

การเตรียมไฮโดรเจลจากไคโตซานและอัลจิเนตผ่านกระบวนการ
Freeze-thaw ในระบบสารละลายเบส

PREPARATION OF HYDROGEL FROM CHITOSAN AND
ALGINATE VIA FREEZE-THAW PROCESS IN BASIC
SOLUTION SYSTEM

ปณิตา ครุธา
อรยา เมธาวีบริรักษ์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

PREPARATION OF HYDROGEL FROM CHITOSAN AND
ALGINATE VIA FREEZE-THAW PROCESS IN BASIC
SOLUTION SYSTEM

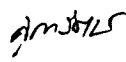


PANNITA KRUTA

ORAYA METHAWEEBORIRAK

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมไฮโดรเจลจากโคโตซานและอัลจินेटผ่านกระบวนการ Freeze-thaw ในระบบสารละลายเบส
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปณิศา ครุฑา รหัสนักศึกษา 58050501 นางสาวอรยา เมธาวิบริรักษ์ รหัสนักศึกษา 58050573
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการ	
รศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมไฮโดรเจลจากไคโตซานและอัลจินตผ่านกระบวนการ Freeze-thaw ในระบบสารละลายเบส
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปณิศา ครุฑา รหัสนักศึกษา 58050501 นางสาวอรยา เมธาวิบริรักษ์ รหัสนักศึกษา 58050573
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากไคโตซานและอัลจินตผ่านกระบวนการ Freeze-thaw ในระบบสารละลายเบส โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตซานต่ออัลจินต ดังนี้ 2:2, 3:1, 4:0, 2:4, 3:3, 4:2 และ 6:0 จากนั้นนำไปเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ ไฮโดรเจลที่เตรียมได้นำไปตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ น้ำหนัก ขนาด ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) และตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความแข็งกดที่พื้นผิว ความแข็งแรงกด และความแข็งแรงดึง ผลการทดสอบพบว่าไคโตซานสามารถละลายได้มากที่สุดในระบบสารละลายเบส LiOH/ KOH/ Urea/ water สำหรับการขึ้นรูปไฮโดรเจลพบว่าไคโตซานมีผลสำคัญในการเกิดเจลโดยสูตรที่มีปริมาณไคโตซานน้อย (อัตราส่วน 2:2 และ 2:4 โดยน้ำหนัก) ไม่สามารถขึ้นรูปได้ สำหรับปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งของไฮโดรเจลมีค่าอยู่ในช่วง 91-93% และ 6-8% ตามลำดับ การเชื่อมโยงของอัลจินตด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สามารถยืนยันได้จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR ซึ่งพบในไฮโดรเจลสูตร C3SA3Ca จากภาพทางสัณฐานวิทยาพบว่าของผสมระหว่างไคโตซานและอัลจินตกระจายตัวไม่สม่ำเสมอและไม่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับสมบัติเชิงกลพบว่าความแข็งกดที่พื้นผิว ความแข็งแรงกดและความแข็งแรงดึง มีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของไคโตซานและเมื่อเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในไฮโดรเจลที่มีอัลจินตเป็นองค์ประกอบ ในขณะที่ไฮโดรเจลที่ไม่มีอัลจินตเป็นองค์ประกอบพบว่ามีค่าความแข็งแรงกดและความแข็งแรงดึงสูงที่สุดซึ่งพบในไฮโดรเจลสูตร C6SA0

คำสำคัญ : แคลเซียมคลอไรด์ ไคโตซาน อัลจินต ไฮโดรเจล

Title	Preparation of hydrogel from chitosan and alginate via freeze-thaw process in basic solution system	
Students	Miss Pannita Kruta	Student ID 58050501
	Miss Oraya Methaweeborirak	Student ID 58050573
Degree	Bachelor of Science (Industrial chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2018	
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade	

Abstract

This research studied on the preparation of hydrogel from chitosan and alginate via freeze-thaw process in basic solution system in a proportion of chitosan/alginate of 2:2, 3:1, 4:0, 2:4, 3:3, 4:2 and 6:0 w/w and further crosslinking by 0.5 M CaCl_2 solution. Physical properties including weights, sizes, water contents, and solid contents of the obtained hydrogels were measured. FT-IR, SEM and Mechanical properties testing including hardness, compression and tensile testing of the hydrogels were also examined. Chitosan was exhibited good solubility in LiOH/ KOH/ Urea/ water solution. Chitosan contents were significantly affected to hydrogel formation i.e., the mixture with low chitosan contents (2:2 and 2:4 w/w) could not form gel. The value of water contents and solid contents were 91-93% and 6-8%, respectively. Crosslinking of alginate using CaCl_2 solution in the hydrogels was confirmed by FT-IR technique especially in C3SA3Ca. The morphological image of the hydrogels showed that the chitosan/alginate mixture was not uniformed and heterogeneous. The mechanical properties of hydrogel were increased with increasing chitosan contents or with crosslinking by CaCl_2 solution in term of alginate-containing hydrogels. However, the hydrogel without alginate exhibited the highest compression and tensile strength which is found in C6SA0.

Keywords : Calcium chloride, Chitosan, Alginate, Hydrogel

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำ ในการดำเนินโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องในการทำโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ ในการตรวจทานและให้ข้อเสนอแนะเพื่อให้โครงการพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เงินทุนสนับสนุนในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์รวมถึงสารเคมีที่ใช้ในโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจในการดำเนินโครงการพิเศษนี้ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือทำให้โครงการพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้ศึกษาขออน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ปณณิตา ครุธา

อรยา เมธาวิบริรักษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels).....	4
2.1.1 ความหมายของไฮโดรเจล	4
2.1.2 สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of hydrogels).....	5
2.1.3 ประเภทของไฮโดรเจล	6
2.1.4 การเตรียมไฮโดรเจล (Preparation methods of hydrogels)	7
2.2 อัลจิเนต (Alginate).....	12
2.2.1 โครงสร้างทางเคมีของอัลจิเนต.....	12
2.2.2 ความหนืดของอัลจิเนต	13
2.2.3 ความสามารถในการสลายตัว.....	13
2.2.4 ความสามารถในการละลาย	13
2.2.5 การเกิดเจล	14
2.2.6 วิธีการสกัดอัลจิเนตจากสาหร่ายทะเล	15
2.2.7 การประยุกต์ใช้งานอัลจิเนต.....	16
2.3 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and Chitosan).....	16
2.3.1 แหล่งที่มาของไคตินและไคโตซาน.....	17
2.3.2 โครงสร้างของไคตินและไคโตซาน	17

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 เทคนิคการเตรียมโคตินและโคโตซาน	17
2.3.4 สมบัติของโคตินและโคโตซาน	19
2.3.5 ประโยชน์ของโคโตซาน	20
2.4 กระบวนการ Freeze-Thaw ในไฮโดรเจล	21
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 สารเคมี	26
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	26
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย	27
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ...	27
3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์...	27
3.4 การทดสอบการละลายของโคโตซาน	27
3.5 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล	28
3.6 ขั้นตอนการล้างเบส	29
3.7 ขั้นตอนการเชื่อมโยง	29
3.8 การวิเคราะห์และทดสอบ	30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	33
4.1 การทดสอบการละลายของโคโตซานในสภาวะสารละลายเบส	33
4.2 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล	34
4.2.1 รูปร่าง ลักษณะของชิ้นงาน	34
4.2.2 ขนาด และน้ำหนักของไฮโดรเจล	35
4.2.3 ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในชิ้นงานไฮโดรเจล (Water content and Solid content)	36
4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจล	37
4.4 สันฐานวิทยาของไฮโดรเจล	38
4.5 ความแข็งกดที่พื้นผิว (Hardness)	40
4.6 ความแข็งแรงกด (Compressive strength)	41
4.7 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)	43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	45
5.1 สรุปผลการวิจัย	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก.....	51
ภาคผนวก ก ค่าเฉลี่ยขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจล	52
ภาคผนวก ข ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	54
ภาคผนวก ค สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล.....	55
ภาคผนวก ง ค่าเฉลี่ยความแข็งกตที่พื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	57
ภาคผนวก จ ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกตของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	58
ภาคผนวก ฉ ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงตึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	59
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนของสารละลายเบส.....	27
3.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโคซานต่ออัลจินต.....	28
4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การละลายของโคโคซานในสารละลายเบสสภาวะต่าง ๆ.....	33
4.2 ค่าปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล	36

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลของสภาวะแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของไฮโดรเจล	4
2.2 การเกิดการเชื่อมขวางของไฮโดรเจล โดยการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิล ของพอลิเมอร์ และ Ca^{2+}	7
2.3 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล	8
2.4 การสังเคราะห์พอลิไอออนิกไฮโดรเจลของ xanthane/chitosan.....	8
2.5 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด Carboxymethyl cellulose	9
2.6 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยการใช้สารเชื่อมขวาง EGDMA	9
2.7 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด APS-co-HEMA hydrogels	10
2.8 การสังเคราะห์ poly(VP-co-MA) hydrogel.....	11
2.9 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์	11
2.10 โครงสร้างของอัลจินตชนิดต่าง ๆ	14
2.11 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model).....	15
2.12 ขั้นตอนการสกัดโซเดียมอัลจินตจากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล	15
2.13 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส ไคติน และไคโตซาน.....	16
2.14 การเตรียมไคโตซานจากปฏิกิริยา Deacetylation ของไคติน.....	19
2.15 กระบวนการ Freeze-Thaw ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	22
3.1 แม่พิมพ์ขนาด $3 \times 7.8 \times 0.5 \text{ cm}^3$ และขนาด $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$	29
4.1 ตัวอย่างการละลายไคโตซานในสารละลาย LiOH/KOH/Urea.....	34
4.2 รูปร่างชิ้นงานที่นำไปทดสอบ ตัวอย่างมาจาก สูตร C6SA0.....	34
4.3 ค่าน้ำหนัก ปริมาตร และความหนาแน่นของไฮโดรเจลโดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการ เก็บในความชื้นสัมพัทธ์ $100 \pm 5\% \text{ RH}$ ก่อนและหลัง 7 วัน.....	35
4.4 สเปคตรา FTIR ของไคโตซาน อัลจินต และไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	37
4.5 ภาพถ่ายพื้นผิวและภาคตัดขวาง ด้วย SEM	39
4.6 ค่าความแข็งกดที่พื้นผิวของไฮโดรเจล.....	40
4.7 ค่าความแข็งแรงกดอัด และค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงด้วย สารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....	41
4.8 ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสของไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงด้วย สารละลายแคลเซียมคลอไรด์.....	43

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
C3SA1	ไฮโดรเจลที่มีปริมาณโคโคซานต่ออัลจินต 3:1 โดยน้ำหนัก
C3SA1Ca	ไฮโดรเจลที่มีปริมาณโคโคซานต่ออัลจินต 3:1 โดยน้ำหนักเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
FT-IR	อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier transform infrared spectrometer)
N/A	หาค่าไม่ได้
RH	ความชื้นสัมพัทธ์
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) ภายในโครงสร้างมีการเชื่อมโยงของโมเลกุลเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ไฮโดรเจลเตรียมได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) หรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer) สามารถบวมตัวและกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้และยังสามารถคงรูปร่าง โครงสร้างสามมิติไว้ได้ ในปัจจุบันไฮโดรเจลได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยสามารถเตรียม ไฮโดรเจลให้มีสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradability) ความเข้ากันได้ ทางชีวภาพ (Biocompatibility) ไฮโดรเจลที่มีความแข็งแรง (Mechanical strength hydrogel) ไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่อสิ่งเร้าต่าง ๆ (Multi-responsive hydrogel) จากสมบัติข้างต้นไฮโดรเจลจึง ถูกนำไปใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น ด้านการแพทย์ ใช้ทำวัสดุปิดแผล อวัยวะเทียม คอนแทกเลนส์ ไฮโดรเจลต้านทานเชื้อแบคทีเรีย และวัสดุนำส่งยา ด้านการเกษตร ใช้ในการเคลือบปุ๋ยและเคลือบ เมล็ดพันธุ์เพื่อใช้ควบคุมการปลดปล่อย ช่วยอุ้มน้ำและดูดซับแร่ธาตุในดิน ด้านการใช้งานใน ชีวิตประจำวัน เช่น ผ้าอ้อมเด็กแบบใช้ครั้งเดียว เป็นต้น [1]

อัลจินเนตหรือ อัลจिन (Alginate or algin) คือ กัมธรรมชาติที่สกัดจากผนังเซลล์ของสาหร่ายสี น้ำตาล โดยทั่วไปมักอยู่ในรูปเกลือของกรดอัลจินิก เช่น แคลเซียมอัลจินเนต โซเดียมอัลจินเนต แมกนีเซียมอัลจินเนต เป็นต้น ความสามารถในการละลายของอัลจินเนตขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ค่าพีเอช (pH) น้ำหนักโมเลกุล ไอออนที่อยู่ในระบบ ความเข้มข้นไอออนของตัวทำละลาย เป็นต้น ซึ่งอัลจินเนตสามารถละลายได้ในน้ำและตัวทำละลายที่เป็นเบส แต่ไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย อินทรีย์ [2,3]

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) ที่มีมากเป็นอันดับสองรอง จากเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของพวกปู กุ้ง และเปลือกหอย โดยโครงสร้างของไคโตซานมี หมู่อะมิโน ($-NH_2$) และไฮดรอกซิล ($-OH$) เมื่อละลายในสารละลายกรด หมู่อะมิโนจะได้รับโปรตรอน เกิดเป็นประจุบวก ($-NH_3^+$) ทำให้ไคโตซานละลายในสารละลายกรด [3] แต่ไม่ละลายในน้ำหรือเบส เจือจาง ไคโตซานมีความสามารถหลายประการ ได้แก่ การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradable) มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) ด้านเชื้อแบคทีเรีย (Antimicrobial activity) และ ไม่เป็นพิษ (Non-toxic) [4] การขึ้นรูปใช้งานของไคโตซานทำได้หลายรูปแบบ เช่น เจล เม็ด เส้นใย เป็นต้น ซึ่งเป็นที่สนใจในปัจจุบันและมักถูกนำไปใช้ทางด้านการแพทย์ เช่น ในอุตสาหกรรมยา การ ปลดปล่อยยา หรือถูกใช้เป็นเนื้อเยื่อกระดูก แต่ไคโตซานยังมีข้อจำกัดเรื่องการละลายในน้ำหรือเบส เจือจาง โดยไคโตซานสามารถละลายได้ในกรดซึ่งกรดอาจตกค้างส่งผลให้เกิดความเป็นพิษได้

ในปัจจุบันมีการนำไฮโดรเจลไปใช้งานหลากหลายรวมถึงด้านการแพทย์ที่ต้องคำนึงถึงความ เป็นพิษต่ำ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพซึ่งไคโตซานและอัลจินเตต่างก็เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีสมบัติ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยมีงานวิจัยได้เตรียม ไฮโดรเจลจากไคโตซานและอัลจินเตเพื่อต้องการนำสมบัติของไคโตซานและอัลจินเตที่ไม่เป็นพิษต่อ ร่างกายและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอีกทั้งสารสองตัวนี้มีหมู่อะมิโนจากไคโตซานและหมู่ คาร์บอกซิลิกจากอัลจินเตเมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจล หมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสามารถเกิดอันตรกิริยา และเกิดการคงสภาพไม่ละลายน้ำ แต่สามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ อย่างไรก็ตามไคโตซานมี ความสามารถในการละลายที่จำกัด การเตรียมไคโตซานผสมอัลจินเตจึงทำได้ยากเพราะไคโตซานมี โครงสร้างที่แข็งแรงเชื่อมด้วยพันธะไฮโดรเจนอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบทำให้ตัวทำละลายทั่วไป เช่น น้ำ เบสเจือจาง ไม่สามารถทำลายพันธะไฮโดรเจนและแทรกเข้าไปแทนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงไม่สามารถละลายไคโตซานได้ โดยไคโตซานสามารถละลายได้ในกรดอินทรีย์ที่มี pH น้อยกว่า 6 เช่น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก และสารละลายกรดอินทรีย์ เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรด เพอร์คลอริก เป็นต้น [5] ในขณะที่อัลจินเตมีสมบัติการละลายที่แตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิ ความ เข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล รวมถึงค่าความเป็นกรด-ด่าง เช่น ค่า pH มากกว่า 5 ความหนืดของ สารละลายจะคงที่ ค่า pH น้อยกว่า 4.5 ความหนืดจะเริ่มเพิ่มขึ้น และที่ค่า pH เท่ากับ 3 หรือน้อย กว่า จะเริ่มตกผลึกในรูปของกรดอัลจินิก ดังนั้นอัลจินเตจึงไม่ละลายในกรดที่มีค่า pH ต่ำ ในขณะที่ ไคโตซานละลายได้ดีในสภาวะกรด วิธีการแก้ปัญหาหนึ่งเพื่อให้ไคโตซานและอัลจินเตละลายร่วมกัน คือ การดัดแปลงไคโตซานให้ละลายในน้ำได้โดยปราศจากกรดเพื่อให้ผสมกับอัลจินเตและขึ้นรูปเป็น แผ่นฟิล์มโดยเชื่อมโยงผ่านไอออนเกิดเป็นฟิล์มไฮโดรเจล [6] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาความ แข็งแรงของไฮโดรเจลจากไคโตซานที่สภาวะเบสพบว่าไคโตซานสามารถละลายในเบสได้และยังมื ความแข็งแรงสูงขึ้นโดยไม่ต้องดัดแปลงโครงสร้าง และไม่ใช้กรดที่จะก่อให้เกิดความเป็นพิษ [4]

จากที่กล่าวมาข้างต้นความสามารถในการละลายของไคโตซานและอัลจินเตมีข้อจำกัด ซึ่ง ยากต่อการนำมาผสมเป็นเนื้อเดียวกัน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการศึกษาที่จะนำไคโตซานผสมกับ อัลจินเตละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันเกิดเป็นไฮโดรเจลโดยไม่ดัดแปลงโครงสร้างของไคโตซาน โดยการ ละลายในระบบสารละลายเบส โดยขั้นตอนการละลายไคโตซานด้วยเบสจะผ่านกระบวนการ Freeze-thaw หลังจากนั้นนำมาขึ้นรูปเจลโดยใช้ระบบการให้ความร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ เป็นพิษ ไม่มีการใช้สารเคมีจึงปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต และมีการเชื่อมโยงของอัลจินเตด้วยสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์เพื่อพัฒนาสมบัติไฮโดรเจลให้แข็งแรงเพิ่มขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากไคโตซานและอัลจินเตในสารละลายเบส
2. เพื่อศึกษาการกระจายตัวของไคโตซานและอัลจินเตในไฮโดรเจลและสมบัติเชิงกล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการละลายของโคโตะซานในสภาวะสารละลายเบสชนิดต่าง ๆ
2. เตรียมไฮโดรเจลจากโคโตะซานผสมกับอัลจินตในสารละลายเบส และทำให้เกิดเจลโดยใช้ระบบให้ความร้อนและเชื่อมโยงอัลจินตด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์
3. ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจลที่เตรียมจากโคโตะซานต่ออัลจินตในอัตราส่วนโดยน้ำหนักดังนี้ 2:2 3:1 4:0 2:4 3:3 4:2 และ 6:0

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมไฮโดรเจลจากโคโตะซานผสมกับอัลจินตที่ละลายในเบสได้
2. ไฮโดรเจลที่เกิดจากโคโตะซานผสมกับอัลจินตมีการกระจายตัวที่ดีและมีความแข็งแรง

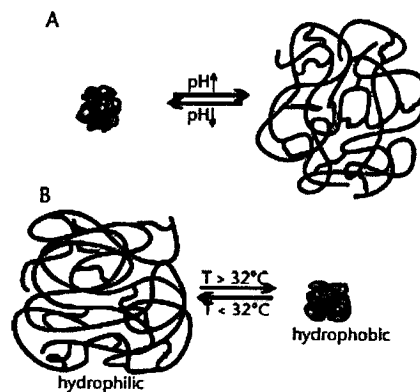
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

