

การเตรียมเมล็ดไฮโดรเจลสำหรับบรรจุน้ำมันเมล็ดชา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Derivative of hydrogel beads for encapsulation Camellia Oleifera seed oil



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

Department of Chemical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมเมล็ดไฮโดรเจลสำหรับบรรจุน้ำมันเมล็ดชา
โดย	นายคุณานนต์ สุรัสวดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ชุตินันท์ สิริพิพัฒนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเทพ เขียวหอม)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ชุตินันท์ สิริพิพัฒนกุล)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พร พลเพชร)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีเมฆ ชาวโพงพาง)	

คุณานนต์ สุรัสวดี : การเตรียมเม็ดไฮโดรเจลสำหรับบรรจุน้ำมันเมล็ดชา. (Derivative of hydrogel beads for encapsulation Camellia Oleifera seed oil) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.ชุตินันท์ สกริพิพัฒน์กุล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมเม็ดปิดสไฮโดรเจลเพื่อเก็บกักน้ำมันเมล็ดชาด้วยอัลจินตและเพคตินด้วยเทคนิคการเกิดเจลแบบไอออนิก (ionic-gelation) ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนอัลจินตต่อเพคตินที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา อัตราส่วนที่เหมาะสมของอัลจินตและเพคตินที่มีค่า 0.5:2.0 มีประสิทธิภาพการกักเก็บอยู่ที่ $99.36 \pm 0.15\%$ ค่าความหนืดอยู่ที่ 0.833 cP ถึง 119.4 cP สามารถผลิตเม็ดปิดสทรงกลมและมีความเรียบเนียนขนาดเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 2.61 – 4.04 มิลลิเมตร สามารถรองรับแรงกดในช่วง 0.11 – 4.03 นิวตัน เมื่อนำตัวอย่างเม็ดปิดสมาทดสอบในผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจล, สารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5, น้ำมันขาวและในน้ำกลั่น พบว่ามีความคงตัวสูงและมีศักยภาพสำหรับการจัดเก็บน้ำมันเมล็ดชาเป็นเวลา 45 วัน ความสามารถการขยายตัวของเม็ดปิดสขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอัลจินตและเพคติน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินของเพคตินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชาสูงขึ้น และ FTIR spectroscopy ทำการยืนยันโครงสร้างภายในมีการขึ้นรูปและการเชื่อมขวางจากอัลจินตและเพคติน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6372013521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORD: Hydrogel beads Alginate Pectin Ionic gelation Camellia Oleifera
Khunanon Suraswadi : Derivative of hydrogel beads for encapsulation
Camellia Oleifera seed oil . Advisor: CHUTIMON SATIRAPIATHKUL, Ph.D.

The purpose of this research was to investigate the production of Camellia Oleifera oil-entrapped beads from alginate and pectin by ionic-gelation technique. The average viscosity of all beads ranged from 0.833 cP to 119.4 cP, enabling to produce 2.61 – 4.04 mm having spherical and smooth beads by Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM). The compressive strength of the beads ranged from 0.11 – 4.03 N. When beads samples were tested in pH buffer solution (5.5), mineral oil, deionized water, or hydrogel system, the beads possessed greater stability and potential for Camellia Oleifera oil storage for 45 days. The swelling ability of beads was dependent on the concentration of alginate and pectin. The more concentration increases of pectin, the higher encapsulated efficiency was obtained. The effects of sodium alginate (ALG) to pectin (P) ratio on the Camellia Oleifera oil entrapment efficiency and the characterization of the beads were investigated for the ALG : P optimal ratio that was 0.5:2.0, which has encapsulated efficiency at $99.36 \pm 0.15\%$. FTIR spectroscopy confirmed possible interactions between alginate and pectin during inter-penetrating network formation and crosslinking.

Field of Study: Chemical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีได้รับความอนุเคราะห์จากคณาจารย์หลายๆท่าน ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร.ชุตินันท์ สิริพิพัฒน์กุล ที่ได้มอบความรู้ คำปรึกษาและแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา เพิ่มเติมเนื้อหาและรายละเอียดของวิจัยให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุรเทพ เขียวหอม ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ คณะกรรมการสอบ ผศ.ดร.พิมพ์พร พลเพชร และ ผศ.ดร. ศรีเมฆ ชาวโพงพาง สำหรับข้อคิดเห็นในการทำวิจัย และตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาทันตวัสดุ คณะทันตแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุและนาโนเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คณาจารย์ทุกท่าน เพื่อนและน้องๆ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านความรู้วิชาการต่าง ๆ ให้การสนับสนุนและมอบกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์นี้ลุล่วงไปจนสำเร็จ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คุณานนต์ สุรัสวดี

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เพคติน.....	4
2.1.1 กลไกการเกิดเจลของเพคติน.....	5
2.1.2 เพคตินในเครื่องสำอาง.....	7
2.2 ไฮโดรเจล.....	7
2.2.1 วิธีการเชื่อมขวาง (Physical cross-links).....	8

2.2.1.1 การให้ความร้อนและทำให้เย็นลงของสารละลายพอลิเมอร์	8
2.2.1.2 แรงดึงดูดระหว่างพันธะไอออนิก (Ionic interaction).....	9
2.2.1.3 การแยกเฟสแบบ (Complex coacervation gels).....	9
2.2.1.4 พันธะของไฮโดรเจลและแรงดึงดูดระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrogel bonding and hydrophobic interaction)	10
2.2.2 การเติมสารเชื่อมขวาง (Chemical cross-links).....	10
2.3 เทคนิคการขึ้นเม็ดบีดส์	10
2.4 อิมัลชัน	12
2.5 น้ำมันเมล็ดชา	14
2.6 วัสดุเชิงประกอบชีวภาพ (Biomaterial) ที่สามารถนำมาผลิตไฮโดรเจล.....	15
2.6.1 อัลจิเนต.....	15
2.6.2 ไคโตซาน	18
2.7 ปัจจัยการเกิดโครงสร้าง Egg box model ของอัลจิเนตและเพคติน.....	19
2.7.1 ปัจจัยภายใน (Intrinsic factor)	19
2.7.1.1 น้ำหนักโมเลกุล	19
2.7.1.2 ร้อยละของกลูโรนิกและกาเลคทูโรนิก	19
2.7.1.3 ความยาวและการกระจายตัวของ Calcium binding blocks.....	19
2.7.1.4 ดีกรีและรูปแบบของเมทอกซิเลชัน.....	20
2.7.2 ปัจจัยภายนอก (Extrinsic factor)	20
2.7.2.1 ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทางชีวภาพ	20
2.7.2.2 ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน	20
2.7.2.3 การเติมแคลเซียมไอออน.....	20
2.7.2.4 ความแข็งแรงของไอออน.....	21
2.7.2.5 ค่า pH.....	21

2.7.2.6 อุณหภูมิ	21
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3	26
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	26
3.1.1 เครื่องมือ	26
3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องแก้ว	27
3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	28
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	28
3.2.1 การเตรียมสารละลายเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัลจิเนต (ALG) และเพคติน (P) ในการทำเม็ดปิดส์เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา	28
3.2.2 การศึกษาการเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in water emulsion) ที่บรรจุน้ำมัน เมล็ดชาที่ไม่ละลายน้ำ.....	29
3.2.3 การเตรียมขึ้นรูปเม็ดปิดส์ไฮโดรเจลระหว่างอัลจิเนตและเพคติน	30
3.2.4 การศึกษาคุณสมบัติของเม็ดปิดส์ไฮโดรเจลระหว่างอัลจิเนตและเพคติน.....	30
3.2.4.1 ศึกษาโครงสร้าง และลักษณะพื้นผิวของเม็ดปิดส์ในแต่ละอัตราส่วนด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มี สมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิชชัน	30
3.2.4.2 ศึกษาโครงสร้างของเม็ดปิดส์ไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)	30
3.2.4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของเม็ดปิดส์ไฮโดรเจลที่ทดสอบด้วยแรงกด (Compression test).....	30
3.2.4.4 ศึกษาความสามารถในการขยายตัวของเม็ดปิดส์ (Swelling test).....	31
3.2.4.5 ศึกษาประสิทธิภาพในการกักเก็บในน้ำมันเมล็ดชา (Encapsulation efficiency).....	31

บทที่ 4	32
ผลการดำเนินงานและการอภิปราย	32
4.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนอัลจิเนตและเพคตินในการขึ้นรูปเม็ดปิดสีไฮโดรเจลจากน้ำมันเมล็ดชา	32
4.2 การศึกษาการเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in water emulsion) ที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชาที่ไม่ละลายก่อนทำการขึ้นรูปเม็ดปิดสี	37
4.3 การศึกษาคุณสมบัติของเม็ดปิดสีไฮโดรเจลระหว่างอัลจิเนตและเพคตินที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชา ลักษณะทางกายภาพและขนาดเม็ดปิดสี	43
4.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบความแข็งแรงของเม็ดปิดสี	44
4.5 ศึกษาความสามารถในการคงตัวของเม็ดปิดสีไฮโดรเจล เพื่อเลือกตัวกลางที่เหมาะสมในการเก็บเม็ดปิดสีที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชา	48
4.6 การศึกษาความสามารถในการขยายตัวของเม็ดปิดสีในน้ำกลั่น และในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5.5	52
4.7 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดปิดสีด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM). 60	
4.8 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดปิดสีไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	61
4.9 ศึกษาความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา ในเม็ดปิดสีไฮโดรเจล (Encapsulation Efficiency)	65
บทที่ 5	67
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	67
5.1 สรุปผลการวิจัย	67
5.2 ข้อเสนอแนะ	68
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ความหนืดของเม็ดปิดสีไฮโดรเจลก่อนเติมน้ำมันเมล็ดชา	70
ภาคผนวก ข การประเมินขนาดของเม็ดปิดสีไฮโดรเจล	72
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ความสามารถในการขยายตัวในน้ำกลั่น	77

ภาคผนวก ง เเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการขยายตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5.....	78
ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ความสามารถในการเก็บน้ำมันเมล็ดชาในเม็ดปี้ดส์	79
ภาคผนวก ฉ การแสดงการวัดค่าการดูดกลืน.....	79
ภาคผนวก ช การวิเคราะห์หาความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา	80
บรรณานุกรม.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	87



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 เครื่องมือในงานวิจัย.....	26
ตารางที่ 2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
ตารางที่ 3 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัลจิเนตและเพคติน.....	29
ตารางที่ 4 ผลการศึกษาค่าความหนืดของอิมัลชันก่อนการขึ้นรูปเม็ดปิดสปีไฮโดรเจล.....	34
ตารางที่ 5 ดัชนีการประเมินการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ.....	35
ตารางที่ 6 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและผิวสัมผัส.....	35
ตารางที่ 7 แสดงลักษณะของอิมัลชันและเม็ดปิดสปีที่เตรียมจากสัดส่วนความเข้มข้นที่แตกต่างกันระหว่างอัลจิเนต (ALG) และเพคติน (P).....	40
ตารางที่ 8 ขนาดเฉลี่ยของเม็ดปิดสปีไฮโดรเจลที่เตรียมจากสัดส่วนต่างๆ.....	43
ตารางที่ 9 ความคงตัวของเม็ดปิดสปีกลุ่มที่ 1 ในตัวกลางชนิดต่างๆเป็นระยะเวลา 45 วัน.....	49
ตารางที่ 10 ความคงตัวของเม็ดปิดสปีกลุ่มที่ 2 ในตัวกลางชนิดต่างๆเป็นระยะเวลา 45 วัน.....	50
ตารางที่ 11 ความคงตัวของเม็ดปิดสปีกลุ่มที่ 3 ในตัวกลางชนิดต่างๆเป็นระยะเวลา 45 วัน.....	51
ตารางที่ 12 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดไฮโดรเจลของกลุ่มที่ 1 ด้วยเทคนิค FE-SEM.....	57
ตารางที่ 13 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดไฮโดรเจลของกลุ่มที่ 2 ด้วยเทคนิค FE-SEM.....	58
ตารางที่ 14 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดไฮโดรเจลของกลุ่มที่ 3 ด้วยเทคนิค FE-SEM.....	59
ตารางที่ 15 ความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชาของเม็ดปิดสปีที่เตรียมในแต่ละกลุ่ม.....	65

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ภาพแสดงโครงสร้างของเพคตินและส่วนประกอบมอนอแซคคาไรด์.....	4
รูปที่ 2 แสดงกลไกของการเกิดเจลเพคติน a) แสดงเพคตินที่มีระดับเมทอกซิลสูง b) แสดง egg-box ของเพคตินที่มีระดับเมทอกซิลต่ำ.....	6
รูปที่ 3 ภาพแสดงกระบวนการขยายตัวไฮโดรเจลในช่วง Equilibrium.....	8
รูปที่ 4 แสดงการเกิดเจลโดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของหมู่ไอออนิกบนอัลจินต (COO ⁻).....	9
รูปที่ 5 แสดงการเกิดแบบ Complex coacervation ระหว่างไอออนบวกและไอออนลบ.....	9
รูปที่ 6 ตัวอย่างของพันธะไฮโดรเจน บนไฮโดรเจล.....	10
รูปที่ 7 แสดงวิธีการขึ้นรูปเม็ดปิดสีในวิธีการที่ต่างกัน.....	12
รูปที่ 8 แสดงรูปกลไกของลักษณะความคงตัวของอิมัลชัน.....	13
รูปที่ 9 แสดงลักษณะต้นเมล็ดชาและผล (<i>Camellia oleifera</i> Abel.).....	14
รูปที่ 10 ภาพแสดงโครงสร้างอัลจินต ประกอบด้วย (β-D-mannuronate (M block) และแอลฟา แอลกลูคูโรนิกแอซิด (α-L-guluronate (G block).....	17
รูปที่ 11 ภาพจาก Microscope ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของอิมัลชัน เมื่อใช้อัลจินตและเพคติน สำหรับเก็บน้ำมันเมล็ดชา.....	37
รูปที่ 12 ภาพอัตราส่วนอัลจินตต่อเพคติน 0.25:2.0 (a), 0.5:2.0 (b), 1.0:2.0 (c).....	38
รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าความสามารถรับแรงกดสูงสุดของเม็ดปิดสีในกลุ่มที่ 1.....	45
รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าความสามารถรับแรงกดสูงสุดของเม็ดปิดสีในกลุ่มที่ 2.....	46
รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าความสามารถรับแรงกดสูงสุดของเม็ดปิดสีกลุ่มที่ 3.....	46
รูป 16 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบแรงกดสูงสุดของเม็ดปิดสีกลุ่มที่ 1, 2, 3.....	47
รูป 17 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบความเค้นของเม็ดปิดสีกลุ่มที่ 1, 2, 3.....	47
รูปที่ 18 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวเม็ดปิดสีกลุ่มที่ 1 ในน้ำปราศจากไอออน.....	53
รูปที่ 19 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวเม็ดปิดสีกลุ่มที่ 1 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.53	

รูปที่ 20 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 3 ในน้ำปราศจากไอออน.....	54
รูปที่ 21 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 2 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5	54
รูปที่ 22 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 3 ในน้ำปราศจากไอออน.....	55
รูปที่ 23 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 3 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5	55
รูปที่ 24 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 1,2,3 ในน้ำปราศจากไอออน.....	56
รูปที่ 25 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 1,2,3 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5.....	56
รูปที่ 26 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 0.25:0.5 กลุ่มที่ 1.....	62
รูปที่ 27 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 0.25:1.5 กลุ่มที่ 1.....	62
รูป 28 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 0.5:1.5 กลุ่มที่ 2.....	63
รูปที่ 29 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 0.5:1.5 กลุ่มที่ 2.....	63
รูปที่ 30 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 1.0:1.5 กลุ่มที่ 3.....	64
รูปที่ 31 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 1.0:1.5 กลุ่มที่ 3.....	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterials) ด้วยคุณสมบัติที่จำเพาะในการนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อ, กระบวนการรักษาบาดแผล, กระบวนการขนส่งยา และการพัฒนาการตรวจวัดทางชีวภาพ ซึ่งวัสดุทางชีวภาพมีหลายรูปแบบ เช่น ไฮโดรเจล, ฟิล์ม, อนุภาคนาโน, นาโนคอมโพสิต อย่างไรก็ตาม ไฮโดรเจลถือว่าได้รับความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากลักษณะที่เข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของวัสดุ (Biodegradability) คุณสมบัติที่เปียกนุ่ม (Soft-wet) มีความคล้ายคลึงกับเนื้อเยื่อธรรมชาติ (Biological tissue) ไฮโดรเจลมีโครงสร้างแบบ 3 มิติ (3D-Crosslinked polymeric) สามารถเก็บกักน้ำได้สูงและสามารถดูดซับปริมาณของเหลวได้ในปริมาณที่มาก ด้วยคุณสมบัติความอ่อนนุ่มตามธรรมชาติของไฮโดรเจล พบว่าสามารถรักษาความชุ่มชื้นรอบๆ ทำให้เกิดการระคายเคืองน้อยที่สุดต่อเนื้อเยื่อรอบๆ และยังกระตุ้นการเกิดเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ นอกจากนี้จุดเด่นของการเข้ากันได้ดีกับเนื้อเยื่อ ยังนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายและสามารถละลายได้มีบทบาทที่สำคัญในการขนส่งยา แม้ว่าจะมีจุดแข็งแต่ก็มีข้อจำกัดในคุณสมบัติเชิงกลที่ไม่แข็งแรง ความไวต่อน้ำ ขึ้นอยู่กับการศึกษาในการเพิ่มคุณสมบัติดังกล่าวด้วยการทดลองใช้แต่ละสัดส่วนนำมาทดลองผสมกัน ไบโอฟิลิเมอร์ถูกสร้างขึ้นโดยการรวมตัวของมอนอเมอร์โดยพันธะโควาเลนต์บอนด์เพื่อให้เป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น แบ่งเป็น 3 แบบ คือ พอลิโนคลิกโอไทด์ พอลิเปปไทด์ และพอลิแซคคาไรด์ พอลิแซคคาไรด์จะเป็นคาร์โบไฮเดรตแบบเส้นตรงหรือตาข่ายจากการรวมกันของมอนอแซคคาไรด์ด้วยไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) เช่น เซลลูโลส ไคโตซาน อัลจิเนตและเพคติน เพคตินเป็นเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ประจุลบที่ละลายน้ำมาจากผนังเซลล์ เช่น จากพวกผลไม้ตระกูลส้ม โดยถูกสกัดออกมาด้วยวิธีเอนไซม์เมติกหรือทางเคมี เพคตินสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างทางชีวภาพ ตัวอย่างเช่น การรักษาบาดแผล การขนส่งยา วิศวกรรมเนื้อเยื่อ การทาแผลเนื่องด้วยปลอดภัยจากสารพิษ ราคาต้นทุนต่ำ ต่อต้านเชื้อแบคทีเรีย และต้านการอักเสบ นอกจากนี้ การเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ดี การย่อยสลายทางชีวภาพ การเกิดเจลของพอลิเมอร์บางประเภทที่มีคุณสมบัติที่ดีในคุณสมบัติดังกล่าว เช่น อัลจิเนต เพคติน ทำให้เกิดการเชื่อมขวางกับแคลเซียมไอออนซึ่งเกิดโครงสร้างที่เรียกว่า “egg box” ซึ่งจะเกิดคุณสมบัติที่แข็งแรงในการนำไปประยุกต์ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้ [1]

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการสังเคราะห์เม็ดปิดสีไฮโดรเจลเพื่อเก็บกักน้ำมันเมล็ดชาด้วยการผสมโครงสร้างที่นำมาหล่อทำจากอัลจิเนตและเพคติน น้ำมันเมล็ดชา (*Camellia Oleifera*) มีสารอาหารที่สูงมากและประโยชน์ต่อสุขภาพจากกรดไขมันไม่อิ่มตัว ป้องกันโรคความดัน คลอเรสเตอรอล โรคหัวใจและมะเร็ง เนื่องจากมีสารต้านอนุมูลอิสระในปริมาณที่สูง น้ำมันเมล็ดชายังประกอบ ด้วยเบต้าแคโรทีน (β -carotene) วิตามินอี ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ธรรมชาติที่ช่วยยับยั้งการเกิดออกซิเดชันในน้ำมัน ทำให้น้ำมันมีความคงตัว สามารถเก็บได้ดีที่อุณหภูมิห้อง และเก็บได้นาน โดยไม่ต้องเติมสารกันหืน น้ำมันเมล็ดชาเหมาะสำหรับการนำมาทำเป็นเครื่องสำอางประเภทมอยชเจอไรเซอร์สำหรับบำรุงผิวหนังเพื่อลดการชลอวัย ยังอุดมไปด้วยวิตามิน เอ บี และอี ไม่มีไขมันทรานส์ แร่ธาตุต่างๆ เช่น ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก เซเรเนียม ซิงค์ เป็นต้น [2] แต่น้ำมันเมล็ดชาประกอบด้วยไขมันไม่อิ่มตัวที่มีปริมาณสูงและตัวยาสำคัญ ไม่เสถียรในช่วงการผลิต การเก็บกัก และการนำไปใช้งาน การใช้โครงสร้างอัลจิเนตและเพคตินในการช่วยเสริมความแข็งแรงเชิงกลในการหล่อในรูปแบบไฮโดรเจลปิดสี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมเม็ดปิดจากอัลจิเนตและเพคตินในการเก็บกักน้ำมันเมล็ดชา
- 1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเตรียมและความคงตัวของเม็ดปิดสี

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการเตรียมเม็ดปิดสีไฮโดรเจลที่ได้จากอัลจิเนตและเพคตินเพื่อกักเก็บน้ำมันเมล็ดชาและช่วยป้องกันไม่ให้น้ำมันสกัดถูกทำลายจนกว่าผลิตภัณฑ์จะถูกส่งไปยังตำแหน่งที่ต้องการดูดซึม
- 1.3.2 การศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขึ้นรูปเม็ดปิดสีไฮโดรเจลระหว่างอัลจิเนตและเพคตินซึ่งบรรจุสารออกฤทธิ์ที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ อัตราส่วนปริมาณระหว่างอัลจิเนตและเพคตินและความเข้มข้นของอัลจิเนตและเพคติน (อัตราส่วนร้อยละโดยน้ำหนัก 0.25:0.25, 0.25:0.5, 0.25:1.0, 0.25:1.5, 0.25:2.0, 0.5:0.25, 0.5:0.5, 0.5:1.0, 0.5:1.5, 0.5:2.0, 1.0:0.25, 1.0:0.5, 1.0:1.0, 1.0:1.5 และ 1.0:2.0)
- 1.3.3 การศึกษารูปร่างของเม็ดไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Field emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) เพื่อศึกษาสัญญาณภาพตัดของไฮโดรเจลที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น
- 1.3.4 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดปิดสีไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
- 1.3.5 สมบัติเชิงกลของเม็ดปิดสีไฮโดรเจลที่ทดสอบด้วยแรงกด (Compression test)

1.3.6 ความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจล (Swelling test)

1.3.7 ความสามารถในการเก็บกักสารออกฤทธิ์ของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจล (Encapsulation efficiency)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้พัฒนาการสังเคราะห์เม็ดบีดส์ที่มีคุณสมบัติทางชีวภาพที่ดี

1.4.2 ได้ข้อมูลเกี่ยวกับระบบกักเก็บสารออกฤทธิ์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางอย่างมีประสิทธิภาพ

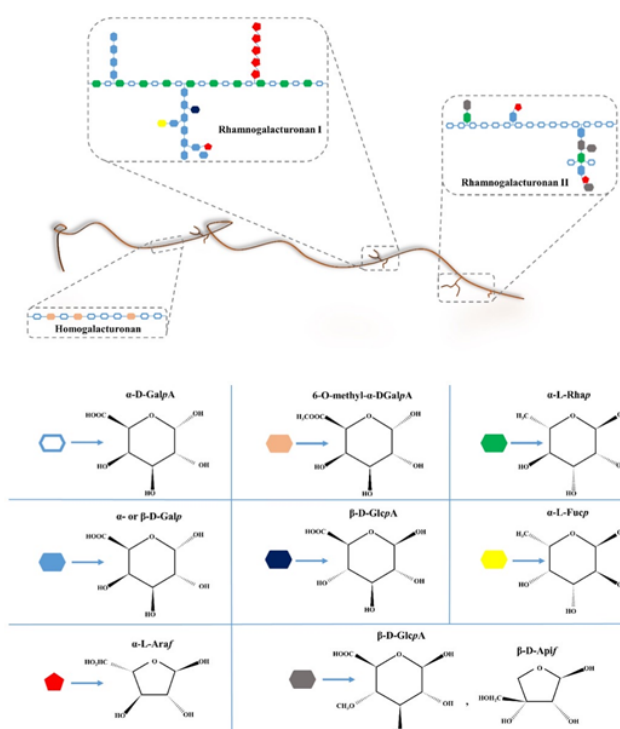


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เพคติน

เพคตินสามารถถูกนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร การเกษตร การแพทย์ เพคตินมีโครงสร้างที่ก่อให้เกิดคุณสมบัติของเจล เพคตินยังเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สามารถละลายในน้ำและปรับปรุงโครงสร้างเซลล์ มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ตัวอย่างเช่น สารเคลือบผิวบนผักและผลไม้ เพื่อเพิ่มความสด फिल्मสำหรับยาต้านจุลชีพ ยังมีประโยชน์อีกหลายด้านในการนำไปใช้งานสำหรับไฮโดรเจล फिल्म อนุภาคนาโน โครงสร้างเชิงเซลล์กระดูก (scaffold) โดยมีส่วนประกอบของมอนอแซ็กคาไรด์ ที่เป็นโซ่กิ่ง การเกิดพอลิเมอร์ตามธรรมชาติของเพคตินนั้น ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของเพคตินและค่าร้อยละปริมาณเมทอกซิลและเอทิลเอสเทอร์รีฟิเคชัน (Degree of esterification; DE) และแหล่งและสภาวะของการสกัดเพคติน เพคตินจะประกอบด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วน คือ แรมโนกาแลคทูโรแนน I (Rhamnogalacturonan-I; RG-I) แรมโนกาแลคทูโรแนน II (Rhamnogalacturonan-II; RG-II) และโฮโมกาแลคทูโรแนน (Homogalacturonan; HGA) ซึ่งเป็นส่วนหลักของเพคติน ซึ่งมีหน่วยย่อยเป็น α -(1-4)-D เชื่อมกับกรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acids; 1,4- α -D-GalpA) [3]



รูปที่ 1 ภาพแสดงโครงสร้างของเพคตินและส่วนประกอบมอนอแซ็กคาไรด์

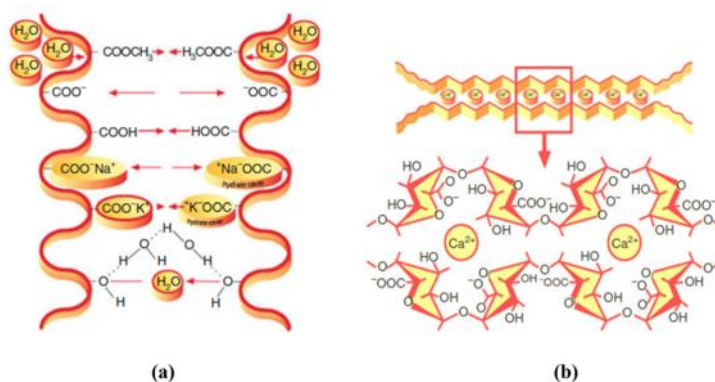
- 1) เพคตินที่มีปริมาณเมทอกซิลสูง (high methoxyl pectin; HM) สามารถเกิดเจลได้ เมื่อมีของแข็งที่ละลายได้ด้วยน้ำและในภาวะที่มีน้ำตาล ซึ่งมีระดับเอสเธอริฟิเคชันสูงกว่า 50 จับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน
- 2) เพคตินที่มีปริมาณเมทอกซิลต่ำ (low methoxyl pectin; LM) สามารถเกิดเจลได้ โดยต้องมีไอออนของโลหะ ซึ่งมีค่า pH อยู่ที่ระหว่าง 2.0 – 6.0 ซึ่งมีระดับเอสเธอริฟิเคชันต่ำกว่า 50 โดยการเกิดเจลเป็นแบบ Egg box model โครงสร้างจะมีประจุแคลเซียมไอออนบริเวณ Junction zone ระหว่างไฮโมกาแลคทูโรนิก เป็นส่วนเริ่มต้นที่มีความแข็งแรงของพอลิเมอร์ 2 เส้น ซึ่งความสามารถการเกิดเจลตัว LM เพิ่มขึ้นด้วยการลดลงของเมทอกซิลเลชัน [4]

2.1.1 กลไกการเกิดเจลของเพคติน

ไฮโดรเจลถูกสร้างขึ้นจากการเชื่อมกันโดยสายโซ่ที่ติดกันของเพคตินโมเลกุลผ่าน Junction Zone ทำให้เกิดเส้นใยที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งพอลิเมอร์แต่ละคู่หรือมากกว่าสองที่มารวมกันจะถูกยึดด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลุ่มคาร์บอกซิลและกลุ่มที่สองของแอลกอฮอล์ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะทำปฏิกิริยาระหว่างเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เกิดขึ้นจากเมทอกซิลเอสเทอร์ (Methoxyl ester) แบบไม่มีขั้วในสายพอลิเมอร์ของเพคติน Junction zone ถูกทำให้คงที่ด้วยการจากพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลมากกว่า 2 ขึ้นไปด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลและในตำแหน่งที่ 2 ของหมู่แอลกอฮอล์ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของหมู่เอสเทอร์

