (Danalache และคณะ, 2015) อีกทั้งงานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นเฉพาะการปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลไม้ขึ้นรูปด้วยการผสมไฮโดรคอลลอยด์มากกว่า 1 ชนิด (Azoubel และคณะ, 2011; da Silva Costa และคณะ, 2020; Grizotto และคณะ, 2007; Leal และคณะ, 2021; Lin และคณะ, 2014; Luh และคณะ, 1977; Mancini และ McHugh, 2000; Nussinovitch และ Peleg, 1990) เช่น การใช้อัลจินเตร่วมกับผงวุ้น (agar) เพื่อให้สามารถเพิ่มปริมาณผลไม้ที่ใช้ได้ แต่กลับพบว่าวุ้นที่เติมลงไปทำให้เจลที่ได้มีเนื้อสัมผัสที่แข็งเปราะแตกหักง่าย (Nussinovitch และ Peleg, 1990) นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาผลของการผสมอัลจินเตกับเพคติน (Mancini และ McHugh, 2000) หรือการใช้อัลจินเตร่วมกับเจลาติน (Azoubel และคณะ, 2011; Lin และคณะ, 2014) โดยพบว่าสามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลไม้ขึ้นรูปได้ แต่เจลที่ได้กลายเป็นเจลแบบ thermo-reversible gel ที่ไม่มีความคงตัวเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเสริมหรือเพิ่มสารบางชนิดเข้าสู่ระบบของอัลจินเตไฮโดรเจล มักจะทำลายจุดเด่นหรือข้อดีที่สำคัญของผลไม้ขึ้นรูปที่ใช้อัลจินเตเป็นสารก่อเจล

จากที่กล่าวมาในข้างต้น สามารถสรุปปัญหาที่สำคัญของเทคนิคการขึ้นรูปผลไม้ได้ 2 ประเด็นหลัก คือ กระบวนการเกิดเจลด้วยอัลจินเตียยังต้องใช้เวลาอันยาวนานเพื่อให้เกิดเจลอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการนำไปประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม และแม้ว่าอาหารแต่ละประเภท จะมีโครงสร้างและคุณลักษณะเนื้อสัมผัสที่แตกต่างกัน แต่ในปัจจุบันกลับพบว่าโครงสร้างและคุณลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารที่ขึ้นรูปด้วยอัลจินเตียยังคงเป็นรูปแบบเดิมๆ และเป็นรูปแบบเดียวกันในอาหารทุกประเภท ซึ่งถือว่าเป็นข้อจำกัดที่ทำให้การขึ้นรูปหลายชนิดยังไม่สามารถพัฒนาให้เหมือนของจริงได้

หากใคร่ตรองถึงสาเหตุที่ทำให้ผลไม้ขึ้นรูปมีเนื้อสัมผัสที่แตกต่างจากผลไม้จริง จะพบว่าผลไม้จริงประกอบด้วยโครงสร้างของเนื้อเยื่อถาวร (parenchyma tissue) ที่มีช่องว่างระหว่างเซลล์ (intercellular space) (Chang และคณะ, 2021) โดยผนังเซลล์ที่พบในผลไม้จริงมีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และโปรตีน ซึ่งโครงสร้างและองค์ประกอบเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อเนื้อสัมผัสของผลไม้จริงตามธรรมชาติ (Posé และคณะ, 2019) แต่สำหรับผลไม้ขึ้นรูปนั้น มีเพียงโครงสร้างของเจลที่ประกอบด้วย ไฮโดรคอลลอยด์ (0.5 -2.0%) น้ำ (60-90%) และผลไม้จริง (10-40%) อีกทั้ง การปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอัลจินเตียด้วยการเพิ่มปริมาณผลไม้ อาจมีข้อจำกัดและไม่สามารถทำได้ในผลไม้บางประเภท เช่น ผลไม้ที่มีความข้นหนืดสูง (Kaletunc และคณะ, 1990; Nussinovitch และคณะ, 1989) หรือผลไม้ที่มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ต่ำกว่า 3.5 เพราะอัลจินเตียจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอัลจินิกซึ่งเกิด โครงสร้างเจลที่แตกต่างจากเจลที่เกิดจากแคลเซียมในรูปแบบปกติ (Glicksman, 1983; Mouquet และคณะ, 1992) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลงานวิจัยที่เผยแพร่ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันจะเห็นได้ว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับการเพิ่มความสามารถในการเกิดเจลด้วยการใช้ไฮโดรคอลลอยด์แบบผสม โดยใช้เทคนิคหรือเทคโนโลยีแบบเดิม จึงก่อเกิดผลลัพธ์ที่ไม่ต่างไปจากเดิมมากนัก อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้การกระตุ้นเชิงกลในระบบอัลจินเตียไฮโดรเจล โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัลจินเตียไฮโดรเจลที่เกิดแบบ External gelation ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้การกระตุ้นเชิงกลในระบบอัลจินเตียไฮโดรเจลเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต ตลอดจนค้นหาแนวทางใหม่ในการพัฒนาเนื้อสัมผัสของผลไม้ขึ้นรูป ภายใต้แนวคิดของการลอกเลียนแบบตั้งแต่องค์ประกอบที่มีในผลไม้จริงจนถึงโครงสร้างที่เป็นไปตามธรรมชาติ ซึ่งอาจนำไปสู่วิธีการใหม่ที่สามารถผลิตผลไม้ขึ้นรูป (restructured fruit products) หรือผลิตภัณฑ์เลียนแบบผลไม้ (simulated fruit products) หรืออาหารขึ้นรูปอื่นๆ ให้มีคุณลักษณะที่เสมือนของจริงมากยิ่งขึ้นได้ต่อไปในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของอัลจิเนตไฮโดรเจลด้วยเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ และประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูป

1.2.2 ประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคสูญญากาศแบบจังหวะในระบบอัลจิเนตไฮโดรเจล

1.2.3 ศึกษาผลของการประยุกต์ใช้อัลตราฟายน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles, UFB) ต่อการเกิดเจลและคุณลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอัลจิเนตไฮโดรเจล

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 อัลจิเนตไฮโดรเจลที่มีส่วนประกอบของใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำจะมีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับส่วนเนื้อของผลไม้จริงตามธรรมชาติ

1.3.2 การกระตุ้นด้วยสูญญากาศแบบจังหวะสามารถเพิ่มอัตราการเกิดเจลและปรับปรุงโครงสร้างของอัลจิเนตไฮโดรเจลให้มีความหลากหลายได้

1.3.3 การใช้อัลตราฟายน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles, UFB) ในการเตรียมสารละลายอัลจิเนต สามารถเพิ่มจำนวนรูพรุนในโครงสร้างของอัลจิเนตไฮโดรเจลและส่งผลให้อัตราการเกิดเจลเพิ่มขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 การปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของอัลจิเนตไฮโดรเจลด้วยเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ และประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูป

ศึกษาผลของชนิดเส้นใยอาหาร จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ เส้นใยอาหารจากเมล่อน เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ เส้นใยอาหารจากโยสุม และเส้นใยอาหารเซลลูโลส โดยศึกษาปริมาณเส้นใยอาหารที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% (w/w) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพของอัลจิเนตไฮโดรเจล เช่น ความสามารถในการอุ้มน้ำ ค่าการลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction) ค่าการหดตัว (%volume shrinkage) ลักษณะเนื้อสัมผัส (textural characteristics) และความคงตัวเมื่อผ่านการแช่แข็งและละลาย (freeze-thaw Stability) ของอัลจิเนตไฮโดรเจล

1.4.2 การประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคสุญญากาศแบบจิ้งหหวะในระบบอัลจิเนตไฮโดรเจล

ศึกษาการกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่แตกต่างกัน 3 ระดับ (8, 35 และ 61 kPa) เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม (101 kPa) โดยทำการกระตุ้นจำนวน 3 รอบ ( 1 รอบ ประกอบด้วยการปรับสภาวะให้เป็นสุญญากาศ นาน 10 นาที และปรับให้เป็นสภาวะความดันบรรยากาศ นาน 10 นาที ทำเช่นนี้ 3 ครั้ง) จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน (diffusion coefficients,  $D$ ) ค่าการลดลงของน้ำหนัก ค่าการหดตัว ลักษณะเนื้อสัมผัส และ โครงสร้างจุลภาคของอัลจิเนตไฮโดรเจล

1.4.3 การศึกษาผลของการประยุกต์ใช้อัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles, UFB) ต่อการเกิดเจลและคุณลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอัลจิเนตไฮโดรเจล

1.4.3.1 ศึกษาผลของชนิดก๊าซ จำนวน 3 ชนิด ได้แก่ อากาศในสภาวะปกติ (Air) ก๊าซออกซิเจน( $O_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่ใช้ระยะเวลาในการสร้าง UFB ต่างกัน 3 ระดับ คือ 15, 30 และ 60 นาที ต่อขนาดและปริมาณของ UFB ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำกลั่น ตลอดจนความเป็นกรดด่าง (pH) และค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้า (zeta potential) ของน้ำกลั่น

1.4.3.2 ศึกษาผลของการใช้น้ำที่มีอัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles, UFB) จากอากาศในสภาวะปกติ (Air) ก๊าซออกซิเจน( $O_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ที่ใช้ระยะเวลาในการสร้าง UFB ต่างกัน 3 ระดับ คือ 15, 30 และ 60 นาที ต่อการเกิดเจลของอัลจิเนตไฮโดรเจล โดยวิเคราะห์ค่าความหนาของเจล (%) และคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน

1.4.3.3 ศึกษาผลของการใช้น้ำที่มีอัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles, UFB) จากก๊าซออกซิเจน( $O_2$ ) ที่ใช้ระยะเวลาในการสร้าง UFB ต่างกัน 3 ระดับ คือ 15, 30 และ 60 นาที ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอัลจิเนตไฮโดรเจล

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถประยุกต์ใช้องค์ความรู้ในการสร้างผลไม้ขึ้นรูป (restructured fruit) ทั้งส่วนเนื้อและส่วนเปลือกให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสเสมือนจริง ภายใต้แนวความคิดการปรับองค์ประกอบหลักและการปรับโครงสร้างจุลภาคให้ใกล้เคียงผลไม้ต้นแบบ

1.5.2 สามารถประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดออลจินเนตไฮโดรเจล แบบ External gelation ได้

1.5.3 สามารถประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลำเลียงมวลสารผ่านไฮโดรเจลได้

1.5.4 สามารถประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัย เพื่อสร้างวัสดุทางชีวภาพที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties) ตรงตามความต้องการได้

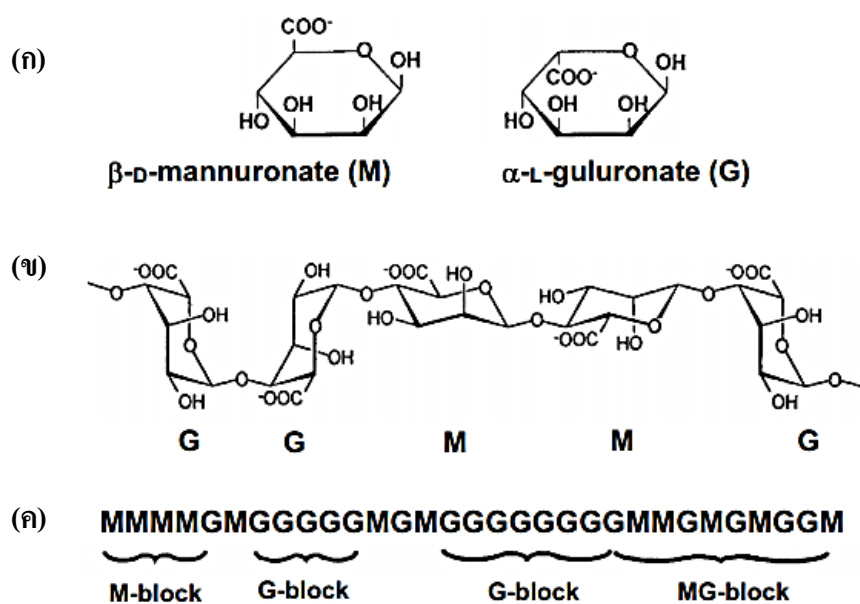


## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อัลจิเนต

อัลจิเนต (Alginate) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ธรรมชาติที่มีโครงสร้างลักษณะสายตรงไม่มีการแตกแขนง (unbranched binary copolymers) ผลิตได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาลและแบคทีเรียบางชนิด เช่น *Azotobacter vinelandii* (Sadoff, 1975) และ *Pseudomonades aeruginosa* (Linker และ Jones, 1966) เป็นต้น ซึ่งภายในโครงสร้างของอัลจิเนตประกอบด้วย D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ (1-4) ไกลโคซิดิก (Draget, 2016) (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของอัลจิเนต: (ก) อัลจิเนตโมโนเมอร์, (ข) โครงสร้างของอัลจิเนตพอลิเมอร์, (ค) การกระจายตัวของกลุ่มอัลจิเนตโมโนเมอร์

ที่มา: Draget (2016)

## 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของอัลจินต

### 2.2.1 ผลของน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight)

อัลจินตที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันจะมีความหนืดที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 1 พบว่า อัลจินตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ก็จะมีมีความหนืดที่สูงเช่นกัน (Kelco, 1987)

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดของอัลจินต

ความหนืด	น้ำหนักโมเลกุล	จำนวนโมโนเมอร์ที่ต่อกัน
อัลจินตที่มีความหนืดต่ำ	12,000-80,000	60-400
อัลจินตที่มีความหนืดปานกลาง	80,000-120,000	100-600
อัลจินตที่มีความหนืดสูง	120,000-190,000	600-1000

ที่มา: KELCO (1987)

### 2.2.2 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความหนืดของสารกลุ่มไฮโดรคอลลอยด์ โดยพบว่า ความหนืดของอัลจินตจะมีค่าลดลง ประมาณ 2.5% ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 1 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม หากให้ความร้อนแก่อัลจินตที่อุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานหลายชั่วโมง จะทำให้เกิดการแยกตัวกันของโมโนเมอร์ (depolymerization) และส่งผลให้ความหนืดของอัลจินตลดลง นอกจากนี้ สารละลายอัลจินตยังมีความคงตัวและทนต่อสภาวะการแช่แข็งได้เป็นอย่างดี โดยพบว่าเมื่อนำสารละลายอัลจินตไปแช่แข็งหรือนำมาละลาย ความหนืดของสารละลายอัลจินตก็จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

### 2.2.3 ผลของความเป็นกรดด่าง (pH)

ความคงตัวของอัลจินตต่อค่า pH ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ mannuronic acid ต่อ guluronic acid ที่มีอยู่ในอัลจินต และจะแปรเปลี่ยนไปตามสายพันธุ์ของสาหร่ายสีน้ำตาลที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตอัลจินต เนื่องจาก โมโนเมอร์ของอัลจินตนั้นมีค่าคงที่การแตกตัว (dissociation constants, pKa) แตกต่างกันไป ซึ่งพบว่า mannuronic acid และ guluronic acid มีค่า pKa เท่ากับ 3.38 และ 3.65 ตามลำดับ (Haug, 1964; Nussinovitch, 1997) (ตารางที่ 2) โดยส่วนใหญ่สารละลายอัลจินตจะมีความคงตัวที่ pH 5-11 แต่หากมีค่า pH ต่ำกว่า 5 หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ที่อยู่ในรูปอิสระ



(-COO-) จะเริ่มอยู่ในรูป COOH ทำให้แรงผลักทางไฟฟ้า (electrostatic repulsion) ระหว่างสายของอัลจินเตลดลง จากนั้นสายของอัลจินเตจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและเกิดพันธะไฮโดรเจน จึงส่งผลให้สารละลายอัลจินเตมีความหนืดที่สูงขึ้น (Manufacture และ King, 2019) นอกจากนี้ยังพบว่าอัลจินเตจะไม่มีเสถียรภาพเมื่อค่าความเป็นกรดต่ำกว่ามากกว่า 10 ( $\text{pH} > 10$ ) เพราะจะเกิดการแยกตัวกันของโมโนเมอร์ ทำให้ความหนืดของอัลจินเตลดลง แต่หากค่า  $\text{pH}$  น้อยกว่า 3.5 เจลของกรดอัลจินิก (alginic acid) จะเกิดขึ้น

**ตารางที่ 2** ค่าคงที่การแตกตัวของโมโนเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักในอัลจินเต

ชนิดของโมโนเมอร์	ค่าคงที่การแตกตัว (pKa)
Mannuronic Acid	3.38
Guluronic Acid	3.65

ที่มา: Haug (1964)

#### 2.2.4 ผลของแคลเซียมไอออน

หากแคลเซียมไอออนมีปริมาณเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้ความหนืดของอัลจินเตเพิ่มขึ้น แต่หากมีในปริมาณที่มากจะทำให้เกิดเป็นเจลที่แข็งแรง ซึ่ง ไอออนชนิดประจุบวกแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการเข้าจับกับสายพอลิเมอร์ของอัลจินเต บริเวณ guluronic acid ได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสัมพรรคภาพ (affinity) ของอัลจินเตกับไอออนชนิดประจุบวกแต่ละชนิด โดยเรียงลำดับตามความสามารถในการเข้าจับกันได้ ดังนี้  $\text{Mg} \ll \text{Ca} < \text{Sr} < \text{Ba} < \text{Cd} < \text{Cu} < \text{Pb}$  (Haug, 1964)

### 2.3 การประยุกต์ใช้อัลจินเตในอุตสาหกรรม

ในปัจจุบัน อัลจินเตเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร (อาหารขึ้นรูป) และ อุตสาหกรรมยา (ชะลอการปลดปล่อยตัวยาคด้วยการเอนแคปซูลชัน) เป็นต้น เนื่องจากอัลจินเตมีความปลอดภัย ไม่เป็นอันตราย และย่อยสลายได้ ตลอดจนอัลจินเตสามารถทำหน้าที่ต่างๆ ได้ดี ไม่ว่าจะเป็น อิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) สารเพิ่มความคงตัว (stabilizer) สารที่ช่วยในการห่อหุ้ม (encapsulating agent) สารเพิ่มความข้นหนืด (thickening agent) สารก่อเจล (gelling agent) เป็นต้น (Chen และคณะ, 2015; Hay และคณะ, 2013; Jain และ Bar-Shalom, 2014)

### 2.3.1 การใช้อัลจิเนตในอุตสาหกรรมอาหาร

อัลจิเนตถูกใช้ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างแพร่หลาย ซึ่งคุณสมบัติของอัลจิเนตและไฮโดรเจลที่เกิดขึ้นสามารถปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ โดยการปรับชนิดและปริมาณของอัลจิเนต ตลอดจนสัดส่วนของสารประกอบอื่นๆ ที่เติมลงไปในการผลิต (Gacesa, 1988) ในปัจจุบันมีสิทธิบัตรและผลงานตีพิมพ์จำนวนมากที่ใช้อัลจิเนตในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวในไอศกรีม ใช้เป็นสารเคลือบเนื้อและปลาเพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ใช้ในการขึ้นรูปอาหาร ใช้ปรับปรุงคุณภาพอาหารแช่เยือกแข็ง เป็นต้น (Chrastil, 1991; Furia, 1973; Luh และคณะ, 1976)

สำหรับการใช้อัลจิเนตขึ้นรูปผลไม้ถือว่าเป็นการประยุกต์ใช้ที่น่าสนใจและมีการศึกษามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1940 โดยประยุกต์ใช้อัลจิเนตในการขึ้นรูปเชอรี่ ด้วยเทคนิคการเกิดเจลแบบ External gelation ซึ่งเชอรี่ขึ้นรูปนี้ถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ขนมอบได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเชอรี่ที่ขึ้นรูปด้วยอัลจิเนตสามารถทนต่อความร้อนได้โดยไม่เกิดการหลอมละลาย (Nussinovitch, 1997) นอกจากนี้ยังมีการใช้อัลจิเนตในการขึ้นรูปผลไม้สดหลากหลายชนิด เนื่องจากอัลจิเนตสามารถขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน โดยไม่จำเป็นต้องกระตุ้นด้วยความร้อน (cold setting) (Kaletunc และคณะ, 1990; Mancini และ McHugh, 2000) ตัวอย่างเช่น การใช้อัลจิเนตขึ้นรูปมะม่วง และอะโวคาโด เป็นต้น (Raharjo, 2002)

### 2.3.2 การใช้อัลจิเนตในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีชีวภาพ

อัลจิเนตถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีชีวภาพได้เป็นอย่างดี เนื่องจากอัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์ที่ปลอดภัย และมีความเป็นรูพรุน (porosity) (Shoichet และคณะ, 1996) สำหรับตัวอย่างการใช้อัลจิเนตในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีชีวภาพ ได้แก่ การห่อหุ้มเซลล์ไว้ในอัลจิเนตไฮโดรเจลเพื่อทำให้เซลล์นั้นมีเสถียรภาพที่ดี หรือ การใช้อัลจิเนตในการตรึงรูปเซลล์ (แบคทีเรีย เชื้อรา เอนไซม์ และเซลล์พืชชนิดต่างๆ) เป็นต้น (Kierstan และ Bucke, 2000; Martinsen และคณะ, 1991; Smidsrød และ Skja, 1990)

### 2.3.3 การใช้อัลจินตในอุตสาหกรรมยา

การนำส่งตัวยาไปที่ระบบชีวภาพเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรมยา โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้ควบคุมการนำส่งและปลดปล่อยตัวยาจะต้องเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับตัวยา ไม่มีอันตรายหรือสารพิษ และสามารถควบคุมการปลดปล่อยของยาได้ ซึ่งอัลจินตก็เป็นพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งที่สามารถใช้ในอุตสาหกรรมยาได้เป็นอย่างดี (Kwok และคณะ, 1991; Stockwell และคณะ, 1986)

## 2.4 กระบวนการเกิดอัลจินตไฮโดรเจล

กระบวนการเกิดอัลจินตไฮโดรเจลโดยทั่วไปสามารถแบ่งได้ 2 รูปแบบด้วยกัน คือ การเกิดอัลจินตไฮโดรเจลแบบ Ionic cross-linking และการเกิดอัลจินตไฮโดรเจลแบบ alginic acid gel ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

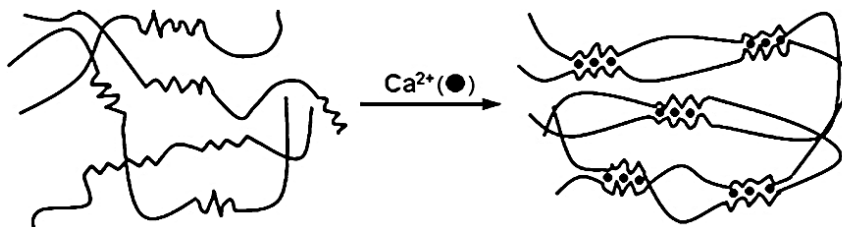
### 2.4.1 การเกิดอัลจินตไฮโดรเจลแบบ Ionic cross-linking

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของอัลจินต คือ ความสามารถในการเกิดไฮโดรเจลด้วยไอออนของโลหะที่เป็นพอลิวาเลนต์และเป็นชนิดประจุบวก เช่น แคลเซียมไอออน (Grant และคณะ, 1973) ซึ่งสามารถแสดงปฏิกิริยาการเกิดเจลของอัลจินตได้ดังสมการต่อไปนี้

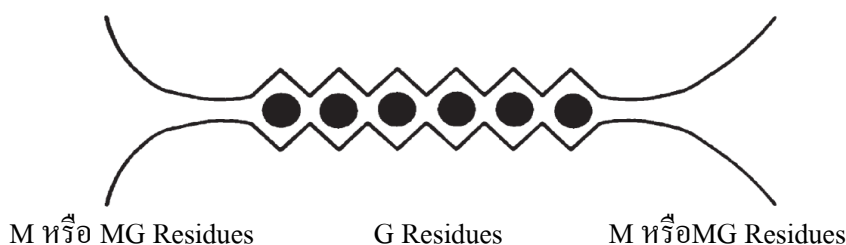


Grant และคณะ (1973) ได้อธิบายกลไกการเกิดเจลของอัลจินตไว้ว่า การเกิดเจลจะสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ นอกจากนี้การเกิดเจลของอัลจินตยังขึ้นอยู่กับส่วนที่เป็นกลุ่มของ guluronic acid เนื่องจากไอออนของแคลเซียมจะเข้าไปจับกับสายโมเลกุลของอัลจินตบริเวณที่มี guluronic acid เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว และเกิดเป็น โครงสร้าง 3 มิติ ที่มีลักษณะคล้าย “egg box” ดังภาพที่ 2

ก) กลไกการเกิดเจลของอัลจินตกับแคลเซียมไอออน



ข) การจับกันระหว่างสายโพลิเมอร์ของอัลจินตบริเวณที่เป็น guluronic acid กับแคลเซียมไอออน



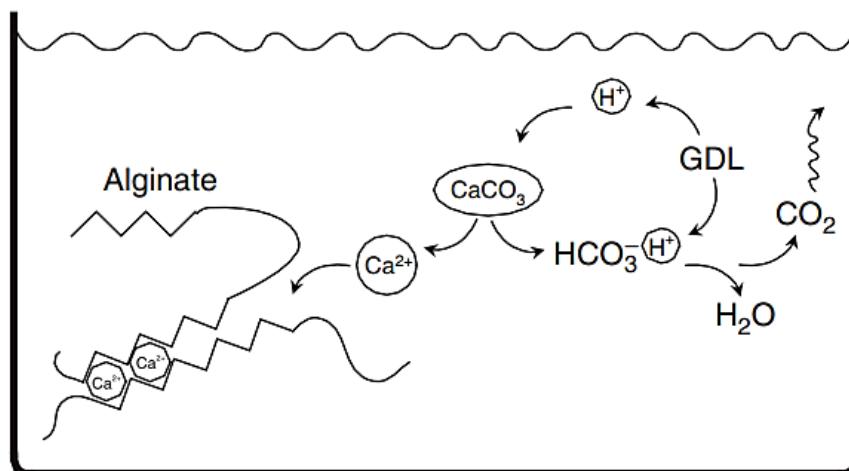
ภาพที่ 2 โมเดล Egg-Box

ที่มา: Skjåk-Bræk และ Draget (2012)

โดยทั่วไปอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากการใช้แคลเซียมไอออน (Ionic crosslinking) สามารถเกิดได้ 2 วิธี ได้แก่ การเกิดเจลแบบ Internal gelation และการเกิดเจลแบบ External gelation ซึ่งทั้ง 2 วิธีมีหลักการและกลไกการเกิดเจลที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

#### 2.4.1.1 การเกิดเจลแบบ Internal gelation

การเกิดเจลแบบ Internal gelation จะมีการใช้สารประกอบแคลเซียมที่ละลายน้ำได้ยาก (inactive form หรือ inert calcium source) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) หรือ แคลเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{CaHPO}_4$ ) หรือ แคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ผสมรวมโดยตรงกับสารละลายอัลจินต ซึ่งแคลเซียมไอออนจะถูกควบคุมการแตกตัวด้วยกรดอ่อนที่ถูกลบลงไปในระบบ เช่น กลูโคโนเดลต้าแลคโตน (GDL) หรือ กรดอะซิติก (acetic acid) เป็นต้น ดังนั้น ประสิทธิภาพการเกิดเจลของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับอัตราการแตกตัวของเกลือแคลเซียมที่กระจายอยู่ในสารละลายอัลจินตเป็นหลัก (Skjåk-Bræk และ Draget, 2012) (ภาพที่ 3)

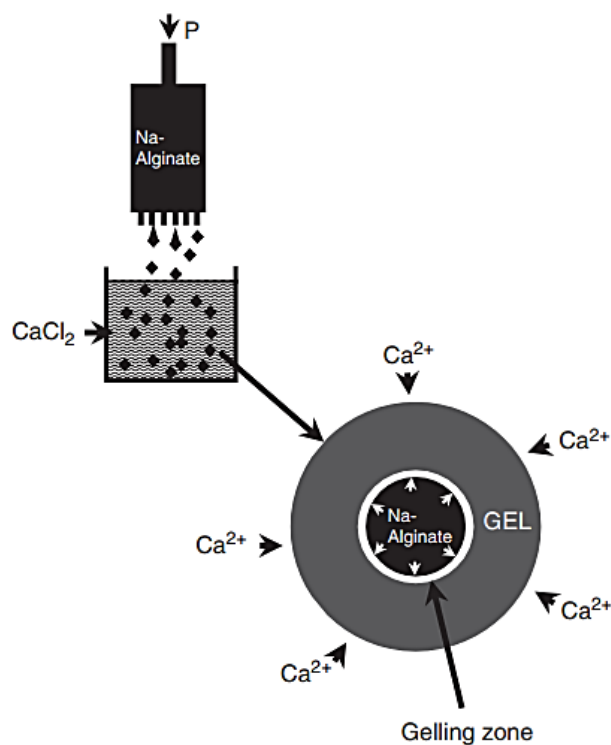


ภาพที่ 3 การเกิดเจลของอัลจินตแบบ Internal gelation

ที่มา: Skjåk-Bræk และ Draget (2012)

#### 2.4.1.2 การเกิดเจลด้วยวิธี External gelation

สำหรับการเกิดเจลด้วยวิธี External gelation นั้น จะหยดหรือบีบสารละลายอัลจินตลงในสารละลายแคลเซียม เมื่อสารละลายอัลจินตสัมผัสกับสารละลายแคลเซียม (เช่น สารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือแคลเซียมแลคเตท) แคลเซียมไอออนจะเข้าจับกับสายโมเลกุลของอัลจินตทันทีทำให้สายโพลิเมอร์เคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันเกิดเป็นเจลชั้นนอกสุดที่แคลเซียมไอออนสามารถซึมผ่านได้น้อยลง จากนั้นแคลเซียมไอออนที่อยู่บริเวณด้านนอกจะแพร่ผ่าน (Diffusion) เจลชั้นนอกสุดเข้าสู่บริเวณตรงกลางของอัลจินต ทำให้เจลที่อยู่ด้านนอกมีความแข็งแรงมากกว่าเจลที่อยู่ด้านใน (Draget, 2009; Mousavi และคณะ, 2019; Qin และคณะ, 2018; Skjåk-Bræk และ Draget, 2012) (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 การเกิดเจลของอัลจิเนตแบบ External gelation  
ที่มา: Skjåk-Bræk และ Draget (2012)

#### 2.4.2 การเกิดอัลจิเนตไฮโดรเจลแบบ Alginic acid gel

การเกิดอัลจิเนตไฮโดรเจลแบบ Alginic acid gel ทำได้โดยปรับให้ระบบมีค่า pH ต่ำกว่า pKa หรือ ต่ำกว่า 3.5 (Haug, 1964) ซึ่งการเกิดเจลวิธีนี้มักใช้กรดที่เกิดการแตกตัวได้อย่างช้าๆ เช่น GDL เติมลงไปในการละลายอัลจิเนตโดยตรง จากนั้นสารละลายอัลจิเนตจะเปลี่ยนเป็นเจลภายใน 30-60 นาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและขนาดโมเลกุลของอัลจิเนต กล่าวคือ หากใช้อัลจิเนตที่มีปริมาณ guluronic acid ปริมาณสูง เจลที่ได้ก็จะมีความแข็งแรงของโครงสร้าง (modulus) ที่สูงด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ การใช้อัลจิเนตที่มีปริมาณ manuronic acid ในปริมาณมากจะส่งเสริมการเกิดเจลแบบ alginic acid gel ให้ดีขึ้น เนื่องจาก manuronic acid มีค่า pKa ต่ำกว่า guluronic acid (Draget และคณะ, 1994)

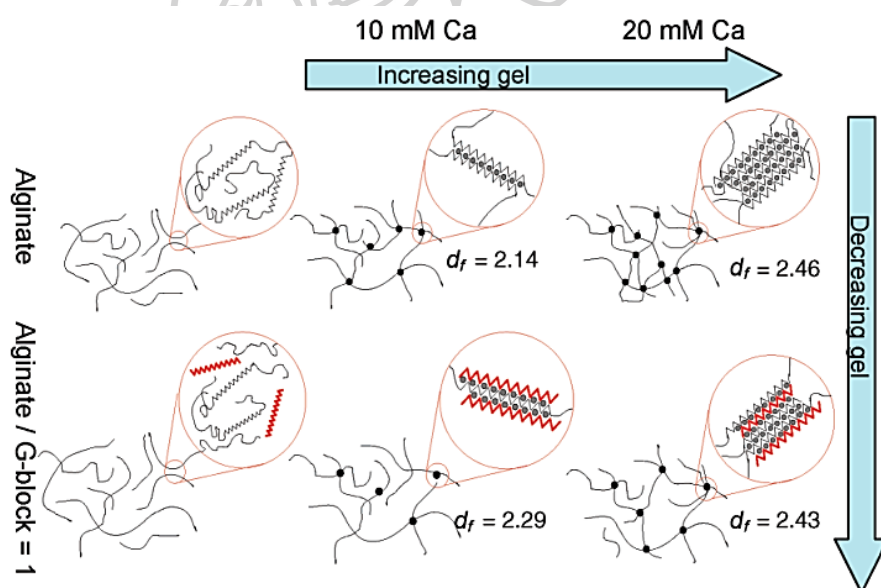
#### 2.5 การปรับปรุงคุณสมบัติของอัลจิเนตไฮโดรเจล

อัลจิเนตไฮโดรเจลเป็นวัสดุทางชีวภาพที่น่าสนใจและนิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถเกิดเจลที่ทนต่อความร้อนได้ เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการเข้า

กันได้ดีทางชีวภาพที่ดี มีความสามารถในการขนส่งสารต่างๆ (Hoffman, 2012) อีกทั้งยังมีความสามารถในการจับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี (Peppas และคณะ, 2006) อย่างไรก็ตาม อัลจินเนตไฮโดรเจลยังคงมีข้อจำกัดสำคัญเกี่ยวกับคุณสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ที่มีผลต่อการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ซึ่งในปัจจุบันมีงานวิจัยทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณภาพของอัลจินเนตไฮโดรเจลด้วยหลากหลายแนวทาง ดังต่อไปนี้

### 2.5.1 ผลของการผสมพอลิเมอร์ทางชีวภาพชนิดอื่นต่อคุณสมบัติของอัลจินเนตไฮโดรเจล

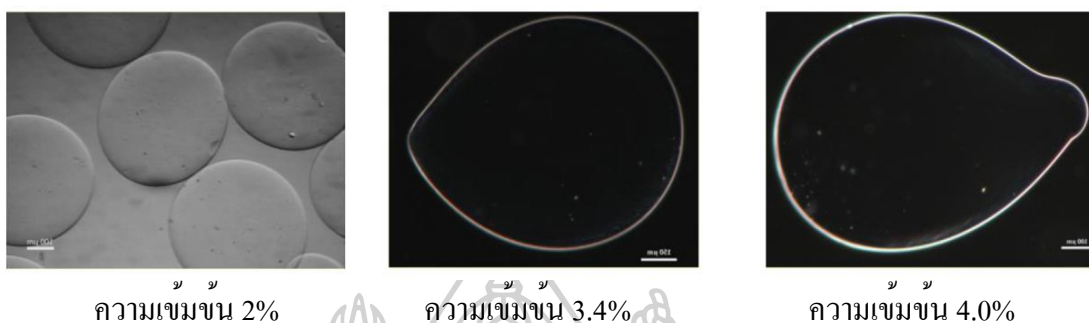
เริ่มต้นจากการศึกษาผลของสารตั้งต้นที่มีผลต่อการเกิดอัลจินเนตไฮโดรเจล ซึ่งได้แก่ สายของกรดกลูโคโนนิก (Guluronic acid block, G-block) และไอออนของแคลเซียม จากผลการศึกษาได้ค้นพบว่า การเพิ่มปริมาณแคลเซียมไอออนส่งผลให้อัลจินเนตไฮโดรเจลมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่กลับพบว่า ความแข็งแรงของอัลจินเนตไฮโดรเจลจะมีค่าลดลง พร้อมทั้งต้องใช้เวลาในการเกิดเจลที่นานขึ้น เมื่อปริมาณ G block เพิ่มขึ้น (Jørgensen และคณะ, 2007) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 5 รูปแบบและโครงสร้างของอัลจินเนตไฮโดรเจลที่เป็นไปได้เมื่อความเข้มข้นของไอออนแคลเซียมและปริมาณ G blocks อิสระ (เส้นสีแดง) แตกต่างกัน