2.1.1 ความหมายของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล (Hydrogels) เป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างตาข่ายสามมิติ (Three-dimensional-network) ซึ่งสายโซ่พอลิเมอร์ของไฮโดรเจลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen) รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่าง ๆ ในสายโซ่ ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่น $-OH$ $-COOH$ $-CONH_2$ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น $-CH_2$ $-CH_3$ ไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำโดยอาจดูดซับน้ำได้มากกว่า 95% ของน้ำหนักรวม จะเรียกว่า “ซูเปอร์แอบซอร์เบนต์” (Superabsorbent) สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจลคือ จะมีการพองตัวเมื่ออยู่ในน้ำ โดยการพองตัวเกิดจากการดูดซับน้ำเข้าไปในโครงสร้างตาข่ายทำให้ไฮโดรเจลมีลักษณะอ่อนนุ่มคล้ายเยลลี่และเมื่อระเหยน้ำออกไฮโดรเจลที่แห้งจะเรียกว่า “ซีโรเจล” (Xerogel) หรือ (Dry gel) การระเหยน้ำออกในลักษณะนี้เป็นการรบกวนโครงสร้างของเจลส่งผลให้ได้เจลมีลักษณะรูพรุน เรียกไฮโดรเจลแบบนี้ว่า “แอโรเจล” (Aerogel) หรือ สฟอนจ์ (Sponge) ปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล ได้แก่ พีเอช (pH), อุณหภูมิ, ความแรงไอออน (Ionic strength), สนามไฟฟ้า (Electric fields), ตัวทำละลาย ความดัน และชนิดของเกลือ ซึ่งเรียกปัจจัยเหล่านี้ว่า Volume collapse หรือ Volume phase transition [6] ไฮโดรเจลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ทางการแพทย์ใช้เป็นวัสดุปิดแผลและบรรจุยาที่ต้องการให้ปลดปล่อยได้ตามต้องการ ศัลยกรรม การเกษตรใช้ในการไถดินเพื่อความชุ่มชื้น เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ผลของสภาวะแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของไฮโดรเจล [6]

2.1.2 สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of hydrogels)

2.1.2.1 การบวมตัว (Swelling)

การบวมตัวของไฮโดรเจลเมื่ออยู่ในน้ำเนื่องจากโครงสร้างของไฮโดรเจลมีส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อแช่ไฮโดรเจลที่แห้งลงในน้ำทำให้เกิดแรงดันออสโมติก (Osmotic driving force) ผลักดันให้น้ำแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่ไม่มีน้ำอยู่ ทำให้เกิดการขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์และปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ เมื่อแรงดันออสโมติก (Osmotic driving force) ที่ดันให้น้ำเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของไฮโดรเจลกับแรงต้านทานการขยายตัวของสายโซ่มีค่าเท่ากัน การบวมตัวของไฮโดรเจลจะถึงจุดสมดุลและปริมาณน้ำในโครงสร้างที่จุดนี้เรียกว่า “ปริมาณน้ำสมดุล” (Equilibrium water content (%)) ส่งผลให้ไฮโดรเจลถูกนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เพื่อใช้เป็นเจลสมานแผลและรักษาความชุ่มชื้นของแผลไม่ให้เกิดการหมักหมม ช่วยในการดูดซับส่วนของเลือดและน้ำหนอง วิธีการที่ใช้น้ำหนักของไฮโดรเจลคือ การนำไฮโดรเจลแห้งมาชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำเจลที่ชั่งไปแช่น้ำกลั่นตามสภาวะแวดล้อมที่กำหนดและชั่งน้ำหนักของเจลหลังจากการบวมตัว นำน้ำหนักของเจลหลังการบวมตัวและน้ำหนักเจลที่แห้งมาคำนวณหาค่า Equilibrium water content (%) ตามสมการที่ 2.1

$$\text{ค่า Equilibrium fluid content (\%)} = \frac{|W_s - W_d|}{W_d} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

โดยค่า W_s และค่า W_d คือค่าน้ำหนักหลังการบวมตัวและน้ำหนักที่แห้งของเจล ซึ่งค่าทั้งสองได้จากการทดสอบการบวมตัวของเจล (Water swelling test) [7]

ไฮโดรเจลเมื่อเกิดการบวมตัวในน้ำ น้ำที่อยู่ในไฮโดรเจลจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. Free water คือ น้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจลที่ไม่เกิดพันธะกับสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระเหยน้ำออกได้ง่ายไม่มีผลของสายโซ่พอลิเมอร์มาเกี่ยวข้อง
2. Bound water คือ น้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์เป็นน้ำที่เคลื่อนที่ได้ยากต้องใช้พลังงานความร้อนสูงมากเพื่อที่จะเอาน้ำออกจากไฮโดรเจล

ปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล

1. ช่องว่างของสายโซ่พอลิเมอร์: ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากจะทำให้มีรูพรุนมาก การบวมตัวจะเกิดขึ้นได้ดีเนื่องจากน้ำสามารถเข้าไปได้ปริมาณมาก
2. อันตรกิริยาของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์: เมื่อเกิดอันตรกิริยามากทำให้น้ำแพร่เข้าไปในโครงสร้างได้มากทำให้การบวมตัวเกิดขึ้นได้ดี

3. ความหนาแน่น: ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อปริมาณการเชื่อมโยงสูงสายโซ่พอลิเมอร์อยู่ใกล้กันมากทำให้ช่องว่างระหว่างสายโซ่และความยืดหยุ่นลดลง

4. ความยืดหยุ่น: น้ำสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ได้ง่ายและมีแรงต้านการขยายตัวน้อยเมื่อความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์มีค่ามาก ทำให้ปริมาณน้ำสมดุลมีค่าสูงเกิดการบวมตัวได้ดี [8,9]

2.1.2.2 ความหนาแน่นของพันธะร่างแห (Cross-linking density)

ความหนาแน่นของพันธะร่างแหมีความสัมพันธ์กับสมบัติอื่น ๆ คือ การบวมตัวของไฮโดรเจล เช่น ความแข็งแรงของโครงสร้างและการให้อากาศและของเหลวซึมผ่านได้ซึ่งความแข็งแรงของโครงสร้างไฮโดรเจลมาจากองค์ประกอบและโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่นำมาเตรียมไฮโดรเจลทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะตาข่าย (Network) ถ้าความหนาแน่นของโครงสร้างร่างแหมาก การบวมน้ำจะเกิดขึ้นได้น้อย

2.1.2.3 ความยืดหยุ่น (Elasticity)

กลไกของแรงดึงอาจทำให้เจลเปลี่ยนรูปหรือขยายตัวมากเกินไป ซึ่งโดยพื้นฐานส่วนใหญ่แล้วค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุจะเป็นอัตราส่วนต่อแรงกดและจะส่งผลต่อการขยายตัวของเจล ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหยุ่นนั้นอาจจะหมายถึงการกลับคืนตัวของเจลหรืออาจหมายถึง เมื่อมีกลไกของแรงดึง เจลจะสามารถกลับคืนได้ซึ่งการบวมน้ำของไฮโดรเจลจะมีความสำคัญต่อความยืดหยุ่นของเจลและขึ้นกับโครงสร้างของโมเลกุล

2.1.2.4 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation)

เนื่องจากไฮโดรเจลสามารถย่อยสลายได้อย่างช้า ๆ และสามารถเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ จึงได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เช่น ระบบนำส่งยา (Drug delivery) ใช้กลไกย่อยสลายนี้เพื่อควบคุมการปลดปล่อยยา (Drug release) และใช้ทางด้าน Tissue-engineering โดยการใช้ Enzyme เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการ Hydrolysis [7]

2.1.3 ประเภทของไฮโดรเจล

2.1.3.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ (Fabrication of hydrogel) แบ่งได้ 3 ชนิด

1. ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network hydrogel)

ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายเตรียมได้โดยการผสม มอนอเมอร์ สารเชื่อมโยง ตัวริเริ่ม ฉีดเข้าแม่พิมพ์และทำให้เกิดพอลิเมอร์เชน ตัวอย่างเช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol) PVA [10]

2. ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film hydrogel)

ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์มเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) เพื่อไม่ให้เจลละลายในน้ำหรืออาจทำการเชื่อมโยงระหว่างสาย

โซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond) ตัวอย่างเช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเมทิลเมทาคริเลต) (Poly(2-hydroxy methylmethacrylate) PHEMA) [11]

3. ไฮโดรเจลแบบตอกิ่งบนพื้นผิว (Surface grafted hydrogel)

ไฮโดรเจลแบบตอกิ่งบนพื้นผิวเตรียมโดยนำพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำมาตอกิ่งบนพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ซึ่งจะได้อิโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำ วิธีการนี้สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นได้ ตัวอย่างเช่น การตอกิ่งบนพื้นผิวของเจลลาติน [12]

2.1.4 การเตรียมไฮโดรเจล (Preparation methods of hydrogels)

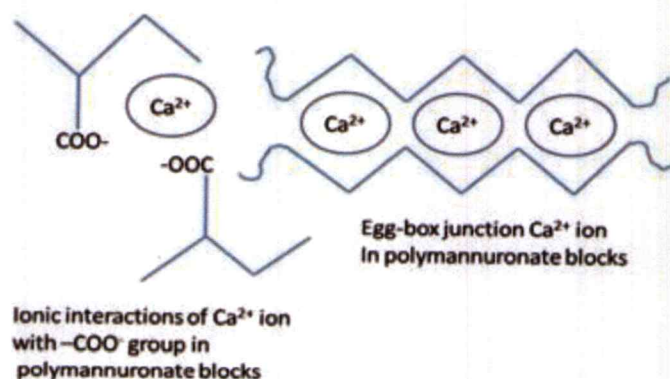
การเตรียมไฮโดรเจลเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีสมบัติตามต้องการเหมาะสม และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้โดยตรง โดยไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้หลายวิธี ดังนี้

2.1.4.1 Physical crosslinking

วิธีนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพ ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย สะดวกและมีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้สารเชื่อมโยงซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล การเตรียมด้วยวิธีนี้มีหลายวิธี ดังนี้

1. Ionic interaction

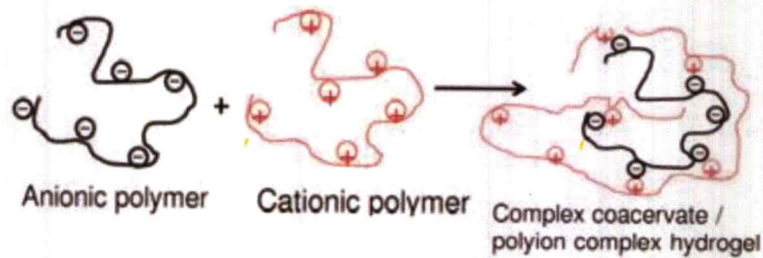
การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็นการเตรียมผ่านการเกิดอันตรกิริยาแบบไอออนิกระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในสายโซ่ของไฮโดรเจล ตัวอย่างดังรูปที่ 2.2 ได้เตรียมไฮโดรเจลโดยการเติม CaCl_2 ลงใน Polymannuronate ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอนไอออนิก คือ COO^- จึงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นไอออนิก เกิดเป็นไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นไอออนิกพอลิเมอร์



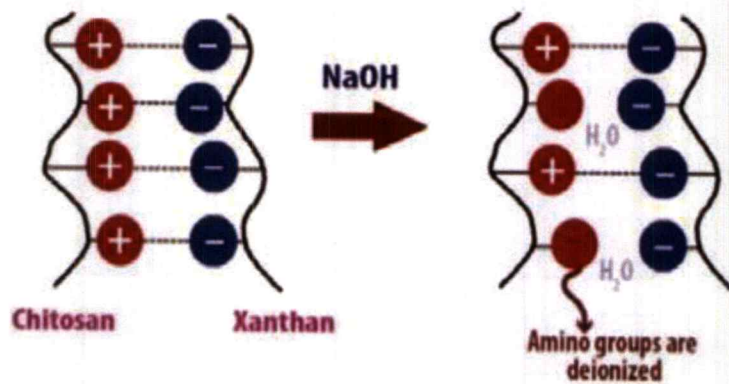
รูปที่ 2.2 การเกิดการเชื่อมขวางของไฮโดรเจล โดยการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเมอร์ และ Ca^{2+} [14]

2. Complex coacervation

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็น การนำพอลิเมอร์ที่เป็นแอนไอออนมาเชื่อมขวางกับพอลิเมอร์ที่เป็นแคทไอออนิก ดังรูปที่ 2.3 โดยหลักการของวิธีนี้คือ พอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมจะต้องมีประจุตรงข้ามกัน และเมื่อนำมาผสมกันจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ตัวอย่างดังรูปที่ 2.4 ได้เตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจลโดยนำ xanthan ซึ่งเป็นแอนไอออนิกพอลิเมอร์มาเชื่อมขวางกับ chitosan ซึ่งเป็นแคทไอออนิกพอลิเมอร์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนพอลิไอออนิกไฮโดรเจล



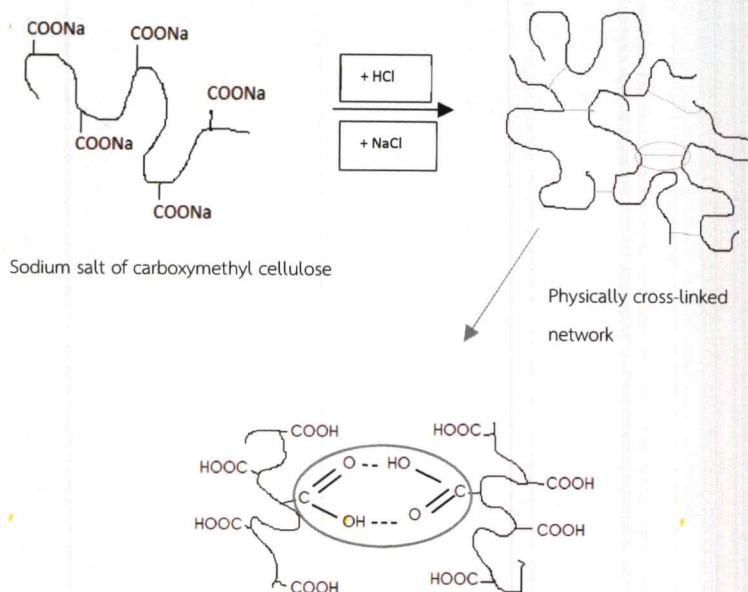
รูปที่ 2.3 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล [13]



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์พอลิไอออนิกไฮโดรเจลของ xanthane/chitosan [15]

3. H-bonding

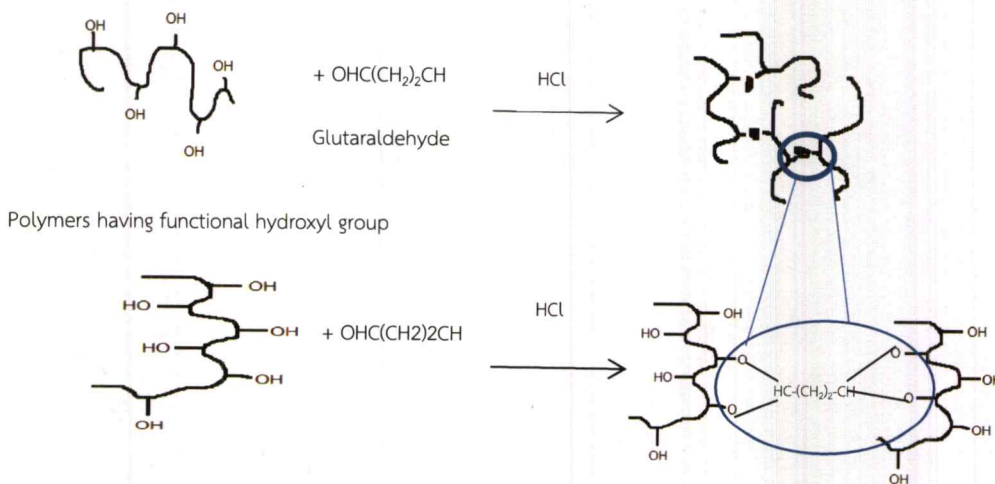
การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็น การสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ตัวอย่างดังรูปที่ 2.5 ได้เตรียมไฮโดรเจลชนิด carboxymethyl cellulose โดยการเชื่อมขวางโมเลกุลของ poly(carboxy-methyl cellulose) ด้วยการลดค่าพีเอชของสารละลายพอลิเมอร์ เพื่อให้สารละลายกลายเป็นกรด และเกิดการถ่ายโอนประจุของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) จากนั้นโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกจะเกิดพันธะไฮโดรเจลระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกด้วยกันจนเกิดการเชื่อมขวาง และเกิดเป็นไฮโดรเจล



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด Carboxymethyl cellulose [13]

2.1.4.2 Chemical crosslinking

วิธีนี้เป็นกรเตรียมไฮโดรเจลด้วยการเชื่อมขวางทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงของมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยการเตรียมด้วยวิธีนี้ต้องมีการเติมสารเชื่อมขวางเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์สองสายโซ่เข้าด้วยกัน ทำให้เกิดพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย ดังรูป 2.6

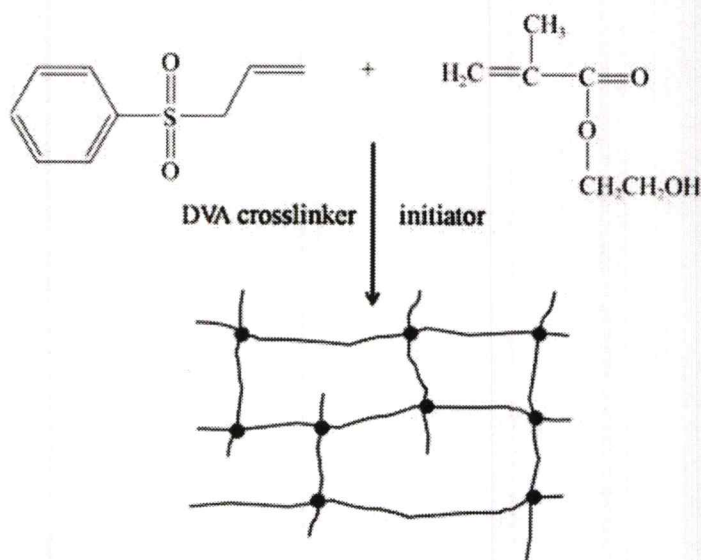


รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยการใช้สารเชื่อมขวาง EGDMA [16]

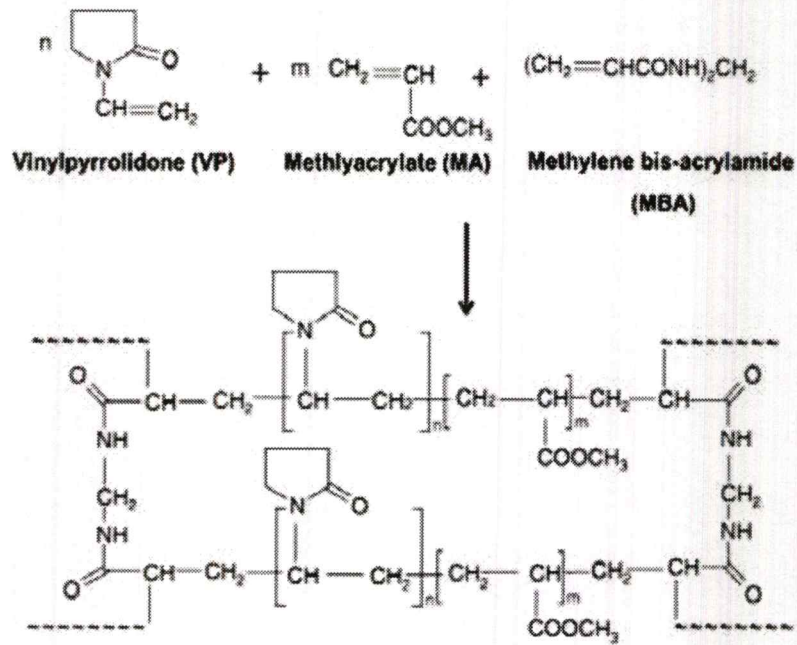
สารเชื่อมขวางที่นิยมใช้ในวิธีนี้ คือ ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) และ glutaraldehyde (GA) เป็นต้น โดยมีงานวิจัยจำนวนมากนำเสนอวิธีเตรียมไฮโดรเจลที่ใช้วิธีการใส่สารเชื่อมขวางทางเคมี 2 แบบ ดังนี้

1. การเติมสารเชื่อมขวาง (Chemical cross-linkers)