- 1) กลไกการเกิด Cold gelation ของ High-methoxyl pectin มีกระบวนการ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกเป็นการใช้อุณหภูมิที่สูงเกิน 50 °C เพื่อให้เกิดการแขวนลอยและการละลายของเพคตินในน้ำ เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) ถูกสร้างขึ้นระหว่างหมู่เมทอกซิลหรือหมู่เอสเทอร์ที่ไม่มีขั้วในสายโซ่ของเพคติน ในบริเวณ Junction zone นั้นถูกยึดด้วยพันธะไฮโดรเจน แต่การไม่เข้ากันระหว่างน้ำและหมู่เมทอกซิลทำให้ไม่สามารถรวมตัวกันได้ อย่างไรก็ตามการยึดกันและเกิดเจลจะเกิดขึ้นหลังจากช่วงที่มีการเย็นตัวลงและแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำจะจับกันอย่างหลวมๆ จะถูกแทนที่ด้วยพันธะไฮโดรเจนแทนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลที่ชอบน้ำบนสายโซ่เพคติน และระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับโมเลกุลข้างๆ กลไกการเกิด Cold gelation ของ High methoxyl pectin จะเกิดที่ค่าความเป็นกรดและในปริมาณ น้ำที่น้อยสภาพแวดล้อมที่มีความเป็นกรดต่ำการขึ้นรูปจะไม่มี การเชื่อมโยงกับหมู่คาร์บอกซิลและทำให้เกิดการฟอร์มพันธะไฮโดรเจน ก่อนที่จะมีการเพิ่มกรดที่สารละลายเพคติน อาจจะต้องทำให้เป็นกลางหรือกรดอ่อน ด้วยการเติมกรดไอออนคาร์บอกซิลถูกเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิลที่ไม่มีประจุ ตัวเลขประจุลบถูกลด ปริมาณระดับน้ำตาลจะต้องมากกว่า 50% (55% - 75%)

ช่วยทำให้เกิดการคงตัวบริเวณ Junction zone และส่งเสริมแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำ ปริมาณน้ำตาลลดการสูญเสียน้ำของเพคติน



รูปที่ 2 แสดงกลไกของการเกิดเจลเพคติน a) แสดงเพคตินที่มีระดับเมทอกซิลสูง b) แสดง egg-box ของเพคตินที่มีระดับเมทอกซิลต่ำ

- 2) กลไกการเกิดไอออนโทรอปิกเจลเลชัน (Ionotropic gelation) ของเมทอกซิลระดับต่ำ Low-methoxyl pectin เกิดขึ้นเพียงขั้นตอนเดียว Ionotropic gelation โดยปกติกลไกนี้เกี่ยวข้องกับกลไกของประจุบวก ส่วนใหญ่จะเป็น Ca^{2+} ของส่วนที่เป็นประจุลบของหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COO}^-$) ไอออนที่มีวาเลนซ์สองบวกของโลหะจะนำไปสู่การเกิดแรงดึงดูดระหว่างคู่พอลิไอออนลบและไอออนบวกของหมู่คาร์บอกซิลบนเกลียวที่ติดกันของสายโซ่โพลีเพคติน ปรากฏการณ์นี้ถูกอธิบายด้วย “egg box model” หมายถึง โครงสร้างของ Junction zone ที่ถูกสร้างโดยแคลเซียมที่อยู่ระหว่างสายโซ่ของโฮโมกาแลคทูโรไนด์ (Homogalacturonide) สะพานแคลเซียมเกิดจากการสลายตัวของหมู่คาร์บอกซิล ซึ่ง pH ในช่วงการเกิดเจลของ LMP ต้องมากกว่าค่า pKa ของเพคติน การเกิดสะพานของแคลเซียมต้องมีปริมาณการเชื่อมของหมู่คาร์บอกซิล หลังจากที่สายโซ่เพคตินทำการเชื่อมแคลเซียม ไอออนตัวแรกจะเปิดทางให้ง่ายขึ้นสำหรับตัวอื่นและเกิดเรียงมาตามลำดับ จะเป็นการเสริมการเชื่อมให้ที่ง่ายขึ้นสำหรับแคลเซียมไอออนถัดไป ไดเมอร์แรกจะมีความแข็งแรงด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์และพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดความแข็งแรงด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์และพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic) [5]

2.1.2 เพคตินในเครื่องสำอาง

ลักษณะที่โดดเด่นของการเกิดเจลของเพคติน การเข้ากันได้ดี ไม่เป็นพิษ และการย่อยสลายได้ จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์สุขภาพ เพคตินยังเป็นตัวสารเพิ่มความคงตัวในอิมัลชันในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง จึงมีการนำไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ครีมทาผิว ครีมบำรุงเส้นผม ยาสระผม เครื่องสำอางที่ใช้ในการทำความสะอาด เป็นต้น ความหนืด การดูดซับมอยซ์เจอร์ เอสเทอร์ริฟิเคชัน อิมัลซิฟิเคชัน เจลเลชัน เป็นคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์อย่างมากในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง การกักเก็บระดับไมครอน (microencapsulation) ของลิโปฟิลิก (lipophilic) คือการขึ้นรูปของเหลวที่ห่อหุ้มด้วยของแข็งเพื่อนำส่งและเสริมความคงตัว รวมไปถึงการเก็บรักษาก่อนนำไปปลดปล่อย ในการทำงานของไมโครแคปซูลของเจลเครื่องสำอางเป็นพื้นฐานในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อกระตุ้นการทำงานให้มีความคงตัวขณะที่มีการเก็บรักษา การผสมกันระหว่างอัลจินตและเพคตินในอัตราส่วนที่ 5:1.5 ไมโครสเฟียร์ค่อนข้างเหมาะสมในการเป็นตัวพื้นฐานของเจล ไมโครสเฟียร์สามารถถูกเติมด้วยวิตามินอี สารต่อต้านอนุมูลอิสระเข้าไปหรือกลั่นเพื่อจะทำให้เกิดความคงตัวที่เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เพคตินสามารถนำไปใช้ในโลชั่นและครีมบำรุงผิวโดยปราศจากสารคงตัว (Surfactant) ซึ่งผลไม้ตระกูลส้มที่มีค่าเมทอกซิลสูงหรือแอปเปิ้ลเพคตินสามารถทดแทนสารไฮโดรคอลลอยด์หรืออิมัลซิไฟเออร์ในบางส่วนหรือทั้งหมดได้ เพคตินที่ละลายน้ำได้ขึ้นอยู่กับความยาวสายโซ่ที่มีผลต่อความเรียบ ถ้าเป็นอนุภาคที่เปียกให้ครีมเนื้อสัมผัสคล้ายไขมัน ขณะที่รูปแบบคลอเรสเตอร์อลอิสระ (Un-esterified form) เมื่อถูกทำเป็นผลิตภัณฑ์ครีม ผิวจะถูกปกป้องจากผลกระทบการจากแสงแดดยูวี ส่วนเจลจะมีความเกาะกันแน่นทางชีวภาพทำให้ไปในงานผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับผิว [6]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2 ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติทางธรรมชาติหรือวัสดุพอลิเมอร์ที่ถูกสังเคราะห์ ด้วยคุณสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงสามารถดูดน้ำได้ในปริมาณที่มากถึง 99% สามารถคงรูป 3 มิติ การนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์จำเป็นต้องออกแบบให้เหมาะสมเพื่อให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่แข็งแรง เช่น ในกระบวนการนำส่งยา (Drug delivery) และวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue engineering) ด้วยคุณสมบัติที่โดดเด่นทางลักษณะกายภาพ เคมี และชีวภาพ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่สูง ไฮโดรเจลสามารถเป็นวัสดุทางชีวภาพในด้านชีวการแพทย์ได้ดี การนำไปประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทั้งทางการแพทย์ ผลิตภัณฑ์ นำส่งทางพันธุกรรม สเต็มเซลล์ และงานวิจัยด้านมะเร็ง เป็นต้น

ความสามารถในการขยายตัว (Swelling behavior) ของไฮโดรเจลที่จะกักเก็บของเหลวเพื่อดูดซับไว้ในโครงร่างตาข่าย โดยประเมินจากรูปแบบที่แห้งก่อนนำไปแช่ เริ่มต้นจะมีการละลายของ

โมเลกุลที่จะชนกับผิวและทะลุผ่านตะขாயทำให้เกิดการขยายตัว หมู่ที่ชอบน้ำของไฮโดรเจลมีการขยายตัวในน้ำและเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันระหว่างน้ำและพอลิเมอร์ เกิดขึ้นทั้ง 3 แรง คือ จะเกิดแรงออสโมซิส แรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic) และแรงดึงดูดโมเลกุลของน้ำหรือ การละลายของไฮโดรเจลถูกป้องกันด้วยแรงยืดหยุ่น (elastic force) เกิดขึ้นจากการ Cross-link ของแรงทั้งสามทำให้เกิดการเข้าสู่จุดสมดุล (equilibrium) [7]

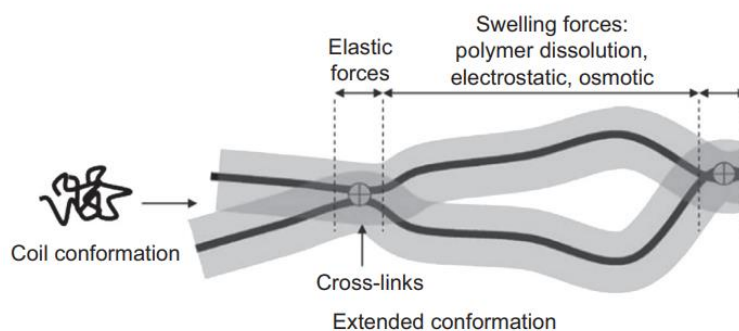


Figure 10.4 Equilibrium forces in the swelling process.

รูปที่ 3 ภาพแสดงกระบวนการขยายตัวไฮโดรเจลในช่วง Equilibrium

Gelation (การเกิดเจล) เกิดได้ 2 วิธี คือทางกายภาพและทางเคมี

2.2.1 วิธีการเชื่อมขวาง (Physical cross-links) หรือที่ถูกรเรียกว่าแบบผันกลับได้ (Reversible) เมื่อตาข่ายเกิดการรวมกันโดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ซึ่งจะมีการจับโดยด้วยพันธะไฮออนิก พันธะไฮโดรเจนหรือแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของส่วนที่ไม่ชอบน้ำหรือแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลข้างต้นรวมกัน โดยปราศจากการใช้สารเคมีหรือสารตั้งต้น แต่โครงสร้างเชิงกลจะมีข้อจำกัดในเรื่องของความแข็งแรง

2.2.1.1 การให้ความร้อนและทำให้เย็นลงของสารละลายพอลิเมอร์

การเชื่อมขวางทางกายภาพทำให้เกิดเจลเมื่อให้ความร้อนกับคาร์ราจินแนนหรือเจลาตินถูกเย็นลง เมื่อมีจุดเปลี่ยน (Transition point) เมื่อมีการเย็นตัวลงจะเปลี่ยนรูปแบบเป็นลักษณะขด (helical rod) และเกิดเป็นเกลือในรูปไอออน (Na^+ , K^+) และหมู่ซัลโฟนิค (SO^{3-}) เป็นตัวม้วนเกลียวคู่รวมกันทำให้เกิดเจลที่มีความเสถียรภาพ

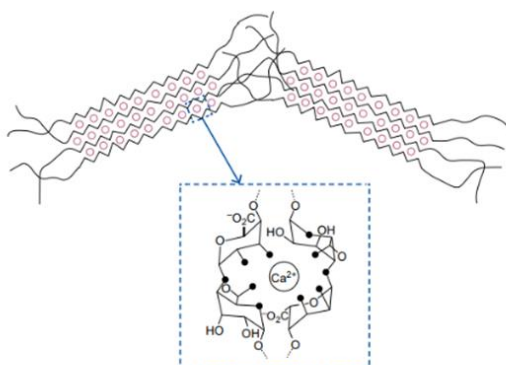


Figure 10.10 Ionotropic gelation by interaction between anionic groups on alginate (COO^-) with divalent metal ions (Ca^{2+}) (Gulrez and Al-Assaf, 2011).

รูปที่ 4 แสดงการเกิดเจลโดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของหมู่ไอออนิกบนอัลจิเนต (COO^-)

2.2.1.2 แรงดึงดูดระหว่างพันธะไอออนิก (Ionic interaction)

ไอออนิกพอลิเมอร์สามารถถูกเชื่อมขวางโดยการเติมไอออนของการเติมเคาน์เตอร์ไอออน (counter ion) คือ ไอออนที่อยู่นอกโคออดิเนชันเสฟิียร์ ทำหน้าที่ดุลประจุให้สารประกอบ ที่มีประจุสองหรือสาม (di, trivalent counterions) วิธีการนี้ทำให้เกิดเจลพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าได้เมื่ออยู่ในสถานะสารละลาย (Polyelectrolyte solution) เช่น โซเดียมอัลจิเนต (Na^+ alginate) โดยใช้ไอออนที่มีวาเลนซ์ตั้งแต่สองขึ้นไป (Multivalent ion) ด้วยประจุตรงกันข้าม เช่น แคลเซียมไอออนหรือคลอไรด์ไอออน (Ca^{2+} , 2Cl^-) อัลจิเนตเป็นพอลิแซคคาไรด์ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติในสาหร่ายสีน้ำตาล แคลเซียมไอออนสามารถเกิดการเชื่อมขวางจากอัลจิเนต เพราะสามารถสร้างพันธะได้ 2 คู่หรือแบบมอนอวาเลนต์ไอออน (monovalent ion) เช่น โซเดียมสามารถสร้างพันธะได้ 1 คู่ และส่วนยาวขึ้นของอัลจิเนตสามารถเชื่อมต่อกับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งทำให้เกิดความแข็งแรงของการเชื่อมขวางที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมไอออน

2.2.1.3 การแยกเฟสแบบ (Complex coacervation gels)

สามารถสร้างโดยการผสมพอลิเมอร์ที่เป็นแอนไอออนิกมาเชื่อมขวางกับพอลิเมอร์ที่เป็นแคทไอออนิก พอลิเมอร์ที่นำมาใช้ต้องเป็นพอลิเมอร์ที่ตรงข้ามกันจะยึดติดกันและกลายเป็นสารละลายเชิงซ้อน ซึ่งการเตรียมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและค่า pH ของสารละลายที่เติมตามลำดับ

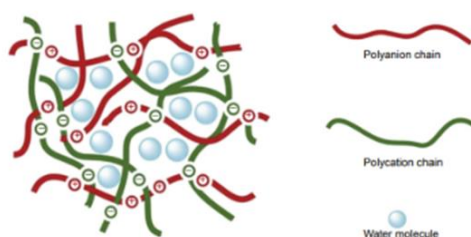
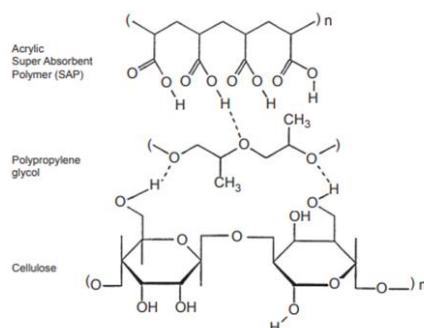


Figure 10.11 Complex coacervation between polyanion and polycation (Priftis and Tirrell, 2012).

รูปที่ 5 แสดงการเกิดแบบ Complex coacervation ระหว่างไอออนบวกและไอออนลบ



รูปที่ 6 ตัวอย่างของพันธะไฮโดรเจน บนไฮโดรเจล

2.2.1.4 พันธะของไฮโดรเจลและแรงดึงดูดระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrogel bonding and hydrophobic interaction)

อาศัยการสร้างพันธะ ไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล โดยการลดค่า pH ของสารละลายในพอลิเมอร์ในหมู่คาร์บอกซิล เพื่อให้สารละลายมีความเป็นกรด และถ่ายโอนประจุของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) โมเลกุลของคาร์บอกซิลิกจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกด้วยกัน ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง แล้วเกิดเป็นเจลในที่สุด

2.2.2 การเติมสารเชื่อมขวาง (Chemical cross-links)

ไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมต่อของสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ในสภาวะที่เป็นสารละลายหรือแห้ง อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างสายพอลิเมอร์ มีด้วยกันหลายวิธี การเชื่อมขวางผ่านการเกิดปฏิกิริยาเรดิคัลพอลิเมอไรเซชัน (Radical polymerization) สังเคราะห์โดยพอลิเมอร์ควบแน่น (Polymer condensation) เป็นต้น [8]

2.3 เทคนิคการขึ้นเม็ดปิดส์

เจลปิดส์มีการปรับปรุงทางด้านโครงสร้างในปัจจุบัน เพื่อให้มีการกักเก็บและการนำส่ง วิธีการในกักเก็บสารออกฤทธิ์ของเม็ดปิดส์ ซึ่งต้องคำนึงขนาด การปลดปล่อย การนำไปใช้งาน วิธีการจึงจำเป็นต้องแม่นยำในการพิจารณาประสิทธิภาพให้เหมาะสม

2.3.1 วิธีแบบ Extrusion เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันมากคือ การหยดหรือการอัดผ่าน (extrusion) ขนาดของเม็ดปิดส์มากกว่า 1.0 mm. สามารถเตรียมจากไซลิงค์ เข้มหรือปิเปต แม้ว่าวิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดแต่ขนาดอนุภาคเจลค่อนข้างใหญ่ ยากต่อการทำ Scale-up นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องค่าความหนืดที่ต่ำ เนื่องจากความยากของการดูดและการอุดตันของเข็มขนาดอนุภาคจำเป็นที่จะต้องนำไปใส่ในอ่าง (Gelling bath) เป็นระยะเวลาสั้น ซึ่งทำให้การแพร่ของประจุบวกไปอยู่ด้านในของตัวหยด (Droplet) อย่างไรก็ตามวิธีการ Extrusion

ทำให้ได้อนุภาคขนาดใหญ่ที่มีรูพรุน ก็จะมีข้อจำกัดในการควบคุมการปลดปล่อยและความคงตัวในอุตสาหกรรม ข้อดีคือ ความกลมของเม็ดบีดส์ โดยเฉพาะวิธีการไอออนิกเจลเลชัน (Inotropic gelation) ที่ใช้สำหรับทำแผ่นมาสก์จากวัสดุทางชีวภาพ (Masking biomaterials) สามารถทำได้ตั้งแต่อนุภาคขนาดไมโครถึงนาโน

- 2.3.2 วิธีการพ่นฝอยอบแห้ง (Spray drying) ใช้มากสำหรับส่วนประกอบที่ต้องการกักเก็บกลิ่น ใช้สร้างเม็ดบีดส์ตั้งแต่อนุภาคไมโครถึงนาโน หลักการคือเติมน้ำเข้าไปให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน สารผสมจะเข้าไปที่ Spray dryer และหัวฉีดจะทำการกระจายให้แตกตัวเป็นละออง น้ำจะเกิดการระเหยจากกาผสมโดยผ่านน้ำร้อน จากนั้นเม็ดบีดส์ถูกรวมกันในรูปแบบผงจากกันไปที่ Dryer ราคาต้นทุนค่อนข้างต่ำ แต่วิธีการนี้ไม่เหมาะกับวัสดุที่ต้องใช้ความร้อน เช่น โพรไบโอติก (probiotic)
- 2.3.3 วิธีการอบแช่แข็ง (Freeze drying) เทคนิคการทำแห้งด้วยการแช่แข็ง มี 4 ขั้นตอน การแช่แข็ง การทำให้แห้งครั้งแรก การทำให้แห้งรอบที่สองและการบำบัด การควบคุมภายใต้สุญญากาศ การขาดอากาศไม่สามารถทำให้ตัวที่ขอบอากาศสลายตัวได้ การทำให้แห้งจะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิห้อง ส่วนประกอบบางประเภทไวต่อความร้อนและการออกซิเดชัน เช่น น้ำหอม สามารถทำให้แห้งด้วยสุญญากาศ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและกายภาพเพียงเล็กน้อย ข้อเสียใช้เวลานาน
- 2.3.4 วิธีอิมัลซิฟิเคชัน (Emulsification) เป็นการทำการเก็บกักส่วนผสมที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ อิมัลชันถูกใช้เป็นส่วนประกอบที่มีสารละลายไขมันเป็นส่วนแกนของเม็ดบีดส์ (core beads) โดยการใช้พลังงานต่ำและสูงเพื่อให้เกิดอิมัลซิฟิเคชัน ส่วนที่มีพลังงานสูงจำเป็นต้องใช้แรงเฉือนที่สูง เช่น homogenizer, ultrasonicator, microfluidizer, film homogenizer, microchannel homogenizer กระบวนการอิมัลซิฟิเคชัน สามารถกักเก็บภายในไฮโดรเจลบีดส์ได้หลายตัว
- 2.3.5 วิธีโคอะเซอร์เวชันเชิงซ้อน (Complex coacervation) เป็นวิธีการแบบง่ายๆ สำหรับการผลิตในรูปแบบการเก็บกักขนาดอนุภาคไมโครหรือนาโน ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับในอุตสาหกรรมยาและอาหาร วิธีการรวมตัวกันต้องใช้ต้นทุนค่อนข้างสูง มีข้อจำกัดสภาพการคงตัวในสารละลายหลายตัว ยากที่จะควบคุมขนาดอนุภาคและป้องกันการรวมตัวกัน complex coacervation ถูกจำกัดโดยค่า pH ที่แคบ ความแข็งแรงของพันธะไอออนิก และอุณหภูมิ นอกจากนี้สภาวะที่เหมาะสม
- 2.3.6 วิธีลิโปโซม (Liposome) เป็นถุงเล็กๆที่มีเยื่อหุ้มลิพิด 2 ชั้นบรรจุนำพาโมเลกุลเข้าสู่ร่างกาย ค่อนข้างให้ความตึงที่คงที่ในการหยดน้ำมันลงในน้ำ มีโครงสร้างที่ป้องกันสภาวะที่มีการย่อยทำให้เหมาะในการนำไปใช้งานสำหรับอุตสาหกรรมอาหารและเภสัชกรรม เช่น การเก็บกัก

น้ำมันใบหอมแขก การเตรียมด้วยวิธีนี้สามารถช่วยในการต้านแบคทีเรีย หรือการเก็บกักวิตามินดี [9]

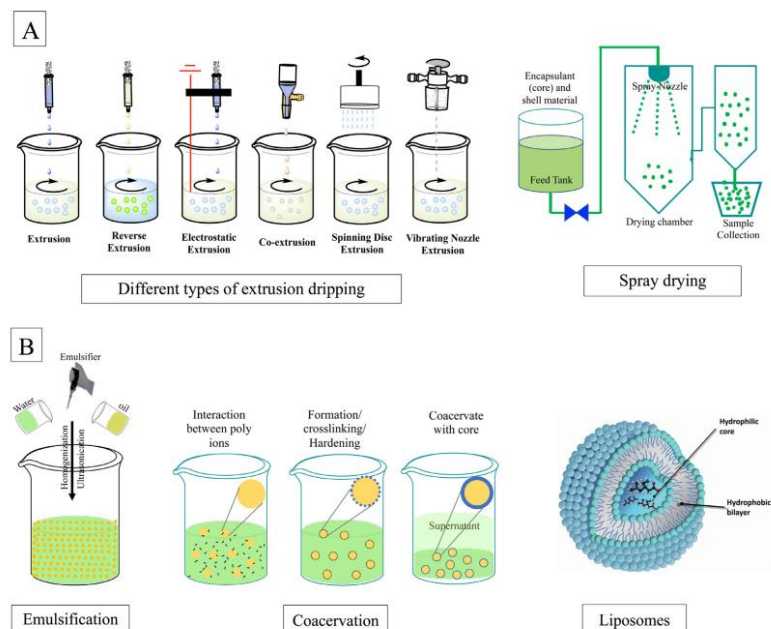


Fig. 1. Different methods for producing beads. (A) Techniques for fabricating gel beads (B) Techniques for incorporating bioactives in beads. The figure of liposome was adapted from (Ioelle, De Luca, Garofalo, & Ragno, 2017) with permission.

รูปที่ 7 แสดงวิธีการขึ้นรูปเม็ดปิดสีในวิธีการที่แตกต่างกัน

2.4 อิมัลชัน

อิมัลชัน ตามระบบ IUPAC คือ ระบบหนึ่งที่ของเหลวเป็นทั้งอนุภาคคอลลอยด์และตัวกลาง กล่าวอีกนัยคือ ของเหลวชนิดหนึ่งกระจายตัวอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ส่วนหรือปเล็ก (droplet) เป็นของเหลวที่กระจายตัวเป็นหยดเล็ก ซึ่งเป็นส่วนที่กระจายตัวหรือวัฏภาคภายใน (dispersed phase) แทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดซึ่งเป็นส่วนหรือวัฏภาคภายนอก (continuous phase) ของเหลวทั้งสองชนิดนี้ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันและไม่ละลายเข้าด้วยกัน การไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ต้องใช้สารอิมัลซิไฟเออร์หรือสารเพิ่มความข้นหนืด เพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคคอลลอยด์ส่วนที่กระจายตัวรวมตัวกันสามารถกระจายในส่วนวัฏภาคภายนอกได้ เป็นการเพิ่มความความคงตัวให้ระบบอิมัลชัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. อิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำ (oil-in-water) หรือ o/w คือ มีดริอปเล็ตของน้ำมันซึ่งเป็นส่วน dispersed phase กระจายตัวในน้ำ ซึ่งเป็นส่วน continuous phase
2. อิมัลชันแบบน้ำในน้ำมัน (water-in-oil) หรือ w/o คือ มีดริอปเล็ตของน้ำซึ่งเป็นส่วน dispersed phase กระจายตัวในน้ำมัน ซึ่งเป็นส่วน continuous phase

ปรากฏการณ์ของอิมัลชัน

- 1) การแยกชั้น (Sedimentation or creaming) คือ ทั้งเกิดการตกตะกอนและการเกิดครีม เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก หากวิภาคในมีความหนาแน่นน้อยกว่าภาคภายนอก จะทำให้อนุภาคน้ำมันเคลื่อนที่ด้านบน เรียกว่าการเกิดครีม (Creaming) แต่ถ้าอนุภาคน้ำมันมีความหนาแน่นมากกว่าวิภาคภายนอกทำให้อนุภาควิภาคภายในเคลื่อนที่ลงด้านล่าง ถูกเรียกว่าการตกตะกอน (Sedimentation)
- 2) การเกาะกลุ่มของอนุภาค (Flocculation) คือ เกิดจากการชนกันและแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของวิภาคภายใน จึงทำให้เกิดการรวมกลุ่มกัน สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน การแยกตัวตามแรงโน้มถ่วง หรือแรงเชิงกล
- 3) ออสวาร์ดริเพนนิ่ง (Ostwald ripening) คือ การที่อนุภาคขนาดเล็กแพร่ไปยังอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า เนื่องจากวิภาคภายในมีความดันออสโมซิส และวิภาคภายนอกมีความดันของลาปลาซ จึงทำให้อนุภาคขนาดเล็กมีขนาดเล็กลง และอนุภาคใหญ่มีขนาดใหญ่ขึ้น
- 4) การรวมตัว (Coalescence) คือ การรวมตัวกันของคอลลอยด์จนเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อมีพลังงานเฉื่อยเกิดขึ้นระหว่างหยด (droplet) 2 หยดจะทำให้เกิดเป็นแผ่นฟิล์มในวิภาคภายนอก [10]

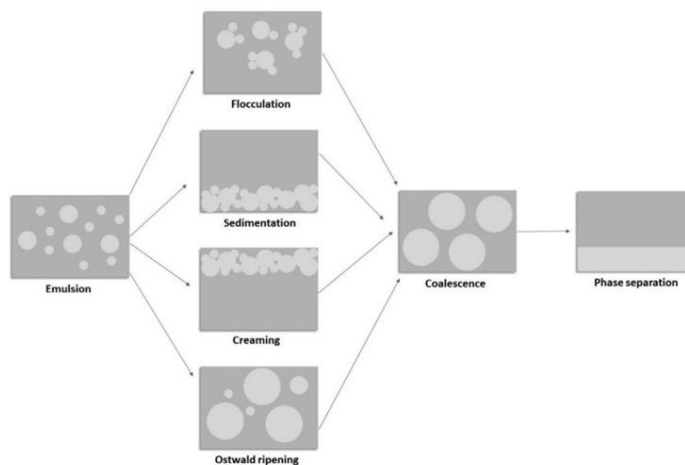


FIG. 2.4 Mechanisms for the destabilization of emulsions. Note that different processes can occur simultaneously.

รูปที่ 8 แสดงรูปกลไกของลักษณะความคงตัวของอิมัลชัน

2.5 น้ำมันเมล็ดชา

น้ำมันเมล็ดชา มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า น้ำมันคามิเลีย (Camellia Oleifera Seed oil, Tea tree oil) ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลายในประเทศจีนทางตอนใต้ ญี่ปุ่น อินเดีย และทางเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สมัยก่อนนำไปใช้ในพืชที่มีน้ำมัน (Oil crop) ใช้ประโยชน์ในด้านสุขภาพเนื่องจากสามารถผลิตน้ำมันสำหรับทำอาหารในคุณภาพที่สูงเนื่องจากมีส่วนกรดไขมันเฉพาะตัว ซึ่งจะอุดมไปด้วยส่วนประกอบหลัก คือ กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ 1 อัน (monounsaturated fatty acid) ได้ถูกนิยามว่าเป็นน้ำมันมะกอกแห่งตะวันออก เนื่องจากประโยชน์ต่อร่างกายในด้านสุขภาพเทียบเท่ากับน้ำมันมะกอก ส่วนประกอบหลัก คือ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) มีองค์ประกอบ โมเลกุลของกลีเซอรอล (glycerol) เชื่อมกับสายโซ่ยาวของส่วนไขมัน (fatty acid) ปัจจุบันองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดชา เป็นแหล่งที่เต็มไปด้วยโครงสร้างที่หลากหลาย พบอยู่ทั้งหมด 249 ชนิด ไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน (Triterpenoid Saponins) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) พอลิฟีนอล (Polyphenols) และพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ซึ่งเป็นส่วนประกอบเด่นๆ เป็นสารที่ใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมมากในอุตสาหกรรม เช่น ในทางการแพทย์ การเกษตร เครื่องสำอาง และทางเภสัชกรรมนั้น สารเคมีที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพของไตรเทอพีนอยด์ ซาโปนิน ถือว่าเป็นสารหลักที่นำไปใช้งาน สามารถผลิตได้จากส่วนดอก ใบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมล็ด นั่นคือ สารซาโปนินที่ได้จากเมล็ดนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์และนำไปกำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการในการเลี้ยงปลาในตู้ รวมไปถึงแมลงที่เป็นอันตรายต่อบ่อกุ้ง นอกจากนี้ยังนำไปใช้ประโยชน์เป็นสารลดแรงตึงผิวทางชีวภาพ ยาฆ่าแมลงแบบชีวภาพ เป็นต้น สารฟลาโวนอยด์ ก็ยังเป็นสารสำคัญรองลงมาจากซาโปนินที่มีส่วนในกระบวนการเมตาบอลิซึมและเป็นสารออกฤทธิ์ เกินกว่าครึ่งจะถูกพบในพืชที่มีสารประกอบในฟีนอลิก นอกจากนี้ยังมีสารลิกันแนน พอลิฟีนอล และพอลิแซ็กคาไรด์ ที่เป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันเมล็ดชา [11]



Figure 1. Trees and fruits of *Camellia oleifera* Abel.