ที่มา : Jørgensen และคณะ (2007)

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อสารละลายอัลจินตที่ใช้มีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น หรือมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ได้อัลจินตไฮโดรเจลทรงกลมที่มีขนาดใหญ่มากขึ้น ตลอดจนทำให้เกิดรูปทรงที่ไม่เป็นทรงกลมและมีปลายแหลมเกิดขึ้น (tail formation) ภาพที่ 6 (Bhujbal และคณะ, 2014)



ภาพที่ 6 ความหนืดของสารละลายอัลจินตต่อรูปทรงของอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดด้วยวิธี External gelation

ที่มา: Bhujbal และคณะ (2014)

อัลจินตสามารถเกิดเจลร่วมกับไอออนที่มีประจุบวก (cation) ทั้งแบบ monovalent, divalent และ trivalent cations ซึ่งอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากไอออนที่มีประจุบวกแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 3) และเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกัน เช่น อัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับ  $\text{Ca}^{2+}$  (Ca-alginate gels) เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การผลิตผลไม้ขึ้นรูป เนื้อสัตว์ขึ้นรูป โยเกิร์ต เยลลี่ และน้ำสลัด เป็นต้น ส่วนอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับ  $\text{Ba}^{2+}$  (Ba-alginate gels) นั้น มีความปลอดภัยในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยา และอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาร่วมกับ  $\text{Sr}^{2+}$  (Sr-alginate gels) เหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นวัสดุชีวภาพในการสร้างกระดูก การเพิ่มจำนวนหรือปลูกถ่ายเซลล์ เป็นต้น (Hu และคณะ, 2021)



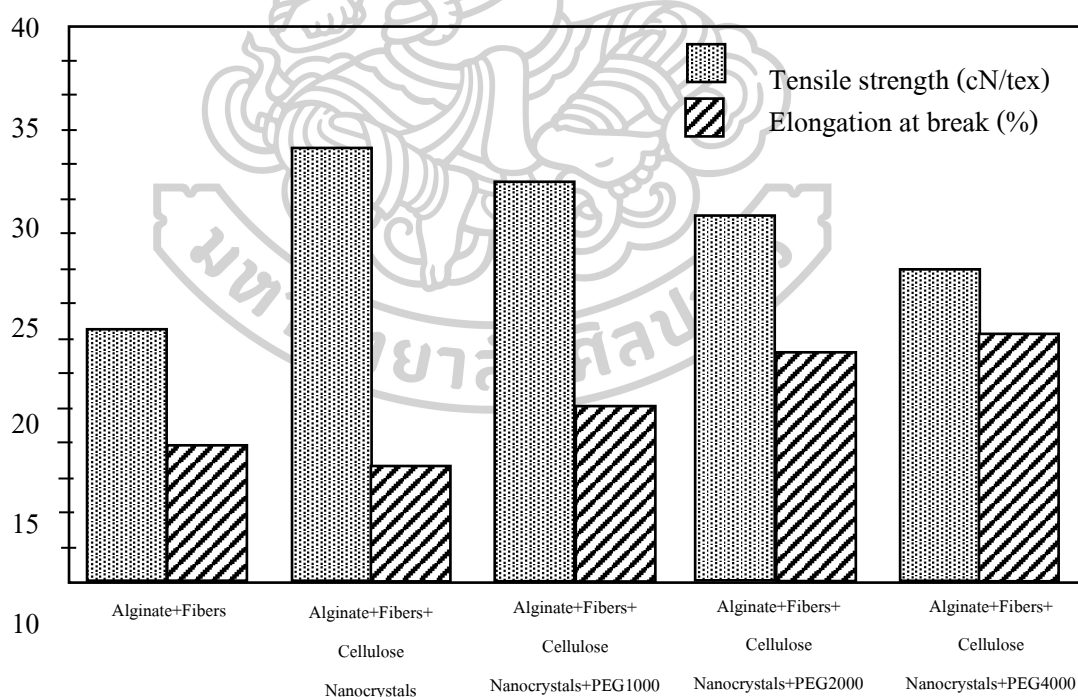
ตารางที่ 3 การเกิดอัลจินเตไฮโดรเจลด้วยไอออนที่มีประจุบวก (cation) ที่แตกต่างกัน

ประเภท ของไอออน (Cross-link ions)	รูปแบบการเชื่อมต่อกัน (Binding mode)	คุณลักษณะ (Characteristics)
$H^+$	Carboxyl protonation	การเกิดเจลควบคุมได้ยาก และอัลจินเตไฮโดรเจลเป็นแบบ Inhomogeneous gel
$Ca^{2+}$	Egg-box model (with carboxylate of G and MG, mainly G)	เตรียมง่าย มีความปลอดภัย และได้เป็นเจลแบบ non-toxic gel
$Ba^{2+}$	Egg-box model (with carboxylate of G and M, mainly G)	มีเสถียรภาพทั้งสภาวะที่ pH เป็นกรดและเป็นกลาง
$Cu^{2+}$	Analogous egg-box model (with carboxylate of G and M, no preferential selection)	เป็นไอออนที่มีแรง Affinity กับสายอัลจินเตได้มากกว่า $Ca^{2+}$ ถึง 10 เท่า
$Sr^{2+}$	Analogous egg-box model (with carboxylate of G and MG, mainly G)	เป็น Nontoxic gel ที่มีเสถียรภาพต่อสารเคมีได้สูง และเป็นเจลที่มีความแข็งแรงมาก
$Zn^{2+}$	Analogous egg-box model (with carboxylate of uronates (monodentate mode))	เป็นเจลแบบอ่อน ไม่แข็งแรง และไม่เหนียวติดกัน (Inhomogeneous gel)
$Fe^{2+}$	Analogous egg-box model (with carboxylate of G and M, mainly G)	เป็นเจลที่ไม่มีเสถียรภาพ (เกิด oxidize ได้ง่าย)
$Mn^{2+}$	Analogous egg-box model (with carboxylate of uronates, mainly MG)	เป็นเจลที่ไม่มีเสถียรภาพ
$Al^{3+}$	Three-dimensional valent binding structure (with carboxylate of uronates)	เป็นเจลที่มีเสถียรภาพแต่เป็นอันตราย (toxic gel)
$Fe^{3+}$	Three-dimensional interconnected structure (with carboxylate of uronates)	เป็นเจลที่มีเสถียรภาพแต่เสื่อมสลายได้ด้วยแสง

ที่มา: Hu และคณะ (2021)

การศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ทางชีวภาพแบบผสม (biopolymer mixtures) ได้รับความสนใจมานานกว่า 20 ปี โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาคุณสมบัติของอัลจินเตไฮโดรเจลที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการใช้พอลิเมอร์ทางชีวภาพผสมกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป (โปรตีน และ/หรือ พอลิแซ็กคาไรด์) (De Kruif และ Tuinier, 2001; Doublier และคณะ, 2000; Piculell, 1995; Turgeon และคณะ, 2003)

Jang และคณะ, 2013 ได้พยายามศึกษาการเสริมความแข็งแรงให้อัลจินเตไฮโดรเจลโดยใช้นาโนไฟเบอร์ จากการทดลอง พบว่า อัลจินเตไฮโดรเจลที่มีการใช้นาโนไฟเบอร์นั้นมีความแข็งแรงของโครงสร้างเพิ่มสูงขึ้น ประมาณ 221% และเกิดการหดตัวของโครงสร้าง (Shrinkage) น้อยลง ซึ่งการเสริมความแข็งแรงของอัลจินเตไฮโดรเจลด้วยไฟเบอร์นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และคณะ (2019) ซึ่งได้ยืนยันว่าเซลลูโลสไฟเบอร์ (Cellulose Nanocrystals) สามารถปรับปรุงความแข็งแรงของอัลจินเตไฮโดรเจลได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ยิ่งไปกว่านั้น ในปี ค.ศ. 2021 Wang และคณะ ได้ค้นพบว่า การใช้ Polyethylene Glycol (PEG) ร่วมกับเซลลูโลสไฟเบอร์สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของอัลจินเตไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 คุณสมบัติเชิงกลของอัลจินเตไฮโดรเจลที่ผสมเซลลูโลสไฟเบอร์ร่วมกับ Polyethylene Glycol (PEG)

ที่มา: Wang และคณะ (2021)

นอกจากการปรับปรุงให้อัลจิเนตไฮโดรเจลมีความแข็งแรงแล้ว การศึกษาผลของการใช้เจลาตินในระบบอัลจิเนตไฮโดรเจลก็ได้รับความสนใจและมีการศึกษาอย่างจริงจัง จากผลการทดลองของ Sarker และคณะ (2014) พบว่า ไฮโดรเจลที่เกิดจากการผสมอัลจิเนตและเจลาตินจะใช้เวลาในการเกิดเจลน้อยลงเมื่อปริมาณเจลาตินเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า การผสมเจลาตินมีผลทำให้สัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิว (surface morphology) เกิดความไม่เรียบเนียนและมีลักษณะผิวขรุขระไม่สม่ำเสมอ โดย Panouillé และ Larreta-Garde (2009) ได้อธิบายเพิ่มเติมว่าไฮโดรเจลที่เกิดจากการผสมระหว่างอัลจิเนตและเจลาตินนั้น ในช่วงแรก แคลเซียมไอออนจะเข้าจับกับสายพอลิเมอร์ของอัลจิเนตและเกิดเป็นเจลแบบถาวร (irreversible alginate gel) และภายหลังจากที่อุณหภูมิเย็นตัวลงจะเกิดเจลของเจลาตินที่เป็นเจลแบบไม่ทนต่อความร้อน (reversible gelatin gel) โดยพบว่าโครงสร้างของเจลผสมระหว่างอัลจิเนตและเจลาตินเกิดการยุบตัวซึ่งอาจเป็นเพราะมีการแยกส่วนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดในระหว่างการเกิดเจล

Lopez-Sanchez และคณะ (2018) ได้ศึกษาผลของการผสมน้ำตาล (กลูโคส และ ฟรุคโตส) ต่อคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพของอัลจิเนตไฮโดรเจล จากการทดลอง พบว่า ปริมาณน้ำตาลที่สูงขึ้นทำให้ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตลดลง เนื่องจากน้ำตาลทำให้โมเลกุลของอัลจิเนตมีการขยายตัวลดลง ทำให้ความสามารถในการเชื่อมต่อหรือการเกิดพันธะต่างๆ ลดลงไปด้วย จึงส่งผลให้เจลมีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง ดังนั้น อัลจิเนตไฮโดรเจลที่ผสมน้ำตาลจึงเกิดการหดตัวได้มากกว่าอัลจิเนตไฮโดรเจลแบบปกติ

การใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ผสมกับเอทานอลในการเกิดเจลแบบ External gelation ทำให้บริเวณผิวหน้าของแผ่นฟิล์มอัลจิเนตมีลักษณะเรียบเนียน ไม่มีรูพรุน หรือไม่มีรอยแตกร้าวตลอดจนพบว่าแผ่นฟิล์มที่ได้มีค่าการขยายตัวลดลงเมื่อปริมาณเอทานอลที่ใช้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ การผสมเอทานอลลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ยังส่งผลให้แผ่นฟิล์มอัลจิเนตมีความแข็งแรงและมีความสามารถในการยืดหยุ่นที่สูงขึ้น แต่หากใช้เอทานอลในปริมาณที่มากกว่า 30% จะส่งผลให้ความแข็งแรงและความสามารถในการยืดหยุ่นลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เอทานอลที่มากเกินไป จะไปขัดขวางการเชื่อมต่อกันระหว่างไอออนของแคลเซียมและสายพอลิเมอร์ของอัลจิเนต (Li และคณะ, 2015)

### 2.5.2 ผลของการกระตุ้นเชิงกลต่อคุณสมบัติของอัลจิเนตไฮโดรเจล

สำหรับผลของการกระตุ้นเชิงกลต่อคุณสมบัติของอัลจิเนตไฮโดรเจลนั้น แม้ว่าจะมีงานวิจัยอยู่ไม่มากนัก แต่ก็ถือว่าเป็นวิธีการใหม่ที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถพัฒนาอัลจิเนตไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติแตกต่างและหลากหลายได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมี หรือสารประกอบอื่นๆ เข้าสู่ระบบของอัลจิเนตไฮโดรเจล

ในปี ค.ศ. 2012 Popeski-Dimovski และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง (electromagnetic spectrum) หรือรังสีแกมมาในการกระตุ้นระหว่างกระบวนการเกิดอัลจิเนตไฮโดรเจล จากการทดลอง พบว่า เมื่อทำการกระตุ้นด้วยรังสีแกมมาที่มากขึ้น ทำให้ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตลดลง และส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการเกิดอัลจิเนตไฮโดรเจลดานานขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากรังสีแกมมาทำลายพันธะระหว่างสายพอลิเมอร์ ทำให้สายพอลิเมอร์สั้นลง (degradation) ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการเชื่อมต่อสายพอลิเมอร์เพื่อเกิดเป็น โครงสร้างเจลที่นานขึ้น

ตารางที่ 4 ผลของรังสีแกมมาต่อความหนืดและเวลาในการเกิดอัลจิเนตไฮโดรเจล

ขนาดของรังสีแกมมา (kGy)	ความหนืดของอัลจิเนต (cP)	เวลาที่ใช้ในการเกิดเจล (นาที)
0	1355	58
2.5	1229	86
5	1150	99
10	948	100
15	481	127

ที่มา: Popeski-Dimovski และคณะ (2012)

ต่อมาในปี ค.ศ. 2016 Zhao (2016) ได้ค้นพบวิธีการใหม่ในการเตรียมอัลจิเนตไฮโดรเจลด้วยการใช้เทคนิคการแช่แข็งสลับกับการละลาย (freeze-thaw technique) ซึ่งทำให้ได้เจลแบบ Alginic acid gel โดยปกติแล้วเจลประเภทนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีค่า pH ต่ำกว่า pKa หรือ ต่ำกว่า 3.5 (Haug, 1964) แต่การกระตุ้นระบบของอัลจิเนตด้วยเทคนิคการแช่แข็งสลับกับการละลายนั้น ทำให้อัลจิเนตไฮโดรเจลสามารถเกิดได้ที่ pH สูงกว่า pKa อย่างไรก็ตาม เจลที่ได้จากกระบวนการนี้มีลักษณะโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง และสามารถหลอมละลายได้เมื่อเก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลาานาน ซึ่ง

เจลที่มีพฤติกรรมแบบใหม่นี้อาจประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิตสอดคล้องกับรูปแบบการเกิดเจลเช่นนี้ต่อไปในอนาคตได้

การประยุกต์ใช้อัลตราซาวด์ (ultrasound) ในกระบวนการเตรียมอัลจิเนตไฮโดรเจลก็มีการศึกษาเช่นกัน โดยพบว่าอัลตราซาวด์ช่วยปรับปรุงการแลกเปลี่ยนไอออนของเจลให้ดีขึ้นกว่าวิธีการเตรียมเจลแบบปกติ อีกทั้งการใช้อัลตราโซนิกกระตุ้นในระหว่างการเกิดอัลจิเนตไฮโดรเจลยังทำให้บริเวณพื้นผิวของเจลมีลักษณะขรุขระไม่เรียบเนียน ซึ่งเป็นผลมาจาก cavitation ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยอัลตราโซนิก (Simonescu และคณะ, 2020)

นอกจากนี้ ในปัจจุบันยังมีกระบวนการผลิตอัลจิเนตไฮโดรเจลขนาดเล็กประมาณ 1-300 ไมครอน (alginate microparticle) ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคต่างๆ ได้แก่ การเกิดเจลด้วยเทคนิค conventional emulsification (Chan และคณะ, 2002) กระบวนการ spray-drying (Santa-Maria และคณะ, 2012) เทคนิค extrusion dripping (Barbieri และคณะ, 2017; Li และคณะ, 2018) และเทคนิค microfluidic (Akbari และ Pirbodaghi, 2014; Hu และคณะ, 2015; Liu และคณะ, 2006; Liu และคณะ, 2019; Pittermannová และคณะ, 2016; Rondeau และ Cooper-White, 2008; Trivedi และคณะ, 2009; Utech และคณะ, 2015; Xu และคณะ, 2008; Yu และคณะ, 2019; Zhang และคณะ, 2020) อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้เทคนิคการกระตุ้นเชิงกลในการผลิตอัลจิเนตไฮโดรเจลจะต้องพิจารณาถึงการนำไปใช้งานเป็นส่วนสำคัญ ทั้งนี้ เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานและเกิดประโยชน์สูงสุดต่ออุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องของเหล่านั้น



### บทที่ 3

## การปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของอัลจินเตไฮโดรเจลด้วยเส้นใยอาหาร แบบไม่ละลายน้ำ

### บทคัดย่อ

เส้นใยอาหารเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญและมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของผลไม้ตามธรรมชาติ ดังนั้น หากต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูปจากอัลจินเตไฮมิเนื้อสัมผัสเหมือนหรือใกล้เคียงผลไม้จริงมากที่สุด จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาผลของเส้นใยอาหารต่อคุณสมบัติของอัลจินเตไฮโดรเจลที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการทดลองในครั้งนี้ จะศึกษาการขึ้นรูปเมล็ดอ่อนด้วยอัลจินเตผสมใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ โดยใช้เนื้อเมล็ดอ่อนสดเป็นตัวอย่งเปรียบเทียบ ทั้งนี้เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการพัฒนาผลไม้ขึ้นรูปภายใต้แนวคิดของการลอกเลียนแบบตั้งแต่องค์ประกอบที่มีในผลไม้จริง ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงศึกษาผลของชนิดเส้นใยอาหาร (เส้นใยอาหารจากเมล็ดอ่อน เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ เส้นใยอาหารจากใยสัสม และเส้นใยอาหารเซลลูโลส) และปริมาณเส้นใยอาหารที่แตกต่างกัน (0.5 -2.0% (w/w)) ต่อคุณสมบัติของอัลจินเตไฮโดรเจลที่เกิดเจลแบบ External gelation จากการทดลอง พบว่า การเสริมเส้นใยอาหารในระบบของอัลจินเตไฮโดรเจลทำให้การลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction) การหดตัว (%volume shrinkage) และความแข็งแรงของเจลลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ยกเว้นเส้นใยอาหารเซลลูโลสที่ทำให้โครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจลมีความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้ เส้นใยอาหารที่เติมลงไปในระบบยังช่วยปรับปรุงให้อัลจินเตไฮโดรเจลมีความสามารถในการอุ้มน้ำและมีความเสถียรต่อการแช่แข็งและละลายเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปนี้แสดงให้เห็นถึงโอกาสในการนำระบบอัลจินเตไฮโดรเจลผสมเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำนี้ไปสู่การผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบผลไม้ (simulated fruit products) ให้มีคุณลักษณะที่เสมือนของจริงมากยิ่งขึ้นได้ต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** การขึ้นรูปผลไม้ อัลจินเตไฮโดรเจล ความเสถียรต่อการละลายน้ำแข็ง เส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ คุณสมบัติเชิงกล

### 3.1 บทนำ

ผลไม้จริงส่วนใหญ่มีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น น้ำตาล พอลิแซคคาไรด์ (แป้งและเส้นใยอาหาร) โปรตีน ไขมัน และกรดออร์แกนิก นอกจากนี้ยังมีกลุ่มที่เป็นองค์ประกอบรอง เช่น สารให้กลิ่นรส วิตามิน และเกลือแร่ ฯลฯ ซึ่งส่วนใหญ่ขององค์ประกอบหลัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยอาหารและน้ำตาล มักมีบทบาทสำคัญต่อเนื้อสัมผัสของผลไม้จริงตามธรรมชาติ (Pose และคณะ, 2019)

ในปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูปส่วนใหญ่ผลิตจากการนำน้ำหรือเนื้อผลไม้มาผสมกับไฮโดรคอลลอยด์ เช่น อัลจินเต เพคติน เจลแลน กัม พวูน เป็นต้น (da Silva Costa และคณะ, 2020) แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากพยายามค้นหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณลักษณะด้านเนื้อสัมผัสเนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความชอบและการยอมรับของผู้บริโภค (Laszity, 2009) อย่างไรก็ตาม กลับพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้นการใช้ไฮโดรคอลลอยด์แบบผสมเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูป (da Silva Costa และคณะ, 2020; Leal และคณะ, 2021) แต่ด้วยโครงสร้างเจลที่เกิดจากไฮโดรคอลลอยด์เหล่านี้ไม่เหมือนกับผลไม้จริงตามธรรมชาติ กล่าวคือ องค์ประกอบของไฮโดรเจลที่เกิดขึ้นมีเพียงน้ำ และไฮโดรคอลลอยด์เท่านั้น ในขณะที่ผลไม้จริงประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ มากมาย อาทิ เช่น น้ำตาล ใยอาหาร โปรตีน ฯลฯ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้เกิดความแตกต่างของคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสระหว่างผลไม้จริงและผลไม้ขึ้นรูปอย่างชัดเจน (Chang และคณะ, 2021)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อคุณสมบัติของอัลจินเตไฮโดรเจลที่เปลี่ยนแปลงไป ทั้งนี้เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้ระบบอัลจินเตไฮโดรเจลผสมเส้นใยอาหารในการผลิตผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูปต่อไปในอนาคต

### 3.2 วัตถุประสงค์

เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของอัลจินเตไฮโดรเจลด้วยเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ และประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูป

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

ในการทดลองครั้งนี้ ใช้โซเดียมอัลจิเนต (sodium alginate) จากบริษัท ทีโอพีไฟลท์ อินเตอร์ ฟู้ดส์ จำกัด (ประเทศไทย) เป็นสารก่อเจลร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ (dihydrate calcium chloride, ความบริสุทธิ์ > 95%) จากบริษัท ชิกมา-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด โดยเส้นใยอาหารที่ใช้ในการทดลอง มีรายการดังต่อไปนี้

##### 1) เส้นใยอาหารจากเมลอน (melon fiber)

ทำการเตรียมโดยนำเนื้อเมลอนสด สายพันธุ์ *Cucumis melo* L. var. *reticulatus* Naud. ปั่นผสมกับน้ำอัตราส่วน 1:1 ด้วยเครื่องปั่นเป็ยกกำลังไฟ 600 วัตต์ นาน 1 นาที จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที เพื่อแยกกากเมลอนและส่วนของเหลวออกจากกัน นำกากเมลอนที่ได้ไปล้างด้วยน้ำสะอาดอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนกากเมลอนต่อน้ำเท่ากับ 1:1 จำนวน 3 ครั้ง และนำกากที่ได้ไปอบแห้งอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง จนมีความชื้นเท่ากับ  $6.0 \pm 0.5\%$  (ฐานเปียก)

##### 2) เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ (psyllium husk fiber) จากบริษัท แพน โทริ เค จำกัด

##### 3) เส้นใยอาหารจากโยสุม (citrifi) จากบริษัท ทีโอพีไฟลท์ อินเตอร์ฟู้ดส์ จำกัด

##### 4) เส้นใยอาหารเซลลูโลส (cellulose fiber) จากบริษัท ชิกมา-อัลดริช (ประเทศไทย) จำกัด

#### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างอัลจิเนตไฮโดรเจลผสมเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ

ตัวอย่างอัลจิเนตไฮโดรเจลถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธี External gelation โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตที่ความเข้มข้น 1.0% (w/w) ผสมกับเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ จำนวน 4 ชนิด ได้แก่ เส้นใยอาหารจากเมลอน เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ เส้นใยอาหารจากโยสุม และเส้นใยอาหารเซลลูโลส ที่ปริมาณ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% (w/w) จากนั้นกวนผสมให้เข้ากันด้วยความเร็ว 100 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการดูดซับน้ำที่สมบูรณ์

ซังสารละลายอัลจิเนตที่ผสมเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำเรียบร้อยแล้ว ปริมาณ  $15.0 \pm 0.1$  กรัม ใส่ในพิมพ์ซิลิโคนทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร จากนั้นนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 12 ชั่วโมง นำสารละลายอัลจิเนตผสมเส้นใยอาหารที่แข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว มาแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 3.0% (w/w) โดยมีอัตราส่วนอัลจิเนต 225 กรัม (อัลจิเนตทรงกลม จำนวน 15 ลูก น้ำหนักลูกละ 15 กรัม) ต่อสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 2.0 ลิตร จากนั้นเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลานาน 180 นาที เพื่อให้เกิดอัลจิเนตไฮโดรเจลได้อย่างสมบูรณ์ก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป



### 3.3.3 การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity, WHC) ของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ

ความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ สามารถทำได้โดยการชั่งตัวอย่างน้ำหนัก 1 กรัม กับน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยง ผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าผสมสาร (vortex mixer) เป็นระยะเวลา 1 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 30 นาที แล้วจึงนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที กำจัดส่วนของเหลวที่แยกตัวออกมา ชั่งน้ำหนักส่วนที่ตกตะกอน จากนั้นคำนวณหาความสามารถในการอุ้มน้ำ (WHC) ของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\text{ความสามารถในการอุ้มน้ำ (WHC)} = \frac{\text{น้ำหนักของตะกอน} - \text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

### 3.3.4 การวิเคราะห์ค่าการลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction) และค่าการหดตัว (%volume shrinkage) ของอัลจินเตไฮโดรเจล

น้ำหนักของอัลจินเตไฮโดรเจลที่ลดลงสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าการลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction)} = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100$$

เมื่อ  $W_o$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (กรัม)  
 $W_t$  คือ น้ำหนักของตัวอย่าง ณ เวลา  $t$  (กรัม)

สำหรับการวิเคราะห์ค่าการหดตัวของอัลจินเตไฮโดรเจลนั้นสามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้

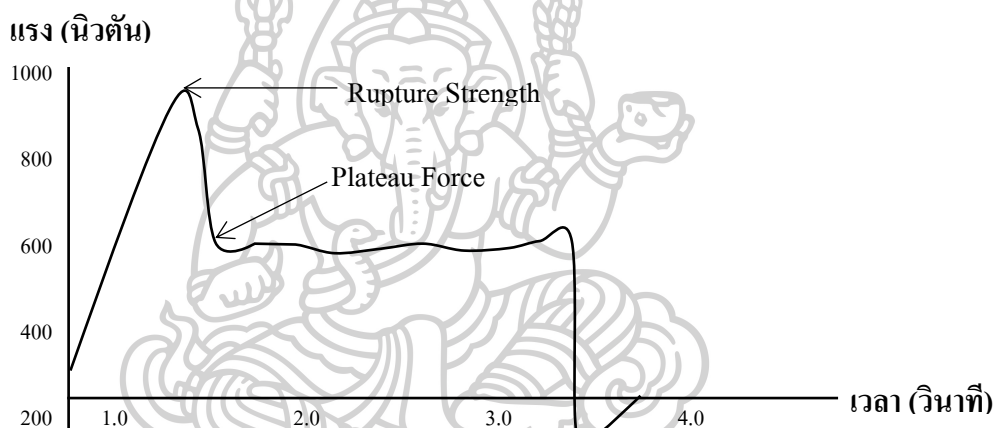
$$\text{ค่าการหดตัว (%volume shrinkage, } S_v) = \frac{V_o - V_t}{V_o} \times 100$$

เมื่อ  $V_o$  คือ ปริมาตรเริ่มต้นของอัลจินเตไฮโดรเจล ( $\text{cm}^3$ )  
 $V_t$  คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ณ เวลา  $t$  ( $\text{cm}^3$ )

\*แต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง

### 3.3.5 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analysis) ของอัลจินเตไฮโดรเจล

3.3.5.1 วิเคราะห์ค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุโครงสร้างบริเวณผิวด้านนอก (rupture strength) และโครงสร้างเจลด้านใน (plateau force) ด้วยเครื่อง Texture analyzer (รุ่น TA-XT Plus, Stable Micro System Co, Ltd., Surrey, Godalming GU7 1YL, UK) ใช้หัววัดแบบหน้าตัดเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร (P/2) ตั้งค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดดังนี้ ความเร็วก่อนทดสอบ (pre-test speed) ความเร็วระหว่างทดสอบ (test-speed speed) และความเร็วภายหลังการทดสอบ (post-test speed) เท่ากับ 1.0, 1.0 และ 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยการกดหัววัดลงบนตัวอย่างจนเจาะทะลุโครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจล (แต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง) (Diao และคณะ, 2016)



ภาพที่ 8 กราฟผลการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analysis)

3.3.5.2 วิเคราะห์ค่าความเค้น (stress) และค่าความเครียด (strain) ของอัลจินเตไฮโดรเจล ด้วยการใช้หัววัดทรงกระบอกหน้าตัดเรียบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตร (P50) ตั้งค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัด ดังนี้ ความเร็วก่อนทดสอบ (pre-test speed) ความเร็วระหว่างทดสอบ (test-speed) และความเร็วภายหลังการทดสอบ (post-test speed) เท่ากับ 1.0, 1.0 และ 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ทำการกดหัววัดลงไปตัวอย่างเป็นระยะทาง 70% ของความสูงตัวอย่างเริ่มต้น จากนั้นคำนวณหาค่าความเค้น (stress) และค่าความเครียด (strain) จากกราฟที่ได้ (แต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง)

### 3.3.6 การวิเคราะห์ความคงตัวเมื่อผ่านการแช่แข็งและละลาย (freeze-thaw stability)

นำตัวอย่างอัลจินเตไฮโดรเจลที่ทราบน้ำหนักแน่นอน ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยง (1 ลูกต่อ 1 หลอด) นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างดังกล่าวมาวางไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักส่วนของเหลวที่แยกตัวออกมา นำไปคำนวณเป็น การแยกตัวของน้ำ (%syneresis) เพื่อบ่งชี้ความคงตัวเมื่อผ่านการแช่แข็งและละลาย ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\text{การแยกตัวของน้ำ (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของเหลวที่แยกตัวออกมา}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใส่เริ่มต้น}} \times 100$$

### 3.3.7 การวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย

การวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย ดำเนินการถ่ายภาพในกล่องไม้สีดำ (ขนาด 45 × 45 × 45 cm<sup>3</sup>) เพื่อควบคุมแสงสว่างในการถ่ายภาพให้เท่ากัน โดยภายในกล่องมีการติดตั้งหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ จำนวน 2 หลอด (TLD90 Deluxe, Natural Daylight, 18W/965, Philips, Holland) และทำการเปิดไฟก่อนถ่ายภาพเป็นเวลา 15 นาที นอกจากนี้ มีอุณหภูมิสีของแสง (color temperature) เท่ากับ 6500K (D65) และมีดัชนีชี้วัดค่าความถูกต้องของสี (color rendering index) สูงถึง 90% ในการศึกษานี้ใช้กล้องดิจิทัล (รุ่น OMD EM10 Mark II, Olympus, Japan) และเลนส์ Zuiko 30 mm macro lens เป็นอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ โดยมีการตั้งระยะห่างระหว่างกล้องกับตัวอย่าง เท่ากับ 20 เซนติเมตร มุมระหว่างเลนส์กล้องและแหล่งกำเนิดแสงถูกกำหนดไว้ที่ 45° ทำการตั้งค่าความเร็วชัตเตอร์ เท่ากับ 1/8 s, macrofocusing mode, F3.5, ความไวแสง ISO อัตโนมัติ และไม่ใช้แฟลช ในการถ่ายภาพได้ทำการวางตัวอย่างลงบนพื้นผิวสีดำด้านเพื่อหลีกเลี่ยงการสะท้อนโดยตรง และตั้งมุมระหว่างแกนเลนส์กล้องกับตัวอย่างไว้ที่ 90° โดยในแต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 5 ตัวอย่าง

### 3.3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ complete randomized design (CRD) และวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA นอกจากนี้ยังทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี the least significant difference (LSD) test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม SPSS software v.16 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

### 3.4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 3.4.1 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อค่าการลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction) และค่าการหดตัว (%volume shrinkage) ของอัลจิเนตไฮโดรเจล

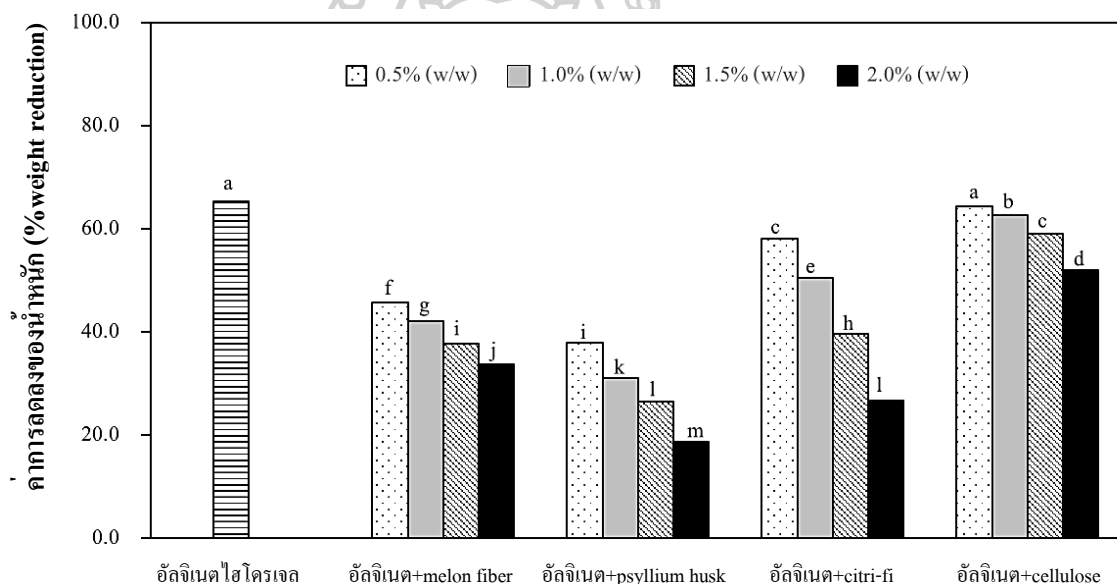
โดยปกติเมื่อแคลเซียมไอออนเข้าจับกับสายพอลิเมอร์ของอัลจิเนต สายพอลิเมอร์ของอัลจิเนตจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ชิดกันและเกิดเป็น โครงสร้างเจลที่แข็งแรง ทำให้น้ำที่อยู่ในระบบถูกกำจัดออกมา (syneresis) ดังนั้น ปริมาตรและน้ำหนักของอัลจิเนตไฮโดรเจลจึงค่อยๆ ลดลง เมื่อระยะเวลาในการเกิดเจลมากขึ้น (Bienaimé และคณะ, 2003; Lee และคณะ, 2018; Rezende และคณะ, 2007)