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็นการเติมสารเชื่อมขวาง และการเกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ตัวอย่างการสังเคราะห์ไฮโดรเจลร่วมชนิด allyl phenyl sulfone/hydrophilic 2-hydroxyethyl methacrylate (APS-co-HEMA hydrogels) โดยใช้ไดไวนิลเบนซีน (DVB) เป็นสารเชื่อมขวาง โดยนำเสนอกลไกในการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.7 และตัวอย่างการใช้ methylene bisacrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด poly(VP-co-MA) hydrogel ดังรูปที่ 2.8 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการจับไอออนโลหะหนัก



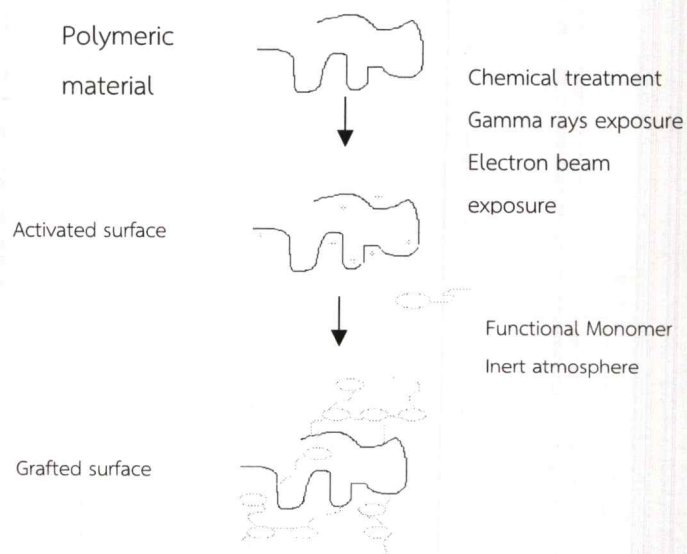
รูปที่ 2.7 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด APS-co-HEMA hydrogels [17]



รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์ poly(VP-co-MA) hydrogel [18]

2. การกราฟต์ (Grafting)

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์บนสายโซ่พอลิเมอร์ โดยใช้สารเชื่อมขวางหรือรังสีความร้อนช่วยให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไว (active site) ขึ้นมา จากนั้นมอนอเมอร์จะเข้าไปกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์ และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันขึ้น จึงเกิดการเชื่อมขวางกันภายในสายโซ่ ดังรูปที่ 2.9 และการทำให้เกิดการกราฟต์ของมอนอเมอร์บนสายโซ่พอลิเมอร์ยังสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้



รูปที่ 2.9 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์ [13]

2.1) Chemical grafting

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้จะใช้สารเคมีเชื่อมขวางทำให้เกิด active sites แล้วเติมมอนอเมอร์เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยตัวอย่างได้มีการเตรียมไฮโดรเจลโคพอลิเมอร์ของ carboxymethyl starch-graft-poly(methacrylic acid) (CMS-g-PMAA hydrogel) สำหรับการประยุกต์ใช้ในการขนส่งยา ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยา free-radical polymerization โดยใช้ bis-acrylamide เป็นสารเชื่อมขวางและเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มในการสังเคราะห์ใช้สารเชื่อมขวางทำให้เกิด active sites บนสายโซ่ของ carboxymethyl starch (CMS) จากนั้นเติม poly(methacrylic acid) เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ และอีกหนึ่งตัวอย่างคือ การเตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของไคโตซานและไดเมทิลอะมีโนเอทิลเมทาคริเลต (Chitosan-g-PDMAEMA) และทำการเชื่อมขวางโมเลกุลของไคโตซาน โดยใช้ GA เป็นสารเชื่อมขวาง และศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อระดับการเชื่อมขวาง จากการทดลองจะได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณ GA มาก การเชื่อมขวางโมเลกุลไคโตซานจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณ GA มากเกินไปจะไม่มีผลต่อระดับการเชื่อมขวาง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน $-NH_2$ ของไคโตซานที่ทำปฏิกิริยากับ GA มีจำนวนจำกัด

2.2) Radiation grafting

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลกราฟต์พอลิเมอร์โดยใช้การฉายรังสีความร้อนที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมาไมโครเวฟ และลำแสงอิเล็กตรอน เป็นต้น เพื่อให้เกิด active site ก่อน แล้วจึงเติมมอนอเมอร์เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเมอร์

2.3) Radiation crosslinking

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็นอีกวิธีที่นิยมโดยใช้การฉายรังสีเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมต่อของมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งคาดว่า การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้ โครงสร้างร่างตาข่ายที่เกิดขึ้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติทั้งด้านโครงสร้างและสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยส่วนมากวิธีนี้จะนิยมเตรียมเป็นสารละลายแบบชั้นตอนเดียว ซึ่งทำให้ลดขั้นตอนการสังเคราะห์ สะดวกรวดเร็ว และยังช่วยลดต้นทุนในการผลิต [13]

2.2 อัลจิเนต (Alginate)

2.2.1 โครงสร้างทางเคมีของอัลจิเนต

อัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากการสกัดสาหร่ายสีน้ำตาล (Phacophyceae) ซึ่งอัลจิเนตเป็นพอลิเมอร์ประเภทเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ในการผลิตอัลจิเนตสาหร่ายทะเลที่ใช้ ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* ซึ่งมีอัลจิเนตประมาณ 15-40% ปริมาณขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาลและแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต อัลจิเนตเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยของมอนอแซคคาไรด์ 2 ชนิด ได้แก่ 1,4- β -D-manuronic acid (M)

และ α -L-guluronic acid (G) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ในโมเลกุลประกอบด้วย Homopolymeric regions ของ M และ G ซึ่งเรียกว่า M-blocks และ G-blocks และมีบางส่วนเป็น MG-blocks สัดส่วนของ Copolymer และโครงสร้างที่กล่าวมาข้างต้นจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของ อัลจิเนต ถ้ามีปริมาณ G สูงทำให้เมื่อเกิดเจลจะมีสมบัติความแข็งแรงมากแต่ความยืดหยุ่นต่ำกว่าและทนต่อความร้อนได้ดี ถ้ามีปริมาณ M สูงเมื่อเกิดเจลจะมีลักษณะอ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่นดีและมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้าง อัลจิเนตที่ผลิตจำหน่ายทางการค้ามีหลายอนุพันธ์จึงทำให้มีสมบัติในการละลายน้ำต่างกัน เช่น อนุพันธ์ของเกลือ K^+ Ca^{2+} NH_4^+ Na^+ และในรูปของ Propylene glycol alginate ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของ Alginate กับ Propylene oxide ภายใต้อุณหภูมิและความดัน อนุพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถละลายได้ในน้ำร้อนและน้ำเย็น [3]

2.2.2 ความหนืดของอัลจิเนต

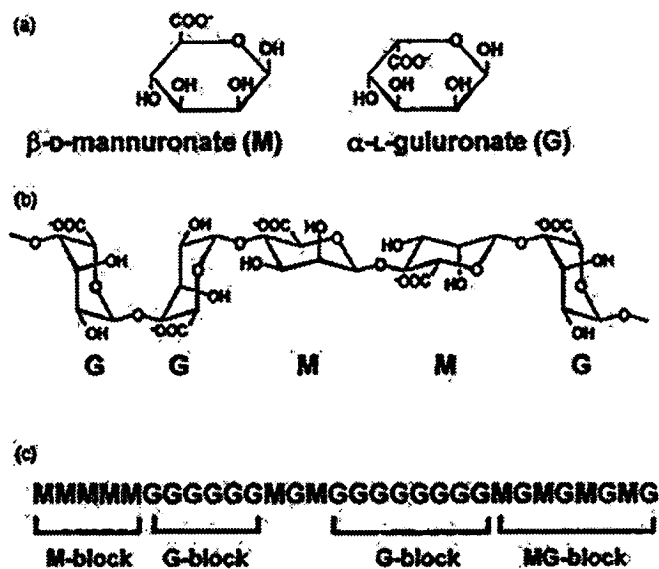
ความหนืดของอัลจิเนตขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดจะลดลง ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง เมื่อ pH ของสารละลายอัลจิเนตมากกว่า 5 ความหนืดจะคงที่ เมื่อ pH ต่ำกว่า 4.5 ความหนืดจะเพิ่มขึ้น และเมื่อ pH เท่ากับ 3 อัลจิเนตจะเริ่มเกิดเป็นผลึก และความหนืดของอัลจิเนตยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล และการมีโลหะประจุบวกในโครงสร้าง

2.2.3 ความสามารถในการสลายตัว

อัลจิเนตมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพสูง สามารถใช้ในร่างกายมนุษย์ได้ ไม่เป็นพิษ Non-immunogenic Non-thrombogenic และย่อยสลายได้ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา (FDA) จึงอนุมัติให้อัลจิเนตสามารถใช้สำหรับงานทางการแพทย์

2.2.4 ความสามารถในการละลาย

ความสามารถในการละลายน้ำของอัลจิเนตขึ้นกับ 3 ปัจจัย คือ ค่าพีเอชของตัวทำละลาย ความแข็งแรงไอออนิกของตัวกลาง การมีไอออนที่ทำให้เกิดเจลในตัวทำละลาย การเปลี่ยนแปลงความแข็งแรงของไอออนิกในสารละลายอัลจิเนตมีผลต่อการขยายสายโซ่พอลิเมอร์และความหนืดของสารละลาย ถ้าความแข็งแรงของไอออนิกสูงการละลายจะลดลง การละลายของอัลจิเนตจึงจำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายที่ปราศจากไอออนที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงกับอัลจิเนตได้ การทำให้อัลจิเนตละลายจำเป็นต้องมีค่าพีเอชมากกว่าค่าวิกฤตซึ่งทำให้หมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) ในโครงสร้างเกิดการ Deprotonated อัลจิเนตสามารถละลายได้ในตัวกลางน้ำที่มีสภาวะความเป็นกรด-ด่าง พีเอชที่เป็นกลาง และสามารถก่อเจลได้อย่างรวดเร็วกับสารที่มีประจุสองบวกเมื่ออยู่ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่มีค่ามากกว่า 6 โดยโครงสร้างของเจลจะมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (Egg Box) ซึ่งมีประจุบวกเกาะอยู่กับสายโซ่พอลิเมอร์



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของอัลจินตชนิดต่าง ๆ [19]

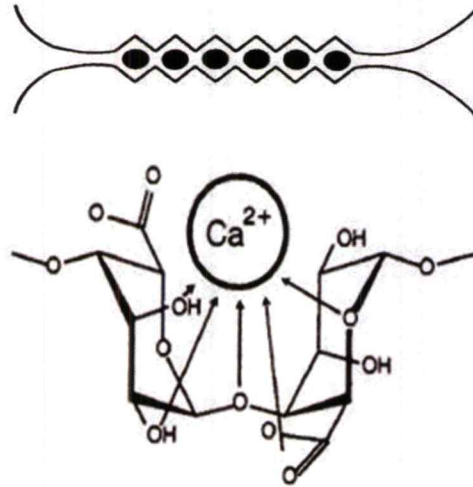
2.2.5 การเกิดเจล

ไฮโดรเจลจากอัลจินตมีสมบัติที่แตกต่างกันโดยขึ้นกับชนิดของการเชื่อมโยง ความหนาแน่นของการเชื่อมโยง และน้ำหนักโมเลกุลกับองค์ประกอบของอัลจินต วิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลจากอัลจินต คือ การเตรียมโดยทำการเชื่อมโยงด้วย Multivalent cations การเกิดเจลเกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนไอออนโซเดียม

การเกิดเจลของสารละลายอัลจินตด้วย Multivalent cations สามารถทำได้ 2 วิธี

1. Internal gelation คือ สารละลายอัลจินตมีการผสมกับเกลือของแคลเซียมที่ไม่ละลายน้ำก่อน จากนั้นแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะถูกปล่อยออกมาจากภายในของสารอัลจินต โดยการลดค่าพีเอชของระบบหรือเพิ่มความสามารถในการละลายของแคลเซียม ทำให้เกิดไฮโดรเจลของอัลจินตขึ้น
2. External gelation คือ สารละลายอัลจินตถูกหยดลงในสารละลายที่มีประจุบวก โดยไอออนบวกจะแพร่จากสารละลายภายนอกเข้าสู่ภายในของหยดอัลจินตซึ่งเรียกวิธีการนี้ว่า การแพร่ (Diffusion method) และเกิดเป็นไฮโดรเจลของอัลจินต

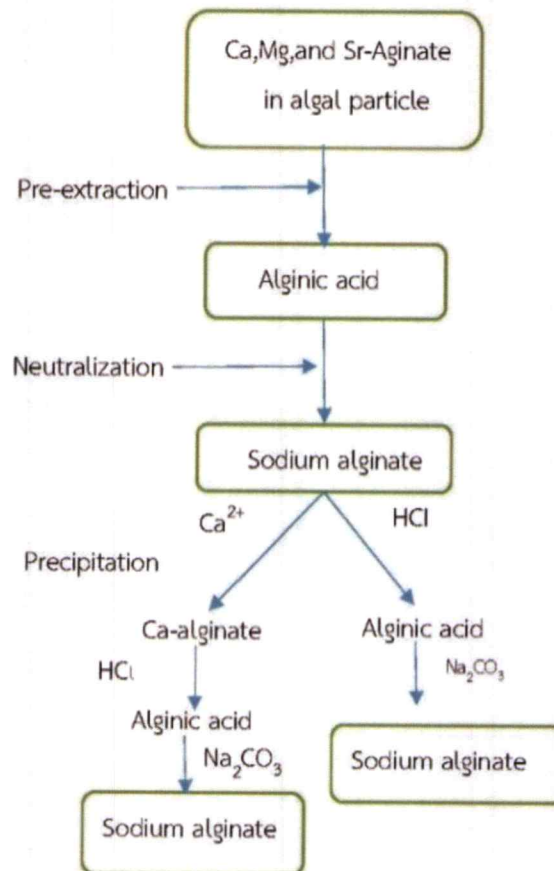
เมื่อค่าพีเอชของสารละลายอัลจินตลดต่ำกว่าค่า pKa ทำให้เกิดเป็นเจลของกรดอัลจินิกแทน โดยวิธีการแรกเป็นการเปลี่ยนแปลงเจลของแคลเซียมอัลจินตไปเป็นเจลของกรดอัลจินิกโดยใช้การแลกเปลี่ยนโปรตอนได้สมบัติที่ดีคือ เจลที่ได้จะไม่สามารถผันกลับมาเป็นสารละลายได้ (Irreversible) เมื่ออยู่ในน้ำเย็นที่มีแคลเซียมไอออน ส่วนวิธีที่สองเป็นการใช้สารกลุ่มแลคโตนมาใช้เป็นตัวไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โซเดียมอัลจินตอย่างช้า ๆ [20]



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model) [3]

2.2.6 วิธีการสกัดอัลจินตจากสาหร่ายทะเล

วิธีนี้ทำได้โดยการนำสาหร่ายสีน้ำตาลมาสกัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก แล้วนำไปล้าง กรอง และทำให้เป็นกลางด้วยด่าง จากนั้นตกตะกอนโซเดียมอัลจินตด้วยแอลกอฮอล์ รายละเอียดดังรูปที่ 2.12 [20]



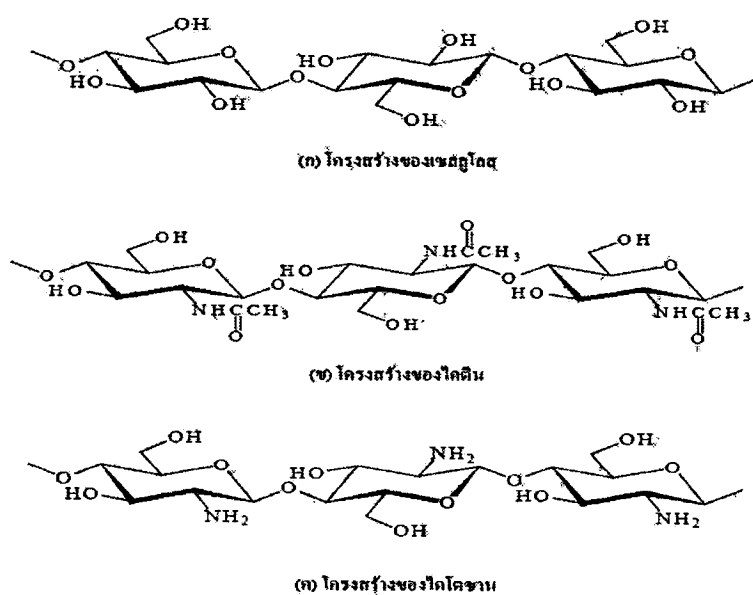
รูปที่ 2.12 ขั้นตอนการสกัดโซเดียมอัลจินตจากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล

2.2.7 การประยุกต์ใช้งานอัลจินต

1. อุตสาหกรรมอาหาร เช่น ใช้เป็นสารทำให้เกิดเจล สารให้ความข้นในซูปครีม ไอศกรีม และเยลลี่ รวมถึงเติมในอาหารกระป๋องเพื่อเพิ่มความหนืด และสารเพิ่มความคงตัว ทั้งนี้เอสเทอร์อัลจินตใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifiers) เป็นต้น
2. อุตสาหกรรมเวชสำอาง เช่น ถูกใช้เป็นสารชั้นในการผลิตเครื่องสำอาง
3. อุตสาหกรรมการแพทย์ เช่น การเตรียมแคปซูลปลดปล่อยยาจากอัลจินต การนำมาขึ้นรูปเจลในวัสดุการพิมพ์ทันตกรรม นำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ และการทำแผ่นปิดแผลเพื่อช่วยลดอาการบาดเจ็บและทำให้แผลหายได้เร็ว เป็นต้น [3]

2.3 ไคตินและไคโตซาน (Chitin and Chitosan)

ไคติน (Poly (β -(1-4)-N-acetyl-D-glucosamine) เป็นพอลิแซคคาไรด์ธรรมชาติ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี 1811 โดยนักเคมีชาวฝรั่งเศส Henri Braconnot ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลสดังรูปที่ 2.5 (ก) ต่างกันเพียงหน่วยย่อยมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.5 (ข) ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินถูกค้นพบโดยบังเอิญในปี 1859 โดย Rogef [21] จากการต้มไคตินในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นเกิดเป็นไคโตซาน ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยากำจัดหมู่อะเซทิล (Deacetylation) ออกจากสารไคติน ผลจากการเกิดปฏิกิริยาอะเซทิลเลชันจะทำให้หมู่อะเซทิลที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2 ในวงแหวนไพราโนส (Pyranose ring) ของไคตินเปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโน ทำให้โครงสร้างของไคตินจาก N-Acetyl Glucosamine กลายเป็น Glucosamine ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ว่องไวพร้อมทำปฏิกิริยา และมีสมบัติละลายได้ในกรดอ่อน



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (ก) โครงสร้างเคมีของไคติน (ข) โครงสร้างเคมีของไคโตซาน (ค) [22]

2.3.1 แหล่งที่มาของไคตินและไคโตซาน

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลสพบมากในสัตว์ทะเลที่มีเปลือกแข็งภายนอก เช่น กุ้ง ปู กุ้ง เปลือกหอย ผึ้ง เซลล์ของพืชบางชนิด และยังพบอีกมากในจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ เช่น เห็ด รา และ ยีสต์ เป็นต้น [23] และอื่น ๆ

2.3.2 โครงสร้างของไคตินและไคโตซาน

ไคติน ($C_8H_{13}O_5N$)_n มีโครงสร้างคล้ายกับเซลลูโลสต่างกันเพียงหน่วยย่อยของเซลลูโลสคือ D-glucose ส่วนหน่วยย่อยของไคตินคือ N-acetylglucosamine และ 2-acetamido-2-deoxy-D-glucose ซึ่งเป็นอนุพันธ์หนึ่งของกลูโคสโดยไคตินมีชื่อทางเคมีคือ Poly β (1-4)-2-acetamido-2-deoxy-D-glucose

โครงสร้างผลึกของไคติน มีการจัดเรียงตัวของผลึก 3 รูปแบบ

- 1.) อัลฟาไคติน (α -chitin) มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทางสวนทางกัน มีความแข็งแรงสูง ได้แก่ ไคตินจากเปลือกกุ้ง และกระดองปู
- 2.) เบต้าไคติน (β -chitin) มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทางเดียวกัน ทำให้สายโซ่ไม่ค่อยมีความแข็งแรง จึงมีความว่องต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าการจัดเรียงตัวแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากแกนปลาหมึก
- 3.) แกมมาไคติน (γ -chitin) มีการจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในทิศทางที่ไม่แน่นอน (สวนทางสลับทิศทางกันไปมา) ทำให้มีความแข็งแรงรองจากจากแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากเห็ด รา และพืชชั้นต่ำ