รูปที่ 9 แสดงลักษณะต้นเมล็ดชาและผล (*Camellia oleifera* Abel.)

นอกจากนี้ยังสารสำคัญที่เป็นสารออกฤทธิ์จากน้ำมันเมล็ดชา ส่วนใหญ่จะได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในแง่ของการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ต่อต้านการอักเสบ ป้องกันโรคความจำเสื่อม ลดไขมันหรือคลอเรสเตอรอลในร่างกาย และไม่นานมานี้ก็พบว่า เป็นประโยชน์ต่อการสร้างภูมิคุ้มกัน สารสควอลีน Squalene เป็นสารตั้งต้นของฮอร์โมนสเตียรอยด์ วิตามินดี มีสารต้านอนุมูลอิสระ ป้องกันโรคหัวใจ การเกิดเนื้องอก นอกจากนี้ยังพบว่าสารสควอริโนสามารถช่วยเพิ่มกลูตาไทโอนและระดับ และลดระดับ SOD ในเนื้อเยื่อตับ สารสเตอรอล (Sterols) ประกอบด้วยลาโนสเตอรอล (lanosterol) เบต้าอามิรีน และไซโคลอาร์เตโนล (cycloartenol) ช่วยในการป้องกันการอักเสบและผลกระทบจากยาต้านมะเร็ง โดยใช้นำไปพัฒนาไฟโตสเตอรอล (phytosterol) สารโทโคฟีรอล Tocopherols ปริมาณ อยู่ในประเภทเดียวกับองค์ประกอบของฟีนอลิก ใช้ป้องกันการเกิดเนื้องอก มีสารต้านอนุมูลอิสระ สารฟีนอลิก (Phenolic) น้ำมันเมล็ดชาเป็นแหล่งใหญ่ของพอลิฟีนอล มีประโยชน์ในการออกฤทธิ์สำหรับต้านการอักเสบ สารต้านอนุมูลอิสระ และเนื้องอก การสกัดน้ำมันเมล็ดชาที่ได้ประโยชน์สูงสุดในแง่ของคุณภาพ องค์ประกอบ ผลผลิตมากที่สุดคือ วิธีการ Aqueous extraction เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการสกัดแบบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การสกัดผสมระหว่างการสกัดแบบน้ำกับแบบเอนไซม์ช่วยสามารถเพิ่มคุณภาพได้ดียิ่งขึ้น การนำน้ำมันเมล็ดชาไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม นอกจากการนำไปใช้ในการประกอบอาหารและทางการแพทย์ ยังไปนำแปรรูปในการทำมาการีน สารหล่อลื่น น้ำมันสำหรับบำรุงเส้นผม น้ำมันป้องกันสนิม ยังมีการนำไปใช้ในยาสระผมของผู้หญิงเพราะมันช่วยหยุดอาการคันบนหนังศีรษะ [12]

2.6 วัสดุเชิงประกอบชีวภาพ (Biomaterial) ที่สามารถนำมาผลิตไฮโดรเจล

2.6.1 อัลจินเนต

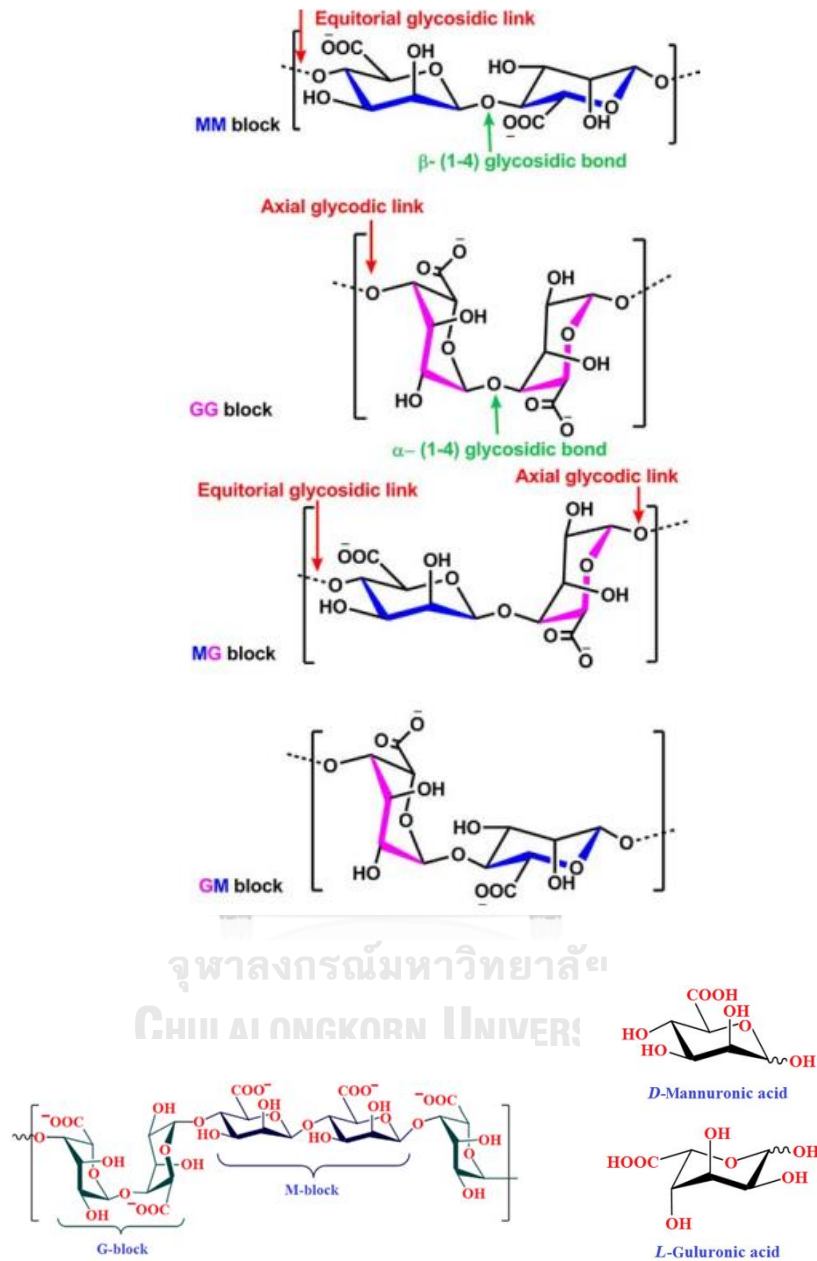
คุณสมบัติทั่วไปของอัลจินเนต มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 32,000 – 40,000 กรัม/โมลาร์ ซึ่งความหนืดจะขึ้นอยู่กับความยาวของโซ่โมเลกุลของและความเข้มข้นหรืออยู่บนจำนวนมอนอเมอร์ อัลจินเนต คือ พอลิเมอร์ประจุลบถูกสกัดจากสาหร่ายสีน้ำตาล ซึ่งประกอบไปด้วยเบต้าดีแมนนูโรเนต (β -D-mannuronate (M block)) และแอลฟาแอลกลูคูโรนิกแอซิด (α -L-gulonate (G block)) อัลจินเนตถูกนำไปใช้งานในด้านวัสดุทางชีวภาพเนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายและเข้ากันได้ทางชีวภาพ ถูกนำไปในใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น ไฮโดรเจล เม็ดปิดส่อนุภาคขนาดไมครอน (microsphere) อนุภาคขนาดนาโน (nanosphere) สารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) คุณสมบัติที่สำคัญในการทำให้เกิดเจล สามารถถูกเตรียมได้จากวิธีการเชื่อมขวาง (Cross-linked) โดยการหยดจากเข็มลงในสารละลายที่มีไอออนประจุบวกสองกลุ่มโลหะเป็นส่วนใหญ่ เช่น Ca^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} และ Mn^{2+} อัลจินเนตสามารถขึ้นรูปเจลที่อุณหภูมิห้องหรือควบคุมจากอุณหภูมิ ลักษณะของอัลจินเนตมีในหลายรูปแบบจากนุ่มและอ่อนเป็น

แข็งและยืดหยุ่น จึงสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมยา อาหาร และอุตสาหกรรมอื่นๆ การเกิดเจลจากอัลจิเนตมี 3 รูปแบบ อันแรก คือ แคลเซียมหรือพันธะสองหรือสามของโลหะที่ทำให้เกิดการนำของเกลือ อย่างที่สอง คือ เจลเกลือ เช่น กลุ่มฟอสเฟตหรือพอลิฟอสเฟต ซึ่งสามารถรวมพันธะโลหะคู่หรือสาม

การเตรียมอัลจิเนตไฮโดรเจล ด้วยวิธีการเตรียมไฮโดรเจลเชื่อมขวางแบบไอออนิก การเชื่อมขวางจะสมบูรณ์เมื่อสารละลายเมื่อสารละลายอัลจิเนตทำการเชื่อมขวางกับโลหะประจุบวกที่เป็นไดวาเลนต์ เช่น Ba^{2+} Ca^{2+} และ Sr^{2+} หรือ ไตรวาเลนต์ Al^{3+} และ Fe^{3+} ทำให้เกิดการขึ้นรูปไฮโดรเจลกับอะตอมที่มีพันธะคู่หรือพันธะสามของโลหะด้วยแรงไอออนิก ที่พันธะภายในโมเลกุลระหว่างพันธะคู่หรือพันธะสามของพันธะโลหะที่มีประจุบวกกับกลุ่มของหมู่คาร์บอกซิล ($-COOH$) แสดงการบล็อกของกูโรเนต (guluronate) นอกจาก G block ยังมี M และ M-G block มีส่วนในการสร้างรูปแบบอื่นๆ พันธะคู่ที่ประจุบวกของแคลเซียมไอออนสามารถสร้างพันธะที่ G block และ M-G block การเลือกพันธะของหลายๆพันธะคู่ของโลหะและการเพิ่มเจลอัลจิเนตที่เพิ่มขึ้นในลำดับ M-M block < M-G block < G-G block การใช้ Ca^{2+} จะถูกนำมาใช้ในวิธีการไอออนิกเจลเลชันในอัลจิเนตเนื่องจากไม่มีความเป็นพิษ ไอออนิกเจลของอัลจิเนตถูกขึ้นรูปเมื่อพันธะคู่ประจุบวกสร้างพันธะกับ G block ของโครงสร้างอัลจิเนต Block ของกูโรเนตจะขึ้นรูปของสายโซ่พอลิเมอร์กับ block ของกูโรเนตติดแน่นที่สายโซ่พอลิเมอร์ผ่านพันธะไอออนิกระหว่างหมู่กูโรนิก แรเงวแวนเดอร์วาล์วระหว่างอัลจิเนตทำให้เกิดโครงสร้างไอออนิกตาข่าย 3D จากการขึ้นรูปของอิเล็กโทรเนกาติวิตี ที่ประกอบไปด้วยกลุ่มที่ชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งพันธะ Ca^{2+} ผ่านการใช้โคออดิเนชันซึ่งใช้อะตอมออกซิเจนมากกว่าหมู่คาร์บอกซิล ความแน่นของการยึดเกาะจะทำให้เกิดโครงสร้างรูปแบบ “Egg box” ก่อให้เกิดโครงสร้างเจล นอกจากนี้พันธะของ Ca^{2+} และ Ba^{2+} อัลจิเนตเกิดขึ้นแบบแบน 2 มิติ การสร้างพันธะไอออนิกของอัลจิเนตได้รับผ่านเจลจากภายนอกและภายในผ่านกระบวนการแบบเย็น

วิธีการแบบภายนอก โดยวิธีการควบคุมการแพร่ การเชื่อมขวางของพันธะโลหะแบบประจุบวกมีแนวโน้มในการกระจายความเข้มข้นที่สูงขึ้นในอัลจิเนต เมื่อสารละลายอัลจิเนตถูกขับออกมาหยดลง การเชื่อมขวางของสารละลายประกอบด้วยโลหะประจุบวก ซึ่งทำให้เกิดการพันธะระหว่างหมู่คาร์บอกซิลทันทีจะลงเหลือกรดกูโรนิกบนพื้นผิว การขึ้นรูปของเจลอัลจิเนตเกิดเป็นชั้นโครงสร้างไฮโดรเจลอย่างรวดเร็ว

วิธีการแบบภายใน วิธีการนี้เป็นการเติมสารเชื่อมโยงข้ามในรูปแบบที่ไม่ทำงาน (inactive) ลงในสารละลายอัลจิเนต เช่น การเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) หรือ แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ที่ไม่ละลายน้ำ หลังจากนั้นก็กระตุ้นการละลาย แคลเซียมคาร์บอเนตโดยการปรับ pH ให้เป็นกรดด้วยการเติมกรดอินทรีย์หรือแลคโตน (lactones) ซึ่ง เป็นการปลดปล่อยแคลเซียมไอออนออกมา เพื่อเกิดการเชื่อมโยงข้ามกับอัลจิเนต [13]



รูปที่ 10 ภาพแสดงโครงสร้างอัลจินต ประกอบด้วย β -D-mannuronate (M block) และแอลฟาแอลกลูคูโรนิกแอซิด (α -L-guluronate (G block))

2.6.2 ไคโตซาน

ไคโตซาน แผลงที่พบได้มากที่สุด ในธรรมชาติ เช่น กระจงคองปู เปลือกกุ้ง แมลง พอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย 1,4-2-acetamido-2-deoxy- β -D-glucan และ (1-4)-2-acetamido-2-deoxy- β -D-glucan โครงสร้างทางเคมี ไคโตซานประกอบด้วย N-acetyl-D-glucosamine และ D-glucosamine ซึ่ง 1 หมู่อะมิโนและ 2 หมู่ไฮดรอกซิลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกเข้าไปเรื่อยๆ ที่ค่า pH ต่ำพบว่าไคโตซานคือโพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก (cation polyelectrolyte) เนื่องจากมีการรับโปรตอน (protonate) อยู่ในรูปกรดอะมิโน คุณสมบัติไอออนบวกของไคโตซานจะถูกผันกลับด้วยปฏิกิริยาซัลโฟเนชัน ไคโตซานมีหลายประเภทขึ้นอยู่กับระดับการกำจัดหมู่อะซิติล (degree of acetylation of chitin) มีผลต่อคุณสมบัติของและการนำไปใช้งานของไคโตซาน โดยพิจารณาได้จากการละลายน้ำ การขยายตัว การสลายตัว และการเข้ากันได้ นอกจากนี้ยังเป็นตัวดูดซับที่ดีเยี่ยม จากการดูดซับโลหะ สารย้อมสี ไขมัน หรือสารประกอบอะโรมาติก [14]

การนำไคโตซานไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เนื่องจากเป็นวัสดุทางชีวภาพและออกฤทธิ์ฆ่าเชื้อราในธรรมชาติ มีคุณสมบัติที่เข้ากันได้ด้วยองค์ประกอบของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นส่วนที่กอบที่สำคัญของการนำไปทำผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง จัดอยู่ในประเภทของไฮโดรคอลลอยด์เป็นอะมิโนพอลิแซคคาไรด์ตามธรรมชาติจึงมีความหนืด และด้วยความเป็นพอลิแคทไอออนจะเป็นกลางเมื่อภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด นั่นคือสามารถช่วยเรื่องผมและผิวหนังตัวอย่างเช่น การนำไปใช้เป็นส่วนประกอบบำรุงเส้นผม เพิ่มความชุ่มชื้น ความแข็งแรงเชิงกล และความเรียบ สารละลายแอลกอฮอล์ในไคโตซานสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นเจลในครีมบำรุงเส้นผม เซรั่ม (Hair tonics) นอกจากนี้ประจุบวกตามธรรมชาติและน้ำหนักโมเลกุลที่สูงสามารถนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางที่หลากหลาย ใช้เป็นมอยซ์เจอร์เซอร์แทนไฮยารูรอนิกเพราะมีราคาต้นทุนที่ต่ำ

การเตรียมไคโตซานไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้จากการรวมตัวกันด้วยโมเลกุลขนาดเล็กๆ ที่มีประจุลบเข้าด้วยกันหรือการรวมกันกับโพลีเมอร์ชนิดอื่น ไคโตซานเป็นกรดกลางๆเนื่องจากความเป็นอิสระของหมู่เอมีนจาก D-glucosamine ความสามารถที่เปลี่ยนความหนาแน่นของประจุภายใต้สภาวะ เช่น pH ความแรงของไอออน อุณหภูมิ เป็นต้น ทำให้เกิดเป็นเจล คุณสมบัติของมันยังสามารถเชื่อมกันเองได้ แต่คุณสมบัติเชิงกลจะมีค่าต่ำ และไม่สามารถควบคุมการละลายได้ จำเป็นที่จะต้องมีการสังเคราะห์เพื่อทำให้มีคุณสมบัติไฮโดรเจลที่ดีขึ้น หลักการเหมือนกันทั่วไปในการสังเคราะห์ คือการเชื่อมขวาง โดยการแช่แข็ง ละลายและทำให้เป็นกลาง (freeze-melting-neutralization method) นำไปแช่แข็งโดยควบคุมอุณหภูมิ สารละลายไคโตซานจะถูกแทนที่ด้วยเจล ภายใต้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะเสื่อมสภาพลง จำเป็นต้องใช้เบสแก่ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

มีผลต่อการเข้ากันได้ทางชีวภาพของไฮโดรเจล อีกวิธีการหนึ่งคือ การใช้วิธีวัฏจักรเยือกแข็งและละลาย (freeze-thaw cycles) ของสารละลายเพื่อให้ความแข็งแรงและการยืดหยุ่นของไฮโดรเจล เช่น การสังเคราะห์ร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ จากการใช้กรดบอริก (boric acid) แข่งขันอุณหภูมิ ประมาณ -20°C ประมาณ 24 ชั่วโมง และละลายต่อที่อุณหภูมิห้อง 25°C เวลา 6 ชั่วโมง พบว่ามีความคงตัวเพิ่มขึ้น

การเติมสารเชื่อมขวาง (Chemical cross-linking) เพื่อสังเคราะห์โคโตนไฮโดรเจล หมู่ฟังก์ชันต้องทำปฏิกิริยากับเอเจนท์ของตัวเชื่อมขวาง ปัจจุบันใช้สารเจนนิพิน (Genipin) ซึ่งนิยมใช้เนื่องจากไม่เป็นพิษ แต่กลูตาโรลดีไฮด์ (glutaraldehyde) มีความเป็นพิษต่อเซลล์ ข้อเสียคือต้องมั่นใจว่าหมู่อัลดีไฮด์ทั้งหมดต้องมีการเชื่อมต่อ [15]

2.7 ปัจจัยการเกิดโครงสร้าง Egg box model ของอัลจินตและเพคติน

2.7.1 ปัจจัยภายใน (Intrinsic factor)

การเกิดโครงสร้างสเจลของอัลจินตและเพคตินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและโครงสร้างทางเคมี

2.7.1.1 น้ำหนักโมเลกุล

อัลจินตและเพคตินมีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงและมีความยาวของสายโซ่ที่แคลเซียมสามารถเข้ามาจับได้ (Ca-binding site) ซึ่งบริเวณที่มีการกระตุ้นหรือการใช้งาน (Active binding site) จะทำให้เกิดการซึมของโครงสร้างตาข่ายและลักษณะการไหลของเจล เจลที่เกิดจากขึ้นรูปของอัลจินตที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะแสดงถึงความเร็วในแง่ของการยืดหยุ่นของเจลที่เร็วกว่าโมเลกุลต่ำ ขณะที่เพคตินที่น้ำหนักโมเลกุลต่ำจะไม่สามารถก่อเจลเนื่องจากข้อจำกัดของ Ca-binding site

2.7.1.2 ร้อยละของกูลูโรนิกและกาแลคทูโรนิก

กรดกูลูโรนิกในอัลจินตและกาแลคทูโรนิกในเพคตินจะแสดงการเชื่อมขวางโดยการจับกับแคลเซียมไอออน ร้อยละของกรดทั้งสองตัวที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการขึ้นรูปของเจลที่มีความเสถียร ความแข็งแรงทางเชิงกลและปริมาณน้ำที่บรรจุ อัลจินตจะเกิดเจลที่ขึ้นรูปในร้อยละที่สูงของ GulA ที่มีความแข็งแรงด้วยการเพิ่มความร้อนที่คงที่และการยืดเกาะของน้ำ ขณะที่ ManA ในร้อยละที่สูงจะส่งผลให้เกิดความนุ่มและยืดหยุ่นที่แข็งแรง

2.7.1.3 ความยาวและการกระจายตัวของ Calcium binding blocks

คุณสมบัติของแคลเซียมอัลจินตและแคลเซียมเพคตินเจลเช่นความสามารถการก่อเจล ความแข็งแรงเจล ความยืดหยุ่นและการทำงานร่วมกัน ขึ้นอยู่กับความยาวและการกระจายตัวของ Ca-binding blocks คือ Gularonic acid block (G blocks) และ Non-methoxlyated galaturonic acid blocks (GalA blocks) อัลจินตต้องมีจำนวนอย่างน้อย 6 ถึง 8 หน่วยย่อยต่อเนื่องกันเพื่อให้การเชื่อมขวางมีความเสถียร ของเพคตินต้องอย่างต่ำ 6 ถึง 20 หน่วยต่อเนื่องกัน ซึ่งของอัลจินต

อาจจะมีกรดแมนูโรนิคสลับกันไปกับกลูโคโรนิคทำให้โครงสร้างอาจส่งผลต่อความแข็งแรงทางเชิงกลซึ่งตรงกันข้ามกับเพคตินที่มีเพียง non-methoxylated GalA ที่ดีกว่าในแง่ของการเกิดเจลและความแข็งแรง

2.7.1.4 ดีกรีและรูปแบบของเมทอกซิเลชัน

เมทอกซิเลชันส่วนใหญ่เกิดในเพคติน ซึ่งแคลเซียมเพคตินจะมีคุณสมบัติต่อค่าดีกรีของเมทอกซิเลชัน (degree of methoxylation; DM) เป็นคุณสมบัติเกิดเจล

2.7.2 ปัจจัยภายนอก (Extrinsic factor)

2.7.2.1 ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทางชีวภาพ

ความเข้มข้นของเพคตินและอัลจินเตตส่งผลต่อกระบวนการก่อเจลและคุณสมบัติ เช่น ความหนืด ความยืดหยุ่น ความแข็งแรง เป็นต้น นอกจากนี้ อัลจินเตตที่มีโมเลกุลเพียงพอนำไปสู่การเชื่อมขวางที่มากขึ้นกับแคลเซียมไอออน ซึ่งจะทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างและอุ้มน้ำไว้ได้มากขึ้น แต่ปริมาณอัลจินเตตที่มากเกินไปทำให้เกิดเจลเป็นก้อนหรือกลุ่มและไม่สามารถจับกับแคลเซียมไอออนได้ ขณะที่เพคตินที่มีความเข้มข้นต่ำสามารถเกิดการจับกันกับแคลเซียมไอออนได้

2.7.2.2 ความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน

ผลกระทบการเกิดเจลสามารถอธิบายได้โดยค่า R ซึ่งมาจาก $2(\text{Ca}^{2+})(\text{COO}^-)$ ทั้งจากอัลจินเตตและเพคตินเจล การเกิดเจลที่เร็วขึ้นและความแข็งแรง รวมไปถึงค่าความหนืด มาจากปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนทำให้เกิดการแพร่ที่เร็วซึ่งทำให้เกิด Egg box การเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมไอออนทำให้ค่า $R < 0.25$ และลดลง $R \geq 0.25$ ซึ่งปริมาณแคลเซียมไอออนที่เกินจะทำให้เกิดการยับยั้งการเกิด egg box และเกิดการแตกหักของการเชื่อมขวาง MG blocks ทำให้เกิดเจลได้ลดลง สำหรับเพคตินการเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมทำให้เกิดความยืดหยุ่นและความหนืด เมื่อเพิ่มความเข้มข้น ค่า $R \leq 3.0$ หมู่คาร์บอกซิลิกที่เป็นอิสระจะทำให้เกิดความแข็งแรงในโครงสร้างเจล เมื่อ $R > 3$ แคลเซียมไอออนมากเกินไป สามารถจับกับประจุลบในเพคตินตัวอื่นและเกิดแรงดึงอิเล็กโตรสแตติกระหว่างโมเลกุลเพคติน

2.7.2.3 การเติมแคลเซียมไอออน

การเติมแบบภายนอก คือ ทำให้เกิดการแพร่เข้าไปจากการหยดพอลิเมอร์ลงไป ซึ่งจะเกิดการเกาะของแคลเซียมไอออนที่พื้นผิว ส่วนเติมแบบภายใน คือ การใช้ค่า pH ควบคุมในการปล่อยแคลเซียมไอออนไปภายในสารละลายพอลิเมอร์ ซึ่งจะเกิดความแข็งแรงของเจลที่น้อยกว่าแบบภายนอก

2.7.2.4 ความแข็งแรงของไอออน

ระดับความเป็นเกลือมีผลกระทบต่ออัลจินตและเพคติน เช่น Ca^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} และ Fe^{2+} เป็นต้น ระดับของความเป็นเกลือจะทำให้เกิดเป็นเจลได้ที่ไม่เสถียร เพราะจะเกิดการแข่งกันจับกับแคลเซียมไอออนใน binding site และทำให้เกิดแรงที่อ่อนระหว่างโมเลกุล

2.7.2.5 ค่า pH

ค่า pH มีผลต่อการเกิดเจลของอัลจินตและเพคตินโดยการละลายของหมู่คาร์บอกซิลของเพคตินและอัลจินต แคลเซียมอัลจินตเจลได้รับ pH ต่ำ (ค่าที่ 3.8) ทำให้เกิดการหย่นและผิวที่เป็นรู pH ยังส่งผลต่อความหนืดและความแข็งแรงจะลดลงเมื่อเพิ่มค่า pH อยู่ที่ 4 ถึง 7 และลดลงอย่างช้าๆ เมื่อ pH อยู่ที่ 6 ถึง 11 ใน นอกจากนี้ยังส่งผลต่อน้ำหนักโมเลกุล ปริมาณของคาร์บอกซิลิกแอนไอออน

2.7.2.6 อุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่อการพัฒนาโครงสร้างระหว่างสายโซ่อัลจินต ความหนาแน่นของโครงสร้าง เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 100 องศาเซลเซียส อัลจินตจะเสื่อมสภาพก่อให้เกิดเจลที่แตก แคลเซียมเพคตินเจล จะมีความแข็งแรง ความหนืดและความยืดหยุ่นที่ลดลงจากการเพิ่มอุณหภูมิ เช่นเดียวกัน [16]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี 2023 Martina Vakarelova และคณะ [17] ทำการศึกษาไมโครเอนแคปซูเลชันของสารแอสทาแซนทินโดยวิธีการไอออนิกเจเลชัน โดยดูความคงตัวจากการผสมไคโตซาน อัลจินตและเพคติน การขึ้นเม็ดบีดส์จากพอลิเมอร์ทั้งสามทำให้เกิดประสิทธิภาพการกักเก็บอยู่ที่ $87.43 \pm 5.95\%$ และประสิทธิภาพการนำไปใช้ทางชีวภาพอยู่ 58% เพคตินและไคโตซานอยู่ที่ $65.5 \pm 1.98\%$ และเพคตินอย่างเดียวในการขึ้นรูปเม็ดบีดส์เพื่อบรรจุสารอยู่ที่ $62.48 \pm 2.19\%$ เนื่องจากการผสมระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดจะช่วยให้เกิดความหนาและความแตกต่างของการเกิดเจลแต่ละตัว ทำให้การกักเก็บมีความคงตัวไม่ให้เกิดการปลดปล่อยออกจากผิวของเม็ดบีดส์ได้

ในปี 2022 Ran Cai และคณะ [18] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการทำเม็ดบีดส์เพคติน 3 ประเภท คือ เมทอกซิลแบบต่ำ (Low methoxyl pectin; A-pectin), วิธีการติเอสเทอร์ริฟิเคชันจากการใช้ความดันสูงในเอนไซม์ (High hydrostatic pressure; HHP) การทำเมทอกซิลระดับต่ำ (Low methoxyl citrus pectin), และวิธีการใช้เอนไซม์ (enzymatic method; E-pectin) สามารถเป็นตัวพาสาร