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาผลของการผสมอัลจิเนตกับเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำจำนวน 4 ชนิด (เส้นใยอาหารจากเมล่อน เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ เส้นใยอาหารจากใยส้ม (Citri-fi) และเส้นใยอาหารเซลลูโลส) ที่ปริมาณ 4 ระดับ คือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% (w/w) จากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 9 และ 10 พบว่า ตัวอย่างที่มีการผสมเส้นใยอาหารทุกชนิด มี weight reduction และ volume shrinkage เกิดขึ้นน้อยกว่าตัวอย่างอัลจิเนตไฮโดรเจลที่ไม่ผสมเส้นใยอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ยกเว้นตัวอย่างอัลจิเนตไฮโดรเจลที่ผสมเส้นใยอาหารเซลลูโลสปริมาณ 0.5% (w/w) ซึ่งพบว่ามีค่า weight reduction ไม่แตกต่างจากตัวอย่างอัลจิเนตไฮโดรเจลที่ไม่ผสมเส้นใยอาหาร นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า weight reduction และ volume shrinkage มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากกลุ่มไฮดรอกซิลอิสระ (free hydroxyl groups) ในเส้นใยอาหารสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำ จึงทำให้เส้นใยอาหารสามารถดูดซับและเก็บกักน้ำไว้ในโครงสร้างได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้ เส้นใยอาหารจึงช่วยลดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างของอัลจิเนตไฮโดรเจล และส่งผลให้ค่า weight reduction และค่า volume shrinkage ของอัลจิเนตไฮโดรเจลที่ผสมเส้นใยอาหารมีค่าลดลงอย่างชัดเจน (Chaplin, 2003; Oakenfull, 2001) การลดลงของค่า weight reduction และค่า volume shrinkage (ภาพที่ 9 และ 10) มีความสอดคล้องกับค่าความสามารถในการอุ้มน้ำของเส้นใยอาหารแต่ละชนิดที่แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 5 กล่าวคือ การใช้เส้นใยอาหารที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำมากขึ้น จะทำให้อัลจิเนตไฮโดรเจลมีการสูญเสียน้ำหนักและเกิดการหดตัวของโครงสร้างน้อยลง จากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการผสมใยอาหารในระบบของอัลจิเนตไฮโดรเจลสามารถช่วยลดการสูญเสียน้ำ (ลด waste และเพิ่ม yield) ในระหว่างกระบวนการเกิดเจลแบบ External gelation และช่วยลดการหดตัวของไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น องค์ความรู้ที่ค้นพบในครั้งนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตตลอดจนสามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นรูปได้ด้วยการเลือกใยอาหารที่เหมาะสมกับความต้องการและรูปแบบการใช้งานของแต่ละอุตสาหกรรม

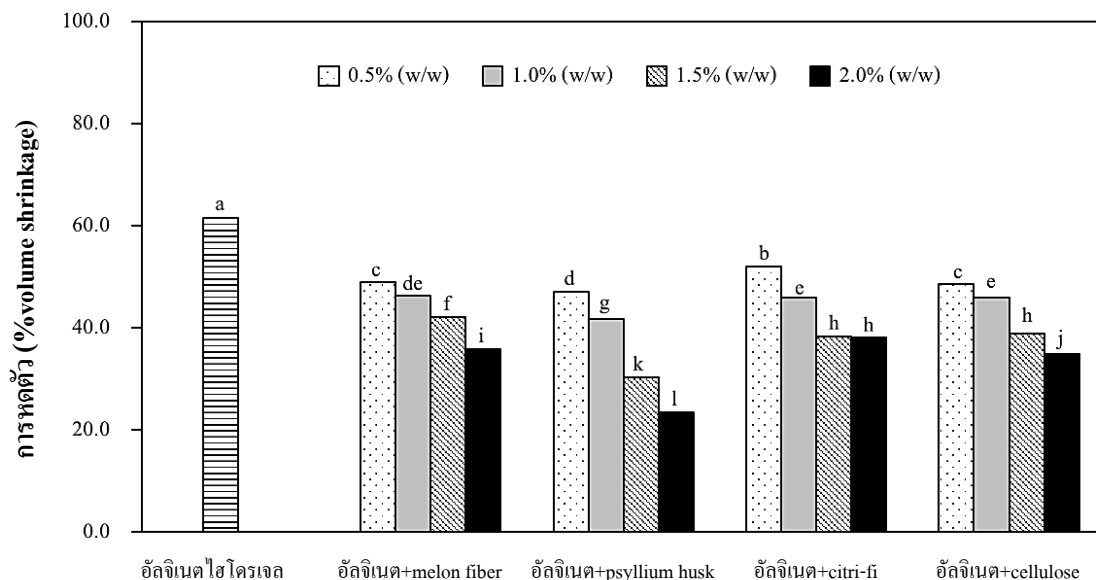
ตารางที่ 5 ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) ของเส้นใยอาหารแต่ละชนิด

ชนิดของเส้นใยอาหาร	ความสามารถในการอุ้มน้ำ (กรัม น้ำ / กรัม ตัวอย่าง)
เส้นใยอาหารจากเมลอน (melon fiber)	13.63 ± 0.09 <sup>c</sup>
เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ (psyllium husk)	33.14 ± 0.12 <sup>a</sup>
เส้นใยอาหารจากไซสม (citri-fi)	15.66 ± 0.24 <sup>b</sup>
เส้นใยอาหารเซลลูโลส (cellulose)	5.65 ± 0.26 <sup>d</sup>

<sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )



ภาพที่ 9 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อการลดลงของน้ำหนักของอัลจิเนตไฮโดรเจล

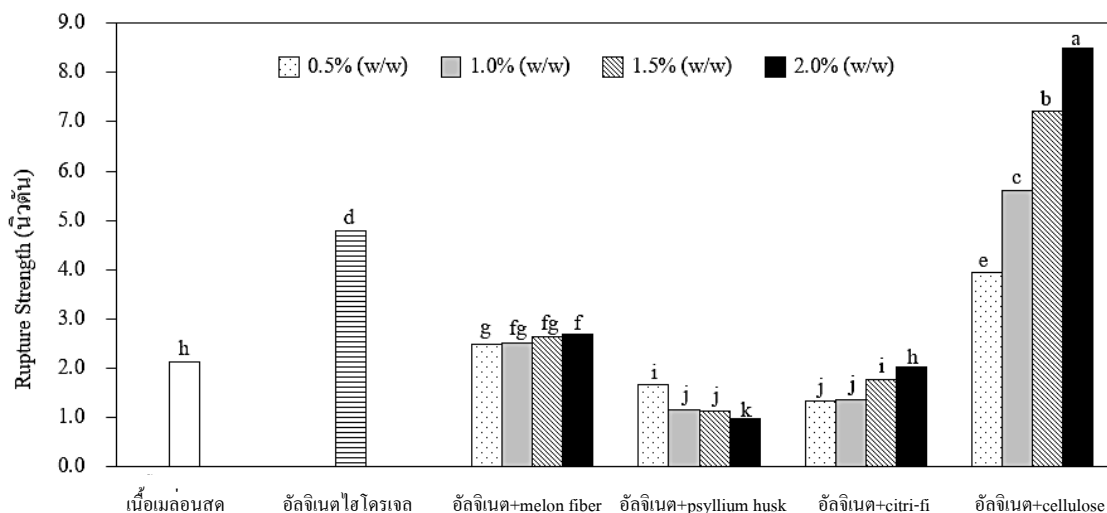


ภาพที่ 10 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อการหดตัวของอัลจิเนตไฮโดรเจล

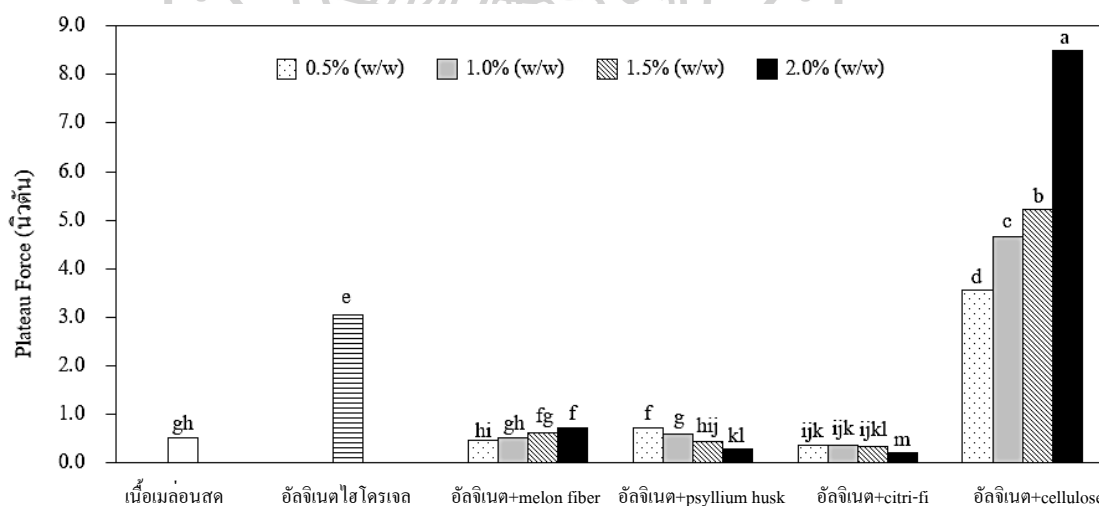
### 3.4.2 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอัลจิเนตไฮโดรเจล

การผสมเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำลงในอัลจิเนตไฮโดรเจล ทำให้ลักษณะเนื้อสัมผัสของอัลจิเนตไฮโดรเจลเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ภาพที่ 11-12) จากผลการทดลอง พบว่า การใช้เส้นใยอาหารที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี หรือเป็นกลุ่มของเส้นใยอาหารที่มีบางส่วนของโครงสร้างเป็นแบบชอบน้ำ (hydrophilic fiber) เช่น เส้นใยอาหารจากเมลอน (melon fiber) เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ (psyllium husk fiber) และเส้นใยอาหารจากไยส้ม (citri-fi) สามารถปรับปรุงเนื้อสัมผัสของอัลจิเนตไฮโดรเจลให้มีลักษณะใกล้เคียงผลไม้จริง (เนื้อเมล่อนสด) ได้มากยิ่งขึ้น โดยเส้นใยอาหารจากเมลอน เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ และเส้นใยอาหารจากไยส้มทำให้ค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ โครงสร้างบริเวณผิวหนังด้านนอก (rupture strength) และค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ โครงสร้างด้านใน (plateau force) ของอัลจิเนตไฮโดรเจลลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แต่สำหรับเส้นใยอาหารเซลลูโลส (cellulose fiber) กลับทำให้อัลจิเนตไฮโดรเจลมีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น สังเกตได้จากค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ โครงสร้างบริเวณผิวหนังด้านนอกและค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุ โครงสร้างด้านในมีค่าแรงสูงกว่าตัวอย่างที่ไม่เติมเส้นใยอาหาร ทั้งนี้หากพิจารณาคุณสมบัติของเส้นใยอาหารเซลลูโลส ด้านความสามารถในการอุ้มน้ำ จะพบว่า เส้นใยอาหารเซลลูโลส มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นใยอาหารเซลลูโลส สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำและไอออนต่างๆ ในระบบได้น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยอาหารชนิดอื่นๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Jang และคณะ (2013) ที่

ค้นพบว่าเส้นใยอาหารประเภทที่ไม่ชอบน้ำหรือไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ (hydrophobic fiber) จะไม่มีผลกระทบหรือไม่ขัดขวางการเกิดเจลระหว่างอัลจินเตและแคลเซียมไอออน แต่เส้นใยอาหารดังกล่าวจะกระจายตัวอยู่ในช่องว่างของโครงสร้างเจล ดังนั้น จึงช่วยเสริมความแข็งแรง (reinforcement) ให้แก่อัลจินเตไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 11 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุโครงสร้างบริเวณผิวด้านนอก (rupture strength) ของอัลจินเตไฮโดรเจล



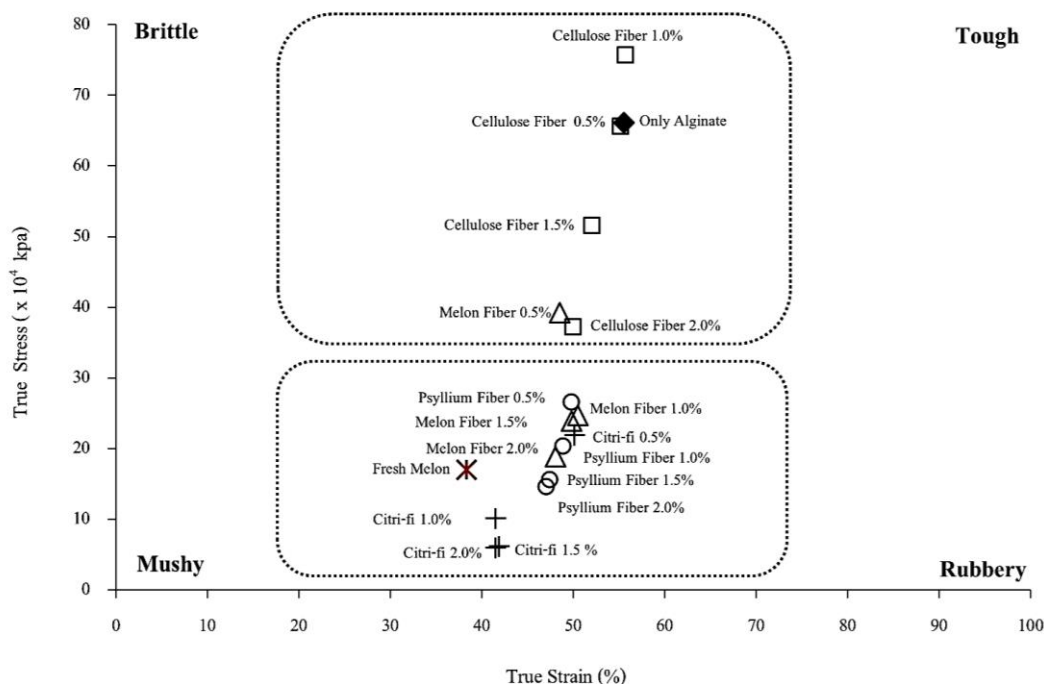
ภาพที่ 12 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุโครงสร้างด้านใน (plateau force) ของอัลจินเตไฮโดรเจล

ภาพที่ 13 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า คุณสมบัติเชิงกล (mechanical characteristic) ของอัลจินเตไฮโดรเจลมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม กล่าวคือ ปกติอัลจินเตไฮโดรเจลจะมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่แข็งและเหนียว แต่เมื่อมีการผสมเส้นใยอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเส้นใยอาหารจากเมล็ดอ่อนเส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ และเส้นใยอาหารจากใยสัสม ทำให้อัลจินเตไฮโดรเจลมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่อ่อนนุ่มใกล้เคียงกับเนื้อเมล็ดนสด (ผลไม้ต้นแบบ) มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเส้นใยอาหารเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญที่มีอยู่แล้วในผลไม้ทั่วไปและมีผลต่อคุณภาพของผักและผลไม้ในด้านต่างๆ เช่น ลักษณะเนื้อสัมผัสและคุณค่าทางโภชนาการ เป็นต้น (Zinina และคณะ, 2019) ดังนั้น ในปัจจุบันจึงพบงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการใช้เส้นใยอาหารเพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสของไฮโดรเจล ตัวอย่างเช่น การใช้เส้นใยอาหารจากเห็ดสดผสมกับเจลแลนกันและน้ำลินีจี้ (Chang และคณะ, 2021) การใช้เส้นใยอาหารปรับปรุงความสามารถในการอุ้มน้ำและปรับปรุงเนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์แปรรูป (Biswas และคณะ, 2011; Chang และ Carpenter, 1997; Pietrasik และ Janz, 2010; Powell และคณะ, 2019; Xu, 2017; Zinina และคณะ, 2019) รวมถึงการใช้เส้นใยอาหารในการเสริมความแข็งแรงให้แก่ไฮโดรเจลชนิดต่างๆ เพื่อประยุกต์ใช้ในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (tissue engineering) (Aarstad และคณะ, 2017; Dong และคณะ, 2013; Li และคณะ, 2021; Syverud และคณะ, 2015) เป็นต้น

จากผลการศึกษาที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติทางกายภาพของอัลจินเตไฮโดรเจลสามารถถูกปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมต่อการใช้งานได้ด้วยการใช้เส้นใยอาหารชนิดต่างๆ กล่าวคือ หากต้องการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูปที่มีเนื้อสัมผัสอ่อนนุ่มก็ควรใช้เส้นใยอาหารที่มีความสามารถในการดูดซับและอุ้มน้ำได้ดี แต่หากต้องการสร้างอัลจินเตไฮโดรเจลที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสเหนียวและแข็งแรงก็ควรเลือกใช้เส้นใยอาหารที่มีความสามารถในการดูดซับและอุ้มน้ำได้น้อย เช่น เส้นใยอาหารเซลลูโลส เป็นต้น ทั้งนี้ ชนิดและปริมาณของเส้นใยอาหารที่เหมาะสมนั้น ควรพิจารณาจากโครงสร้างและองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการสร้างหรือพัฒนาเป็นหลัก จากนั้นจึงเลือกใช้เส้นใยอาหารที่มีคุณสมบัติเหมือนหรือใกล้เคียงผลิตภัณฑ์ต้นแบบเพื่อนำมาผสมกับไฮโดรเจลในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งแท้จริงแล้วการปรับปรุงโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เหมือนหรือใกล้เคียงผลไม้จริงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องผสมองค์ประกอบต่างๆ เข้าด้วยกัน ไม่ว่าจะเป็นน้ำตาล ใยอาหาร (ทั้งแบบละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ) โปรตีน และไขมัน เพราะคุณสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับการทำปฏิกิริยากันของ



องค์ประกอบแต่ละชนิดที่มีอยู่ในระบบอีกด้วย (Mancini และ McHugh, 2000; S. Manjunatha และ D. Das Gupta, 2006)



ภาพที่ 13 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อคุณสมบัติเชิงกล (mechanical characteristic) ของอัลจินตไฮโดรเจล

### 3.4.3 ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อความคงตัวเมื่อผ่านการแช่แข็งและละลาย (freeze-thaw stability) ของอัลจินตไฮโดรเจล

อัลจินตไฮโดรเจลที่ผสมเส้นใยอาหาร ปริมาณ 1.0% (w/w) ถูกนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และนำตัวอย่างดังกล่าวมาวางไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้ น้ำแข็งละลายอย่างสมบูรณ์ จากนั้นทำการเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่แยกออกมา (%syneresis) ของแต่ละตัวอย่างเพื่อบ่งชี้ถึงความคงตัวเมื่อผ่านการแช่แข็งและละลาย (freeze-thaw stability) ของอัลจินตไฮโดรเจล จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 6 พบว่า อัลจินตไฮโดรเจลที่ผสมเส้นใยอาหารทุกชนิดมีปริมาณน้ำแยกตัวออกมาภายหลังจากการแช่แข็งและละลายน้อยกว่าตัวอย่างอัลจินตไฮโดรเจลปกติที่ไม่ผสมเส้นใยอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยอัลจินตผสมเส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ มีการแยกตัวของน้ำน้อยที่สุด (20.29%) หรือมีความสามารถในการเก็บรักษาน้ำไว้ใน โครงสร้างได้ดีที่สุด รองลงมาคือ อัลจินตผสมเส้นใยอาหารจากไซสม (citri-fi) อัลจินตผสมเส้นใยอาหารจากเมล่อน และอัลจินต

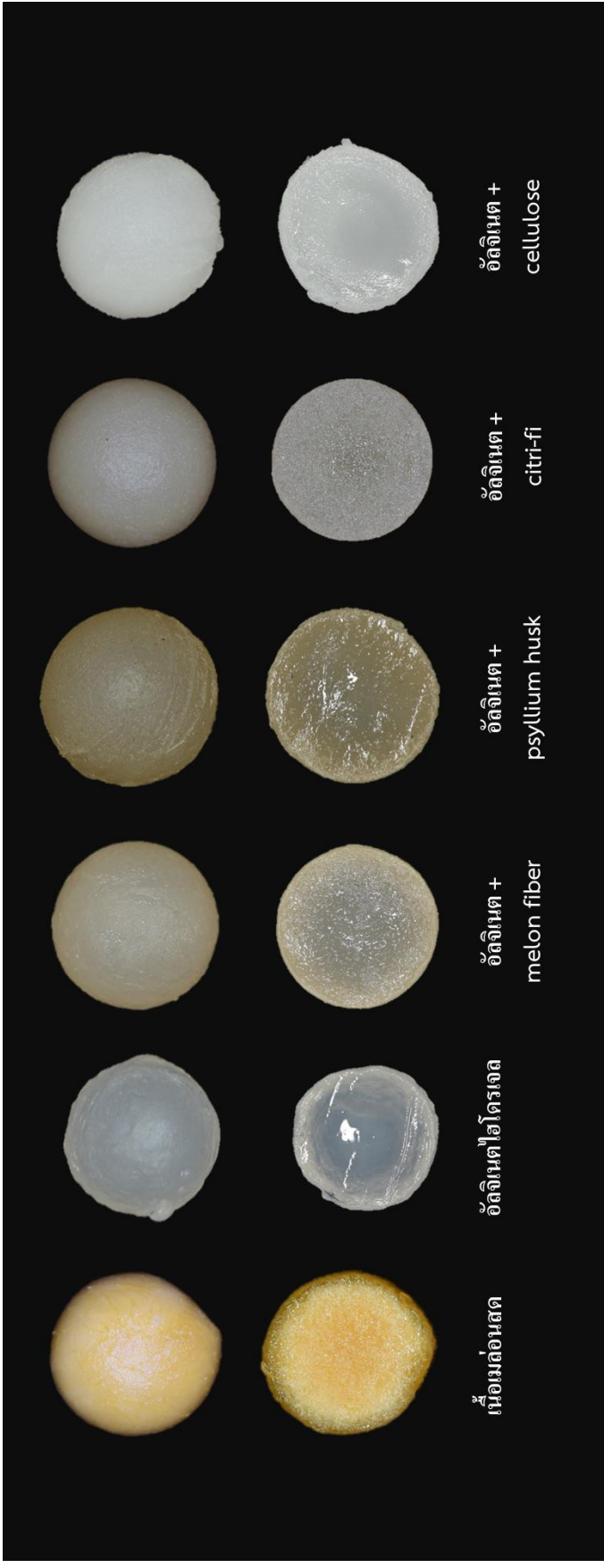
ผสมเส้นใยอาหารเซลลูโลส ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sosulski และคณะ (1982) ที่รายงานว่าเส้นใยอาหารที่มีส่วนประกอบของมิวซิเลจ (mucilage) หรือเพคตินในปริมาณมาก เช่น เส้นใยอาหารจากไซเลียมฮัสค์ จะมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ดีกว่าเส้นใยอาหารที่มีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลส โดยปริมาณน้ำที่แยกออกมา (syneresis) นั้น เกี่ยวข้องโดยตรงกับคุณสมบัติด้านการจับน้ำ (hydration) ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับน้ำ (water absorption) การอุ้มน้ำ (water holding capacity) และการพองตัว (swelling) (Elleuch และคณะ, 2011) โดยปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการจับน้ำของเส้นใยอาหาร ได้แก่ แหล่งที่มาของเส้นใยอาหาร องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยอาหาร ลักษณะโครงสร้าง กระบวนการผลิต ขนาดอนุภาคของเส้นใยอาหาร และระบบของอาหารที่ประยุกต์ใช้ เป็นต้น (Tosh และ Yada, 2010) นอกจากนี้ยังพบว่าเส้นใยอาหารที่ได้จากผักและผลไม้จะมีความสามารถในการจับกับน้ำได้สูงกว่าเส้นใยอาหารที่มาจากธัญพืช (Grigelmo-Miguel และ Martin-Belloso, 1999)

อย่างไรก็ตาม การผสมเส้นใยอาหารในอัลจินตไฮโดรเจลนอกจากจะสามารถเปลี่ยนแปลงคุณภาพเชิงกล โดยเฉพาะอย่างยิ่งลักษณะเนื้อสัมผัส และมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงความสามารถในการอุ้มน้ำของอัลจินตไฮโดรเจลได้แล้วนั้น เส้นใยอาหารยังช่วยให้อัลจินตไฮโดรเจลที่ได้มีลักษณะปรากฏที่คล้ายคลึงกับผลไม้จริงมากยิ่งขึ้นได้อีกด้วย (ภาพที่ 14)

**ตารางที่ 6** ผลของเส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำต่อความคงตัวของอัลจินตไฮโดรเจลเมื่อผ่านการแช่แข็งและละลาย

ตัวอย่าง	การแยกตัวของน้ำ (%syneresis)
เนื้อเมล่อนสด	37.13 ± 0.78 <sup>d</sup>
อัลจินตไฮโดรเจล	63.23 ± 1.46 <sup>a</sup>
อัลจินต + melon fiber	42.53 ± 1.63 <sup>c</sup>
อัลจินต + psyllium husk	20.29 ± 1.04 <sup>f</sup>
อัลจินต + citri-fi	31.73 ± 1.02 <sup>c</sup>
อัลจินต + cellulose	50.30 ± 1.48 <sup>b</sup>

<sup>a-f</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

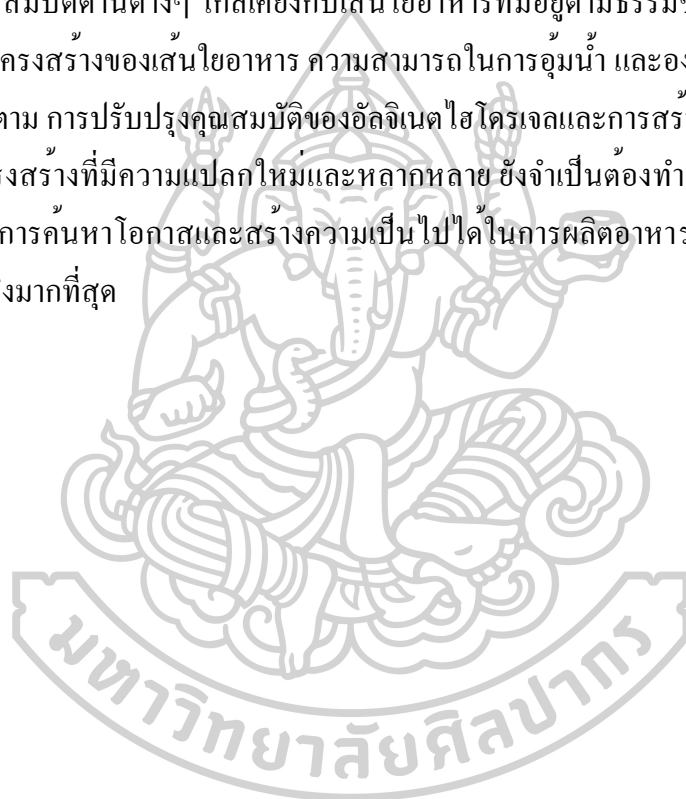


ภาพที่ 14 อัลจิเนตไฮโดรเจลผสมกับสเนไฮอาหารแบบไม่ละลายน้ำชนิดต่างๆ ที่ 1.0% (w/w)



### 3.5 สรุป

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นแนวทางและความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลด้วยการใช้เส้นใยอาหารแบบไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติเชิงกลและความสามารถในการอุ้มน้ำ ตลอดจนลักษณะปรากฏภายนอกของอัลจินตไฮโดรเจลสามารถถูกปรับปรุงให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยการเลือกใช้ชนิดและปริมาณของเส้นใยอาหารให้ถูกต้องและเหมาะสมกับการใช้งาน กล่าวคือ หากต้องการปรับปรุงคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลให้เหมาะสมกับการผลิตผลไม้ขึ้นรูป ควรพิจารณาเลือกใช้เส้นใยอาหารที่มีคุณสมบัติด้านต่างๆ ใกล้เคียงกับเส้นใยอาหารที่มีอยู่ตามธรรมชาติของอาหารชนิดนั้น ตัวอย่างเช่น โครงสร้างของเส้นใยอาหาร ความสามารถในการอุ้มน้ำ และองค์ประกอบทางเคมี เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลและการสร้างอัลจินตไฮโดรเจลให้มีลักษณะโครงสร้างที่มีความแปลกใหม่และหลากหลาย ยังจำเป็นต้องทำการศึกษาต่อไปอีกมาก ทั้งนี้ เพื่อเป็นการค้นหาโอกาสและสร้างความเป็นไปได้ในการผลิตอาหารขึ้นรูปให้มีคุณลักษณะเสมือนของจริงมากที่สุด



## บทที่ 4

### การประเมินความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคสุญญากาศแบบจังหวะในระบบอัลจินตไฮโดรเจล

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ (pulsed-vacuum stimulation (PVS)) ต่อการเกิดเจลแบบ External gelation ของอัลจินตไฮโดรเจลทรงกลม (hydrogel balls) โดยการกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่แตกต่างกัน 3 ระดับ (8, 35 และ 61 kPa) ทำการกระตุ้นจำนวน 3 รอบ (1 รอบประกอบด้วย การปรับสถานะให้เป็นสุญญากาศ นาน 10 นาที และปรับให้เป็นสถานะความดันบรรยากาศ นาน 10 นาที ทำเช่นนี้ 3 ครั้ง) จากการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficients,  $D$ ) ของแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) มีค่าค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการเกิดเจลที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยพบว่าอัตราการลดลงของน้ำหนัก (rate of weight reduction) และอัตราการหดตัว (rate of volume shrinkage) ของอัลจินตไฮโดรเจล มีค่าแปรผันโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การประยุกต์ใช้การกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ 61 kPa นั้น เป็นสถานะที่สามารถกระตุ้นให้เกิดการแพร่ของแคลเซียมไอออนได้สูงที่สุด ในขณะที่การปรับสถานะให้เป็นสุญญากาศเท่ากับ 8 kPa กลับทำให้ตัวอย่างอัลจินตไฮโดรเจลมีค่าอัตราการลดลงของน้ำหนักและค่าอัตราการหดตัวมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่สถานะอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบว่า คุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสทั้งหมดของตัวอย่าง (hardness, breaking deformation, Young's modulus และ rupture strength) ไม่ได้แปรผันโดยตรงตามสถานะสุญญากาศที่เปลี่ยนแปลงไป แต่กลับมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราการลดลงของน้ำหนักและค่าอัตราการหดตัวของอัลจินตไฮโดรเจล สำหรับผลการวิเคราะห์โครงสร้างระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron micrographs, SEM) ทำให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่า การกระตุ้นด้วยสถานะสุญญากาศแบบจังหวะส่งผลต่อลักษณะโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจล กล่าวคือ การกระตุ้นด้วยสถานะสุญญากาศแบบจังหวะสามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลให้เกิดลักษณะเป็นชั้นเปลือกด้านนอกที่แข็งแรงมีลักษณะคล้ายเปลือกของผลไม้ได้

อย่างไรก็ตาม พบว่า เมื่อตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยสภาวะสุญญากาศที่มีการลดความดันต่ำกว่า 61 kPa (35 และ 8 kPa) ทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน, มีโพรงอากาศขนาดใหญ่ และเกิดการยุบตัวของโครงสร้าง ดังนั้น จากผลลัพธ์ที่กล่าวมาแล้วในช่วงต้น สามารถบ่งชี้ได้ว่า การกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะอาจเป็นเทคโนโลยีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเกิดเจลแบบ External gelation เพื่อปรับปรุงกระบวนการเกิดเจลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ตลอดจนสามารถสร้างความปลอดภัยด้านโครงสร้างใหม่ให้แก่อัลจินเตไฮโดรเจลได้อีกด้วย

**คำสำคัญ:** การแพร่ของแคลเซียม การลดความดัน โครงสร้างเจล ไฮโดรไดนามิก สุญญากาศ

#### 4.1 บทนำ

อัลจินเต (alginate) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีโครงสร้างลักษณะสายตรงไม่มีการแตกแขนงผลิตมาจากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล เช่น *Laminaria sp.*, *Durvillaea sp.*, และ *Sargassum sp.* (Ramdhan และคณะ, 2020) หรือ ไบโอฟิล์มของแบคทีเรีย (Chan และ Mooney, 2013) สายของอัลจินเตประกอบด้วย (1-4)- $\beta$ -D-mannuronic acid (M) และ  $\alpha$ -L-guluronic acid (G) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ M-blocks, G-blocks และการผสมกันของ M และ G residues (Donati และ Paoletti, 2009; Ramdhan และคณะ, 2020) ส่วนประกอบของ M และ G ในอัลจินเต ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของสาหร่ายและแบคทีเรีย (Chan และ Mooney, 2013) โดยอัลจินเตมีหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ที่มีคุณสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ดังนั้น อัลจินเตจึงสามารถเกิดเจลกับไอออนที่มีประจุบวกได้ง่ายและรวดเร็ว เช่น  $\text{Na}^+$  และ  $\text{K}^+$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  (Fujiwara และคณะ, 2021) จากคุณสมบัติที่สามารถเกิดเจลได้ง่ายนี้ อัลจินเตจึงเป็นที่นิยมสำหรับนำมาใช้งานในด้านต่างๆ เช่น เป็นวัตถุเจือปนอาหารในอุตสาหกรรมอาหาร และเป็นสารห่อหุ้ม (encapsulation agent) ที่ใช้ในเทคโนโลยีชีวภาพและเภสัชวิทยา (Chen และคณะ, 2015; Huang และ Lin, 2017; Jain และ Bar-Shalom, 2014; Ponce และคณะ, 2021) นอกจากนี้ อัลจินเตไฮโดรเจลยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการรักษาโรคเบาหวาน (Soon-Shiong และคณะ, 1994) การสร้างกระดูกขึ้นมาใหม่ (Alsberg และคณะ, 2001) การซ่อมแซมเนื้อเยื่อ (Chen และคณะ, 2017) และใช้ในการควบคุมกระบวนการนำส่งตัวยาได้อีกด้วย (Chen และคณะ, 2018)

โดยทั่วไปแล้วแคลเซียมไอออนจะจับกับส่วน G-block ของอัลจินเตและเกิด crosslink เป็นโครงสร้างเจลที่มีลักษณะคล้าย “egg-box” (Agulhon และคณะ, 2012; Cao และคณะ, 2020) โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดเจลของอัลจินเต คือ ส่วนของ G-block และแคลเซียมไอออน ซึ่งพบว่า

พอลิเมอร์อัลจินตที่มี G-blocks จำนวนมากจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น (Kuo และ Ma, 2001) นอกจากนี้ Lozano-Vazquez และคณะ (2015) ได้ระบุว่า ปริมาณแคลเซียมไอออนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยกระตุ้นการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างสายพอลิเมอร์ของอัลจินตและเกิดเป็นไฮโดรเจลได้ดีขึ้น