2.3.3 เทคนิคการเตรียมไคตินและไคโตซาน

การเตรียมไคตินขั้นพื้นฐานมีกระบวนการหลัก ๆ อยู่ 3 กระบวนการ ได้แก่ การแยกโปรตีน (Deproteinization), การแยกแคลเซียมคาร์บอเนต (Demineralization) และการแยกเม็ดสี (Decoloration) โดยแหล่งที่มาของสารตั้งต้นส่วนใหญ่มาจากสัตว์ทะเล เช่น กุ้ง ปู และเปลือกหอย

2.3.3.1 กระบวนการแยกโปรตีน (Deproteinization)

กระบวนการแยกโปรตีนมีวิธีทำ 2 วิธี ได้แก่ การใช้เบส (Alkali) และการใช้เอนไซม์โปรติเอส (Protease) ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้เบส

1. การใช้เบสในกระบวนการแยกโปรตีน คือ กระบวนการกำจัดโปรตีนออกจากสัตว์ทะเล ด้วยการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.5-15 % อุณหภูมิในช่วง 25-100 °C เป็นเวลา 0.5-72 ชั่วโมง ซึ่งสารโปรตีนจะถูกกำจัดออกพร้อมกับไขมันและสีบางส่วน หลังจากนั้นล้างน้ำให้สะอาดจนค่า pH เป็นกลาง ก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการต่อไป [24]

2. การใช้เอนไซม์ ในกระบวนการแยกโปรตีน คือ การใช้เอนไซม์โปรติเอส ซึ่งสามารถย่อยสลายโปรตีนได้ โดยวิธีนี้มีข้อดี ในเรื่องของ การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลและค่าอาศัยของการเกิดดิวเอเซทิลเลชันของโคตินน้อยกว่า แต่เอนไซม์อาจไม่สามารถแยกโปรตีนออกได้หมด อีกทั้งยังใช้เวลานานขึ้นกับประสิทธิภาพของเอนไซม์ จึงทำให้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมนัก

2.3.3.2. กระบวนการแยกแคลเซียมคาร์บอเนต (Deminerlization)

การแยกแคลเซียมคาร์บอเนตออกจากเปลือกกุ้งหรือเปลือกปูสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การใช้สารละลายกรดและใช้สารละลาย EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid)

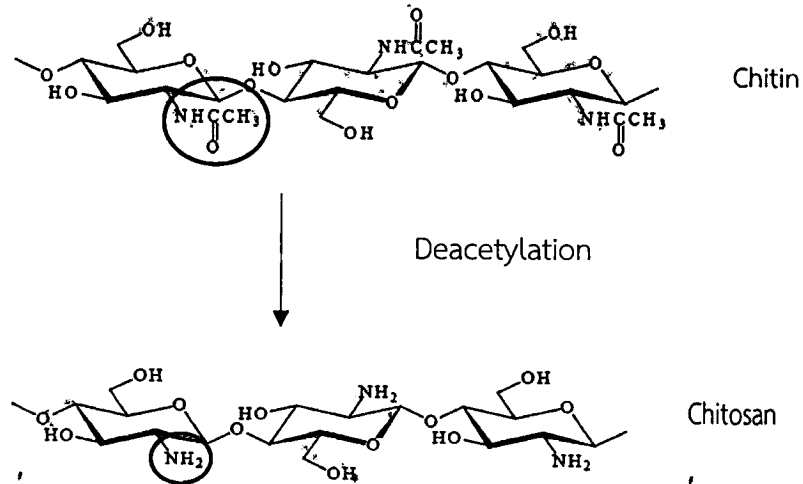
1. การแยกแคลเซียมคาร์บอเนตโดยใช้สารละลายกรด ซึ่งกรดที่นิยมใช้คือ กรดไฮโดรคลอริก และยังมีอีกหลายชนิด เช่น กรดไนตริก กรดอะซิติก เป็นต้น การแยกด้วยกรดจะเปลี่ยนแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ให้อยู่ในรูปของแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) ที่ละลายน้ำได้และมักทำที่อุณหภูมิ 15-30 องศาเซลเซียส เพื่อหลีกเลี่ยงการเสียดสภาพของโคติน

2. การแยกแคลเซียมคาร์บอเนตโดยใช้สารละลาย EDTA เนื่องจากการแยกด้วยกรดอาจส่งผลให้โคโตซานย่อยสลายไปด้วย ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง การใช้วิธีนี้จึงอาจเป็นทางเลือกหนึ่งในการแยกแคลเซียมคาร์บอเนต แต่ทางเลือกนี้อาจไม่ค่อยเป็นที่นิยมเพราะไม่สามารถกำจัดสารอินทรีย์ออกได้หมด

2.3.3.3 กระบวนการแยกเม็ดสี (Decoloration)

โคตินที่ได้จากการผ่านกระบวนการทั้ง 2 กระบวนการ อาจจะยังคงเหลือเม็ดสีอยู่ซึ่งสามารถแยกออกโดยการล้างด้วยเอทานอล หรืออะซิโตน หรือสารฟอกขาวอื่น ๆ

การเตรียมโคโตซานจะใช้สารตั้งต้นคือ โคติน และปฏิกิริยาที่เกิดการเปลี่ยนโคตินเป็นโคโตซานคือ ปฏิกิริยาดิวเอเซทิลเลชัน (Deacetylation) ดังรูปที่ 2.6 ทำให้หมู่อะเซทาไมด์ที่อะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่สองในวงแหวนไพราโนส (Pyranose ring) ของโคตินเปลี่ยนเป็นหมู่เอมิโน ($-\text{NH}_2$) การกำจัดหมู่อะเซทิล ($\text{CH}_3\text{CO}-$) กระทำได้โดยใช้เบสที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 40% ขึ้นไป การกำจัดหมู่อะเซทิลออกจากโคตินอาจเกิดบางส่วนหรือเกือบทั้งหมดขึ้นกับสภาวะของปฏิกิริยาซึ่งหมู่เอมิโนที่เกิดขึ้นสามารถรับโปรตอนจากสารละลายเปลี่ยนเป็นโครงสร้างที่มีประจุบวก ทำให้มีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าเมื่อกำจัดหมู่อะเซทิลออกร้อยละ 50 ขึ้นไป ทำให้โคโตซานละลายได้ในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดน้ำส้มสายชู กรดแลกติก ดังนั้นค่าระดับการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of deacetylation , %DD) จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อสมบัติที่เปลี่ยนไปของโคโตซาน [3]



รูปที่ 2.14 การเตรียมไคโตซานจากปฏิกิริยา Deacetylation ของไคติน [21]

2.3.4 สมบัติของไคตินและไคโตซาน

2.3.4.1 ความหนืด

ความหนืดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น น้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยและร้อยละในการกำจัดหมู่อะเซทิล (Degree of deacetylation: %DD) โดยการกำจัดหมู่อะเซทิลที่ใช้ระยะเวลาานหรือไคโตซานที่กำจัดหมู่อะเซทิลสูง จะทำให้ความหนืดของสารละลายลดลง เนื่องจากภาวะที่ใช้ในการกำจัดหมู่อะเซทิลที่รุนแรงจะมีผลทำให้เกิดการแตกขาดของสายโซ่โมเลกุล ส่วนน้ำหนักโมเลกุลโดยเฉลี่ยของไคโตซานถ้ามีค่าเฉลี่ยสูงจะทำให้สารละลายมีความหนืดสูงกว่าค่าเฉลี่ยที่ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังมีประเด็นของความเข้มข้นกับอุณหภูมิ โดยไคโตซานที่ได้รับอุณหภูมิสูงกว่าจะมีความหนืดต่ำกว่า เนื่องจากการแตกขาดของสายโซ่ [25]

2.3.4.2 สมบัติการละลาย

เนื่องจากไคตินมีพลังงานที่สูงเกิดจากความแข็งแรงของปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลที่เกิดจากพันธะไฮโดรเจน ทำให้ไคตินไม่ละลายในตัวทำละลายทั่วไป เช่น น้ำ กรดเจือจาง และแอลกอฮอล์ จึงเป็นข้อจำกัดในการพัฒนา แปรรูปและการใช้งานไคติน ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ที่สำคัญของไคตินละลายได้ในกรดเจือจาง เนื่องจากโครงสร้างของไคโตซานมีหมู่เอมีโน (-NH₂) และไฮดรอกซิล (-OH) เมื่อละลายในสารละลายกรด หมู่เอมีโนจะได้รับโปรตอนเกิดเป็นประจุบวก (-NH₃⁺) ทำให้ไคโตซานละลายได้ในสารละลายกรด

2.3.4.3 สมบัติทางความร้อน

ไคตินและไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง ซึ่งควรแสดงสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) เช่น มีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) แต่ด้วยไคโตซานมีพันธะไฮโดรเจนที่เป็นระเบียบ พลังงานความร้อนจึงไม่สามารถทำลายพันธะให้สายโซ่นี้

เคลื่อนที่ได้ ทำให้ไม่แสดงอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว แต่อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนต่อเนื่องนาน ๆ ถึงระดับอุณหภูมิสูงจนพันธะด้านไม่ไหว ก็จะทำให้ไคตินและไคโตซานไหม้และสลายไปในที่สุด [25]

2.3.4.4 ค่าองศาของการเกิดอะเซทิลเลชัน (Degree of deacetylation)

ค่าองศาของการเกิดอะเซทิลเลชัน คือสัดส่วนของจำนวน D-glucosamine ที่มีอยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ของไคตินและไคโตซาน ซึ่งค่าองศาการเกิดอะเซทิลเลชันสามารถใช้ระบุโครงสร้างไคตินและไคโตซานได้ เนื่องจากไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคติน คือ ถ้าองศาของการเกิดอะเซทิลเลชันต่ำ พอลิเมอร์จะแสดงสมบัติของไคติน แต่ถ้าค่าองศาการเกิดอะเซทิลเลชันสูง จะแสดงสมบัติของไคโตซาน

2.3.5. ประโยชน์ของไคโตซาน

เนื่องจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และยังมีความปลอดภัยต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ไคโตซานจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายด้าน ดังนี้

2.3.5.1 ด้านอาหารและเครื่องดื่ม

1. สารป้องกันคอเลสเตอรอลและการจับไขมันหรืออาหารเสริม: โดยไคโตซานเป็นเส้นใยอาหารหรือไฟเบอร์จากสัตว์ที่เป็นสารพวกคาร์โบไฮเดรตชนิดหนึ่งไม่มีรสหวานไม่ละลายน้ำ ไม่ย่อยในกระเพาะอาหารของคน ไม่ให้พลังงานงานหรือสารอาหารแก่ร่างกาย แต่มีประโยชน์ต่อระบบขับถ่าย สามารถเข้าจับไขมันจึงเป็นที่นิยมในการนำมาทำผลิตภัณฑ์อาหารเสริม

2. สารเติมแต่ง: ไคโตซานช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บรักษาสีของอาหารทะเล หลังจากผ่านกระบวนการทางความร้อนและยังสามารถควบคุมความเป็นกรดของน้ำผลไม้ได้อีกด้วย

2.3.5.2 ด้านเครื่องสำอาง

1. ดูแลเส้นผม: ผลมาจากประจุที่ต่างกันของเส้นผมกับไคโตซานโดยเส้นผมมีประจุลบและไคโตซานมีประจุบวกจึงทำให้จับกันได้ดีโดยไคโตซานจะเคลือบอยู่บนเส้นผมเพิ่มความอ่อนนุ่ม

2. ขจัดกลิ่นปาก: สามารถใช้เป็นส่วนประกอบในยาสีฟัน น้ำยาบ้วนปากเพื่อป้องกันการก่อตัวของหินปูน

3. หนอมผิว: ไคโตซานสามารถให้ความชุ่มชื้นแก่ผิวหนังได้ เนื่องจากประจุบวกบนโครงสร้างที่เข้ากันได้ดีกับผิวหนัง

2.3.5.3 ด้านการแพทย์

1. วัสดุปิดแผล: ไคโตซานสามารถสมานแผลและลดความเจ็บปวดโดยการรักษาแผลผ่าตัดด้วยไคโตซาน ไม่ทำให้ระคายเคือง

2 สารห้ามเลือด: ไคโตซานทำให้เลือดเกิดการแข็งตัว เป็นสารห้ามเลือด และสามารถผสมในซีฟิงเพื่อช่วยรักษาแผลได้

3 การปลูกถ่ายเซลล์: มีการพัฒนานำเยื่อไคตินและไคโตซานมาใช้ในการปลูกถ่ายอวัยวะ เนื่องจากไคโตซานมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพและปลอดภัยไม่มีสารตกค้าง

2.3.5.4 ด้านการเกษตร

การเคลือบเมล็ดพันธุ์: ไคโตซานมีคุณสมบัติในการเคลือบเพื่อป้องกันการปลอมปนของเมล็ดพันธุ์ อีกทั้งยังป้องกันโรคและแมลงรวมถึงยืดอายุการใช้งานการเก็บรักษา

2.3.5.5 ด้านการบำบัดน้ำเสีย

1 การบำบัดน้ำดื่ม: สามารถนำไคโตซานมาผสมกับถ่านกัมมันต์กำจัดสารประกอบอินทรีย์และกำจัดโลหะหนักเพื่อทำให้น้ำดื่มบริสุทธิ์

2 การบำบัดของเสียประเภทอาหาร: ไคโตซานสามารถจับอนุภาคที่เป็นคอลลอยด์ที่แพร่กระจายอยู่ในน้ำเสีย โดยจะดึงโปรตีนกลับคืนมาเพื่อใช้ในการผลิตอาหารสัตว์

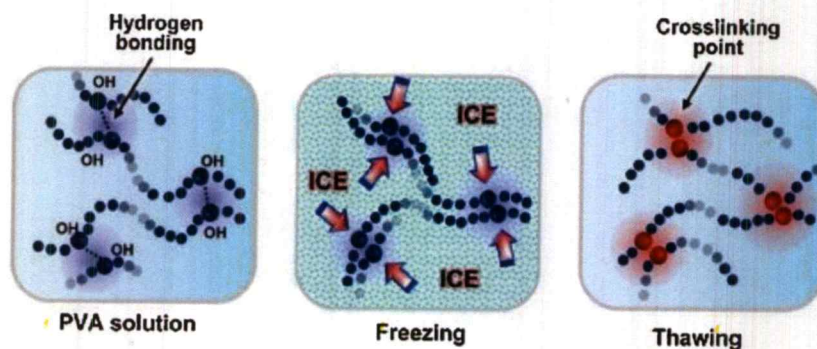
3 การบำบัดน้ำในสระว่ายน้ำและบ่อน้ำแร่: ไคโตซานสามารถตกตะกอน เช่น น้ำมัน สบู่ สิ่งสกปรก ที่ปะปนอยู่ในน้ำทำให้น้ำใสขึ้นได้ [26]

2.4 กระบวนการ Freeze-Thaw ในไฮโดรเจล

Freeze-Thaw คือกระบวนการอย่างหนึ่งที่ช่วยในเรื่องของการละลายของสสาร โดยผ่านการแช่แข็งและละลายหรือการผ่านอุณหภูมิต่ำและสูงสลับกันไป จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยในเรื่องของการละลายโดยไม่ใช้สารเคมีอื่นเพิ่มเติมแต่อย่างใด โดยข้อดีของการเตรียมผ่านกระบวนการนี้ คือ จะเกิดการเชื่อมโยงทางกายภาพที่ได้จากการแช่แข็งและละลาย จึงไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษที่อาจจะทำให้เกิดโรคมะเร็ง มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์และส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลสูงขึ้น

เนื่องจากสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลไคโตซานไม่ครอบคลุมสำหรับการใช้งานบางส่วนในด้านชีวการแพทย์ นักวิจัยหลายกลุ่มจึงพยายามที่จะปรับปรุงเพื่อให้สมบัติเชิงกลและทางชีวภาพดีขึ้น การผสมกันระหว่างพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของวัสดุไฮโดรเจลโดยผ่านกระบวนการ Freeze-Thaw เช่น การใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านชีวการแพทย์และชีวเคมี โดยมีสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพ การเตรียมง่ายและต้นทุนต่ำ การผสมผสานของไคโตซานกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จึงใช้วิธีการเตรียมผ่านเทคนิค Freeze-Thaw ซึ่งในระหว่างขั้นตอนการแช่แข็ง การแยกของวัฏภาคของเหลว-ของเหลวและการสร้างขึ้นของผลึกน้ำแข็งจะเกิดขึ้นในวัฏภาคที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์ต่ำ เรียกว่า Polymer poor phase โข่พอลิเมอร์ในวัฏภาคที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของพอลิเมอร์สูง เรียกว่า Polymer rich phase จะทำให้เกิดการสร้างขึ้นของพันธะไฮโดรเจนและผลึกเล็ก ๆ ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ในขั้นตอนการละลายจะทำให้มีการสร้างขึ้นของผลึกเล็ก ๆ ของพอลิเมอร์ที่เหลืออยู่ซึ่งทำให้เกิดการสร้างขึ้นของโครงข่ายไฮโดรเจล

ผลึกน้ำแข็งกระทำตัวเป็นสารเชื่อมขวางในระหว่างการสร้างขึ้นของไฮโดรเจลและทั้งโครงสร้างที่เป็นรูปพรุนไว้ เนื่องจากมีพื้นที่ว่างจากการหลอมเหลวผลึกน้ำแข็งในระหว่างขั้นตอนการละลาย ดังนั้นขนาดของผลึกน้ำแข็งที่ถูกสร้างขึ้นในโครงสร้างจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของรอบ Freeze/Thaw [21]



รูปที่ 2.15 กระบวนการ Freeze-Thaw ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [21]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sun และคณะ [4] ได้เตรียมไฮโดรเจลโคโตซาน เพื่อศึกษาความแข็งแรงของไฮโดรเจลที่เตรียมในสารละลาย 2 ระบบ คือ สภาวะกรด และสภาวะเบส หลังจากนั้นขึ้นเจลและทำให้เป็นกลาง พบว่าไฮโดรเจลในสภาวะเบสมีค่าความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) สูงกว่าไฮโดรเจลในสภาวะกรด อีกทั้งเมื่อความเข้มข้นของโคโตซานต่างกันก็ส่งผลต่อค่าความแข็งแรง โดยความเข้มข้นสูงยังมีค่าความแข็งแรงสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อนำไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw มาศึกษาสัญญาณวิทยา พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโคโตซานเพิ่มขึ้น ขนาดของรูพรุนจะลดลง รวมถึงในสภาวะเบสมีขนาดรูพรุนเล็กกว่า เมื่อเทียบที่ใช้ความเข้มข้นเท่ากัน ดังนั้นการละลายโคโตซานในเบสส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงภายใน โดยไม่ต้องนำโคโตซานไปดัดแปลงหรือเชื่อมโยงภายนอกเพื่อเพิ่มความแข็งแรงอีก

He และคณะ [27] ได้คิดค้นการทำไฮโดรเจลคอมโพสิตที่เกิดจากโคโตซานกับอัลจิเนตโดยเตรียมเป็นชั้น ๆ สลับกันไป โดยศึกษาการเกิดเป็นเจลในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน และระยะเวลาแช่ให้เกิดเจลที่แตกต่างกัน ดังนี้ ควบคุมความเข้มข้นของโคโตซานและอัลจิเนตเท่ากันโดยมีทั้งหมด 3 ความเข้มข้น มีการควบคุมความเข้มข้นของอัลจิเนตและปรับความเข้มข้นของโคโตซานในอัตราส่วนต่าง ๆ และสุดท้ายควบคุมความเข้มข้นของโคโตซานและปรับความเข้มข้นของอัลจิเนตในอัตราส่วนต่าง ๆ โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ผลว่ายิ่งใช้ความเข้มข้นสูงขึ้นไปยิ่งส่งผลให้ความหนาของชั้นนั้นหนาขึ้น และผลของการใช้ความเข้มข้นของโคโตซานกับอัลจิเนตต่างกันก็ส่งผลต่อความหนาที่ต่างกัน รวมถึงระยะเวลาในการแช่ให้เกิดเจล คือ ถ้าเพิ่มเวลาการแช่หรือความเข้มข้นก็จะส่งผลให้ความหนาเพิ่มขึ้น ดังนั้น งานรูปแบบใหม่ ๆ ที่สร้างเจลเป็นชั้น ๆ จะสามารถควบคุมความหนาได้ โดยการควบคุมความเข้มข้นหรือระยะเวลาในการแช่ให้เกิดเจล อีกทั้งยังมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพด้วย

Liu และคณะ [28] ได้ศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าของไฮโดรเจลที่เกิดจากไคโตซานและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยทำในระบบสารละลายเบส (LiOH/KOH/urea) มีการเชื่อมขวางทั้งทางเคมี และทางกายภาพและถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้าในน้ำเกลือ พบว่าไฮโดรเจลที่เกิดจากไคโตซานและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผ่านระบบสารละลายเบสสามารถเกิดเป็นเนื้อเดียวกันที่มีความแข็งแรงเชิงกลสูงมากและยังตอบสนองต่อการกระตุ้นไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้า องค์ประกอบตัวทำละลาย ค่าความเป็นกรดต่าง และค่าความเป็นไอออนของสารละลาย งานวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางในการนำไฮโดรเจลที่เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพมาใช้ในระบบควบคุมด้วยไฟฟ้า เป็นตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า หรือใช้ในการขับเคลื่อนวัตถุที่อยู่ติดกันให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า

Chang และคณะ [29] ได้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลโดยวิธีการละลายไคตินในสารละลาย 8 wt% NaOH/4 wt% urea จากนั้นทำการ Freezing/thawing ซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพจนได้สารละลายใส ไฮโดรเจลที่เกิดจากไคตินถูกนำไปผ่านการเชื่อมโยงทางเคมีด้วย Epichlorohydrin (ECH) ที่อุณหภูมิ 60 °C ทำให้ได้ไฮโดรเจลที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โครงสร้างของไฮโดรเจลมีลักษณะพรุนแบบสม่ำเสมอถึงความแข็งแรงเชิงกลที่ดีเยี่ยม และมีการศึกษาเพื่อทดสอบความเป็นพิษของไฮโดรเจลโดยการนำเซลล์ 293T มาเพาะเลี้ยง ผลการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลนั้นปลอดภัยและมีคุณสมบัติเข้ากันทางชีวภาพได้ดี เนื่องจากเซลล์ 293T สามารถเจริญเติบโตบนไฮโดรเจลที่เกิดจากไคติน ดังนั้นไฮโดรเจลที่เตรียมจากไคตินจึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุสำหรับการสร้างกล้ามเนื้อ

Xie และคณะ [30] ได้พัฒนาไฮโดรเจลที่เกิดจากไคโตซานโดยใช้อนุภาคนาโนของซิลเวอร์เป็นส่วนเสริมแรง นำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและตรวจสอบสมบัติการต้านทานแบคทีเรียสำหรับเร่งการสมานแผล โดยการนำไคโตซานมาละลายในสารละลาย 4.5 wt% LiOH/ 7 wt% KOH/ 8 wt% urea/ 80.5 wt% H₂O ผ่านวิธีการ Freezing/thawing จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และทำให้เกิดเจลซึ่งมีการใส่อนุภาคนาโนของซิลเวอร์ รวมไปถึงไฮโดรเจลเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและเพื่อปรับปรุงสมบัติในการต้านทานเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจล จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล การบวมตัว รวมถึงประสิทธิภาพการสมานบาดแผล ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น การบวมตัวลดลง และมีประสิทธิภาพการต้านทานเชื้อแบคทีเรียดีเยี่ยม

Gao และคณะ [31] ได้ศึกษาการสังเคราะห์ไคโตซานอีเทอร์โดยเตรียมในสารละลายอัลคาไล/ยูเรีย โดยการนำไคโตซานไปละลายในสารละลาย KOH/ LiOH/ urea ผ่านวิธีการ Freezing/thawing จนได้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และได้นำไคโตซานไปสังเคราะห์โดยใช้ปฏิกิริยา etherification ได้ไคโตซาน 5 ชนิดที่แตกต่างกัน ได้แก่ Trimethyl chitosan (TMCh)

Carboxymethyl chitosan (CMCh) Ionic conductivities ของ hydroxyethyl chitosan (HECh) Hydroxypropyl chitosan (HPCh) และ Cyanoethyl chitosan (CECh) ซึ่งไคโตซานที่สังเคราะห์โดยใช้ปฏิกิริยา Etherification ยังมีสมบัติที่น่าสนใจสำหรับการประยุกต์ใช้ในวิทยาศาสตร์การอาหาร การแพทย์ และวัสดุทางชีวภาพ

Li และคณะ [32] ได้ศึกษาอุณหภูมิในการเกิดไฮโดรเจลของไคโตซานที่ละลายในสารละลายอัลคาไล/ยูเรีย โดยนำไคโตซานมาละลายในสารละลาย 7 wt% NaOH/ 12 wt% urea/ 81 wt% H₂O ผ่านวิธีการ Freezing/thawing จนได้สารละลายเนื้อเดียวกัน และนำสารละลายไคโตซานที่ได้ไปให้ความร้อนซึ่งสารละลายไคโตซานสามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจลได้ และมีการนำไปทดสอบเบื้องต้นพบว่าไฮโดรเจลไคโตซานมีสมบัติทางชีวภาพและรองรับการเติบโตของเซลล์ไฮโดรเจลที่เกิดขึ้นประกอบด้วยไคโตซานเพียงอย่างเดียว

PitchayaTreenate และ Pathavuth Monvisade [33] ได้ศึกษาไฮโดรเจลส่งยาเฉพาะพื้นที่โดยทำการผสมระหว่างไฮดรอกซีเอทิลอะคริลไคโตซาน (HC) และโซเดียมอัลจิเนต (SA) ซึ่งมีการพัฒนาไฮโดรเจลโดยใช้ตัวเชื่อมโยง (Crosslinkers) ประเภทต่าง ๆ ได้แก่ แคลเซียมไอออน (Ca²⁺) ซิงค์ไอออน (Zn²⁺) และ คอปเปอร์ (Cu²⁺) ผลจากการทดสอบ FT-IR แสดงให้เห็นว่า แคลเซียมไอออน (Ca²⁺) สามารถเชื่อมโยงกับโซเดียมอัลจิเนต (SA) เกิดพันธะไอออนิกเท่านั้น ขณะที่ ซิงค์ไอออน (Zn²⁺) และ คอปเปอร์ (Cu²⁺) สามารถเชื่อมโยงกับไฮดรอกซีเอทิลอะคริลไคโตซาน (HC) และโซเดียมอัลจิเนต (SA) เกิดพันธะโคออร์ดิเนต และสามารถเกิดพันธะไอออนิกเพียงบางส่วนกับโซเดียมอัลจิเนต (SA) การผสมกันระหว่างไฮดรอกซีเอทิลอะคริลไคโตซาน (HC) และโซเดียมอัลจิเนต (SA) สามารถชะลออัตราการย่อยสลายของไฮโดรเจลเพราะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ระหว่างไฮดรอกซีเอทิลอะคริลไคโตซาน (HC) และโซเดียมอัลจิเนต (SA) ในของเหลวที่จำลองระบบทางเดินอาหาร เมื่อไฮโดรเจลอยู่ในระบบจำลองกระเพาะอาหาร (The simulated gastric fluid (SGF)) อัตราการปลดปล่อยยาค่อนข้างต่ำ แต่เมื่ออยู่ในระบบจำลองลำไส้เล็ก (The simulated intestinal fluid (SIF)) อัตราการปลดปล่อยยาจะขึ้นกับไฮดรอกซีเอทิลอะคริลไคโตซาน (HC) และตัวเชื่อมโยง (Crosslinkers) และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน HC 75:SA 25 เป็นสูตรที่ดีที่สุดในการควบคุมการปลดปล่อยยาในลำไส้เล็ก นอกจากนี้อัตราส่วน HC 50:SA 50 ที่ใช้สารเชื่อมโยงแคลเซียมไอออน (Ca²⁺) 0.5 โมลาร์ แสดงการปลดปล่อยยาค่อนข้างต่ำในระบบจำลองลำไส้เล็ก แต่อาจจะมีประสิทธิภาพสำหรับการส่งยาเฉพาะที่ลำไส้ใหญ่

Wang และคณะ [34] ได้ศึกษากระบวนการการเกิดเจลของไคโตซานในระบบสารละลายเบสผ่านการถ่ายภาพเรืองแสง (Confocal laser scanning fluorescence microscope) พบว่าไฮโดรเจลจะเกิดขึ้นหลังจากมีการให้ความร้อน แต่อย่างไรก็ตามขั้นตอนการล้างเบสก็ส่งผลต่อ

โครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งทำให้มีความแข็งแรงสูงขึ้น เกิดจากพฤติกรรมหดตัวและเมื่อศึกษาแบบไดนามิกจะพบว่าอุณหภูมิส่งผลให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น รวมถึงการล้างเบสออก ถ้ามีการล้างเบสจะทำให้ค่ามอดุลัสสูงกว่าแบบไม่ได้ล้างเบสออก ดังนั้นการเกิดเจลขึ้นกับทั้งให้ความร้อนและการล้างเบสออกจากไฮโดรเจล

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าไฮโดรเจลที่เกิดจากการละลายไคโตซานในสารละลายเบสโดยผ่านกระบวนการ Freezing/thawing และมีการเพิ่มสารเชื่อมโยงจะทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ค่าความเค้นและความเครียดสูงกว่าไฮโดรเจลในสภาวะกรด ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาไฮโดรเจลที่เกิดจากการผสมระหว่างไคโตซานกับโซเดียมอัลจินตซึ่งมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพมาละลายในสารละลายเบส ผ่านกระบวนการ Freezing/thawing จนได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกันและใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเพิ่มการเชื่อมโยงทางกายภาพเพื่อการคงรูปและความแข็งแรงโดยนำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจลต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ไคโตซาน (Chitosan); M_w 270,000 Daltons [35], %DD = 85 เกรดวิเคราะห์ Eland Co.,Ltd
2. โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate); M_w 1,296,172 Daltons เกรดวิเคราะห์ Acros Organics Co.,Ltd
3. โพแทสเซียม ไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide); KOH เกรดวิเคราะห์ Ajax Finechem Co.,Ltd
4. ยูเรีย (Urea) เกรดวิเคราะห์ CARLO ERBA Reagents Co.,Ltd
5. ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (Lithium hydroxide, 98%, pure, anhydrous); LiOH เกรดวิเคราะห์ ACROS ORGANICS Co.,Ltd
6. ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid); HCl เกรดวิเคราะห์ CARLO ERBA Reagents Co.,Ltd
7. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride); $CaCl_2$ เกรดวิเคราะห์ Merck Co.,Ltd
8. น้ำกลั่น
9. น้ำมันพาราฟิน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องแก้ว
2. จานเพาะเชื้อ (Petri dishes) ชนิดพลาสติก ยี่ห้อ Hycon Plastic
3. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
4. เครื่องกวนผสมสารเคมี (Mechanical overhead stirrer) ยี่ห้อ IKA® รุ่น C-MAG HS7.
5. เครื่องชั่งแบบละเอียด (Denver Instrument Co.,Ltd) ทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น SI-234
6. ที่คีบ (Forceps)
7. พลาสติกแรป (Plastic wrap) ยี่ห้อ M Wrap®
8. ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ (Universal indicator) EMD Millipore Corporation Co.,Ltd
9. กระจกทรงเบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 mm GE Healthcare Companies Co.,Ltd
10. ถุงซิปล็อค (Ziplock bag) Thantawan Industry PLC Co.,Ltd
11. ตู้แช่แข็ง รุ่น LGT 2325 LIEBHERR Co.,Ltd

12. ชุดกรองแบบลดความดัน
13. โถดูดความชื้น
14. ตู้ดูดควัน (Fume hood) รุ่น FH 120/DC Official Equipment Manufacturing Co.,Ltd
15. เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier caliper) ยี่ห้อ NAZA
16. ดูโรมิเตอร์แบบชอร์ (Shore durometer) Intro Enterprise Public Co.,Ltd
17. เครื่องทดสอบแรงดึงแรงกด (Universal Testing Machine) Lloyd Instruments Co.,Ltd รุ่น LR5K
18. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น QUANTA250
19. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) shimadzu scientific instruments incorporated Co.,Ltd รุ่น IRTracer-100

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

1. ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (12.0759 โมลาร์) ปริมาตร 4.140 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตร 500 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรเท่ากับ 500 มิลลิลิตร
3. เขย่าเบา ๆ ให้เป็นเนื้อเดียวกัน

3.3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์

1. ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ 55.49 กรัม ใส่ในขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
2. เติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรเท่ากับ 1000 มิลลิลิตร
3. เขย่าเบา ๆ ให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.4 การทดสอบการละลายของโคโตซาน

1. ชั่งลิเทียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ยูเรีย และน้ำ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของสารละลายเบส

สถานะการทดสอบ	องค์ประกอบ				แหล่งอ้างอิง
	LiOH (กรัม)	KOH (กรัม)	Urea (กรัม)	Water (มิลลิลิตร)	
1	4.5	7.0	8.0	80.5	[30]
2	-	7.0	8.0	85.0	[30]
3	4.8	-	8.0	87.2	[36]

2. ปั่นกวนจนละลายเป็นเนื้อเดียวกันในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. ชั่งโคโคซาน 0.25 กรัม ใส่ในสารละลาย 25 มิลลิลิตร ของแต่ละสภาวะการทดสอบ พร้อมปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง
4. ทำการ Freeze-thaw (แช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4-6 ชั่วโมง สลับกับอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง) ทำซ้ำ จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
5. สังเกตผลการทดลอง

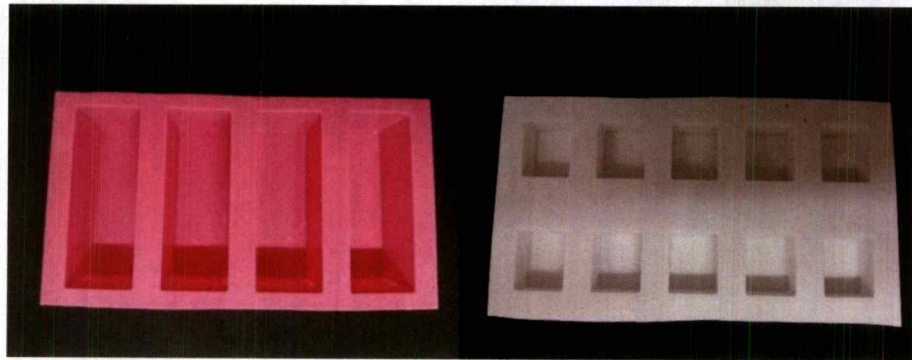
3.5 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล

1. เลือกสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 3.4
2. ชั่งอัลจินตใส่ในบีกเกอร์ตามอัตราส่วนที่กำหนดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโคซานต่ออัลจินต

สูตร	น้ำหนักของโคโคซาน (กรัม)	น้ำหนักของอัลจินต (กรัม)
C2SA2	2	2
C3SA1	3	1
C4SA0	4	0
C2SA4	2	4
C3SA3	3	3
C4SA2	4	2
C6SA0	6	0

3. ปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องจนสารละลายหมด
4. ชั่งโคโคซานใส่ในบีกเกอร์ตามอัตราส่วนที่กำหนดดังตารางที่ 3.2 พร้อมปั่นกวนที่อุณหภูมิห้อง
5. ทำการ Freeze-thaw (แช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8-12 ชั่วโมง สลับกับอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง) ทำซ้ำ จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
6. เทสารลงแม่พิมพ์ตามขนาด ดังรูปที่ 3.1



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์ ขนาด $3 \times 7.8 \times 0.5 \text{ cm}^3$ (ก) และ ขนาด $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$ (ข)

7. ให้ความร้อนที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สำหรับขนาด $3 \times 7.8 \times 0.5 \text{ cm}^3$ และ 45 นาที สำหรับขนาด $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$
8. สังเกตการเกิดไฮโดรเจล

3.6 ขั้นตอนการล้างเบส

1. ตวงกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีไฮโดรเจล แช่ชิ้นงานไฮโดรเจลเป็นเวลา 15 นาที ทำซ้ำ 2 ครั้ง
2. เปลี่ยนมาแช่ในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตรทุก ๆ 30 นาที ทำซ้ำ 6 ครั้ง หรือตามความเหมาะสมของค่าพีเอชและแช่น้ำกลั่นทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง
3. วัดพีเอช ทุกครั้ง จนได้ค่าพีเอชเท่ากับ 7
4. ทดสอบการตกค้างของคลอไรด์ที่หลงเหลือจากการล้างกรดไฮโดรคลอริกในขั้นตอนที่ 1 โดยหยดซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ลงในน้ำกลั่นที่ล้างน้ำสุดท้ายถ้าไม่มีคลอไรด์ตกค้างจะไม่เกิดตะกอนขุ่น

3.7 ขั้นตอนการเชื่อมโยง

1. นำไฮโดรเจลที่ได้จากข้อ 3.6 แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. ล้างแคลเซียมคลอไรด์ที่เหลือ โดยแช่ในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตรเป็นเวลา 5 นาที
3. นำน้ำกลั่นครั้งสุดท้ายไปทดสอบว่ามีแคลเซียมคลอไรด์ที่หลงเหลือ โดยการหยดซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) ถ้าล้างหมดจะไม่เกิดตะกอนขุ่น

3.8 การวิเคราะห์และทดสอบ

1. ขนาดและน้ำหนักของไฮโดรเจล

ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของไฮโดรเจลโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ 5 ตำแหน่งและหาค่าเฉลี่ย

2. การทดสอบหาปริมาณน้ำ (Water content) และปริมาณของแข็ง (Solid content) ในไฮโดรเจล

2.1 เตรียมชิ้นงานไฮโดรเจลขนาด $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$ จำนวน 3 ตัวอย่างและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน

2.2 นำไฮโดรเจลไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักไฮโดรเจลหลังอบ

2.3 ทำซ้ำข้อ 2 จนน้ำหนักไฮโดรเจลคงที่

2.4 คำนวณหาปริมาณน้ำ (Water content) ดังสมการที่ 3.1 และปริมาณของแข็ง (Solid content) ดังสมการที่ 3.2

$$\text{Water content (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบ} - \text{น้ำหนักไฮโดรเจลหลังอบ}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบ}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

$$\text{Solid content (\%)} = 100 - \text{ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (\%)} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

3. การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจล

ศึกษาเพื่อตรวจหาองค์ประกอบของสารในโครงสร้าง โดยนำไฮโดรเจลไปอบแห้งแล้วบิดเป็นผงละเอียด แล้วนำมาทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) โหมด ATR ที่ช่วง $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ และมีค่า resolution เท่ากับ 4.0 cm^{-1}

4. สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล (Morphology)

ศึกษาการกระจายตัวของโคโตซานและอัลจินेट โดยใช้ชิ้นงานขนาด $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ cm}^3$ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) กำลังขยาย 100x

5. การทดสอบความแข็งกดที่พื้นผิว (Hardness)

ทดสอบความแข็งกดที่พื้นผิวของชิ้นงานไฮโดรเจลที่เคลือบด้วยน้ำมันพาราฟิน และเก็บในความชื้นสัมพัทธ์ $100 \pm 5 \%$ RH เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน โดยใช้ตุ้มน้ำหนักแบบชอร์หัวกดชนิด ๐๐ น้ำหนักกด 400 กรัม ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง ดังนี้

ขนาดชิ้นงาน	: 2×2×1 cm ³
ชนิดหัวกด	: shore oo
น้ำหนักกด	: 400 กรัม
จำนวนชิ้นงาน	: 10 ชิ้น

6. การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

ทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลที่เคลือบด้วยน้ำมันพาราฟิน และเก็บในโถดูดความชื้น 100±5 % RH เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน โดยใช้ Universal Testing Machine ทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง ดังนี้

6.1 ทดสอบความแข็งแรงกดอัด

ขนาดชิ้นงาน	: 2×2×1 cm ³
อัตราเร็วในการกดอัด	: 5 mm/min
Load cell	: 100 N
จำนวนชิ้นงาน	: 8 ชิ้น
ระยะกดชิ้นงาน	: 30% ของความหนาชิ้นงาน

คำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{ความเค้นแรงกด (Compressive Stress)} = \frac{F}{A}$$

$$\text{มอดูลัสกดอัด (Compressive modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}}$$

เมื่อ F = แรงที่กดอัดชิ้นงาน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (cm²)

6.2 ทดสอบความแข็งแรงดึง

ขนาดชิ้นงาน	: 3×7.8×0.5 cm ³
อัตราเร็วในการดึง	: 30 mm/min
Gauge length	: 20 mm
Load cell	: 100 N
จำนวนชิ้นงาน	: 8 ชิ้น

คำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)} = \frac{F_{\max}}{A}$$

มอดูลัสของยัง (Young's modulus) = ความชันเริ่มต้น (3-5%)
ของกราฟ stress-strain

เมื่อ F_{\max} = แรงสูงสุดที่ดึงชิ้นงาน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (cm^2)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ศึกษาความแข็งแรงของไฮโดรเจลที่เกิดจากไคโตซานและอัลจินตที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในระบบสารละลายเบส โดยใช้อัตราส่วนของไคโตซานต่ออัลจินตเป็น 2:2 (C2SA2), 3:1 (C3SA1), 4:0 (C4SA0), 2:4 (C2SA4), 3:3 (C3SA3), 4:2 (C4SA2) และ 6:0 (C6SA0) โดยน้ำหนัก และเชื่อมโยงโครงสร้างด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ โดยมีการทดสอบหาสถานะสารละลายเบสที่สามารถละลายได้ดีที่สุดก่อนนำมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล ไฮโดรเจลที่เตรียมได้นำมาพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค FT-IR, SEM จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติเชิงกล

4.1 การทดสอบการละลายของไคโตซานในสถานะสารละลายเบส

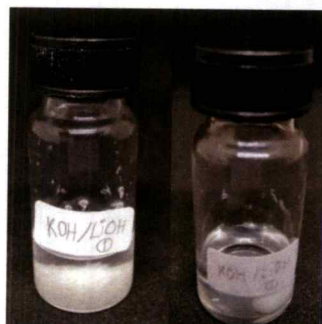
เนื่องจากไคโตซานโดยทั่วไปละลายในสภาวะกรด ส่วนอัลจินตไม่ละลายในสภาวะกรดแต่ละลายได้ในสภาวะกลางและเบส ดังนั้นจึงไม่สามารถผสมไคโตซานกับอัลจินตให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยมีงานวิจัยได้เสนอวิธีการละลายไคโตซานในสภาวะเบส [30] ซึ่งวิธีนี้จะช่วยให้ไคโตซานและอัลจินตผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยมีวิธีการเลือกใช้สารละลายเบส 3 สภาวะ ทำการทดสอบละลายไคโตซานในเบสแล้วนำมากรองตะกอนที่เหลือ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การละลายจากสมการที่ 4.1 ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์การละลายของไคโตซานในสารละลายเบสสภาวะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

$$\text{การละลาย (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไคโตซานเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักตะกอนไคโตซานที่เหลือ}}{\text{น้ำหนักไคโตซานเริ่มต้น}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

ตารางที่ 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์การละลายของไคโตซานในสารละลายเบสสภาวะต่าง ๆ

สภาวะการทดสอบ	น้ำหนักไคโตซานเริ่มต้น	น้ำหนักตะกอนไคโตซานที่เหลือ	ค่าการละลาย (%)
1. LiOH/KOH/Urea	0.2520	0.1240	50.8
2. KOH/Urea	0.2507	0.2489	0.7
3. LiOH/Urea	0.2512	0.1559	37.9

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การละลายของโคโตซานในสารละลายเบสสถานะต่าง ๆ พบว่าสถานะที่ดีที่สุดคือ สถานะที่ 1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายเท่ากับ 50.8% ซึ่งเป็นสถานะที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การละลายมากที่สุด เนื่องจากลิเทียมไฮดรอกไซด์เป็นโมเลกุลขนาดเล็กจึงสามารถแทรกเข้าไปในโมเลกุลของโคโตซานได้ง่าย ทำให้โมเลกุลของโคโตซานแยกออกจากกัน ดังนั้นโครงการพิเศษจึงเลือกสถานะที่ 1 มาใช้ในการเตรียมสารละลายโคโตซาน ดังรูปที่ 4.1



(ก)

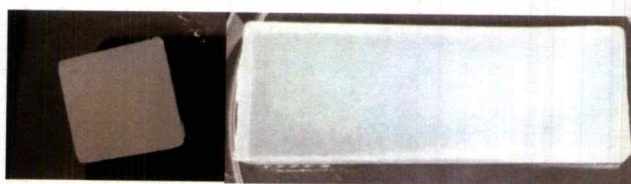
(ข)

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการละลายโคโตซานในสารละลาย LiOH/KOH/Urea ก่อน Freeze-thaw (ก) และหลังการ Freeze-thaw 4 รอบ (ข)

4.2 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล

4.2.1 รูปร่าง ลักษณะของชิ้นงาน

ไฮโดรเจลทุกสูตรที่เตรียมได้มีรูปร่าง ลักษณะตามแม่พิมพ์ที่กำหนดไว้ แต่สูตร C2SA2 กับ C2SA4 ไม่สามารถขึ้นเป็นไฮโดรเจลได้ เนื่องจากมีอัตราส่วนของโคโตซานน้อยเกินไป ซึ่งส่วนของโคโตซานเป็นส่วนที่ทำให้เกิดไฮโดรเจลในขั้นต้น ดังนั้นในการทดลองจึงไม่นำอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตซานต่ออัลจินต 2 สูตรข้างต้นมาทดสอบ โดยโครงการพิเศษนี้จะขึ้นรูปร่างชิ้นงาน 2 รูปแบบเพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลและกายภาพต่าง ๆ ดังนี้



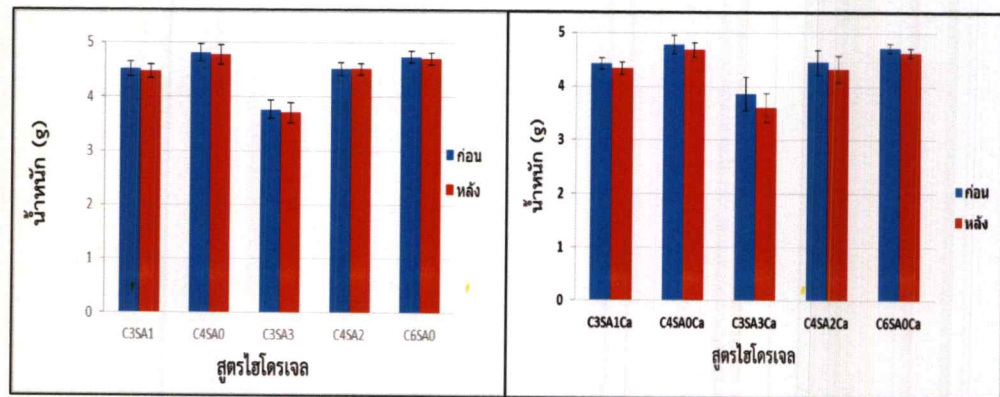
(ก)

(ข)

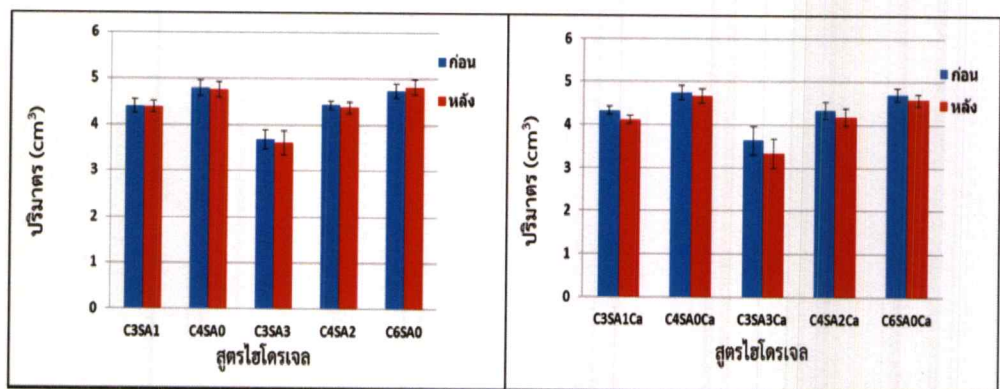
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างรูปร่างชิ้นงานจากสูตร C6SA0 ที่นำไปทดสอบความแข็งแรงกด ความแข็งแรงที่พื้นผิว ปริมาณน้ำ และปริมาณของแข็ง (ก.) และรูปร่างชิ้นงานที่นำไปทดสอบความแข็งแรงดึง (ข.)

4.2.2 ขนาดและน้ำหนักของไฮโดรเจล

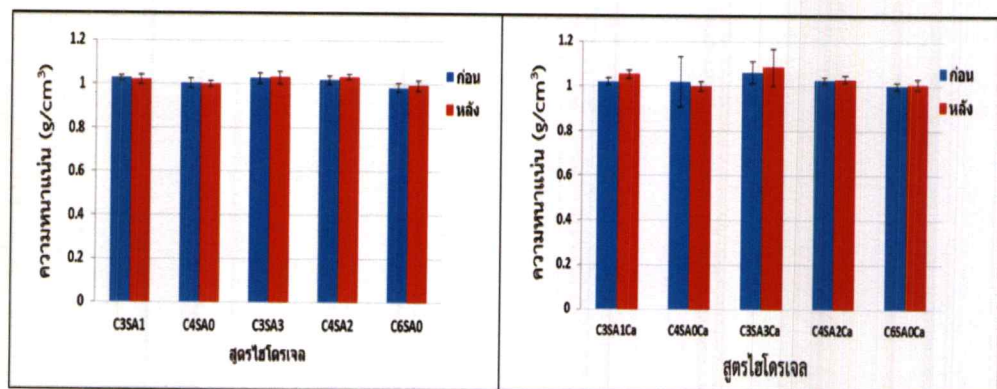
ขนาดและน้ำหนักของไฮโดรเจลสามารถหาได้จากการชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของไฮโดรเจล โดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ 5 ตำแหน่งและหาค่าเฉลี่ย ดังรูปที่ 4.3



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.3 น้ำหนัก (ก) ปริมาตร (ข) และความหนาแน่น (ค) ของไฮโดรเจลโดยเปรียบเทียบระยะเวลาในการเก็บในความชื้นสัมพัทธ์ $100 \pm 5\%$ RH ก่อนและหลัง 7 วัน

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลของน้ำหนัก ปริมาตรและความหนาแน่นของชิ้นงานไฮโดรเจลโดยนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดก่อนเก็บและหลังเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $100 \pm 5\%$ RH เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าน้ำหนัก ปริมาตรและความหนาแน่นของไฮโดรเจลทุกสูตรทั้งก่อนและหลังเก็บไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตซานต่ออัลจินตและการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนัก ปริมาตรและความหนาแน่นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นถึงสถานะการจัดเก็บไฮโดรเจลช่วยรักษาความชื้นไว้ในโครงสร้างไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าน้ำหนัก ปริมาตรและความหนาแน่นเฉลี่ยของชิ้นงานไฮโดรเจลทุกสูตรแสดงในภาคผนวก ก

4.2.3 ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในชิ้นงานไฮโดรเจล (Water content and Solid content)

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชิ้นงานสามารถหาได้จากการนำชิ้นงานไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผลก่อนและหลังนำไฮโดรเจลไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักของชิ้นงานคงที่ จะได้ค่าปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไฮโดรเจลแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยคำนวณหาปริมาณน้ำในไฮโดรเจลจากสมการที่ 3.1 และคำนวณหาปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจลจากสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\text{Water content (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบ} - \text{น้ำหนักไฮโดรเจลหลังอบ}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบ}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

$$\text{Solid content (\%)} = 100 - \text{ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (\%)} \quad \text{สมการที่ 3.2}$$

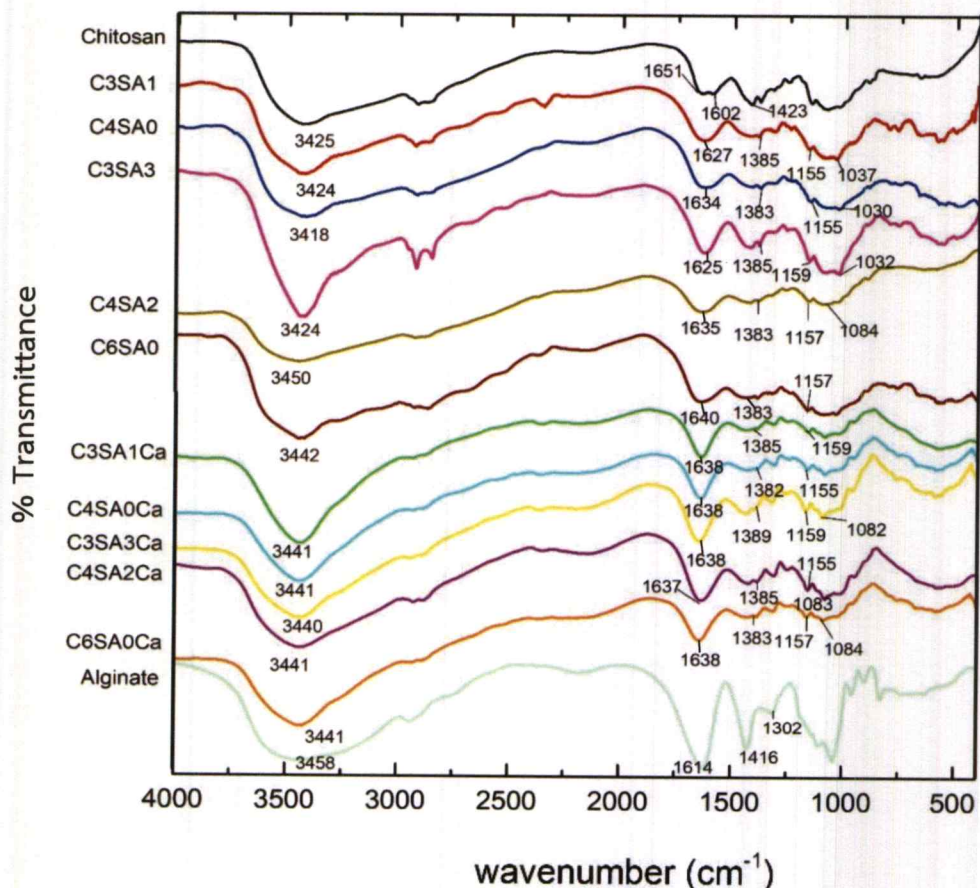
ตารางที่ 4.2 ค่าปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล

สูตร	ปริมาณน้ำ (%)	ปริมาณของแข็ง (%)	สูตร	ปริมาณน้ำ (%)	ปริมาณของแข็ง (%)
C3SA1	95.6	4.4	C3SA1Ca	93.4	6.6
C4SA0	95.8	4.2	C4SA0Ca	93.4	6.6
C3SA3	96.1	3.9	C3SA3Ca	93.8	6.2
C4SA2	95.0	5.0	C4SA2Ca	92.7	7.3
C6SA0	93.8	6.2	C6SA0Ca	91.6	8.4

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลทุกสูตร โดยพบว่าการนำไฮโดรเจลไปเชื่อมโยงโครงสร้างด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล โดยส่งผลให้ปริมาณน้ำลดลงเล็กน้อยและปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทำให้ Ca^{2+} แทรกเข้าไปในส่วนของอัลจินต และเกิดการเชื่อมโยงที่ตำแหน่งคาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) อย่างไรก็ตามในส่วน of สูตรที่ไม่มีองค์ประกอบของอัลจินตเมื่อนำไปเชื่อมโยง พบว่ามีปริมาณน้ำที่ลดลงเล็กน้อยและปริมาณของแข็งที่มากขึ้นเช่นกัน คาดว่าเกิดจากการที่แคลเซียมคลอไรด์อาจจะตกค้างบนพื้นผิวชิ้นงาน

4.3 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจล

การศึกษาองค์ประกอบหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจลที่เกิดจากไคโตซานผสมกับอัลจินตและมีการเชื่อมโยงโครงสร้างด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยผ่านการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ได้ผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงสเปกตรัมของไคโตซาน อัลจินต และไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ



รูปที่ 4.4 FT-IR สเปกตรัมของไคโตซาน อัลจินต และไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.4 ในส่วนของสเปกตรัมของโคโตซานพบพีคสำคัญที่ 3425 cm^{-1} เป็นการสั่นของ N-H และ O-H stretching และที่ตำแหน่ง 1651 และ 1602 cm^{-1} แสดงการสั่นของ C=O stretching และ N-H bending ตามลำดับ ส่วนสเปกตรัมของอัลจินตพบพีคสำคัญที่ 3458 , 1614 , 1416 และ 1302 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของ O-H stretching, $-\text{COO}^-$ asymmetric stretching, $-\text{COO}^-$ symmetric stretching และ C-O stretching ตามลำดับ สำหรับสเปกตรัมของไฮโดรเจลที่เตรียมจากโคโตซานเพียงอย่างเดียว ได้แก่ สูตร C4SA0 และ C6SA0 พบการเปลี่ยนแปลงพีคของ C=O stretching เลื่อนจากตำแหน่ง 1651 cm^{-1} ไปที่ 1634 และ 1640 cm^{-1} ตามลำดับ ในขณะที่ไฮโดรเจลที่เตรียมจากโคโตซานและอัลจินตพบการเปลี่ยนแปลงของพีค C=O stretching ในช่วงที่ต่ำกว่าคือ 1627 cm^{-1} (สำหรับไฮโดรเจลสูตร C3SA1) และ 1625 cm^{-1} (สำหรับไฮโดรเจลสูตร C3SA3) โดยเป็นการรวมกันของพีค C=O stretching ของโคโตซานที่ตำแหน่ง 1651 cm^{-1} และพีคของ $-\text{COO}^-$ asymmetric stretching ของอัลจินต แสดงให้เห็นถึงการเกิดอันตรกิริยาของโคโตซานและอัลจินต เมื่อทำการเชื่อมโยงไฮโดรเจลด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์พบว่าสเปกตรัมของไฮโดรเจลสูตร C3SA3Ca มีการขยับของพีคที่ตำแหน่ง 1385 cm^{-1} เป็น 1389 cm^{-1} ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่า Ca^{2+} เกิดพันธะไอออนิกกับหมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) ของอัลจินต [37] ในขณะที่ไฮโดรเจลสูตรอื่นเห็นการเปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน เนื่องจากไฮโดรเจลสูตรอื่นมีส่วนของอัลจินตน้อยกว่า

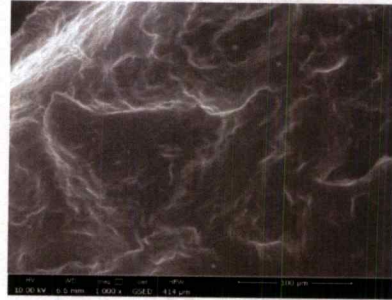
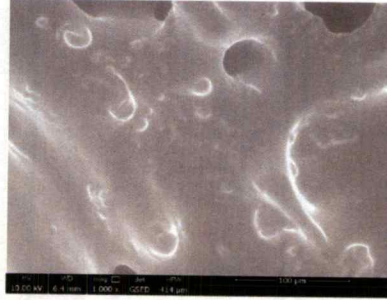
4.4 สันฐานวิทยาของไฮโดรเจล

การศึกษาการกระจายตัวของสารผสมระหว่างโคโตซานกับอัลจินตและสารเชื่อมโยงแคลเซียมคลอไรด์ สามารถตรวจสอบบริเวณพื้นผิวและภาคตัดขวางของไฮโดรเจล ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้กำลังขยาย 100 เท่า โหมดทดสอบ ESEM แสดงดังรูป 4.5 พบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีโคโตซานอย่างเดียว เช่น C6SA0 และ C6SA0Ca จะเห็นการกระจายที่สม่ำเสมอ เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกันแต่สูตรที่มีการผสมอัลจินต เช่น C3SA3 และ C3SA3Ca จะเห็นลักษณะของการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ไม่เรียบเนียนเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นคาดว่าโคโตซานกับอัลจินตมีความไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันเมื่อนำมาผสมกันแล้วเตรียมเป็นชิ้นงานไฮโดรเจล เนื่องจากโคโตซานและอัลจินตเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีความหนืดที่สูง ทำให้สารทั้งสองตัวไม่สามารถกระจายตัวเข้ากันได้อย่างสม่ำเสมอ รวมถึงหมู่ฟังก์ชันเอมีนของโคโตซานและหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจินต อาจเกิดอันตรกิริยาบางส่วนในสภาวะเบสเกิดเป็นจุดเชื่อมโยง ทำให้ขัดขวางการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน

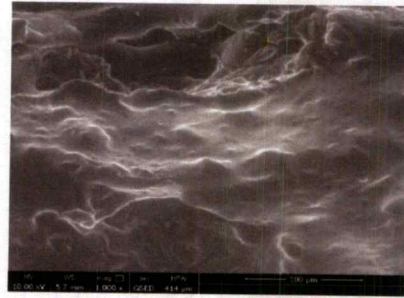
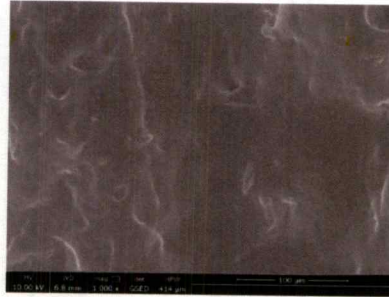
ภาพถ่ายพื้นผิว

ภาพถ่ายภาคตัดขวาง

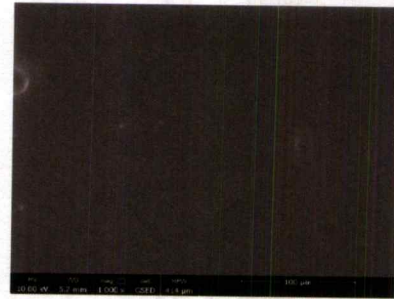
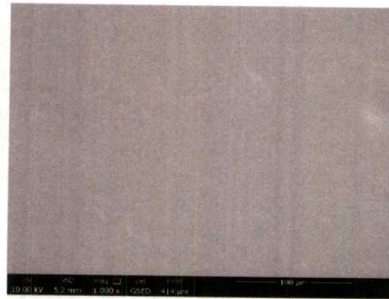
C3SA3



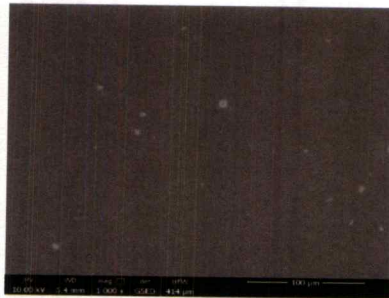
C3SA3Ca



C6SA0



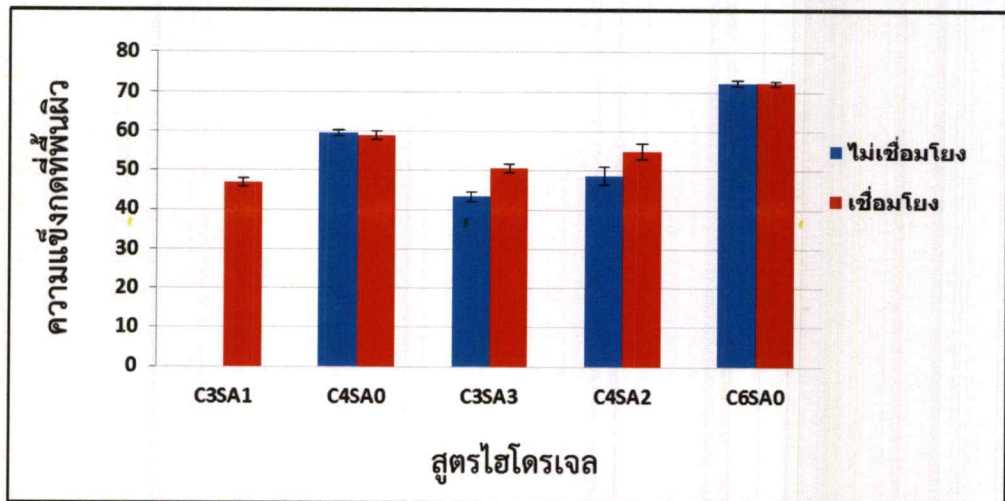
C6SA0Ca



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายพื้นผิว (ซ้าย) และภาคตัดขวาง (ขวา) ด้วย SEM

4.5 ความแข็งกตที่พื้นผิว (Hardness)

ไฮโดรเจลทุกสูตรจะถูกเก็บไว้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $100 \pm 5\%$ RH เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน โดยชิ้นงานไฮโดรเจลจะเคลือบด้วยน้ำมันพาราฟิน โดยใช้ดูโรมิเตอร์แบบชอร์ หัวกดชนิด ๐๐ น้ำหนักกด 400 กรัม ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง ได้ค่าความแข็งกตที่พื้นผิวไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.6



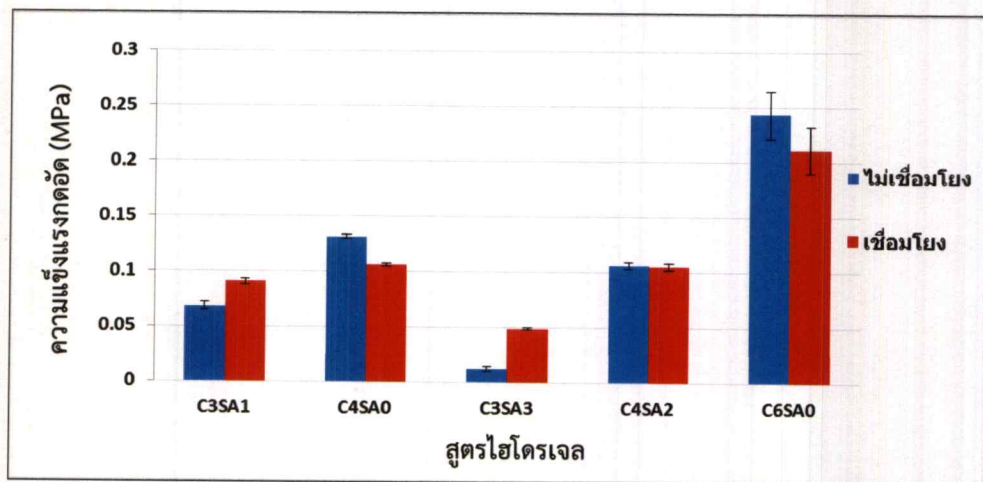
รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งกตที่พื้นผิวไฮโดรเจล

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่าความแข็งกตที่พื้นผิวของไฮโดรเจล โดยไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มีอัลจินเนต ได้แก่สูตร C4SA0 และ C6SA0 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่นำไปเชื่อมโยงและไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าค่าความแข็งกตที่พื้นผิวไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ไม่มีผลต่อการเชื่อมโยงกับไคโตซาน ส่วนไฮโดรเจลสูตรที่มีอัลจินเนต ได้แก่ C3SA1, C3SA3 และ C4SA2 พบว่าสูตรที่มีการนำไปเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีค่าความแข็งกตที่พื้นผิวสูงกว่าเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่ได้มีการเชื่อมโยง เนื่องจากการนำไปเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทำให้ Ca^{2+} แทรกเข้าไปในส่วนของอัลจินเนต และเกิดการเชื่อมโยงที่ตำแหน่งคาร์บอกซิเลต ($-COO^-$) ส่งผลให้ส่วนของอัลจินเนตเมื่อเกิดการเชื่อมโยงทำให้มีค่าความแข็งกตที่พื้นผิวเพิ่มสูงขึ้น แต่ไฮโดรเจลสูตร C3SA1 ที่ไม่ได้เชื่อมโยงมีลักษณะอ่อนนุ่มและเมื่อทำการทดสอบชิ้นงานไฮโดรเจลเกิดการแตกจึงไม่สามารถหาค่าได้ เมื่อพิจารณาปริมาณของไคโตซานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งกตที่พื้นผิวของไฮโดรเจลเพิ่มสูงขึ้น แสดงว่าไคโตซานเป็นส่วนทำให้ความแข็งกตที่พื้นผิวสูงขึ้น และเปรียบเทียบปริมาณเนื้อสารรวมจะได้ว่า เมื่อปริมาณเนื้อสารเพิ่มขึ้น ส่งผลถึงค่าความแข็งกตที่พื้นผิวสูงขึ้นเช่นกัน

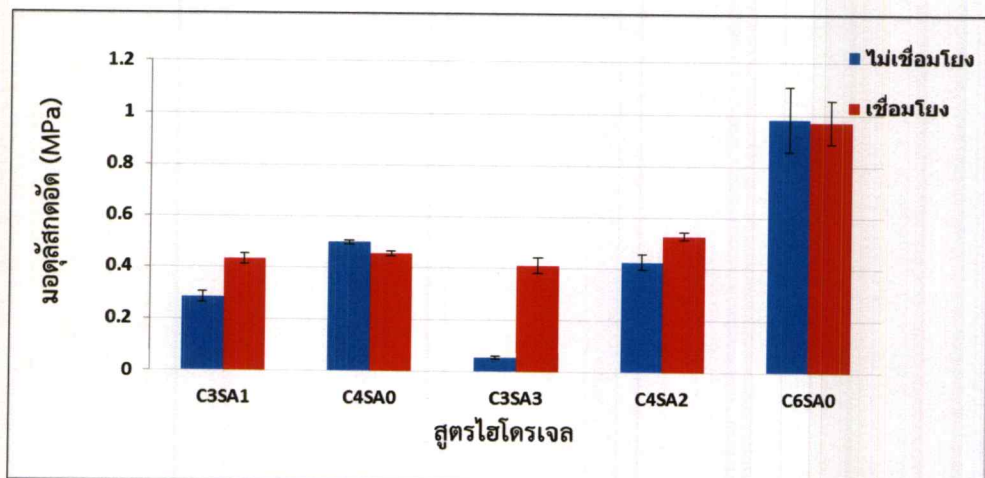
4.6 ความแข็งแรงกด (Compressive strength)

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลเพื่อศึกษาถึงปัจจัยของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ ไคโตซานต่ออัลจินตและการเสริมแรงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองแบบคือ ชิ้นงานที่ไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ โดยไฮโดรเจลทุกสูตร จะเก็บไว้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $100 \pm 5\%$ RH เป็นระยะเวลา 7 วันก่อนนำมาทดสอบความแข็งแรงกด

สภาวะในการทดสอบความแข็งแรงกดใช้ระยะการกด 30% ของความหนาชิ้นงาน อัตราเร็วในการกด 5 mm/min ขนาดของ Load cell 100 N จากเครื่องทดสอบ Universal testing machine แสดงค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลทุกสูตร ดังรูปที่ 4.7



(ก)



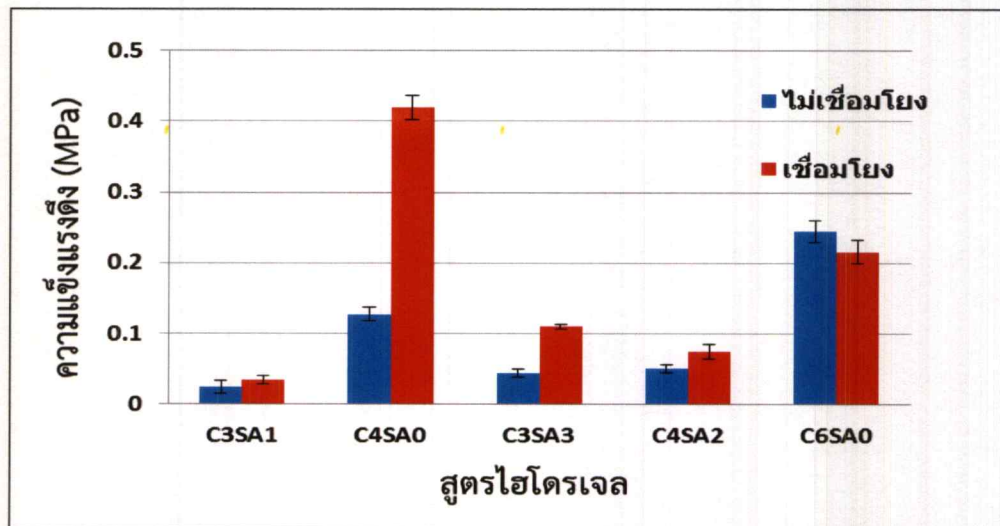
(ข)

รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งแรงกดอัด (ก) และค่ามอดุลัสกดอัด (ข) ของไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

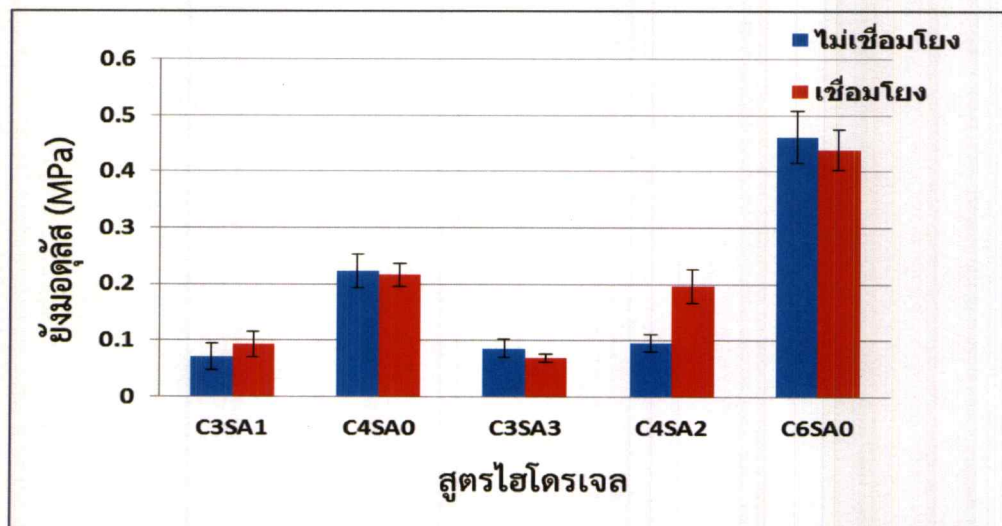
จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดที่ 30% ของความหนาของชิ้นงาน ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักไคโตซานต่ออัลจินตที่แตกต่างกันพบว่า ค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของไคโตซาน เช่น ไฮโดรเจลสูตร C3SA1 มีค่าเฉลี่ย 0.068 MPa และ 0.280 MPa โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.130 MPa และ 0.490 MPa ตามลำดับ ในสูตร C4SA0 ไฮโดรเจลสูตร C3SA3 (มีค่าเฉลี่ย 0.012 MPa และ 0.056 MPa) มีค่าเพิ่มขึ้นในสูตร C4SA2 (มีค่าเฉลี่ย 0.110 MPa และ 0.430 MPa) และมีค่าเพิ่มขึ้นในสูตร C6SA0 (มีค่าเฉลี่ย 0.240 MPa และ 0.980 MPa ตามลำดับ) การเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของไคโตซานจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของไฮโดรเจลอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนชิ้นงานไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์พบว่า ค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดมีค่าไม่แตกต่างกับไฮโดรเจลที่ไม่ได้เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในสูตรที่ไม่มีอัลจินต และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในกรณีไฮโดรเจลสูตรที่มีอัลจินตน้อย (สูตร C3SA1 และ C4SA2) โดยสูตรที่มีปริมาณอัลจินตสูงคือ ไฮโดรเจลสูตร C3SA3 มีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดเฉลี่ย 0.048 MPa และ 0.410 MPa ตามลำดับ ค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลสูตร C6SA0 มีค่าความแข็งแรงกดสูงสุด แสดงให้เห็นว่าไคโตซานมีความแข็งแรงมากกว่าอัลจินตและการผสมระหว่างไคโตซานและอัลจินตมีความไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อการตรวจสอบสัณฐานวิทยา จึงทำให้มีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดต่ำ เนื่องจากอัลจินตสามารถเกิดการเชื่อมโยงกับแคลเซียมไอออนเกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (Egg box) ขณะที่ไคโตซานมีความสามารถในการจับแคลเซียมไอออนที่ต่ำ เนื่องจากธาตุโลหะหมู่ II ไม่มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนใน d และ f ออร์บิทัลต่างกับโลหะทรานซิชัน จึงไม่เกิดการเชื่อมโยงกับแคลเซียมไอออน โดยมีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.048-0.211 MPa และ 0.411-0.968 MPa ตามลำดับ

4.7 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้เป็นข้อมูลที่ช่วยสนับสนุนค่าความแข็งแรงกดในการศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของโคโตะซานต่ออัลจินตและการเสริมความแข็งแรงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์โดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึงคืออัตราเร็วในการดึง 30 mm/min น้ำหนัก Load cell 100 N ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่า Young's modulus ของไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แสดงดังรูปที่ 4.8



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงดึง (ก) และค่า Young's modulus (ข) ของไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสของชิ้นงานไฮโดรเจลในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไคโตซานต่ออัลจินตที่แตกต่างกันพบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสของไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของไคโตซาน เช่น ไฮโดรเจลสูตร C3SA1 (มีค่าเฉลี่ย 0.024 MPa และ 0.071 MPa) และมีค่าเพิ่มขึ้นในสูตร C4SA0 (มีค่าเฉลี่ย 0.126 MPa และ 0.222 MPa ตามลำดับ) ไฮโดรเจลสูตร C3SA3 (มีค่าเฉลี่ย 0.044 MPa และ 0.085 MPa) มีค่าเพิ่มขึ้นในสูตร C4SA2 (มีค่าเฉลี่ย 0.0495 MPa และ 0.095 MPa) และมีค่าเพิ่มขึ้นในสูตร C6SA0 (มีค่าเฉลี่ย 0.245 MPa และ 0.463 MPa ตามลำดับ) ซึ่งค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสมีความสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของไคโตซานเพิ่มขึ้นจึงส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนชิ้นงานไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์พบว่า ค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอนและไม่ค่อยแตกต่างกับไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.034-0.215 MPa และ 0.092-0.439 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความแข็งแรงของไฮโดรเจลสูตรที่มีแต่ไคโตซาน (สูตร C4SA0 และ C6SA0) ทั้งแบบที่เชื่อมโยงและไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสสูงกว่าสูตรอื่น ๆ ที่มีอัลจินตเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากความไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันของไคโตซานและอัลจินตจึงเกิดจุดอ่อนแอ (Weak point) ของชิ้นงาน ทำให้เกิดการขาดของชิ้นงานได้ง่ายเป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสของสูตรไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบของอัลจินตมีค่าต่ำ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลจากไคโตซานกับอัลจินेटโดยใช้สารละลายเบส LiOH/KOH/Urea/Water เป็นตัวทำละลายและแบ่งชิ้นงานไฮโดรเจลออกเป็น 2 แบบคือ แบบไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์โดยการแช่ชิ้นงานไฮโดรเจลในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งอัลจินेटสามารถเกิดการเชื่อมโยงกับแคลเซียมไอออนที่หมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) จากนั้นเก็บชิ้นงานไฮโดรเจลไว้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $100 \pm 5\%$ RH เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 7 วันก่อนนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งและปริมาณน้ำในไฮโดรเจล ตรวจวิเคราะห์การเชื่อมโยงด้วย FT-IR ตรวจสอบสัณฐานวิทยา รวมถึงนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล โดยมีข้อสรุปดังนี้

1. สารละลาย LiOH/KOH/Urea/Water มีประสิทธิภาพเป็นตัวทำละลายไคโตซานกับโซเดียมอัลจินेटได้ดีที่สุด
2. ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูป ขนาด น้ำหนักและปริมาตรของชิ้นงานก่อนและหลังเก็บภายใต้สภาวะที่ควบคุมมีค่าใกล้เคียงกัน
3. ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลทุกสูตรอยู่ในช่วง 91-93% และ 6-8% ตามลำดับ โดยการนำไฮโดรเจลไปเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่ลดลงและปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย
4. ผลจากภาพถ่าย SEM พบว่าการผสมระหว่างไคโตซานกับอัลจินेटมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอเกิดการแยกออกเป็นสองวัฏภาค
5. ค่าความแข็งกดที่พื้นผิวไฮโดรเจลพบว่า ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะมีค่าความแข็งกดที่พื้นผิวที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่ได้เชื่อมโยงและเมื่อปริมาณสัดส่วนของไคโตซานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งกดที่พื้นผิวของไฮโดรเจลสูงขึ้นด้วย
6. ไฮโดรเจลที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของไคโตซานเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสที่ระยะกด 30% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การเพิ่มสัดส่วนโดยน้ำหนักของไคโตซานส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของไฮโดรเจลอย่างมีนัยสำคัญและไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีค่าสูงกว่าไฮโดรเจลที่ไม่เชื่อมโยง โดยเฉพาะไฮโดรเจลสูตร C3SA3 ค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสกดอัดเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยไฮโดรเจลสูตร C6SA0 มีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดูลัสกดอัดสูงสุด

7. ค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมีอดุลีของไฮโดรเจลทุกสูตรทั้งแบบเชื่อมโยงและไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีค่าสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลีกดอัดโดยไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มีอัลจินตเป็นองค์ประกอบจะมีค่าสูงกว่าและไฮโดรเจลสูตร C6SA0 มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมีอดุลีสูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ปรับเปลี่ยนวิธีการผสมรวมถึงสัดส่วนของไคโตซานและอัลจินตเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของไฮโดรเจล ตลอดจนปรับระยะเวลาที่ใช้ในการเชื่อมโยงไฮโดรเจลเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล

2. เพิ่มจำนวนรอบ Freeze-thaw เพื่อให้ไคโตซานละลายได้อย่างสมบูรณ์

3. ควรกำจัดฟองของสารละลายก่อนนำมาขึ้นรูปเจลเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] อุมภาพร ไชยสุวรรณ, อุไรวรรณ พันธุ์แก่น, ณัฐติยา ใจภักดี, ทิพย์สุดา บุญประสพ และจิราพร กวานเทียน. 2556. “ผลของสารเชื่อมขวางต่อสมบัติของไฮโดรเจลเชื่อมโยงแบบกึ่งโครงร่างตาข่ายของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง.” วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 16(3) : 131-138
- [2] โชติชัย วนภู. 2550. “การผลิตอัลจินेटโดยเชื้อ *Azotobacter vinelandii* และการประยุกต์ใช้ในการตรึงเอนไซม์เพื่ออุตสาหกรรม.” ได้รับทุนอุดหนุนงานวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [3] ภัทราวุธ มนต์วิเศษ. 2553. “เอกสารการสอนวิชา ไบโอฟอลิเมอร์.” ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] Sun, Y., Li, Y., Nie, J., Wong, Z and Hu, Q. 2013. “High-streng Chitosan Hydrogels Prepared from LiOH/Urea Solvent System.” *Chem Lett.* 42(8) : 838-840.
- [5] กันตวัฒน์ หมาดสุเรน. 2555. “การเตรียมและการทดสอบของฟิล์มนาโนคอมพอสิตชีวภาพจากไคโตซานและไฮดรอกซีอะพาไทต์.” *ปริญาวิทยาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ ภาควิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยศิลปากร.*
- [6] Fu, Y., Xiao, C and Liu, J. 2019. “Facile fabrication of quaternary water solution chitosan-sodium alginate gel and its affinity characteristic toward multivalent metal ion.” *Environmental Technology & Innovation.* 13(21) : 340-345.
- [7] Uchebu, I.F. and Schatzlein, A.G. 2006. “Polymer in Drug Delivery.” Taylor & Francis Group.
- [8] Ahmad, M.B. and Huglin, M.B. 1994. “State of water in Poly(methyl methacrylate-co-N-vinyl-2-pyrrolidone) hydrogels during swelling.” *Polymer.* 35(9) : 1997-2000.
- [9] Pathe, F.M. 1998. “Different states of water in hydrogels.” *Macromolecules.* 31(19) : 6721- 6723.
- [10] Buchholz, F.L. and Graham, A.T. 1998. “Modern Superabsorbent Polymer Technology.” New York : John wiley & sons Inc.

- [11] Junping, Z., Qin, W. and Aiqin, W. 2007. "Synthesis and characterization of chitosan-g-poly(acrylic acid)/attapulgate superabsorbent composites." *Carbohydrate polymer*. 68(2) : 367-374.
- [12] Mi, F.L., Sung, H.W. and Shyu, S.S. 2002. "Drug release from chitosan-alginate complex beads reinforced by a naturally occurring cross-linking agent." *Carbohydrate polymer*. 48(1) : 61-72.
- [13] วารุณี ตานันต์ และ สายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. "พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก : การสังเคราะห์ การวิเคราะห์ และประยุกต์ใช้ Super Absorbent Polymer : Synthesis, Characterization and Application." *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 16(2) : 63-81
- [14] Bajpai, S.K. and Sharma, S. 2004. "Investigation of swelling/degradation behaviour of alginatebeads crosslinked with Ca^{2+} and Ba^{2+} ions." *Reactive and Functional polymers*. 59(1) : 129-140.
- [15] Argin, S. 2014. "The cell release kinetics and the swelling behavior of physically crosslinked xanthanechitosan hydrogels in simulated gastrointestinal conditions." *Food Hydrocolloids*. 40(1) : 138-144.
- [16] Sahu, K. 2013. "A Review of Hydrogel As A Drug Carrier." *Asian Journal of Pharmaceutical Education and Research*. 2(2) : 1-18.
- [17] Zhihui, L. 2007. "Swelling behaviors, tensile properties and thermodynamic interactions in APS/HEMA copolymeric hydrogels." *Frontiers of Materials Science in China*. 1(4) : 427-431.
- [18] H.A. Essawy and H.S. Ibrahim. 2004. "Synthesis and characterization of poly(vinylpyrrolidone-co-methyl-acrylate) hydrogel for removal and recovery of heavy metal ions from wastewater." *Reactive and Functional polymer*. 61(1) : 421-432.
- [19] Phillips, G.O. and Williams, P.A., 2000, "Handbook of hydrocolloids." New York CRC press, pp.
- [20] Pawar, S.N. and Edgar, K.J. 2012. "Alginate derivatization: A review of chemistry, properties and applications." *Biomaterials*. 33(1) : 3279-3305.
- [21] Hamedi, H., Moradi, S., Hudson, S.M. and Tonelli, A.E. 2018. "Chitosan base hydrogel and their application for drug delivery in wound dressings: A review." *Crabohydrate Polymers*. 199(1) : 445-460.
- [22] บริษัท จีซีโพลีเทค จำกัด. 2558. ไคติน-ไคโตซาน. [ออนไลน์] : <http://www.gcpolytech.com>.

- [23] Islam, S., Bhuiyam, M.A and Islam, M.N. 2017. "Chitin and Chitosan Structure, Properties and Applications in Biomedical Engineering." *J Polym Environ.* 25(3) : 854-866.
- [24] Steinbuchel, A and Marchessault, R.H. (2005). *Biopolymers for Medical and Pharmaceuyical Applications.* : 419-459
- [25] สวบุญ จิรชาญชัย รังรอง ยก้าน และโกสุม สมัครรัตน์. 2544. "การประชุมเชิงปฏิบัติการ ไคติน และไคโตซานจากวัตถุดิบธรรมชาติสู่การประยุกต์ใช้." 30-31 สิงหาคม 2544 : กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.13
- [26] Pillai, C.K., Willi, P and Sharma, C.P. 2009. "Chitin and chitosan polymers: Chemistry, solubility and fiber formation." 34(7) : 641-678.
- [27] He, M., Zhang, X., Yao, W., Wang, C., Shi, L and Zhou, P. 2017. "Construction of alternate layered chitosan/alginate composite hydrogels and their properties." *Materials Letters.* 200(1) : 43-46
- [28] Liu, Q., Dong, Z., Ding, Z., Hu, Z., Yu, D., Hu, Y., Abidi, N and li, W. 2018. "Electroresponsive Homogeneous Polyelectrolyte Complex Hydrogels from Naturally Derived Polysaccharides." *ACS Sustainable Chem.* 6(5) : 7052-7063.
- [29] Chang, C., Chen, S and Zhang, L. 2011. " Novel hydrogels prepared via direct dissolution of chitin at low temperature:structure and biocompatibility." *Journal of Materials Chemisty.* 21(11) : 3865-3871.
- [30] Xie, Y., Liao, X., Hang, J., Yang, F and Fan, Z. 2018. "Novel chitosan hydrogels reinforced by silver nanoparticles with ultrahigh mechanical and antibacterial properties for accelerating wound healing." *Inteantional Journal of Biological Macromolecules.* 119(1) : 402-412.
- [31] Cao, J., You, J., Zhang, L and Zhou, J. 2018. "Homogeneous synthesis and characterization of chitosan ethers prepared in aqueous alkali/urea solutions." *Carbohydrate Polymers.* 185(1) : 138-144.
- [32] Li, C., Han, Q., Guan, Y and Zhang, Y. 2014. "Thermal gelation of chitosan in an aqueous alkali-urea solution." *Soft Matter.* 10(41) : 8245-8253.
- [33]Treenate., P. and Monvisade., P. 2017. "In vitro drug release profiles of pH-sensitive hydroxythylacryl chitosan/sodium alginate hydrogels using paracetamol as soluble model drug." *International Journal of Biological Macromolecules.* 99(1) : 71-78

- [34] Wang, Z., Nie, J., Qin, W., Hu, Q and Tang, B.Z. 2016. "Gelation process visualized by aggregation-induced emission fluorogens." *Nature Communications*.
- [35] Mongkhol Prawatborisut. 2016. "Preparation and properties of inclusion complexes between β -cyclodextrin modified hydroxyalkylacrylchitosans and methyl orange." Degree of Master of Science in Polymer Technology Department of Chemistry Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [36] Li, C., Han, Q., Guan, Y and Zhang, Y. 2015. "Michael reaction of chitosan with acrylamides in an aqueous alkali urea solution." *Polymer Bulletin*. 10(72) : 2075-2087
- [37] Ma, H.S., Li, H., Yang, X and Wang, A. 2010. "pH-sensitive sodium alginate/poly(vinyl alcohol) hydrogel beads prepared by combined Ca^{2+} crosslinking and freeze-thawing cycles for controlled release of diclofenac sodium." *International Journal of Biological Macromolecules*. 46(1) : 517-523.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ค่าเฉลี่ยขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจล

ตารางที่ ก 1 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลาย
แคลเซียมคลอไรด์ก่อนเก็บในสภาวะความชื้น $100\pm 5\%$ RH

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (cm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (g/cm ³)	ปริมาตรเฉลี่ย (cm ³)
	กว้าง	ยาว	หนา			
C3SA1	1.9323	1.9308	1.1792	4.5169	1.0267	4.4002
C4SA0	1.9447	1.949	1.2653	4.8137	1.0042	4.7954
C3SA3	1.8068	1.821	1.117	3.7689	1.0262	3.6754
C4SA2	1.9360	1.9293	1.1857	4.5165	1.0199	4.4287
C6SA0	1.9527	1.9483	1.2620	4.7449	0.9855	4.7344

ตารางที่ ก 2 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลาย
แคลเซียมคลอไรด์หลังเก็บในสภาวะความชื้น $100\pm 5\%$ RH เป็นระยะเวลา 7 วัน

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (cm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (g/cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)
	กว้าง	ยาว	สูง			
C3SA1	1.9287	1.9300	1.1783	4.4762	1.0207	4.3861
C4SA0	1.9470	1.9513	1.2543	4.7745	1.0019	4.7656
C3SA3	1.8108	1.1783	1.1007	3.7081	1.0320	3.5982
C4SA2	1.9213	1.9230	1.1837	4.5151	1.0325	4.3738
C6SA0	1.9450	1.9410	1.2540	4.7075	0.9948	4.7344

ตารางที่ ก 3 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
แคลเซียมคลอไรด์ก่อนเก็บในสภาวะความชื้น $100\pm 5\%$ RH

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (cm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (g/cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)
	กว้าง	ยาว	สูง			
C3SA1Ca	1.9175	1.9300	1.1700	4.4182	1.0205	4.3297
C4SA0Ca	1.9347	1.1700	1.2700	4.7807	1.0202	4.7502
C3SA3Ca	1.8317	1.8287	1.0877	3.8657	1.0615	3.6412
C4SA2Ca	1.9163	1.9157	1.1807	4.4491	1.0257	4.3362
C6SA0Ca	1.9445	1.9513	1.2407	4.7183	1.0026	4.7074

ตารางที่ ก 4 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
แคลเซียมคลอไรด์หลังเก็บในสภาวะความชื้น $100\pm 5\%$ RH เป็นระยะเวลา 7 วัน

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (cm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความ หนาแน่นเฉลี่ย (g/cm ³)	ปริมาตร เฉลี่ย (cm ³)
	กว้าง	ยาว	สูง			
C3SA1Ca	1.8876	1.8926	1.1513	4.3304	1.0529	4.1131
C4SA0Ca	1.9437	1.9543	1.2305	4.6777	1.0011	4.6743
C3SA3Ca	1.8000	1.8077	1.0253	3.6030	1.0852	3.3353
C4SA2Ca	1.8993	1.8963	1.1623	4.3254	1.0322	4.1889
C6SA0Ca	1.9277	1.9340	1.2300	4.6258	1.0093	4.5856

ภาคผนวก ข

ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ข 1 ปริมาณของน้ำในไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1	C4SA0	C3SA3	C4SA2	C6SA0
% ปริมาณของน้ำ	95.5564	95.7563	96.0574	95.0076	93.7529

ตารางที่ ข 2 ปริมาณของน้ำในไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1Ca	C4SA0Ca	C3SA3Ca	C4SA2Ca	C6SA0Ca
% ปริมาณของน้ำ	93.3674	93.4194	93.7820	92.7114	91.6216

ตารางที่ ข 3 ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1	C4SA0	C3SA3	C4SA2	C6SA0
% ปริมาณของแข็ง	4.4436	4.2437	3.9426	4.9924	6.2471

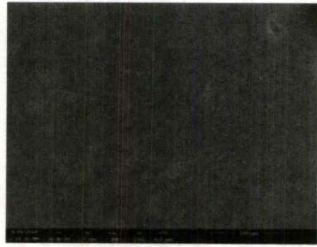
ตารางที่ ข 4 ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1Ca	C4SA0Ca	C3SA3Ca	C4SA2Ca	C6SA0Ca
% ปริมาณของแข็ง	6.6326	6.5806	6.2180	7.2886	8.3784

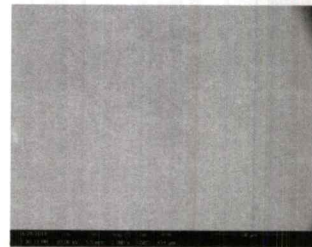
ภาคผนวก ค

สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล

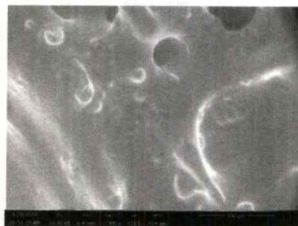
รูปที่ ค 1 ภาพถ่ายพื้นผิวของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



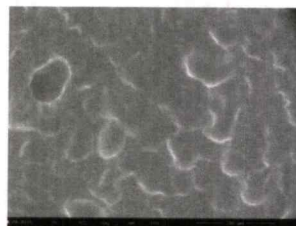
1) C3SA1



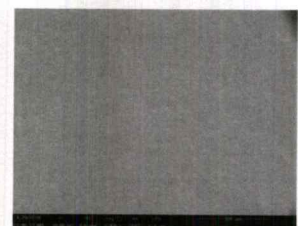
2) C4SA0



3) C3SA3



4) C4SA2

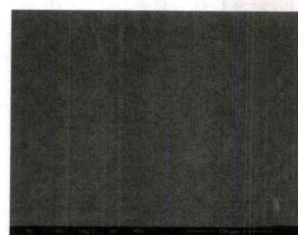


5) C6SA0

รูปที่ ค 2 ภาพถ่ายพื้นผิวของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



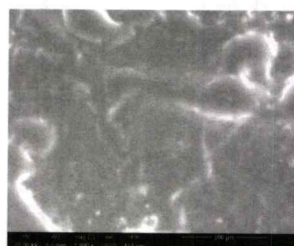
1) C3SA1Ca



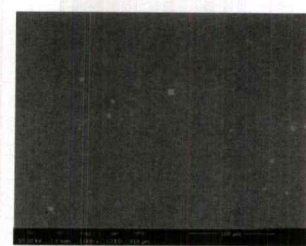
2) C4SA0Ca



3) C3SA3Ca

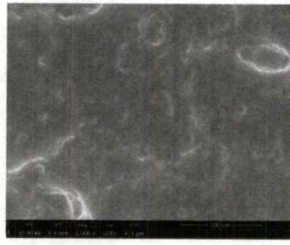


4) C4SA2Ca

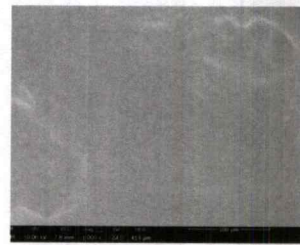


6) C6SA0Ca

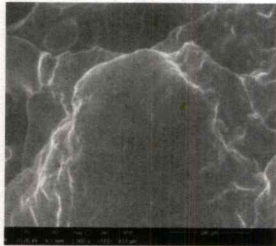
รูปที่ ค 3 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



1) C3SA1



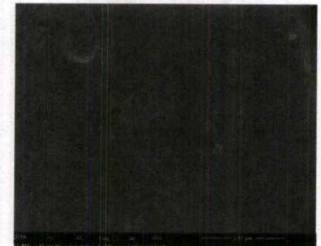
2) C4SA0



3) C3SA3



4) C4SA2



5) C6SA0

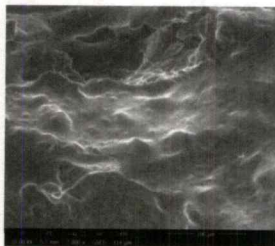
รูปที่ ค 4 ภาพถ่ายภาคตัดขวางของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์



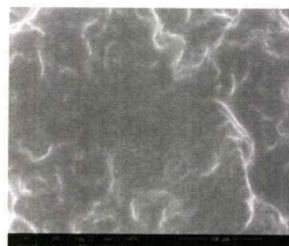
1) C3SA1Ca



2) C4SA0Ca



3) C3SA3Ca



4) C4SA2Ca



5) C6SA0Ca

ภาคผนวก ง

ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงที่พื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ง 1 ความแข็งแรงที่พื้นผิวของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1	C4SA0	C3SA3	C4SA2	C6SA0
ค่าความแข็งแรงที่พื้นผิว	N/A	59.60	43.33	48.70	72.27

ตารางที่ ง 2 ความแข็งแรงที่พื้นผิวของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1Ca	C4SA0Ca	C3SA3Ca	C4SA2Ca	C6SA0Ca
ค่าความแข็งแรงที่พื้นผิว	46.87	58.90	50.43	54.93	72.13

ภาคผนวก จ

ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ จ 1 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1	C4SA0	C3SA3	C4SA2	C6SA0
ค่าความแข็งแรงกด (MPa)	0.0683	0.1313	0.0118	0.1061	0.2432

ตารางที่ จ 2 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1Ca	C4SA0Ca	C3SA3Ca	C4SA2Ca	C6SA0Ca
ค่าความแข็งแรงกด (MPa)	0.0906	0.1061	0.0487	0.1054	0.2111

ตารางที่ จ 3 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1	C4SA0	C3SA3	C4SA2	C6SA0
ค่ามอดุลัสกดอัด (MPa)	0.2847	0.4978	0.0569	0.4259	0.9386

ตารางที่ จ 4 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1Ca	C4SA0Ca	C3SA3Ca	C4SA2Ca	C6SA0Ca
ค่ามอดุลัสกดอัด (MPa)	0.4325	0.4529	0.4109	0.5274	0.9684

ภาคผนวก ฉ

ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ฉ 1 ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1	C4SA0	C3SA3	C4SA2	C6SA0
ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	0.0237	0.1269	0.0436	0.0496	0.2447

ตารางที่ ฉ 2 ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1Ca	C4SA0Ca	C3SA3Ca	C4SA2Ca	C6SA0Ca
ค่าความแข็งแรงดึง (MPa)	0.0339	0.4196	0.1100	0.0746	0.2155

ตารางที่ ฉ 3 ค่ามอดุลัสของยังของไฮโดรเจลแบบไม่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1	C4SA0	C3SA3	C4SA2	C6SA0
ค่ามอดุลัสของยัง (MPa)	0.0710	0.2221	0.0851	0.0951	0.4625

ตารางที่ ฉ 4 ค่ามอดุลัสของยังของไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตรไฮโดรเจล	C3SA1Ca	C4SA0Ca	C3SA3Ca	C4SA2Ca	C6SA0Ca
ค่ามอดุลัสของยัง (MPa)	0.0922	0.2165	0.0687	0.1968	0.4398