เคอร์คิวมิน (Curcumin) จากขมิ้นชันไปยังลำไส้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พบว่าประสิทธิภาพการกักเก็บทั้ง 3 วิธีอยู่ที่ค่า $37.58 \pm 0.20\%$, $45.70 \pm 1.35\%$, $40.77 \pm 0.64\%$ ค่าจาก HHP เพคตินจะมีกึ่งที่สูงกว่าแบบ A pectin และ E pectin อาจะบอกถึงการเกิดเชื่อมขวางที่สูงขึ้นทำให้เกิดความแข็งแรงของโครงสร้างและสามารถบรรจุควอเซตินได้ดีกว่า จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานภายนอก เม็ดปิดส์มีการพับไปมาของโครงสร้างเนื่องจากความหนาแน่นของแคลเซียมไอออน และเกิดการขยายตัวยึดตัวออกจับกับแคลเซียมไอออนที่มีปริมาณมาก เมื่อมีการผ่าครึ่งซีกออกมาดูโครงสร้างภายในการเพิ่มของแคลเซียมไอออนดังกล่าวจะเกิดความหนาของโครงสร้างภายใน (Thick shell) กับเพคติน แคลเซียมเจลปิดส์จะทำให้เกิดการเชื่อมของของแคลเซียมเพคเตท (calcium pectate) และแคลเซียมไอออนจะทะลุไปข้างในผิวและก่อให้เกิดความหนาขึ้นและรูพรุนข้างในของโครงสร้าง ซึ่งรูพรุนที่เพิ่มมากยิ่งขึ้นส่งผลต่อการกักเก็บที่ต่ำของเม็ดปิดส์ การขยายตัวในน้ำ (Swelling behavior) แบบ HHP จะสามารถขยายตัวในน้ำได้น้อยเนื่องจากว่ามีคุณสมบัติความแข็งแรงมากกว่าอีก 2 ประเภท มีโครงสร้างตาข่ายที่หนาแน่นกว่าสำหรับเจลแคลเซียมของตัวมันเอง ทำให้การขยายตัวในน้ำได้ไม่ตีมาก นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของเม็ดปิดส์ก็มีผลต่อการขยายตัวเช่นกัน นั่นคือ ขนาดที่ใหญ่จะมีผลต่อการดูดซับของน้ำได้ดีกว่าเพราะขนาดของพื้นที่ ซึ่งอาจจะต้องคำนึงถึงแต่ละปัจจัยประกอบกัน นอกจากนี้ยังพบว่า การเชื่อมขวางของเพคตินกับแคลเซียมไอออนเป็นประเภทไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ดังนั้นยิ่งโครงสร้างตาข่ายแน่นมากขึ้นก็ยิ่งการซึมผ่าน (permeation) ก็ยิ่งเข้าไยากขึ้น)

งานวิจัย Pei-Wen Chao (2022) และคณะ [19] ได้ทำงานวิจัยไมโครแคปซูลโดยการ Low-methoxyl pectin (LMP) เป็นส่วนชั้นของเหลวภายใน (liquid core) ที่ประกอบไปด้วยอิมัลชันจากสารไอโซฟลาโวน (Isoflavone) ในถั่วเหลืองที่มีอนุภาคขนาด 40.09 นาโนเมตร การใช้ Low methoxyl pectin ถือว่าเป็นสารธรรมชาติ ไม่มีพิษ และใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร เกษีกรรมและเครื่องสำอาง ด้วยการเติม Tween 80 ด้วย เมื่อศึกษาด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกันที่ 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% และ 0.5% เวลาบ่ม 5, 30 และ 60 นาที พบว่าไฮโดรเจลปิดส์โดยการใช้ 0.3% ของ Low methoxyl pectin บ่มเป็นเวลา 60 นาที ใน 0.3 โมลาร์ด้วยแคลเซียมคลอไรด์ แสดงถึงประสิทธิภาพร้อยละการเก็บกักของสาร (encapsulation efficiency) 84.3% และ 95.17% ในความเข้มข้นของเพคตินที่ 0.2 และ 0.3 ขณะที่เพคตินที่ร้อยละความเข้มข้น 0.1 พบว่าการกักเก็บอยู่ที่ 8.83%-16.50% ในการทำงานวิจัยนี้พิสูจน์ได้ว่าโครงสร้าง egg-box ที่มีการจัดระหว่างเมทอกซิลระดับต่ำ (LMP) และ แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เหมาะสมที่เตรียมส่วนชั้นในเม็ดปิดส์ไฮโดรเจล เพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บกักและการปลดปล่อยสารไอโซฟลาโวน เมทอกซิลเพคตินต่ำไม่สามารถขึ้นรูปแกนหรือบรรจุสารไอโซฟลาโวนได้ ของเม็ดปิดส์ในความเข้มข้นร้อยละ 0.1 การเพิ่ม

ความเข้มข้นจะทำให้ค่าความหนืดเฉือนสูงขึ้น (Shear viscosity) ผลของร้อยละโดยน้ำหนักของเพคตินที่ 0.2 และ 0.3 ทำให้มีรูปร่างทรงกลมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมทอกซิลเพคตินและแคลเซียมคลอไรด์มีผลต่อการเคลือบสารบนสารไอโซพลาโนอิมัลชันและการเพิ่มความแข็งแรงของแกนเม็ดบีตส์ การตรวจสอบด้วย FTIR แสดงลักษณะเฟสน้ำมันของสารไอโซพลาโนของถั่วเหลือง ประกอบด้วยค่าพีคที่ 2932, 2850 และ 1735 cm^{-1} ซึ่งประกอบด้วยสารลดแรงตึงผิวและไอโซพลาโนของถั่วเหลือง ซึ่งสารนี้ปกติดูดซับที่ค่าพีค 1500 และ 1000 cm^{-1} ซึ่งประกอบด้วย 1500 – 1350 cm^{-1} (วงแหวนอะโรมาติก C=C), 1236 cm^{-1} (ฟีนอลิก ไฮดรอกซิล) และ 1200 – 1000 cm^{-1} (C-O การสั่นแบบยืด (stretching vibration))

ในปี 2022 Maanas Sharma และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาไฮโดรเจลบีตส์ของอัลจินเตตอกัมอราบิก ต่อเพคติน ต่อถั่วถั่ว และต่อแซนแทนกัม บนสารสกัดสมุนไพรมะขาม (Black Jamun pulp) โดยการผสมอัตราส่วน 1.5% ของโซเดียมอัลจินเตตผสมกับสารแต่ละตัวดังกล่าวทั้ง 4 แบบ การทำเชื่อมขวาง (Cross-linking) จากการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าวิธีการไอออนิกเจลเลชัน (Ionic gelation) จากการพัฒนาทำแบบ Vibration dripping Extrusion ทำให้เกิดสารเคมีที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่ดีขึ้นในแง่ของสี (Color) พื้นผิว (texture) จากการศึกษาลักษณะพื้นฐาน มีลักษณะรูปร่างมีการหดตัวของอัลจินเตตที่ผสมกับเพคติน รูปร่างเป็นทรงแบบไข่ มีรอยแตกและรูพรุนขนาดเล็กจากบนพื้นผิว เนื่องจากโครงสร้างการผสมกันระหว่างเพคตินและอัลจินเตต ค่าอัตราการขยายตัว (swelling ratio) พบว่าการขยายตัวระหว่างอัลจินเตตและเพคตินจะเกิดขึ้นน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอัลจินเตตผสมกับสารพอลิเมอร์ตัวอื่น เนื่องจากการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะไอออนิกในอัลจินเตตและเพคติน จะมีโซเดียมคลอไรด์ไอออนอยู่กับเพคตินซึ่งมีผลกระทบต่อกรดดูดซับน้ำเข้าไปที่เม็ดบีตส์ ค่าการกักเก็บของเม็ดบีตส์จากการผสมตัวห่อหุ้มจากอัลจินเตตและเพคตินจากอัตราส่วนมีค่าที่ $87.41 \pm 4.28\%$

ในปี 2022 Sergey Popov และคณะ [21] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างเม็ดบีตส์จากแอปเปิ้ลเพคตินและคาราจีแนน วิธีการเตรียมโดยผสมกันแล้วนำไปหยดในแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งกลไกการเกิดเจลของเมทอกซิลระดับต่ำ (Low methoxyl esterified pectin) จะทำปฏิกิริยาหมู่คาร์บอกซิลิกอิสระด้วยพันธะคู่จะเกิดการเชื่อมที่แข็งแรงระหว่างสายโซ่เพคติน และยังพบว่าการผสม 1.5% ของแอปเปิ้ลเพคตินและ 0.5% ของคาราจีแนนทำให้เกิดการขึ้นรูปไฮโดรเจลเหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวิศวกรรมเนื้อเยื่อ เนื่องจากกลไกการเกิดเจลของของเมทอกซิลเพคตินเกี่ยวข้องกับจำนวนกรดคาร์บอกซิลิกอิสระที่สูง (COO^-) ด้วยไอออนพันธะคู่ที่แข็งแรงเชื่อมระหว่างสายโซ่ของเพคติน ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินก็จะเพิ่มความหนาแน่นและความแข็งแรงของเจลด้วยใน

การนำไปประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้เมื่อคุณสมบัติของสมบัติยืดหยุ่นแบบหน่วงหนืด (Viscoelasticity) ค่ามอดูลัสของยัง (G' ; Elastic modulus) จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าร้อยละของเพคตินเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 ถึง 4 โดยน้ำหนัก

ในปี 2020 Taechee Lee และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยสารเคอซตินของไฮโดรเจลปิดส์ที่ทำจากโอลิโกไคโตซานและกระบวนการดีเอสเทอร์ไรไฟด์เพคตินจากส้มยูชู เตรียมด้วยวิธีการออสติกเจเลชัน ด้วยความเข้มข้นเพคตินร้อยละ 1, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนัก พบว่าการเชื่อมขวางระหว่างหมู่คาร์บอกซิลกับแคลเซียมไอออน อีกส่วนทำให้เกิดพอลิอิเล็กโทรไลต์ระหว่างหมู่คาร์บอกซิลกับแอมโมเนียมไอออน ทำให้เกิดไฮโดรเจลปิดส์ในการขึ้นรูปใหม่ จากการวิเคราะห์ด้วย FTIR การเชื่อมขวาง (Cross-linking) ระหว่าง -COO^- และ Ca^{2+} และพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่ซับซ้อนระหว่างดีเอสเทอร์ไรไฟด์ของเพคตินจากส้มยูชู -COO^- ในประจุลบทำกับแคลเซียมไอออนและโอลิโกไคโตซาน NH_3^+ ในประจุบวกที่ทำกับแคลเซียมไอออนเป็นการขึ้นรูปที่สมบูรณ์ของไฮโดรเจลปิดส์ แสดงหมู่ฟังก์ชันที่ 1727 , 1607 และ 1408 cm^{-1} สอดคล้องกับการดึงของของหมู่ (C=O) แบบยืด (stretching) ของเมทิลเอสเทอร์ไฟฟของหมู่คาร์บอกซิล การเก็บกักสารเคอซตินจะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นจากการใช้ดีเอสเทอร์ไรไฟด์ ของส้มยูชูเพคติน การยืดแบบสมมาตรและอสมมาตรจะเกิดการสั่นของหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งพีคที่ 1727 (การยืดหมู่คาร์บอนิลของเมทิลเอสเทอร์ไฟฟหมู่คาร์บอกซิล) ของดีเอสเทอร์ไฟฟของเพคตินจากส้มยูชูถูกเคลื่อนไปที่ 1721 , 1603 , 1521 , 1422 , 1381 และ 1319 ในความเข้มข้นที่ร้อยละ 1, 1.5 และ 2 หลังจากทำปฏิกิริยากับออร์โกลิโกไคโตซานแสดงถึงการเชื่อมแบบพอลิอิเล็กโทรไลต์ถูกเชื่อมระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของเพคตินกับหมู่แอมโมเนียมไอออนของไคโตซาน ขนาดของเม็ดปิดส์การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นเพคตินเพิ่มทำให้เกิดความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ การไหลที่ช้าลงจากเพิ่มทำให้เม็ดมีขนาดใหญ่มากขึ้นจากการเตรียมแต่ละอัตราส่วน ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินส่งผลต่อขนาดของเม็ดปิดส์

ในปี 2019 Kittikoon Torpol และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาไฮโดรเจลปิดส์โดยใช้ไคโตซานและเพคตินที่ประกอบด้วยน้ำมันกระเทียมและน้ำมันโหระพา ทำการศึกษาอัตราส่วนไคโตซาน (0.2-0.7%) และเพคติน (3.5-5.5%) และแคลเซียมคลอไรด์ (5.0-20.0%) เพื่อการยับยั้งจุลินทรีย์ในอาหาร โดยกระบวนการออสติกเจเลชัน ผ่านการเติมแคลเซียมคลอไรด์ และสารทำให้เกิดความคงตัว Tween 20 เป็นอิมัลซิไฟเออร์ จากการดูลักษณะสัณฐานของพื้นผิวด้วย SEM แสดงรูปร่างของเม็ดปิดส์เป็นทรงกลมและผิวเรียบบนพื้นผิว ภายในมีรูขนาดเล็กและรอยแตก ขนาดเม็ดปิดส์อยู่ที่ $1.65 - 2.86$ มิลลิเมตร เนื่องจากการทำให้แห้ง ซึ่งมีประสิทธิภาพของร้อยละของประสิทธิภาพในการเก็บกักอยู่ที่ $62.16-79.06 \%$ พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเพคติน และไคโตซานกับเพคติน มีผลต่อค่าการกัก

เก็บน้ำมันโหระพาอย่างมีนัยยะ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากเพคตินมีการนำไปใช้ในโครงสร้างภายในเมื่อทำการเชื่อมขวางกับแคลเซียมคลอไรด์จะส่งผลต่อการยึดของการเชื่อมขวางเกิดขึ้น ถือว่าการผสมส่วนต่อหุ้มระหว่างโคโตซานและเพคตินยังช่วยเป็นประโยชน์ในด้านการรักษาอาหารเพื่อยับยั้งจุลินทรีย์อีกด้วย

ในปี 2017 Bapeyeva และคณะ [24] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการเก็บกักแลโทบาซิลลัส คาไซ ทำการเตรียมเม็ดบีดส์ด้วยวิธี extrusion โดยใช้เพคติน 3 ประเภทที่มีความแตกต่างกันของระดับเอสเทอร์ฟิเคชัน อะมิเตทเพคติน (DE; de-esterification 28% และ 20%) เพคตินที่มีระดับเอสเทอร์ระดับต่ำ (LMP:DE 3.6%) และเพคตินแบบที่มีระดับเอสเทอร์สูง (HMP:DE 59%) หยดลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.15 โมลาร์ ที่เพคตินความเข้มข้นร้อยละ 1 น้ำหนักโดยปริมาตร รูปร่างเพคตินยังไม่เกิดรูปทรงกลมที่เป็นแคปซูลที่ร้อยละ 1% ของทั้งอะมิเตทเพคตินและเพคตินเมทอกซิลระดับต่ำ ขณะที่เพิ่มความเข้มข้นเป็นร้อยละ 2% และ 3% จะพบว่าเม็ดบีดส์มีลักษณะกลมมากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติการเกิดเจลของเพคตินจะขึ้นอยู่กับระดับของเอสเทอร์ในเพคติน ซึ่งในเพคตินที่มีระดับเอสเทอร์ระดับสูงจะเกิดเจลเมื่อมีน้ำตาลหรือโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น โพลีออลส์ (polyols) หรือ มอนอไฮดริกแอลกอฮอล์ (monohydric alcohols) การเกิดเจลของเมทิลเพคตินระดับต่ำเกิดได้จาก ไอออนบวกคู่ แคลเซียมไอออน นอกจากนี้ค่าแรงที่ใช้ในการกดทับ (Compressive strength) ที่ความเข้มข้นอะมิเตทเพคตินความเข้มข้นร้อยละ 2 มีค่าอยู่ที่ 8.88 ± 0.57 N และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินเพิ่มไปที่ร้อยละ 3 ต้องใช้ค่าแรงเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 9.37 ± 0.56 N ความเข้มข้นจึงมีผลต่อการใช้แรงในการกดทับ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 เครื่องมือ

ตารางที่ 1 เครื่องมือในงานวิจัย

ลำดับ	เครื่องมือ	รุ่น	ผู้ผลิต
1	เครื่องชั่งวิเคราะห์ 2 ตำแหน่ง	STX2202	OHAUS, สหรัฐอเมริกา
2	เครื่องชั่งวิเคราะห์ 4 ตำแหน่ง	PB303-S/FACT	Mettler Toledo, สวิตเซอร์แลนด์
3	เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตา ความร้อนแบบดิจิตอล (hot plate stirrer)	C MAC HS 7	IKA, เยอรมัน
4	Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)		
5	เครื่องวัดกรดเบส (pH meter)	Docu-pH	Sartorius, เยอรมัน
6	Vernier caliper แบบดิจิตอล	Mitutoyo	
7	เครื่องวัดความหนืด (Viscometer)	DV-II+	Bookfield, สหรัฐอเมริกา
8	กล้องจุลทรรศน์แบบเฟสคอนทราสต์ (Phase contrast microscopic)	Eclipse Ts2 inverted	Nikon, สหรัฐอเมริกา
9	Field emission Scanning electron microscopy (SEM)		
10	UV-Vis spectrophotometer	T92+Spectrophotometer	PG Instrument สหรัฐอเมริกา
11	Universal testing machine	EZ-S	SHIMADZU
12	Overhead stirrer	RW20 DZM.n	IKA เยอรมัน

3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องแก้ว

- 1) ปีกเกอร์ขนาด 50, 100, 250, 400, 600 และ 1,000 มิลลิลิตร
- 2) ซ้อนตักสาร
- 3) แท่งแก้วคนสาร
- 4) กระบอกตวงขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
- 5) เทอร์โมมิเตอร์
- 6) ขวดปรับปริมาตร 500 มิลลิลิตร
- 7) ขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร
- 8) จานเพาะเชื้อ
- 9) Magnetic stirrer
- 10) หลอดหยดสาร
- 11) Syringe ขนาด 10 มิลลิลิตร
- 12) หัวเข็มฉีดยา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5 มิลลิลิตร
- 13) ตะแกรงกรอง Mesh 300
- 14) หลอดปั่นเหวี่ยงขนาดขนาด 50 ml
- 15) ปากคิบบสแตนเลส
- 16) ใบกวน 4- blade turbine



3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	สารเคมี	ผู้ผลิต/จำหน่าย
1	น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	บริษัท ธีวธิญะ เทคโนโลยี จำกัด ไทย
2	อัลจิเนต (Alginate)	Food grade, CT Chemical
3	เพคติน (Pectin)	Food grade, CT Chemical
4	แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium Chloride)	AR grade
5	น้ำมันเมล็ดชา (Camellia Oleifera)	โครงการชัยพัฒนา
6	Polysorbate 80 (Tween 80)	CT Chemical
7	พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene glycol) PEG มวลโมเลกุลเฉลี่ย 400 g/mol	CT Chemical
8	Mineral Oil	CT Chemical
9	คาร์โบพอล 940 (Carbopol 940)	CT Chemical
10	ไตรเอทานอลามีน (Triethanolamine) TEA ความเข้มข้น 99% โดยน้ำหนัก	CT Chemical
11	เอทานอล (Ethanol) ความเข้มข้น 95% โดย น้ำหนัก	บริษัทกรุงเทพเคมี จำกัดไทย
12	กรดอะซิติก (Acetic acid) (CH ₃ COOH)	CT Chemical
13	เฮกเซน (Hexane) C ₆ H ₁₄	CT Chemical

3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การเตรียมสารละลายเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัลจิเนต (ALG) และเพคติน (P)

ในการทำเม็ดปิดส์เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา

เตรียมชนิดของสารละลายอัลจิเนตและเพคตินในอัตราส่วน ตามตารางที่ 3.1 โดยใช้เครื่อง Magnetic stirrer ปั่นกวนสารละลายให้เข้ากัน เป็นเวลา 1 ชั่วโมงจากนั้นนำมาวัดค่าความหนืดก่อนใส่น้ำมันลงไป วัดทั้งหมด 3 ครั้ง โดยใช้เครื่องวัดความหนืด (Viscometer) และหัววัดเบอร์ 3 และวัดหลังใส่น้ำมันเมล็ดชาร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักและสารคงตัว (Tween 80) ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และวัดค่าความหนืดอีกครั้งทำ 3 ซ้ำ หลังจากนั้นนำเข็มเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร (Syringe) มาดูด

สารละลายขึ้นมาจำนวน 10 มิลลิลิตร แล้วนำมาหยดผ่านเข็มฉีดยาลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เพื่อให้ได้เม็ดปิดส์จากสารละลายอัลจิเนตและเพคติน จากนั้นบันทึกผลการทดลอง

ตารางที่ 3 การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัลจิเนตและเพคติน

สูตรเม็ดปิดส์อัตราส่วน (ALG:P)	ร้อยละอัลจิเนต (ALG)	ร้อยละเพคติน (P)	Tween 80	น้ำมัน เมล็ดชา	ร้อยละ น้ำกลั่น
0.25:0.25	0.25	0.25	0.25	2.5	97.75
0.25:0.5	0.25	0.5	0.25	2.5	97.50
0.25:1.0	0.25	1.0	0.25	2.5	97.00
0.25:1.5	0.25	1.5	0.25	2.5	96.50
0.25:2.0	0.25	2.0	0.25	2.5	96.00
0.5:0.25	0.5	0.25	0.25	2.5	97.50
0.5:0.5	0.5	0.5	0.25	2.5	97.25
0.5:1.0	0.5	1.0	0.25	2.5	96.75
0.5:1.5	0.5	1.5	0.25	2.5	96.25
0.5:2.0	0.5	2.0	0.25	2.5	95.75
1.0:0.25	1.0	0.25	0.25	2.5	97.00
1.0:0.5	1.0	0.5	0.25	2.5	96.75
1.0:1.0	1.0	1.0	0.25	2.5	96.25
1.0:1.5	1.0	1.5	0.25	2.5	95.75
1.0:2.0	1.0	2.0	0.25	2.5	95.25

3.2.2 การศึกษาการเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in water emulsion) ที่บรรจุน้ำมัน เมล็ดชาที่ไม่ละลายน้ำ

ขั้นตอนการเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชาที่ไม่ละลายน้ำร้อยละ 2.5 โดยการผสมน้ำมันสกัดธรรมชาติที่ไม่ละลายน้ำ กับสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก จะได้วิภูภาคน้ำมัน และมารวมกับวิภูภาคน้ำที่ประกอบด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมของอัลจิเนตและเพคติน ตามการทดลองจากข้อ 3.2.1 และนำปราศจากไอออน ผสมทิ้งไว้ 1 ชั่วโมงที่

อุณหภูมิห้องทำให้สารละลายเนื้อเจลก่อนผสมกับวัฏภาคน้ำมัน หลังจากนั้นปั่นด้วย Overhead stirrer ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาการคงตัวของอิมัลชันโดยทิ้งไว้สักครู่ชั่วโมงก่อนนำไปขึ้นรูปเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลจากอัลจินตและเพคติน

3.2.3 การเตรียมขึ้นรูปเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลระหว่างอัลจินตและเพคติน

นำอิมัลชันจากการทดลอง 3.2.2 ที่ได้มาใส่ใน syringe ที่ใส่เข็มฉีดยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 2.5 กรัมในน้ำ 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางสมบูรณ์ จึงนำมาล้างออกด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งเพื่อกำจัดแคลเซียมไอออนส่วนเกินออก จากนั้นนำมาวิเคราะห์ความคงตัวของอิมัลชัน นำไปทดสอบความคงตัวก่อนเก็บไว้ในตู้กลาง 5 ประเภท คือ น้ำปราศจากไอออน, สารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5, น้ำมันขาว (mineral oil), Polyethylene glycol และไฮโดรเจล

3.2.4 การศึกษาคุณสมบัติของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลระหว่างอัลจินตและเพคติน

3.2.4.1 ศึกษาโครงสร้าง และลักษณะพื้นผิวของเม็ดบีดส์ในแต่ละอัตราส่วนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีสมรรถนะสูง ชนิดฟิลด์อิมิสชัน

โดยโครงสร้างจะใช้กำลังขยายตั้งแต่ 150, 500, 3,000 และ 5,000 เท่า เพื่อให้สามารถดูลักษณะทางกายภาพและรูปร่างของเม็ดบีดส์ได้อย่างครบถ้วนด้วยเครื่อง Critical point dryer (CPD) เพื่อช่วยรักษาโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดบีดส์และน้ำมันเมล็ดชา ไม่ให้ถูกทำลายก่อนส่งวิเคราะห์ FE-SEM และเคลือบด้วยทองเพื่อให้เกิดการสะท้อนของอิเล็กตรอนก่อนนำไปส่องด้วย FE-SEM

3.2.4.2 ศึกษาโครงสร้างของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

3.2.4.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลที่ทดสอบด้วยแรงกด (Compression test)

ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของเม็ดบีดส์ ด้วยเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) โดยใช้เทคนิค compressive strength ค่าแรงที่ 1,000 นิวตัน เพื่อหาความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) และแรง (Force) ที่มากที่สุดในการกระทำให้เม็ดบีดส์เปลี่ยนรูปร่าง ด้วยการพิจารณาจาก 2 แรงนี้เพื่อหาว่าความสามารถในการรับแรงกดสูงสุดของเม็ดบีดส์ก่อนที่จะแตก ความสัมพันธ์ของทั้ง 2 แรง คำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = F / A$$

โดย

“ σ ” คือ ความเค้น (Stress) N/mm^2

F คือ แรง (Force) ที่กระทำกับวัตถุตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัด มีหน่วยเป็น N

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ มีหน่วยเป็น mm^2

3.2.4.4 ศึกษาความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์ (Swelling test)

วิเคราะห์ความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์ โดยนำเมล็ดที่ผ่านการอบแห้งในขั้นตอน

3.2.3 มาชั่งในน้ำหนัและนำไปแช่สารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ (Acetate buffer) ที่ pH 5.5 เป็น

เวลา 45 วัน จากนั้นเทผ่านกระดาษกรองเพื่อกำจัดสารละลายส่วนเกินและนำไปชั่งน้ำหนัก

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเม็ดบีดส์ตามสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การขยายตัวของเม็ดบีดส์} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100 \quad [25]$$

3.2.4.5 ศึกษาประสิทธิภาพในการกักเก็บในน้ำมันเมล็ดชา (Encapsulation efficiency)

วิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บสารออกฤทธิ์ของเม็ดบีดส์ โดยเทคนิค UV-vis spectroscopy

โดยทำเม็ดบีดส์ 0.05 กรัม ในสารละลายเฮกเซน 20 มิลลิลิตร (Hexane) จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่อง

เขย่าสาร Vortex และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างสารละลายแต่ละอัตราส่วน ซึ่งน้ำมัน

เมล็ดชามีค่าความยาวคลื่นอยู่ที่ 208 นาโนเมตร จากนั้นเตรียมน้ำมันเมล็ดชา 0.05 กรัม ใน

สารละลายเฮกเซนที่ 200, 300, 400, 500 และ 600 มิลลิลิตรในการเตรียมกราฟมาตรฐาน

(Standard curve) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าการกักเก็บในน้ำมันเมล็ดชาต่อไป [26]

$$\text{เปอร์เซ็นต์การกักเก็บของน้ำมันเมล็ดชาในเม็ดบีดส์} = \frac{\text{ปริมาณน้ำมันเมล็ดชาในเม็ดบีดส์}}{\text{ปริมาณน้ำมันเมล็ดชาตามทฤษฎี}} \times 100$$

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการอภิปราย

งานวิจัยการเตรียมเม็ดไฮโดรเจลจากน้ำมันเมล็ดชาด้วยสารทอหุ้มอัลจิเนตและเพคติน และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเตรียมและความคงตัวของเม็ดปิดส์

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการขึ้นรูปเม็ดปิดส์ โดยร้อยละความเข้มข้นของอัลจิเนตต่อเพคตินโดยน้ำหนักแต่ละอัตราส่วน
2. ศึกษาลักษณะของเม็ดปิดส์ ได้แก่ ความหนืด ลักษณะสีฐาน การขยายตัว ลักษณะของเม็ดปิดส์ขนาดและรูปร่าง ความคงตัวของอิมัลชัน สมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา

4.1 ผลการศึกษาอัตราส่วนอัลจิเนตและเพคตินในการขึ้นรูปเม็ดปิดส์ไฮโดรเจลจากน้ำมันเมล็ดชา

ทำการศึกษาอัตราส่วนอัลจิเนตและเพคตินในการเตรียมอิมัลชัน ก่อนและหลังการใส่น้ำมันจากเมล็ดชาร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก โดยทำการเตรียมเป็น 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 อิมัลชันได้จากการเตรียมด้วยความเข้มข้นอัลจิเนต (ALG) ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักและแปรผันความเข้มข้นของเพคติน(P) ที่ร้อยละ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก

กลุ่มที่ 2 อิมัลชันได้จากการเตรียมด้วยความเข้มข้นอัลจิเนต(ALG) ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักและแปรผันความเข้มข้นของเพคติน(P) ที่ร้อยละ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก

กลุ่มที่ 3 อิมัลชันได้จากการเตรียมด้วยความเข้มข้นอัลจิเนต(ALG) ร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักและแปรผันความเข้มข้นของเพคติน(P) ที่ร้อยละ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก

จากตารางที่ 4 แสดงผลการศึกษาความเข้มข้นของสารที่ทอหุ้มจากอัลจิเนตและเพคตินมีผลต่อค่าความหนืดของอิมัลชัน ก่อนและหลังการใส่น้ำมันเมล็ดชา ได้ผลดังนี้

กลุ่มที่ 1 อิมัลชันได้จากการเตรียมจากอัลจิเนตร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักและแปรผันความเข้มข้นของเพคติน พบว่า ค่าความหนืดหลังใส่น้ำมันเมล็ดชา มีค่าอยู่ในช่วง 2.78 ± 0.05 ถึง 24.90 ± 0.10 cP โดยเมื่อการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินมีผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นกัน

การเติมน้ำมันเมล็ดชามีผลต่อลักษณะความหนืดของอิมัลชันโดยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในทุกอัตราส่วนเพคติน

กลุ่มที่ 2 อิมัลชันได้จากการเตรียมจากอัลจินตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักและแปรผันความเข้มข้นของเพคติน พบว่า ค่าความหนืดก่อนใส่น้ำมันเมล็ดชา มีค่าอยู่ในช่วง 12.37 ± 0.21 ถึง 28.90 ± 0.17 cP โดยเมื่อการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินมีผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ค่าความหนืดหลังใส่น้ำมันเมล็ดชา มีค่าอยู่ในช่วง 19.50 ± 0.70 ถึง 36.87 ± 0.06 cP โดยเมื่อการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินมีผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นกัน

การเติมน้ำมันเมล็ดชามีผลต่อลักษณะความหนืดของอิมัลชันโดยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในทุกอัตราส่วนแพคติน