อัลจินตไฮโดรเจลสามารถผลิตได้ 2 วิธี คือ External gelation และ Internal gelation โดยการเกิดเจลแบบ External gelation เป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายด้วยการบีบหรือหยดสารละลายอัลจินตลงในสารละลายเกลือแคลเซียมซึ่งจะเกิดอัลจินตไฮโดรเจลบริเวณชั้นนอกสุดได้ในทันที (Chan และคณะ, 2006) จากนั้นแคลเซียมไอออนจะแพร่ผ่านเจลด้านนอกเข้าไปสู่จุดศูนย์กลางของเม็ดอัลจินต (Lopez-Sanchez และคณะ, 2018) แต่สำหรับวิธี Internal gelation นั้น จะใช้เกลือแคลเซียมที่ไม่ละลายน้ำ (เช่น  $\text{CaCO}_3$  หรือ  $\text{CaSO}_4$ ) ผสมกับสารละลายอัลจินต โดยใช้กรด (เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) หรือ กลูโคโนเดลตาแลคโตน (GDL)) ช่วยควบคุมการปลดปล่อยแคลเซียมไอออน จากนั้นบีบหรือหยดสารละลายดังกล่าวลงในน้ำมัน (Liu และคณะ, 2002) เมื่อแคลเซียมไอออนเกิดการแตกตัวและปลดปล่อยออกมา จะเกิด crosslink กับอัลจินตและเกิดเป็นอัลจินตไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) มากกว่าเจลที่เกิดจากวิธี External gelation (Choi และคณะ, 2002; Liu และคณะ, 2002) แต่โครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดจากวิธี Internal gelation นั้นกลับมีความหนาแน่นน้อยกว่าเจลที่ผลิตขึ้นด้วยวิธี External gelation เนื่องจากวิธี Internal gelation ทำให้มีรูพรุนขนาดใหญ่เกิดขึ้นจำนวนมาก (Vandenberg และ De La Noue, 2001) Chan และคณะ (2006) ได้มีการศึกษาผลของวิธีการเกิดเจลแบบ Internal gelation และ External gelation ต่อคุณสมบัติของฟิล์มอัลจินต จากผลการศึกษพบว่า การเกิดเจลแบบ External gelation ทำให้เกิดฟิล์มที่บางและมีลักษณะผิวที่เรียบเนียนกว่า ตลอดจนมีความแข็งแรงของโครงสร้างเจลที่มากกว่าฟิล์มที่เกิดเจลแบบ Internal gelation โดยคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยภายใน (เช่น น้ำหนักโมเลกุล, การกระจายของ Ca-binding blocks) และปัจจัยภายนอก (เช่น ความเข้มข้นของ polyuronates, ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), อุณหภูมิ, หรือความแข็งแรงของไอออน) (Cao และคณะ, 2020) นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่า อัตราการแพร่ของไอออนที่มีประจุบวกในระหว่างกระบวนการเกิดเจลแบบ External gelation นั้น ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตอัลจินตไฮโดรเจลเป็นอย่างมาก (B. Petit และคณะ, 1996)

ในปัจจุบัน พบว่า มีการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงอัตราการแพร่ของไอออน (cation) ในการผลิตเม็ดอัลจินตไฮโดรเจลอยู่ไม่มากนัก เช่น Bajpai และคณะ (2016) ได้ใช้เทคนิค dialysis tube (DTDT) ในการเตรียมอัลจินตไฮโดรเจลต่อการเกิด crosslink กับไอออนของ  $\text{Ca(II)+Ba(II)}$  ในขณะที่ Simonescu และคณะ (2020) ได้มีการเตรียมอัลจินตไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นเม็ดบีดส์

โดยใช้เทคนิคอัลตราซาวด์ (ultrasound technique) เพื่อกระตุ้นการแลกเปลี่ยนไอออนในระบบการกำจัดตะกั่วจากน้ำธรรมชาติและน้ำเสีย จากผลการศึกษาพบว่า เม็ดบีดส์ที่เตรียมโดยการใช้เทคนิคอัลตราซาวด์ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ดีขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่ามีการใช้เทคนิคสุญญากาศ (vacuum infiltration) ในการวิจัยทางชีวเคมีของพืช โดยการแช่เนื้อเยื่อพืชลงในสารละลายและนำเข้าสู่สถานะสุญญากาศ (Servillo และคณะ, 2018) เพื่อกำจัดอากาศที่อยู่ภายในเซลล์พืช จากนั้นสารละลายจะสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างของเนื้อเยื่อพืชได้โดยไม่ทำลายโครงสร้างของเซลล์ (Meiri และ Anderson, 1970) สำหรับสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารนั้น เทคนิคการกระตุ้นด้วยสุญญากาศเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อ vacuum impregnation หรือ vacuum infusion โดยเทคนิคดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มปริมาณสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในอาหาร ปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการ ปรับปรุงอายุการเก็บรักษา และปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร (Betoret และคณะ, 2015; Corrêa และคณะ, 2016; de Jesus Junqueira และคณะ, 2017; Moreno และคณะ, 2017; Radziejewska-Kubzdela และคณะ, 2014) นอกจากนี้ Servillo และคณะ (2018) ได้ค้นพบว่าสามารถใช้เทคนิคสุญญากาศเพื่อกระตุ้นให้แคลเซียมไอออนแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างเนื้อเยื่อของมะเขือเทศหั่นเต๋าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีความแน่นเนื้อ (firmness) มากขึ้น ถึงแม้ว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคสุญญากาศจะมีศักยภาพสูงและเป็นเทคนิคที่น่าสนใจ แต่ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ (pulsed-vacuum stimulation, PVS) ในกระบวนการเกิดเจลแบบ External gelation ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาผลของการประยุกต์ใช้เทคนิคสุญญากาศแบบจังหวะต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน (diffusion coefficients, D) ลักษณะเนื้อสัมผัส (textural characteristics) และ โครงสร้างจุลภาค (microstructural characteristics) ของอัลจินेटไฮโดรเจลที่ขึ้นรูปเป็นทรงกลม (hydrogel balls) ซึ่งสิ่งที่ค้นพบในงานวิจัยนี้จะช่วยให้เข้าใจถึงผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะต่อคุณสมบัติของอัลจินेटไฮโดรเจลได้ชัดเจนมากขึ้น และอาจทำให้ค้นพบแนวทางใหม่ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นรูปที่สามารถประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตได้

#### 4.2 วัตถุประสงค์

เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคสุญญากาศแบบจังหวะที่มีการลดระดับความดันแตกต่างกัน ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน, ลักษณะเนื้อสัมผัส และ โครงสร้างจุลภาคของอัลจินेटไฮโดรเจลที่ขึ้นรูปเป็นทรงกลม (hydrogel balls)



### 4.3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 4.3.1 สารเคมี

ในการทดลองครั้งนี้ ใช้โซเดียมอัลจิเนต (sodium alginate) จากบริษัท ทีโอพีไฟลท์ อินเตอร์ ฟู้ดส์ จำกัด (ประเทศไทย) เป็นสารก่อเจลร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ (dihydrate calcium chloride, ความบริสุทธิ์ > 95%) จากบริษัท ชิกมา-อัลคริช (ประเทศไทย) จำกัด

#### 4.3.2 การขึ้นรูปสารละลายอัลจิเนตทรงกลม

เตรียมสารละลายโซเดียมอัลจิเนตความเข้มข้น 1.0 % (w/w) โดยการผสมอัลจิเนตกับน้ำกลั่น และคนผสมจนละลายอย่างสมบูรณ์ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดฟองอากาศ จากนั้นนำสารละลายอัลจิเนตซึ่งใส่พิมพ์ซิลิโคนทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร โดยชั่งน้ำหนัก  $15.0 \pm 0.1$  กรัมและนำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

#### 4.3.3 การเตรียมอัลจิเนตไฮโดรเจลทรงกลม

นำสารละลายอัลจิเนตทรงกลมแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ความเข้มข้น 3.0% (w/w) เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิห้อง โดยมีอัตราส่วนของอัลจิเนต 225 กรัม (อัลจิเนตทรงกลม จำนวน 15 ลูก น้ำหนักลูกละ 15 กรัม) ต่อสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 2.0 ลิตร เพื่อสร้างเจลบางๆ ชั้นนอกสุดที่ช่วยป้องกันการเลี้ยวรูปของอัลจิเนตไฮโดรเจล ก่อนนำไปกระตุ้นด้วยสุญญากาศ

#### 4.3.4 วิธีการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ

กระบวนการเกิดอัลจิเนตไฮโดรเจลจะเกิดขึ้นในหม้อสุญญากาศที่ทำจากวัสดุประเภทสแตนเลส (Owner Foods Machinery Co., Ltd., กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.8 เซนติเมตร และมีความสูง 28 เซนติเมตร (ความจุ 8 ลิตร) เชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) โดยในการศึกษานี้จะทำการกระตุ้นในระหว่างการเกิดเจลของอัลจิเนตด้วยสภาวะสุญญากาศแบบจังหวะ (8, 35 และ 61 kPa) จำนวน 3 รอบ (เวลารวมทั้งหมดในการเกิดเจล คือ 180 นาที แบ่งเป็น 3 รอบ รอบละ 60 นาที) โดยการกระตุ้น 1 รอบ ประกอบไปด้วยการปรับสภาวะให้เป็นสุญญากาศ นาน 10 นาที และปรับให้เป็นสภาวะความดันบรรยากาศ นาน 10 นาที ทำเช่นนี้จำนวน 3 ชั่วโมง (เวลารวม 60 นาที/รอบ) สำหรับตัวอย่างควบคุมในการทดลองนี้คือตัวอย่างที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ กล่าวคือ เป็นตัวอย่างที่เกิดเจลในสภาวะความดันบรรยากาศ

ปกติ (101 kPa) จากนั้นนำอัลจินเตไฮโดรเจลมาล้างด้วยน้ำกลั่นก่อนนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านต่างๆ ต่อไป

#### 4.3.5 การวิเคราะห์การลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction) ของอัลจินเตไฮโดรเจล

น้ำหนักของอัลจินเตไฮโดรเจลที่ลดลงสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{การลดลงของน้ำหนัก (\%weight reduction)} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100$$

เมื่อ  $W_0$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (กรัม)

$W_t$  คือ น้ำหนักของตัวอย่าง ณ เวลา  $t$  (กรัม)

\*แต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง

#### 4.3.6 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, D)

สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, D) ของแคลเซียมไอออน คัดแปลงจากวิธีของ Chrastil (1991) นำตัวอย่างอัลจินเตไฮโดรเจลมาผ่าครึ่ง จากนั้นวัดความหนาของชั้นเจลด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier calipers) โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากสมการต่อไปนี้

$$L = L_{\max}[1 - \exp(-kt)]^n$$

เมื่อ  $L$  คือ ความหนาของไฮโดรเจล (%) ที่เวลา  $t$

$L_{\max}$  คือ ความหนาของไฮโดรเจล (%) ที่เวลา  $t \rightarrow \infty$

(รัศมีของไฮโดรเจลทรงกลม เมื่อเกิดเจลสมบูรณ์)

$n$  คือ ค่า heterogeneous structural resistance constant

$k$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดเจล (gelation rate constant)

\*ในการคำนวณค่า  $n$  และ ค่า  $k$  ใช้วิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรง

\*แต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D = \frac{\pi(k)^{2n}(L_{\max})^2}{36}$$

#### 4.3.7 การวิเคราะห์ค่าการหดตัว (%volume shrinkage, Sv) ของอัลจินเตไฮโดรเจล

สำหรับการวิเคราะห์ค่าการหดตัว (%volume shrinkage, Sv) นั้น สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ค่าการหดตัว (\%volume shrinkage)} = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \times 100$$

เมื่อ  $V_0$  คือ ปริมาตรเริ่มต้นของอัลจินเตไฮโดรเจล ( $\text{cm}^3$ )

$V_t$  คือ ปริมาตรของตัวอย่าง ณ เวลา  $t$  ( $\text{cm}^3$ )

\*แต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง

#### 4.3.8 การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (texture analysis) ของอัลจินเตไฮโดรเจล

สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของอัลจินเตไฮโดรเจลนั้น ใช้เครื่อง Texture Analyzer (รุ่น TA-XT Plus, Stable Micro System Co, Ltd., Surrey, England, UK) ในการทดสอบแรงกด (Uniaxial Compression Test) โดยตั้งค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัด ดังนี้ ความเร็วก่อนทดสอบ (pre-test speed) ความเร็วระหว่างทดสอบ (test-speed) และความเร็วภายหลังการทดสอบ (post-test speed) เท่ากับ 1.0, 1.0 และ 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ทำการกดหัววัดลงไปที่ตัวอย่างเป็นระยะทาง 70% ของความสูงตัวอย่างเริ่มต้น จากนั้นคำนวณหาแรงสูงสุด (N) ที่ทำให้อัลจินเตไฮโดรเจลแตกหรือถูกทำลายโครงสร้าง โดย Young's modulus (E) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Hertz (Mohsenin, 1970) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$E = \frac{3(1 - \nu^2)F}{4D^2d^2}$$

เมื่อ

E คือ Young's modulus

$\nu$  คือ อัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio) ของอัลจินเตไฮโดรเจล

F คือ แรงที่ใช้ในการกด (N)

D คือ ระยะทางที่หัววัดกดลงบนตัวอย่าง (m)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอัลจินเตไฮโดรเจล (m)

\*แต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง

สำหรับค่าแรงที่ใช้ในการเจาะทะลุโครงสร้างบริเวณผิวด้านนอก (rupture strength) ของอัลจินเตไฮโดรเจล ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Texture analyzer (รุ่น TA-XT Plus, Stable Micro System Co, Ltd., Surrey, Godalming GU7 1YL, UK) ใช้หัววัดแบบหน้าตัดเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร (P/2) ตั้งค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดดังนี้ ความเร็วก่อนทดสอบ (pre-test speed) ความเร็วระหว่างทดสอบ (test-speed speed) และความเร็วภายหลังการทดสอบ (post-test speed) เท่ากับ 1.0, 1.0 และ 10.0 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ จากนั้นทำการวิเคราะห์โดยการกดหัววัดลงบนตัวอย่างจนเจาะทะลุโครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจล (แต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง) (Diao และคณะ, 2016)

#### 4.3.9 การวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย

การวิเคราะห์เชิงภาพถ่าย ดำเนินการถ่ายภาพในกล่องไม้สีดำ (ขนาด  $45 \times 45 \times 45 \text{ cm}^3$ ) เพื่อควบคุมแสงสว่างในการถ่ายภาพให้เท่ากัน โดยภายในกล่องมีการติดตั้งหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ จำนวน 2 หลอด (TLD90 Deluxe, Natural Daylight, 18W/965, Philips, Holland) และทำการเปิดไฟก่อนถ่ายภาพเป็นเวลา 15 นาที นอกจากนี้ มีอุณหภูมิสีของแสง (color temperature) เท่ากับ 6500K (D65) และมีดัชนีชี้วัดค่าความถูกต้องของสี (color rendering index) สูงถึง 90% ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กล้องดิจิทัล (รุ่น OMD EM10 Mark II, Olympus, Japan) และเลนส์ Zuiko 30 mm macro lens เป็นอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ โดยมีการตั้งระยะห่างระหว่างกล้องกับตัวอย่าง เท่ากับ 20 เซนติเมตร มุมระหว่างเลนส์กล้องและแหล่งกำเนิดแสงถูกกำหนดไว้ที่  $45^\circ$  ทำการตั้งค่าความเร็วชัตเตอร์ เท่ากับ  $1/8 \text{ s}$ , macrofocusing mode, F3.5, ความไวแสง ISO อัตโนมัติ และไม่ใช้แฟลช ในการถ่ายภาพได้ทำการวางตัวอย่างลงบนพื้นผิวสีดำด้านเพื่อหลีกเลี่ยงการสะท้อนโดยตรง และตั้งมุมระหว่างแกนเลนส์กล้องกับตัวอย่างไว้ที่  $90^\circ$  โดยในแต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 5 ตัวอย่าง

#### 4.3.10 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของอัลจินเตไฮโดรเจล

ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของอัลจินเตไฮโดรเจล (โครงสร้างภายนอกและภาพตัดขวางของตัวอย่างอัลจินเตไฮโดรเจล) โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (รุ่น JSM-6610LV, Tokyo, Japan) และ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (SEM-EDS) (รุ่น X-MaxN 50, JEOL Ltd., Tokyo, Japan) เตรียมตัวอย่างให้มีขนาด  $5 \times 5 \text{ mm}^3$  และทำการกำจัดน้ำโดยแช่อัลจินเตไฮโดรเจลในสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นในระดับต่างๆ โดยเริ่มแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยไปมาก (ไล่ระดับความเข้มข้น ดังนี้ 10, 30, 50, 70, 90 และเอทา

นอลเข้มข้น 99.9% (v/v) ทำการแช่ในแต่ละความเข้มข้นนาน 30 นาที หลังจากนั้นนำไปทำแห้งด้วยวิธี Critical Point Dryer (รุ่น Q150R S, Leica, EM CPD300, Quorum Technology Ltd., East Sussex, England) และทำการเคลือบตัวอย่างด้วย gold-palladium ภายใต้สภาวะสุญญากาศ นำตัวอย่างที่ถูกเคลือบเรียบร้อยแล้วไปถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ตั้งค่า accelerating voltage เท่ากับ 15 kV โดยในแต่ละ treatment จะทำการวิเคราะห์ 3 ตัวอย่าง

#### 4.3.11 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ในการทดลองครั้งนี้ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยผลลัพธ์แสดงเป็นค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน การวิเคราะห์ทางสถิติดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SPSS software v. 16 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) วิเคราะห์หาความแตกต่างของข้อมูลด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) โดยค่า  $p$  ที่น้อยกว่า 0.05 ถือว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นดำเนินการโดยใช้โปรแกรม OriginPro software v. 9 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA)

### 4.4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.4.1 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficients, D) ของแคลเซียมไอออน

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ (61, 35 และ 8 kPa) และจำนวนรอบที่กระตุ้น (การกระตุ้นรอบที่ 1, 2 และ 3) ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) (ตารางที่ 7) นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสภาวะสุญญากาศเดียวกัน (ความดันที่ลดลงเท่ากัน) แต่จำนวนรอบที่กระตุ้นแตกต่างกัน พบว่า การกระตุ้นด้วยสุญญากาศรอบที่ 1 (ช่วงแรกของการเกิดเจลแบบ External gelation : ช่วงเวลา 0-60 นาที) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าการกระตุ้นในรอบที่ 2 (ช่วงเวลา 60-120 นาที) และการกระตุ้นในรอบที่ 3 (ช่วงเวลา 120-180 นาที) เท่ากับ 1.8-11.0 เท่า และ 13.4-172.0 เท่า ตามลำดับ โดยปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเหมือนกันในตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นและตัวอย่างที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการค้นพบของ Li และคณะ (2018) และ Hajikhani และคณะ (2021) ที่กล่าวว่า ในช่วงแรกของการเกิดเจลก่อนที่อัลจินเตไฮโดรเจลจะแข็งตัว แคลเซียมไอออนจะสามารถแพร่เข้าไปในโครงสร้างของอัลจินเตได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่ออัลจินเตไฮโดรเจลเกิดขึ้นจะทำให้แคลเซียมไอออนแพร่ผ่านได้ช้าลง เพราะถูกกีดขวางด้วยชั้นเจลดังกล่าว ดังนั้น จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่า

หากต้องการเพิ่มอัตราการแพร่ หรือเร่งกระบวนการเกิดเจลของอัลจินเตไฮโดรเจลให้เร็วขึ้น ควรกระตุ้นในช่วง 0-60 นาทีแรกของการเกิดเจล เพราะจะเกิดผลลัพ์ที่ดีที่สุด

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาแต่ละรอบของการกระตุ้น พบว่า ในการกระตุ้นรอบที่ 1 (ช่วงแรกของการเกิดเจลที่เวลา 0-60 นาที) การกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ระดับความดัน 61 kPa มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่าการกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 35 kPa และ 8 kPa ประมาณ 1.8 เท่า แต่เมื่อเข้าสู่การกระตุ้นในรอบที่ 2 กลับพบว่า ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยความดัน 61 kPa มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำกว่าตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยความดัน 35 kPa และ 8 kPa ประมาณ 2.2 และ 3.3 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากการกระตุ้นรอบที่ 1 (ช่วงแรกของการเกิดเจลที่เวลา 0-60 นาที) ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 61 kPa มีชั้นเจลเกิดขึ้นหนากว่าตัวอย่างอื่นๆ เพราะมีการแพร่ของแคลเซียมไอออนในอัตราที่สูงที่สุด โดย Lee และคณะ (2018) ได้อธิบายไว้ว่า ในช่วงแรกของการเกิดเจลแบบ External gelation นั้น แคลเซียมไอออนจะเข้าจับกับสายพอลิเมอร์ของอัลจินเตและเกิดเป็นอัลจินเตไฮโดรเจลที่ห่อหุ้มสารละลายอัลจินเตไว้ด้านใน จากนั้นแคลเซียมไอออนจะเกิดการแพร่ผ่านชั้นเจลดังกล่าวเข้าสู่ด้านในของเม็ดอัลจินเต (alginate bead) และเกิดเป็นชั้นเจลที่หนาขึ้น (Lee และคณะ, 2018; Lupo และคณะ, 2015) ด้วยเหตุนี้ ตัวอย่างที่เกิดเจลปริมาณมากในช่วงแรก (รอบที่ 1: 0-60 นาที) จึงส่งผลให้การซึมผ่านของแคลเซียมในช่วงหลัง (รอบที่ 2: 60-120 นาที) เกิดขึ้นได้อย่างจำกัด เพราะถูกกีดขวางด้วยชั้นเจลที่เกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงแรกตามที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น

เมื่อเปรียบเทียบผลของสภาวะสุญญากาศแบบจังหวะที่จำนวนรอบการกระตุ้นเท่ากัน (เวลาการเกิดเจลเท่ากัน) พบว่า การกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะสามารถเพิ่มอัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนได้อย่างชัดเจนในการกระตุ้นรอบที่ 1 และรอบที่ 2 (ตารางที่ 7) โดยในการกระตุ้นรอบที่ 1 พบว่า ตัวอย่างควบคุม (101 kPa) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่น้อยกว่าตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ เท่ากับ 2.6, 1.5 และ 1.4% เมื่อมีการลดความดันให้เท่ากับ 61, 35 และ 8 kPa ตามลำดับ สำหรับการกระตุ้นรอบที่ 2 พบว่า ตัวอย่างควบคุม (101 kPa) มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่น้อยกว่าตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ เท่ากับ 1.6, 3.6 และ 5.4% เมื่อมีการลดความดันให้เท่ากับ 61, 35 และ 8 kPa ตามลำดับ โดยสิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากกลไก hydrodynamic mechanisms (HDM) ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ กล่าวคือ เมื่อมีการเปิดระบบสุญญากาศที่อยู๋ภายใน โครงสร้างของอัลจินเตจะถูกกำจัดออกจากระบบ และเมื่อปิดระบบสุญญากาศระบบจะถูกปรับให้เป็นสภาวะความดันบรรยากาศปกติ (101 kPa) ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของสารละลายแคลเซียมเข้าไปแทนที่ก๊าซในช่องว่างระหว่างเซลล์ ซึ่งเป็นผลมาจาก capillary action และ pressure gradient ที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้

ดีกว่าสภาวะความดันปกติ (Corrêa และคณะ, 2016; Escriche และคณะ, 2000; Fito และคณะ, 2001)

ตารางที่ 7 ผลของสภาวะสุญญากาศและจำนวนรอบในการกระตุ้นต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ แคลเซียมไอออน (D), อัตราการลดลงของน้ำหนัก (Rate of WR) และอัตราการหดตัว (Rate of  $S_v$ ) ของอัลจินเตไฮโดรเจล

ตัวอย่าง	ความดัน (kPa)	จำนวนรอบที่กระตุ้น <sup>1</sup>	D ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /s)	R <sup>2,2</sup>	Rate of WR (mg/s)	Rate of $S_v$ (mm <sup>3</sup> /s)
control	101	1	3.47 ± 0.38 <sup>aC</sup>	0.993	0.43 ± 0.09 <sup>aAB</sup>	0.37 ± 0.08 <sup>aB</sup>
		2	0.51 ± 0.39 <sup>bD</sup>	0.977	0.36 ± 0.06 <sup>aA</sup>	0.32 ± 0.03 <sup>aA</sup>
		3	0.26 ± 0.44 <sup>cB</sup>	0.970	0.16 ± 0.07 <sup>bB</sup>	0.12 ± 0.06 <sup>bB</sup>
PVS	61	1	9.14 ± 1.73 <sup>aA</sup>	0.980	0.48 ± 0.06 <sup>aAB</sup>	0.38 ± 0.03 <sup>aB</sup>
		2	0.83 ± 0.50 <sup>bC</sup>	0.990	0.20 ± 0.07 <sup>bB</sup>	0.31 ± 0.01 <sup>aA</sup>
		3	0.49 ± 0.82 <sup>cA</sup>	0.957	0.07 ± 0.12 <sup>bB</sup>	0.00 ± 0.06 <sup>bC</sup>
	35	1	5.17 ± 1.15 <sup>aB</sup>	0.991	0.38 ± 0.05 <sup>aB</sup>	0.31 ± 0.03 <sup>aB</sup>
		2	1.86 ± 0.87 <sup>bB</sup>	0.984	0.29 ± 0.04 <sup>aAB</sup>	0.30 ± 0.04 <sup>aA</sup>
		3	0.03 ± 0.03 <sup>cC</sup>	0.975	0.12 ± 0.08 <sup>bB</sup>	0.08 ± 0.04 <sup>bB</sup>
	8	1	5.01 ± 0.95 <sup>aB</sup>	0.964	0.54 ± 0.10 <sup>aA</sup>	0.49 ± 0.05 <sup>aA</sup>
		2	2.75 ± 1.47 <sup>bA</sup>	0.952	0.18 ± 0.07 <sup>bB</sup>	0.22 ± 0.04 <sup>cB</sup>
		3	0.00 ± 0.00 <sup>cC</sup>	0.976	0.39 ± 0.11 <sup>aA</sup>	0.37 ± 0.05 <sup>bA</sup>

<sup>1</sup> 1 รอบของตัวอย่างควบคุม (control, 101 kPa) หมายถึง การแช่ตัวอย่างในสารละลายแคลเซียมต่อเนื่อง นาน 60 นาที, 1 รอบของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ (PVS) หมายถึง การปรับสภาวะให้เป็นสุญญากาศ นาน 10 นาที และปรับให้เป็นสภาวะความดันบรรยากาศ (101 kPa) นาน 10 นาที ทำเช่นนี้ 3 ซ้ำต่อ 1 รอบการกระตุ้น (รวม 60 นาที)

<sup>2</sup> R<sup>2</sup> ของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน

ผลลัพธ์แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ของค่าเฉลี่ยที่ความดันเท่ากัน แต่จำนวนรอบในการกระตุ้นแตกต่างกัน

<sup>A-D</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ของค่าเฉลี่ยที่จำนวนรอบในการกระตุ้นเท่ากัน แต่มีความดันแตกต่างกัน

#### 4.4.2 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะต่อค่าการลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction) และการหดตัว (%volume shrinkage)

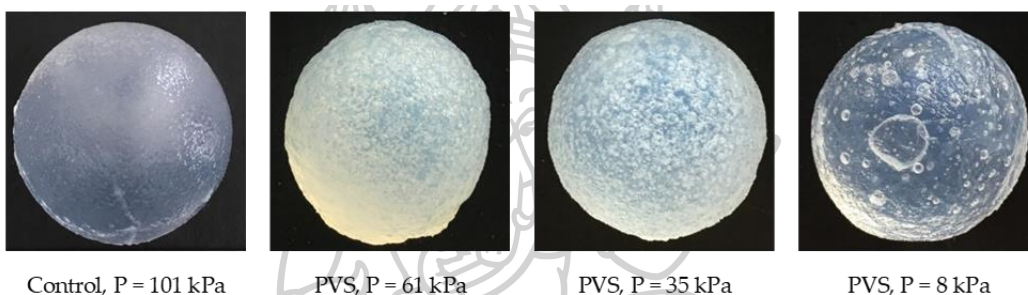
ในช่วง 60 นาทีแรกของการเกิดเจลแบบ External gelation (การกระตุ้นรอบที่ 1) พบว่าตัวอย่างอัลจิเนตไฮโดรเจลมีอัตราการลดลงของน้ำหนัก (rate of weight reduction) และอัตราการหดตัว (rate of volume shrinkage) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเกิดการเกิดเจลในช่วงที่ 2 (60-120 นาที : การกระตุ้นรอบที่ 2) และช่วงที่ 3 (120-180 นาที : การกระตุ้นรอบที่ 3) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเหมือนกันในทุกตัวอย่างทั้งตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นและตัวอย่างที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะก็ตาม (ตารางที่ 7) ยกเว้น ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะที่ความดัน 8 kPa ซึ่งพบว่าอัตราการลดลงของน้ำหนักและอัตราการหดตัวมีค่าลดลงในช่วงการกระตุ้นรอบที่ 2 จากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นอีกครั้งในการกระตุ้นรอบที่ 3 เนื่องจากความเค้น (stress) ที่เพิ่มขึ้นเหนี่ยวนำให้โครงสร้างของอัลจิเนตไฮโดรเจลเกิดการหดตัวมากขึ้นซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการกำจัดน้ำออกจากระบบ โดย Lee และคณะ (2018) ได้กล่าวว่าการสูญเสียมวล (mass loss) และการหดตัวของฟิล์มอัลจิเนตจะเกิดขึ้นในระหว่างที่แคลเซียมไอออนทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอัลจิเนต ซึ่งปริมาณของอัลจิเนตไฮโดรเจลจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่เดียวกันของเหลวที่อยู่ภายในอัลจิเนตไฮโดรเจลก็จะถูกกำจัดออกจากระบบ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า syneresis (Bienaimé และคณะ, 2003; Rezende และคณะ, 2007) จากภาพที่ 15 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า เมื่อระยะเวลาในการเกิดเจลงานขึ้น ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นและไม่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะจะเกิดการสูญเสียน้ำและเกิดการหดตัวของอัลจิเนตไฮโดรเจลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะปรากฏที่มีสีขาวขุ่นเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อเปรียบเทียบผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศ (61, 35 และ 8 kPa) ที่มีรอบของการกระตุ้นเท่ากับ 3 รอบ (ตารางที่ 7) พบว่า ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 8 kPa มีอัตราการลดลงของน้ำหนักและอัตราการหดตัวสูงสุด ( $p < 0.05$ ) ในขณะที่การกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 61 kPa กลับมีค่าอัตราการลดลงของน้ำหนักและอัตราการหดตัวที่เกือบจะเป็นศูนย์ นอกจากนี้ จากภาพที่ 16 และ 17 ยังแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างอัลจิเนตไฮโดรเจลที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 61 kPa เป็นตัวอย่างที่มีค่าการลดลงของน้ำหนักและค่าการหดตัวโดยรวมภายหลังการเกิดเจลอย่างสมบูรณ์แล้วต่ำกว่าตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 8 kPa เท่ากับ 26.5 และ 22.3% ตามลำดับ ( $p < 0.05$ ) ทั้งนี้ เนื่องจากในระหว่างการกระตุ้นด้วยสุญญากาศจะเกิดกลไก hydrodynamic mechanism (HDM) ควบคู่ไปกับปรากฏการณ์การเปลี่ยนรูปและการคลายตัว (deformation-relaxation phenomenon, DRP) ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุที่มีรูพรุน (Fito และคณะ, 1996) ด้วยเหตุนี้ ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 8 kPa จึงอาจเกิดการเปลี่ยนรูปร่างได้มากกว่าตัวอย่างที่ถูกกระตุ้น

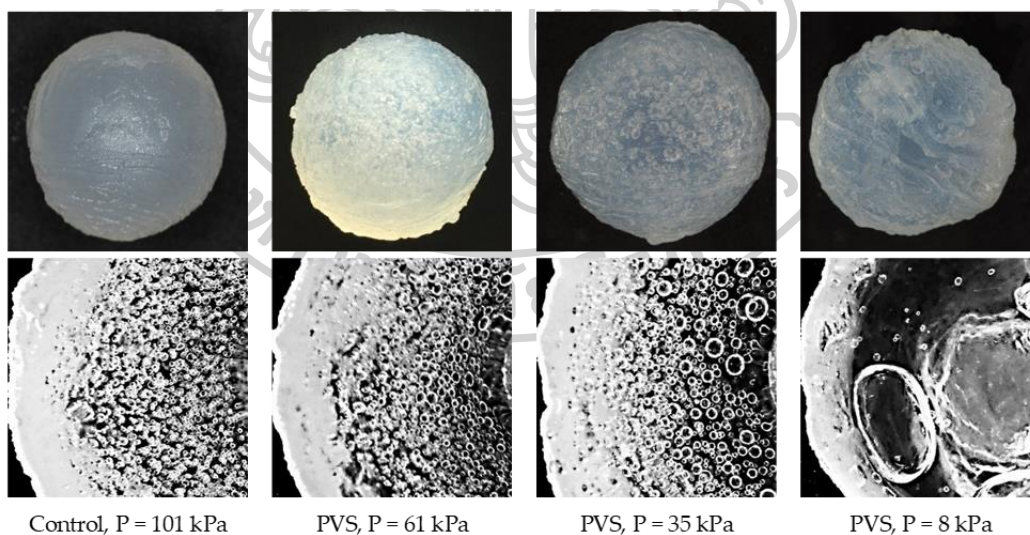


ด้วยสุญญากาศที่ความดัน 61 kPa โดยอัลจินเตไฮโดรเจลจะเกิดการขยายตัวเมื่อระบบเป็นสภาวะสุญญากาศ และเกิดการหดตัวเมื่อสภาวะกลับเข้าสู่ความดันบรรยากาศปกติ ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่กระบวนการเกิดเจลแบบ External gelatin สามารถทำได้โดยเพิ่มอัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนด้วยการใช้สุญญากาศแบบจังหวะ ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้สภาวะสุญญากาศที่มีการลดความดันมากเกินไป เพราะนอกจากจะไม่ช่วยส่งเสริมให้การแพร่ของแคลเซียมไอออนเพิ่มสูงขึ้นแบบแปรผันโดยตรงแล้ว ยังทำให้อัลจินเตไฮโดรเจลเกิดการสูญเสียมวลและเกิดการหดตัวเป็นอย่างมากอีกด้วย

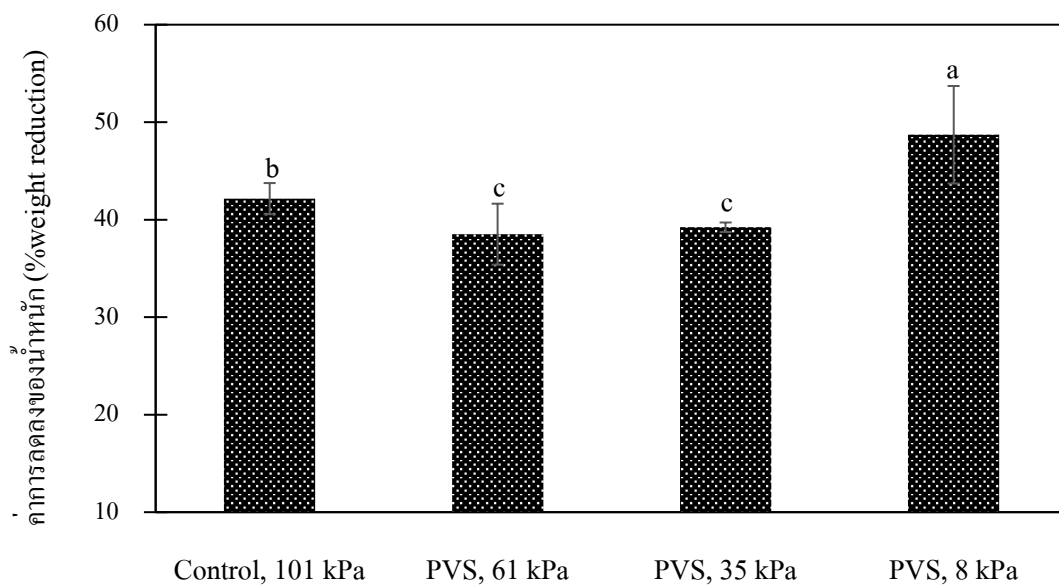
(ก) ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ นาน 20 นาที