กลุ่มที่ 3 อิมัลชันได้จากการเตรียมจากอัลจินตร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักและแปรผันความเข้มข้นของเพคติน พบว่า ค่าความหนืดก่อนใส่น้ำมันเมล็ดชา มีค่าอยู่ในช่วง 35.10 ± 0.10 ถึง 95.3 ± 0.25 cP โดยเมื่อการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินมีผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ค่าความหนืดหลังใส่น้ำมันเมล็ดชา มีค่าอยู่ในช่วง 43.83 ± 0.67 ถึง 119.4 ± 0.2 โดยเมื่อการเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินมีผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเช่นกัน

การเติมน้ำมันเมล็ดชามีผลต่อลักษณะความหนืดของอิมัลชันโดยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในทุกอัตราส่วนแพคติน

เมื่อเปรียบเทียบความหนืดแต่ละกลุ่ม ที่ความเข้มข้นอัลจินตเท่ากัน แต่แปรผันความเข้มข้นเพคติน อิมัลชันที่เตรียมได้มีความหนืดเพิ่มขึ้นจากเดิม ทั้งนี้เนื่องด้วยคุณสมบัติของเพคตินที่ก่อให้เกิดเจล การเพิ่มความเข้มข้นของเพคติน ทำให้สารละลายเกิดความหนืดมากขึ้นและส่งผลต่อการเชื่อมขวางมากขึ้น (Crosslink) สำหรับพอลิเมอร์ทั้งสองตัว อีกทั้งความหนืดเป็นผลมาจากค่าของระดับของเมทิลเลชัน (Degree of methylation) ของเพคติน ซึ่งทำให้เกิดการขึ้นรูปของเจล ที่ส่งผลต่อระดับความหนืดของสารละลายเมื่อเติมปริมาณเพคตินเข้าไปมากขึ้นด้วย ดังนั้นกลุ่มที่ 1 มีค่าความหนืดต่ำที่สุดและรองลงมาคือกลุ่มที่ 2 สำหรับกลุ่มที่ 3 มีค่าความหนืดมากที่สุด

เมื่อเปรียบเทียบความหนืดแต่ละกลุ่ม ที่ความเข้มข้นของแพคตินเท่ากัน แต่แปรผันตามความเข้มข้นอัลจินต อิมัลชันที่เตรียมได้จะมีความหนืดสูงขึ้น

ที่อัตราส่วนอัลจินตและแพคตินที่เท่ากัน การใส่น้ำมันเมล็ดชาจะส่งผลให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเนื่องจากน้ำมันเมล็ดชามีค่าความหนืดในตัวและด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่สูง ทำให้เมื่อใส่เพิ่มเข้าไปทำให้สารละลายค่าความหนืด

ตารางที่ 4 ผลการศึกษาค่าความหนืดของอิมัลชันก่อนการขึ้นรูปเม็ดปิดสโไฮโดรเจล

อัตราส่วน ALG:P	ค่าความหนืด (cP)	
	น้ำมันเมล็ดชา (0%)	น้ำมันเมล็ดชา (2.5%)
0.25:0.25	0.833±0.02	2.78±0.05
0.25:0.5	3.34±0.05	4.65±0.11
0.25:1.0	4.09±0.05	6.94±0.00
0.25:1.5	10.87±0.15	15.30±0.34
0.25:2.0	13.77±0.05	24.90±0.10
0.5:0.25	12.37±0.21	19.50±0.70
0.5:0.5	20.07±0.25	22.63±0.32
0.5:1.0	12.13±0.06	17.87±0.38
0.5:1.5	27.60±0.20	44.40±1.05
0.5:2.0	28.90±0.17	36.87±0.06
1.0:0.25	35.10±0.10	43.83±0.67
1.0:0.5	48.80±0.10	58.10±0.46
1.0:1.0	57.23±0.06	78.67±0.15
1.0:1.5	81.87±1.46	91.67±0.31
1.0:2.0	95.3 ± 0.25	119.4 ± 0.2

ตารางที่ 5 ดัชนีการประเมินการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ

เนื้อเม็ดบีดส์ที่มีเนื้อนิ่มน้อยที่สุดบิ๊บแตกยากที่สุด	•
เนื้อเม็ดบีดส์ที่มีเนื้อนิ่มน้อยบิ๊บแตกยาก	••
เนื้อเม็ดบีดส์ที่มีเนื้อนิ่มปานกลางบิ๊บแตกง่ายปานกลาง	•••
เนื้อเม็ดบีดส์ที่มีเนื้อนิ่มมาก บิ๊บแตกง่ายมาก	••••
เนื้อเม็ดบีดส์ที่มีเนื้อนิ่มมากที่สุด บิ๊บแตกง่ายมากที่สุด	•••••

ตารางที่ 6 ผลการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและผิวสัมผัส

ALG:P	ลักษณะทางกายภาพ	ผิวสัมผัส
0.25:0.25	เม็ดเหลี่ยมสีขาว	•••••
0.25:0.5	เม็ดกลมมีหางสีขาว	•••••
0.25:1.0	เม็ดเหลี่ยมสีขาว	••••
0.25:1.5	เม็ดกลมสีขาว	••••
0.25:2.0	เม็ดรีสีขาวขุ่น	•••
0.5:0.25	เม็ดกลมสีขาวขุ่น	•••
0.5:0.5	เม็ดกลมสีขาวขุ่น	•••
0.5:1.0	เม็ดกลมสีขาวขุ่น	••
0.5:1.5	เม็ดรีสีขาวขุ่น	••
0.5:2.0	เม็ดรีสีขาวขุ่น	••
1.0:0.25	เม็ดกลมสีขาวขุ่น	••
1.0:0.5	เม็ดกลมสีขาวขุ่น	••
1.0:1.0	เม็ดกลมสีขาวขุ่น	•
1.0:1.5	เม็ดกลมสีขาวขุ่น	•
1.0:2.0	เม็ดกลมสีขาวขุ่น	•

ผลจากตารางที่ 6 แสดงการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โดยการประเมินจากผิวสัมผัสของ เม็ดบีดส์ไฮโดรเจลและการดูด้วยตาเปล่า วิธีการทำโดยการบีบเม็ดบีดส์เพื่อให้น้ำมันเมล็ดชามีการ ปลดปล่อยออกมาและบีบลงผิวที่หลังมือ ต้องไม่ทิ้งคราบ แดงง่ายเมื่อสัมผัส เม็ดบีดส์ต้องมีการ กระจายตัวได้ดี

กลุ่มที่ 1 เม็ดบีดส์ที่ได้จากการเตรียมจากอัลจินตร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักและแปรผันตาม ความเข้มข้นของเพคติน พบว่า อัตราส่วน 0.25:0.25 และ 0.25:0.5 ลักษณะเม็ดบีดส์ไม่เป็นรูปทรง สีขาวขุ่น เมื่อทำการบีบเม็ด แดงได้ง่ายมาก มีลักษณะนิ่มมากและไม่ทิ้งคราบ ขณะที่อัตราส่วน 0.25:1.0, 0.25:1.5 ปริมาณเพคตินทำให้ความหนืดของเม็ดบีดส์สูงขึ้น แต่ยังคงความนิ่มและบีบง่าย เนื่องจากความเข้มข้นของอัลจินตและเพคตินในปริมาณที่ต่ำทำให้แคลเซียมจะเข้าไปจับได้ในปริมาณ ที่น้อย การแพร่ผ่านของน้ำยังสามารถเข้าไปได้ ทำให้เมื่อมีการบีบเกิดความอ่อนนุ่ม ในอัตราส่วนอัล จินตต่อเพคติน 0.25 ต่อ 2.0 มีลักษณะเป็นรูปทรงรี รูปทรงของเม็ดบีดส์จะเริ่มเป็นทรงกลมมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของเพคติน ทำให้บีบยากขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากความยืดหยุ่นของเพคตินส่งผลให้เกิด ความยืดหยุ่น

กลุ่มที่ 2 เม็ดบีดส์ที่ได้จากการเตรียมจากอัลจินตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักและแปรผันความ เข้มข้นของเพคติน พบว่า ผิวสัมผัสของเนื้อบีดส์จะมีความเรียบเนียนมากขึ้น เม็ดมีลักษณะกลมและ สีขาวขุ่น อัตราส่วนอัลจินตต่อเพคติน 0.5:0.5, 0.5:1.0 และ 0.5:1.5 เม็ดบีดส์บีบยากขึ้นต้องออก แรงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มแรก แต่ยังมีการกระจายตัวที่ดีหลังจากบีบให้เม็ดแตก มีลักษณะ นิ่มปานกลาง ลักษณะกลมสีขาวขุ่น ไม่มีการทิ้งคราบ การบีบเม็ดให้แตกปานกลางเนื่องจากปริมาณ ของอัลจินตที่เพิ่มขึ้นปรับจากกลุ่มแรกจากร้อยละ 0.25 เป็น 0.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้เกิดการ เสริมความแข็งแรง ทำให้ต้องออกแรงมากขึ้น

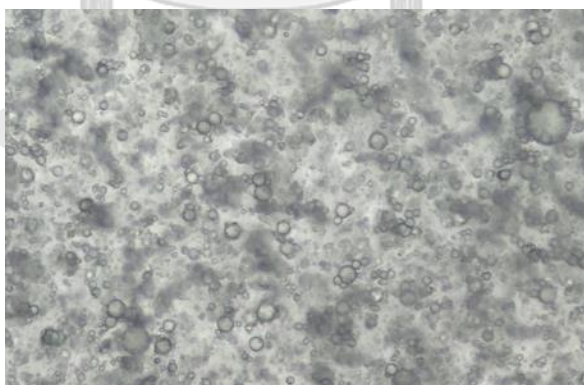
กลุ่มที่ 3 เม็ดบีดส์ที่ได้จากการเตรียมจากอัลจินตร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักและแปรผันความ เข้มข้นของเพคติน พบว่า การขึ้นรูปเม็ดบีดส์จะทำให้ได้เม็ดบีดส์ที่มีลักษณะแข็งแรงเพิ่มขึ้นจาก ปริมาณความเข้มข้นของอัลจินตที่เพิ่มขึ้น แต่ต้องออกแรงมากขึ้นเพื่อทำให้เม็ดบีดส์แตก เนื่องจาก เม็ดบีดส์มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นมากขึ้น ความยืดหยุ่นของเม็ดจากการสัมผัสขณะบีบเกิดจาก การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของอัลจินตและเพคติน ทำให้บีบเม็ดได้ยากขึ้นและยังทิ้งคราบไว้ เล็กน้อย คราบที่เกิดขึ้นเกิดจากชั้นพอลิเมอร์ที่หนาขึ้นบนชั้นหุ้มภายนอกของปริมาณอัลจินตที่

เพิ่มขึ้น และเม็ดปิดสีในกลุ่มที่ 3 บียามากที่สุด เพราะโครงสร้างเกิดการเชื่อมขวางที่มากขึ้นจากการจับกันระหว่างแคลเซียมไอออนกับอลิจินेट ทำให้เกิดความหนาแน่นของเม็ดปิดสี

4.2 การศึกษาการเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (Oil in water emulsion) ที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชาที่ไม่ละลายก่อนทำการขึ้นรูปเม็ดปิดสี

อิมัลชันเป็นระบบคอลลอยด์ (Colloid) ประกอบด้วยของเหลว 2 ชนิดที่ไม่ละลายเข้าด้วยกันรวมเป็นเนื้อเดียวกัน ต้องอาศัยสารลดแรงตึงผิวมีทั้ง 2 ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic surfactant) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic surfactant) หรืออิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) อิมัลชันประกอบด้วย 2 วัฏภาค คือ หยดที่เล็กๆของของเหลวชนิดหนึ่งเรียกว่า วัฏภาคการกระจายตัว (internal dispersed phase) ซึ่งการกระจายตัวแทรกอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า วัฏภาคภายนอก หรือวัฏภาคต่อเนื่อง (external or continuous phase)

การเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชา โดยทำการผสมระหว่างวัฏภาคน้ำมันและวัฏภาคน้ำ วัฏภาคน้ำมันจะเตรียมจากการผสมน้ำมันเมล็ดชา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและสารลดแรงตึงผิว Tween 80 ที่ร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนนี้มีผลต่อการขึ้นรูปอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำได้ดี ซึ่งมีอนุภาคทรงกลมที่กระจายตัวอยู่ในสารละลายอัลจินेटและเพคติน ไม่มีการแยกออกจากกัน จากวิธีการปั่นกวนด้วยเครื่อง Homogenizer ด้วยความเร็วรอบ 1,500 รอบต่อนาที เวลา 15 นาที ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกำลังขยาย 1,000 เท่า



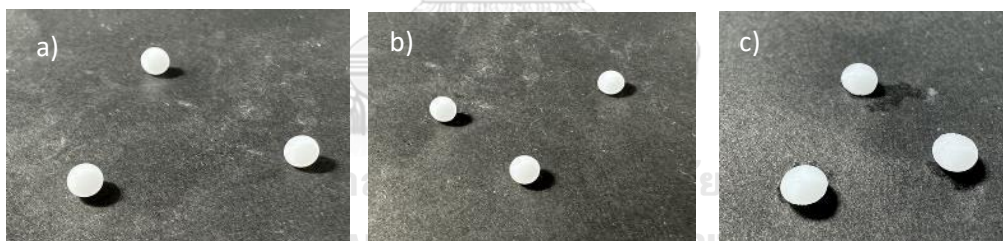
รูปที่ 11 ภาพจาก Microscope ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ของอิมัลชัน
เมื่อใช้อัลจินेटและเพคติน สำหรับเก็บน้ำมันเมล็ดชา

การเตรียมอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชา จากอัตราส่วนอัลจินेटและเพคติน 3 กลุ่ม โดยความเข้มข้นอัลจินेटร้อยละ 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก และแปรผันกับความเข้มข้นเพคตินร้อยละ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่า น้ำมันเมล็ดชาสามารถคงตัวอยู่ใน

สารละลายอิมัลชันได้ดี มีลักษณะเป็นอนุภาคทรงกลม มีการกระจายตัวได้ดี ไม่มีการแตกออกจากกัน เพื่อนำไปใช้ในการเตรียมเม็ดบีดส์ในขั้นต่อไปเนื่องจากการผสมความเข้มข้นระหว่างอัลจินเตและเพคติน ในแต่ละอัตราส่วนส่งผลให้เกิดความหนืดทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำมันเมล็ดชาได้น้อยลง จึงสามารถทำให้อิมัลชันคงรูปไว้และลักษณะวิฎภาคภายในจะมีการกระจายสม่ำเสมอ

เนื่องจากการผสมความเข้มข้นระหว่างอัลจินเตและเพคติน ในแต่ละอัตราส่วนส่งผลให้เกิดความหนืดทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำมันเมล็ดชาได้น้อยลง จึงสามารถทำให้อิมัลชันคงรูปไว้และลักษณะวิฎภาคภายในจะมีการกระจายสม่ำเสมอ

กลไกในการเกิดเจลของอัลจินเตและเพคติน เป็นลักษณะโมเดลที่ถูกเรียกเหมือนกัน คือ Egg Box หลังจากนั้นนำอิมัลชัน มาขึ้นรูปเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลด้วยเทคนิคไอออนิกเจลเลชัน (Ionic gelation) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร นำไปหยดลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ร้อยละ 2.5 กรัมโดยน้ำหนักในปริมาตรน้ำปราศจากไอออน 100 มิลลิลิตร ที่ไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำ 3 ครั้ง เพื่อทำการล้างเอาส่วนเกินออกไป ทำให้เกิดรูปทรงส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะเม็ดกลมขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเข้มข้นร้อยละของอัลจินเตและเพคตินโดยน้ำหนัก มีลักษณะสีขาวขุ่นทุกอัตราส่วน



รูปที่ 12 ภาพอัตราส่วนอัลจินเตต่อเพคติน 0.25:2.0 (a), 0.5:2.0 (b), 1.0:2.0 (c)


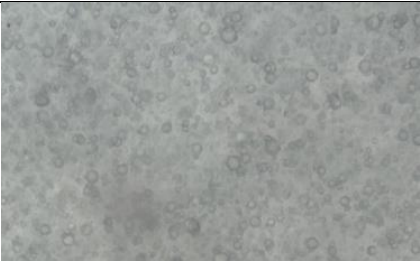


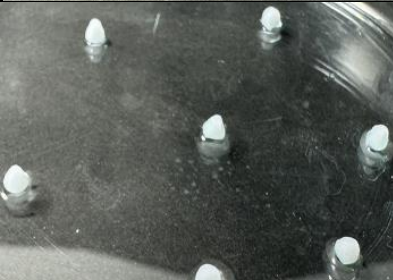


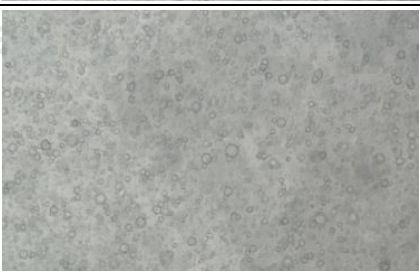

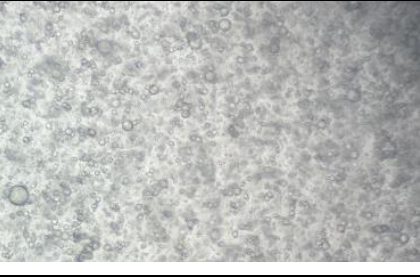
ในกลุ่มที่ 1 ที่เตรียมเม็ดบีดส์จากอัลจินเตร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และแปรผันความเข้มข้นเพคติน พบว่า ลักษณะของเม็ดบีดส์ของเพคตินที่อัตราส่วน 0.25 จะไม่เป็นรูปร่าง มีลักษณะรูปทรงเหลี่ยมเนื่องจากความเข้มข้นของทั้งอัลจินเตและเพคตินอยู่ในปริมาณที่ต่ำทำให้โครงสร้างยังไม่สามารถขึ้นรูปได้ชัดเจน ขณะที่ความเข้มข้นเพคตินที่ 0.5 เพคตินเม็ดบีดส์จะมีทางเหมือนหยดน้ำ และที่ 1.0 จะเริ่มมีความกลมมากขึ้น จนกระทั่งมีลักษณะเป็นทรงกลมชัดเจน ที่อัตราส่วน 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ


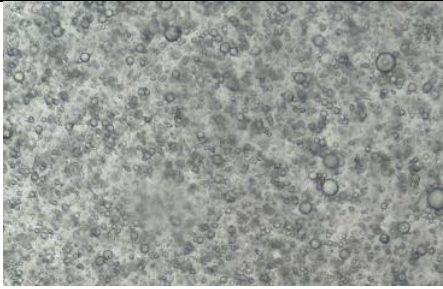
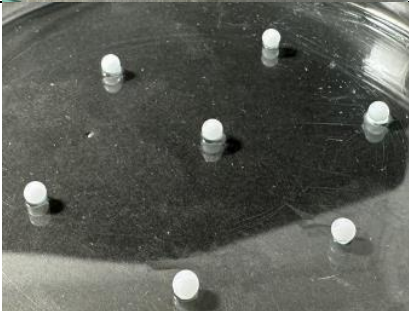
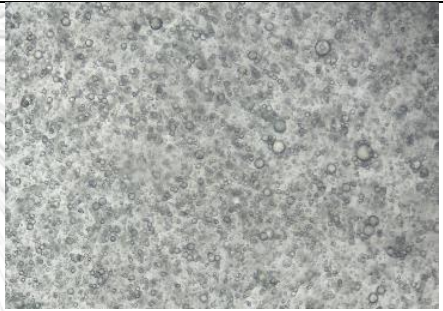

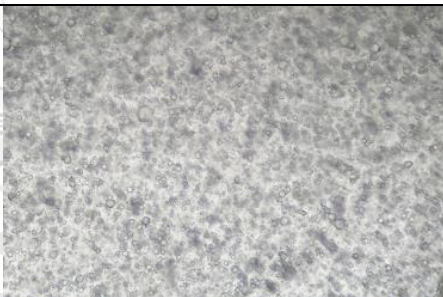

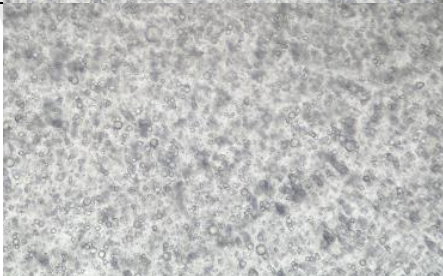


ในกลุ่มที่ 2 ที่เตรียมเม็ดปืดส์จากอัลจินตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และแปรผันความเข้มข้นเพคติน พบว่า ลักษณะเม็ดปืดส์มีความกลมมากขึ้น และเมื่อใช้ความเข้มข้นของเพคตินร้อยละ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก เม็ดปืดส์จะเปลี่ยนรูปทรงแบนรี อันเกิดจากการเพิ่มปริมาณเพคติน




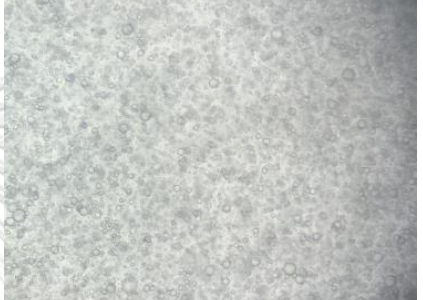
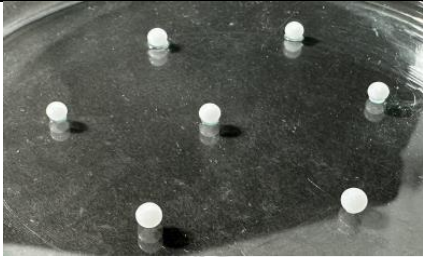
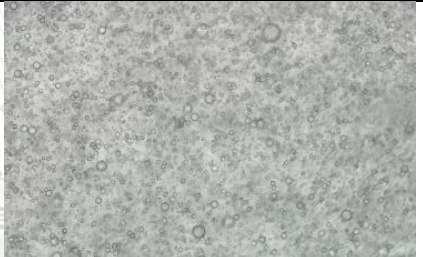




ในกลุ่มที่ 3 ที่เตรียมเม็ดปืดส์จากอัลจินตร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนัก และแปรผันความเข้มข้นเพคติน พบว่า เม็ดปืดส์ที่เตรียมได้จะมีความกลมจากการเพิ่มปริมาณอัลจินเตทำให้เกิดทรงกลมชัดเจน ในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับเพคติน ทำให้ไม่มีมุมเหลี่ยมเกิดขึ้น นั่นคือ ความเข้มข้นของเพคตินส่งผลต่อขนาดของเม็ดปืดส์ที่แตกต่างออกไป เมื่อความเข้มข้นของเพคตินสูงขึ้นจะทำให้ขนาดของเพคตินเพิ่มขึ้นตามซึ่งถ้ามากเกินไปก็จะทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นทรงกลม หรืออาจทำให้เกิดรูปร่างที่แตกต่างกัน ได้แก่ ไม่เป็นรูปทรง เป็นทรงกลม หรือทรงรี ตามงานวิจัยของ Xingxin Hu และคณะ [27]



ตารางที่ 7 แสดงลักษณะของอิมัลชันและเม็ดปิดส์ที่เตรียมจากสัดส่วนความเข้มข้นที่แตกต่างกัน
ระหว่างอัลจินต (ALG) และเพคติน (P)

อัตราส่วน ALG:P กลุ่มที่ 1		
อัตราส่วน ALG:P	เม็ดปิดส์ไฮโดรเจล	อิมัลชัน
0.25:0.25		
0.25:0.5		
0.25:1.0		
0.25:1.5		
0.25:2.0		

อัตราส่วน ALG:P กลุ่มที่ 2		
อัตราส่วน ALG:P	เม็ดปิดสีไฮโดรเจล	อิมัลชัน
0.5:0.25		
0.5:0.5		
0.5:1.0		
0.5:1.5		
0.5:2.0		

อัตราส่วน ALG:P กลุ่มที่ 3		
อัตราส่วน ALG:P	เม็ดปิดสีไฮโดรเจล	อิมัลชัน
1.0:0.25		
1.0:0.5		
1.0:1.0		
1.0:1.5		
1.0:2.0		

4.3 การศึกษาคุณสมบัติของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลระหว่างอัลจินตและเพคตินที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชา ลักษณะทางกายภาพและขนาดเม็ดบีดส์

การศึกษาขนาดเม็ดบีดส์ในการดูดซับส่วนของความเข้มข้นที่ต่างกันนั้น มีผลต่อขนาดของเม็ดบีดส์ หลังจากการขึ้นรูปเม็ดบีดส์จะมีการนำมาวัดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดบีดส์ Vernier Caliper เป็นหน่วยมิลลิเมตร และดูจำนวนเม็ดบีดส์ที่ได้จากการหยดจากเข็มที่มีปริมาตร 10 มิลลิลิตร

ตารางที่ 8 ขนาดเฉลี่ยของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลที่เตรียมจากสัดส่วนต่างๆ

อัตราส่วนอัลจินตต่อเพคติน	จำนวนเม็ดบีดส์ที่ได้จาก ปริมาตรของสารหล่อหุ้ม 10 ml	ขนาดเฉลี่ย (mm.) ของเม็ดบีดส์
ALG:P		
0.25:0.25	390	2.61 ± 0.01
0.25:0.5	384	2.68 ± 0.05
0.25:1.0	357	2.90 ± 0.09
0.25:1.5	340	3.36 ± 0.01
0.25:2.0	320	3.52 ± 0.01
0.5:0.25	386	2.77 ± 0.01
0.5:0.5	385	2.82 ± 0.01
0.5:1.0	364	2.87 ± 0.01
0.5:1.5	343	3.43 ± 0.01
0.5:2.0	317	4.04 ± 0.01
1.0:0.25	389	3.07 ± 0.01
1.0:0.5	354	2.99 ± 0.01
1.0:1.0	340	3.12 ± 0.01
1.0:1.5	320	3.18 ± 0.01
1.0:2.0	310	3.48 ± 0.01

จากตารางที่ 8 เม็ดบีดส์ที่ได้จากการเตรียมสารหล่อหุ้มด้วยอัลจินตและเพคติน ในการบรรจุน้ำมันเมล็ดชา นำมาใส่เข็มเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 0.5 มิลลิเมตร บรรจุสารละลายปริมาตร 10 มิลลิเมตร เพื่อดูจำนวนของเม็ดบีดส์อยู่ที่ระหว่าง 310-390 เม็ด ทำการสุ่มตรวจเม็ดบีดส์จำนวน 50 เม็ดจากทั้งหมดของแต่ละอัตราส่วน เพคตินมีผลต่อขนาดของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจล กลุ่มที่ 3 จะมีขนาดใหญ่มากที่สุด

รองลงมาคือ กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 1 ตามลำดับ กลุ่มที่ 1 เม็ดไฮโดรเจลจะมีขนาดเล็กที่สุด อัตราส่วนความเข้มข้นอัลจินตต่อเพคตินที่ 0.25:0.25 และ 0.25:0.5 ไม่เป็นรูปทรงเนื่องจากความหนืดที่ต่ำทำให้ขณะที่มีปล่อยสารละลายจากเข็มลงไปสารละลายจะเกาะกันค่อนข้างต่ำและยังไม่มีกรจับตัวในการเกิดโครงสร้างได้เยอะพอในการทำให้เกิดความแข็งแรง อัตราส่วนอัลจินตต่อเพคตินที่ 0.5:1.0 และ 0.5:2.0 โดยน้ำหนักจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่ที่สุด เนื่องจากรูปทรงถูกเปลี่ยนจากทรงกลมเป็นกลมแบนรี ทำให้เกิดความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าเม็ดบีดส์ในอัตราส่วนอื่นๆ ตามงานวิจัยของ Rejendra Awasthi ปี 2017 และคณะ ขนาดความใหญ่ของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจล ของเพคตินจะขึ้นอยู่กับความหนืดที่สูงขึ้น เพราะปริมาณเพคตินที่สูงมากมีผลต่อค่าความหนืดที่สูงขึ้น วิธีการใช้เข็ม Syringe ในการหยดสารละลายมูมปลายจะเกิดการทิ้งตัวข้างลง ทำให้รูปทรงมีขนาดใหญ่ขึ้น

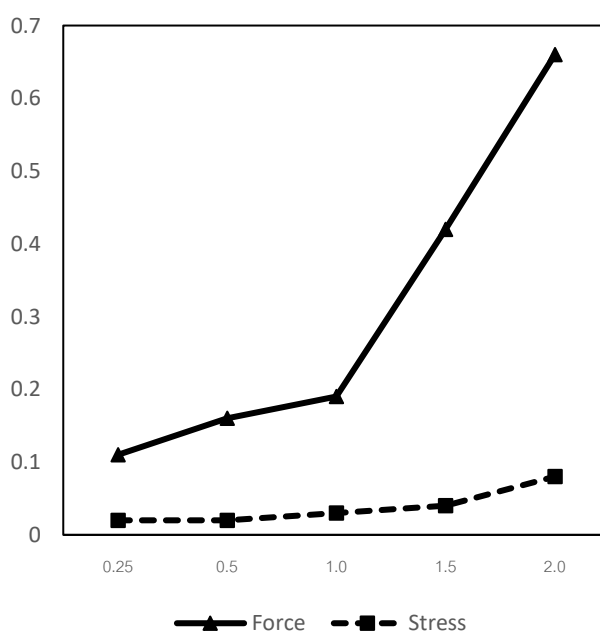
4.4 ศึกษาสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบความแข็งแรงของเม็ดบีดส์

กลุ่มที่ 1 เม็ดบีดส์ไฮโดรเจลที่เตรียมจากความเข้มข้นอัลจินตร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนัก และแปรผันความเข้มข้นของเพคติน พบว่า จากกราฟแสดงค่าของแรงเค้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.08 N/mm² และแรงกดอยู่ที่ค่า 0.11 ถึง 0.66 นิวตัน ค่าแรงที่ใช้ในการกดและความเค้นจะแปรผันตามปริมาณความเข้มข้นของเพคตินที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเพคตินมีการจับกับแคลเซียมไอออนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความยืดหยุ่นจากโครงสร้าง egg box อัลจินตร้อยละ 0.25 โดยน้ำหนักที่แปรผันเพคตินที่ร้อยละ 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก เม็ดบีดส์จะมีความอ่อนนุ่มแต่มีรูปทรงไม่แน่นอน ขณะที่เม็ดบีดส์ที่เพิ่มความเข้มข้นเพคตินที่ 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักจะมีความเหนียวเพิ่มขึ้นและรูปร่างเป็นทรงกลม

การวิเคราะห์ความเค้นของกลุ่มที่ 2 ซึ่งเตรียมจากความเข้มข้นอัลจินตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก แปรและแปรผันความเข้มข้นของเพคติน พบว่า เมื่อปรับอัตราส่วนจากร้อยละ 0.25 เป็น 0.5 โดยน้ำหนักจะทำให้เกิดความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เพราะทั้งอัลจินตและเพคตินต่างเกิดการเกิดโครงสร้าง Egg Box โดยค่าแรงกดมีค่าตั้งแต่ 0.09 ถึง 2.76 นิวตันและความเค้นอยู่ที่ 0.014 ถึง 0.34 N/mm² เมื่อนำไปใช้งานพบว่าเมื่อทำการบีบจะเริ่มใช้แรงในการบีบมากขึ้นจึงสามารถแตกได้ โดยรูปร่างจะเปลี่ยนแปลงจากรูปทรงกลมที่อัตราส่วน 0.5 ต่อความเข้มข้นเพคติน 0.25, 0.5 และ 1.0 และความเข้มข้นเพคตินที่ 1.5 และ 2.0 จะเกิดเป็นรูปทรงรี

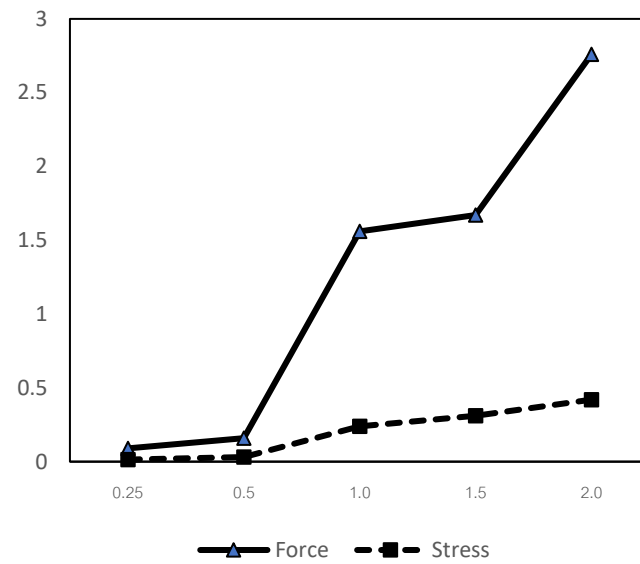
ผลจากการทดสอบความแข็งแรงในกลุ่มที่ 3 จากการเตรียมความเข้มข้นอัลจินต์ร้อยละ 1.0 โดย น้ำหนักและแปรผันความเข้มข้นของเพคติน พบว่า ค่าความเค้นอยู่ที่ 0.04 ถึง 0.58 N/mm² และ ค่าแรงที่กดทับอยู่ที่ 0.35 ถึง 4.03 นิวตัน ความเข้มข้นของอัลจินต์และเพคตินทำการบีบยากมากขึ้น โครงสร้างที่แข็งแรงจากการยึดเกาะภายในมากขึ้นจากการจับกันของแคลเซียมไอออนที่มากขึ้น จาก งานวิจัย Xu Wang และคณะ ปี 2021 [28] พบว่าลักษณะทางกายภาพของเม็ดบีตส์ เมื่อนำไป ทดสอบความแข็งแรง (Hardness) การยืดหยุ่น (Resilience) การเพิ่มเพคตินเป็นความยืดหยุ่นและ ความแข็งแรงให้กับเม็ดบีตส์ ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทั้งอัลจินต์และเพคตินจะส่งผลต่อ คุณสมบัติเชิงกล ในแง่ของการเพิ่มสัดส่วนเนื่องจากการทำงานร่วมกันของ G-blocks ของอัลจิ เนตและเมทิลเอสเทอร์ของเพคติน จากการเพิ่มอัตราส่วนอัลจินต์ต่อเพคติน 25:75 และ 75:25 แสดงถึงความเสถียรทางเชิงกลที่ดีขึ้น ความเข้มข้นของเพคตินที่สูงขึ้น เป็นไปตามงานวิจัยของ Bekhit [29] ซึ่งเพคตินจะทำการจับตัวกับแคลเซียมไอออนได้มากขึ้นให้เกิดโครงสร้าง Egg box ที่ มากขึ้น ในทางเดียวกันสายโซ่ของเพคตินที่มีความยาวขึ้นทำให้สร้างอัตรปฏิกิริยาได้มากขึ้น ทำให้เกิด ความแข็งแรงของโครงสร้าง เมื่อได้รับแรงกดทับจะสามารถทนแรงได้สูงขึ้น กลุ่มที่ 3 จึงมีค่าแรงและ ความเค้นสูงที่สุด

COMPRESSIVE TEST FORCE (N) & STRESS
(N/mm²) GROUP 1



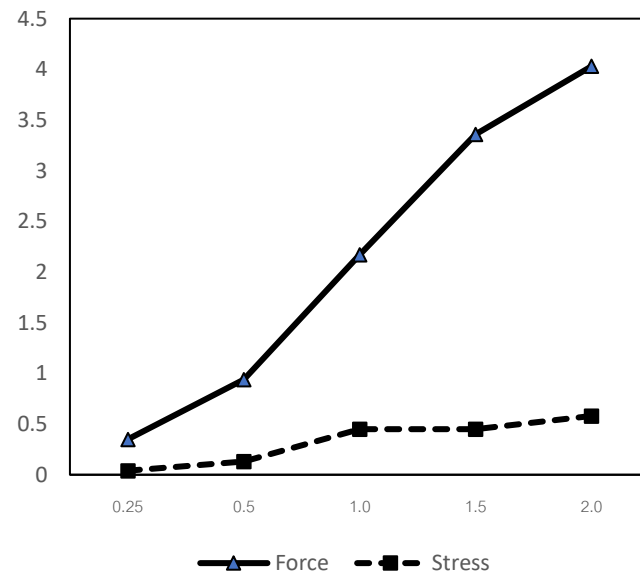
รูปที่ 13 กราฟแสดงค่าความสามารถรับแรงกดสูงสุดของเม็ดบีตส์ในกลุ่มที่ 1

COMPRESSIVE TEST FORCE (N) & STRESS
(N/mm²) GROUP 2



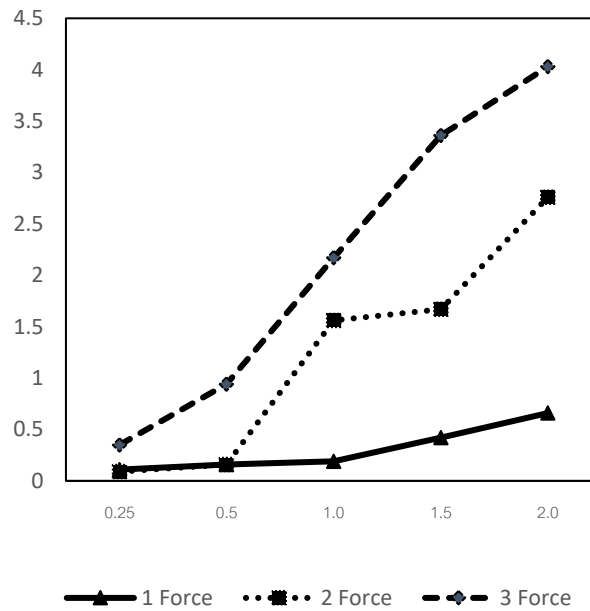
รูปที่ 14 กราฟแสดงค่าความสามารถรับแรงกดสูงสุดของเม็ดปิดสีในกลุ่มที่ 2

COMPRESSIVE TEST FORCE (N) & STRESS
(N/mm²) GROUP 3



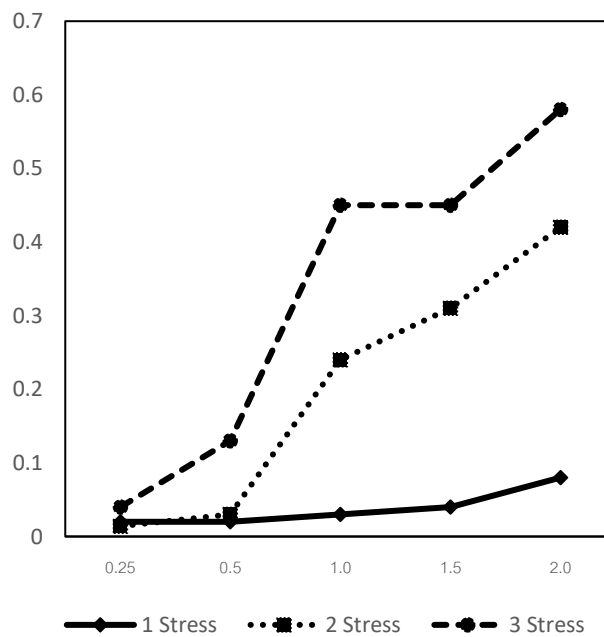
รูปที่ 15 กราฟแสดงค่าความสามารถรับแรงกดสูงสุดของเม็ดปิดสีกลุ่มที่ 3

COMPARISON BETWEEN GROUP 1, 2, 3
(Force; N)



รูป 16 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบแรงกดสูงสุดของเมดบิตส์กลุ่มที่ 1, 2, 3

COMPARISON BETWEEN GROUP 1,2,3
(Stress; N/mm²)



รูป 17 กราฟแสดงค่าเปรียบเทียบความเค้นของเมดบิตส์กลุ่มที่ 1, 2, 3

4.5 ศึกษาความสามารถในการคงตัวของเม็ดปิดสีไฮโดรเจล เพื่อเลือกตัวกลางที่เหมาะสมในการเก็บเม็ดปิดสีที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชา


























เมื่อทำการศึกษาความสามารถในการคงตัวของเม็ดปิดสีไฮโดรเจล สำหรับการเลือกตัวกลางที่เหมาะสมในการกักเก็บเม็ดปิดสีที่บรรจุน้ำมันเมล็ดชา มีตัวกลางที่แตกต่างกัน 5 ชนิด ดังนี้

1. ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจล โดยจะเตรียมจากสารก่อเจลคาร์โบพอลความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยควบคุม pH ของไฮโดรเจลอยู่ที่ 5.56 ± 0.03 และมีความหนืดอยู่ที่ 32.1 ± 0.96 cP
2. สารละลายบัฟเฟอร์ pH 5 เตรียมจากสารละลาย โซเดียมอะซิเตดความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ และกรดอะซิติกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งสารที่มี pH 5.5 เป็นค่าที่เหมาะสมกับผิวหนังมากที่สุดความเป็นกรดอ่อนๆ คล้ายธรรมชาติของพื้นผิวหนังชั้นบนที่สุด
3. น้ำมันขาว (Mineral oil หรือ Paraffinum liquidum) เป็นสารที่มักนำมาใช้เครื่องสำอาง ผลิตภัณฑ์บำรุงผิว และผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผิว เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นฟิล์มน้ำมันเคลือบบริเวณผิวหนังชั้นบนเพื่อเก็บรักษาความชุ่มชื้นให้กับผิวหนังเป็นโมเลกุลใหญ่เป็นสารที่สกัดมาจากน้ำมันปิโตรเลียม
4. โพลีเอทิลีนไกลคอล (Poly Ethylene Glycol: PEG 400) เป็นสารทำละลาย (Solvent) และตัวนำ (Carrier) ที่ดีและปลอดภัยในเครื่องสำอาง ซึ่งเป็นสารเคมีสังเคราะห์มีคุณสมบัติชอบน้ำสูง
5. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water)


























จากการทดสอบความคงตัวของเม็ดปิดสีในตัวกลาง 5 ประเภท ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจล สารละลายบัฟเฟอร์ น้ำมันขาว โพลีเอทิลีนไกลคอล และน้ำกลั่น จะทำการปิดทึบไม่ให้แสงส่องผ่านเนื่องจากอาจทำลายน้ำมันเมล็ดชาที่ถูกบรรจุในเม็ดปิดสี เป็นเวลาทั้งหมด 45 วัน โดยการแช่ในน้ำและสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5 จะมีการชั่งน้ำหนักเม็ดปิดสีก่อนและหลังเพื่อทำการหาค่าร้อยละการขยายตัวในส่วนถัดไป เบื้องต้นพบว่าเม็ดปิดสีทุกอัตราส่วนในกลุ่มที่ 1, 2 และ 3 จะมีการขยายตัวทั้งในน้ำปราศจากไอออนและในสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งจะมีความคงตัวที่ดี การเก็บสารเม็ดปิดสีไฮโดรเจลไว้ในผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจล พบว่าเม็ดไฮโดรเจลมีการขยายตัวบวมใหญ่มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป แต่สภาพคงตัว ไม่ละลาย การนำเม็ดปิดสีไปทดสอบในน้ำมันขาว (Mineral oil) มีสภาพคงตัวไม่มีการแตกตัวหรือเกิดการบวมจากสภาพก่อนและหลังไม่แตกต่างกัน และลักษณะเม็ดปิดสีจะเกาะกลุ่มเป็นก้อนเดียวกันในตัวกลางประเภทนี้ ไม่แยกออกจากกันเป็นเม็ดๆ ไม่มีน้ำมันเมล็ดชาละลายออกหรือมีการซึมมาจากเม็ดปิดสี เมื่อเก็บเม็ดปิดสีไฮโดรเจล ทำการเก็บไว้ใน Polyethylene glycol 400 เป็นเวลา

45 วัน พบว่าเม็ดปิดส์ทุกอัตราส่วนไม่สามารถคงตัวอยู่ได้ มีลักษณะบางและเล็กลง นั่นคือ เม็ดปิดส์ไฮโดรเจลสามารถละลายในไขมันได้ดี


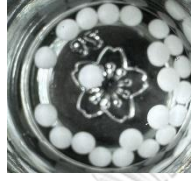























ตารางที่ 9 ความคงตัวของเม็ดปิดส์กลุ่มที่ 1 ในตัวกลางชนิดต่างๆเป็นระยะเวลา 45 วัน

กลุ่มที่ 1	ALG : P 0.25:0	ALG : P 0.25:0.5	ALG : P 0.25:1.0	ALG : P 0.25:1.5	ALG :P 0.25:2.0
DI					
PEG					
Mineral oil					
pH buffer					
Hydrogel					

ตารางที่ 10 ความคงตัวของเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 2 ในตัวกลางชนิดต่างๆเป็นระยะเวลา 45 วัน

กลุ่มที่ 2	ALG : P 0.5:0.25	ALG : P 0.5:0.5	ALG : P 0.5:1.0	ALG : P 0.5:1.5	ALG : P 0.5:2.0
DI					
PEG					
Mineral oil					
pH buffer					
Hydrogel					

ตารางที่ 11 ความคงตัวของเม็ดปิดสักลุ่มที่ 3 ในตัวกลางชนิดต่างๆเป็นระยะเวลา 45 วัน

กลุ่มที่ 3	ALG : P 1.0:0.25	ALG : P 1.0:0.5	ALG : P 1.0:1.0	ALG : P 1.0:1.5	ALG:P 1.0:2.0
DI					
PEG					
Mineral oil					
pH buffer					
Hydrogel					

4.6 การศึกษาความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์ในน้ำกลั่น และในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 5.5

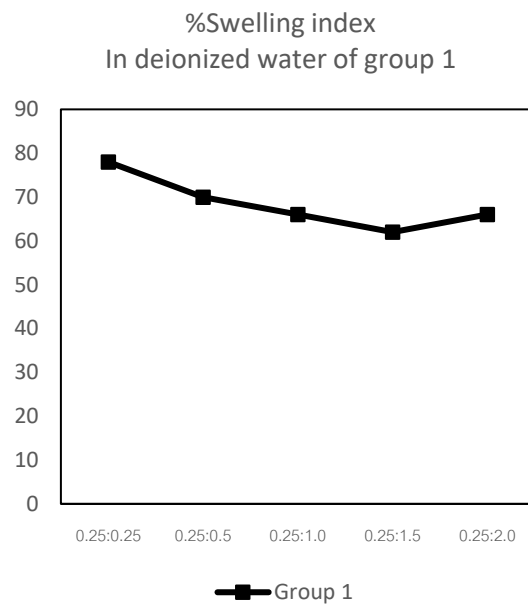
การขยายตัวของเม็ดบีดส์ในตัวกลางแต่ละชนิดเป็นเวลา 45 วัน สำหรับเก็บเม็ดบีดส์ไว้ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5 และน้ำกลั่น (Deionized water) มีการขยายตัว ซึ่งจะมีการชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการขยายตัวเพื่อดูความเปลี่ยนแปลงการขยายตัวของเม็ดบีดส์จากทั้ง 2 ตัวกลาง จากสมการร้อยละการขยายตัวของเม็ดบีดส์ตามด้านล่างนี้

$$\text{ร้อยละการขยายตัวของเม็ดบีดส์} = \frac{\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}}{\text{น้ำหนักแห้ง}} \times 100$$

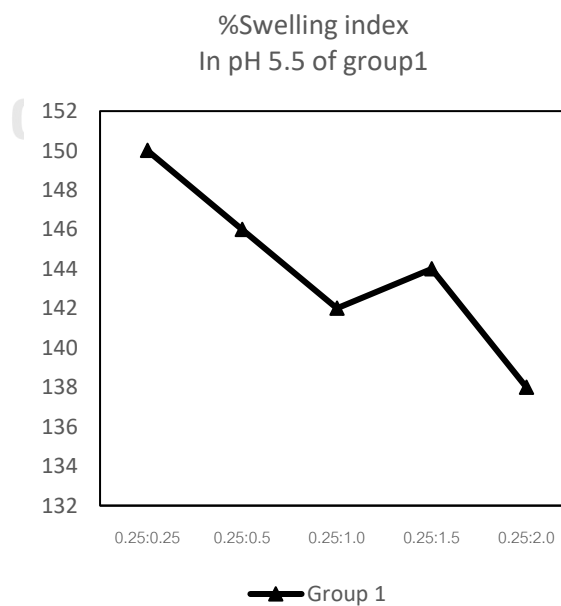
ผลจากการวิเคราะห์เมื่อคำนวณการขยายตัวของเม็ดบีดส์ทั้งหมด 3 กลุ่ม อัตราส่วนอัลจินเตร์ร้อยละ 0.25, 0.5 และ 1.0 โดยน้ำหนัก แปรผันเพคตินร้อยละ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละการขยายตัวของเม็ดบีดส์ในน้ำกลั่นอยู่ที่ 62 – 78 % และกลุ่มที่ 2 ร้อยละอยู่ที่ 48 – 56% และกลุ่มที่ 3 ร้อยละอยู่ที่ 14 – 36% จากงานวิจัยของ Silvia ปี 2017 และคณะ พบว่าการทำไฮโดรเจลบีดส์จากการเชื่อมขวางเพคตินอย่างเดียวในการขึ้นรูป ทำการแช่น้ำเพื่อดูการขยายตัว พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินทำให้มีการขยายตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดที่ใหญ่ขึ้นของการเชื่อมขวางของไฮโดรเจลทำให้มีการสร้างพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากเพคติน จำนวนของพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการขยายตัวได้เร็วขึ้นนอกจากนี้อัลจินเตและเพคตินยังเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (hydrophilic) จึงทำให้การดูดซับน้ำไว้ แต่การผสมอัตราส่วนระหว่างอัลจินเตและเพคตินจะเกิดการเชื่อมขวางทั้งสองพอลิเมอร์และมีการจัดโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นทำให้น้ำสามารถแพร่ผ่านเข้าไปด้านในยากขึ้น จึงทำให้เกิดการขยายตัวได้ลดลงในกลุ่มที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบการขยายตัวในสารละลายบัฟเฟอร์พบว่าร้อยละมีค่าเป็น 1-2 เท่าจากการขยายตัวในน้ำกลั่น

ผลการแช่เม็ดบีดส์ในสารละลายบัฟเฟอร์ โดยกลุ่มแรกมีค่าร้อยละอยู่ที่ 138 – 150% กลุ่มที่ 2 มีค่าร้อยละอยู่ที่ 96 – 120% กลุ่มที่ 3 มีค่าร้อยละอยู่ที่ 28 – 50% พบว่ามีร้อยละการละลายในสารละลายบัฟเฟอร์ลดลง กลุ่มสุดท้ายจะมีการละลายน้อยที่สุด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของเพคตินมีผลต่อการขยายตัวของเม็ดบีดส์ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่ากลาง แต่การเชื่อมขวางจากโครงสร้างทั้งอัลจินเตและเพคตินทำให้การแพร่ทะลุผ่านเข้าไปยังเม็ดบีดส์เพื่อให้เกิดการขยายตัวได้ลดลง ซึ่งการเชื่อมขวางแบบคู่ (Dual crosslink) จะสามารถขยายตัวได้น้อยกว่า การเชื่อมขวางแบบเดี่ยว (Single crosslink) เพราะรูพรุนจะลดลงโดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของทั้งอัลจินเตและเพคตินก็จะ

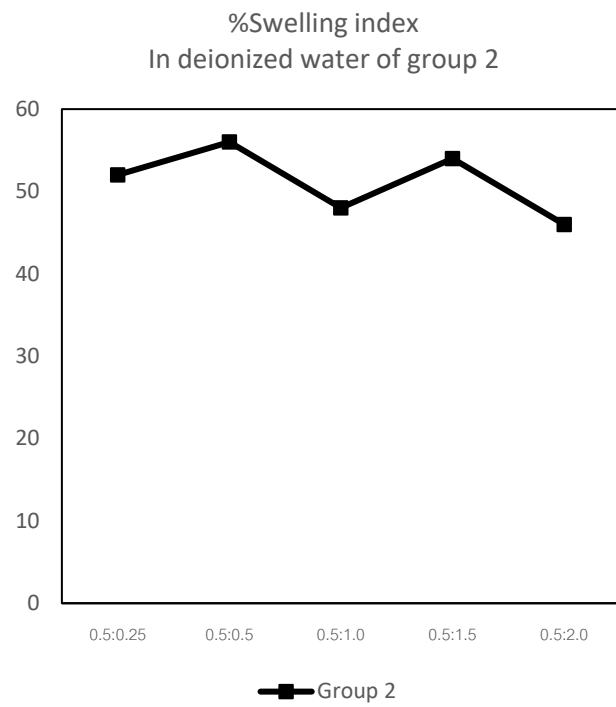
มียิ่งมีการเพิ่มความหนาแน่นการเชื่อมขวางมากขึ้น อย่างมีนัยยะและโครงสร้างที่ผิวที่แตกจะลดลงไปด้วยเมื่อนำโครงสร้างไปส่องดูสัณฐานภายนอกด้วยวิธีการ SEM สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rajendra Awasthi ในปี 2017 [30]



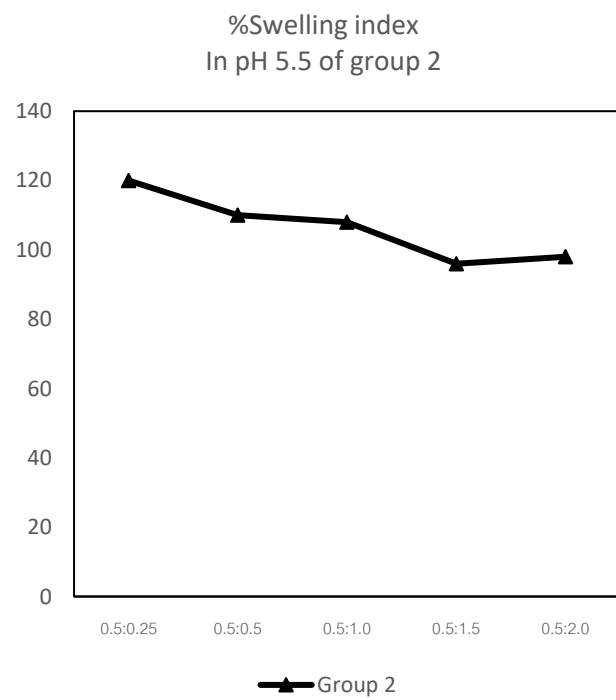
รูปที่ 18 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 1 ในน้ำปราศจากไอออน



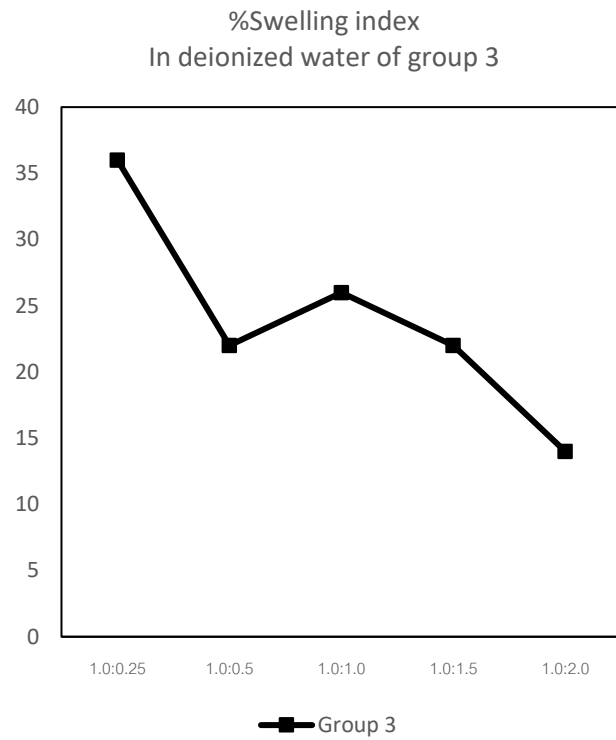
รูปที่ 19 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 1 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5



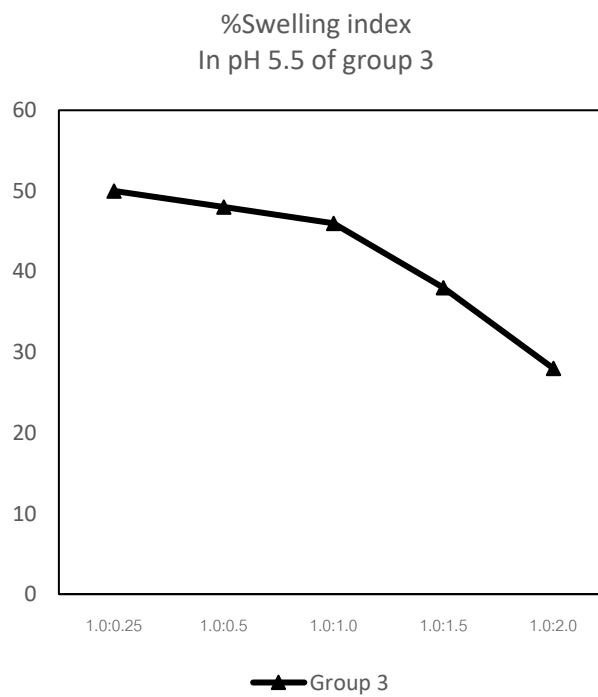
รูปที่ 20 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 3 ในน้ำปราศจากไอออน



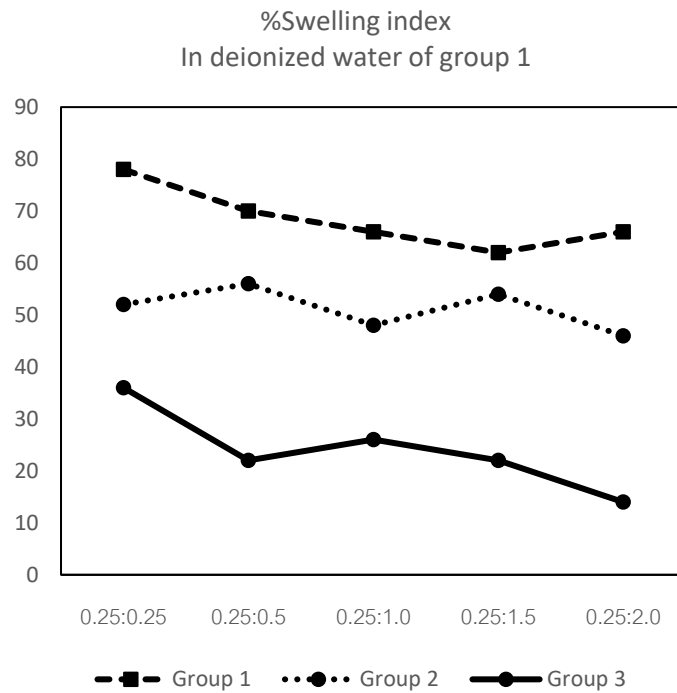
รูปที่ 21 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 2 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5



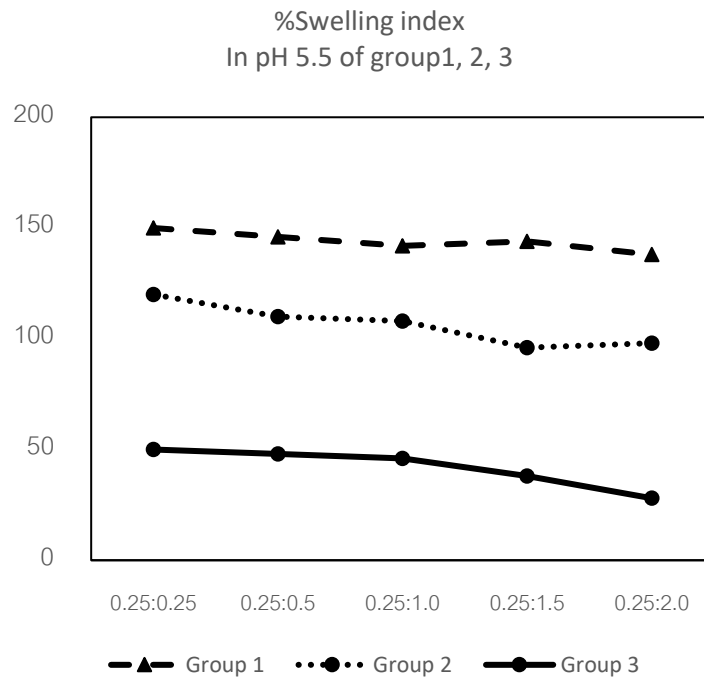
รูปที่ 22 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 3 ในน้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 23 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวของเม็ดบีดส์กลุ่มที่ 3 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5