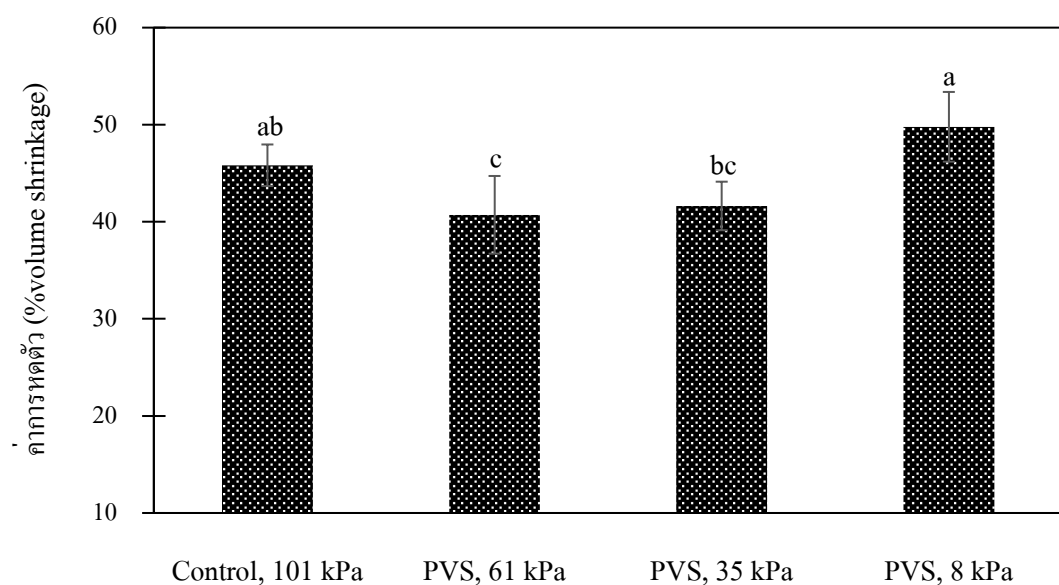
(ข) ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ นาน 180 นาที



ภาพที่ 15 ลักษณะปรากฏภายนอกและภาพตัดขวางของอัลจินเตไฮโดรเจล ซึ่งเกิดเจลภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน โดย (ก) คือตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ นาน 20 นาที และ (ข) คือตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ นาน 180 นาที



ภาพที่ 16 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ จำนวน 3 รอบ (180 นาที) ต่อค่าการลดลงของน้ำหนัก (%weight reduction) ของอัลจินตไฮโดรเจล



ภาพที่ 17 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ จำนวน 3 รอบ (180 นาที) ต่อค่าการหดตัว (%volume shrinkage) ของอัลจินตไฮโดรเจล

#### 4.4.3 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอัลจินตไฮโดรเจล

##### ไฮโดรเจล

จากการศึกษานี้พบว่า การกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะจำนวน 3 รอบ ส่งผลให้ตัวอย่างมีค่า hardness, breaking deformation และ Young's modulus มากกว่าตัวอย่างที่เกิดเจลในสภาวะความดันบรรยากาศปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตาม การกระตุ้นด้วยสุญญากาศไม่มีผลกระทบท่อค่า rupture strength ของอัลจินตไฮโดรเจลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ 8) นอกจากนี้ ยังพบว่าพารามิเตอร์ในด้านลักษณะเนื้อสัมผัสของอัลจินตไฮโดรเจลไม่ได้แปรผันตรงกับระดับความดันของสภาวะสุญญากาศ แต่มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับอัตราการลดลงของน้ำหนักและอัตราการหดตัวของอัลจินตไฮโดรเจล (ตารางที่ 7 และ 8) โดยตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 8 kPa พบว่า มีค่า hardness, breaking deformation และ Young's modulus เพิ่มขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างควบคุมที่เกิดเจลในสภาวะบรรยากาศปกติ (101 kPa), ตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 61 และ 35 kPa ตามลำดับ ทั้งนี้ เมื่อเปรียบเทียบคุณลักษณะทางเนื้อสัมผัสของตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 8 kPa กับตัวอย่างควบคุมที่เกิดเจลในสภาวะบรรยากาศปกติ (101 kPa) พบว่า มีค่า hardness, breaking deformation และ Young's modulus สูงกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณ 78.7, 15.1 และ 115.6% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากฟองอากาศขนาดเล็กที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายอัลจินต เกิดการรวมตัวกันและพยายามเคลื่อนที่ออกจากโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลซึ่งสังเกตได้จากภาพที่ 15 (ข) ที่แสดงให้เห็นว่าฟองอากาศเคลื่อนที่มารวมตัวกันบริเวณเจลชั้นนอก จึงทำให้ฟองอากาศที่อยู่บริเวณด้านใน โดยเฉพาะบริเวณตรงกลางของอัลจินตไฮโดรเจลทรงกลมมีฟองอากาศกระจายตัวอยู่น้อยลง ประกอบกับน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของอัลจินตถูกกำจัดออกในระหว่างการกระตุ้นด้วยสุญญากาศจึงส่งผลให้สายพอลิเมอร์ของอัลจินตเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ใกล้ชิดกันมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ การสูญเสียน้ำหนักและการหดตัวของอัลจินตไฮโดรเจลจึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น และส่งผลให้ลักษณะเนื้อสัมผัสโดยรวมของอัลจินตไฮโดรเจลมีความแน่นเนื้อและมีโครงสร้างที่แข็งแรงเพิ่มมากขึ้น (Jeong และคณะ, 2020) ซึ่งชุดข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถวางแผนกระบวนการผลิตที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของอัลจินตไฮโดรเจลให้มีความแตกต่างจากรูปแบบเดิม หรือมีคุณสมบัติตรงตามเป้าประสงค์ของการใช้งานได้ด้วยการกระตุ้นเชิงกล และไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีใดๆ

**ตารางที่ 8** ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ จำนวน 3 รอบ<sup>1</sup> (180 นาที) ต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของอัลจินตไฮโดรเจล

ตัวอย่าง	ความดัน (kPa)	Hardness (N)	Breaking deformation (%)	Young's modulus (kPa)	Rupture strength (N)
Control	101	36.1 ± 2.3 <sup>d</sup>	58.1 ± 0.3 <sup>d</sup>	66.2 ± 2.7 <sup>d</sup>	7.4 ± 0.6 <sup>ab</sup>
PVS	61	51.0 ± 1.7 <sup>b</sup>	63.0 ± 0.9 <sup>b</sup>	95.0 ± 2.3 <sup>b</sup>	7.0 ± 0.4 <sup>b</sup>
	35	42.2 ± 2.1 <sup>c</sup>	60.3 ± 1.1 <sup>c</sup>	69.6 ± 6.4 <sup>c</sup>	7.1 ± 0.5 <sup>b</sup>
	8	64.5 ± 5.5 <sup>a</sup>	66.9 ± 0.6 <sup>a</sup>	142.7 ± 7.9 <sup>a</sup>	8.2 ± 0.2 <sup>a</sup>

<sup>1</sup> 1 รอบของตัวอย่างควบคุม (control, 101 kPa) หมายถึง การแช่ตัวอย่างในสารละลายแคลเซียม นาน 60 นาที,

1 รอบของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ (PVS) หมายถึง การปรับสภาวะให้เป็นสุญญากาศ นาน 10 นาที และปรับให้เป็นสภาวะความดันบรรยากาศ (101 kPa) นาน 10 นาที ทำเช่นนี้ 3 ชุดต่อ 1 รอบการกระตุ้น (รวม 60 นาที) ผลลัพธ์แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

<sup>a-d</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

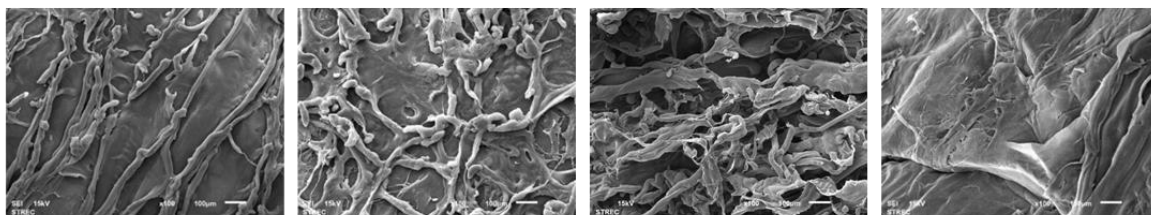
#### 4.4.4 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาของอัลจินตไฮโดรเจล

##### ไฮโดรเจล

ภาพถ่ายที่วิเคราะห์ด้วย SEM แสดงให้เห็นโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลที่ประกอบไปด้วยการยึดเกาะกันของสายพอลิเมอร์ โพร่งอากาศ และรูพรุน (ภาพที่ 18 และ 19) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกระตุ้นด้วยสุญญากาศในระหว่างการเกิดเจลแบบ External gelation นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนทั้งบริเวณพื้นผิวภายนอกและโครงสร้างภายในของอัลจินตไฮโดรเจล เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นฐานวิทยาของตัวอย่างที่เกิดเจลภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศปกติ (101 kPa: ตัวอย่าง Control) และตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศ พบว่า ตัวอย่าง Control มีลักษณะพื้นผิวภายนอกที่เรียบเนียน และไม่มีรอยแตกร้าว ในขณะที่ลักษณะพื้นผิวภายนอกของอัลจินตไฮโดรเจลที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะนั้นมีลักษณะขรุขระและไม่เรียบเนียน โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ความดัน 8 kPa (ภาพที่ 18) ซึ่ง Li และคณะ (2018) ได้รายงานไว้ว่า พื้นผิวของแคลเซียมอัลจินตฟิล์มที่ไม่เรียบเนียนหรือมีความขรุขระนั้น ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับระดับการขยายตัว (swelling degree) ของอัลจินตไฮโดรเจลซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเกิดเจล ดังนั้น อาจตั้งสมมติฐานได้ว่า ตัวอย่างที่มีการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะจะเกิดการขยายตัวเมื่อระบบเป็นสภาวะสุญญากาศ และเกิดการหดตัวเมื่อสภาวะกลับเข้าสู่ความดันบรรยากาศปกติ ซึ่งอัลจินตไฮโดรเจลที่ขยายตัวมากจะส่งผลให้เกิดการพับตัวของพอลิเมอร์และเกิดเป็นพื้นผิว

ที่ไม่เรียบเนียน ด้วยเหตุนี้ ตัวอย่างอัลจินเตไฮโดรเจลที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะจึงแสดงลักษณะสัณฐานวิทยาที่ขรุขระไม่เรียบเนียนมากกว่าตัวอย่างที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศหรือตัวอย่าง Control ดังที่แสดงในภาพที่ 18

(ก) กำลังขยาย 100 เท่า



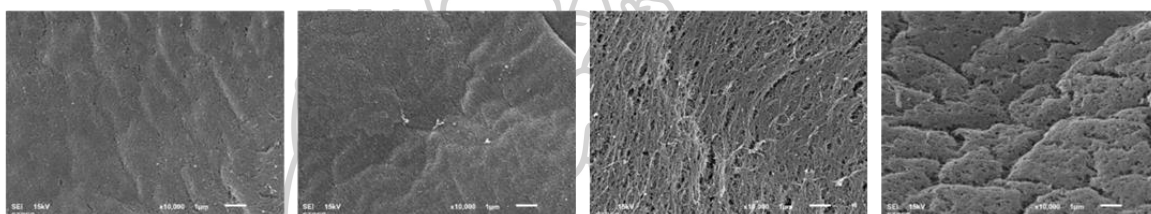
Control, P = 101 kPa

PVS, P = 61 kPa

PVS, P = 35 kPa

PVS, P = 8 kPa

(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า



Control, P = 101 kPa

PVS, P = 61 kPa

PVS, P = 35 kPa

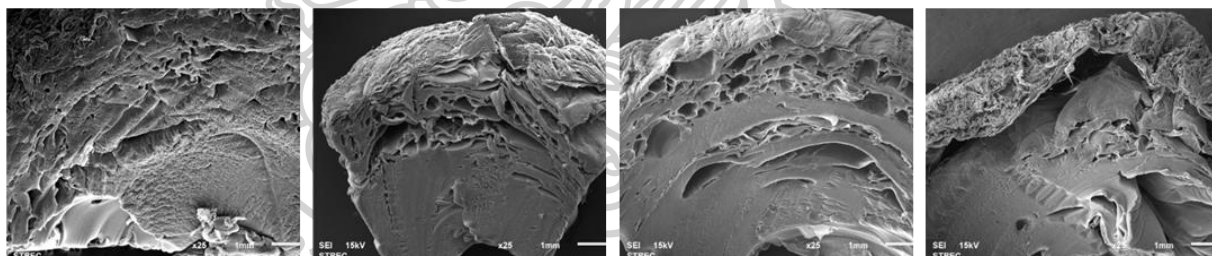
PVS, P = 8 kPa

ภาพที่ 18 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะจำนวน 3 รอบ (180 นาที) ต่อลักษณะสัณฐานวิทยา (โครงสร้างภายนอก) ของอัลจินเตไฮโดรเจลที่วิเคราะห์ด้วย SEM โดยใช้

(ก) กำลังขยาย 100 เท่า และ (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยาของอัลจินเตไฮโดรเจล (ภาพตัดขวาง) ซึ่งวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่า การกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะที่ความดัน 61 kPa เป็นสถานะเดียวที่ไม่ทำให้โครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจลเกิดการยุบตัวเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะที่ความดัน 35 และ 8 kPa โดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะที่ความดัน 8 kPa ซึ่งเป็นตัวอย่างที่โครงสร้างเกิดความเสียหายมากที่สุด เพราะตรวจพบโพรงอากาศขนาดใหญ่และโครงสร้างเกิดการยุบตัวมากกว่าตัวอย่างอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 19) ทั้งนี้ อาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ ซึ่งมีการควบคุมให้สถานะเป็นสุญญากาศสลับกับสถานะความดันบรรยากาศปกติ โดยเมื่อเริ่มเปิดระบบสุญญากาศ อากาศที่อยู่ในตัวอย่างจะเกิดการขยายตัวและไหลออกไปบางส่วน จากนั้นเมื่อปรับให้เป็นสถานะความดันบรรยากาศปกติอย่างกะทันหัน อากาศที่เหลืออยู่จะกลับมาถูกบีบอัดทำให้เกิด HDM (Servillo และคณะ, 2018) และเมื่อการขยายตัวสลับ

กับการบีบอัดก๊าซมีจำนวนรอบที่เพิ่มมากขึ้น อาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค, การยุบตัวของอัลจินเตไฮโดรเจล และการเกิดพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Deng และ Zhao, 2008; Nieto และคณะ, 2013) โดย Lin และคณะ (2016) ได้ค้นพบเช่นกันว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาคในชั้นเนื้อเยื่อที่ถูกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะในกระบวนการแช่แข็ง ซึ่งการขยายตัวของก๊าซที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยสุญญากาศช่วยเพิ่มช่องว่างระหว่างเซลล์ และส่งเสริมให้ความสามารถในการซึมผ่าน (permeability) ของเซลล์เมมเบรนเกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาภาพที่ 19 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่เกิดขึ้นกับอัลจินเตไฮโดรเจลแล้ว พบว่า ลักษณะโครงสร้างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (nonhomogeneous structure) และโพรงอากาศขนาดต่างๆ เกิดขึ้นบริเวณโครงสร้างด้านในของอัลจินเตไฮโดรเจลมากกว่าบริเวณผิวด้านนอก ซึ่ง Lee และคณะ (2018) และ Puguang และคณะ (2014) ได้อธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นนี้ว่าเป็นเพราะเจลที่อยู่บริเวณด้านนอกมีปริมาณของแคลเซียม ไอออนและโมเลกุลของอัลจินเตที่มากกว่าบริเวณด้านใน จึงทำให้โครงสร้างของเจลด้านนอกมีความแข็งแรงมากกว่า และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ยากกว่า ดังนั้น จึงพบว่าเจลที่อยู่บริเวณด้านนอกมีโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าเจลที่อยู่บริเวณด้านในอย่างเห็นได้ชัด



Control, P = 101 kPa

PVS, P = 61 kPa

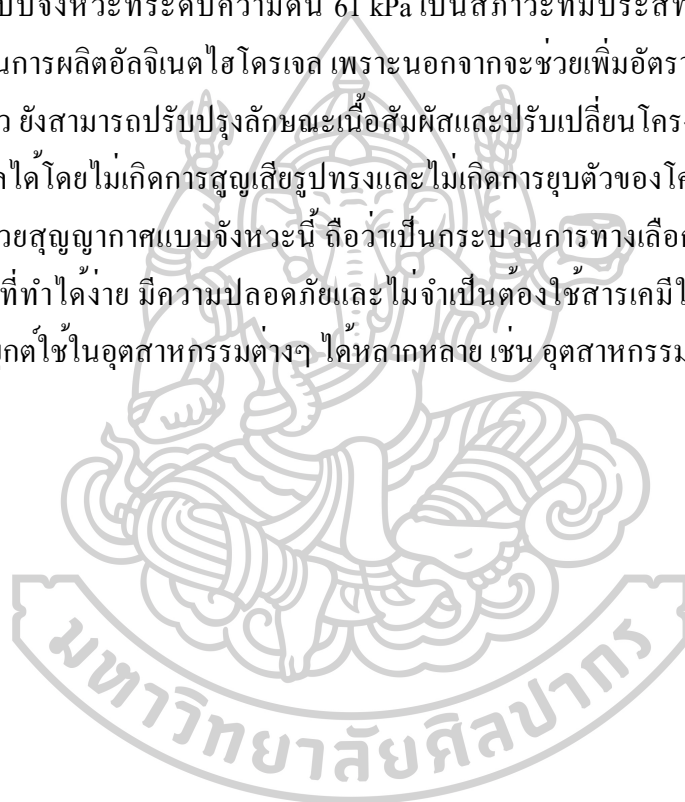
PVS, P = 35 kPa

PVS, P = 8 kPa

ภาพที่ 19 ผลของการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะจำนวน 3 รอบ (180 นาที) ต่อดัชนีฐานวิทยา (ภาพตัดขวาง) ของอัลจินเตไฮโดรเจลซึ่งวิเคราะห์ด้วย SEM ที่กำลังขยาย 25 เท่า

#### 4.5 สรุป

จากการประยุกต์ใช้สุญญากาศแบบจังหวะในการกระตุ้นระหว่างกระบวนการเกิดเจล แบบ External gelation ของอัลจิเนตไฮโดรเจลนั้น พบว่า การกระตุ้นด้วยสุญญากาศในช่วงแรกของการเกิดเจล (ช่วงเวลา 0-60 นาที แรกของการเกิดเจล) เป็นช่วงเวลาที่การกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะสามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของแคลเซียมไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด เพราะหลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออนจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาการเกิดเจลที่เพิ่มมากขึ้น โดยจากผลการศึกษาในครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่าการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะที่ระดับความดัน 61 kPa เป็นสถานะที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดสำหรับประยุกต์ใช้ในการผลิตอัลจิเนตไฮโดรเจล เพราะนอกจากจะช่วยเพิ่มอัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนได้แล้ว ยังสามารถปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสและปรับเปลี่ยนโครงสร้างโดยรวมของอัลจิเนตไฮโดรเจลได้โดยไม่เกิดการสูญเสียรูปทรงและไม่เกิดการยุบตัวของโครงสร้าง ซึ่งเทคโนโลยีการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะนี้ ถือเป็นกระบวนการทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย มีความปลอดภัยและไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีใดๆ ดังนั้น จึงเป็นวิธีที่สามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น



## บทที่ 5

### การประยุกต์ใช้ Ultra-Fine Bubble (UFB) ในระบบอัลจินเตไฮโดรเจล

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่ต้องการสร้างรูพรุนในโครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจล (porous gel) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ (functional properties) ในด้านการลำเลียงมวลสารให้ดียิ่งขึ้น จึงมีความสนใจในการประยุกต์ใช้ Ultra-Fine Bubble (UFB) หรือฟองอากาศที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมครอน ซึ่งเป็นฟองอากาศที่มีเสถียรภาพสามารถแขวนลอยในของเหลวได้ยาวนานโดยไม่เกิดการแยกชั้นหรือรวมตัวกัน ดังนั้น นักวิจัยจึงทำการศึกษาผลของชนิดก๊าซ ได้แก่ อากาศในสภาวะปกติ (Air) ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ร่วมกับการศึกษาผลของระยะเวลาในการสร้าง UFB ที่ 15, 30 และ 60 นาที ต่อคุณสมบัติของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป ตลอดจนการประยุกต์ใช้น้ำที่มี UFB ในการผลิตอัลจินเตไฮโดรเจล จากผลการทดลอง พบว่า ตัวอย่างที่ใช้ Air และก๊าซ  $O_2$  เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า 200 นาโนเมตร โดยก๊าซ  $O_2$  สามารถสร้าง UFB ที่มีขนาดและปริมาณอนุภาคมากกว่าการใช้ก๊าซชนิดอื่นๆ ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้ ยังพบว่า น้ำที่มี UFB จากก๊าซ  $O_2$  มีค่าสัมบูรณ์ของศักย์ไฟฟ้าเซตา (absolute zeta potential) สูงที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่า UFB ที่เกิดจากก๊าซ  $O_2$  มีเสถียรภาพสูงกว่า UFB ที่ถูกสร้างจาก Air และ  $CO_2$  ตามลำดับ ( $p < 0.05$ ) เมื่อนำน้ำที่มี UFB ไปผลิตอัลจินเตไฮโดรเจล พบว่า UFB ที่เกิดจากก๊าซ  $O_2$  และ Air สามารถช่วยให้กระบวนการเกิดเจลของอัลจินเตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์เร็วขึ้นได้อย่างชัดเจน แต่ น้ำที่มี UFB จากก๊าซ  $CO_2$  กลับแสดงผลตรงกันข้ามกับก๊าซชนิดอื่นๆ โดยมีแนวโน้มทำให้อัตราการเกิดเจลของอัลจินเตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และผลการวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาที่แสดงให้เห็นรูพรุนจำนวนมากในโครงสร้างของอัลจินเตไฮโดรเจลที่ประยุกต์ใช้ UFB ดังนั้น จากผลการทดลองทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ UFB จากก๊าซ  $O_2$  เป็นเทคนิคใหม่ที่มีความปลอดภัยสูงและสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของอัลจินเตไฮโดรเจลในด้านการลำเลียงมวลสารได้เป็นอย่างดี

**คำสำคัญ:** นาโนบับเบิล รูพรุน ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ พันธะไอออนิก ศักย์ไฟฟ้าเซตา



## 5.1 บทนำ

อัลจินตเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ มีคุณสมบัติเป็นประจุลบ (anionic polymer) ซึ่งสามารถเกิดเจลแบบทนร้อนได้ด้วยการเชื่อมต่อกับไอออนประจุบวก หรือ cation (Ionic cross-linking) โดยสามารถเรียงลำดับ divalent cation ที่เกิด Ionic cross-linking กับอัลจินตได้ดีจากมากไปน้อย ดังนี้  $Pb > Cu > Cd > Ba > Sr > Ca > Co, Ni, Zn > Mn$  (Mørch และคณะ, 2006) แต่โดยส่วนใหญ่ไอออนประจุบวกที่นิยมใช้ในการเกิดอัลจินตไฮโดรเจลมากที่สุดคือ แคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) เนื่องจากสามารถละลายในน้ำได้ดี ทำให้อัลจินตเกิดเจลได้อย่างรวดเร็ว และมีความปลอดภัยสูง โดยแคลเซียมไอออนจะเข้าไปแทนที่ไฮโดรเจนในหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl groups) ที่อยู่ภายในโครงสร้างของอัลจินต แล้วเกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่เรียกว่า “egg box model” (Grant และคณะ, 1973)

การเกิดเจลแบบ External gelation เป็นกระบวนการที่ทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน โดยแคลเซียมไอออนจะเคลื่อนที่เข้าทำปฏิกิริยากับสายพอลิเมอร์ของอัลจินตทันทีที่อัลจินตสัมผัสกับสารละลายแคลเซียมและเกิดเป็นเจลบริเวณผิวด้านนอกสุด (Gel membrane) ซึ่งเจลที่เกิดขึ้นนี้จะห่อหุ้มอัลจินตที่ยังเป็นของเหลวไว้ด้านใน (Zhang และคณะ, 2007) จากนั้นแคลเซียมไอออนจะแพร่ (diffusion) ผ่านเจลชั้นนอกสุดที่มีขนาดรูพรุนหรือช่องว่างประมาณ 5 นาโนเมตร (Boonthekul และคณะ, 2005) เข้าสู่บริเวณใจกลาง (core) และจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดอัลจินตไฮโดรเจลที่สมบูรณ์ ซึ่งอัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกลไกการเกิดเจลของอัลจินตเป็นอย่างมาก โดยการเคลื่อนที่ของแคลเซียมไอออนที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากความเข้มข้นของแคลเซียมที่แตกต่างกันระหว่างด้านนอกและด้านในอัลจินตไฮโดรเจล (concentration gradient) ตลอดจนเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุลบของอัลจินตและประจุบวกของแคลเซียมไอออน (Chan และคณะ, 2006; Correia และคณะ, 2013; Pankongadisak และคณะ, 2014) นอกจากนี้ อัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนยังมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของอัลจินตและแคลเซียมในด้านต่างๆ เช่น ขนาดโมเลกุล ขนาดและจำนวนรูพรุนของไฮโดรเจล ตำแหน่งและระยะเวลาของการเกิดเจล เป็นต้น (Amsden, 1998, 2001; Johansson และคณะ, 1993; Lundberg และ Kuchel, 1997; J. M. Petit และคณะ, 1996)

ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตอัลจินตไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (porous gel) ด้วยเป้าหมายที่แตกต่างกันออกไป เช่น เพิ่มความสามารถในการดูดซับสาร เพิ่มประสิทธิภาพในการลำเลียงมวลสารผ่านอัลจินตไฮโดรเจล และปรับปรุงโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจล เป็นต้น (Bal และ Ganguly, 2014; Banerjee และคณะ, 2017; Patra และคณะ, 2016) โดยพบว่าสามารถผลิตอัลจินตไฮโดรเจลที่มีโพรงอากาศหรือรูพรุนได้ 2 วิธี คือ การใช้สารเคมีในการสร้าง

ฟองอากาศเพื่อให้เกิดรูพรุนในอัลจิเนตไฮโดรเจล (Boz และคณะ, 2021; Lin และคณะ, 2014; Peretz และคณะ, 2014; Sergeeva และคณะ, 2015) และการกระตุ้นเชิงกลเพื่อสร้างฟองอากาศหรือรูพรุนในอัลจิเนตไฮโดรเจล (Banerjee และ Ganguly, 2019; Martynov และคณะ, 2010) แม้ว่างานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในช่วงต้น จะสามารถสร้างฟองอากาศและผลิตอัลจิเนตไฮโดรเจลที่มีรูพรุนในโครงสร้างได้ แต่กลับพบว่าฟองอากาศที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดใหญ่ (1-500 ไมครอน: Micro / Macro bubbles) และไม่มีเสถียรภาพ จึงทำให้อัลจิเนตไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนกระจายตัวแบบไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งโครงสร้าง เพราะตามธรรมชาติแล้วฟองอากาศขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะรวมตัวกันและลอยขึ้นบริเวณด้านบน จากนั้นจะเกิดการสลายตัวไปอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ อัลจิเนตไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่จะสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้อย่างจำกัด อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันนี้มีเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถสร้างฟองอากาศขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน (<1,000 นาโนเมตร) ได้ ซึ่งถูกเรียกว่า อัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles: UFB) (Chaplin, 2017) โดย Azevedo และคณะ (2016) รายงานว่าฟองอากาศขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำนวนมาก และถูกล้อมรอบด้วย OH<sup>-</sup> ทำให้มีแรงผลักรวมตัวของประจุลบเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของ UFB (electrically charged surfaces) ส่งผลให้ฟองอากาศไม่เคลื่อนที่เข้ามารวมตัวกันและมีเสถียรภาพสามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำได้นาน (Meegoda และคณะ, 2018)

ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อศึกษาผลของการประยุกต์ใช้อัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles: UFB) ที่ถูกสร้างด้วยการกระตุ้นเชิงกลต่อการเกิดเจลและคุณสมบัติของอัลจิเนตไฮโดรเจล โดยเปรียบเทียบผลของ UFB ที่เกิดขึ้นจากการใช้ก๊าซ 3 ชนิด ได้แก่ อากาศในสถานะปกติ (Air) ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โดยใช้ระยะเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกัน คือ 15, 30 และ 60 นาที

## 5.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของการประยุกต์ใช้อัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles: UFB) ที่ผลิตด้วยการกระตุ้นเชิงกลต่อการเกิดเจลและคุณสมบัติของอัลจิเนตไฮโดรเจล

## 5.3 วิธีดำเนินการวิจัย

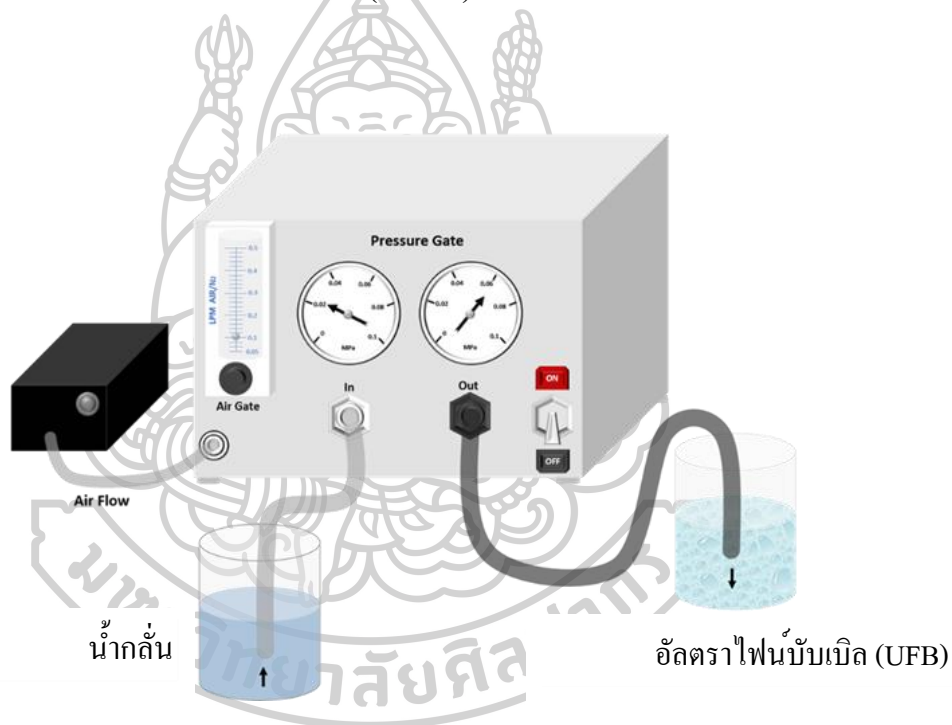
### 5.3.1 วัสดุและสารเคมี

ในการทดลองครั้งนี้ ใช้โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate) จากบริษัท ท็อปไฟท์ (ประเทศไทย) จำกัด เป็นสารก่อเจลร่วมกับแคลเซียมคลอไรด์ (ความบริสุทธิ์ > 95%) จากบริษัท ชิกมา-อัลคริช (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับก๊าซที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่

- 1) อากาศในสภาวะปกติ (Air) ซึ่งประกอบด้วยไนโตรเจน (78.08%) ออกซิเจน (20.95%) (0.93%) และส่วนที่เหลือ คือ อาร์กอน คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ (0.97%)
- 2) ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ : ความบริสุทธิ์ 99.99%, บริษัทแมสเซอร์สเปเชียลตีคาส จำกัด)
- 3) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ : ความบริสุทธิ์ 99.99% บริษัทแมสเซอร์สเปเชียลตีคาส จำกัด)

### 5.3.2 การสร้างฟองอากาศขนาดเล็ก หรือ อัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles, UFB)

ฟองอากาศขนาดเล็ก หรือ UFB ถูกสร้างขึ้นในน้ำกลั่นด้วยอุปกรณ์สำหรับสร้างอัลตราไฟน์บับเบิลที่ต่อท่อสำหรับลำเลียงของเหลว (น้ำกลั่น) และก๊าซ ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 อุปกรณ์สำหรับสร้างอัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles, UFB)

โดย 1 รอบการผลิตจะใช้น้ำกลั่น ปริมาตร 1 ลิตร ลำเลียงเข้าสู่เครื่องด้วยอัตราเร็ว 0.5 ลิตรต่อนาที สำหรับก๊าซที่ถูกใช้เพื่อสร้าง UFB จะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องด้วยอัตราเร็ว 0.1 ลิตรต่อนาที จากนั้น UFB จะถูกสร้างขึ้นภายใต้ความดันสูงเท่ากับ 0.6 MPa (600 kPa) และมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เท่ากับ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส

ในการทดลองครั้งนี้ ทำการสร้าง UFB ด้วยก๊าซ 3 ชนิด ได้แก่ อากาศในสภาวะปกติ (Air) ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ( $O_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ( $CO_2$ ) โดยใช้เวลาในการสร้าง

UFB แตกต่างกัน ดังนี้ 15, 30 และ 60 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ  $25 \pm 1$  องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ก่อนนำตัวอย่างน้ำกลั่นที่มี UFB ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

### 5.3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำกลั่นที่มีอัลตราไฟน์บับเบิล (UFB)

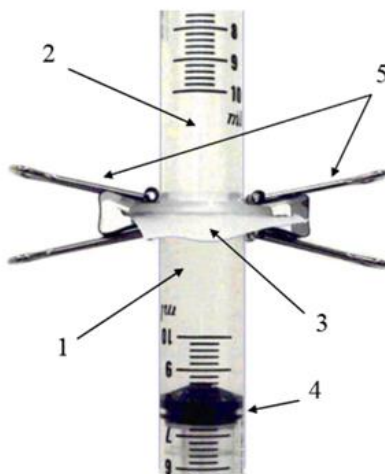
1) วิเคราะห์ขนาด การกระจายตัว และปริมาณของฟองอากาศ ด้วยเครื่อง Nanoparticle Tracking Analysis (NTA) (รุ่น NanoSight NS300) และประมวลผลด้วย NTA 2.0 analytical software

2) วิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าเซตา (zeta potential) ด้วยเครื่อง Zetasizer (ยี่ห้อ Malvern Nano-Zetasizer)

3) วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (ยี่ห้อ OHUAS; USA)

### 5.3.4 การสร้างอัลจินตไฮโดรเจล

ตัวอย่างอัลจินตไฮโดรเจลถูกสร้างขึ้นด้วยวิธีเกิดเจลแบบ External gelation โดยซึ่งโซเดียมอัลจินต น้ำหนัก 1.0 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก (UFB) ปริมาณ 99.0 กรัม (ใช้น้ำกลั่นที่ถูกเตรียมตามรายละเอียดที่แสดงในหัวข้อ 5.3.2) ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้โซเดียมอัลจินตเกิดการดูดซับน้ำได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นทำการศึกษาผลของ UFB ต่ออัลจินตไฮโดรเจลด้วยชุดอุปกรณ์ที่แสดงดังภาพที่ 21 ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ สารละลายอัลจินตปริมาณ 5.0 กรัม ถูกบรรจุในหลอด (หมายเลข 1) จากนั้นสารละลายอัลจินตจะถูกดันขึ้นมาให้มีความสูงเสมอกับขอบของหลอดด้วยลูกยาง Syringe (หมายเลข 4) ซึ่งมีการใช้กระดวยกรอง (ขนาดรูพรุนเท่ากับ 2.5 ไมครอน) (หมายเลข 3) ในการกั้นระหว่างส่วนที่บรรจุสารละลายอัลจินต (หมายเลข 1) และส่วนที่บรรจุสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 3.0% (w/w) ปริมาณ 5.0 กรัม (หมายเลข 2) โดยใช้คลิป (หมายเลข 5) ในการยึดทั้ง 2 ส่วนเข้าด้วยกัน จากนั้นปล่อยให้แคลเซียมไอออนแพร่ผ่านกระดวยกรองจากด้านบน (หมายเลข 2) ลงมาสู่สารละลายอัลจินตที่อยู่ด้านล่าง (หมายเลข 1) เป็นระยะเวลานาน 180 นาที เพื่อให้เกิดอัลจินตไฮโดรเจลได้อย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 21 ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมอัลจินตไฮโดรเจล  
ที่มา: คัดแปลงมาจากวิธีของ Martynov และคณะ (2010)

### 5.3.5 การวิเคราะห์การเกิดเจลของอัลจินตไฮโดรเจล (ดัดแปลงวิธีมาจาก Chrastil, 1991)

วิเคราะห์ค่าความหนาของอัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดขึ้นทุกๆ 30 นาที (0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที) โดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ ซึ่งแต่ละทริทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง จากนั้นคำนวณเป็นความหนาของเจล (%) ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\text{ความหนาของเจล (\%)} = \frac{\text{ความหนาของเจล ณ เวลานั้น}}{\text{ความหนาของเจลที่สมบูรณ์}} \times 100$$

### 5.3.6 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, D)

สำหรับการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, D) ของแคลเซียมไอออน ดัดแปลงจากวิธีของ Chrastil (1991) โดยสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากสมการต่อไปนี้

$$L = L_{\max}[1 - \exp(-kt)]^n$$

เมื่อ  $L$  คือ ความหนาของไฮโดรเจล (%) ที่เวลา  $t$

$L_{\max}$  คือ ความหนาของไฮโดรเจล (%) ที่เวลา  $t \rightarrow \infty$

$n$  คือ ค่า heterogeneous structural resistance constant

$k$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดเจล (gelation rate constant)

\*ในการคำนวณค่า  $n$  และ ค่า  $k$  ใช้วิธีการถดถอยแบบไม่เป็นเส้นตรง

\*แต่ละทรีทเมนต์จะทำการวิเคราะห์ 15 ตัวอย่าง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$D = \frac{\pi(k)^{2n}(L_{\max})^2}{36}$$

### 5.3.7 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของอัลจินตไฮโดรเจล

ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาของอัลจินตไฮโดรเจล (โครงสร้างภายนอกและภาพตัดขวางของตัวอย่างอัลจินตไฮโดรเจล) โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (รุ่น JSM-6610LV, Tokyo, Japan) และ Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (SEM-EDS) (รุ่น X-MaxN 50, JEOL Ltd., Tokyo, Japan) เตรียมตัวอย่างให้มีขนาด  $5 \times 5 \text{ mm}^3$  และทำการกำจัดน้ำโดยแช่อัลจินตไฮโดรเจลในสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นในระดับต่างๆ โดยเริ่มแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยไปมาก (ไล่ระดับความเข้มข้น ดังนี้ 10, 30, 50, 70, 90 และเอทานอลเข้มข้น 99.9% (v/v)) ทำการแช่ในแต่ละความเข้มข้นนาน 30 นาที หลังจากนั้นนำไปทำแห้งด้วยวิธี Critical Point Dryer (รุ่น Q150R S, Leica, EM CPD300, Quorum Technology Ltd., East Sussex, England) และทำการเคลือบตัวอย่างด้วย gold palladium ภายใต้สภาวะสุญญากาศ นำตัวอย่างที่ถูกเคลือบเรียบร้อยแล้วไปถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ตั้งค่า accelerating voltage เท่ากับ 15 kV โดยในแต่ละ treatment จะทำการวิเคราะห์ 3 ตัวอย่าง

### 5.3.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

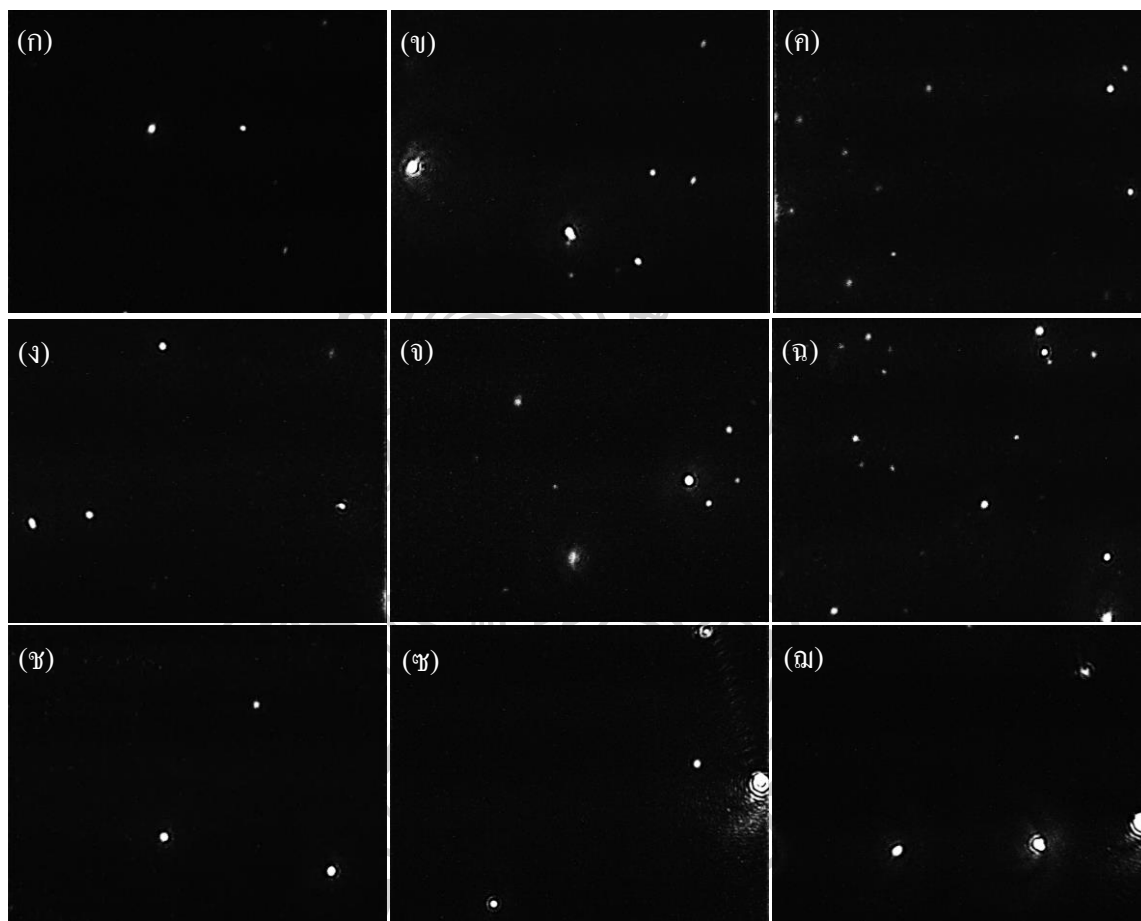
วางแผนการทดลองแบบ complete randomized design (CRD) และวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ ANOVA นอกจากนี้ยังทำการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี the least significant difference (LSD) test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม SPSS software v.16 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)

## 5.4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 5.4.1 ผลการวิเคราะห์ขนาด การกระจายตัว และปริมาณของฟองอากาศ (Ultra-Fine Bubble, UFB) ในน้ำกลั่น

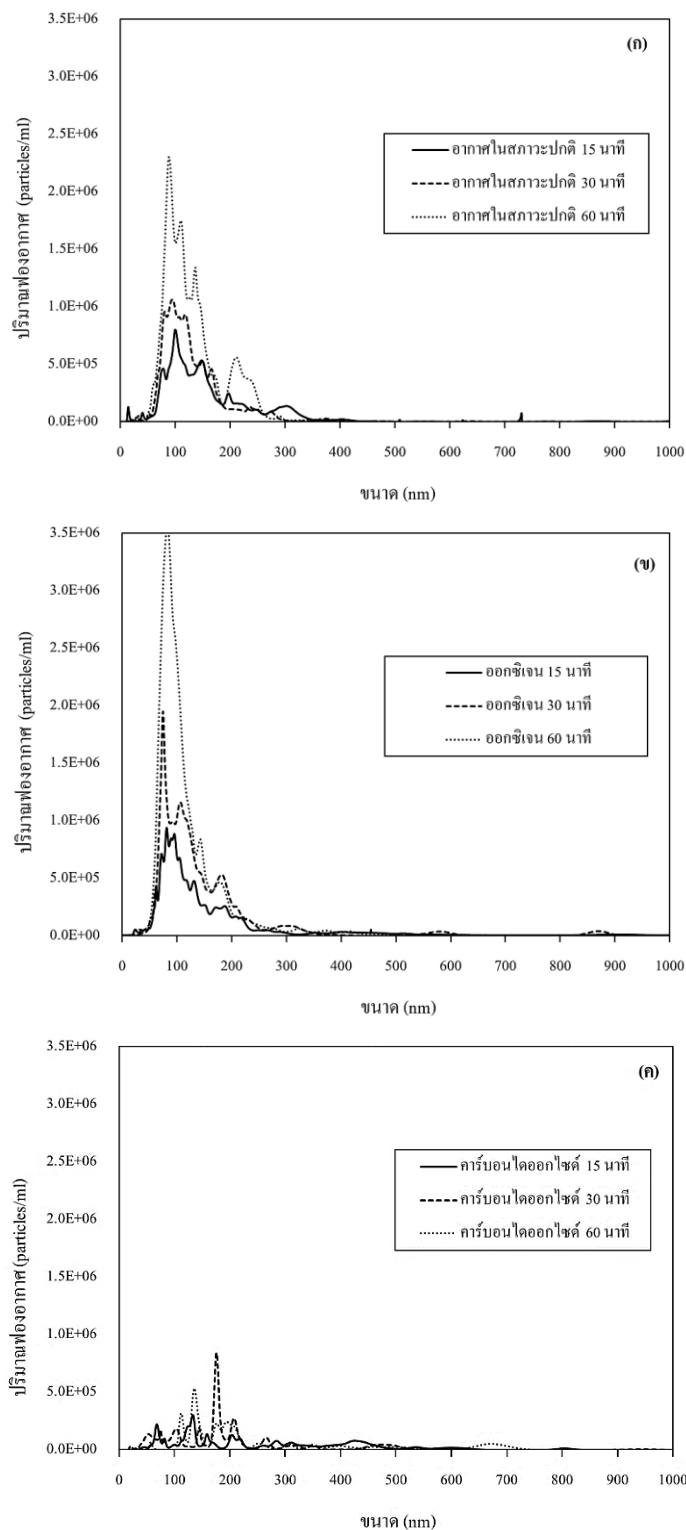
จากการศึกษาผลของการใช้ก๊าซ 3 ชนิด ได้แก่ อากาศในสภาวะปกติ (Air) ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ร่วมกับการใช้เวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 15, 30 และ 60 นาที ต่อขนาด การกระจายตัว และปริมาณของฟองอากาศที่เกิดขึ้น พบว่า น้ำกลั่นที่ถูกกระตุ้นด้วยเครื่อง bubbles generator มีฟองอากาศ หรือ อัลตราไฟน์บับเบิล (Ultra-Fine Bubbles: UFB) เกิดขึ้นและกระจายตัวอยู่จริง โดยภาพที่ 22 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการกระตุ้นเพิ่มขึ้นจาก 15 นาที เป็น 30 นาที และ 60 นาที จะสังเกตเห็นฟองอากาศมีการกระจายตัวหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Nanoparticle Tracking Analysis ที่สามารถวิเคราะห์ปริมาณและขนาดฟองอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการติดตามการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian motion) หรือเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทางแน่นอนของฟองอากาศขนาดเล็ก โดยเครื่องจะทำการบันทึกวิถีไอเพื่อจับแสงที่กระเจิงจากอนุภาคเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นซอฟต์แวร์จะคำนวณว่าอนุภาคมีทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่เป็นอย่างไร เพื่อแปลผลเป็นขนาดและจำนวนของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตร จากผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 23 และตารางที่ 9 พบว่า เมื่อเวลาในการสร้าง UFB นานขึ้น ตัวอย่างที่ใช้ Air และก๊าซ  $O_2$  จะพบฟองอากาศที่มีขนาดเล็ก (< 200 nm) และตรวจพบจำนวนฟองอากาศเพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wang และคณะ (2019) ที่พบว่าเมื่อเปิดเครื่องสร้างฟองอากาศเป็นระยะเวลานานขึ้น ฟองอากาศจะมีขนาดเล็กและตรวจพบขนาดที่สม่ำเสมอมากขึ้น ตลอดจนมีจำนวนของฟองอากาศที่เป็น UFB เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดก๊าซที่ใช้ ณ เวลาการสร้าง UFB ที่เท่ากัน จะเห็นว่าตัวอย่างน้ำกลั่นที่ใช้ก๊าซ  $O_2$  และ Air สามารถสร้าง UFB ที่มีขนาดเล็กกว่าตัวอย่างน้ำกลั่นที่ใช้ก๊าซ  $CO_2$  ตลอดจนก๊าซ  $O_2$  และ Air ยังสามารถสร้าง UFB ได้ในปริมาณที่มากกว่าการใช้ก๊าซ  $CO_2$  อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ยิ่งไปกว่านั้น ก๊าซ  $CO_2$  ยังแสดงผลการทดลองที่แตกต่างจากตัวอย่างอื่นๆ โดยพบว่า เมื่อเวลาในการสร้างฟองอากาศนานขึ้นมีผลทำให้ขนาดของ UFB มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อจำนวนของ UFB ที่เกิดขึ้น ซึ่ง Haedelt และคณะ (2007) ได้รายงานว่า ก๊าซที่มีความสามารถในการละลายสูง เช่น ก๊าซ  $CO_2$  (solubility =  $70.07 \times 10^5$  mol gas/mol  $H_2O$ ) จะสร้างฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าก๊าซที่มีความสามารถในการละลายต่ำ เช่น ก๊าซ  $O_2$  (solubility =  $2.50 \times 10^5$  mol gas/mol  $H_2O$ ) (Lide, 2004) ดังนั้น UFB ที่ถูกสร้างขึ้นจากก๊าซ  $CO_2$  จึงละลายในน้ำได้อย่างรวดเร็วและละลายได้ในปริมาณที่มากกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ (Ushikubo และคณะ, 2010) ซึ่ง Azevedo และคณะ (2016) ได้รายงานว่า ฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า 200 นาโน

เมตร หรือที่เรียกว่า “นาโนบับเบิล (nano bubble)” จะมีเสถียรภาพสูงและสามารถอยู่ในน้ำได้นานถึง 2 สัปดาห์ ในขณะที่ฟองอากาศขนาดใหญ่จะรวมตัวกันหรือเกิดการแตกสลายไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจเป็นเพราะสาเหตุนี้จึงทำให้ตัวอย่างที่สร้างฟองอากาศด้วยก๊าซ  $\text{CO}_2$  ตรวจพบ UFB ที่มีขนาดใหญ่ และมีจำนวน UFB ที่ตรวจพบน้อยกว่าก๊าซชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 22 ฟองอากาศขนาดเล็กหรืออัลตราไฟน์บับเบิล (UFB) ที่กระจายตัวในน้ำกลั่น โดย (ก) – (ค) คือ UFB จากอากาศในสภาวะปกติ (Air) ที่กระตุ้นเป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที; (ง) – (ฉ) คือ UFB จากก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ที่กระตุ้นเป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที; (ช) – (ฉ) คือ UFB จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ที่กระตุ้นเป็นเวลา 15, 30 และ 60 นาที





ภาพที่ 23 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกันต่อการกระจายตัวของฟองอากาศในน้ำกลั่น : (ก) อากาศในสภาวะปกติ (Air); (ข) ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และ (ค) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

**ตารางที่ 9** ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกันต่อขนาดเฉลี่ยและปริมาณของฟองอากาศในน้ำกลั่น

ตัวอย่าง	ขนาดเฉลี่ย (นาโนเมตร)	ปริมาณ ( $\times 10^7$ Particles/ml)
<b>อากาศในสภาวะปกติ (Air)</b>		
15 นาที	$150.74 \pm 52.28^{ab}$	$7.30 \pm 3.11^{cA}$
30 นาที	$129.37 \pm 24.97^{bb}$	$9.12 \pm 2.05^{bB}$
60 นาที	$128.76 \pm 19.84^{bb}$	$16.30 \pm 1.50^{ab}$
<b>ก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>)</b>		
15 นาที	$137.64 \pm 70.81^{ab}$	$7.67 \pm 3.09^{cA}$
30 นาที	$124.19 \pm 39.07^{bb}$	$12.90 \pm 2.85^{bA}$
60 นาที	$116.81 \pm 15.62^{bb}$	$20.50 \pm 1.22^{aA}$
<b>ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)</b>		
15 นาที	$237.91 \pm 83.12^{bA}$	$2.88 \pm 2.56^{nsB}$
30 นาที	$294.05 \pm 120.24^{aA}$	$3.42 \pm 2.99^{nsC}$
60 นาที	$310.01 \pm 175.93^{aA}$	$3.53 \pm 2.75^{nsC}$

<sup>ns</sup> หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้ชนิดก๊าซเหมือนกัน แต่เวลาในการสร้าง UFB แตกต่างกัน

<sup>a-c</sup> ตัวอย่างที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้ชนิดก๊าซเหมือนกัน แต่เวลาในการสร้าง UFB แตกต่างกัน

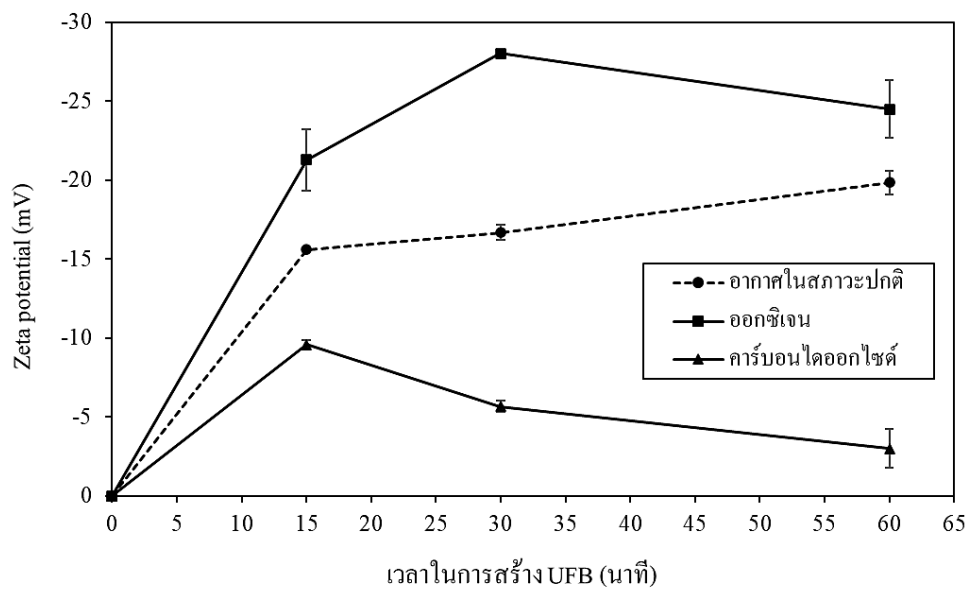
<sup>A-D</sup> ตัวอย่างที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้เวลาในการสร้าง UFB เท่ากัน แต่ชนิดก๊าซแตกต่างกัน

#### 5.4.2 ผลการวิเคราะห์ค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้า (zeta potential) และค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำกลั่น

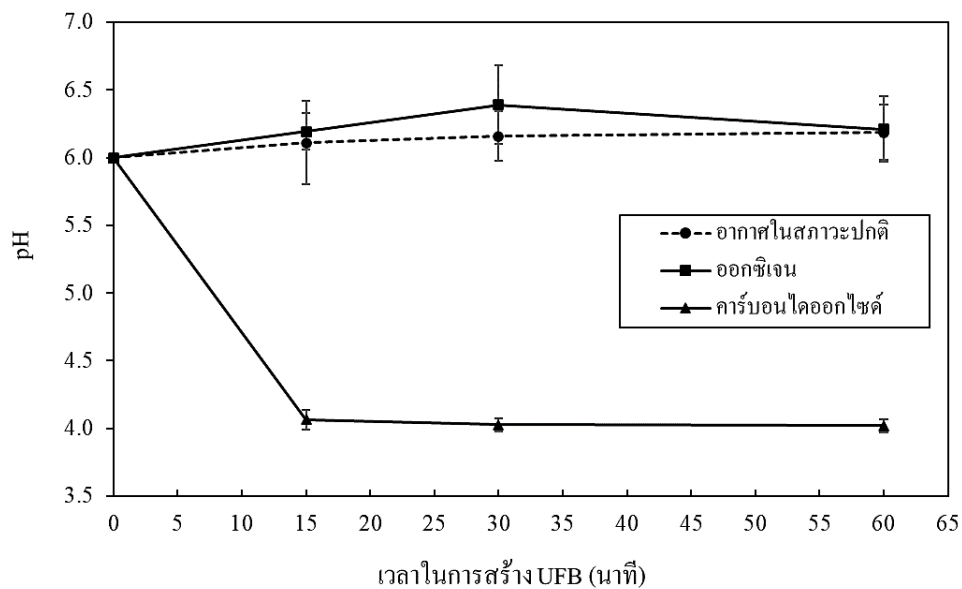
การเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้า (zeta potential) และค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำกลั่นที่ผ่านกระบวนการสร้างอัลตราฟิโนบับเบิล (UFB) จากก๊าซ 3 ชนิด (Air, O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub>) แสดงดังภาพที่ 24 และ 25 ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ก๊าซทุกชนิดทำให้น้ำกลั่นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้าเป็นลบ ซึ่งงานวิจัยจำนวนมากยืนยันว่าเป็นผลมาจากการดูดซับ OH<sup>-</sup> ที่บริเวณ Interface ของ UFB (Hubbard, 2002; Usui และ Sasaki, 1978) นอกจากนี้ ยังพบว่าชนิดของก๊าซมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเซต้าของน้ำกลั่นอย่างชัดเจน โดยการสร้าง UFB ด้วยก๊าซ O<sub>2</sub> ทำให้น้ำกลั่นมีค่า

สัมบูรณ์ของศักย์ไฟฟ้าเซตา (absolute zeta potential) สูงกว่าน้ำกลั่นที่ใช้ Air และ ก๊าซ CO<sub>2</sub> (ภาพที่ 24) ทั้งนี้ เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าเซตามีความสัมพันธ์กับปริมาณและความหนาแน่นของประจุลบ (OH<sup>-</sup>) ที่บริเวณ gas-water interfaces ของ UFB (Jia และคณะ, 2013; Ohgaki และคณะ, 2010; Takahashi, 2005; Temesgen และคณะ, 2017) ดังนั้น หากพิจารณาชนิดของก๊าซที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งได้แก่ อากาศในสภาวะปกติ (N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>) ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จะเห็นได้ว่าก๊าซ O<sub>2</sub> สามารถละลายในน้ำแล้วเกิด OH<sup>-</sup> ได้ปริมาณมากที่สุด (O<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>O + 4e<sup>-</sup> ---> 4 OH<sup>-</sup>) รองลงมาคือ Air และก๊าซ CO<sub>2</sub> ตามลำดับ (Eagleton, 1999; Kim และคณะ, 2000; Takahashi, 2005) ด้วยเหตุนี้ น้ำกลั่นที่สร้าง UFB ด้วยก๊าซ O<sub>2</sub> จึงมี OH<sup>-</sup> อยู่บริเวณ gas-water interfaces จำนวนมากที่สุด ส่งผลให้ค่าสัมบูรณ์ของศักย์ไฟฟ้าเซตาของระบบสูงกว่าน้ำกลั่นที่สร้าง UFB ด้วย Air และก๊าซ CO<sub>2</sub>

สำหรับค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของน้ำกลั่นที่ผ่านกระบวนการสร้างอัลตราไฟน์บับเบิล (UFB) จากก๊าซ 3 ชนิด (Air, O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub>) พบว่า น้ำกลั่นที่สร้าง UFB ด้วยก๊าซ CO<sub>2</sub> ไม่เพียงแต่มี UFB ในปริมาณที่น้อย และมีค่าสัมบูรณ์ของศักย์ไฟฟ้าเซตาที่ต่ำแล้ว ยังเป็นตัวอย่างที่มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ต่ำเพียง 4.02 เท่านั้น (ระบบปกติ pH ประมาณ 6.0) (ภาพที่ 25) ซึ่ง Hasegawa และคณะ (2008) ได้อธิบายเกี่ยวกับปรากฏการณ์นี้ว่าเกี่ยวข้องกับปริมาณ H<sup>+</sup> ในระบบ กล่าวคือเมื่อก๊าซ CO<sub>2</sub> ละลายในน้ำกลั่น (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O <---> H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> <---> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) จะมี H<sup>+</sup> เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า pH ของระบบมีค่าลดลง ซึ่งค่า pH ที่ลดลงนี้ทำให้ค่าสัมบูรณ์ของศักย์ไฟฟ้าเซตาของน้ำกลั่นที่ใช้ ก๊าซ CO<sub>2</sub> มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ ยิ่งไปกว่านั้น Meegoda และคณะ (2018) ได้ยืนยันว่าค่า pH มีผล ต่อขนาดของ UFB โดยระบบที่มีค่า pH ต่ำ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ (1-100 ไมครอน) และเกิดการสลายตัวได้อย่างรวดเร็วกว่าระบบที่มีค่า pH สูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองใน ตารางที่ 9 ที่แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างน้ำกลั่นที่สร้าง UFB ด้วยก๊าซ CO<sub>2</sub> มีฟองอากาศขนาดใหญ่ที่สุด ตลอดจนมีปริมาณฟองอากาศในระบบที่ตรวจพบน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำกลั่นที่ใช้ ก๊าซ O<sub>2</sub> และ Air ในการสร้าง UFB



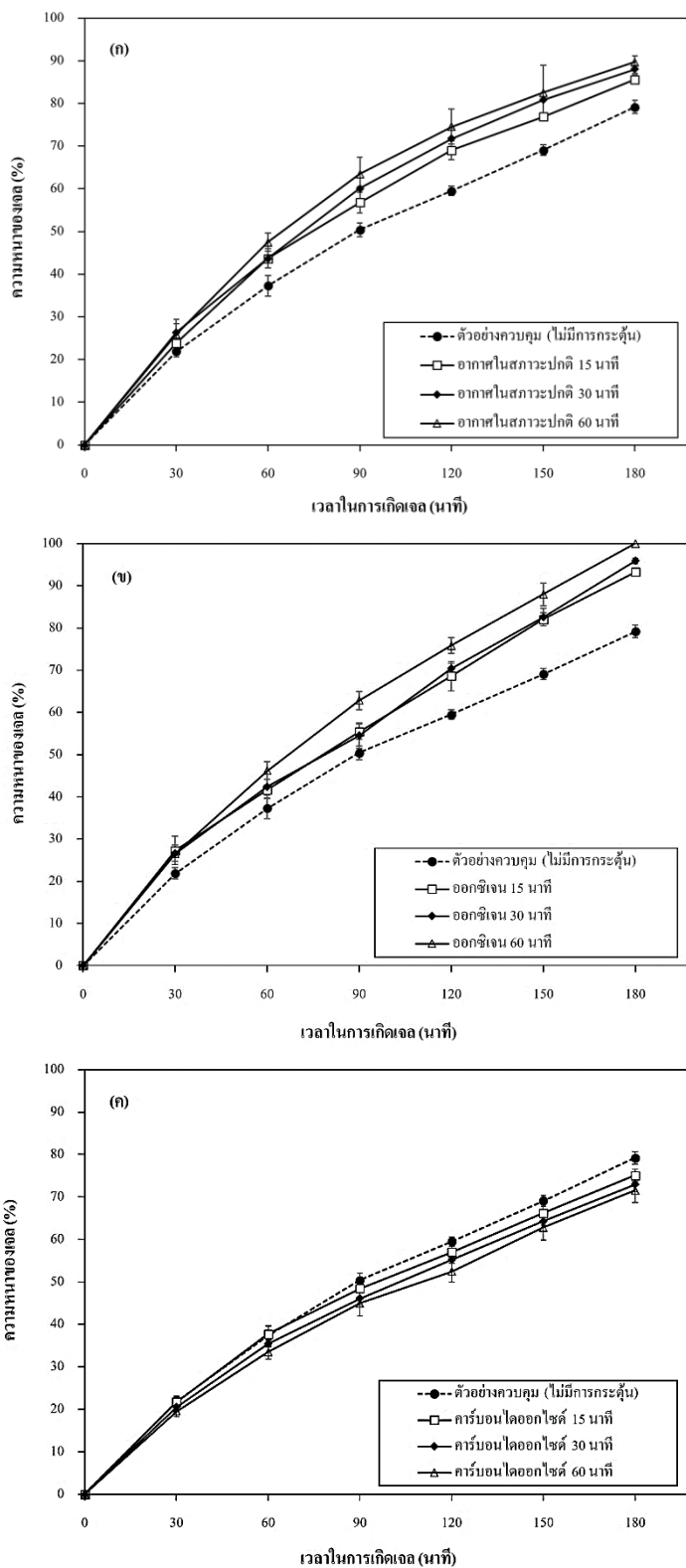
ภาพที่ 24 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกันต่อค่าศักย์ไฟฟ้าเซต่าน้ำกลั่น



ภาพที่ 25 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ที่แตกต่างกันต่อค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของน้ำกลั่น

#### 5.4.3 ผลของการใช้น้ำกลั่นที่มี UFB ต่อความหนาของอัลจินตไฮโดรเจลและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน

ภาพที่ 26 และตารางที่ 10 แสดงผลของการประยุกต์ใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซ 3 ชนิด (Air, O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub>) และใช้เวลาในการสร้าง UFB เท่ากับ 15, 30 และ 60 นาที นำมาผลิตอัลจินตไฮโดรเจล โดยติดตามการเกิดอัลจินตไฮโดรเจลทุกๆ 30 นาที เป็นระยะเวลารวมทั้งสิ้น 180 นาที ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการประยุกต์ใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซ O<sub>2</sub> และ Air ในการผลิตอัลจินตไฮโดรเจลทำให้ความหนาของเจล (%) ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงกว่าตัวอย่างชุดควบคุมที่ไม่มี UFB ซึ่งมีผลสอดคล้องและเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficients (D) ของแคลเซียมไอออนที่เปลี่ยนแปลงไป (ตารางที่ 10) จึงสามารถสรุปได้ว่าการเตรียมอัลจินตโดยใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซ O<sub>2</sub> และ Air ทุกตัวอย่างมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน (D) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชุดควบคุมที่ใช้น้ำกลั่นธรรมดาในการเตรียมอัลจินตไฮโดรเจล ทั้งนี้ Li และคณะ (2018) และ Hajikhani และคณะ (2021) ได้กล่าวไว้ว่าช่วงแรกของการเกิดเจลแบบ External gelation แคลเซียมไอออนจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านอัลจินตได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อเกิดชั้นเจลขึ้นแล้ว อัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนจะลดลง เนื่องจากอัลจินตไฮโดรเจลชั้นนอกสุดมีโครงสร้างที่แข็งแรงและมีรูพรุนขนาดเล็ก ประมาณ 5 นาโนเมตรเท่านั้น (Boontheekul และคณะ, 2005) ซึ่งเจลที่เกิดขึ้นนี้เป็นอุปสรรคสำคัญที่มีผลทำให้อัตราการแพร่ของแคลเซียมไอออนลดลง ดังนั้น การเตรียมอัลจินตไฮโดรเจลโดยใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จึงอาจทำให้เกิดโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมากขึ้น และส่งผลให้สารละลายแคลเซียมเคลื่อนที่ผ่านชั้นเจลได้ง่ายขึ้น ซึ่ง Tamagawa และคณะ (2000) ได้ยืนยันว่าการเพิ่มขนาดและจำนวนรูพรุนให้แก่โครงสร้างของเจลสามารถเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลายให้เคลื่อนที่ผ่านเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 26 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ต่อความหนาของอัลจินेटไฮโดรเจล (%)

ตารางที่ 10 ผลของชนิดก๊าซและเวลาในการสร้าง UFB ต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแคลเซียมไอออน

ตัวอย่าง	D ( $\times 10^{-4}$ cm <sup>2</sup> /s)
ตัวอย่างควบคุม (ใช้น้ำกลั่นธรรมดา)	0.54 $\pm$ 0.22 <sup>E</sup>
อากาศในสภาวะปกติ	
15 นาที	0.89 $\pm$ 0.40 <sup>cD</sup>
30 นาที	1.08 $\pm$ 0.26 <sup>bC</sup>
60 นาที	1.31 $\pm$ 0.10 <sup>aB</sup>
ก๊าซออกซิเจน	
15 นาที	1.11 $\pm$ 0.65 <sup>bBC</sup>
30 นาที	1.26 $\pm$ 0.41 <sup>bB</sup>
60 นาที	2.19 $\pm$ 0.26 <sup>aA</sup>
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	
15 นาที	0.48 $\pm$ 0.32 <sup>nsE</sup>
30 นาที	0.42 $\pm$ 0.28 <sup>nsEF</sup>
60 นาที	0.38 $\pm$ 0.30 <sup>nsF</sup>

<sup>ns</sup> หมายถึงค่าเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้ชนิดก๊าซเหมือนกัน แต่เวลาในการสร้าง UFB แตกต่างกัน

<sup>a-c</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้ชนิดก๊าซเหมือนกัน แต่เวลาในการสร้าง UFB แตกต่างกัน

<sup>A-D</sup> ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบตัวอย่างที่ใช้เวลาในการสร้าง UFB เท่ากัน แต่ชนิดก๊าซแตกต่างกัน

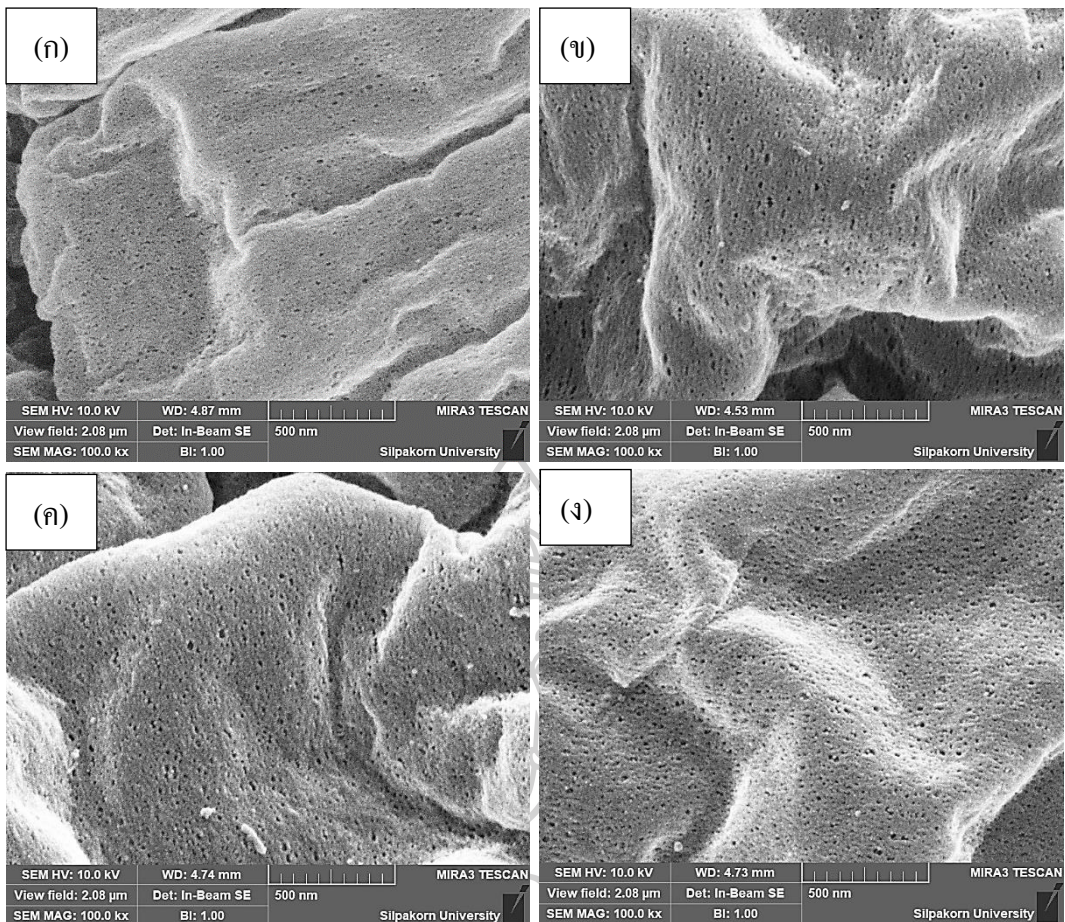
อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวอย่างที่ประยุกต์ใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซ CO<sub>2</sub> กลับแสดงผลตรงกันข้ามกับตัวอย่างอื่นๆ โดยพบว่าการประยุกต์ใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซ CO<sub>2</sub> ในการผลิตอัลจินเตไฮโดรเจลทำให้อัตราการเกิดเจลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างชุดควบคุมที่ใช้น้ำกลั่นธรรมดาในการเตรียมอัลจินเตไฮโดรเจล ทั้งนี้เนื่องจากอัลจินเตจะมีความเสถียรเมื่อ pH อยู่ในช่วง 5-11 เท่านั้น แต่เมื่อ CO<sub>2</sub> ละลายกับน้ำจะเกิดการแตกตัว (CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O <---> H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> <---> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) และปลดปล่อย H<sup>+</sup> ออกมาทำให้ค่า pH ของระบบลดลงเหลือประมาณ

4.02 ซึ่งเข้าใกล้ค่า pKa ของกรด manuronic และกรด guluronic monomers ที่มีค่าเท่ากับ 3.38 และ 3.65 ตามลำดับ (Haug, 1964; Nussinovitch, 1997) โดย Manufacture และ King, 2019 ได้อธิบายว่าเมื่อค่า pH ของระบบต่ำกว่า 5 หมู่คาร์บอกซิลอิสระ (free -COO-) จะเริ่มถูกเติมโปรตอน ( $H^+$ ) และกลายเป็น COOH ทำให้แรงผลักรัน (electrostatic repulsion) ระหว่างสายพอลิเมอร์ลดลง สายพอลิเมอร์ของอัลจินตจึงเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ส่งผลให้สารละลายอัลจินตมีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความหนืดที่เพิ่มสูงขึ้นนี้เป็นอุปสรรคสำคัญในการเคลื่อนที่ของแคลเซียมไอออน ดังนั้น การเกิดเจลของอัลจินตไฮโดรเจลแบบ External gelation จึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซ  $CO_2$  ซึ่งเป็นน้ำที่มีค่า pH ต่ำกว่าตัวอย่างอื่นๆ อย่างชัดเจน

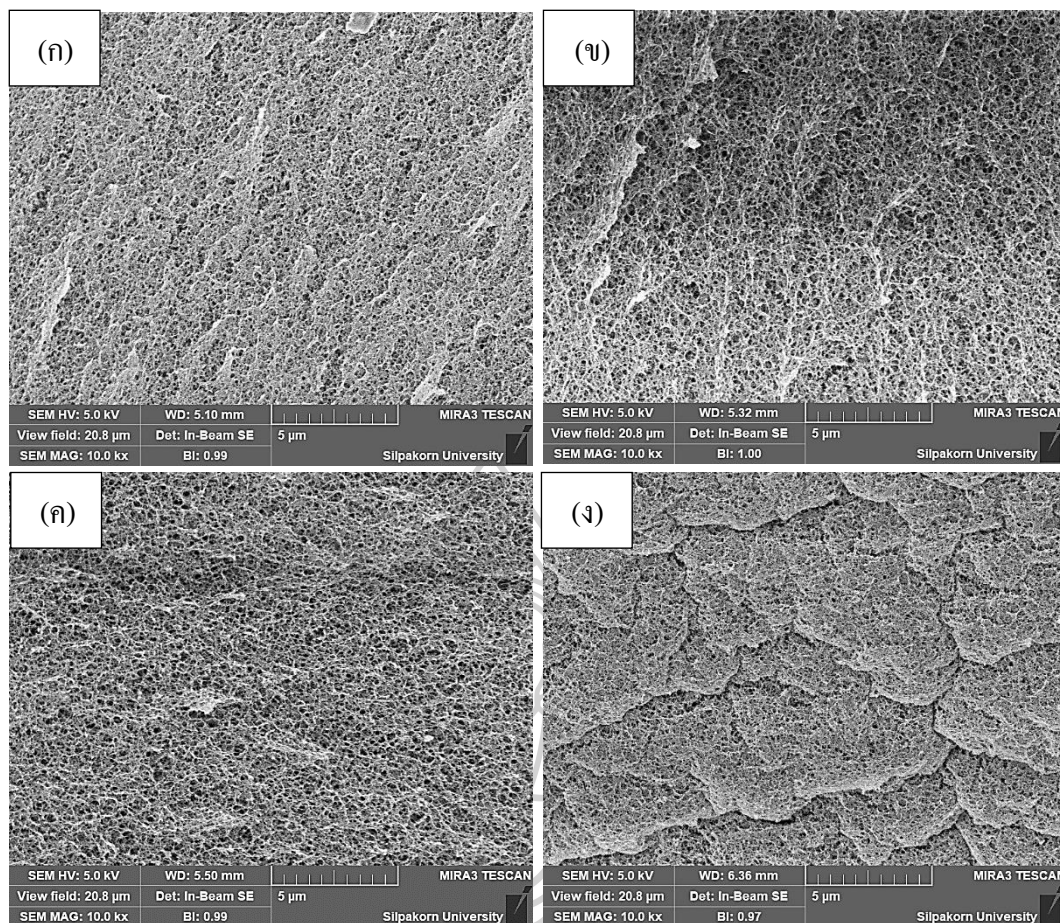
#### 5.4.4 ผลของการใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ต่อลักษณะสัณฐานวิทยาของอัลจินตไฮโดรเจล

การวิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของอัลจินตไฮโดรเจลที่เปลี่ยนแปลงไปถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่ออธิบายผลของการใช้น้ำกลั่นที่มี UFB ในการผลิตอัลจินตไฮโดรเจล โดยนักวิจัยเลือกวิเคราะห์ตัวอย่างอัลจินตไฮโดรเจลที่ใช้น้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ที่ใช้เวลาในการสร้าง UFB แตกต่างกัน (15, 30 และ 60 นาที) เนื่องจากเป็นก๊าซที่สามารถสร้าง UFB ที่มีเสถียรภาพสูง ตลอดจนสามารถช่วยสนับสนุนการเกิดเจลของอัลจินตไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด จากภาพที่ 27 และ 28 แสดงให้เห็นโครงสร้างระดับจุลภาคของพื้นผิวภายนอก (outer surface) และโครงสร้างด้านใน (cross-section) ของอัลจินตไฮโดรเจล โดยพบว่า ตัวอย่างอัลจินตไฮโดรเจลที่ผลิตจากน้ำกลั่นที่มี UFB จากก๊าซ  $O_2$  มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่า และมีจำนวนรูพรุนที่มากกว่าตัวอย่างควบคุมที่ใช้น้ำกลั่นธรรมดาอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเวลาในการสร้าง UFB นานขึ้นจาก 15 นาที เป็น 30 และ 60 นาที แม้ว่าขนาดของรูพรุนที่พบบนโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลจะมีแนวโน้มลดลง แต่กลับพบว่ามีจำนวนรูพรุนที่กระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของเจลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาสามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าเหตุใดการใช้น้ำกลั่นที่มี UFB โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำกลั่นที่มี UFB ที่สร้างจากก๊าซ  $O_2$  ที่ระยะเวลา 60 นาที ซึ่งทำให้การแพร่ของแคลเซียมไอออนมีอัตราเร็วสูงที่สุด ตลอดจนสามารถปรับปรุงกระบวนการเกิดอัลจินตไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด





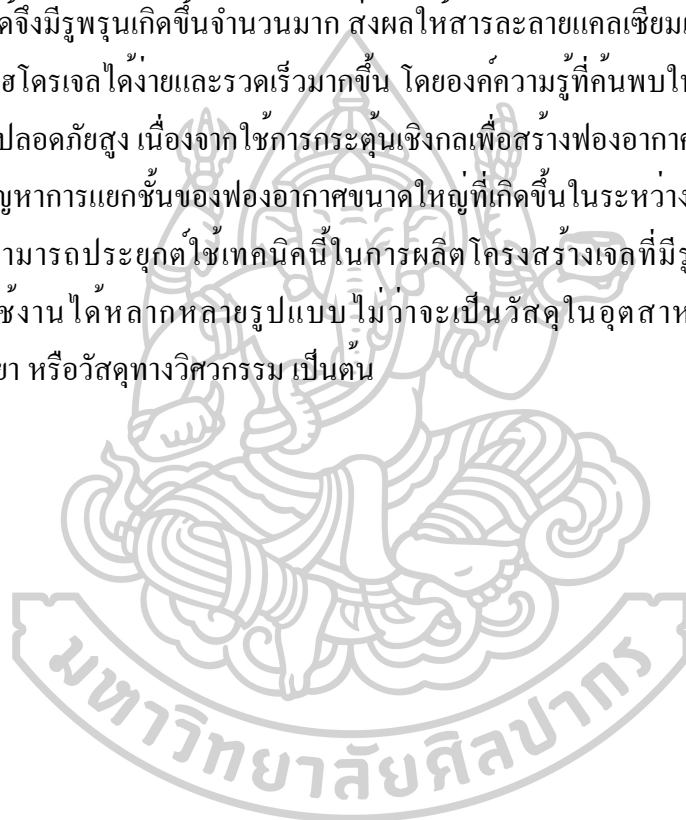
ภาพที่ 27 ผลของการใช้ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) ในการสร้าง UFB ที่เวลาต่างๆ ดังนี้ (ก) 0 นาที (น้ำกลั่นธรรมดาไม่มี UFB), (ข) 15 นาที, (ค) 30 นาที และ (ง) 60 นาที ต่อลักษณะ ลัคนานิวทยาบริเวณพื้นผิวภายนอก (outer surface) ของอัลจินตไฮโดรเจลที่วิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 100,000 เท่า



ภาพที่ 28 ผลของการใช้ก๊าซออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) ในการสร้าง UFB ที่เวลาต่างๆ ดังนี้ (ก) 0 นาที (น้ำกลั่นธรรมดาไม่มี UFB), (ข) 15 นาที, (ค) 30 นาที และ (ง) 60 นาที ต่อลักษณะ ล้วนฐานทางด้านใน (cross section) ของอัลจินตไฮโดรเจลที่วิเคราะห์ด้วย SEM กำลังขยาย 10,000 เท่า

## 5.5 สรุป

จากผลการวิจัยทำให้ทราบข้อดีและข้อเสียของการสร้างอัลตราไฟน์บับเบิล (UFB) จากก๊าซแต่ละชนิด (อากาศในสภาวะปกติ (Air) ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )) ซึ่งพบว่านอกจาก UFB จะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำให้มีค่า zeta potential เป็นลบได้แล้วนั้น น้ำที่มี UFB ยังช่วยเพิ่มอัตราการเกิดเจลของอัลจินตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์อย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย ทั้งนี้ เนื่องจาก UFB เป็นฟองอากาศขนาดเล็กที่มีเสถียรภาพสูง และสามารถกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลได้เป็นอย่างดี ด้วยเหตุนี้ โครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลที่ได้จึงมีรูพรุนเกิดขึ้นจำนวนมาก ส่งผลให้สารละลายแคลเซียมเคลื่อนที่ผ่านโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลได้ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น โดยองค์ความรู้ที่ค้นพบในครั้งนี้ถือว่าเป็นเทคนิคใหม่ที่มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากใช้การกระตุ้นเชิงกลเพื่อสร้างฟองอากาศแทนการใช้สารเคมี ซึ่งสามารถแก้ปัญหาการแยกชั้นของฟองอากาศขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดเจลได้เป็นอย่างดี ตลอดจนสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการผลิตโครงสร้างเจลที่มีรูพรุน (porous gel) เพื่อรองรับการใช้งานได้หลากหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นวัสดุในอุตสาหกรรมอาหาร วัสดุในอุตสาหกรรมยา หรือวัสดุทางวิศวกรรม เป็นต้น



## บทที่ 6

### การประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัย

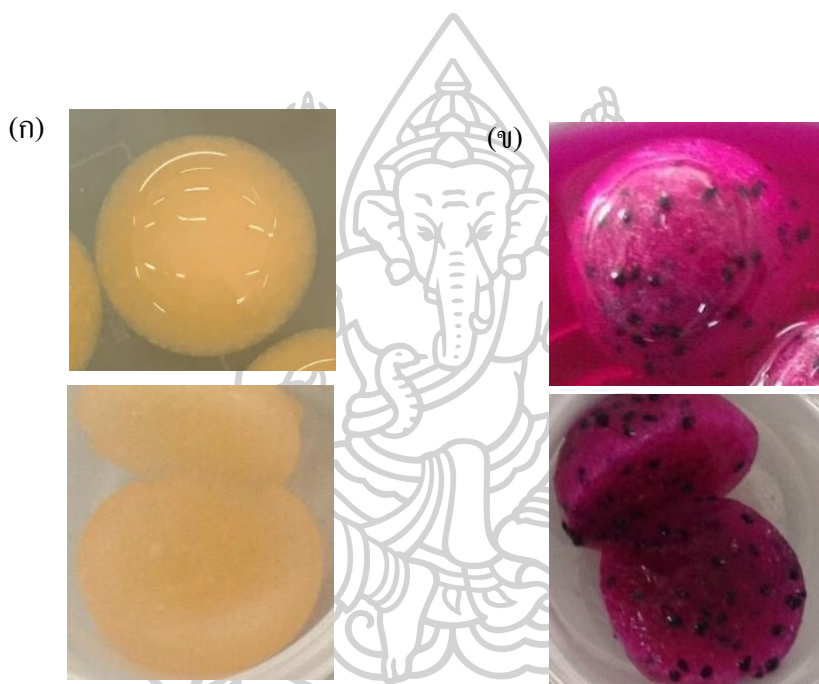
งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นแนวทางและความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น การใช้เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ การใช้ระบบสุญญากาศแบบจังหวะ และการใช้อัลตราฟิโนบับเบิล (UFB) โดยองค์ความรู้ ทั้ง 3 ส่วนนี้ สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลให้มีลักษณะ โครงสร้างที่มีความแปลกใหม่ และมีความหลากหลายสามารถรองรับต่อการนำไปใช้งานในอนาคตได้

#### 6.1 การประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ผลไม้ขึ้นรูป (restructured fruit)

##### 6.1.1 การสร้างผลไม้ขึ้นรูปส่วนเนื้อ (fruit pulp)

การประยุกต์ใช้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเพื่อสร้างผลไม้ขึ้นรูปส่วนเนื้อ (fruit pulp) ให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสเสมือนจริงมากขึ้น (เนื้อสัมผัส, โครงสร้างที่ถาวรไม่หลอมละลาย และลักษณะปรากฏ ฯลฯ) ภายใต้แนวคิดการปรับองค์ประกอบหลักและโครงสร้างจุลภาคให้ใกล้เคียงผลไม้ต้นแบบ สามารถทำได้โดยเริ่มจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักที่มีในผลไม้ชนิดนั้นๆ ตัวอย่างเช่น การผลิตเนื้อเมล่อนสดขึ้นรูป ซึ่งเมล่อนสดมีองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ คือ น้ำ (90%) น้ำตาล (8% ประกอบด้วย ซูโครส : กลูโคส : ฟรุคโตส ที่อัตราส่วน 55 : 25 : 20) ใยอาหาร (1%) (USDA National, Nutrient data base) จากองค์ประกอบต่างๆ ที่แสดงในข้างต้น จึงนำมาสู่การคัดเลือกใยอาหารที่เหมาะสม โดยพิจารณาคุณสมบัติของใยอาหารในด้านความสามารถในการอุ้มน้ำเป็นหลัก ทั้งนี้ หากต้องการพัฒนาผลไม้ขึ้นรูปที่มีเนื้อสัมผัสนุ่มและอุ้มน้ำ ควรใช้ใยอาหารที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดี เช่น ใยอาหารจากผลไม้ แต่หากต้องการพัฒนาผลไม้ขึ้นรูปที่มีโครงสร้างเส้นใยที่แข็งแรงและมีเนื้อสัมผัสที่เหนียว อาจใช้ใยอาหารที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ เช่น เซลลูโลส ดังนั้น จะพบว่าใยอาหารจากไซสม (citi-fi) เป็นใยอาหารที่มีค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ (15.66 กรัม/ 1 กรัมของตัวอย่าง) ใกล้เคียงกับความสามารถในการอุ้มน้ำของเมล่อน (13.63 กรัม/ 1 กรัมของตัวอย่าง) ด้วยเหตุนี้ หากต้องการขึ้นรูปเนื้อเมล่อน จึงสามารถดำเนินการได้

โดยผสมโซเดียมอัลจินเตกับน้ำเปล่าหรือน้ำเมล่อน ร่วมกับโยอาหารจากเมล่อนหรือโยอาหารจากโยสั่มปริมาณ 1% นอกจากนี้ ยังจำเป็นต้องมีการผสมน้ำตาล ตลอดจนสารปรุงแต่งกลิ่นรสต่างๆ ก่อนบรรจุลงในพิมพ์ที่มีรูปทรงตามต้องการ และนำไปแช่แข็ง ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 12 ชั่วโมง เมื่อตัวอย่างแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ จะนำออกจากพิมพ์และนำไปสร้างอัลจินเตไฮโดรเจลโดยแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งหลักการดังกล่าวข้างต้นสามารถประยุกต์ใช้ในการผลิตผลไม้ได้ทุกชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลไม้ที่ตกเกรด หรือผลไม้ที่อยู่ในสถานการณ์ล้นตลาดจนทำให้มีราคาตกต่ำบางช่วงเวลา ตัวอย่างเช่น แก้วมังกร เป็นต้น



ภาพที่ 29 การประยุกต์ใช้ของความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเพื่อสร้างผลไม้ขึ้นรูปส่วนเนื้อ (fruit pulp) ตัวอย่างเช่น (ก) เมล่อน และ (ข) แก้วมังกร

### 6.1.2 การสร้างผลไม้ขึ้นรูปส่วนเปลือก (fruit skin)

สำหรับการประยุกต์ใช้ของความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเพื่อสร้างส่วนเปลือก (fruit skin) ให้กับผลไม้ขึ้นรูปนั้น สามารถใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ผลไม้กลุ่มที่มีเปลือกหุ้มเป็นเอกลักษณ์เฉพาะ ตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปเปลือกขององุ่น เป็นต้น สามารถทำได้โดยการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะในระหว่างการเกิดเจลแบบ External gelation ซึ่งการกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะที่ระดับความดัน 61 kPa และทำการกระตุ้นจำนวน 3 รอบ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจาก

สามารถสร้างชั้นนอกสุด (outer crust) ของอัลจินตไฮโดรเจลที่มีลักษณะคล้ายเปลือกผลไม้ได้ โดยไม่ก่อให้เกิดการยุบตัวของโครงสร้าง (ภาพที่ 30) ดังนั้น จะเห็นได้ว่า การกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะเป็นเทคนิคการกระตุ้นเชิงกลที่ช่วยสร้างเอกลักษณ์เฉพาะให้กับโครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลทำให้สามารถผลิตผลไม้ขึ้นรูปได้หลากหลายรูปแบบตามความต้องการ



Control, P = 101 kPa

PVS, P = 61 kPa กระตุ้น 3 รอบ

ภาพที่ 30 อัลจินตไฮโดรเจลที่เกิดเจลในสภาวะปกติและเกิดเจลภายใต้สภาวะที่ถูกกระตุ้นด้วยสุญญากาศแบบจังหวะ

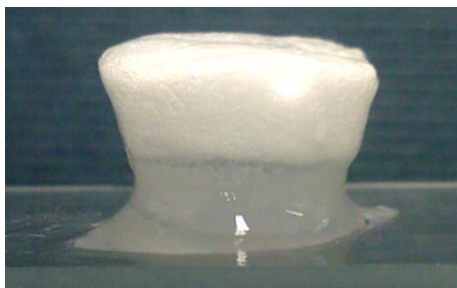
## 6.2 การประยุกต์ใช้ของความรู้ที่ได้จากงานวิจัยเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตอัลจินตไฮโดรเจล

หากพิจารณาเกี่ยวกับประโยชน์ในด้านการปรับปรุงกระบวนการผลิตอัลจินตไฮโดรเจล จะเห็นได้ว่าการใช้ไฮอาหารและการกระตุ้นด้วยสุญญากาศที่ระดับความดัน 61 kPa มีผลต่อการลดการสูญเสียมวลหรือน้ำหนัก ดังนั้น หากมีการประยุกต์ใช้ไฮอาหารและการกระตุ้นด้วยสภาวะสุญญากาศที่เหมาะสมจะสามารถเพิ่มผลิตภาพ (productivity) ให้แก่กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารขึ้นรูปต่างๆ ได้ เนื่องจากทำให้ผลผลิต (yield) มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น การกระตุ้นด้วยสุญญากาศ และการประยุกต์ใช้น้ำที่มี Ultra-Fine Bubbles (UFB) ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ (efficiency) ในการผลิตที่เกี่ยวข้องกับการแพร่ (diffusion) ได้อีกด้วย ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวจะเกิดการเคลื่อนที่ของมวลสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ เช่น กระบวนการเกิดเจลแบบ External gelation หรือ กระบวนการ osmotic dehydration เป็นต้น โดยการประยุกต์ใช้ของความรู้ที่ได้จากงานวิจัยสามารถช่วยลดเวลาในการแพร่ลงได้ เนื่องจากการกระตุ้นด้วยสุญญากาศ และการประยุกต์ใช้น้ำที่มี Ultra-Fine Bubbles (UFB) ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้น 1-4 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามวลสารต่างๆ ถูกกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่ที่รวดเร็วมากขึ้น

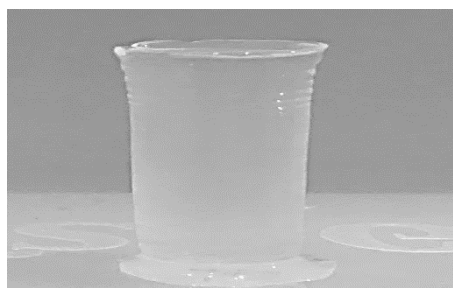
นอกจากนี้ การเพิ่มจำนวนรูพรุนภายใน โครงสร้างของอัลจินตไฮโดรเจลยังมีผลต่อ ประสิทธิภาพในการอบแห้งอีกด้วย เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นนี้ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศ ร้อนให้มากขึ้น จึงทำให้น้ำที่อยู่ในตัวอย่างที่มีรูพรุนสามารถระเหยออกไปได้ในปริมาณที่มากกว่า เมื่อระยะเวลาในการอบแห้งเท่ากัน

### 6.3 การประยุกต์ใช้องค์ความรู้เพื่อพัฒนาวัสดุทางชีวภาพที่ปลอดภัย

ในปัจจุบันมีการพัฒนาและปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุทางชีวภาพที่ใช้อัลจินตเป็นสารก่อ เจลเกิดขึ้นจำนวนมาก เช่น การเพิ่มความแข็งแรงให้กับอัลจินตไฮโดรเจล ด้วยการใส่ Polyethylene Glycol (PEG) ร่วมกับเซลลูโลสไฟเบอร์ (Wang และคณะ, 2021) การสร้างรูพรุนในอัลจินตไฮโดร เจลด้วยการใช้สารก่อโฟม (gas foaming agent) เช่น การใส่ โซเดียมไบคาร์บอเนต การใส่สาร PEG-40s ร่วมกับ phospholipid หรือการใส่สาร SLS เป็นต้น (Barbetta และคณะ, 2009; Martynov และ คณะ, 2010; Niță และคณะ, 2007; Peretz และคณะ, 2014) หรือแม้กระทั่งการทำให้อัลจินตเกิด เจลหรือมีความหนืดเพิ่มขึ้น ก็จะมีการใช้ Glucono-delta-lactone (GDL) เป็นสารช่วยให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงดังกล่าว เป็นต้น (Draget, 2009) เมื่อพิจารณาแล้ว จะพบว่า ส่วนใหญ่มักปรับปรุง คุณสมบัติของอัลจินตไฮโดรเจลด้วยการใช้สารเคมี หรือสารประกอบอื่นๆ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อ การนำไปใช้งาน และอาจมีผลต่อระดับความปลอดภัยที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุทางชีวภาพ ดังนั้น การกระตุ้นเชิงกลที่ค้นพบในงานวิจัยครั้งนี้ จึงเป็นเทคนิคทางเลือกที่สามารถใช้ในการปรับปรุง คุณสมบัติด้านต่างๆ ของอัลจินตไฮโดรเจลได้ ตัวอย่างเช่น การเพิ่มหรือเสริมความแข็งแรงของอัล จินตไฮโดรเจลด้วยการใช้เทคนิคสูญญากาศแบบจังหวะในการกระตุ้นระหว่างกระบวนการเกิดเจล ของอัลจินตไฮโดรเจล ทำให้อัลจินตไฮโดรเจลมีโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากค่า hardness ค่า breaking deformation และค่า Young's modulus ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ น้ำที่มี UFB ในการสร้างอัลจินตไฮโดรเจลยังสามารถสร้างวัสดุพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนกระจายตัวอยู่ ในโครงสร้างได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมี ยิ่งไปกว่านั้น รูพรุนที่เกิดขึ้นยังมีการกระจายตัวอย่าง สม่าเสมอ และไม่เกิดการแยกชั้นของฟองอากาศเหมือนกับการใช้สารเคมี เนื่องจาก UFB เป็น ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นเชิงกลด้วยความดันสูง ทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้มีเสถียรภาพสามารถแขวนลอยอยู่ในสารละลายได้นานกว่า ฟองอากาศที่มีขนาดใหญ่ โดยฟองอากาศประเภท UFB จะไม่เกิดการรวมตัวกัน และไม่เกิดการ เคลื่อนที่ขึ้นสู่บริเวณด้านบนของสารละลาย ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการแยกชั้นของฟองอากาศใน ระหว่างที่อัลจินตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออนและเกิดเป็นอัลจินตไฮโดรเจล (ภาพที่ 31)



(ก)



(ข)

### ภาพที่ 31 อัลจินเตไฮโดรเจลที่มีฟองอากาศ

โดย (ก) คือ อัลจินเตไฮโดรเจลที่มีฟองอากาศขนาดใหญ่ (Micro/Macro bubbles) ที่เกิดขึ้นจากการใช้สารเคมี และ (ข) คือ อัลจินเตไฮโดรเจลที่มีฟองอากาศขนาดเล็ก (UFB) ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นเชิงกล

ที่มา: Martynov และคณะ, 2010

#### 6.4 ข้อเสนอแนะ

6.4.1 องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้เป็นการค้นหาโอกาสที่มีความเป็นไปได้ทั้งหมด ดังนั้น การประยุกต์ใช้ของความรู้จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งานและความเหมาะสมกับรูปแบบของการใช้งานเป็นสำคัญ

6.4.2 คุณสมบัติของอาหารมักขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในระบบของอาหารนั้นๆ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต (แป้ง ใยอาหาร น้ำตาล) และไขมัน ฯลฯ ซึ่งอาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบต่างๆ และทำให้อาหารแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะแตกต่างกัน ดังนั้น ในอนาคตควรให้ความสำคัญกับการศึกษาผลของการผสมองค์ประกอบต่างๆ ร่วมกัน ตลอดจนศึกษาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น เพื่อให้สามารถค้นพบองค์ความรู้ใหม่สู่การสร้างผลิตภัณฑ์นวัตกรรมได้อย่างเป็นรูปธรรม



## รายการอ้างอิง

- Aarstad, O., Heggset, E. B., Pedersen, I. S., Bjørnøy, S. H., Syverud, K., & Strand, B. L. (2017). Mechanical properties of composite hydrogels of alginate and cellulose nanofibrils. *Polymers*, 9(8), 378.
- Agulhon, P., Robitzer, M., David, L., & Quignard, F. o. (2012). Structural regime identification in ionotropic alginate gels: influence of the cation nature and alginate structure. *Biomacromolecules*, 13(1), 215-220.
- Akbari, S., & Pirbodaghi, T. (2014). Microfluidic encapsulation of cells in alginate particles via an improved internal gelation approach. *Microfluidics and nanofluidics*, 16(4), 773-777.
- Alsberg, E., Anderson, K., Albeiruti, A., Franceschi, R., & Mooney, D. (2001). Cell-interactive alginate hydrogels for bone tissue engineering. *Journal of dental research*, 80(11), 2025-2029.
- Amsden, B. (1998). Solute Diffusion within Hydrogels. Mechanisms and Models. *Macromolecules*, 31(23), 8382-8395. <https://doi.org/10.1021/ma980765f>
- Amsden, B. (2001). Diffusion in Polyelectrolyte Hydrogels: Application of an Obstruction-Scaling Model to Solute Diffusion in Calcium Alginate. *Macromolecules*, 34(5), 1430-1435. <https://doi.org/10.1021/ma001450e>
- Azevedo, A., Etchepare, R., Calgaroto, S., & Rubio, J. (2016). Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features. *Minerals Engineering*, 94, 29-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.001>
- Azoubel, P. M., Araújo, A. J. d. B., Oliveira, S. B. d., & Amorim, M. d. R. (2011). Restructuring Passiflora cincinnata fruit pulp: influence of hydrocolloids. *Food Science and Technology*, 31(1), 160-166.
- Bajpai, M., Shukla, P., & Bajpai, S. (2016). Ca (II)+ Ba (II) ions crosslinked alginate gels prepared by a novel diffusion through dialysis tube (DTDT) approach and preliminary BSA release study. *Polymer Degradation and Stability*, 134, 22-29.
- Bal, D., & Ganguly, S. (2014). Enhancement of solute release from alginate scaffold with embedded sub-millimeter voids. *J Biomater Sci Polym Ed*, 25(1), 51-60. <https://doi.org/10.1080/09205063.2013.833442>

- Banerjee, A., & Ganguly, S. (2019). Mechanical behaviour of alginate film with embedded voids under compression-decompression cycles. *Scientific Reports*, 9(1), 13193. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49589-w>
- Banerjee, A., Patra, S., & Ganguly, S. (2017). Alginate gelatin blend with embedded voids for controlled release applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 134.
- Barbetta, A., Barigelli, E., & Dentini, M. (2009). Porous alginate hydrogels: synthetic methods for tailoring the porous texture. *Biomacromolecules*, 10(8), 2328-2337.
- Barbieri, M., Cellini, F., Cacciotti, I., Peterson, S. D., & Porfiri, M. (2017). In situ temperature sensing with fluorescent chitosan-coated PNIPAAm/alginate beads. *Journal of Materials Science*, 52(20), 12506-12512.
- Betoret, E., Betoret, N., Rocculi, P., & Dalla Rosa, M. (2015). Strategies to improve food functionality: Structure–property relationships on high pressures homogenization, vacuum impregnation and drying technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 1-12.
- Bhujbal, S. V., Paredes-Juarez, G. A., Niclou, S. P., & De Vos, P. (2014). Factors influencing the mechanical stability of alginate beads applicable for immunoisolation of mammalian cells. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 37, 196-208.
- Bienaimé, C., Barbotin, J. N., & Nava-Saucedo, J. E. (2003). How to build an adapted and bioactive cell microenvironment? A chemical interaction study of the structure of Ca-alginate matrices and their repercussion on confined cells. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 67(2), 376-388.
- Biswas, A., Kumar, V., Bhosle, S., Sahoo, J., & Chatli, M. (2011). Dietary fibers as functional ingredients in meat products and their role in human health. *International Journal of Livestock Production*, 2(4), 45-54.
- Boontheekul, T., Kong, H.-J., & Mooney, D. J. (2005). Controlling alginate gel degradation utilizing partial oxidation and bimodal molecular weight distribution. *Biomaterials*, 26(15), 2455-2465. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.06.044>
- Boz, B., Dev, T., Salvadori, A., & Schaefer, J. L. (2021). Review—Electrolyte and Electrode Designs for Enhanced Ion Transport Properties to Enable High Performance Lithium

- Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 168(9). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac1cc3>
- Britnell, P. (1989). The development of structured mango products. III International Mango Symposium 291,
- Cao, L., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., & Fang, Y. (2020). Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: A review. *Carbohydrate Polymers*, 242, 116389.
- Chan, G., & Mooney, D. J. (2013). Ca<sup>2+</sup> released from calcium alginate gels can promote inflammatory responses in vitro and in vivo. *Acta biomaterialia*, 9(12), 9281-9291.
- Chan, L., Lee, H., & Heng, P. (2002). Production of alginate microspheres by internal gelation using an emulsification method. *International journal of pharmaceutics*, 242(1-2), 259-262.
- Chan, L. W., Lee, H. Y., & Heng, P. W. (2006). Mechanisms of External and internal gelation and their impact on the functions of alginate as a coat and delivery system. *Carbohydrate Polymers*, 63(2), 176-187.
- Chang, H. C., & Carpenter, J. A. (1997). Optimizing quality of frankfurters containing oat bran and added water. *Journal of Food Science*, 62(1), 194-197.
- Chang, X., Yang, A., Bao, X., He, Z., Zhou, K., Dong, Q., & Luo, W. (2021). An innovative structured fruit (SF) product made from litchi juice, king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*) and gellan gum: Nutritional, textural, sensorial properties. *LWT*, 152, 112344.
- Chaplin, M. (2017). *Nanobubbles (ultrafine bubbles)*. [www1.lsbu.ac.uk/water/nanobubble.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/nanobubble.html)
- Chaplin, M. F. (2003). Fibre and water binding. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62(1), 223-227.
- Chen, C.-Y., Ke, C.-J., Yen, K.-C., Hsieh, H.-C., Sun, J.-S., & Lin, F.-H. (2015). 3D porous calcium-alginate scaffolds cell culture system improved human osteoblast cell clusters for cell therapy. *Theranostics*, 5(6), 643.
- Chen, L., Shen, R., Komasa, S., Xue, Y., Jin, B., Hou, Y., Okazaki, J., & Gao, J. (2017). Drug-loadable calcium alginate hydrogel system for use in oral bone tissue repair. *International journal of molecular sciences*, 18(5), 989.
- Chen, Z., Wang, T., & Yan, Q. (2018). Building a polysaccharide hydrogel capsule delivery system for control release of ibuprofen. *Journal of Biomaterials science, Polymer edition*, 29(3), 309-324.

- Choi, B., Park, H. J., Hwang, S., & Park, J. (2002). Preparation of alginate beads for floating drug delivery system: effects of CO<sub>2</sub> gas-forming agents. *International journal of pharmaceutics*, 239(1-2), 81-91.
- Chrastil, J. (1991). Gelation of calcium alginate. Influence of rice starch or rice flour on the gelation kinetics and on the final gel structure. *Journal of agricultural and food chemistry*, 39(5), 874-876.
- Corrêa, J. L. G., Ernesto, D. B., & de Mendonça, K. S. (2016). Pulsed vacuum osmotic dehydration of tomatoes: Sodium incorporation reduction and kinetics modeling. *LWT-Food Science and Technology*, 71, 17-24.
- Correia, C., Sher, P., Reis, R. L., & Mano, J. F. (2013). Liquified chitosan–alginate multilayer capsules incorporating poly(L-lactic acid) microparticles as cell carriers. *Soft Matter*, 9, 2125-2130. <https://doi.org/10.1039/C2SM26784E>
- da Silva Costa, R. A., Bonomo, R. C. F., Rodrigues, L. B., Santos, L. S., & Veloso, C. M. (2020). Improvement of texture properties and syneresis of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch gels by using hydrocolloids (guar gum and xanthan gum). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(7), 3204-3211.
- Danalache, F., Mata, P., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2015). Novel mango bars using gellan gum as gelling agent: Rheological and microstructural studies. *LWT-Food Science and Technology*, 62(1), 576-583.
- de Jesus Junqueira, J. R., Corrêa, J. L. G., de Mendonça, K. S., Resende, N. S., & Boas, E. V. d. B. V. (2017). Influence of sodium replacement and vacuum pulse on the osmotic dehydration of eggplant slices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 10-18.
- De Kruif, C., & Tuinier, R. (2001). Polysaccharide protein interactions. *Food hydrocolloids*, 15(4-6), 555-563.
- De Paula, C. D., Pastrana-Puche, Y. I., Vilorio-Benitez, K. M., Rubio-Arrieta, J. A., Simanca-Sotelo, M., Alvarez-Badel, B., & Avilez-Montes, Y. (2021). Physicochemical and sensory evaluation of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) restructured products produced in the Sinu Valley, Colombia. *Heliyon*, 7(8), e07691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07691>
- Deng, Y., & Zhao, Y. (2008). Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji). *Journal of Food Engineering*, 85(1), 84-93.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.016>

- Diao, X., Guan, H., Zhao, X., Diao, X., & Kong, B. (2016). Physicochemical and structural properties of composite gels prepared with myofibrillar protein and lard diacylglycerols. *Meat science*, 121, 333-341.
- Donati, I., & Paoletti, S. (2009). Material properties of alginates. In *Alginates: biology and applications* (pp. 1-53). Springer.
- Dong, H., Snyder, J. F., Williams, K. S., & Andzelm, J. W. (2013). Cation-induced hydrogels of cellulose nanofibrils with tunable moduli. *Biomacromolecules*, 14(9), 3338-3345.
- Doublier, J.-L., Garnier, C., Renard, D., & Sanchez, C. (2000). Protein-polysaccharide interactions. *Current opinion in Colloid & interface Science*, 5(3-4), 202-214.
- Draget, K., Bræk, G. S., & Smidsrød, O. (1994). Alginic acid gels: the effect of alginate chemical composition and molecular weight. *Carbohydrate Polymers*, 25(1), 31-38.
- Draget, K. I. (2009). Alginates. In *Handbook of Hydrocolloids* (pp. 807-828).  
<https://doi.org/10.1533/9781845695873.807>
- Draget, K. I. (2016). Alginates: Fundamental Properties and Food Applications. In *Reference Module in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.03182-6>
- Eagleton, J. (1999). Ozone in Drinking Water Treatment: a Brief Overview 106 Years & Still Going. *Draft-JGE-2/1/99* <http://www.hydroserve.com/ozone>, 20.
- Elleuch, M., Bedigian, D., Roiseux, O., Besbes, S., Blecker, C., & Attia, H. (2011). Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. *Food chemistry*, 124(2), 411-421.
- Ensor, S., Ernst, E., Sofos, J., & Schmidt, G. (1989). Quality characteristics of restructured turkey meat with variable alginate/calcium-lactate ratios. *Journal of Food Science*, 54(3), 558-560.
- Escrive, I., Garcia-Pinchi, R., Andrés, A., & Fito, P. (2000). Osmotic dehydration of kiwifruit (*Actinidia chinensis*): fluxes and mass transfer kinetics. *Journal of Food Process Engineering*, 23(3), 191-205.
- Fito, P., Andrés, A., Chiralt, A., & Pardo, P. (1996). Coupling of hydrodynamic mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems. *Journal of Food Engineering*, 27(3), 229-240.
- Fito, P., Chiralt, A., Barat, J. M., Andrés, A., Martínez-Monzó, J., & Martínez-Navarrete, N. (2001).

- Vacuum impregnation for development of new dehydrated products. *Journal of Food Engineering*, 49(4), 297-302.
- Fujiwara, Y., Maeda, R., Takeshita, H., & Komohara, Y. (2021). Alginates as food ingredients absorb extra salt in sodium chloride-treated mice. *Heliyon*, 7(3), e06551.
- Furia, T. E. (1973). *CRC handbook of food additives* (Vol. 1). CRC press.
- Gacesa, P. (1988). Alginates. *Carbohydrate Polymers*, 8(3), 161-182.
- Glicksman, M. (1983). *Food Hydrocolloids* (Vol. 2). CRC Press.
- Glicksman, M. (1987). Utilization of seaweed hydrocolloids in the food industry. Twelfth international seaweed symposium,
- Grant, G. T., Morris, E. R., Rees, D. A., Smith, P. J. C., & Thom, D. (1973). Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model. *FEBS Letters*, 32(1), 195-198. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(73\)80770-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80770-7)
- Grigelmo-Miguel, N., & Martín-Belloso, O. (1999). Comparison of dietary fibre from by-products of processing fruits and greens and from cereals. *LWT-Food Science and Technology*, 32(8), 503-508.
- Grizotto, R. K., Bruns, R. E., De Aguirre, J. M., & De Menezes, H. C. (2007). Technological aspects for restructuring concentrated pineapple pulp. *LWT - Food Science and Technology*, 40(5), 759-765. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.05.002>
- Haedelt, J., Beckett, S. T., & Niranjana, K. (2007). Bubble-Included Chocolate: Relating Structure with Sensory Response. *Journal of Food Science*, 72, E138-142. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00313.x>
- Hajikhani, A., Wriggers, P., & Marino, M. (2021). Chemo-mechanical modelling of swelling and crosslinking reaction kinetics in alginate hydrogels: A novel theory and its numerical implementation. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 153, 104476.
- Hasegawa, H., Nagasaka, Y., & Kataoka, H. (2008). Electrical potential of microbubble generated by shear flow in pipe with slits. *Fluid Dynamics Research*, 40(7-8), 554.
- Haug, A. (1964). Composition and properties of alginates.
- Hay, I. D., Rehman, Z. U., Moradali, M. F., Wang, Y., & Rehm, B. H. (2013). Microbial alginate production, modification and its applications. *Microbial biotechnology*, 6(6), 637-650.
- Hoffman, A. S. (2012). Hydrogels for biomedical applications. *Advanced drug delivery reviews*, 64,

18-23.

- Hu, C., Lu, W., Mata, A., Nishinari, K., & Fang, Y. (2021). Ions-induced gelation of alginate: Mechanisms and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 177, 578-588.
- Hu, Y., Azadi, G., & Ardekani, A. M. (2015). Microfluidic fabrication of shape-tunable alginate microgels: Effect of size and impact velocity. *Carbohydrate Polymers*, 120, 38-45.
- Huang, S.-L., & Lin, Y.-S. (2017). The size stability of alginate beads by different ionic crosslinkers. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017.
- Hubbard, A. T. (2002). *Encyclopedia of surface and colloid science* (Vol. 1). CRC press.
- Jain, D., & Bar-Shalom, D. (2014). Alginate drug delivery systems: application in context of pharmaceutical and biomedical research. *Drug development and industrial pharmacy*, 40(12), 1576-1584.
- Jang, J., Lee, J., Seol, Y.-J., Jeong, Y. H., & Cho, D.-W. (2013). Improving mechanical properties of alginate hydrogel by reinforcement with ethanol treated polycaprolactone nanofibers. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1216-1221.
- Jeong, C., Kim, S., Lee, C., Cho, S., & Kim, S.-B. (2020). Changes in the physical properties of calcium alginate gel beads under a wide range of gelation temperature conditions. *Foods*, 9(2), 180.
- Jia, W., Ren, S., & Hu, B. (2013). Effect of water chemistry on zeta potential of air bubbles. *Int. J. Electrochem. Sci*, 8(4), 5828-5837.
- Johansson, L., Skantze, U., & Loeffroth, J. E. (1993). Diffusion and interaction in gels and solutions. 6. Charged systems. *The Journal of Physical Chemistry*, 97(38), 9817-9824.  
<https://doi.org/10.1021/j100140a045>
- Jørgensen, T. E., Sletmoen, M., Draget, K. I., & Stokke, B. T. (2007). Influence of oligoguluronates on alginate gelation, kinetics, and polymer organization. *Biomacromolecules*, 8(8), 2388-2397.
- Kaletunc, G., Nussinovitch, A., & Peleg, M. (1990). Alginate texturization of highly acid fruit pulps and juices. *Journal of Food Science*, 55(6), 1759-1761.
- Kelco, A. (1987). Alginate products for scientific water control. In: Kelco San Diego.
- Kierstan, M., & Bucke, C. (2000). The immobilization of microbial cells, subcellular organelles, and

- enzymes in calcium alginate gels. Reprinted from *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. XIX, No. 3, Pages 387-397 (1977). *Biotechnology and bioengineering*, 67(6), 726-736.
- Kim, J.-Y., Song, M.-G., & Kim, J.-D. (2000). Zeta potential of nanobubbles generated by ultrasonication in aqueous alkyl polyglycoside solutions. *Journal of colloid and interface science*, 223(2), 285-291.
- Kuo, C. K., & Ma, P. X. (2001). Ionically crosslinked alginate hydrogels as scaffolds for tissue engineering: Part 1. Structure, gelation rate and mechanical properties. *Biomaterials*, 22(6), 511-521.
- Kwok, W., Kiparissides, C., Yuet, P., Harris, T., & Goosen, M. (1991). Mathematical modelling of protein diffusion in microcapsules: A comparison with experimental results. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 69(1), 361-370.
- Lasztity, R. (2009). *Food Quality and Standards-Volume II* (Vol. 10). EOLSS Publications.
- Leal, A. R., de Siqueira Oliveira, L., Farias, L. M., Alves, C. A. N., da Costa, J. N., Mata, P., & de Sousa, P. H. M. (2021). Elaboration of mixed structured fruit formulations with agar and gellan gum: Texture, physicochemical, and sensory properties. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 23, 100294.
- Lee, B.-B., Bhandari, B. R., & Howes, T. (2018). Gelation of an alginate film via spraying of calcium chloride droplets. *Chemical Engineering Science*, 183, 1-12.
- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: properties and biomedical applications. *Progress in polymer science*, 37(1), 106-126.
- Li, J., He, J., Huang, Y., Li, D., & Chen, X. (2015). Improving surface and mechanical properties of alginate films by using ethanol as a co-solvent during External gelation. *Carbohydrate Polymers*, 123, 208-216.
- Li, W., Zhang, L., Ge, X., Xu, B., Zhang, W., Qu, L., Choi, C.-H., Xu, J., Zhang, A., & Lee, H. (2018). Microfluidic fabrication of microparticles for biomedical applications. *Chemical Society Reviews*, 47(15), 5646-5683.
- Li, Z., Pearce, A. K., Dove, A. P., & O'Reilly, R. K. (2021). Precise tuning of polymeric fiber dimensions to enhance the mechanical properties of alginate hydrogel matrices. *Polymers*, 13(13), 2202.
- Lide, D. R. (2004). *CRC handbook of chemistry and physics* (Vol. 85). CRC press.



- Lin, T., Zhang, Y., Wu, J., Zhao, X., Lian, H., Wang, W., Guo, H., & Hu, Y. (2014). A floating hydrogel system capable of generating CO<sub>2</sub> bubbles to diminish urinary obstruction after intravesical instillation. *Pharmaceutical research*, 31(10), 2655-2663.
- Lin, X., Luo, C., & Chen, Y. (2016). Effects of Vacuum Impregnation with Sucrose Solution on Mango Tissue. *Journal of Food Science*, 81. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13309>
- Linker, A., & Jones, R. S. (1966). A new polysaccharide resembling alginic acid isolated from pseudomonads. *J. biol. Chem*, 241(16), 3845-3851.
- Liu, K., Ding, H.-J., Liu, J., Chen, Y., & Zhao, X.-Z. (2006). Shape-controlled production of biodegradable calcium alginate gel microparticles using a novel microfluidic device. *Langmuir*, 22(22), 9453-9457.
- Liu, X., Yu, W., Zhang, Y., Xue, W., Yu, W., Xiong, Y., Ma, X., Chen, Y., & Yuan, Q. (2002). Characterization of structure and diffusion behaviour of Ca-alginate beads prepared with External or internal calcium sources. *Journal of microencapsulation*, 19(6), 775-782.
- Liu, Y., Tottori, N., & Nisisako, T. (2019). Microfluidic synthesis of highly spherical calcium alginate hydrogels based on External gelation using an emulsion reactant. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 283, 802-809.
- Lopez-Sanchez, P., Fredriksson, N., Larsson, A., Altskär, A., & Ström, A. (2018). High sugar content impacts microstructure, mechanics and release of calcium-alginate gels. *Food hydrocolloids*, 84, 26-33.
- Lozano-Vazquez, G., Lobato-Calleros, C., Escalona-Buendia, H., Chavez, G., Alvarez-Ramirez, J., & Vernon-Carter, E. (2015). Effect of the weight ratio of alginate-modified tapioca starch on the physicochemical properties and release kinetics of chlorogenic acid containing beads. *Food hydrocolloids*, 48, 301-311.
- Luh, N., Flink, J. M., & Karel, M. (1977). Fabrication, characterization, and modification of the texture of calcium alginate gels. *Journal of Food Science*, 42(4), 976-981.
- Luh, N., Karel, M., & Flink, J. M. (1976). A simulated fruit gel suitable for freeze dehydration. *Journal of Food Science*, 41(1), 89-93.
- Lundberg, P., & Kuchel, P. (1997). Diffusion of solutes in agarose and alginate gels: <sup>1</sup>H and <sup>23</sup>Na PFGSE and <sup>23</sup>Na TQF NMR studies. *Magnetic resonance in medicine : official journal of the Society of Magnetic Resonance in Medicine / Society of Magnetic Resonance in*

- Medicine*, 37, 44-52. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910370108>
- Lupo, B., Maestro, A., Gutiérrez, J. M., & González, C. (2015). Characterization of alginate beads with encapsulated cocoa extract to prepare functional food: Comparison of two gelation mechanisms. *Food hydrocolloids*, 49, 25-34.
- Mancini, F., & McHugh, T. (2000). Fruit-alginate interactions in novel restructured products. *Food/Nahrung*, 44(3), 152-157.
- Manjunatha, S., & Das Gupta, D. (2006). Instrumental textural characteristics of restructured carrot cubes. *International Journal of Food Properties*, 9(3), 453-462.
- Manjunatha, S. S., & Das Gupta, D. K. (2006). Instrumental Textural Characteristics of Restructured Carrot Cubes. *International Journal of Food Properties*, 9(3), 453-462. <https://doi.org/10.1080/10942910600596316>
- Manufacture, I., & King, A. H. (2019). Brown seaweed extracts (alginates). *Food hydrocolloids*, 2, 115.
- Martinsen, A., Skjåk-Bræk, G., Smidsrød, O., Zanetti, F., & Paoletti, S. (1991). Comparison of different methods for determination of molecular weight and molecular weight distribution of alginates. *Carbohydrate Polymers*, 15(2), 171-193.
- Martynov, S., Wang, X., Stride, E. P., & Edirisinghe, M. J. (2010). Preparation of a Micro-Porous Alginate Gel Using a Microfluidic Bubbling Device. *International Journal of Food Engineering*, 6(3). <https://doi.org/doi:10.2202/1556-3758.1774>
- McHugh, T. H., & Huxsoll, C. C. (2000). Restructured fruit and vegetable products and processing methods. In: Google Patents.
- Meegoda, J., Aluthgun Hewage, S., & Batagoda, J. (2018). Stability of Nanobubbles. *Environmental Engineering Science*, 35. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0203>
- Meiri, A., & Anderson, W. (1970). Observations on the exchange of salt between the xylem and neighbouring cells in *Zea mays* primary roots. *Journal of Experimental Botany*, 21(4), 908-914.
- Mohsenin, N. (1970). *Physical properties of plant and animal materials: Structure*. Gordon and Breach.
- Mørch, Ý. A., Donati, I., Strand, B. L., & Skjåk-Bræk, G. (2006). Effect of Ca<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, and Sr<sup>2+</sup> on Alginate Microbeads. *Biomacromolecules*, 7(5), 1471-1480.

<https://doi.org/10.1021/bm060010d>

- Moreno, H., Carballo, J., & Borderías, J. (2013). Raw-appearing Restructured fish models made with Sodium alginate or Microbial transglutaminase and effect of chilled storage. *Food Science and Technology*, 33(1), 137-145. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612013005000004>
- Moreno, J., Echeverria, J., Silva, A., Escudero, A., Petzold, G., Mella, K., & Escudero, C. (2017). Apple snack enriched with L-arginine using vacuum impregnation/ohmic heating technology. *Food Science and Technology International*, 23(5), 448-456.
- Mouquet, C., Aymard, C., Guilbert, S., Cuvelier, G., & Launay, B. (1997). Influence of initial pH on gelation kinetics of texturized passion fruit pulp. *LWT-Food Science and Technology*, 30(2), 129-134.
- Mouquet, C., DUMAS, J. C., & Guilbert, S. (1992). Texturization of sweetened mango pulp: optimization using response surface methodology. *Journal of Food Science*, 57(6), 1395-1400.
- Mousavi, S. M. R., Rafe, A., & Yeganehzad, S. (2019). Textural, mechanical, and microstructural properties of restructured pimiento alginate-guar gels. *J Texture Stud*, 50(2), 155-164. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12385>
- Nieto, A. B., Vicente, S., Hodara, K., Castro, M. A., & Alzamora, S. M. (2013). Osmotic dehydration of apple: Influence of sugar and water activity on tissue structure, rheological properties and water mobility. *Journal of Food Engineering*, 119(1), 104-114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.04.032>
- Nițã, I., Iorgulescu, M., Spiroiu, M. F., Ghiurea, M., Petcu, C., & Cinteza, O. (2007). The adsorption of heavy metal ions on porous calcium alginate microparticles.
- Nussinovitch, A. (1997). Texturized products. In *Hydrocolloid Applications* (pp. 328-338). Springer.
- Nussinovitch, A., & Peleg, M. (1990). Mechanical properties of a raspberry product texturized with alginate 1. *Journal of food processing and preservation*, 14(4), 267-278.
- Nussinovitch, A., Peleg, M., & Normand, M. (1989). A modified Maxwell and a nonexponential model for characterization of the stress relaxation of agar and alginate gels. *Journal of Food Science*, 54(4), 1013-1016.

- Oakenfull, D. (2001). Physicochemical properties of dietary fiber: Overview. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER-*, 195-206.
- Ohgaki, K., Khanh, N. Q., Joden, Y., Tsuji, A., & Nakagawa, T. (2010). Physicochemical approach to nanobubble solutions. *Chemical Engineering Science*, 65(3), 1296-1300.
- Onsøyen, E. (1997). Alginates. In *Thickening and gelling agents for food* (pp. 22-44). Springer.
- Pankongadisak, P., Ruktanonchai, U. R., Supaphol, P., & Suwantong, O. (2014). Preparation and Characterization of Silver Nanoparticles-Loaded Calcium Alginate Beads Embedded in Gelatin Scaffolds. *AAPS PharmSciTech*, 15(5), 1105-1115. <https://doi.org/10.1208/s12249-014-0140-9>
- Panouillé, M., & Larreta-Garde, V. (2009). Gelation behaviour of gelatin and alginate mixtures. *Food hydrocolloids*, 23(4), 1074-1080.
- Patra, S., Bal, D. K., & Ganguly, S. (2016). Diffusion in and around alginate and chitosan films with embedded sub-millimeter voids. *Materials Science and Engineering: C*, 59, 61-69. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.09.079>
- Pelaez, C., & Karel, M. (1981). Improved method for preparation of fruit-simulating alginate gels. *Journal of food processing and preservation*, 5(2), 63-81.
- Peppas, N. A., Hilt, J. Z., Khademhosseini, A., & Langer, R. (2006). Hydrogels in biology and medicine: from molecular principles to bionanotechnology. *Advanced materials*, 18(11), 1345-1360.
- Peretz, S., Florea-Spiroiu, M., Anghel, D. A., Bala, D., Stoian, C. A., & Zgherea, G. (2014). Preparation of Porous Calcium Alginate Beads and Their Use for Adsorption of O-Nitrophenol from Aqueous Solutions.
- Petit, B., Masuda, K., D'souza, A., Otten, L., Pietryla, D., Hartmann, D., Morris, N., Uebelhart, D., Schmid, T., & Thonar, E.-M. (1996). Characterization of crosslinked collagens synthesized by mature articular chondrocytes cultured in alginate beads: comparison of two distinct matrix compartments. *Experimental cell research*, 225(1), 151-161.
- Petit, J. M., Zhu, X. X., & Macdonald, P. M. (1996). Solute Probe Diffusion in Aqueous Solutions of Poly(vinyl alcohol) As Studied by Pulsed-Gradient Spin-Echo NMR Spectroscopy. *Macromolecules*, 29(1), 70-76. <https://doi.org/10.1021/ma9510597>
- Piculell, L. (1995). Gelling carrageenans. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-*

MARCEL DEKKER-, 205-205.

- Pietrasik, Z., & Janz, J. (2010). Utilization of pea flour, starch-rich and fiber-rich fractions in low fat bologna. *Food Research International*, 43(2), 602-608.
- Pittermannová, A., Ruberová, Z., Zadražil, A., Bremond, N., Bibette, J., & Štěpánek, F. (2016). Microfluidic fabrication of composite hydrogel microparticles in the size range of blood cells. *RSC advances*, 6(105), 103532-103540.
- Ponce, B., Urtuvia, V., Maturana, N., Peña, C., & Díaz-Barrera, A. (2021). Increases in alginate production and transcription levels of alginate lyase (alyA1) by control of the oxygen transfer rate in *Azotobacter vinelandii* cultures under diazotrophic conditions. *Electronic Journal of Biotechnology*, 52, 35-44.
- Popeski-Dimovski, R., Rendeovski, S., & Mahmudi, N. (2012). Change in gellation time of sodium alginate biopolymer hydrogels with change of dose of gamma irradiation. *Physica Macedonica*, 61, 67-72.
- Posé, S., Paniagua, C., Matas, A. J., Gunning, A. P., Morris, V. J., Quesada, M. A., & Mercado, J. A. (2019). A nanostructural view of the cell wall disassembly process during fruit ripening and postharvest storage by atomic force microscopy. *Trends in Food Science & Technology*, 87, 47-58.
- Powell, M. J., Sebranek, J. G., Prusa, K. J., & Tarté, R. (2019). Evaluation of citrus fiber as a natural replacer of sodium phosphate in alternatively-cured all-pork Bologna sausage. *Meat science*, 157, 107883.
- Puguan, J. M. C., Yu, X., & Kim, H. (2014). Characterization of structure, physico-chemical properties and diffusion behavior of Ca-Alginate gel beads prepared by different gelation methods. *Journal of colloid and interface science*, 432, 109-116.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.06.048>
- Qin, Y., Jiang, J., Zhao, L., Zhang, J., & Wang, F. (2018). Applications of alginate as a functional food ingredient. In *Biopolymers for food design* (pp. 409-429). Elsevier.
- Radziejewska-Kubzdela, E., Biegańska-Marecik, R., & Kidoń, M. (2014). Applicability of vacuum impregnation to modify physico-chemical, sensory and nutritive characteristics of plant origin products—a review. *International journal of molecular sciences*, 15(9), 16577-16610.

- Raharjo, S. (2002). Sensory Characteristics of Restructured Fresh Fruit Composite Prepared from Jack Fruit (*Artocarpus heterophylla* L.) and Sapodilla (*MaidMara achras* Mill. Fosb.). *Indonesian Food and Nutrition Progress*, 9(2002).
- Ramdhan, T., Ching, S. H., Prakash, S., & Bhandari, B. (2020). Physical and mechanical properties of alginate based composite gels. *Trends in Food Science & Technology*, 106, 150-159.
- Reddy, G. V. B., Mandal, P. K., Sen, A. R., & Reddy, K. S. (2014). Developments in Science, Technology, Quality and Constraints of Restructured Meat Products-A Review. *International Journal of Meat Science*, 5(1), 14-48.  
<https://doi.org/10.3923/ijmeat.2015.14.48>
- Rezende, R. A., Bártolo, P., Mendes, A., & Filho, R. M. (2007). Experimental characterisation of the alginate gelation process for rapid prototyping. *Chem. Eng. Trans.*, 11, 509-514.
- Rondeau, E., & Cooper-White, J. J. (2008). Biopolymer microparticle and nanoparticle formation within a microfluidic device. *Langmuir*, 24(13), 6937-6945.
- Sadoff, H. L. (1975). Encystment and germination in *Azotobacter vinelandii*. *Bacteriological reviews*, 39(4), 516-539.
- Santa-Maria, M., Scher, H., & Jeoh, T. (2012). Microencapsulation of bioactives in cross-linked alginate matrices by spray drying. *Journal of microencapsulation*, 29(3), 286-295.
- Sarker, B., Papageorgiou, D. G., Silva, R., Zehnder, T., Gul-E-Noor, F., Bertmer, M., Kaschta, J., Chrissafis, K., Detsch, R., & Boccaccini, A. R. (2014). Fabrication of alginate–gelatin crosslinked hydrogel microcapsules and evaluation of the microstructure and physico-chemical properties. *Journal of Materials Chemistry B*, 2(11), 1470-1482.
- Sergeeva, A., Feoktistova, N., Prokopovic, V., Gorin, D., & Volodkin, D. (2015). Design of Porous Alginate Hydrogels by Sacrificial CaCO<sub>3</sub> Templates: Pore Formation Mechanism. *Advanced Materials Interfaces*, 2. <https://doi.org/10.1002/admi.201500386>
- Servillo, L., Balestrieri, M. L., Giovane, A., De Sio, F., Cannavacciuolo, M., Squitieri, G., Ferrari, G., Cautela, D., & Castaldo, D. (2018). Improving diced tomato firmness by pulsed vacuum calcification. *LWT*, 92, 451-457.
- Shoichet, M. S., Li, R. H., White, M. L., & Winn, S. R. (1996). Stability of hydrogels used in cell encapsulation: An in vitro comparison of alginate and agarose. *Biotechnology and bioengineering*, 50(4), 374-381.

- Simonescu, C. M., Mason, T. J., Călinescu, I., Lavric, V., Vînătoru, M., Melinescu, A., & Culiță, D. C. (2020). Ultrasound assisted preparation of calcium alginate beads to improve absorption of  $Pb^{+2}$  from water. *Ultrasonics Sonochemistry*, 68, 105191.
- Siriwongwilaichat, P., & Koedcharoenporn, J. (2019). Improvement of texture and gel stability of restructured frozen mango pulp by using xanthan gum and locust bean gum. *Science, Engineering and Health Studies*, 59-72.
- Skjåk-Bræk, G., & Draget, K. I. (2012). Alginates. In *Polymer Science: A Comprehensive Reference* (pp. 213-220). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53349-4.00261-2>
- Smidsrød, O., & Skja, G. (1990). Alginate as immobilization matrix for cells. *Trends in biotechnology*, 8, 71-78.
- Smidsrød, O., & Draget, K. I. (1997). Alginate gelation technologies. *Food colloids: Proteins, lipids and polysaccharides*, 279.
- Soon-Shiong, P., Heintz, R., Merideth, N., Yao, Q., Yao, Z., Zheng, T., Murphy, M., Moloney, M., Schmehl, M., & Harris, M. (1994). Insulin independence in a type 1 diabetic patient after encapsulated islet transplantation. *Lancet (London, England)*, 343(8903), 950-951.
- Sosulski, F., & Cadden, A. (1982). Composition and physiological properties of several sources of dietary fiber. *Journal of Food Science*, 47(5), 1472-1477.
- Stockwell, A., Davis, S., & Walker, S. (1986). In vitro evaluation of alginate gel systems as sustained release drug delivery systems. *Journal of Controlled Release*, 3(1-4), 167-175.
- Syverud, K., Pettersen, S. R., Draget, K., & Chinga-Carrasco, G. (2015). Controlling the elastic modulus of cellulose nanofibril hydrogels—scaffolds with potential in tissue engineering. *Cellulose*, 22(1), 473-481.
- Takahashi, M. (2005).  $\zeta$  potential of microbubbles in aqueous solutions: electrical properties of the gas-water interface. *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(46), 21858-21864.
- Tamagawa, H., Popovic, S., & Taya, M. (2000). Pores and diffusion characteristics of porous gels. *Polymer*, 41(19), 7201-7207.
- Temesgen, T., Bui, T. T., Han, M., Kim, T.-i., & Park, H. (2017). Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review. *Advances in colloid and interface science*, 246, 40-51.
- Tosh, S. M., & Yada, S. (2010). Dietary fibres in pulse seeds and fractions: Characterization,

- functional attributes, and applications. *Food Research International*, 43(2), 450-460.
- Trivedi, V., Ereifej, E. S., Doshi, A., Sehgal, P., VandeVord, P. J., & Basu, A. S. (2009). Microfluidic encapsulation of cells in alginate capsules for high throughput screening. 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,
- Trout, G. R., Chen, C., & Dale, S. (1990). Effect of calcium carbonate and sodium alginate on the textural characteristics, color and color stability of restructured pork chops. *Journal of Food Science*, 55(1), 38-42.
- Truong, V., Walter Jr, W., & Giesbrecht, F. (1995). Texturization of sweetpotato puree with alginate: effects of tetrasodium pyrophosphate and calcium sulfate. *Journal of Food Science*, 60(5), 1054-1059.
- Turgeon, S., Beaulieu, M., Schmitt, C., & Sanchez, C. (2003). Protein-polysaccharide interactions: phase-ordering kinetics, thermodynamic and structural aspects. *Current opinion in Colloid & interface Science*, 8(4-5), 401-414.
- Uchida, K., & Asai, I. (2008). Composition for preparing artificial fruit flesh and food product containing the same. In: Google Patents.
- Ushikubo, F. Y., Furukawa, T., Nakagawa, R., Enari, M., Makino, Y., Kawagoe, Y., Shiina, T., & Oshita, S. (2010). Evidence of the existence and the stability of nano-bubbles in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 361(1), 31-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.03.005>
- Usui, S., & Sasaki, H. (1978). Zeta potential measurements of bubbles in aqueous surfactant solutions. *Journal of colloid and interface science*, 65(1), 36-45.
- Utech, S., Prodanovic, R., Mao, A. S., Ostafe, R., Mooney, D. J., & Weitz, D. A. (2015). Microfluidic generation of monodisperse, structurally homogeneous alginate microgels for cell encapsulation and 3D cell culture. *Advanced healthcare materials*, 4(11), 1628-1633.
- Vandenberg, G., & De La Noue, J. (2001). Evaluation of protein release from chitosan-alginate microcapsules produced using External or internal gelation. *Journal of microencapsulation*, 18(4), 433-441.
- Wang, D., Yang, X., Tian, C., Lei, Z., Kobayashi, N., Kobayashi, M., Adachi, Y., Shimizu, K., & Zhang, Z. (2019). Characteristics of ultra-fine bubble water and its trials on enhanced



- methane production from waste activated sludge. *Bioresource Technology*, 273, 63-69.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.077>
- Wang, Y., Chen, H., Cui, L., Tu, C., & Yan, C. (2021). Toughen and Strengthen Alginate Fiber by Incorporation of Polyethylene Glycol Grafted Cellulose Nanocrystals.
- Xu, J., Li, S., Tan, J., & Luo, G. (2008). Controllable preparation of monodispersed calcium alginate microbeads in a novel microfluidic system. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry-Plant Equipment-Process Engineering-Biotechnology*, 31(8), 1223-1226.
- Xu, R. (2017). *Assessment of Physicochemical and Functional Properties of Fibre-rich Fractions of Yellow Pea and Red Lentil to Use in Low-fat Pork Bologna* University of Saskatchewan].
- Yalpani, M. (2013). *Polysaccharides: syntheses, modifications and structure/property relations*. Elsevier.
- Yu, L., Sun, Q., Hui, Y., Seth, A., Petrovsky, N., & Zhao, C.-X. (2019). Microfluidic formation of core-shell alginate microparticles for protein encapsulation and controlled release. *Journal of colloid and interface science*, 539, 497-503.
- Zhang, C., Grossier, R., Lacaria, L., Rico, F., Candoni, N., & Veessler, S. (2020). A microfluidic method generating monodispersed microparticles with controllable sizes and mechanical properties. *Chemical Engineering Science*, 211, 115322.
- Zhang, H., Tumarkin, E., Sullan, R. M., Walker, G., & Kumacheva, E. (2007). Exploring Microfluidic Routes to Microgels of Biological Polymers. *Macromolecular Rapid Communications*, 28, 527-538. <https://doi.org/10.1002/marc.200600776>
- Zinina, O., Merenkova, S., Tazeddinova, D., Rebezov, M., Stuart, M., Okusphanova, E., Yessimbekov, Z., & Baryshnikova, N. (2019). Enrichment of meat products with dietary fibers: a review.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวจันจิรา จิน โนรส
วัน เดือน ปี เกิด	20 พฤษภาคม พ.ศ.2530
สถานที่เกิด	จังหวัด จันทบุรี ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	2559-ศึกษาดูงานในระดับปริญญาเอก ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร) มหาวิทยาลัยศิลปากร 2555-สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร) มหาวิทยาลัยศิลปากร 2553-สำเร็จการศึกษาระดับ วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีอาหาร) เกียรตินิยมอันดับ 2 มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	109/40 ถนน ราชทัณฑ์ ซอย 7 ตำบล ในเมือง อำเภอ เมืองนครพนม จังหวัด นครพนม 48000
ผลงานตีพิมพ์	Janjira Jinnoros, Bhundit Innawong, Patchimaporn Udomkun, Pramuk Parakulsuksatid and Juan L. Silva. The Feasibility of Using Pulsed-Vacuum in Stimulating Calcium-Alginate Hydrogel Balls. Foods. 2021, 10, 1521.