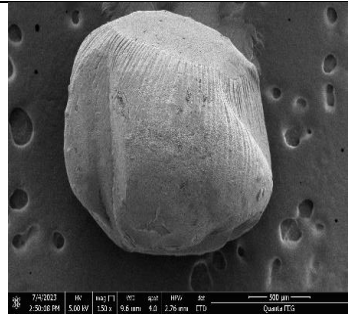
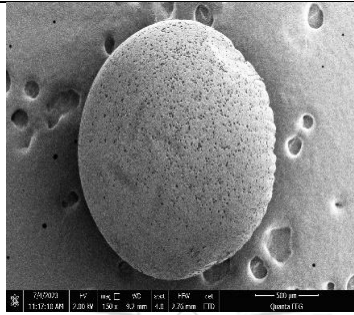
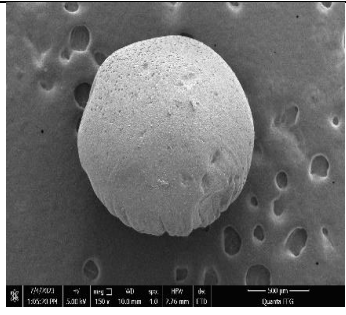
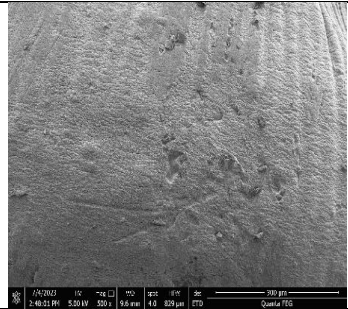
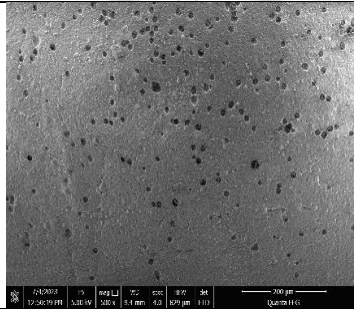
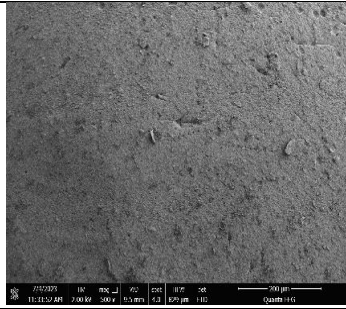
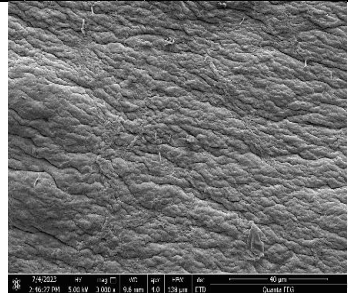
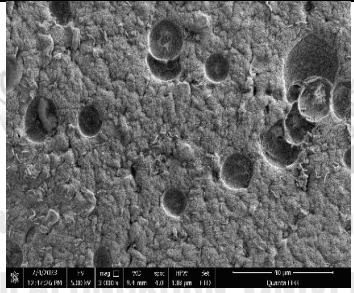
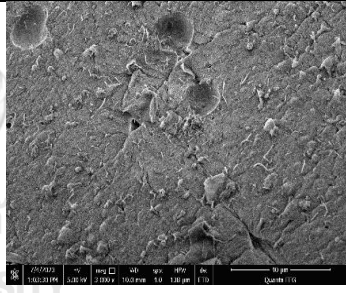
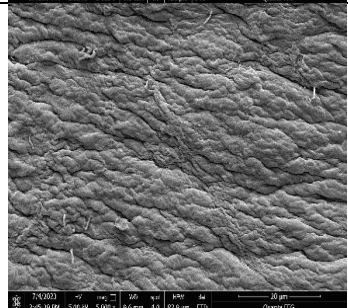
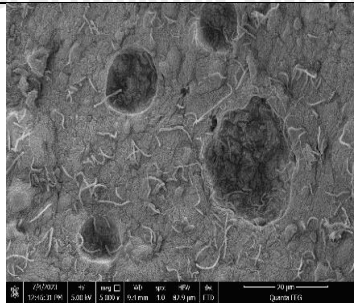
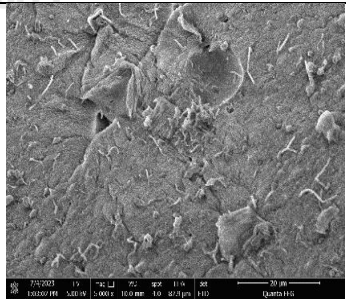


รูปที่ 24 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวของเม็ดปิดสีกกลุ่มที่ 1,2,3 ในน้ำปราศจากไอออน


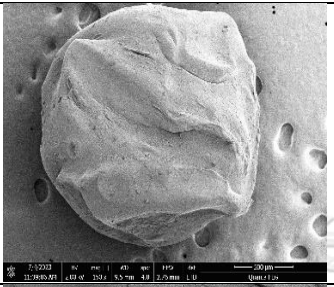
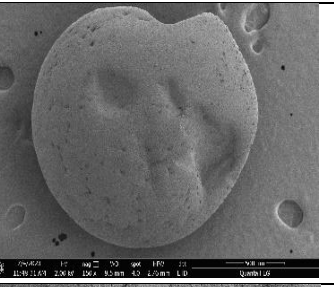
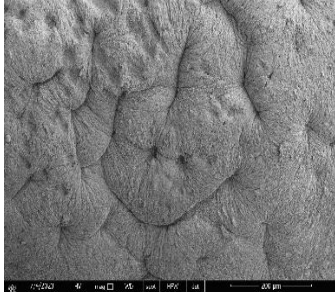
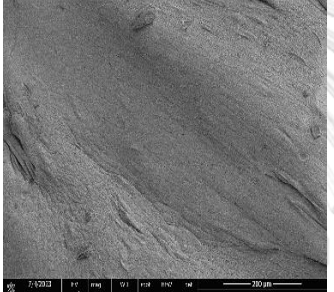
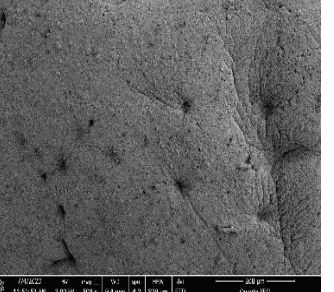
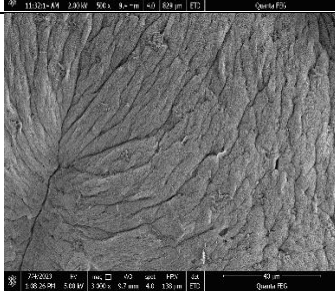
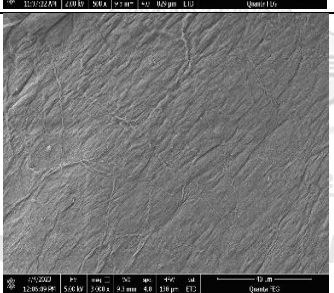
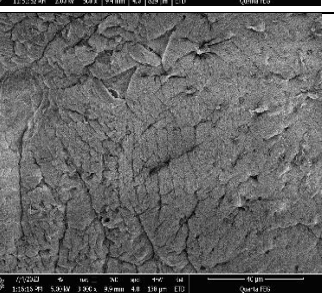
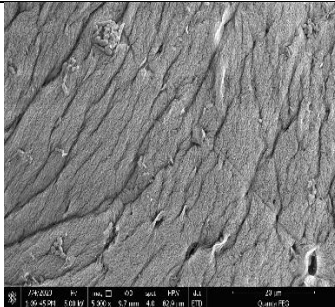
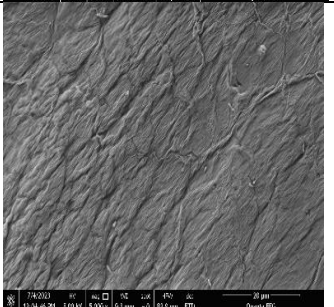
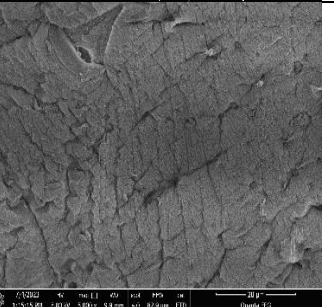


รูปที่ 25 กราฟแสดงความสามารถในการขยายตัวของเม็ดปิดสีกกลุ่มที่ 1,2,3 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5

ตารางที่ 12 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดไฮโดรเจลของกลุ่มที่ 1 ด้วยเทคนิค FE-SEM

อัตราส่วนALG:P 0.25:0.25	อัตราส่วน ALG:P 0.25:1.0	อัตราส่วน ALG:P 0.25:2.0	กำลัง ขยาย
			150
			500
			3,000
			5,000

ตาราง 13 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดไฮโดรเจลของกลุ่มที่ 2 ด้วยเทคนิค FE-SEM

อัตราส่วนALG:P 0.5:0.25	อัตราส่วน ALG:P 0.5:1.0	อัตราส่วน ALG:P 0.5:2.0	กำลัง ขยาย
			150
			500
			3,000
			5,000

ตาราง 14 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดไฮโดรเจลของกลุ่มที่ 3 ด้วยเทคนิค FE-SEM

อัตราส่วน ALG:P 1.0:0.25	อัตราส่วนALG:P 1.0:1.0	อัตราส่วน ALG:P 1.0:2.0	กำลัง ขยาย
			150
			500
			3,000
			5,000

4.7 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดโตรเจลด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

การศึกษาสัณฐานเม็ดบีดส์จะใช้กำลังขยายทั้งหมด 4 ช่วงด้วยกัน คือ ที่กำลังขยาย 150, 500, 3000 และ 5000 เพื่อทำการดูลักษณะพื้นผิวของเม็ดบีดส์ รูปทรงเม็ดบีดส์ ลักษณะรูพรุน เพื่อทำการอธิบายลักษณะสารห่อหุ้มที่ใช้อัลจิเนตและเพคตินหลังจากที่ผ่านการทำให้แห้ง ได้ผลวิเคราะห์ดังนี้

ผลการวิเคราะห์กลุ่มที่ 1 จากการเตรียมความเข้มข้นอัลจิเนตต่อเพคติน 0.25:0.25 โครงสร้างไม่เป็นรูปทรง มีลักษณะนุ่มเหนียวและผิวขรุขระ เนื่องจากความเข้มข้นของพอลิเมอร์ทั้งสองยังมีปริมาณน้อยทำให้เกิดโครงสร้าง Egg box ไม่มาก ขณะที่ความเข้มข้นของทั้งอัลจิเนตและเพคตินที่ 0.25:1.0 ลักษณะของเม็ดบีดส์จะเป็นทรงกลมมากขึ้น ที่กำลังขยาย 150 และ 300 พื้นผิวแสดงถึงรูพรุนจำนวนมากและขนาดใหญ่ เมื่อปรับกำลังขยายเพิ่มขึ้นที่ 3,000 และ 5,000 โครงสร้างเริ่มมีการจับกันบน Calcium binding site มากขึ้น เพราะปริมาณความเข้มข้นของเพคตินที่เพิ่มขึ้นทำให้แคลเซียมมีพื้นที่ในการเข้าไปจับได้มากขึ้น น้ำสามารถแพร่ผ่านเข้าไปยังรูพรุนของเม็ดบีดส์ได้ทำให้เกิดการขยายตัว ที่ความเข้มข้นของเพคตินร้อยละ 2.0 โดยน้ำหนักพบว่า ลักษณะของเม็ดบีดส์มีรูปร่างเปลี่ยนไปเป็นรูปทรงรี เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของเพคตินทำให้เกิดความหนาแน่นมากขึ้นจึงทำให้ขนาดรูจึงลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนของเพคตินที่ร้อยละ 1.0

จากการศึกษาเม็ดบีดส์ในกลุ่มที่ 2 ทำการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนอัลจิเนตต่อเพคติน 0.5:0.25, 0.5:1.0 และ 0.5:2.0 ที่กำลังขยาย 150 เม็ดบีดส์มีลักษณะเป็นทรงกลมชัดเจน และที่ กำลังขยาย 3,000 และ 5,000 ลักษณะพื้นผิวเป็นคลื่นพับไปมาและขรุขระ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของอัลจิเนตส่งผลต่อโครงสร้างเกิดการเชื่อมขวางมากขึ้นรูจึงมีขนาดเล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มแรก การจัดเรียงตัวที่มากขึ้นจะเกิดความหนาแน่นของภายในเม็ดบีดส์ทำรูมีขนาดเล็กลง เป็นไปตามงานวิจัยของ Wu และคณะ [31]

กลุ่มสุดท้ายเม็ดบีดส์ โดยการศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนอัลจิเนตต่อเพคติน 1.0:0.25, 1.0:1.0 และ 1.0:2.0 พบว่า กลุ่มสุดท้ายเม็ดบีดส์จะมีลักษณะเป็นทรงกลมมากยิ่งขึ้นที่ กำลังขยาย 150 และเมื่อเพิ่มกำลังขยายไปที่ 3,000 และ 5,000 จะพบว่าพื้นผิวมีความเรียบเนียนมาก มีลักษณะคลื่นที่ลดลงมาก แทบจะไม่พบรูพรุนบนพื้นผิว ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บสารได้ดีเนื่องจากรูพรุนที่น้อยลง ความเข้มข้นของอัลจิเนตส่งผลทำให้มีพื้นที่สำหรับแคลเซียมในการเข้าไปยึดเกาะ ทำให้โครงสร้าง Egg box เกิดเป็นสายโซ่ยาวต่อกันไปมาหนาแน่นมากขึ้น ดังนั้นพื้นผิวจึงมีลักษณะที่เรียบเนียนบนเม็ดบีดส์

4.8 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

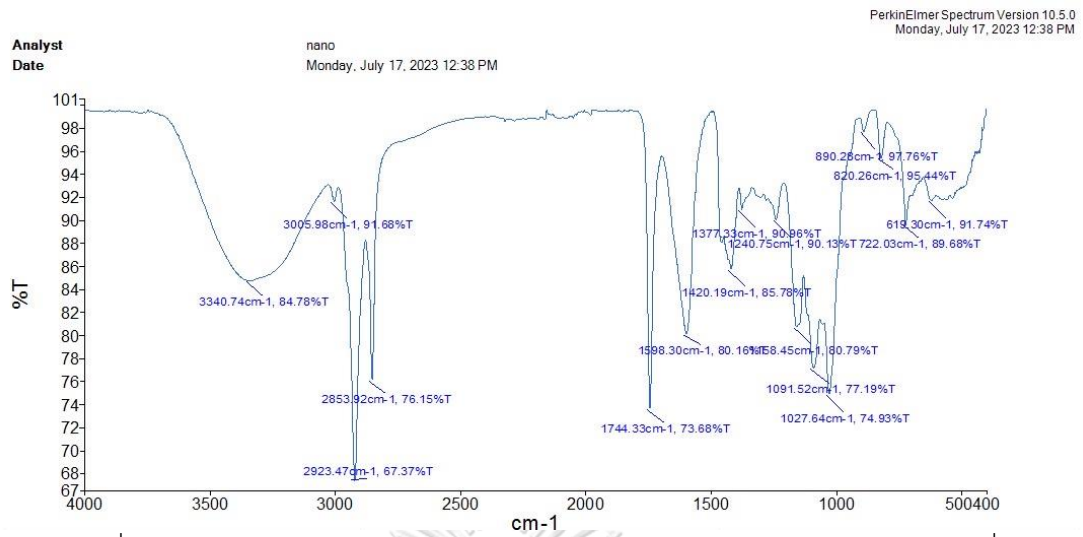
FTIR ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวของเม็ดไฮโดรเจลบีดส์อัลจิเนตและเพคติน โดยวัดจากค่าช่วงความยาวคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$ จากรูปที่ 26 ถึง 31

จากการนำเม็ดบีดส์ทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า นำไปดูโครงสร้างด้วย FTIR ลักษณะเม็ดบีดส์ที่มีอัลจิเนตและเพคติน เกิดการสั่นแบบ Stretching ของหมู่ O-H ที่การดูดกลืนอยู่ในช่วงค่า $3340.74 - 3005.98\text{ cm}^{-1}$ และ การสั่นแบบ Stretching ของหมู่ O-H (ไฮดรอกซิล) เกิดจาก β -D mannuronic acid และ α -L (1-4) guluronic acid จากอัลจิเนต สำหรับ Hydrogen bond จะพบที่ α -D galacturonic acid ช่วงที่พอลิเมอร์ทั้งสองมีการผสมกันของกระบวนการการสั่นจะลดลงมา เนื่องจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจน ในทางเทอร์โมไดนามิกแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เกิดจากพลังงานอิสระ (free energy) ของโมเลกุลที่เกิดการรวมกันด้วยอัลจิเนตและเพคติน และแรงดึงดูดระหว่างอัลจิเนตและเพคติน

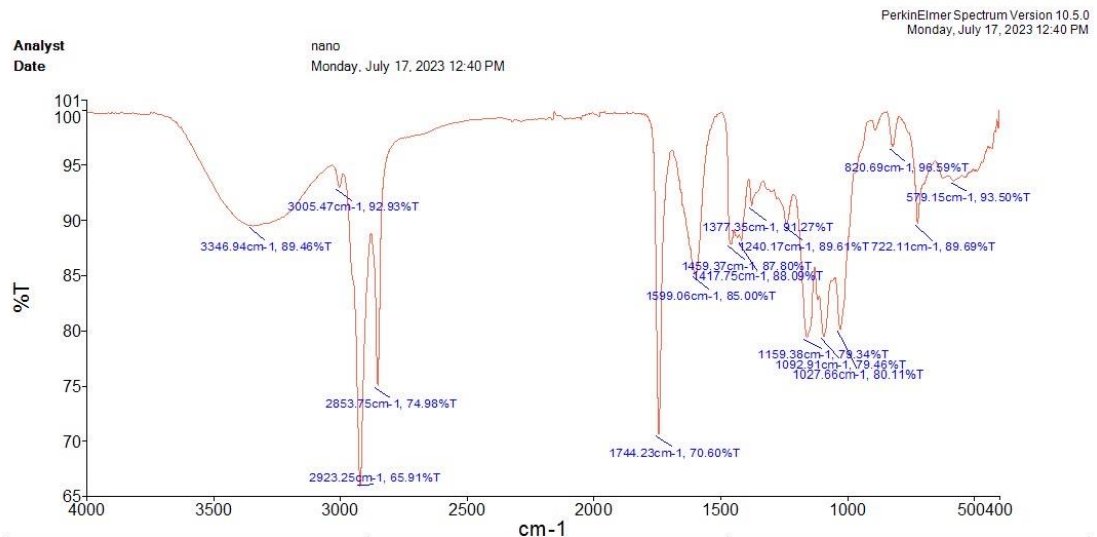
แรงดึงดูดระหว่างอัลจิเนตและเพคตินก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวอย่างช้าๆของอะลิฟาติก ที่แบน $2923.47 - 2853.92\text{ cm}^{-1}$

FTIR spectra ของหมู่คาร์บอนิลเอสเทอร์ (COCH_3) และการสั่นแบบ Stretching แบบไม่สมมาตรในไอออนคาร์บอกซิลิก (COO^-) ในเพคตินปรากฏอยู่ที่ $1744.33 - 1598.30\text{ cm}^{-1}$ ขณะที่การสั่นแบบ Stretching ที่สมมาตรของหมู่คาร์บอกซิลิกและการสั่นของอะเซทิลและเมทอกซิลปรากฏที่ 1420.19 และ 1377.33 cm^{-1} และมีแบนที่ $1240.75 - 1091.52\text{ cm}^{-1}$ บอกลถึงการจับยึดกันของหมู่ Ether $-\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพันธะไกลโคซิดิกของพอลิเมอร์ และการแสดงพีคที่มีค่าต่ำกว่า 800 cm^{-1} จะไม่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์

ซึ่งจากทั้งหมดสามกลุ่มในการใช้ FTIR ในการตรวจสอบเพื่อดูโครงสร้างทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า มีอัลจิเนตและเพคติน ซึ่งตำแหน่งของพีคมีค่าที่ใกล้เคียงกันในแต่ละช่วง มีการแสดงหมู่ฟังก์ชันที่เหมือนกัน การเพิ่มความเข้มข้นของแต่ละอัตราส่วนค่าแบนยังอยู่ในช่วงดังกล่าว และแสดงการเชื่อมขวางจากปฏิกิริยาในการที่แคลเซียมไอออนเข้าไปจับกับอัลจิเนตและเพคตินทำให้เกิดโครงสร้าง egg box เป็นไปตามงานวิจัยของ Hegi Adi (2021)

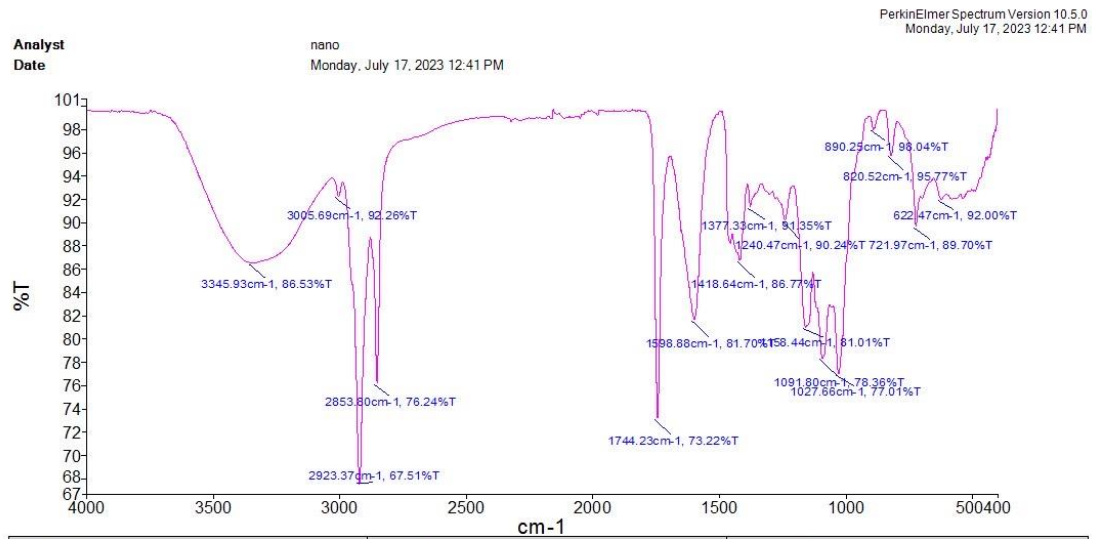


รูปที่ 26 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 0.25:0.5 กลุ่มที่ 1

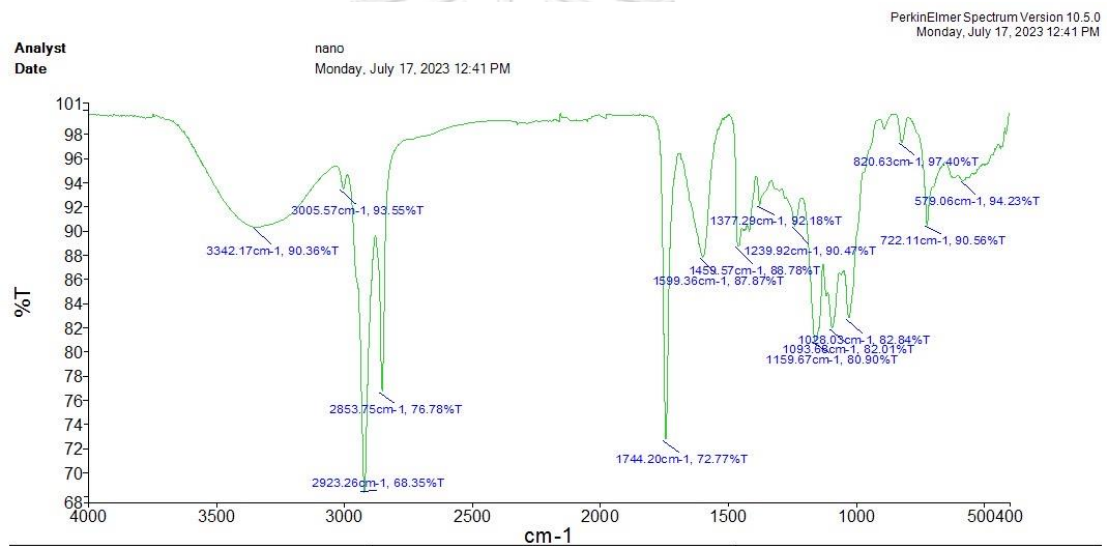


Sample Name	Description	Quality Checks
2_1	Sample 002 By nano Date Monday, July 17 2023	The Quality Checks give rise to a Weak Bands warning for the sample.

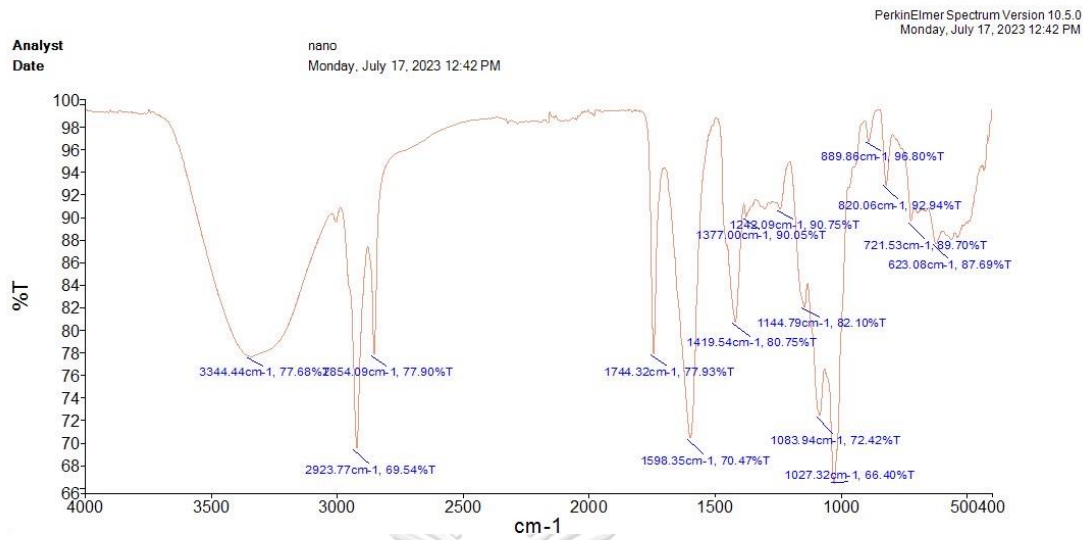
รูปที่ 27 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 0.25:1.5 กลุ่มที่ 1



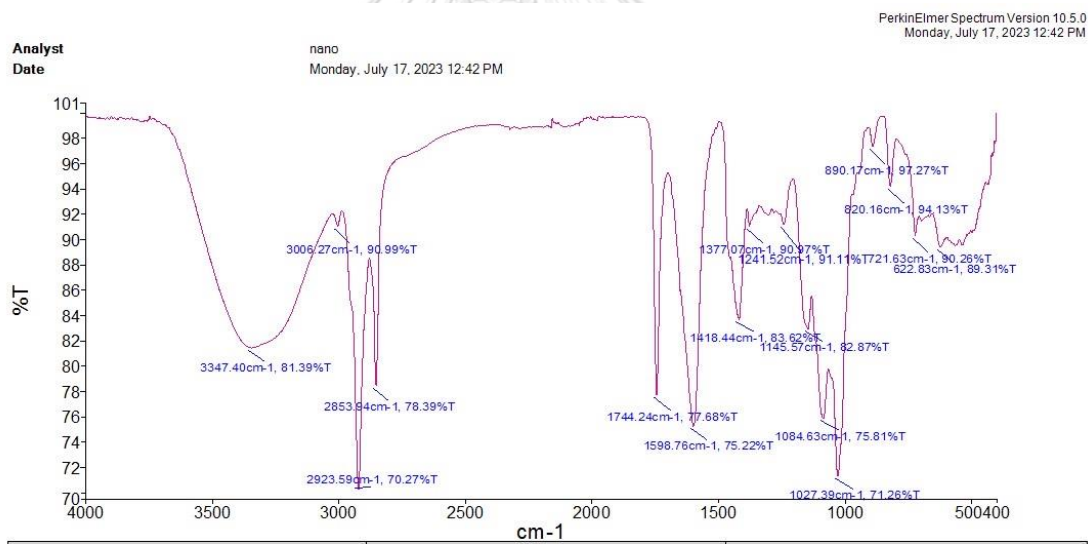
รูป 28 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 0.5:1.5 กลุ่มที่ 2



รูปที่ 29 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 0.5:1.5 กลุ่มที่ 2



รูปที่ 30 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 1.0:1.5 กลุ่มที่ 3



รูปที่ 31 แสดงการวัดค่า FTIR จากอัตราส่วนของอัลจินตต่อเพคติน 1.0:1.5 กลุ่มที่ 3

4.9 ศึกษาความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา ในเม็ดปิดส์ไฮโดรเจล (Encapsulation Efficiency)

ทำการวิเคราะห์ความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา โดยการชั่งเม็ดปิดส์ที่น้ำหนัก 0.05 กรัมตามแต่ละอัตราส่วน จากนั้นนำเม็ดปิดส์ไปละลายด้วยสารละลายเฮกเซนด้วยปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำตัวอย่างสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสง วัดด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ที่ค่าสเปกตรัม 208 นาโนเมตร โดยการสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้น (Standard curve) เพื่อนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา ผลการทดลองตามตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชาของเม็ดปิดส์ที่เตรียมในแต่ละกลุ่ม

อัตราส่วนอัลจินต	อัตราส่วนเพคติน	Encapsulation Efficiency (%)
0.25	0.25	56.65 ± 1.10
0.25	0.5	60.45 ± 1.40
0.25	1.0	62.79 ± 0.76
0.25	1.5	69.12 ± 0.43
0.25	2.0	72.67 ± 0.81
0.5	0.25	58.36 ± 0.22
0.5	0.5	61.53 ± 0.31
0.5	1.0	71.85 ± 0.11
0.5	1.5	77.22 ± 0.26
0.5	2.0	83.58 ± 0.37
1.0	0.25	66.84 ± 0.43
1.0	0.5	68.08 ± 0.17
1.0	1.0	77.48 ± 0.07
1.0	1.5	85.40 ± 0.28
1.0	2.0	99.36 ± 0.15

ผลการทดลองกลุ่มที่ 1 จากการเตรียมเม็ดบีดส์ด้วยอัตราส่วนอัลจินต 0.25 แปรผันตามอัตราส่วนเพคติน 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของเพคตินมีผลต่อร้อยละการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา โครงสร้างของเพคตินจะมีการจับกับแคลเซียมไอออนได้มากขึ้น ทำให้เกิดความหนาแน่น รูพรุนมีขนาดลดลงทำให้สามารถกักเก็บได้มากขึ้น กลุ่มที่ 1 มีค่าการกักเก็บที่ร้อยละ 56.65 ± 1.10 ถึง 72.67 ± 0.81 %

กลุ่มที่ 2 การเตรียมเม็ดบีดส์ด้วยอัตราส่วนอัลจินตที่เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักแปรผันตามเพคติน 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเพคตินมีผลต่อร้อยละการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา ขณะเดียวกันการเพิ่มความเข้มข้นของอัลจินตจากร้อยละ 0.25 เป็น 0.5 ทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบเพคตินที่ปริมาณความเข้มข้นเท่ากัน เนื่องจากอัลจินตช่วยเสริมโครงสร้างแข็งแรงขึ้นและลดปริมาณรูพรุนบนพื้นผิว พื้นที่ในการจับกันที่มากขึ้นจากปริมาณความเข้มข้นทั้งสองพอลิเมอร์ทำให้แคลเซียมสามารถเข้ามายึดกัน และเกิดโครงสร้าง egg box ที่ยาวขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชาสูงขึ้นจากกลุ่มแรก กลุ่มที่สอง มีค่าการกักเก็บอยู่ที่ 58.36 ± 0.22 ถึง 83.58 ± 0.37 %

กลุ่มที่ 3 การเตรียมเม็ดบีดส์ด้วยอัตราส่วนอัลจินตร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักแปรผันตามเพคติน 0.25, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของอัลจินตยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการกักเก็บที่สูงขึ้นเมื่อใช้เพคตินที่ปริมาณเท่ากันและสูงกว่าสองกลุ่มแรก การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นทั้งสองพอลิเมอร์ส่งผลต่อการกักเก็บของน้ำมันเมล็ดชาที่สูงขึ้น เป็นไปตามงานวิจัยของ Hegi และคณะปี 2021 [32] มีค่าการกักเก็บน้ำมัน 66.84 ± 0.43 ถึง 99.36 ± 0.15 % โดยร้อยละการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชาสูงที่สุดจากการเตรียมอัตราส่วนอัลจินตต่อเพคตินที่ 1.0:2.0

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการเตรียมเม็ดบีดส์ไฮโดรเจลจากวัสดุพอลิเมอร์ธรรมชาติเพื่อกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา ซึ่งได้ทำการศึกษาการผสมอัตราส่วนสารหล่อลื่นระหว่างอัลจิเนตและเพคติน ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีในการเสริมความแข็งแรง โดยมีปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการขึ้นรูปเม็ดบีดส์ดังนี้

1. ปัจจัยอัตราการขึ้นรูปปร่างและขนาดเม็ดบีดส์ ของความเข้มข้นของอัลจิเนตและเพคตินที่เพิ่มขึ้น
2. ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนืดของเม็ดบีดส์ อัตราส่วนของความเข้มข้นของอัลจิเนตและเพคตินที่เพิ่มขึ้น

คุณสมบัติของเม็ดบีดส์ที่ได้จากการเตรียมมีผลต่อการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1. การเพิ่มความเข้มข้นของอัตราส่วนอัลจิเนตและเพคติน มีผลต่อการกระจายตัวของภูมิภาคน้ำมันในน้ำ พบว่าทุกอัตราส่วนมีการกระจายตัวได้ดี
2. การเพิ่มอัตราส่วนของอัลจิเนตและเพคตินส่งผลต่อรูปร่างและขนาดของเม็ดบีดส์
3. สัดส่วนที่พอเหมาะของอัลจิเนตและเพคตินส่งผลต่อความกลมของเม็ดบีดส์ ทำให้ทางและรูปทรงเหลี่ยมหายไป เปลี่ยนเป็นทรงกลม
4. การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเพคติน ทำให้สามารถทนรับแรงกดได้มากขึ้น ซึ่งเสริมแรงให้กับเม็ดบีดส์ ค่าแรงและความเค้นจะแปรผันตามกับเพคตินที่เพิ่มขึ้น
5. เม็ดบีดส์ไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและเพคตินสามารถคงตัวอยู่ในสารละลายตัวกลางได้ติดนานถึง 45 วัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจล, สารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5, Mineral oil และในสารละลาย PEG ไม่สามารถคงตัวอยู่ได้
6. ร้อยละการขยายตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5 มากกว่าในน้ำกลั่น 1-2 เท่า
7. อัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา คือ ALG:P ที่ความเข้มข้น 1:2 มีค่าอยู่ที่ 100% ซึ่งความเข้มข้นของเพคตินมีผลต่อการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการใช้พอลิเมอร์ทางชีวภาพชนิดต่างๆเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างหรือสามารถเกิดโครงสร้างแคลเซียมไอออนแล้วทำให้ขึ้นรูปเม็ดปิดสัได้



ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ความหนืดของเม็ดบีตส์ไฮโดรเจลก่อนเติมน้ำมันเมล็ดชา

ALG:P	ค่าความหนืด (cP)			ค่าเฉลี่ย	S.D
	ก่อนใส่น้ำมันเมล็ดชา				
ครั้งที่	1	2	3		
0.25:0.25	0.86	0.82	0.82	0.83	0.02
0.25:0.5	3.37	3.37	3.28	3.34	0.05
0.25:1.0	4.03	4.12	4.12	4.09	0.05
0.25:1.5	11.00	10.90	10.70	10.87	0.15
0.25:2.0	13.80	13.80	13.70	13.77	0.05
0.5:0.25	12.60	12.20	12.30	12.37	0.20
0.5:0.5	20.30	20.10	19.80	20.07	0.25
0.5:1.0	12.20	12.10	12.10	12.13	0.05
0.5:1.5	27.80	27.60	27.40	27.60	0.20
0.5:2.0	29.10	28.80	28.80	28.90	0.17
1.0:0.25	35.00	23.20	35.10	35.10	0.10
1.0:0.5	48.70	48.80	48.90	48.80	0.10
1.0:1.0	57.20	57.20	57.30	57.23	0.05
1.0:1.5	83.30	81.90	80.40	81.87	1.45
1.0:2.0	95.3	95.6	95.1	95.33	0.25

ALG:P	ค่าความหนืด (cP)			ค่าเฉลี่ย	S.D
	หลังใส่น้ำมันเมล็ดชา				
ครั้งที่	1	2	3		
0.25:0.25	2.81	2.81	2.72	2.78	0.05
0.25:0.5	4.78	4.59	4.59	4.65	0.11
0.25:1.0	6.94	6.94	6.93	6.936	0.01
0.25:1.5	15.7	15.1	15.1	15.3	0.35
0.25:2.0	24.9	25.0	24.8	24.9	0.10
0.5:0.25	20.2	19.5	18.8	19.5	0.70
0.5:0.5	23.0	22.4	22.5	22.63	0.32
0.5:1.0	17.6	18.3	17.7	17.86	0.38
0.5:1.5	44.3	43.4	45.5	44.4	1.05
0.5:2.0	36.8	36.9	36.9	36.87	0.06
1.0:0.25	43.6	42.5	42.4	42.83	0.67
1.0:0.5	58.6	58.0	57.7	58.10	0.46
1.0:1.0	78.7	78.5	78.8	78.67	0.15
1.0:1.5	92.0	91.6	91.4	91.67	0.31
1.0:2.0	119.2	119.6	119.4	119.4	0.20

ภาคผนวก ข การประเมินขนาดของเม็ดบีดส์ไฮโดรเจล

	0.25:0.25	0.25:0.5	0.25:1.0	0.25:1.5	0.25:20
1	2.60	2.76	2.89	3.32	3.50
2	2.60	2.68	2.91	3.38	3.53
3	2.59	2.63	2.91	3.36	3.52
4	2.61	2.76	2.89	3.36	3.50
5	2.60	2.68	2.92	3.37	3.53
6	2.60	2.63	2.89	3.35	3.53
7	2.60	2.76	2.89	3.38	3.53
8	2.60	2.68	2.91	3.36	3.52
9	2.60	2.63	2.90	3.36	3.50
10	2.60	2.76	2.91	3.36	3.53
11	2.60	2.68	2.89	3.36	3.53
12	2.60	2.63	2.90	3.36	3.53
13	2.61	2.76	2.91	3.36	3.52
14	2.61	2.68	2.90	3.36	3.50
15	2.61	2.63	2.90	3.36	3.53
16	2.61	2.76	2.91	3.36	3.53
17	2.61	2.68	2.89	3.36	3.52
18	2.61	2.63	2.89	3.36	3.52
19	2.61	2.76	2.91	3.36	3.52
20	2.61	2.68	2.90	3.37	3.52
21	2.61	2.63	2.90	3.35	3.52
22	2.61	2.76	2.90	3.38	3.52
23	2.61	2.68	2.91	3.36	3.52
24	2.61	2.63	2.90	3.36	3.53
25	2.61	2.76	2.90	3.36	3.53
26	2.61	2.68	2.91	3.36	3.52
27	2.61	2.63	2.90	3.36	3.50
28	2.61	2.76	2.90	3.36	3.53

29	2.61	2.68	2.90	3.37	3.53
30	2.62	2.63	2.89	3.35	3.52
31	2.62	2.65	2.91	3.38	3.52
32	2.62	2.65	2.88	3.36	3.52
33	2.62	2.63	2.91	3.36	3.53
34	2.62	2.65	2.90	3.36	3.53
35	2.62	2.64	2.91	3.36	3.52
36	2.62	2.65	2.90	3.36	3.50
37	2.62	2.65	2.90	3.36	3.53
38	2.62	2.65	2.90	3.36	3.53
39	2.62	2.65	2.89	3.36	3.52
40	2.62	2.65	2.91	3.36	3.52
41	2.62	2.65	2.88	3.36	3.52
42	2.62	2.64	2.91	3.37	3.53
43	2.62	2.66	2.90	3.35	3.53
44	2.62	2.68	2.91	3.38	3.52
45	2.62	2.66	2.90	3.36	3.50
46	2.62	2.67	2.90	3.36	3.53
47	2.62	2.65	2.90	3.36	3.53
48	2.63	2.64	2.89	3.36	3.52
49	2.63	2.66	2.91	3.36	3.52
50	2.63	2.68	2.88	3.37	3.52
X bar	2.61	2.68	2.90	3.36	3.52
SD.	0.008	0.046	0.009	0.009	0.009

ค่าที่	0.5:0.25	0.5:0.5	0.5:1.0	0.5:1.5	0.5:20
1	2.75	2.82	2.86	3.45	4.03
2	2.76	2.89	2.87	3.42	4.02
3	2.78	2.82	2.86	3.43	4.03
4	2.77	2.8	2.87	3.42	4.04
5	2.77	2.83	2.87	3.42	4.03
6	2.78	2.82	2.86	3.41	4.08
7	2.76	2.8	2.86	3.42	4.05
8	2.75	2.82	2.87	3.44	4.04
9	2.78	2.82	2.85	3.43	4.04
10	2.78	2.8	2.87	3.42	4.05
11	2.78	2.83	2.86	3.43	4.05
12	2.79	2.83	2.86	3.45	4.04
13	2.76	2.83	2.87	3.42	4.04
14	2.76	2.82	2.88	3.43	4.05
15	2.76	2.83	2.86	3.42	4
16	2.76	2.82	2.86	3.42	4.04
17	2.77	2.8	2.86	3.41	4.04
18	2.78	2.82	2.87	3.42	4.05
19	2.79	2.82	2.88	3.44	4.05
20	2.79	2.8	2.88	3.43	4.04
21	2.76	2.83	2.88	3.42	4.04
22	2.76	2.83	2.86	3.43	4.05
23	2.76	2.83	2.86	3.45	4.04
24	2.76	2.82	2.86	3.42	4.04
25	2.77	2.83	2.87	3.43	4.05
26	2.78	2.82	2.87	3.42	4.05
27	2.79	2.8	2.88	3.42	4.04
28	2.79	2.82	2.86	3.41	4.04
29	2.76	2.82	2.86	3.42	4.05

30	2.76	2.8	2.86	3.44	4.04
31	2.76	2.83	2.87	3.43	4.04
32	2.76	2.83	2.87	3.42	4.05
33	2.77	2.83	2.86	3.43	4.05
34	2.78	2.82	2.86	3.42	4.04
35	2.79	2.83	2.87	3.44	4.04
36	2.79	2.82	2.87	3.43	4.05
37	2.76	2.8	2.86	3.42	4.04
38	2.76	2.82	2.86	3.43	4.04
39	2.76	2.82	2.86	3.45	4.05
40	2.76	2.8	2.86	3.42	4.05
41	2.77	2.83	2.87	3.43	4.04
42	2.78	2.83	2.87	3.42	4.04
43	2.79	2.83	2.88	3.42	4.05
44	2.79	2.82	2.86	3.42	4.04
45	2.76	2.82	2.88	3.44	4.04
46	2.76	2.82	2.87	3.43	4.05
47	2.76	2.8	2.86	3.42	4.05
48	2.76	2.83	2.85	3.43	4.04
49	2.77	2.83	2.87	3.45	4.04
50	2.78	2.83	2.87	3.42	4.05
X bar	2.77	2.83	2.87	3.43	4.04
SD.	0.012	0.014	0.010	0.010	0.010
ค่าที่	1.0:0.25	1.0:0.5	1.0:1.0	1.0:1.5	1.0:20
1	3.06	2.98	3.12	3.16	3.44
2	3.07	2.99	3.11	3.17	3.48
3	3.1	3	3.12	3.19	3.48
4	3.08	3	3.13	3.13	3.49
5	3.08	2.98	3.12	3.18	3.47
6	3.07	2.99	3.11	3.18	3.48

7	3.07	2.99	3.12	3.19	3.49
8	3.08	2.98	3.13	3.17	3.49
9	3.06	3	3.11	3.18	3.48
10	3.06	3.00	3.12	3.18	3.48
11	3.06	3.01	3.12	3.19	3.49
12	3.07	2.99	3.13	3.18	3.48
13	3.1	2.98	3.11	3.19	3.47
14	3.08	3.00	3.12	3.19	3.49
15	3.08	2.99	3.12	3.19	3.48
16	3.07	3.00	3.13	3.18	3.49
17	3.07	3.00	3.10	3.18	3.48
18	3.08	2.98	3.10	3.19	3.48
19	3.06	2.99	3.10	3.18	3.49
20	3.06	2.99	3.13	3.19	3.50
21	3.1	2.98	3.12	3.19	3.48
22	3.08	3.00	3.11	3.18	3.43
23	3.08	3.00	3.11	3.19	3.45
24	3.07	3.01	3.12	3.18	3.49
25	3.07	2.99	3.10	3.17	3.48
26	3.08	2.98	3.13	3.18	3.48
27	3.06	3.00	3.13	3.19	3.47
28	3.06	3.00	3.12	3.18	3.47
29	3.06	3.01	3.13	3.19	3.48
30	3.07	2.99	3.13	3.18	3.49
31	3.1	2.98	3.14	3.17	3.48
32	3.08	3.00	3.14	3.17	3.48
33	3.08	2.99	3.12	3.18	3.49
34	3.07	3.00	3.14	3.19	3.46
35	3.07	3.00	3.14	3.19	3.47
36	3.08	2.98	3.14	3.18	3.48

37	3.1	2.99	3.15	3.17	3.48
38	3.08	2.99	3.15	3.16	3.49
39	3.08	2.98	3.13	3.16	3.48
40	3.07	2.98	3.12	3.17	3.48
41	3.07	3.00	3.11	3.19	3.49
42	3.08	2.99	3.11	3.18	3.46
43	3.06	3.00	3.12	3.19	3.47
44	3.06	3.00	3.10	3.18	3.48
45	3.06	2.98	3.13	3.17	3.49
46	3.07	2.99	3.13	3.18	3.48
47	3.1	2.99	3.12	3.19	3.48
48	3.08	2.98	3.13	3.19	3.49
49	3.08	2.98	3.13	3.18	3.46
50	3.07	2.97	3.14	3.19	3.47
X bar	3.07	2.99	3.12	3.18	3.48
SD.	0.012	0.009	0.012	0.011	0.013

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ความสามารถในการขยายตัวในน้ำกลั่น

ALG:P	น้ำหนักแห้ง	น้ำหนักเปียก	ร้อยละการขยายตัว
0.25:0.25	0.5	0.89	78
0.25:0.5	0.5	0.85	70
0.25:1.0	0.5	0.83	66
0.25:1.5	0.5	0.81	62
0.25:2.0	0.5	0.83	66
0.5:0.25	0.5	0.76	52
0.5:0.5	0.5	0.78	56
0.5:1.0	0.5	0.74	48
0.5:1.5	0.5	0.77	54
0.5:2.0	0.5	0.73	46

1.0:0.25	0.5	0.68	36
1.0:0.5	0.5	0.64	22
1.0:1.0	0.5	0.63	26
1.0:1.5	0.5	0.61	22
1.0:2.0	0.5	0.57	14

ภาคผนวก ง เปรี่เซ็นต์ความสามารถในการขยายตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5

ALG:P	น้ำหนักแห้ง	น้ำหนักเปียก	ร้อยละการขยายตัว
0.25:0.25	0.5	1.25	150
0.25:0.5	0.5	1.23	146
0.25:1.0	0.5	1.21	142
0.25:1.5	0.5	1.22	144
0.25:2.0	0.5	1.19	138
0.5:0.25	0.5	1.10	120
0.5:0.5	0.5	1.05	110
0.5:1.0	0.5	1.04	108
0.5:1.5	0.5	0.98	96
0.5:2.0	0.5	0.99	98
1.0:0.25	0.5	0.75	50
1.0:0.5	0.5	0.74	48
1.0:1.0	0.5	0.73	46
1.0:1.5	0.5	0.69	38
1.0:2.0	0.5	0.64	28

ภาคผนวก จ การวิเคราะห์ความสามารถในการเก็บน้ำมันเมล็ดชาในเม็ดบีดส์

ALG:P	น้ำหนักเม็ดบีดส์ (กรัม)	ปริมาณน้ำมันเมล็ด ชาตามทฤษฎี (mg/l)	ปริมาณน้ำมันเมล็ด ชาในเม็ดบีดส์
0.25:0.25	0.05	1923.077	1101.667
0.25:0.5	0.05	1785.714	1103.333
0.25:1.0	0.05	1562.500	983.333
0.25:1.5	0.05	1388.889	966.667
0.25:2.0	0.05	1250.000	913.333
0.5:0.25	0.05	1785.714	1046.667
0.5:0.5	0.05	1666.667	1020.000
0.5:1.0	0.05	1470.588	1056.667
0.5:1.5	0.05	1315.789	1013.333
0.5:2.0	0.05	1190.476	996.667
1.0:0.25	0.05	1562.500	1036.667
1.0:0.5	0.05	1470.588	998.333
1.0:1.0	0.05	1315.789	1018.333
1.0:1.5	0.05	1190.476	1013.333
1.0:2.0	0.05	1086.957	1080.000

CHULALONGKORN UNIVERSITY

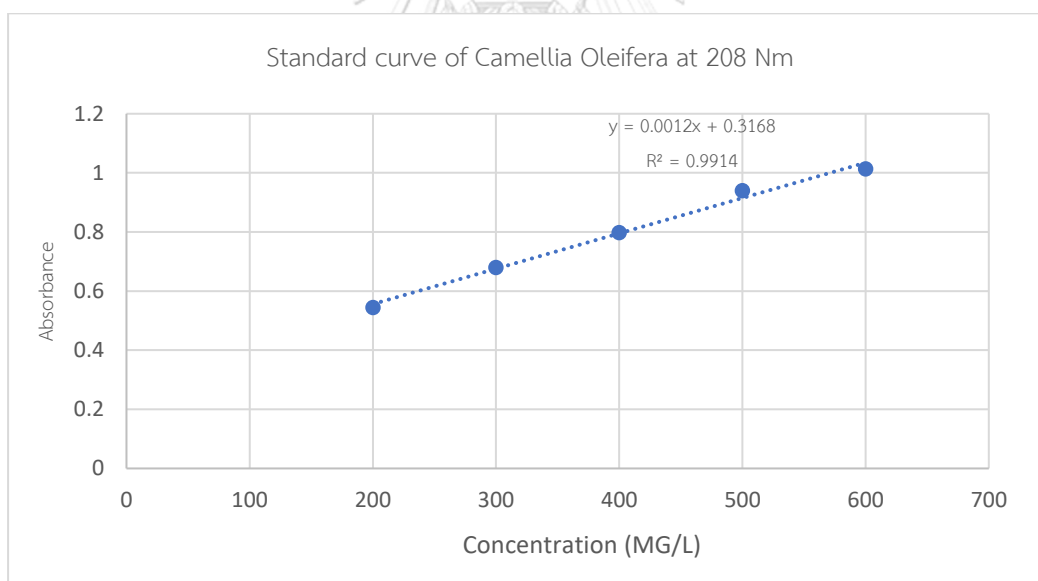
ภาคผนวก ฉ การแสดงการวัดค่าการดูดกลืน

ALG:P	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน
0.25:0.25	0.661	0.661	0.639	0.654	0.013
0.25:0.5	0.662	0.632	0.649	0.648	0.015
0.25:1.0	0.59	0.581	0.595	0.589	0.007
0.25:1.5	0.58	0.575	0.573	0.576	0.004
0.25:2.0	0.548	0.549	0.538	0.545	0.006
0.5:0.25	0.628	0.624	0.624	0.625	0.002
0.5:0.5	0.612	0.616	0.618	0.615	0.003

0.5:1.0	0.634	0.633	0.635	0.634	0.001
0.5:1.5	0.608	0.609	0.612	0.610	0.002
0.5:2.0	0.598	0.594	0.599	0.597	0.003
1.0:0.25	0.622	0.629	0.629	0.627	0.004
1.0:0.5	0.599	0.601	0.602	0.601	0.002
1.0:1.0	0.611	0.612	0.612	0.612	0.001
1.0:1.5	0.608	0.61	0.612	0.610	0.002
1.0:2.0	0.648	0.649	0.647	0.648	0.001

ภาคผนวก ข การวิเคราะห์หาความสามารถในการกักเก็บน้ำมันเมล็ดชา

ปริมาณน้ำมันเมล็ดชาในสารละลายเฮกเซน สำหรับเตรียมกราฟมาตรฐาน โดยเตรียมความเข้มข้นที่ 200, 300, 400, 500 และ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยเทคนิค UV-vis spectroscopy ที่สเปกตรัม 208 นาโนเมตร



กราฟมาตรฐานของน้ำมันเมล็ดชาในสารละลายเฮกเซน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

1. Eivazzadeh-Keihan, R., et al., *Recent advances on biomedical applications of pectin-containing biomaterials*. Int J Biol Macromol, 2022. **217**: p. 1-18.
2. Chaicharoenpong, C., *Tea (Camellia oleifera) Seeds: Use of Tea Seeds in Human Health*, in *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention*. 2020. p. 299-313.
3. Martau, G.A., M. Mihai, and D.C. Vodnar, *The Use of Chitosan, Alginate, and Pectin in the Biomedical and Food Sector-Biocompatibility, Bioadhesiveness, and Biodegradability*. Polymers (Basel), 2019. **11**(11).
4. Bagal-Kestwal, D.R., M.H. Pan, and B.H. Chiang, *Properties and applications of gelatin, pectin, and carrageenan gels*, in *Bio Monomers for Green Polymeric Composite Materials*. 2019. p. 117-140.
5. Ishwarya S, P., S. R, and P. Nisha, *Advances and prospects in the food applications of pectin hydrogels*. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021. **62**(16): p. 4393-4417.
6. Sharma, P., et al., *Pectin*, in *Biomass, Biofuels, Biochemicals: Biodegradable Polymers and Composites - Process Engineering to Commercialization*. 2021. p. 101-128.
7. Redaelli, F., M. Sorbona, and F. Rossi, *Synthesis and processing of hydrogels for medical applications*, in *Bioresorbable Polymers for Biomedical Applications*. 2017. p. 205-228.
8. Redaelli, F., M. Sorbona, and F. Rossi, *Synthesis and processing of hydrogels for medical applications*, in *Bioresorbable Polymers for Biomedical Applications: From Fundamentals to Translational Medicine*. 2017. p. 205-228.
9. Saqib, M.N., et al., *Hydrogel beads for designing future foods: Structures, mechanisms, applications, and challenges*. Food Hydrocolloids for Health, 2022. **2**.
10. Silva, C.E.P. and W. Loh, *Fundamentals of emulsion formation and stability*, in *Developments in Clay Science*. 2022. p. 37-59.

11. Luan, F., et al., *Recent advances in Camellia oleifera Abel: A review of nutritional constituents, biofunctional properties, and potential industrial applications*. Journal of Functional Foods, 2020. **75**.
12. Zhang, F., et al., *Composition, bioactive substances, extraction technologies and the influences on characteristics of Camellia oleifera oil: A review*. Food Research International, 2022. **156**.
13. Nagaraja, K., K.M. Rao, and K.S.V.K. Rao, *Alginate-based hydrogels*, in *Plant and Algal Hydrogels for Drug Delivery and Regenerative Medicine*. 2021. p. 357-393.
14. Chisty, A.H., et al., *PEGylated chitin and chitosan derivatives*, in *Handbook of Chitin and Chitosan: Volume 1: Preparation and Properties*. 2020. p. 59-100.
15. Rahangdale, D., N. Joshi, and A. Kumar, *Chitosan and its derivatives: A new versatile biopolymer for various applications*, in *Functional Chitosan: Drug Delivery and Biomedical Applications*. 2020. p. 1-42.
16. Cao, L., et al., *Egg-box model-based gelation of alginate and pectin: A review*. Carbohydr Polym, 2020. **242**: p. 116389.
17. Vakarelova, M., et al., *Microencapsulation of astaxanthin by ionic gelation: effect of different gelling polymers on the carotenoid load, stability and bioaccessibility*. International Journal of Food Science & Technology, 2023. **58(5)**: p. 2489-2497.
18. Cai, R., et al., *Curcumin loading and colon release of pectin gel beads: Effect of different de-esterification method*. Food Chem, 2022. **389**: p. 133130.
19. Chao, P.-W., et al., *The formulation and the release of low-methoxyl pectin liquid-core beads containing an emulsion of soybean isoflavones*. Food Hydrocolloids, 2022. **130**.
20. Sharma, M., K.K. Dash, and L.S. Badwaik, *Physicochemical and release behaviour of phytochemical compounds based on black jamun pulp extracts-filled alginate hydrogel beads through vibration dripping extrusion*. Int J Biol Macromol, 2022. **194**: p. 715-725.
21. Popov, S., et al., *Characterization and Biocompatibility Properties In Vitro of Gel Beads Based on the Pectin and kappa-Carrageenan*. Mar Drugs, 2022. **20(2)**.
22. Lee, T. and Y.H. Chang, *Structural, physicochemical, and in-vitro release*

- properties of hydrogel beads produced by oligochitosan and de-esterified pectin from yuzu (Citrus junos) peel as a quercetin delivery system for colon target.* Food Hydrocolloids, 2020. **108**.
23. Torpol, K., et al., *Optimising chitosan–pectin hydrogel beads containing combined garlic and holy basil essential oils and their application as antimicrobial inhibitor.* International Journal of Food Science & Technology, 2019. **54**(6): p. 2064-2074.
 24. Bepeyeva, A., et al., *Encapsulation of Lactobacillus casei into Calcium Pectinate-Chitosan Beads for Enteric Delivery.* Journal of Food Science, 2017. **82**(12): p. 2954-2959.
 25. Sevinç Özakar, R. and E. Özakar, *The effect of polymer amount and crosslinker ratio in polymeric hydrogel beads on characterization.* Journal of Research in Pharmacy, 2021. **25**(5): p. 653-666.
 26. Wang, C., et al., *Microencapsulation of camellia oil to maintain thermal and oxidative stability with focus on protective mechanism.* International Journal of Food Science & Technology, 2021. **56**(9): p. 4780-4788.
 27. Hu, X., et al., *In vitro digestion of sodium alginate/pectin co-encapsulated Lactobacillus bulgaricus and its application in yogurt bilayer beads.* Int J Biol Macromol, 2021. **193**(Pt B): p. 1050-1058.
 28. Wang, X., et al., *Fabrication and Characterization of Gel Beads of Whey Isolate Protein-Pectin Complex for Loading Quercetin and Their Digestion Release.* Gels, 2021. **8**(1).
 29. Bekhit, M., et al., *Encapsulation of Lactococcus lactis subsp. lactis on alginate/pectin composite microbeads: Effect of matrix composition on bacterial survival and nisin release.* Journal of Food Engineering, 2016. **180**: p. 1-9.
 30. Awasthi, R., et al., *Dual crosslinked pectin-alginate network as sustained release hydrophilic matrix for repaglinide.* Int J Biol Macromol, 2017. **97**: p. 721-732.
 31. Wu, B., et al., *Encapsulation of resveratrol-loaded Pickering emulsions in alginate/pectin hydrogel beads: Improved stability and modification of digestive behavior in the gastrointestinal tract.* Int J Biol Macromol, 2022. **222**(Pt

A): p. 337-347.

32. Prabowo, H.A., E. Budianto, and S. Hudiyono, *Encapsulation of Partially Purified Bromelain from Pineapple Cores in Alginate-Pectin Beads as a Targeted Antiplatelet Agent*. *International Journal of Applied Pharmaceutics*, 2021: p. 176-182.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	คุณานนต์ สุรัสวดี
วัน เดือน ปี เกิด	2 พฤศจิกายน 2527
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น เข้าศึกษาระดับปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	ศรีราชา ชลบุรี



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY