การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจาก โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/โซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม

PREPARATION AND SWELLING BEHAVIOUR OF SODIUM CARBOXYMETHYL CELLULOSE / SODIUM ALGINATE / GUAR GUM HYDROGELS

ชมพล มีสาคร

SHAMAS MINSAKORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ISBN 978-616-556-035-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจาก โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/โซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม

PREPARATION AND SWELLING BEHAVIOUR OF SODIUM CARBOXYMETHYL CELLULOSE / SODIUM ALGINATE / GUAR GUM HYDROGELS

ชามาศ มินสาคร
SHAMAS MINSAKORN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 123718
วัน, เดือน, ปี 2 7 ก.ค. 2555

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2555
KMITL-2012-SC-M-014-036

PREPARATION AND SWELLING BEHAVIOUR OF SODIUM CARBOXYMETHYL CELLULOSE / SODIUM ALGINATE / GUAR GUM HYDROGELS

SHAMAS MINSAKORN

A THESIS SUBMITTED PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012

KMITL-2012-SC-M-014-036

COPYRIGHT 2012
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/โซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม
Preparation and swelling behaviour of sodium carboxymethyl cellulose/sodium alginate/guar gum hydrogels

นักศึกษา นางสาวชามาศ มินสาคร
รหัสประจำตัว 52651219
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชลลดา	ฤตวิรุฬห์	
ผศ.ดร.สุภารัตน์	รักชลธี	
รศ.ดร.ทวีชัย	อมรศักดิ์ชัย	
ผศ.ดร.ภัทธาวุธ	มนต์วิเศษ	

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2555 เวลา 9.00 – 12.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารจุฬาภรณวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุษณี ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 4 **เดือน** ส.ค. **พ.ศ.** 55

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจาก โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส / โซเดียมอัลจิเนต / กัวร์กัม
นักศึกษา	นางสาวชามาศ มินสาคร
รหัสประจำตัว	52651219
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (C), โซเดียม-อัลจิเนต (A) และกัวร์กัม (G) ด้วยการเชื่อมโยงสองแบบ คือ การเชื่อมโยงแบบกลไกเดียวด้วยโซเดียมเททระบอเรต และการเชื่อมโยงแบบสองกลไกด้วยโซเดียมเททระบอเรตและแคลเซียม-คลอไรด์ การเชื่อมโยงแต่ละแบบแบ่งออกเป็นสองระบบ คือ ระบบสององค์ประกอบ ได้แก่ ไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG และระบบสามองค์ประกอบ ได้แก่ ไฮโดรเจล ACG งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารตั้งต้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงเท่ากับ 0.2, 0.6 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ไฮโดรเจลที่ได้นำไปทดสอบการบวมตัวในสภาวะต่าง ๆ คือ น้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C สารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ สารละลายเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์ และที่สภาวะกรด-เบสที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ผลการทดสอบพบว่าไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบสูตร A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 23°C สูงสุดที่ 50 เท่า และไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไกสูตร A1C3G6-10Ca สามารถคงสภาพเจลได้นานที่สุดที่เวลาการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 180 นาที การบวมตัวของไฮโดร-เจลในสารละลายเกลือ พบว่าค่าการบวมตัวในน้ำกลั่น > NaCl > $CaCl_2$ และเจลคงสภาพได้นานที่สุดเมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ นอกจากนี้การบวมตัวมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มสูงขึ้น การบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C พบว่าเจลบวมตัวได้น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 23°C และเกิดการเสียสภาพเร็วขึ้น เมื่อทดสอบการบวมตัวในสภาวะกรด-เบส พบว่าค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 < 7 ≅ 10 และที่ pH เริ่มต้น 4 เจลเกิดการเสียสภาพ ได้เร็ว

คำสำคัญ: ไฮโดรเจล, โซเดียมอัลจิเนต, โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, กัวร์กัม, การบวมตัว

Thesis Title	Preparation and Swelling Behaviour of Sodium Carboxymethyl Cellulose / Sodium Alginate / Guar Gum Hydrogels
Student	Shamas Minsakorn
Student ID	52651219
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2012
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade

ABSTRACT

The preparation and swelling test of crosslinked sodium carboxymethyl cellulose (C), sodium alginate (A) and guar gum (G) hydrogels were studied. Two methods of crosslinking were exploited, i.e., one-mechanism crosslinking using sodium tetraborate as crosslinking agent and two-mechanism crosslinking using sodium tetraborate and calcium chloride as crosslinking agents. Besides, the preparation of hydrogel was separated into two systems, i.e., binary system as AG and CG hydrogels, and ternary system as ACG hydrogel. The effects on swelling of the various ratios among types of polysaccharide and sodium tetraborate contents; 0.2, 0.6 and 1.0% w/v, were investigated. The swelling tests were achieved in different solutions, i.e., distilled water at 23 and 37°C, sodium chloride (NaCl) solution at the concentrations of 0.1, 0.25 and 0.5 M, calcium chloride ($CaCl_2$) at the concentrations of 0.1 and 0.25 M and water with initial pH of 4, 7 and 10. The results showed that one-mechanism crosslinking ternary system hydrogel (A3C1G6-10) was swollen in distilled water at 23°C with the highest values at 50 folds and two-mechanism crosslinking ternary system hydrogel (A1C3G6-10Ca) showed the longest stability of swollen hydrogel at 180 min for the time which its highest swelling value was reached. The swelling of hydrogel in salt solution at given concentrations is in the order distilled water > NaCl > $CaCl_2$ and the best stability of swollen hydrogel gained when hydrogel was swollen in $CaCl_2$. When the higher concentration of NaCl solution was applied the swelling ratio of hydrogels was decreased. The swelling and stability of swollen hydrogels in distilled water at 37°C were less than those in distilled water at 23°C. Finally, the swelling values of hydrogels in water with different initial pH is in the order of pH 4 < 7 ≅ 10 and stability of swollen hydrogels at initial pH 4 was also the least.

Keywords: Hydrogel, Sodium alginate, Sodium carboxymethyl cellulose, Guar gum, Swelling

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยแนะนำแก้ไขพร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินวิทยานิพนธ์ ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และรศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นางสาวอภิชญา เจียนประเสริฐ ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการดำเนินวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาเคมีทุกท่านที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมีตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

ขอขอบพระคุณอย่างยิ่งสำหรับกำลังใจ ความเอาใจใส่ ความรักและแรงผลักดันจากบิดา มารดา น้องๆ และคนในครอบครัว

สำหรับคุณงามความดีอันใดซึ่งเกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้ทุกๆ ความปรารถนาดีและความห่วงใยจากทุกๆ ท่านที่มีต่อผู้วิจัยตลอดมา

ชามาศ มินสาคร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... II
กิตติกรรมประกาศ..... III
สารบัญ..... IV
สารบัญตาราง..... VIII
สารบัญรูป..... IX
รายการคำย่อและสัญลักษณ์..... XI

บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

บทที่ 2 หลักการ..... 3
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogel)..... 3
2.1.1 ประเภทของไฮโดรเจล..... 3
2.1.1.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้..... 3
2.1.1.2 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์..... 5
2.1.1.3 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง..... 6
2.1.1.4 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามขนาดของรูพรุน..... 6
2.1.2 การบวมตัวและปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล..... 8
2.2 กัมจากธรรมชาติ (Natural gums)..... 10
2.2.1 กัมจากสาหร่ายทะเล..... 11
2.2.1.1 อะการ์ (Agar)..... 11
2.2.1.2 อัลจิเนต (Alginate)..... 12
2.2.1.3 คาร์ราจีแนน (Carrageenan)..... 15
2.2.2 Gums จาก Botanical Sources..... 17
2.2.2.1 Plant extrudate..... 17
2.2.2.2 Seed gums..... 19
2.2.2.3 Plant tissue gums..... 20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.3 Microbial Gum..... 21
2.3 เซลลูโลสและเซลลูโลสอีเทอร์ (Cellulose and Cellulose ether)..... 23
2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)..... 23
2.3.2 เซลลูโลสอีเทอร์ (Cellulose Ethers)..... 23
2.3.2.1 เมทิลเซลลูโลส (Methycellulose : MC)..... 24
2.3.2.2 เอทิลเซลลูโลส (Ethycellulose)..... 24
2.3.2.3 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
(Carboxymethy cellulose : CMC)..... 25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 27

บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน..... 29
3.1 สารเคมี..... 29
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ..... 29
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายตั้งต้น..... 29
3.3.1 การเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)..... 29
3.3.2 การเตรียมสารละลายเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)..... 29
3.3.3 การเตรียมสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl)..... 30
3.3.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)..... 30
3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล..... 30
3.4.1 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบ
เชื่อมโยงกลไกเดียว..... 30
3.4.2 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบ
เชื่อมโยงกลไกเดียว..... 34
3.4.3 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบ
เชื่อมโยงสองกลไก..... 36
3.4.4 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบ
เชื่อมโยงสองกลไก..... 38
3.5 การทดสอบการบวมตัว..... 40
3.5.1 การทดสอบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่ pH 7 อุณหภูมิต่าง ๆ..... 40
3.5.2 การทดสอบการบวมตัวในสารละลายเกลือต่าง ๆ..... 40
3.5.3 การทดสอบการบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 4 และ 10..... 40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... 42

4.1 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบที่เชื่อมโยงกลไกเดียว..... 43

4.1.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลโซเดียม-อัลจิเนต/กัวร์กัม (AG)และไฮโดรเจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส/กัวร์กัม (CG)..... 45

4.1.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่างๆ ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG..... 49

4.1.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl..... 49

4.1.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$..... 53

4.1.2.3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl และ $CaCl_2$ ความเข้มข้น 1 โมลาร์..... 56

4.1.3 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37 °C ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG..... 59

4.1.4 พฤติกรรมการบวมตัวในสภาวะกรด-เบส ที่ pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG..... 60

4.2 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงกลไกเดียว..... 62

4.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม (ACG)..... 62

4.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่าง ๆ ของไฮโดรเจล ACG..... 65

4.2.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl..... 65

4.2.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$..... 66

4.2.2.3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl และ $CaCl_2$ ความเข้มข้น 1 โมลาร์..... 68

4.2.3 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37 °C ของไฮโดรเจล ACG..... 69

4.2.4 พฤติกรรมการบวมตัวในสภาวะกรด-เบส ที่ pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG..... 70

4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไก..... 71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (AG-Ca) และไฮโดรเจล CG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (CG-Ca) 72

4.3.2 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37 ° C ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca 75

4.3.3 พฤติกรรมการบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-CG..... 77

4.4 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไก..... 79

4.4.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (ACG-CG)..... 79

4.4.2 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37 ° C ของไฮโดรเจล ACG-Ca..... 80

4.4.3 พฤติกรรมการบวมตัวในสภาวะกรด-เบส ที่ pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG-Ca..... 82

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... 84

เอกสารอ้างอิง..... 86

ภาคผนวก ก..... 89

ภาคผนวก ข..... 100

ภาคผนวก ค..... 107

ภาคผนวก ง..... 111

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตัวอย่างไฮโดรเจล..... 4
2.2 ค่าองศาการแทนที่ของเอทิลเซลลูโลสต่อสมบัติการละลาย..... 24
3.1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัม
แบบเชื่อมโยงกลไกเดียว..... 31
3.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกัวร์กัม
แบบการเชื่อมโยงกลไกเดียว..... 32
3.3 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยง
กลไกเดียว..... 34
3.4 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยง
สองกลไก..... 36
3.5 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยง
สองกลไก..... 38

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่ใช้แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้..... 5
2.2 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามการสังเคราะห์..... 7
2.3 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล..... 9
2.4 อันตรกิริยาของไฮโดรเจลกับโมเลกุลของน้ำ..... 9
2.5 โครงสร้างของอะกาโรส..... 11
2.6 กลไกการเกิดเจลของอะกาโรส..... 12
2.7 โครงสร้างของอัลจิเนต..... 13
2.8 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจิเนตแบบ Egg-box model..... 14
2.9 โครงสร้างของคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ประเภท..... 16
2.10 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน..... 17
2.11 โครงสร้างโมเลกุลของกัมอาระบิก..... 18
2.12 โครงสร้างของกัวร์กัม..... 19
2.13 โครงสร้างของเปคตินชนิเมทอกซิลต่ำ..... 20
2.14 โครงสร้างโมเลกุลของกัมแซนแทน..... 22
2.15 โครงสร้างของเซลลูโลส..... 23
2.16 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส..... 25
3.1 แผนภาพแสดงการเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบ
เชื่อมโยงกลไกเดียว..... 33
3.2 แผนภาพแสดงการเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบ
เชื่อมโยงกลไลเดียว..... 35
3.3 แผนภาพแสดงการเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบ
เชื่อมโยงสองกลไก..... 37
3.4 แผนภาพแสดงการเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบ
เชื่อมโยงสองกลไก..... 39
3.5 แผนภาพแสดงการทดสอบการบวมตัว..... 41
4.1 การเกิดพันธะเมื่อใช้บอแร็กเป็นสารเชื่อมโยง..... 43
4.2 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลสูตร A4G6-10..... 44
4.3 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG ในอัตราส่วนต่างๆ
เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นแตกต่างกัน..... 45
4.4 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG ในอัตราส่วนต่างๆ
เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นแตกต่างกัน..... 47
4.5 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ของไฮโดรเจล AG..... 50
4.6 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล CG..... 52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.7 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล AG..... 53
4.8 การเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} เมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$..... 54
4.9 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล CG..... 55
4.10 การบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้ม 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล AG..... 57
4.11 การบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้ม 0.1 M ของไฮโดรเจล CG..... 58
4.12 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG
และไฮโดรเจล CG..... 59
4.13 การบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG
และไฮโดรเจล CG..... 61
4.14 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้สารละลายบอแร็ก
1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร..... 62
4.15 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้สารละลายบอแร็ก
0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร..... 63
4.16 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล ACG..... 65
4.17 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล ACG..... 67
4.18 การบวมตัวในสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล ACG..... 68
4.19 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG..... 69
4.20 การบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG..... 70
4.21 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วย
บอแร็กความเข้มข้นต่างๆ..... 72
4.22 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วย
บอแร็กความเข้มข้นต่างๆ..... 73
4.23 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG-Ca
และไฮโดรเจล CG-Ca..... 75
4.24 การบวมตัวที่สภาวะกรด-เบสเริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG-Ca
และไฮโดรเจล CG-Ca..... 77
4.25 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลแบบ ACG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วย
บอแร็กความเข้มข้นต่างๆ..... 79
4.26 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG-Ca..... 81
4.27 การบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10
ของไฮโดรเจล ACG-Ca..... 82

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

°C	องศาเซลเซียส
A, Na-Alg	โซเดียมอัลจิเนต
AG	ไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม
AG-Ca	ไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม ที่เชื่อมโยงสองกลไก
ACG	ไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส/กัวร์กัม
ACG-Ca	ไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส/กัวร์กัม ที่เชื่อมโยงสองกลไก
C, CMC, Na-CMC	โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
$CaCl_2$	แคลเซียมคลอไรด์
CG	ไฮโดรเจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม
CG-Ca	ไฮโดรเจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม ที่เชื่อมโยงสองกลไก
DM	Degree of methylation
DSC	Differential scanning calorimetry
G	กัวร์กัม
M	โมลาร์
NaCl	โซเดียมคลอไรด์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก (Superabsorbent) ไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้จากการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถบวมตัวในน้ำได้ดีหรือมอนอเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ ความสามารถในการดูดซับน้ำหรือบวมตัวของไฮโดรเจลเนื่องมาจากความยืดหยุ่น หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น -OH, -COOH, $-NH_2$ เป็นต้น รวมถึงปริมาตรอิสระภายในสายโซ่โมเลกุล ไฮโดรเจลทางการค้าส่วนใหญ่เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ อาทิ พอลิเมทาคริเลต พอลิอะคริเลต พอลิอะคริลาไมด์ รวมถึงพอลิเมอร์ร่วม เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่างอะคริลาไมด์กับกรดอะคริลิก [1] เป็นต้น ไฮโดรเจลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ในทางการแพทย์นำไปใช้เป็นวัสดุปิดแผล ใช้ในการทำศัลยกรรม รวมทั้งใช้บรรจุยาให้มีการปลดปล่อยได้ตามที่ต้องการ ในการเกษตรที่ใช้โรยในดินเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้น ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ในผ้าอ้อมเด็กแบบใช้แล้วทิ้ง คอนแทคเลนส์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในงานเฉพาะทางที่ต้องการความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน เช่น การใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างหรืออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลง [2] ดังนั้นไฮโดรเจลที่ใช้จึงต้องว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างหรืออุณหภูมิ ไฮโดรเจลที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นมีสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดีเยี่ยม แต่มอนอเมอร์ที่ตกค้างอยู่ในชิ้นงานนั้นเป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็ง การตกค้างของมอนอเมอร์จึงกลายเป็นปัญหาในการนำไปใช้งานทำให้การเลือกใช้สารตั้งต้นที่ได้จากธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะลดปัญหาดังกล่าวได้ และเพื่อเป็นการลดการใช้มอนอเมอร์ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ใช้สารตั้งต้นที่ได้จากธรรมชาติร่วมกับมอนอเมอร์มาสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ร่วม เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิอะคริลิกแอซิดกับกัวร์กัม [3] เป็นต้น ต่อมาจึงมีการพัฒนาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมด อาทิ การเตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลสและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยมีอีพิคลอโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมโยง [4], ไฮโดรเจลที่เตรียมจากการเชื่อมโยงโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยเมทิลบิสอะคริลาไมด์ (MBA) [5] เป็นต้น

เพื่อลดการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ในการเตรียมไฮโดรเจล ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากวัตถุดิบประเภทพอลิแซคคาไรด์ ได้แก่ โซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมไฮโดรเจล เนื่องจากไม่เป็นพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้ง่าย และสามารถละลายหรือบวมตัวในน้ำได้ดีเพราะในโครงสร้างมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ คือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของสารตั้งต้นทั้งสามชนิด และหมู่คาร์บอกซิเลต ($-COO^-$) ที่มีอยู่ในโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับน้ำของกัวร์กัมไม่มีผลของประจุเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงช่วยให้การบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายอิเล็กโตรไลต์คงรูปอยู่ได้ ประจุลบในรูปของหมู่คาร์บอกซิเลตในโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะช่วยให้สามารถเชื่อมโยงแบบประจุด้วยตัวเชื่อมโยงที่เป็นไดหรือไตรวาเลนต์ได้ [6-7] เช่น Ca^{2+}, Al^{3+} เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซคคาไรด์ โดยแบ่งการเชื่อมโยงออกเป็นสองแบบ คือ การเชื่อมโยงแบบกลไกเดียวด้วยโซเดียมเททระบอเรตซึ่งเป็นการเชื่อมโยงหมู่ไฮดรอกซิล และการเชื่อมโยงแบบสองกลไกด้วยโซเดียมเททระบอเรตและแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งแคลเซียมคลอไรด์จะเชื่อมโยงด้วยแรงทางประจุกับหมู่คาร์บอกซิเลตของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส นอกจากนี้ยังได้แบ่งการเตรียมไฮโดรเจลออกเป็นสองระบบด้วย คือ ระบบสององค์ประกอบ (Binary system) ระหว่างโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกัวร์กัม และระบบสามองค์ประกอบ (Ternary system) ของโซเดียมอัลจิเนต, โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนขององค์ประกอบต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C, ในสารละลายที่มีค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10, ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ และในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) เข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลพอลิแซคคาไรด์มีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม
2. เพื่อศึกษาผลของการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรตและแคลเซียมคลอไรด์ต่อการดูดซับน้ำ
3. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิแซคคาไรด์ในสารละลายต่างๆ คือ น้ำกลั่น, สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นต่างๆ และสารละลายเกลือต่างชนิดกันและความเข้มข้นต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบของโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม แบบเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วยโซเดียมเททระบอเรต
2. เตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบของโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม แบบเชื่อมโยงสองกลไกด้วยโซเดียมเททระบอเรตและแคลเซียมคลอไรด์
3. เตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบจากโซเดียมอัลจิเนต/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม แบบเชื่อมโยงกลไกเดียวและเชื่อมโยงสองกลไก
4. ทดสอบการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ในสารละลายต่างๆ ดังนี้ คือ น้ำกลั่นที่อุณหภูมิต่างๆ, สารละลายเกลือ และสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่างๆ กัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิแซคคาไรด์ได้
2. ได้ไฮโดรเจลที่สามารถควบคุมพฤติกรรมการบวมตัวได้

บทที่ 2

หลักการ

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogel)

ไฮโดรเจล (Hydrogel) หรือเรียกกันในชื่ออื่น เช่น Water gel, Water crystal, Gel crystal [8] เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้จนถึงจุดสมดุลโดยไม่เกิดการละลาย สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล คือ การบวมตัวเมื่ออยู่ในน้ำและหดตัวได้เมื่อไม่มีน้ำ ซึ่งลักษณะของไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ก่อนการดูดซับน้ำจะคล้ายผลึกควอร์ซชิ้นเล็กๆ แต่เมื่อดูดซับน้ำแล้วจะบวมตัว อ่อนนุ่มคล้ายกับเยลลี่ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่น -OH, -COOH, $-CONH_2$ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น $-CH_2-$, $-CH_3$ ในโครงสร้างของไฮโดรเจลมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไฮโดรเจน รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ ในสายโซ่ ทำให้ไฮโดรเจลสามารถคงรูปอยู่ในสภาพที่บวมตัวได้ ส่วนไฮโดรเจลในสภาพที่แห้งเรียกได้อีกอย่างว่า เซโรเจล (Xerogel) โดยความสามารถในการบวมตัวของไฮโดรเจลนั้นขึ้นอยู่กับความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงสร้าง รวมถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) ด้วย

ไฮโดรเจลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น

- ในทางการแพทย์
  - ใช้เป็นวัสดุปิดแผล
  - ศัลยกรรม
  - บรรจุยาที่ต้องการให้ปลดปล่อยได้ตามความต้องการ
- ในการเกษตร
  - โรยในดิน เพื่อเพิ่มความชุ่มชื้น
- ในชีวิตประจำวัน
  - ผ้าอ้อมเด็กแบบใช้แล้วทิ้ง คอนแทคเลนส์

2.1.1 ประเภทของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ที่ใช้ ดังนี้

2.1.1.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้ [9]

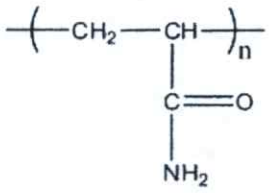
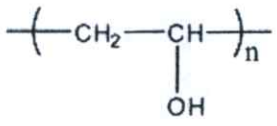
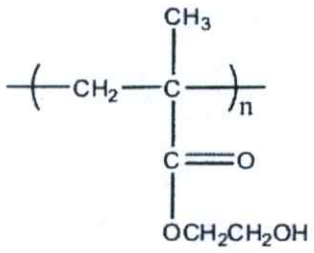
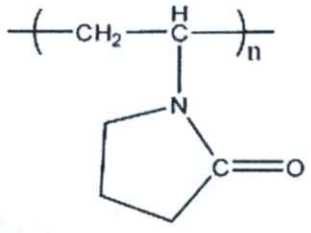
1) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic monomer) และมอนอเมอร์ร่วมที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Polyfunctional comonomer) โครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแต่ละมอนอเมอร์ ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำที่นิยมใช้กัน เช่น เมทาคริเลต เมทาคริลาไมด์ เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ((2-hydroxyethyl) methacrylate (HEMA)) กับเอทิลีนไกลคอลบิสเมทาคริเลต (Ethyleneglycol bismethacrylate (EGDMA)) ดังรูปที่ 2.1 A ไฮโดรเจลที่ได้นำมาใช้เป็นคอนแทคเลนส์แบบนิ่ม การพอลิเมอไรซ์ของไวนิลมอนอเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้ตัวริเริ่มแบบอนุมูล-

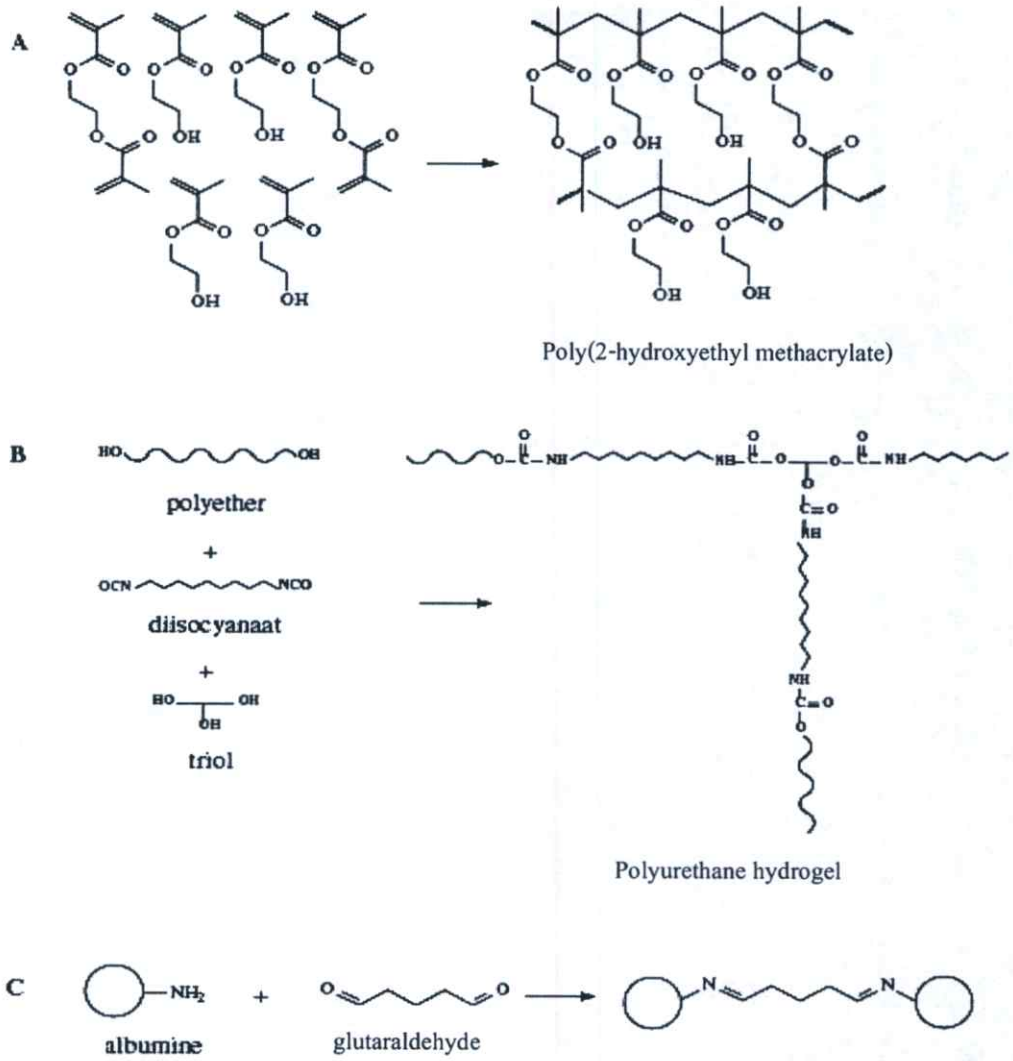
อิสระ เช่น เปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบเอโซ เป็นต้น โดยที่ตัวริเริ่มจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระเมื่อมีการให้ความร้อน หรืออาจใช้ตัวริเริ่มแบบรีดอกซ์ เช่น แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตคู่กับ N,N-tetramethyl ethylene diamine (TEMED) รวมไปถึงการใช้ตัวริเริ่มด้วยแสง (Photo initiator)

2) *ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์* ไฮโดรเจลประเภทนี้เตรียมโดยการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือโอลิโกเมอร์ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยง α,ω-hydroxyl poly(ethylene glycol) ด้วยไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) ดังรูปที่ 2.1 B ซึ่งเป็นตัวเชื่อมโยงแบบไตรออล ไฮโดรเจลที่ได้จัดเป็นพอลิยูริเทนที่ชอบน้ำ

3) *ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ* ไฮโดรเจลประเภทนี้เกิดจากการเชื่อมโยงทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยงโมเลกุลของโปรตีนด้วยฟอร์มัลดีไฮด์หรือกลูตารอลดีไฮด์ ดังรูปที่ 2.1 C นอกจากนี้ไอออนิกพอลิเมอร์ยังสามารถเชื่อมโยงได้ด้วยการใช้ตัวเชื่อมโยงที่มีประจุเป็น 2+ หรือ 3+ เช่น การสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตด้วยตัวเชื่อมโยงที่ให้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+})

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างไฮโดรเจล

โครงสร้าง	ชื่อ
	พอลิอะคริลาไมด์ Poly(acrylamide)
	พอลีไวนิลอัลกอฮอล์ Poly(vinyl alcohol)
	พอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต Poly(2-hydroxyethyl methacrylate)
	พอลิเอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน Poly(N-vinyl-2-pyrolidone)



รูปที่ 2.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่ใช้แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้ [9]

2.1.1.2 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [10]

1) ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film hydrogel) ไฮโดรเจลแบบนี้มักนำไปใช้เคลือบผิววัสดุต่างๆ มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) เพื่อป้องกันไม่ให้เจลละลายในตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหรือในบางกรณีหลังจากที่เคลือบบนพื้นผิววัสดุแล้วอาจจะทำการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์ โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบนี้ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ 2-ไฮดรอกซีเมทิลเมทาคริเลต (Poly(2-hydroxy methylmethacrylate), PHEMA) [11] เป็นต้น

2) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network hydrogel) ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยการฉีดสารผสมของมอนอเมอร์ ตัวริเริ่ม และสารเชื่อมโยง เข้าไปในแม่พิมพ์ ซึ่งในบางกรณีอาจผสมตัวทำละลายลงไปด้วย จากนั้นทำให้เกิดการพอลิเมอไรซ์ในแม่พิมพ์ ตัวอย่างเช่น พอลิไวนิลอัลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) [10] เป็นต้น

3) ไฮโดรเจลแบบต่อกิ่งบนพื้นผิว (Surface grafted hydrogel) ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยการนำพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำไปทำการต่อกิ่งบนพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้ไม่ละลายน้ำ วิธีการนี้สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้ด้วย โดยการนำไฮโดรเจลไปต่อกิ่งบนพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น การต่อกิ่งบนพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ร่วมของเจลาติน/พอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต/พอลิบิวทิลอะคริเลต [12]

4) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์พีเนเทรติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (Interpenetrating polymer network hydrogel) ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นการแทรกพอลิเมอร์สองชนิดที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายเข้าด้วยกัน โดยโครงร่างทั้งสองไม่สามารถแยกออกจากกันได้และมีความแข็งแรง วิธีการนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง เช่น พอลิไวนิลอัลกอฮอล์/พอลิอะคริลิก-แอซิด อินเตอร์พีเนเทรติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (Poly(vinyl alcohol)/Poly(acrylic acid) IPN) [13] เป็นต้น

2.1.1.3 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง [14]

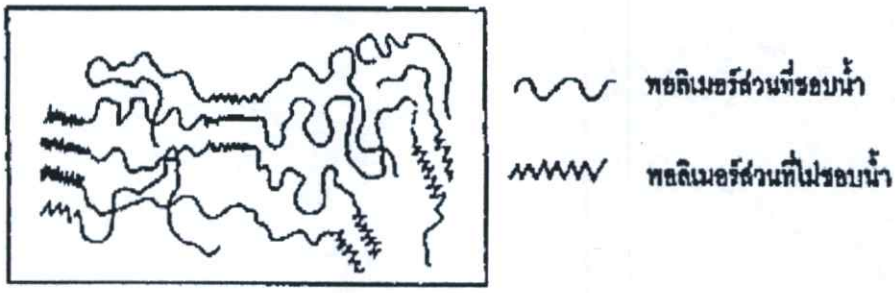
1) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical hydrogel) มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก โดยในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะมักมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลายตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับทางความร้อน คือ ไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก แต่หากให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัวสมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกได้อีกอย่างว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต เนื่องจากไฮโดรเจลชนิดนี้มีความคงทน ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลายทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูป ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ 2-ไฮดรอกซี-เอทิลเมทาคริเลต ที่เชื่อมโยงด้วยเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต [15] เป็นต้น

2) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical hydrogel) การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากพันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลล์ หรือแรงระหว่างประจุ ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดการผันกลับทางความร้อนได้จึงเรียกได้อีกอย่างว่าไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมได้เมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง ซึ่งการให้ความร้อนไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิดทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายรวมทั้งการผสมสารอื่นลงในเจลด้วย เช่น สารต้านจุลินทรีย์ เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิอะคริลาไมด์-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน (Poly(acrylamide-co-methymethacrylate-co-vinylamine)) [16] เป็นต้น

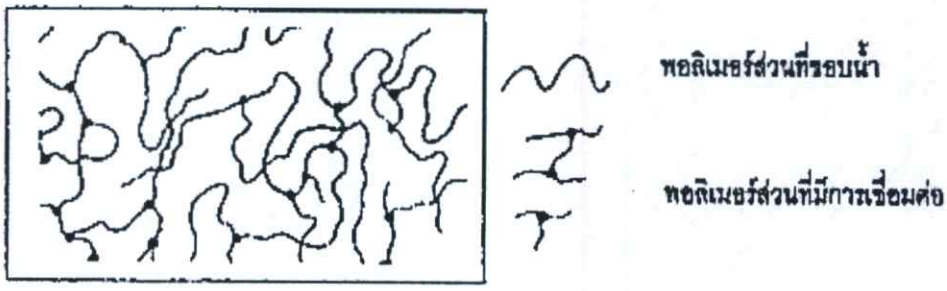
2.1.1.4 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามขนาดของรูพรุน [10]

1) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดี โดยที่มอนอเมอร์ สารเชื่อมโยง และพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ เจลที่ได้มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่าไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous hydrogel) เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA:H_2O เท่ากับ 2:1 เป็นต้น

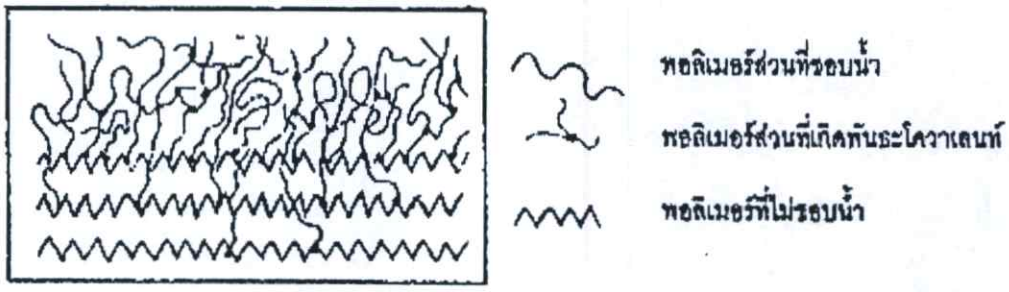
A ไฮโดรเจลแบบฟลม (Cast film)



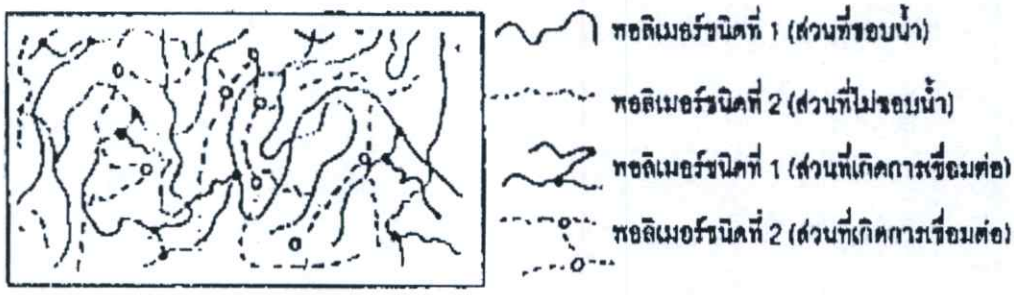
B ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network)



C ไฮโดรเจลแบบกราฟทบนพนผว (Surface grafted polymer)



D ไฮโดรเจลแบบอนเตอรพเนเทรตงพอลเมอรเนตเวรค (Interpenetrating network, IPN)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามการสังเคราะห์ [10]

2) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous hydrogel) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดนี้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการพอลิเมอไรซ์ แต่จะตกตะกอนแยกออกมา ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีสีขาวขุ่น เรียกได้ว่าเป็นไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel) เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA:H_2O เท่ากับ 1.25:1 เป็นต้น

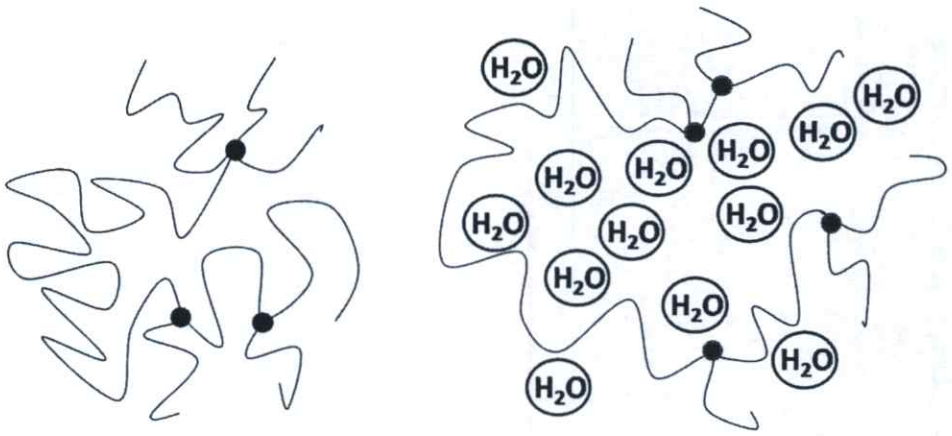
2.1.2 การบวมตัวและปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล [10]

สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจลคือสามารถบวมตัวได้เมื่ออยู่ในน้ำ เนื่องจากโครงสร้างของไฮโดรเจลที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ทั้งยังมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ เมื่อแช่เซโรเจลในน้ำ แรงดันออสโมติก (Osmotic driving force) จะผลักดันน้ำให้แทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ของไฮโดรเจลซึ่งไม่มีน้ำอยู่ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวและปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ หากน้ำสามารถเกิดอันตรกิริยากับหมู่ต่างๆ ในสายโซ่ของพอลิเมอร์นั้น เช่น พันธะไฮโดรเจน จะเป็นแรงเสริมที่ทำให้น้ำเข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจลได้มากขึ้น น้ำที่เข้าไปในไฮโดรเจลจะดันสายโซ่ให้ยืดออก แต่เนื่องจากสายโซ่ชอบอยู่ในสภาวะเดิมซึ่งมีเอนโทรปีต่ำจึงมีแรงต้านการขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดขึ้น เช่น แรงต้านการขยายตัวที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล เป็นต้น เมื่อแรงดันออสโมติกที่ผลักดันให้น้ำเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของไฮโดรเจลกับแรงที่ต้านการขยายตัวของสายโซ่มีค่าเท่ากันการบวมตัวของไฮโดรเจลจะถึงจุดสมดุลและปริมาณน้ำในโครงสร้าง ณ จุดนี้เรียกว่าปริมาณน้ำสมดุล (Equilibrium water content) ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับโดยไฮโดรเจลสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{ปริมาณน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่แห้ง}} \times 100\%$$

เมื่อไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวในน้ำ น้ำที่อยู่ในไฮโดรเจลจะมีลักษณะดังต่อไปนี้ [17-18]

1. Free water คือ น้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจล ซึ่งไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์ โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระเหยง่าย ไม่มีผลของสายโซ่พอลิเมอร์มาเกี่ยวข้อง
2. Bound water คือ น้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลน้ำที่เคลื่อนที่ได้ยาก ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงในการเอาน้ำนี้ออกจากโครงสร้างไฮโดรเจล



รูปที่ 2.3 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล [10]

รูปที่ 2.4 อันตรกิริยาของไฮโดรเจลกับโมเลกุลของน้ำ [10]

ปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล ได้แก่

1. แรงดันออสโมติก เนื่องจากปริมาณน้ำภายในและภายนอกไฮโดรเจลมีไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลนั้น ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมาก น้ำก็จะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากขึ้น

2. อันตรกิริยาระหว่างน้ำกับสายโซ่ของไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เกิดพันธะไฮโดรเจนได้จะทำให้น้ำแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้มากขึ้นทำให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวได้ดี

3. ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าการเชื่อมโยงมีปริมาณมากจะทำให้สายโซ่อยู่ใกล้กันมากขึ้น มีช่องว่างระหว่างสายโซ่น้อยลง รวมถึงสายโซ่มีความยืดหยุ่นลดลง ทำให้การขยายตัวของสายโซ่เกิดได้น้อยเนื่องจากเกิดการดึงรั้งกันของสายโซ่ แรงต้านการขยายตัวของไฮโดรเจลจึงมีค่าสูงทำให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวได้น้อย

4. ความยืดหยุ่นของสายโซ่ หากสายโซ่มีความยืดหยุ่นมากน้ำสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ได้ง่ายและมีแรงต้านการขยายตัวของสายโซ่น้อย ทำให้ปริมาณน้ำสมดุลมีค่าสูงและเกิดการบวมตัวได้มาก

2.2 กัมจากธรรมชาติ (Natural gums) [19]

กัมจากธรรมชาติ (Natural gums) เป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์และอนุพันธ์ของพอลิแซคคาไรด์ ส่วนใหญ่มีแหล่งที่มาจากพืช สามารถละลายได้ทั้งในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อน โดยสารละลายที่ได้จะมีความหนืดสูงแม้ว่ามีความเข้มข้นของกัมน้อย ดังนั้นจึงมีการนำกัมจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหารโดยใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดหรือสารข้น สารเพิ่มเสถียรภาพ อิมัลซิไฟเออร์ ใช้เป็นสารช่วยให้เกิดเป็นเจล นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นกาวได้

กัมจากธรรมชาติมีที่มาจากหลายแหล่ง เมื่อแบ่งตามแหล่งที่มาสามารถแยกได้เป็น 3 แหล่งใหญ่ ดังนี้

1. กัมจากสาหร่ายทะเล (Algae source) เช่น อะการ์ (Agar), อัลจิเนต (Alginate), คาร์ราจีแนน (Carrageenan)
2. กัมจากพืช (Botanical source) ได้จากส่วนต่างๆ ของพืช เช่น
   - Plant Extrudates เช่น กัมอะราบิค กัมคารายา
   - เมล็ด (Seed gums) จำพวกเมล็ดมะขาม เช่น กัวร์กัม (Guar gum), Lucust bean gum
   - เยื่อไม้ (Plant tissue) เช่น Larch gum, Pectin
3. กัมจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Microbial gums) เช่น แซนแทนกัม (Xanthan gum)

2.2.1 กัมจากสาหร่ายทะเล

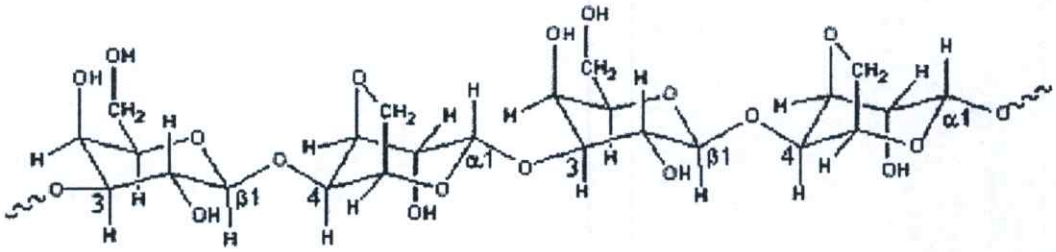
แหล่งวัตถุดิบได้จากสาหร่ายทะเล (Marine algae) เช่น กลุ่มสาหร่ายสีแดงและสาหร่ายสีน้ำตาล เป็นต้น

2.2.1.1 อะการ์ (Agar)

อะการ์ (Agar) ได้จากผนังเซลล์ของสาหร่ายสีแดง อะการ์จัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดสายโซ่ตรง ประกอบไปด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) ประเทศแรกที่พบคือ ญี่ปุ่น เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1700 แต่เริ่มมีการนำมาใช้ประโยชน์เมื่อประมาณปี ค.ศ. 1900 ประเทศที่ผลิตอะการ์จากสาหร่าย ได้แก่ สเปน โมร็อคโก ชิลี สหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น ไต้หวัน เกาหลีใต้ และโปรตุเกส

อะการ์มีองค์ประกอบของพอลิแซคคาไรด์ 2 ประเภทหลัก คือ อะกาโรส (Agarose) และอะกาโรเปคติน (Agaropectin) ซึ่งทั้งอะกาโรสและอะกาโรเปคตินนี้เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีโครงสร้างหลักเป็นหน่วยย่อยของน้ำตาลกาแลคโตส

- **อะกาโรส** มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 1,3 linked β-D-galactopyranose และ 1,4 linked 3,6-anhydro-α-L-galactopyranose เรียงสลับกันไปที่ตำแหน่ง 1,3 linked สายโซ่สามารถถูกตัดได้ด้วยกรด แต่ที่ตำแหน่ง 1,4 linked สายโซ่จะต้องตัดโดยใช้เอนไซม์ ดังรูปที่ 2.5

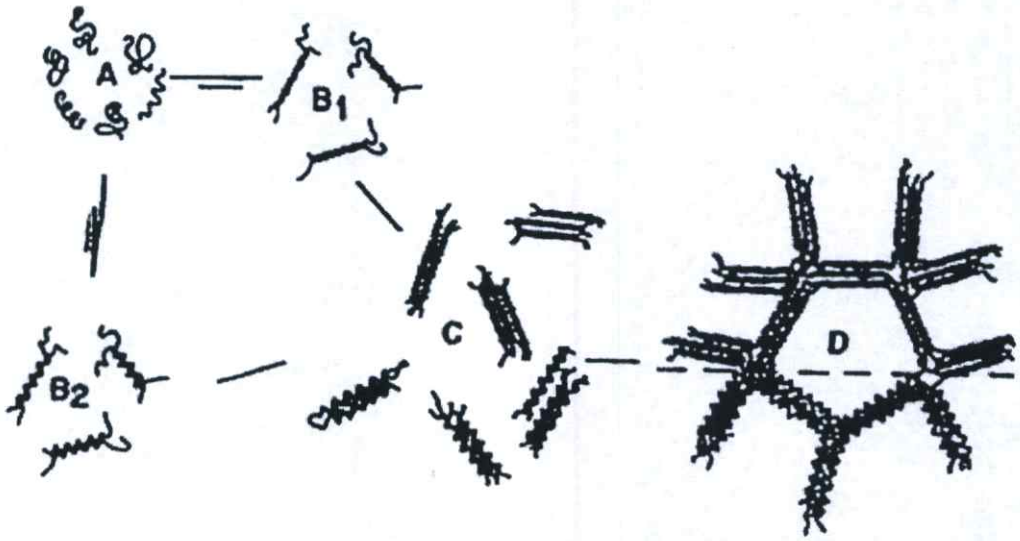


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะกาโรส [20]

- **อะกาโรเปคติน** เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟต มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับอะกาโรส คือ มีหน่วยซ้ำของ β-D-galactopyranose ซึ่งมีโครงสร้างเหมือนในอะกาโรส แต่ 3,6-anhydro-α-L-galactopyranose บางโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยซัลเฟตประมาณ 5-8%

อะการ์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะอยู่ในรูปที่เป็นผง เกล็ด รวมทั้งเป็นแผ่น มีสีขาวขุ่น สามารถละลายได้ในน้ำเย็นและละลายได้ดีในน้ำเดือด อะการ์ยังสามารถเกิดเป็นเจลได้ด้วยเมื่อมีความเข้มข้นของเนื้ออะการ์มากกว่า 0.5% ที่อุณหภูมิ 30-40°C และจะละลายเมื่อมีอุณหภูมิประมาณ 75-90°C การเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า Physical gels โดยเมื่อโมเลกุลของอะกาโรสละลายอยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็น Random coil และเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิเกิดเจลจะเกิดการจับกันของสายโซ่พอลิเมอร์ ตามรูปที่ 2.6 B1 (Antisymmetric double helices) ได้เป็นโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 C ส่วนบน และ D ส่วนบน หรือจับกันตามรูปที่ 2.6 B2 (Symmetric double helices) ได้โครงสร้างดังรูปที่ 2.6 C ส่วนล่าง และ D ส่วนล่าง การที่จะเกิดเจลรูปแบบใดนั้น

ขึ้นอยู่กับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิลดลงเร็วจะได้โครงสร้างเป็นแบบรูปที่ 2.6 B1 และ C,D (ส่วนบน) เจลที่ได้นี้สามารถเกิดการผันกลับทางความร้อนได้ เรียกว่า เทอร์โม-รีเวอซิเบิลเจล (Thermoreversible gel)



รูปที่ 2.6 กลไกการเกิดเจลของอะกาโรส [21]

อะการ์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิ

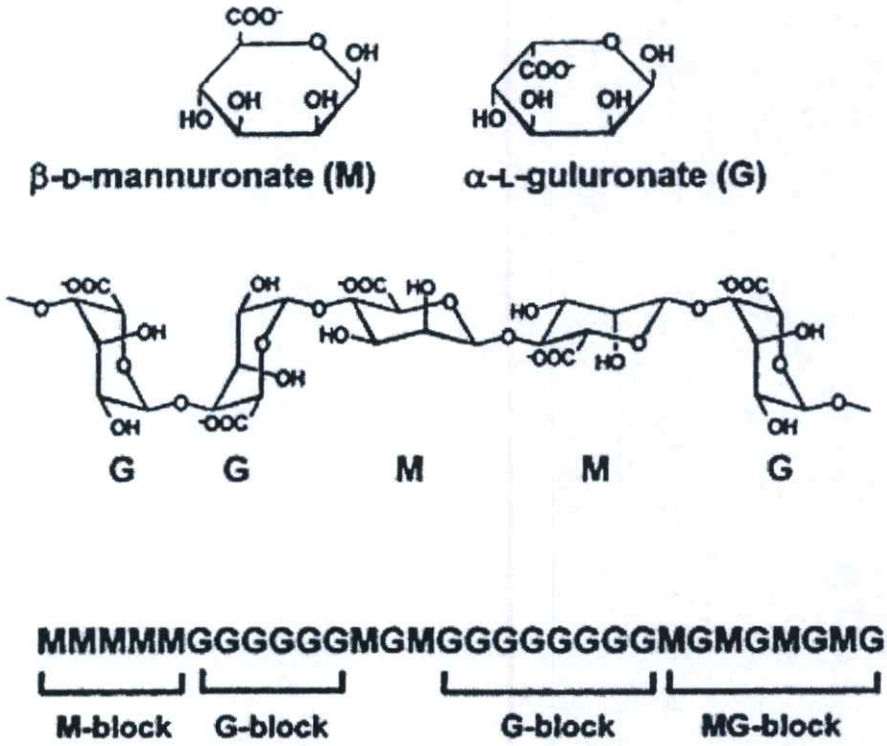
- ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารเพิ่มความข้นของซอสหรือน้ำซุป
- ในอุตสาหกรรมกระดาษ (Paper sizing)
- ในทางเภสัชศาสตร์ใช้ช่วยให้ตัวยาถูกปล่อยออกมาช้าลง (Slow release ingredient) เพราะอะการ์ไม่สามารถย่อยในร่างกายมนุษย์ได้เนื่องจากไม่มีเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อย
- ใช้เป็น Tissue culture media ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

2.2.1.2 อัลจิเนต (Alginate)

กัมประเภทนี้จะอยู่ที่ผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาล (Phaeophyceae) เรียกว่า อัลจิเนต อัลจิเนตจะอยู่ในรูปเกลือโซเดียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมของกรดอัลจินิก พบเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1800 ในประเทศสหราชอาณาจักร และเริ่มมีการผลิตเชิงอุตสาหกรรมในปี ค.ศ. 1929 ในรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา

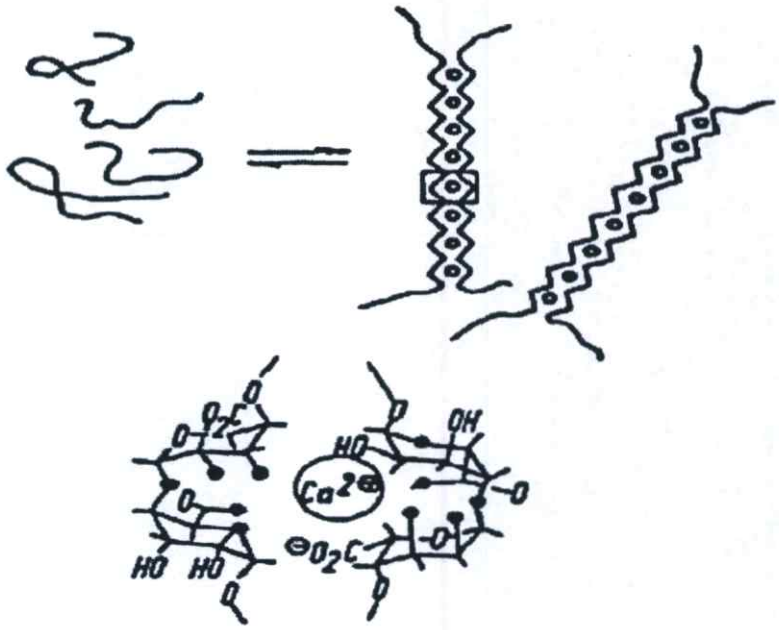
การผลิตอัลจิเนตในเชิงอุตสาหกรรมนั้น สาหร่ายทะเลที่ใช้ ได้แก่ Macrocystis pyrifera มีอัลจินประมาณ 14-19%, Laminaria cloustoni และ Laminaria digitata มีอัลจินประมาณ 15-40% ปริมาณที่พบจะขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่วๆ ไปในโลก ประเทศที่ผลิตอัลจิเนตมาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนนาดา และญี่ปุ่น

อัลจิเนตเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยของมอนอแซคคาไรด์สองตัว คือ 1,4-β-D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วยบริเวณที่มีพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวของ G และ M ที่เรียกว่า G-bolcks และ M-blocks ตามลำดับ และบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks ดังรูปที่ 2.7 สัดส่วนของพอลิเมอร์ร่วมและโครงสร้างที่แตกต่างจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าในสายโซ่มีพอลิเมอร์ G ในปริมาณสูงจะมีสมบัติเป็นเจลแข็งที่ความเข้มข้นหนึ่งๆ ของประจุบวกของโลหะ แต่ถ้าในสายโซ่มีพอลิเมอร์ M ในปริมาณสูงเจลที่เกิดจะมีแนวโน้มอ่อนนุ่มและมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้างกว่าสายโซ่ที่มีพอลิเมอร์ G ปริมาณสูง



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอัลจิเนต [21]

อัลจิเนตบางชนิดไม่มีสมบัติเป็นเจลและจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) โครงสร้างของเจลที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกล่องใส่ไข่ (Egg box) โดยมี Ca^{2+} เกาะอยู่กับสายโซ่พอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.8 สมบัติที่ดีของอัลจิเนตเมื่อเกิดเป็นเจลคือเจลที่ได้จะไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible gel) เมื่ออยู่ในน้ำเย็นที่มีแคลเซียมไอออน



รูปที่ 2.8 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจิเนตแบบ Egg-box model [21]

อัลจิเนตที่ผลิตและจำหน่ายในเชิงการค้านั้นมีหลายอนุพันธ์จึงมีสมบัติการละลายในน้ำที่แตกต่างกันไป เช่น อนุพันธ์ของเกลือ Ca^{2+}, K^{+}, Na^{+}, NH_4^{+} และยังผลิตในรูปของพรอพิลีนไกลคอลอัลจิเนต (Propylene glycol alginate) ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของกรดอัลจินิก (Alginic acid) กับพรอพิลีนออกไซด์ (Propylene oxide) ภายใต้ความดันอนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ประจุบวกของโลหะที่อยู่ในโครงสร้าง รวมถึงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย เช่น ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตจะคงที่เมื่อมีค่า pH มากกว่า 5 แต่ความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH น้อยกว่า 4.5 และหากสารละลายมีค่า pH เท่ากับ 3 จะเริ่มมีผลึกของกรดอัลจินิกเกิดขึ้น

อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 โดยเติมในอาหารกระป๋องบางชนิดเพื่อใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว หรือใช้เป็นสารทำให้เกิดเจล นอกจากนี้ยังใช้อัลจิเนตในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกด้วย ตัวอย่างของการนำอัลจิเนตไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น

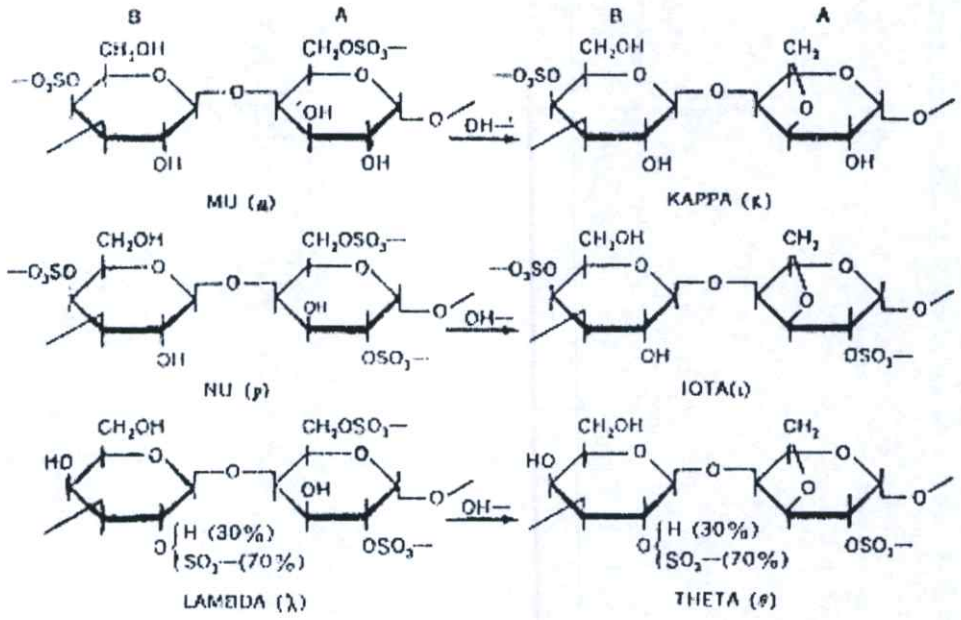
- ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารข้นหรือสารทำให้เกิดเจลในซุป เครื่องดื่ม ไอศครีมและเยลลี
- ใช้เป็นสารข้นในการผลิตเครื่องสำอางค์
- แคลเซียมอัลจิเนตใช้ทำเป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้ซึ่งจะช่วยให้แผลหายเร็วขึ้นและช่วยลดอาการบาดเจ็บได้ดีกว่าแผ่นปิดแผลแบบดั้งเดิม
- ช่วยดูดซึมโลหะที่เป็นพิษจากเลือด
- เอสเตอร์อัลจิเนตใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และอิมัลซีไฟเออร์ (Emulsifiers)

2.2.1.3 คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

ชื่อคาร์ราจีแนน (Carrageenan) มาจาก Carragheen ซึ่งเป็นชื่อแหล่งที่มีการพบสาหร่ายในปริมาณมากอยู่ในแถบชายฝั่งของประเทศไอร์แลนด์ คาร์ราจีแนนเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) มีการนำมาใช้ครั้งแรกในประเทศจีนเมื่อประมาณ 600 ปีก่อนคริสตกาล ในขณะที่การผลิตในระดับอุตสาหกรรมเกิดขึ้นเมื่อประมาณช่วงทศวรรษ 1930

คาร์ราจีแนนจัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟต (Polysaccharides sulphate) โครงสร้างมีลักษณะบิดเป็นเกลียว (Helical) โดยมีโครงสร้างหลักเป็นกาแลคโทสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic linkage) คาร์ราจีแนนสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้อีกหลายชนิดตามจำนวนและตำแหน่งของกลุ่มเอสเตอร์ซัลเฟต (Ester sulphate) และจำนวน 3,6 anhydro-D-galactose (3,6-AG) ได้แก่ Kappa, Iota และ Lambda ซึ่งคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิดนี้ ประกอบด้วยโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำๆ กันหลายหน่วย ดังรูปที่ 2.9 Unit A แสดง 1,4-linked galactoside ในขณะที่ Unit-B แสดง 1,3-linked galactoside

- **Kappa carrageenan** ประกอบด้วย 1,3-linked galactoside มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1,4-linked 3,6 anhydro-D-galactose (3,6 AG) โดยมีสารตั้งต้นเป็น mu-carrageenan ถ้ามีปริมาณแอนไฮดรายจากการปิดวงเป็น 3,6 anhydride ในช่วง 28-35% จะมีผลทำให้ไวต่อโปแตสเซียมและมีความสามารถในการเกิดเจล แม้จะมีการดัดแปรให้มี 3,6-AG สูงที่สุด แต่อาจจะมีความแตกต่างกันที่จำนวนของซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 ใน 1,3-linked galactoside และกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 หรือ 6 ใน 1,4-linked galactoside จะทำให้คาร์ราจีแนนชนิด Kappa มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป
- **Iota carrageenan** มีสารตั้งต้นเป็น nu-carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1,4-linked 3,6-AG มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ความแตกต่างระหว่างแอนไฮดรายในคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota คือ จำนวนกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ใน 1,4-linked galactoside ของ Iota จะมีมากกว่า Kappa ประมาณ 25-50% ความไวต่อโปแตสเซียมลดลงซึ่งจะมีผลทำให้ได้เจลที่อ่อนนุ่ม แต่ถ้ามีซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 มากถึง 80% จะไวต่อแคลเซียม
- **Lambda carrageenan** ประกอบด้วย 1,3-linked galactose ซึ่งมีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ประมาณ 70% และ 1,4-linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 6 ซึ่งคาร์ราจีแนนชนิดนี้จะไม่เกิดการปิดวงเป็น 3,6-AG ทำให้ไม่มีสมบัติในการเกิดเจล

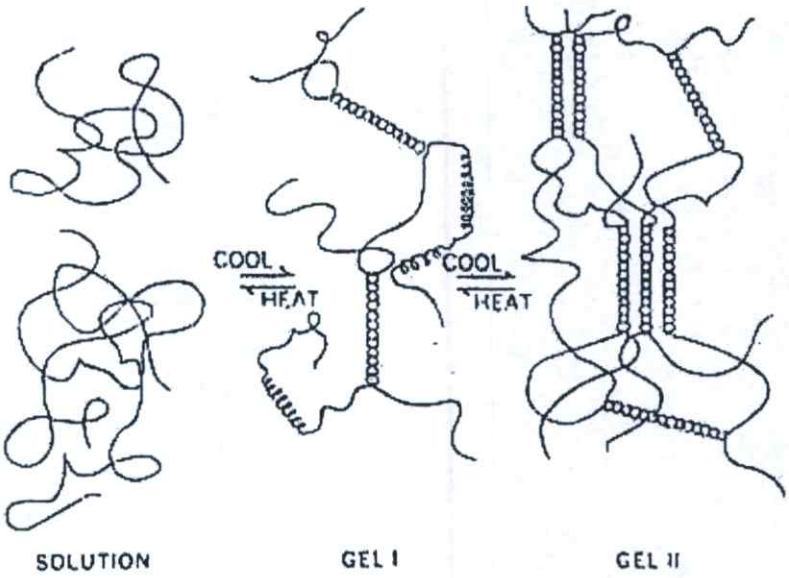


รูปที่ 2.9 โครงสร้างของคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ประเภท [21]

คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายได้ในน้ำร้อน ถ้าเป็นเกลือโซเดียมของคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota จะสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ในขณะที่เกลือของไอออนชนิดอื่นๆ เช่น โปแตสเซียม หรือแคลเซียมไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Lambda จะละลายได้ในน้ำเย็นโดยไม่ขึ้นกับชนิดของไอออน อุณหภูมิที่ใช้ในการละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนและไอออนที่เกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota ต้องใช้อุณหภูมิในการละลายมากกว่า 70°C นอกจากนี้คาร์ราจีแนนทุกชนิดจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายในตัวทำละลายที่รวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำได้ เช่น โพรพิลีนไกลคอล อัลกอฮอล์ เป็นต้น

คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota มีความสามารถที่จะเกิดเจลได้เมื่อสารละลายของคาร์ราจีแนนเย็นตัวลง ซึ่งเจลที่ได้จัดเป็น Thermoreversible aqueous gel คือ เจลที่สามารถละลายได้เมื่อได้รับความร้อนและเกิดเจลได้อีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง เมื่อคาร์ราจีแนนที่ละลายน้ำสามารถเกิดเจลได้ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการรวมตัวกันแบบเกลียวคู่ (Double helix) หากให้ความร้อนจนอุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของเจล ทั้งอุณหภูมิและการปั่นกวนจะทำให้เกลียวคลายตัวเป็น Random coil และเมื่อเย็นตัวลงแต่ละสายโซ่จะรวมตัวกันเกิด Junction point ดังรูปที่ 2.10 Gel I และหากปล่อยให้เย็นลงอีกจะเกิดการเกาะกันของแต่ละเกลียว ดังรูปที่ 2.10 Gel II จนเป็นโครงสร้างแบบโครงร่างแหสามมิติ (Polymer network 3D) ทำให้เจลเกิดการแข็งตัว การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น คาร์ราจีแนนชนิด Kappa ถ้าเติม K^+ จะเกิดเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่น (Elastic gel) แต่หากเติม Ca^{2+} จะเกิดเป็นเจลแข็ง (Rigid gel) ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Iota เมื่อเติม Ca^{2+} จะเกิดเป็นเจลที่มีความยืดหยุ่น ถ้าผสมคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับ Iota เข้าด้วยกันจะทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลได้มากขึ้น เจลที่ได้มีความยืดหยุ่นนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน [21]

คาร์ราจีแนนเกรดการค้าโดยทั่วไปจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 100,000 ถึง 1,000,000 สามารถละลายได้ในน้ำ ซึ่งสารละลายที่ได้มีความหนืดสูงและสามารถเกิดเจลได้ สารละลายของคาร์ราจีแนนมีสมบัติเฉพาะประการหนึ่งซึ่งถือเป็นข้อดี คือ มีสมบัติการไหลแบบ Thixotropic คือ ที่สภาวะปกติจะมีความหนืดสูงแต่หากให้แรงเฉือน เช่น การคนหรือเขย่าจะทำให้สารละลายมีความหนืดลดลงแต่จะมีความหนืดสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อเอาแรงออก คาร์ราจีแนนถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยใช้เป็นสารข้นหรือสารเพิ่มเสถียรภาพ เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารใช้ช่วย เพิ่มความหนืด เช่น ไอศครีม ซอส เป็นต้น หากใช้คาร์ราจีแนนผสมกับโปรตีนเคซีนจะได้เป็น โยเกิร์ต หรือใช้เป็นสารข้นในเครื่องสำอางค์

2.2.2 Gums จาก Botanical Sources

กัมประเภทนี้เป็นกัมที่ได้จากส่วนต่างๆ ของพืช แบ่งได้ดังนี้

1. Plant extrudate เช่น Arabic gum, Karaya gum
2. Plant seed gums เช่น Guar gum, Lucust bean gum
3. Plant tissue gum เช่น เปคติน (Pectin)

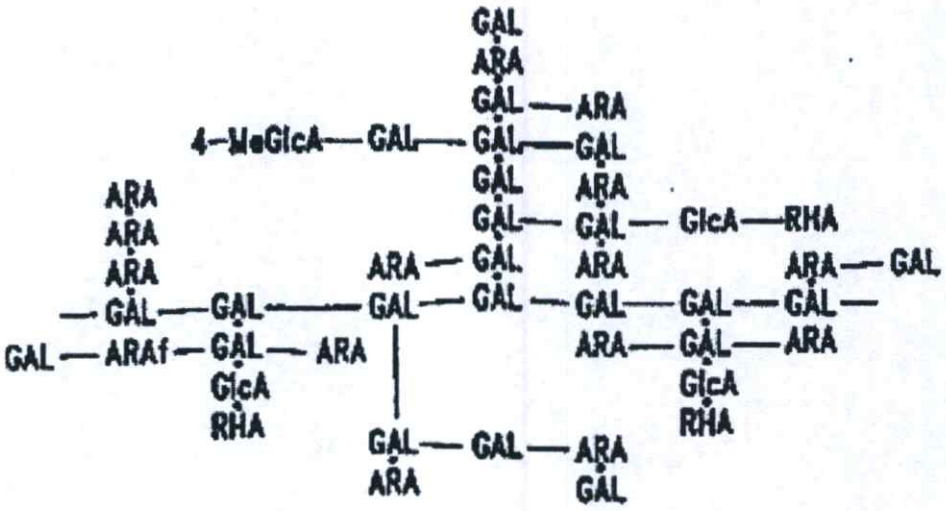
2.2.2.1 Plant Extrudate

กัมประเภทนี้ได้จากยางต้นไม้ เช่น ไม้พุ่มในเขตทะเลทราย แถบเอเชียตะวันออกกลาง แอฟริกาตอนเหนือ มีลักษณะเป็น Dried resins ซึ่งจะไหลออกมาเมื่อต้นไม้มีบาดแผล กัมในกลุ่มนี้ ได้แก่ Arabic gum, Ghatti gum, Karaya gum และ Tragacath gum กัมที่ได้ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส

123718

กัมอะราบิก หรือ กัมอะคาเซีย

กัมอะราบิก หรือ กัมอะคาเซีย (Arabic gum or Gum acacia) เป็นกัมที่ได้จากต้น Acacia senegal และ Acacia seyal จัดเป็น Heteropolysaccharide ที่มีโครงสร้างซับซ้อนเป็นสารผสมเชิงซ้อนระหว่างเกลือโปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมของกรดอะราบิก (Arabic acid) ซึ่งกรดอะราบิกนี้เป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อนและมีไนโตรเจนจำนวนเล็กน้อย โดยที่องค์ประกอบทางเคมีจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามแหล่งที่มา ภูมิอากาศ ฤดูกาลและอายุของต้น ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานที่อยู่ในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลและอนุพันธ์ของน้ำตาล ได้แก่ Galactose (GAL) 44%, Arabinose (ARA) 24%, Glucuronic acid (GlcA) 14.5%, Rhamnose (RHA) 13% และ 4-O-methylglucuronic acid (4-MeGlcA) 1.5% โดยกัมจาก Acacia seyal จะมีปริมาณ Rhamnose และ Glucuronic acid ต่ำกว่า Acacia senegal แต่มีปริมาณ Arabinose และ 4-O-methylglucuronic acid สูงกว่า นอกจากนี้ในโมเลกุลยังมีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบด้วย ได้แก่ Hydroxyproline และ Serine



รูปที่ 2.11 โครงสร้างโมเลกุลของกัมอาระบิก [21]

กัมอะราบิกละลายได้ในน้ำและให้สารละลายใสที่มีสีตั้งแต่เหลืองอ่อนจนถึงน้ำตาลส้ม แต่หากกัมนั้นได้จาก Acacia senegal ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นกิ่งแขนงมากและโมเลกุลอัดกันแน่น สารละลายที่ได้จึงมีความหนืดที่ความเข้มข้นสูง กัมอะราบิกสามารถละลายได้จนมีความเข้มข้นสูงถึง 55% และสารละลายที่ได้ยังคงมีความหนืดต่ำ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้อัมอะราบิกมีสมบัติที่แตกต่างจากกัมชนิดอื่นซึ่งสามารถละลายได้สูงสุดเพียง 5% เท่านั้น กัมอะราบิกเป็นกัมที่มีการนำมาใช้มากที่สุดในกลุ่มกัมจากธรรมชาติที่ได้จากพืชเพราะละลายได้ดีในน้ำและทนต่อความเป็นกรด-ด่าง

ส่วนใหญ่กัมอะราบิกจะนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารจำพวกขนมหวาน เช่น มาร์ชเมลโล ลูกกวาด เป็นต้น โดยทำหน้าที่ยับยั้งการตกผลึกของน้ำตาลและช่วยให้เกิดอิมัลชันได้ดี ในการผลิตสารที่ให้กลิ่นจะใช้กัมอะราบิกเป็นสารยึดติด เพราะขณะทำการพ่นสารที่ให้กลิ่นลงบนอาหารกัมอะราบิกจะไปช่วยเคลือบผิวนอกของผลิตภัณฑ์อาหารทำให้สารที่ให้กลิ่นติดอยู่บนผิวของอาหารและช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันรวมทั้งการระเหยของสารที่ให้กลิ่นออกไปจากอาหารอีกด้วย

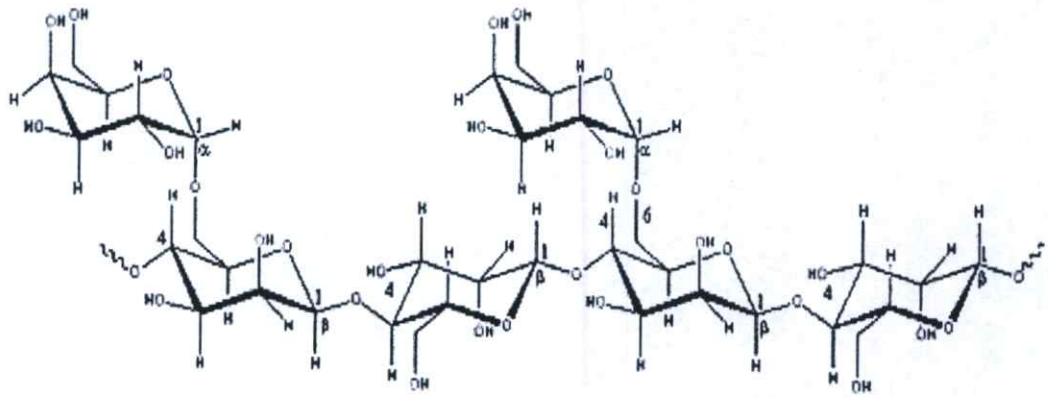
นอกจากนี้ยังใช้เป็น Flavor encapsulating agent เพื่อนำไปใช้ในพวกผลิตภัณฑ์แบบผง เช่น ซุปผง ในเบียร์กัมอะราบิกจะช่วยทำให้ฟองเบียร์คงตัว ช่วยเป็นอิมัลซิไฟเออร์และเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพให้กับเครื่องดื่มที่อยู่ในรูปของอิมัลชันด้วย

2.2.2.2 Seed Gums

กัมประเภทนี้เป็นกลุ่มของ Galactomannan gums ที่สกัดได้จากเมล็ดของพืช เช่น Locust bean gum, Guar gum, Tamarind Gum เป็นต้น

กัวร์กัม (Guar gum)

กัวร์กัมได้จาก Endosperm ของเมล็ดต้นกัวร์ (Cyamopsis tetragonolobus) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน ปัจจุบันมีปลูกในรัฐเทกซัส สหรัฐอเมริกา โครงสร้างของกัวร์กัมเป็นพอลิเมอร์สายยาวของแมนโนสที่ต่อกันด้วย 1,4-linked และมีกิ่งแขนงของกาแลคโตส โดยทุกๆ 2 โมเลกุลของแมนโนสจะต่อกับ 1 โมเลกุลของกาแลคโตสด้วย 1,6 linked ทำให้อัตราส่วนโดยโมลของแมนโนสต่อกาแลคโตสเป็น 2:1 กัวร์กัมมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 220,000



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของกัวร์กัม [22]

กัวร์กัมจัดเป็น Non-gelling แต่สามารถกระจายตัวและอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัวและอุ้มน้ำ กัวร์กัมมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0 ความหนืดของสารละลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เวลา ความเข้มข้นและขนาดของอนุภาคด้วย นอกจากนี้ยังสามารถเกิดอันตรกิริยากับกัมแซนแทน (Xanthan gum) ได้สารละลายที่มีความหนืดเพิ่มขึ้น กัมร์กัมเป็น Non-ionic และทนต่อ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-10 ทำให้สามารถเติมอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่า 5% จะมีผลต่อการอุ้มน้ำและการเกิดเจล

กัวร์กัมสามารถนำไปใช้งานได้ในหลายอุตสาหกรรม โดยทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดเป็นอิมัลซิไฟเออร์ รวมทั้งเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพด้วย เช่น

- อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น Sizing agent และ Thickener
- อุตสาหกรรมกระดาษ

- อุตสาหกรรมอาหาร เช่น เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพในไอศครีม และพวกอาหารแช่แข็ง หรือใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์

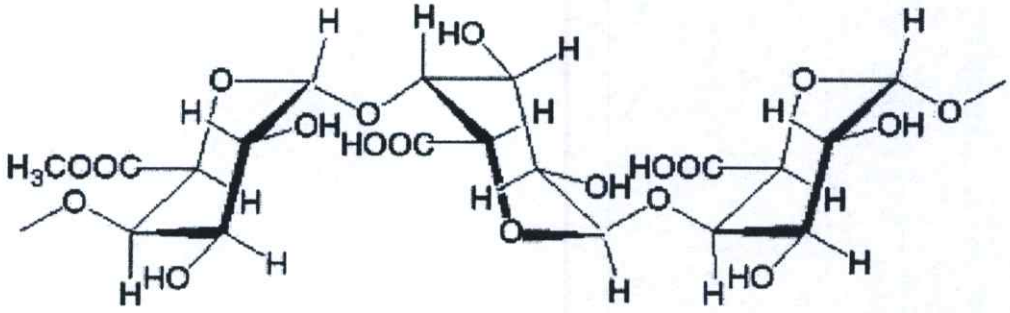
2.2.2.3 Plant tissue gums

กัมที่ได้จากเนื้อเยื่อพืชที่สำคัญ คือ เปคติน (Pectin) ซึ่งสกัดได้จากผลไม้ตระกูลส้ม เปคตินยังพบว่าเป็นส่วนประกอบในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล ฝรั่ง เป็นต้น

เปคติน (Pectin)

เปคติน (Pectin) มีลักษณะเป็นผงสีขาวถึงน้ำตาลอ่อน น้ำหนักโมเลกุลสูง ได้จากการตัดสายโซ่ของ Protopectin ที่อยู่ที่ผนังเซลล์ของเนื้อเยื่อของต้นไม้ (Plant tissue) ประกอบด้วยกลุ่มของพอลิแซคคาไรด์ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็น Polygalacturonic acid ที่หมู่กรดบางส่วนถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเมทิลเอสเทอร์ (Partially methylated) เมื่อผสมเปคตินกับน้ำจะได้สารละลายที่มีความหนืดและมีเสถียรภาพซึ่งจะเกิดเป็นเจลขึ้น

เปคตินเป็น Heteropolysaccharide ที่มีสายโซ่ตรงของ α-(1-4)-linked D-galacturonic acid (ประมาณ 65% โดยน้ำหนัก) เป็นสายหลักที่เรียกว่า Smooth regions และมีกิ่งแขนงหรือ Hair regions เป็นอะราบิโนส กาแลคโตส หรือแรมโนส บางส่วนของหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่ D-galacturonic acid จะเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) กับหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นเมทิลเอสเทอร์และมี Degree of methylation (DM) แตกต่างกัน ซึ่ง DM คืออัตราส่วนของหมู่ Methylated galacturonic acid ต่อหมู่ Galacturonic acid ทั้งหมดที่มีอยู่ในโมเลกุลของเปคติน ดังนั้นวัตถุดิบแต่ละแหล่งจะได้เปคตินที่มีโครงสร้างต่างกันและซับซ้อนมากเพราะมีค่า DM ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเปคตินชนิดเมทอกซิลต่ำ [23]

ชนิดของเปคตินสามารถแบ่งออกตามค่า DM ได้เป็น 2 ชนิดคือ

- **เปคตินชนิดเมทอกซิลต่ำ (Low methoxyl pectin, LM)** มีค่า DM น้อยกว่า 50% สามารถเกิดเจลโดยมีปริมาณของ Ca^{2+} สามารถละลายได้ที่ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 2.9-5.5 เจลที่ได้เป็นชนิดที่สามารถผันกลับได้ทางความร้อน (Thermoreversible) ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจะมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากกว่าเจลที่ได้จากเปคตินชนิด HM หรืออะการ์
- **เปคตินชนิดเมทอกซิลสูง (High methoxyl pectin, HM)** มีค่า DM มากกว่า 50% ใช้กับอาหารที่มี pH 2.0-3.5 เปคตินชนิดนี้ยังแบ่งย่อยออกเป็นอีก 3 ชนิด ตามเวลาที่ใช้ในการเกิดเจล (Gelling time) คือ เกิดเจลได้ช้า (Slow set), ปานกลาง (Medium set) และรวดเร็ว (Rapid set) ซึ่งจะแตกต่างกันที่ค่า DM เช่น ชนิดที่เกิดเจลได้ช้าจะมีค่า DM ประมาณ 60% และชนิดที่เกิดเจลได้เร็วมีค่า DM ประมาณ 75%

เปคตินที่สกัดได้จากธรรมชาติจะเป็นชนิด HM ซึ่งมีค่า DM สูงถึง 75% เมื่อนำมาทำให้เกิดปฏิกิริยา Deesterification จะได้เปคตินชนิด LM เปคตินทั้งชนิด LM และ HM จะมีสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน

การนำเปคตินมาใช้ประโยชน์ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร เปคตินนิยมใช้ในอาหารประเภทแยม, เยลลี่, Bakery filling, Fruit topping, เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ เช่น

- การเติมเปคตินชนิด LM จำนวนเล็กน้อยลงในโยเกิร์ตจะช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อของโยเกิร์ตให้ดีขึ้น
- สำหรับน้ำผลไม้เข้มข้นจะเติมเปคตินชนิด HM เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอนุภาคของเนื้อผลไม้ ทำให้อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอน
- ในน้ำผลไม้ผงสำเร็จรูปจะมีการเติมเปคตินชนิด HM ลงไปเพื่อให้เกิดความรู้สึกเหมือนน้ำผลไม้ธรรมชาติขณะดื่ม
- ในผลิตภัณฑ์เบเกอร์รี เช่น แยมที่นำมาเติมในทาร์ตจะให้ลักษณะผิวเรียบเป็นเงาหลังจากอบและทนต่อการอบ

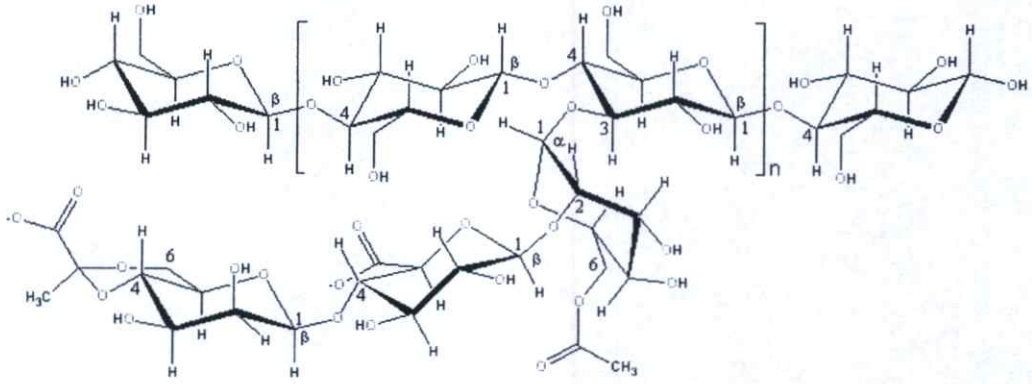
2.2.3 Microbial Gum

กัมที่มีแหล่งที่มาจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1822 สารที่สกัดได้คือ Dextrans ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 50,000-100,000 ได้จากการหมักกลูโคสด้วยแบคทีเรีย ในช่วงปี 1950-1960 ได้เริ่มการผลิตกัมที่มาจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Microbial gum) ในระดับอุตสาหกรรม คือ กัมแซนแทน (Xanthan gum)

กัมแซนแทน (Xanthan gum)

กัมแซนแทน (Xanthan gum) เป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในอาหารและเป็นสารที่ช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลได้ เป็นกัมที่ได้จากการหมักน้ำตาลกลูโคสหรือซูโครสด้วยเชื้อแบคทีเรียบริสุทธิ์ คือ Xanthomonas campestris หลังจากกระบวนการหมักแล้วนำมาตกตะกอนด้วยไอโซโพรพิลอัลกอฮอล์แยกเอากัมแซนแทนออกมาทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียด

กัมแซนแทนเป็น Heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยกลูโคส, แมนโนส และ Glucuronic acid ในอัตราส่วน 2.8:3:2 มีหมู่อะซิทิลประมาณ 4.7% และกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) ประมาณ 3% โครงสร้างทางเคมีของกัมแซนแทนนั้นมีสายโซ่หลักเป็นกลูโคสซึ่งเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่ง 1,4 β-D-glucose โดยมีสายโซ่ข้างเคียงต่ออยู่ที่ตำแหน่งที่ 1,3 เป็นไตรแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย α-D-mannose ซึ่งมีหมู่อะซิทิลในโครงสร้างที่ตำแหน่งที่ 6, β-D-glucuronic และ terminal β-D-mannose



รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของกัมแซนแทน [24]

กัมแซนแทนละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สารละลายของกัมแซนแทนที่มีสารที่มีสมบัตินำไฟฟ้า (Electrolyte) ผสมอยู่เล็กน้อย มีสมบัติในการรักษาเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ที่ดีมากและมีความหนืดคงที่ในช่วงอุณหภูมิ –18°C ถึง 80°C และความหนืดคงที่ในช่วง pH 1-11 นอกจากนั้นสารละลายกัมแซนแทนยังมีสมบัติเป็นซูโดพลาสติก (Pseudo plastic) คือ ความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่อมีแรงเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร

กัมแซนแทนนำไปใช้ประโยชน์ในหลากหลายอุตสาหกรรม โดยหลักๆ ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว และทำให้อนุภาคแขวนลอยได้ดี อาทิเช่น

- ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ช่วยให้อนุภาคต่างๆ แขวนลอยได้ดีและช่วยให้เกิดเป็นครีม ซึ่งส่วนใหญ่พบได้ในน้ำสลัดและซอส รวมทั้งไอศครีม นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอาหารแช่แข็งและเครื่องดื่มด้วย
- นำกัมแซนแทนไปใส่ในยาสีฟันเพื่อใช้เป็นตัวประสาน (Binder) ช่วยให้ไม่เสียรูป

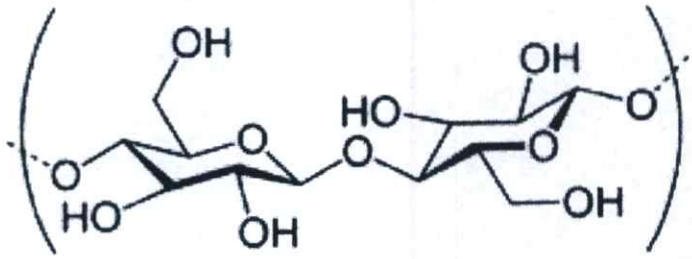
- ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ การเติมกัมแซนแทนช่วยให้หยดน้ำมันสามารถคงตัวอยู่ในระบบอิมัลชันแบบน้ำมันในน้ำได้
- ในอุตสาหกรรมขุดเจาะน้ำมัน ใช้กัมแซนแทนในปริมาณมากเพื่อใช้เป็น Thicken drilling fluids ซึ่งช่วยให้นำของแข็งที่เจาะได้กลับขึ้นมาที่พื้นผิวได้ง่ายขึ้น
- ในงานก่อสร้าง ใช้กัมแซนแทนผสมกับคอนกรีตที่จะเทใต้น้ำเพื่อให้คอนกรีตมีความหนืดสูงขึ้นและป้องกันการกัดเซาะ

2.3 เซลลูโลสและเซลลูโลสอีเทอร์ (Cellulose and Cellulose ether) [19]

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่พบมากที่สุดในโลก เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose) ซึ่งเหมือนกับแป้งและไกลโคเจน อาจจะมีค่าองศาการพอลิเมอไรซ์ (DP) ถึง 3,500 แต่โครงสร้างของหน่วยแอนไฮโดร-กลูโคสที่ต่อกันจะเป็นแบบ 1,4-β-linkage ซึ่งทำให้เซลลูโลสมีสมบัติแตกต่างกับแป้งและไกลโคเจน

เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงโดยที่สายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบ Fully extended chains ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนมีผลทำให้เกิดโครงสร้างผลึกขึ้น ดังนั้นเซลลูโลสจะไม่ละลายในน้ำและเป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับเป็นสารเสริมแรง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งพบว่าเซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงกว่าแป้งมาก



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเซลลูโลส [25]

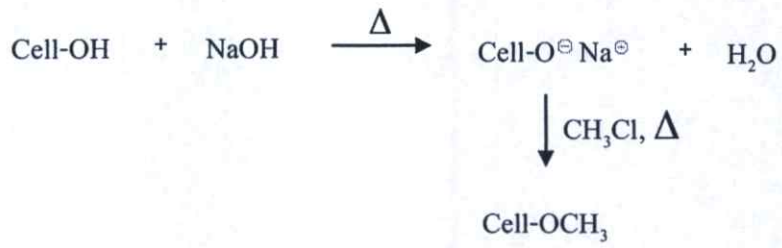
2.3.2 เซลลูโลสอีเทอร์ (Cellulose Ethers)

เซลลูโลสอีเทอร์ได้จากการนำอัลคาไลน์เซลลูโลสมาทำปฏิกิริยากับอัลคิลเฮไลด์ เช่น เมทิลคลอไรด์ ตัวอย่างของเซลลูโลสอีเทอร์ เช่น เมทิลเซลลูโลส, เอทิลเซลลูโลส, ไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส, อะมิโนเอทิลเซลลูโลส, คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นต้น

2.3.2.1 เมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose: MC)

เมทิลเซลลูโลสเตรียมขึ้นครั้งแรกเมื่อปี 1905 เริ่มผลิตในระดับอุตสาหกรรมในปี 1938 สามารถละลายน้ำได้ (Water-soluble cellulose ethers) รวมทั้งละลายในน้ำเย็นได้ด้วยเมทิลเซลลูโลสมีองศาการแทนที่ประมาณ 1.6-1.8

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



การนำไปใช้ประโยชน์

- ผสมในดินเพื่อช่วยในการขึ้นรูปของเครื่องปั้นดินเผา ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก
- ผสมในซีเมนต์, กระเบื้องมุงหลังคา, กระเบื้องยิปซัม, ปูน
- ในยาสระผม, โลชั่น ใช้เป็นสารเพิ่มความข้นและอิมัลซิไฟเออร์
- ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ ใช้เป็นตัวประสานในยาเม็ด
- ใช้เติมในปฏิกิริยาการเตรียมพอลิเมอร์แบบแขวนลอยของไวนิลคลอไรด์ เพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมการกระจายตัวของขนาดของอนุภาค

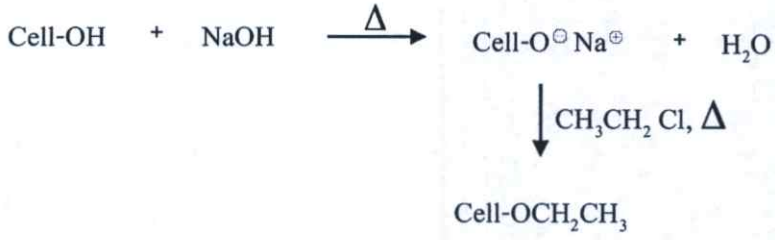
2.3.2.2 เอทิลเซลลูโลส (Ethylcellulose)

สมบัติของเอทิลเซลลูโลสจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล องศาการแทนที่ของหมู่เอทอกซี ความสัมพันธ์ระหว่างค่าองศาการแทนที่กับสมบัติการละลายแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าองศาการแทนที่ของเอทิลเซลลูโลสต่อสมบัติการละลาย

ค่าองศาการแทนที่ (DS)	การละลาย
~0.5	โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 4-8%
0.8-1.3	น้ำ
1.4-1.8	บวมตัวในตัวทำละลายผสมระหว่างตัวทำละลายมีขั้วและไม่มีขั้ว
1.8-2.2	อัลกอฮอล์ และตัวทำละลายที่มีขั้วต่ำ
2.4-2.5	ในตัวทำละลายที่หลากหลาย
2.5-2.8	เฉพาะในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

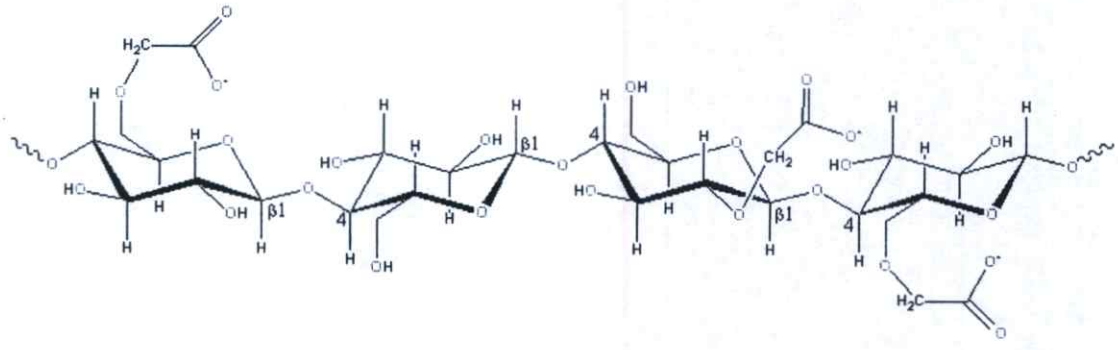


การนำไปใช้ประโยชน์

- ในอุตสาหกรรมสี รวมทั้งพวกวานิช แลคเกอร์
- ใช้เคลือบพวกมือจับ ลูกบิดประตู

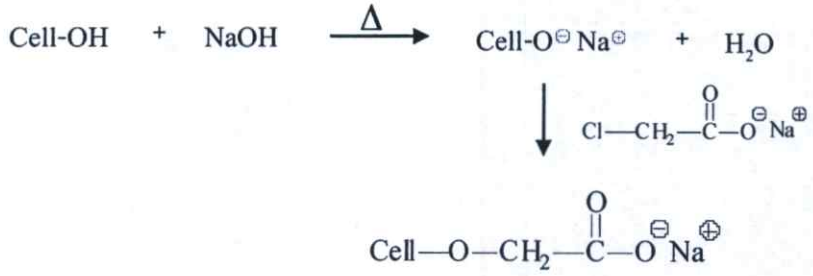
2.3.2.3 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสประเภทหนึ่งที่เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้าง โดยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างของเซลลูโลสถูกแทนที่ด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิล ($-OCH_2COOH$) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นของแข็ง สีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตราย ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถละลายน้ำได้หากอยู่ในรูปของเกลือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเกลือ เช่น เกลือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose salt) อาจมีชื่อเรียกว่า Cellulose gum หรือ Sodium cellulose glycolate จัดอยู่ในพวก Anionic cellulose ether คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผลิตในเชิงการค้าโดยทั่วไปจะมีค่าองศาการแทนที่ประมาณ 0.4-1.5 ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ในขณะที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีค่าองศาการแทนที่ 0.1-0.3 จะละลายน้ำได้ไม่ดี คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบ่งออกเป็นเกรดต่างๆ ตามการนำไปใช้ประโยชน์ซึ่งการแบ่งเกรดของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสขึ้นกับค่าองศาการแทนที่ ความสม่ำเสมอของหมู่แทนที่ องศาการเกิดพอลิเมอร์ และองศาความบริสุทธิ์



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [26]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



และมีปฏิกิริยาข้างเคียงดังนี้

การนำไปใช้ประโยชน์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติเป็นสารเพิ่มความหนืดที่ช่วยในการยึดเกาะและเป็นสารคงสภาพ สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิ

- ใช้เป็นสารให้ความหนืดในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ไอศครีม
- ใช้เป็นสารเคลือบผิวแคปซูลยาหรือสารก่อให้เกิดเจลทางด้านเภสัชกรรม
- ส่วนผสมในผงซักฟอก เป็น Antiredeposition agent ป้องกันสิ่งสกปรกไม่ให้กลับเข้ามาเกาะเนื้อผ้าระหว่างการซักล้าง
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้ผสมในสีพิมพ์ผ้าให้มีเนื้อข้น เพื่อเคลือบเนื้อผ้า ซึ่งช่วยให้ผ้าไม่สกปรกง่ายและช่วยให้สามารถล้างสิ่งสกปรกออกได้ง่าย เคลือบเส้นใยทำให้เส้นใยลื่นและทนต่อแรงดึงรวมทั้งแรงเสียดทานในระหว่างการทอผ้า
- อุตสาหกรรมอาหารและยา
  - ใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเกรดที่มีความบริสุทธิ์สูงใส่ในไอศครีม ช่วยในการคงรูปของไอศครีม
  - เป็นสารช่วยป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลในอาหารประเภทน้ำเชื่อม
  - เป็นส่วนผสมในอาหารแห้งประเภทผงเพื่อช่วยในการละลายเป็นตัวประสาน
  - สารปรับความหนืดในอาหารพวก เยลลี สังขยา และขนมพุดดิง
  - สารป้องกันการเกิดคอลลอยด์ ช่วยให้อาหารจำพวกครีมไม่ตกตะกอนหรือแยกเป็นสองชั้นเมื่อเก็บไว้นาน เป็นส่วนผสมในการทำเค้ก เพื่อช่วยให้เค้กฟูและเก็บได้นาน
  - อาหารลดความอ้วน (Low-calories food products) เนื่องจากร่างกายไม่สามารถย่อยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้
  - สารข้นในยาประเภทครีมตัวประสานในยาเม็ด

- อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เป็น Sizing agent
- อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์เป็นสารข้นและสารป้องกันการเกิดคอลลอยด์ใน ผลิตภัณฑ์พวกครีมทามือ ยาสีฟัน
- ในสารยึดติด (Adhesives) ใช้เป็นตัวปรับความหนืด
- เซรามิก ใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นตัวประสานในการผสมเพื่อให้เนื้อดินและส่วนผสมอื่นรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น
- อุตสาหกรรมสี ใช้เป็นสารป้องกันการเกิดคอลลอยด์ในสีอิมัลชัน
- สารหล่อลื่นในการขุดเจาะน้ำมัน (Drilling Colloid)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pourjavadi, A. และคณะ (2006) [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมไฮโดรเจลที่เป็นตัวดูดซับยิ่งยวดโดยใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมด ซึ่งพอลิแซคคาไรด์ที่ใช้คือโซเดียมอัลจิเนต (Na-Alg) และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) โดยใช้เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (MBA) เป็นสารเชื่อมโยงและใช้แอมโมเนียมซัลเฟต (APS) เป็นตัวริเริ่ม แล้วทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะด้วย FT-IR และ SEM จากการทดลอง พบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมที่อุณหภูมิ 85°C และมีอัตราส่วน Na-Alg : Na-CMC เท่ากับ 0.54 สามารถดูดซับน้ำได้ดีที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณของ MBA และ APS ทำให้การดูดซับน้ำลดลง ส่วนการดูดซับในสารละลายเกลือ พบว่าความสามารถในการบวมตัวในสารละลายเกลือเป็นดังนี้ $NaCl > CaCl_2 > AlCl_3$

Nie, H. Liu และคณะ (2004) [6] ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยในการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลสและพฤติกรรมการย่อยสลายของไฮโดรเจลในดิน ซึ่งเตรียมไฮโดรเจลโดยการเชื่อม-โยงโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) ด้วยอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) พร้อมใส่สารฆ่าเชื้อและสารอาหารไว้ภายในด้วย จากนั้นทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน จากการทดลอง พบว่าปริมาณของสารฆ่าเชื้อ สารอาหารและประเภทของดินที่ต่างกันมีผลต่อการย่อยสลายของไฮโดรเจล ซึ่งไฮโดรเจลจะย่อยสลายได้ดีในดินทราย นอกจากนี้อัตราส่วนของ $AlCl_3$ ต่อ Na-CMC มีผลต่อการย่อยสลายในดินด้วย โดยพบว่าที่อัตราส่วน $AlCl_3$: Na-CMC เท่ากับ 0.13 สามารถย่อยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิห้อง

George, M. และ Abraham, T.E. (2007) [7] ได้ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและกัวร์กัม ที่มีความว่องไวต่อค่า pH ที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้กลูตารอลดีไฮด์ความเข้มข้น 0.25, 0.3, 0.4 และ 0.5% โดยน้ำหนัก เป็นสารเชื่อมโยง ซึ่งจะเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสารตั้งต้นทั้งสองเข้าด้วยกัน ไฮโดรเจลที่ได้ถูกนำมาทำเป็นเม็ด โดยหยดสารละลายผสมของอัลจิเนตและกัวร์กัมลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ เมื่อล้างและทำเม็ดไฮโดรเจลให้แห้งแล้ว นำไปทดสอบการบวมตัวในสารละลายที่มี pH 1.2 และ 7.4 การบวมตัวของไฮโดรเจลขึ้นกับความเข้มข้นของกลูตารอลดีไฮด์ อัตราส่วนระหว่างอัลจิเนตต่อกัวร์กัม และค่า pH จากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์เข้มข้น 0.3% โดยน้ำหนัก มีการบวมตัวดีที่สุดทั้ง pH 1.2 และ 7.4 แต่อัตราส่วนระหว่างอัลจิเนตต่อกัวร์กัมที่บวมตัวดีที่สุดในแต่ละค่า pH ต่างกัน

Gliko-Kabir, I. และคณะ (1999) [27] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางความร้อนของกัวร์กัมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์เข้มข้น 25% โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ที่อุณหภูมิ 50-500°C และ Thermogravimetric analysis (TGA) ที่อุณหภูมิ 70-600°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าเมื่อปริมาณของกลูตารอลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มสูงขึ้นและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น

Barbucci, R. และคณะ (2008) [28] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมในการไหลและการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมจากการเชื่อมโยงกัวร์กัมด้วย PEGDGE (Polyethylene glycol diglycidyl ether) ในสารละลายด่าง ในการศึกษาพฤติกรรมการไหล พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ทำให้ความหนืดของไฮโดรเจลลดลง ส่วนการบวมตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ค่า pH 2, 4, 5, 9, และ 11 พบว่าหลังจากผ่านไปสี่วัน ไฮโดรเจลสามารถบวมตัวได้ดีที่สุดเมื่อมีค่า pH เท่ากับ 4

Coviello, T และคณะ (2005) [29] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมโดยการเชื่อมโยง Scleroglucan ด้วยบอแร็ก ไฮโดรเจลเตรียมโดยการละลาย Scleroglucan ในน้ำกลั่น 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายบอแร็กเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ลงไป แล้วทิ้งไว้ข้ามคืนเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง ในการทดสอบการบวมตัวของเจลที่มีรูปร่างเป็นเม็ดซึ่งใช้เทคนิค Freeze-dried ในการทำให้เจลแข็งได้ทรงที่ต้องการ พบว่าเจลมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 18 เท่าของน้ำหนักเจลแห้งและมีทิศทางการบวมตัวเป็นแบบไม่สมมาตร โดยบวมตัวในแนวยาวเท่านั้น ไม่บวมตัวในแนวรัศมี

Rasool, N. และคณะ (2010) [30] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์และตรวจวิเคราะห์ไฮโดรเจลที่ว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH, Ionic strength และอุณหภูมิ ซึ่งไฮโดรเจลนี้เตรียมจากการเชื่อมโยงคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับกรดอะคริลิกด้วยไวนิลไทรเอทอกซีไซเลน (Vinyltriethoxy silane: VTESi) โดยมีโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มที่อุณหภูมิ 60°C แล้วล้างชิ้นงานด้วยน้ำกลั่น และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50°C ภายใต้สุญญากาศ จากนั้นนำไปทดสอบการบวมตัวที่สภาวะต่างๆ โดยใช้เจลแห้งหนัก 50 กรัม แช่ลงในสารละลาย 100 มิลลิลิตร พบว่าเมื่อค่า pH และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เจลมีแนวโน้มที่จะบวมตัวได้มากขึ้น แต่หากความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงและ Ionic strength มีค่าเพิ่มขึ้น เจลมีแนวโน้มที่จะบวมตัวได้น้อยลง

Zhang, K. และคณะ (2007) [31] ได้เตรียมไฮโดรเจลจากเมทาคริลิกแอซิด (Methacrylic acid: MAA) กับอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile: AN) โดยใช้ N,N-methylenebisacrylamide เป็นสารเชื่อมโยง นำไฮโดรเจลที่ได้ไปศึกษาโครงสร้างและสัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่อง FT-IR และ SEM และวิเคราะห์หาปริมาณน้ำอิสระ (Free water) และน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่พอลิเมอร์ (Bound water) ด้วยเครื่อง DSC และศึกษาผลของ pH และ Ionic strength ที่มีต่อการบวมตัวของไฮโดรเจลโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 1.4 และ 7.4 ในการศึกษา พบว่าการบวมตัวของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น แต่การบวมตัวลดลงเมื่อค่า Ionic strength เพิ่มขึ้น

บทที่ 3
การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 สารเคมี

1. กัวร์กัม (Guar gum: GG) บริษัท รวมเคมี จำกัด เกรดการค้า
2. โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate: Na-Alg) บริษัท รวมเคมี จำกัด เกรดการค้า น้ำหนักโมเลกุล 400,000 กรัม/โมล
3. โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymathylcellulose salt: Na-CMC) บริษัท Sigma-Aldrich จำกัด เกรดวิเคราะห์ น้ำหนักโมเลกุล 90,000 กรัม/โมล องศาการแทนที่ 0.65 – 0.90
4. โซเดียมเททระบอเรต (Sodium tetraborate: $Na[B_4O_5(OH)].8H_2O$) บริษัท RFCL จำกัด เกรดวิเคราะห์
5. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride: NaCl) บริษัท CARLO ERBA จำกัด เกรดวิเคราะห์
6. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride: $CaCl_2$) บริษัท UNILAB จำกัด เกรดวิเคราะห์
7. ไฮโดรคลอริก (Hydrochloric: HCl) บริษัท CARLO ERBA จำกัด เกรดวิเคราะห์
8. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide: NaOH) บริษัท RFCL จำกัด เกรดวิเคราะห์

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นกวนแบบแม่เหล็ก บริษัท IKA จำกัด รุ่น HS-5
2. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific จำกัด รุ่น Isotemp
3. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument จำกัด รุ่น SI-234
4. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว
5. ตะแกรงลวดความละเอียด 400 เมช

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายตั้งต้น

3.3.1 การเตรียมสารละลายเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ชั่งโซเดียมคลอไรด์ 5.58 กรัม, 14.625 กรัม และ 29.25 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรสารละลายจนได้ปริมาตร 1 ลิตรได้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ตามลำดับ

3.3.2 การเตรียมสารละลายเกลือแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)

ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ 11.1 กรัม และ 27.75 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรสารละลายจนได้ปริมาตร 1 ลิตร ได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์

3.3.3 การเตรียมสารละลายไฮโดรคลอริก (HCl)

ปิเปตสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% มา 8.3 ไมโครลิตร เจือจางในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรจนได้สารละลาย 1 ลิตร ได้สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

3.3.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 200 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรสารละลายจนได้ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ จากนั้น นำสารละลายดังกล่าวมาเจือจางให้ได้สารละลายเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เจือจางในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร

3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล

3.4.1 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

1. ชั่งโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม ตามตารางที่ 3.1 และ 3.2
2. ผสมโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัมเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 น้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C
4. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรตลงในสารละลายในข้อ 3 จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของสารละลายดังตารางที่ 3.1 และ 3.2
5. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60°C
6. ชะเจลที่ได้ด้วยน้ำกลั่น
7. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
8. บดให้ละเอียด

โดยสัญลักษณ์ของสูตรไฮโดรเจลแสดงดังนี้

- A4G6-6 คือ โซเดียมอัลจิเนต 40 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงด้วยบอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- C4G6-6 คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 40 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงด้วยบอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- A1C3G6-6 คือ โซเดียมอัลจิเนต 10 ส่วน ต่อโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 30 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

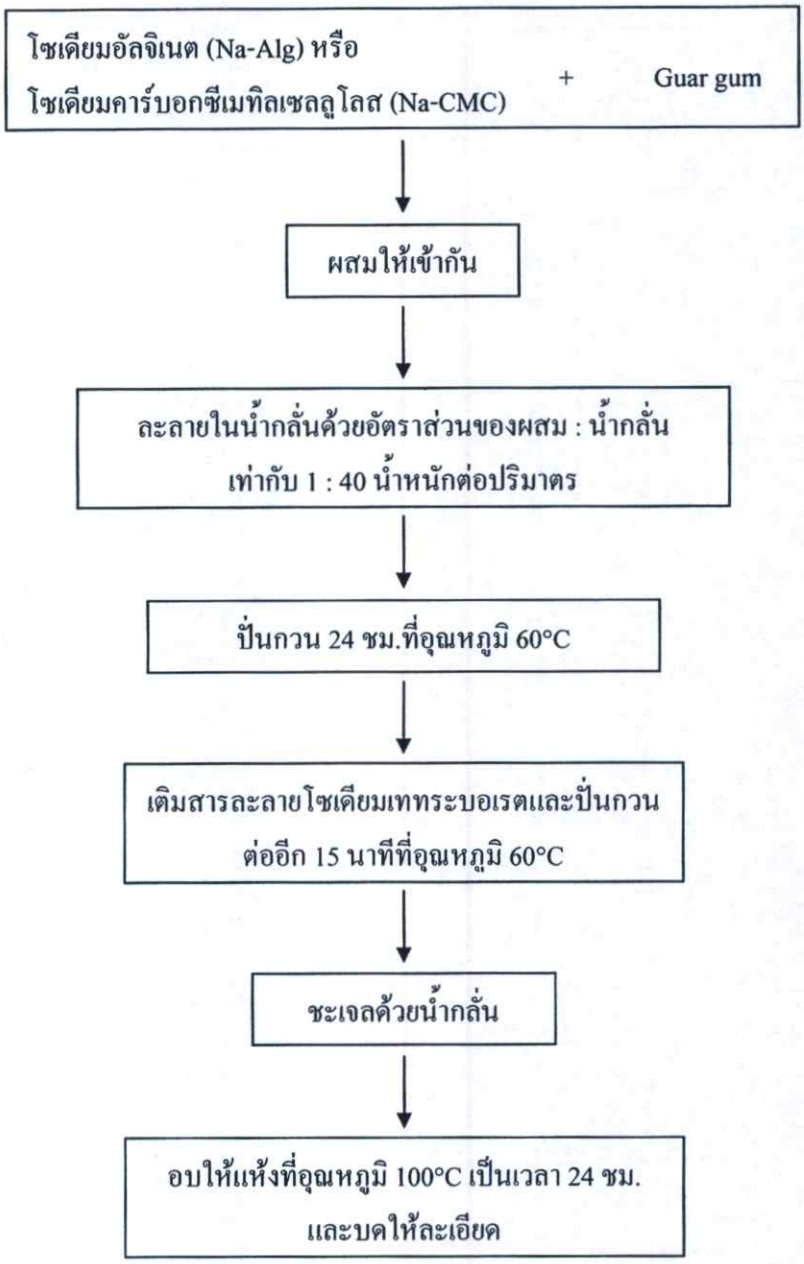
สำหรับไฮโดรเจลสูตรอื่นๆ ใช้สัญลักษณ์ในลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัมแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

สูตร	องค์ประกอบ (%)		ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)
	Na-Alg	Guar gum	
A2G8-10	20	80	1.0
A4G6-10	40	60	
A6G4-10	60	40	
A8G2-10	80	20	
A2G8-6	20	80	0.6
A4G6-6	40	60	
A6G4-6	60	40	
A8G2-6	80	20	
A2G8-2	20	80	0.2
A4G6-2	40	60	
A6G4-2	60	40	
A8G2-2	80	20	

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกัวร์กัมแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

สูตร	องค์ประกอบ (%)		ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)
	Na-CMC	Guar gum	
C2G8-10	20	80	1.0
C4G6-10	40	60	
C6G4-10	60	40	
C8G2-10	80	20	
C2G8-6	20	80	0.6
C4G6-6	40	60	
C6G4-6	60	40	
C8G2-6	80	20	
C2G8-2	20	80	0.2
C4G6-2	40	60	
C6G4-2	60	40	
C8G2-2	80	20	



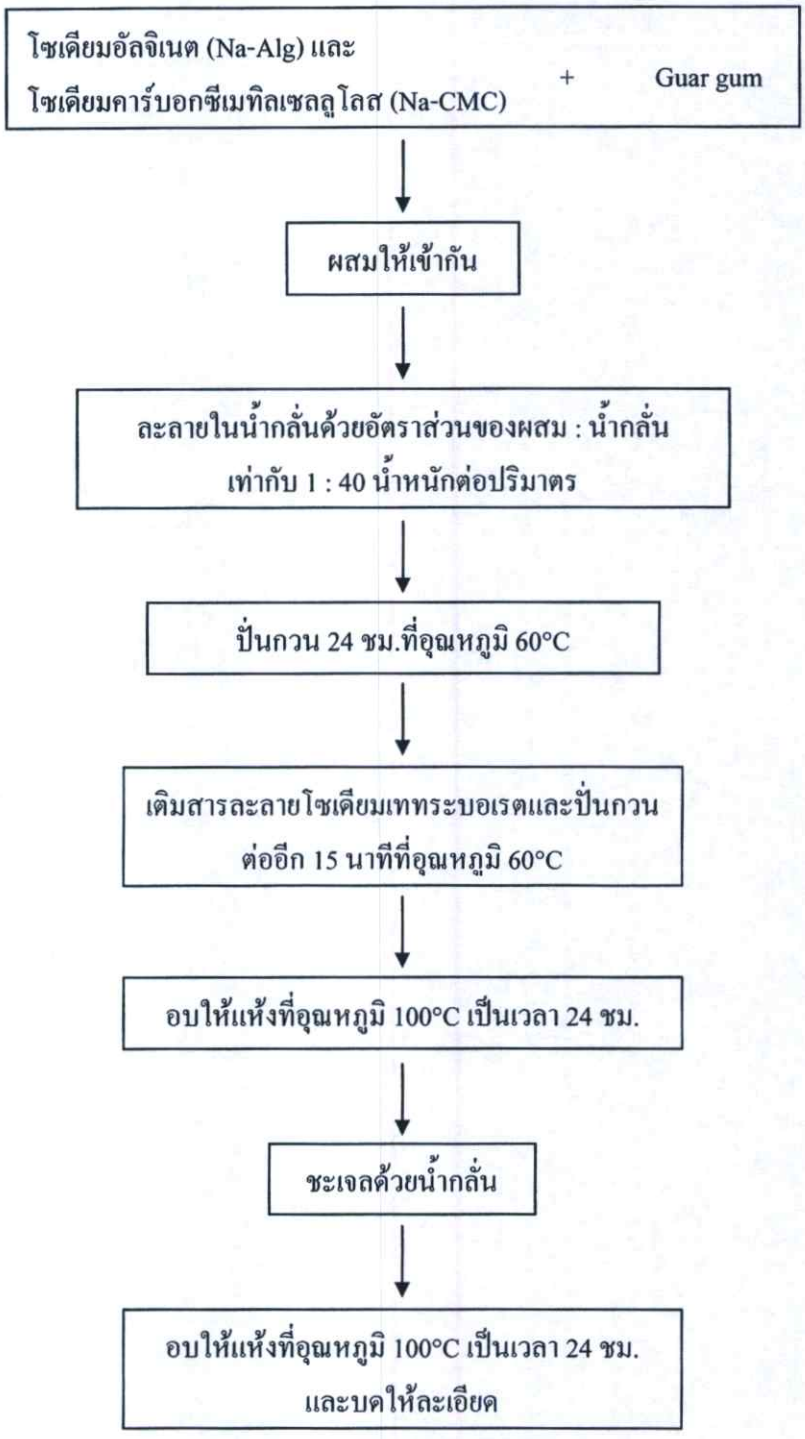
รูปที่ 3.1 แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

3.4.2 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบการเชื่อมโยงกลไกเดียว

1. เลือกสูตรที่บวมตัวในน้ำกลั่นได้ดีจากตอนที่ 3.4.1
2. ชั่งโซเดียมอัลจิเนต, โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม ตามตารางที่ 3.3
3. ผสมโซเดียมอัลจิเนต, โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม เข้าด้วยกัน
4. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 น้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C
5. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรต ลงในสารละลายในข้อ 4 จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของสารละลายดังตารางที่ 3.3
6. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60°C
7. ชะเจลที่ได้ด้วยน้ำกลั่น
8. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
9. บดให้ละเอียด

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

สูตร	องค์ประกอบ (%)			ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)
	Na-Alg	Na-CMC	Guar gum	
A1C5G4-10	10	50	40	1.0
A5C1G4-10	50	10	40	
A1C3G6-10	10	30	60	
A3C1G6-10	30	10	60	
A1C5G4-6	10	50	40	0.6
A5C1G4-6	50	10	40	
A1C3G6-6	10	30	60	
A3C1G6-6	30	10	60	



รูปที่ 3.2 แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

3.4.3 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก

1. เลือกสูตรที่บวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายเกลือได้ดีจากตอนที่ 3.4.1
2. ชั่งโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม ตามตารางที่ 3.4
3. ผสมโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือโซเดียมอัลจิเนต และกัวร์กัม เข้าด้วยกัน
4. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 น้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C
5. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรต ลงในสารละลายในข้อ 4 จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของสารละลายดังตารางที่ 3.4
6. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60°C
7. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบดละเอียด
8. นำเจลแห้งที่บดละเอียดแล้ว แช่ลงในสารละลาย $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที แล้วชะเจลที่ได้ด้วยน้ำกลั่น
9. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
10. บดให้ละเอียด

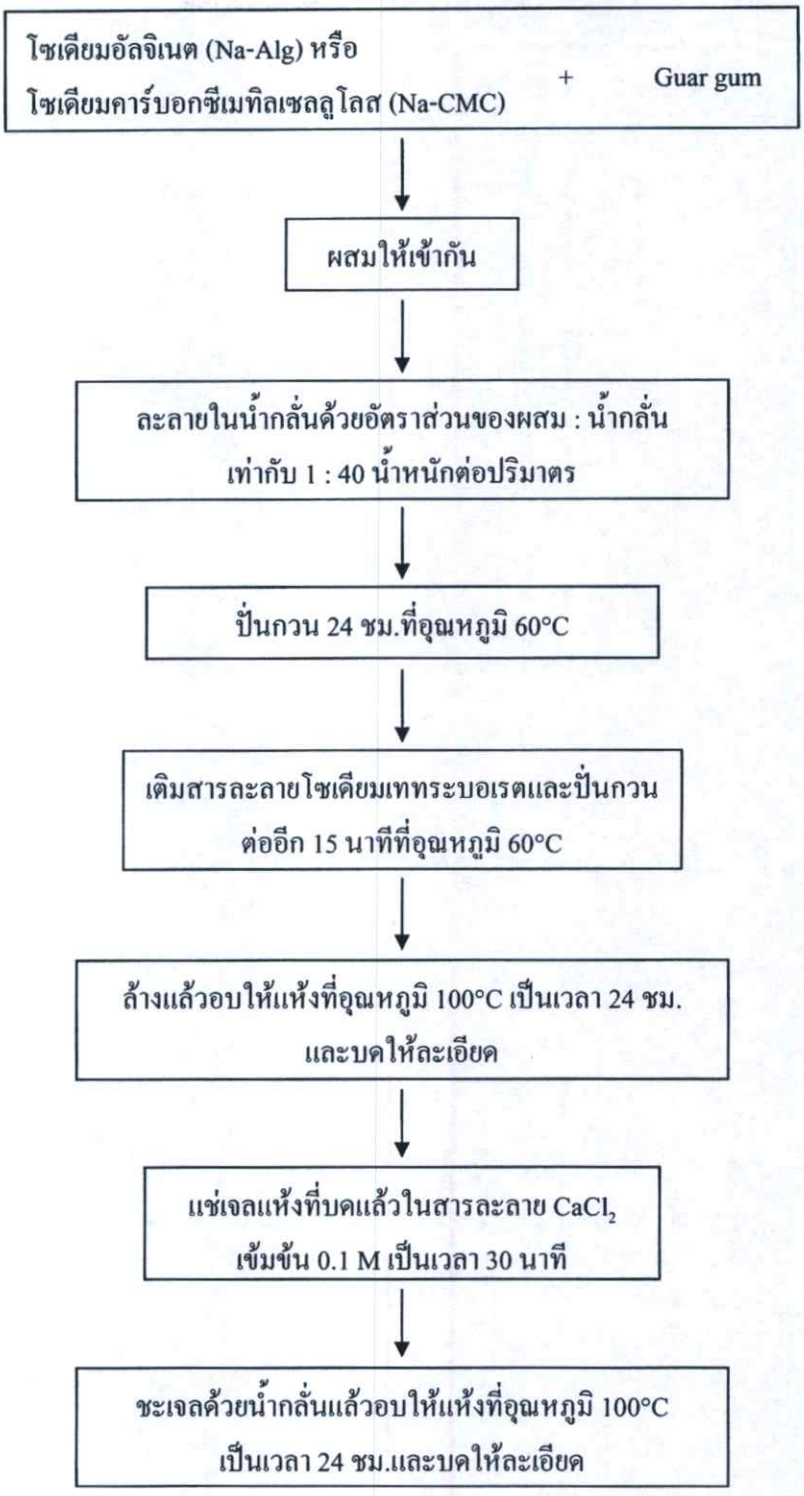
โดยสัญลักษณ์ของสูตรไฮโดรเจลแสดงดังนี้

- C4G6-6Ca คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 40 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วยแคลเซียมคลอไรด์
- A1C3G6-6Ca คือ โซเดียมอัลจิเนต 10 ส่วน ต่อโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 30 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วยแคลเซียมคลอไรด์

สำหรับไฮโดรเจลสูตรอื่นๆ ใช้สัญลักษณ์ในลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก

สูตร	องค์ประกอบ (%)			ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)
	Na-Alg	Na-CMC	Guar gum	
A2G8-10Ca	20	-	80	1.0
A4G6-10Ca	40	-	60	
C2G8-10Ca	-	20	80	
C4G6-10Ca	-	40	60	
A2G8-6Ca	20	-	80	0.6
A4G6-6Ca	40	-	60	
C2G8-6Ca	-	20	80	
C4G6-6Ca	-	40	60	



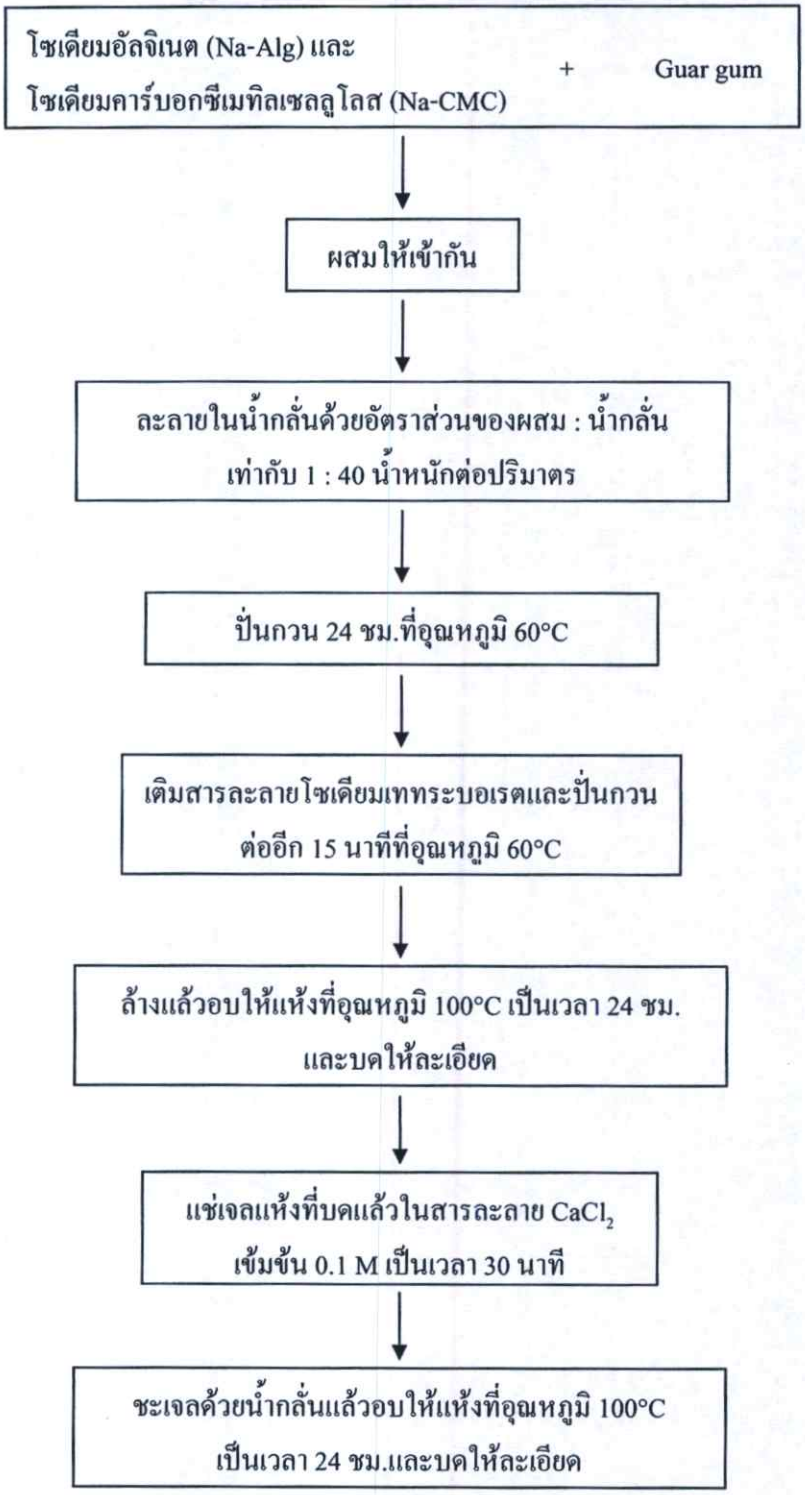
รูปที่ 3.3 แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก

3.4.4 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก

1. เลือกสูตรที่บวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายเกลือได้ดีจากตอนที่ 3.4.1
2. ชั่งโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม ตามตารางที่ 3.5
3. ผสมโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม เข้าด้วยกัน
4. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 น้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C
5. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรต ลงในสารละลายในข้อ 4 จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของสารละลายดังตารางที่ 3.5
6. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60°C
7. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบดละเอียด
8. นำเจลแห้งที่บดละเอียดแล้ว แช่ลงในสารละลาย $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 30 นาที แล้วชะเจลที่ได้ด้วยน้ำกลั่น
9. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
10. บดให้ละเอียด

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก

สูตร	องค์ประกอบ (%)			ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)
	Na-Alg	Na-CMC	Guar gum	
A1C5G4-10Ca	10	50	40	1.0
A5C1G4-10Ca	50	10	40	
A1C3G6-10Ca	10	30	60	
A3C1G6-10Ca	30	10	60	
A1C5G4-6Ca	10	50	40	0.6
A5C1G4-6Ca	50	10	40	
A1C3G6-6Ca	10	30	60	
A3C1G6-6Ca	30	10	60	



รูปที่ 3.4 แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก

3.5 การทดสอบการบวมตัว

3.5.1 การทดสอบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่ pH 7 อุณหภูมิต่าง ๆ

1. ชั่งไฮโดรเจลแห้งที่บดแล้ว หนัก 50 ± 0.3 มิลลิกรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
2. ห่อด้วยตะแกรงลวดความละเอียด 400 เมช ขนาด 2.0 x 2.5 x 1.0 cm^3
3. แช่ตะแกรงลวดที่มีไฮโดรเจลอยู่ภายในลงในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อไปนี้
   - น้ำกลั่น pH 7 อุณหภูมิ 23°C
   - น้ำกลั่น pH 7 อุณหภูมิ 37°C
4. นำขึ้นมาที่เวลาต่างๆ ดังต่อไปนี้ แล้วซับน้ำรอบตะแกรงลวดก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก
   - 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90 และ 120 นาที สำหรับสูตรที่เชื่อมโยงกลไกเดียว
   - 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที สำหรับสูตรที่เชื่อมโยงสองกลไก
5. คำนวณหาค่าการบวมตัว ดังนี้

$$\text{การบวมตัว (เท่า)} = \frac{\text{น้ำหนักของเจลที่บวมตัว} - \text{น้ำหนักเจลแห้ง}}{\text{น้ำหนักเจลแห้ง}}$$

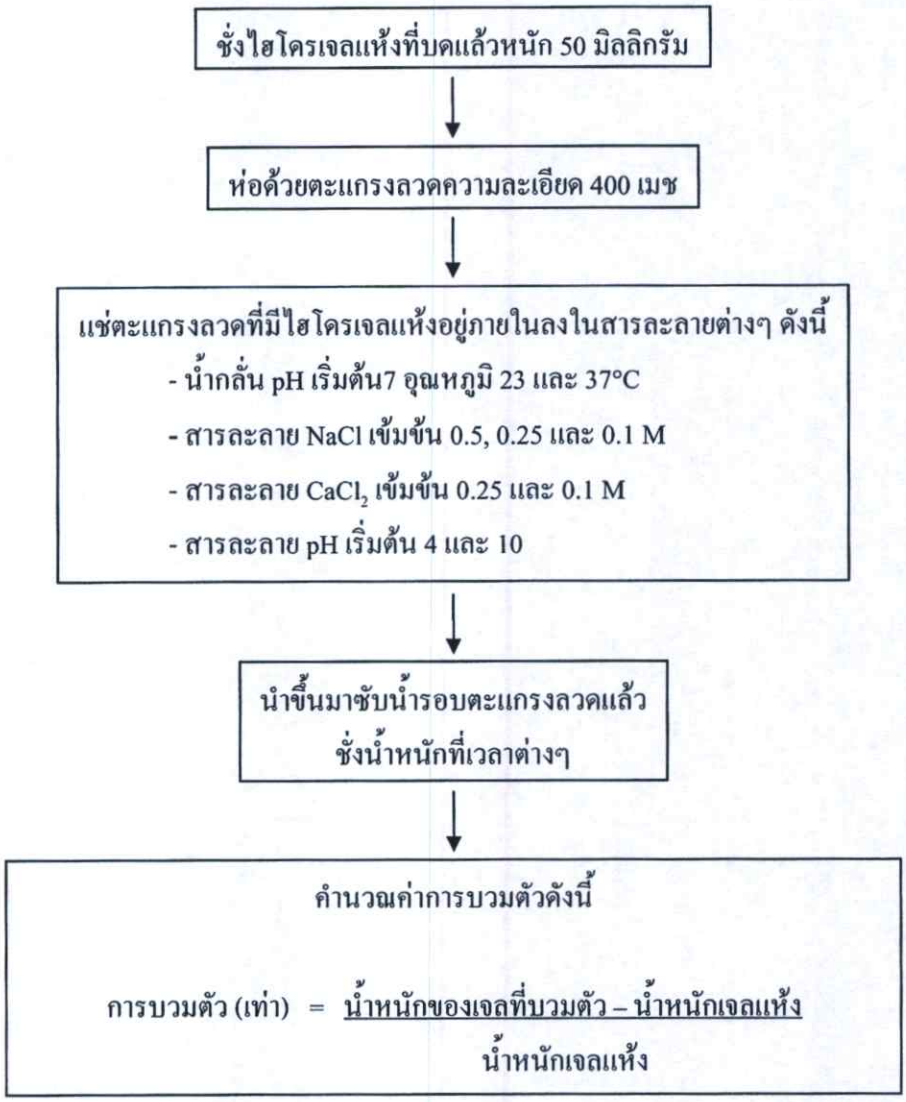
3.5.2 การทดสอบการบวมตัวในสารละลายเกลือต่าง ๆ

1. เลือกไฮโดรเจลที่บวมตัวในน้ำกลั่นได้ดี
2. ชั่งไฮโดรเจลแห้งที่บดแล้ว หนัก 50 ± 0.3 มิลลิกรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
3. ห่อด้วยตะแกรงลวดความละเอียด 400 เมช ขนาด 2.0 x 2.5 x 1.0 cm^3
4. แช่ตะแกรงลวดที่มีไฮโดรเจลอยู่ภายในลงในสารละลายต่อไปนี้
   - สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 0.25 และ 0.5 โมลาร์
   - สารละลาย $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์
5. นำขึ้นมาที่เวลา 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 และ 300 นาที แล้วซับน้ำรอบตะแกรงลวดก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก
6. คำนวณหาค่าการบวมตัว

3.5.3 การทดสอบการบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 4 และ 10

1. เลือกไฮโดรเจลที่บวมตัวในน้ำกลั่นได้ดี
2. ชั่งไฮโดรเจลแห้งที่บดแล้ว หนัก 50 ± 0.3 มิลลิกรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
3. ห่อด้วยตะแกรงลวดความละเอียด 400 เมช ขนาด 2.0 x 2.5 x 1.0 cm^3
4. แช่ตะแกรงลวดที่มีไฮโดรเจลอยู่ภายในลงในสารละลายที่มีค่า pH ต่างๆ ดังนี้
   - สารละลาย HCl เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์
   - สารละลาย NaOH เข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์

5. นำขึ้นมาที่เวลาต่างๆ ดังต่อไปนี้แล้วซับน้ำรอบตะแกรงลวดก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก
   - 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90 และ 120 นาที สำหรับสูตรที่เชื่อมโยงกลไกเดียว
   - 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที สำหรับสูตรที่เชื่อมโยงสองกลไก
6. คำนวณหาค่าการบวมตัว



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทดสอบการบวมตัว

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมจากโซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate : A) โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose : C) และกัวร์กัม (Guar gum : G) โดยใช้โซเดียมเททระบอเรต (บอแร็ก) และแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมโยง (Crosslinker) โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ ดังนี้

- สภาวะน้ำกลั่นที่ pH 7 อุณหภูมิ 23 และ 37°C
- สารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1 0.25 และ 0.5 โมลาร์
- สารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์
- สภาวะกรด-เบส ที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10

ไฮโดรเจลที่เตรียมได้แบ่งเป็น 2 แบบ คือ แบบเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วยบอแร็กและแบบเชื่อมโยงสองกลไกด้วยบอแร็กและแคลเซียมคลอไรด์ โดยแต่ละแบบแบ่งออกเป็นสองประเภท ดังนี้

1. ไฮโดรเจลประเภทสององค์ประกอบ ได้แก่
   - ไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม (AG)
   - ไฮโดรเจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม (CG)
2. ไฮโดรเจลประเภทสามองค์ประกอบ คือ โซเดียมอัลจิเนต/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส/กัวร์กัม (ACG)

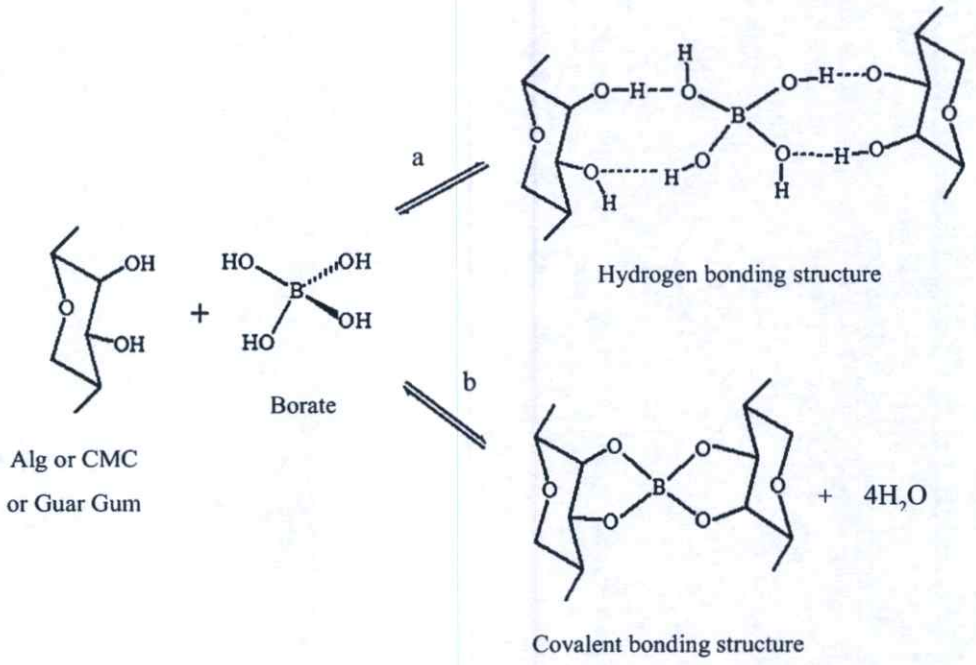
โดยสัญลักษณ์ของสูตรไฮโดรเจลแสดงดังนี้

- A4G6-6 คือ โซเดียมอัลจิเนต 40 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงด้วยบอแร็ก ความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- C4G6-6Ca คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 40 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วยแคลเซียมคลอไรด์
- A1C3G6-6 คือ โซเดียมอัลจิเนต 10 ส่วน ต่อโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 30 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- A1C3G6-6Ca คือ โซเดียมอัลจิเนต 10 ส่วน ต่อโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 30 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วยแคลเซียมคลอไรด์

สำหรับไฮโดรเจลสูตรอื่นๆ ใช้สัญลักษณ์ในลักษณะเดียวกัน

4.1 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบที่เชื่อมโยงกลไกเดียว

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลจัดเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเป็นจำนวนมากทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี แต่มีความสามารถในการละลายแตกต่างกัน โดยโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายน้ำได้ดี ส่วนกัวร์กัมละลายน้ำได้ยากแต่บวมตัวได้ดี ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียวเกิดจากการที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH) บนสายโซ่โมเลกุลของสารตั้งต้นถูกเชื่อมโยงด้วยบอแร็ก ซึ่งเมื่อบอแร็กละลายน้ำแล้วจะได้บอเรต ($B(OH)_4^-$) จากนั้นบอเรตจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนสายโซ่โมเลกุลของโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม โดยบางโมเลกุลของบอเรตเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลด้วยพันธะไฮโดรเจน (รูปที่ 4.1 a) และบางโมเลกุลเชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์ (รูปที่ 4.1 b) การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบนี้ทำให้โครงสร้างของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โครงสร้างดังกล่าวช่วยให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้เพราะสารตั้งต้นถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกันไม่ให้ละลายออกไปกับน้ำหรือสารละลายต่างๆ แต่การเชื่อมโยงดังกล่าวสามารถเกิดการผันกลับได้เป็นผลให้เจลสามารถเกิดการเสียสภาพ [32]



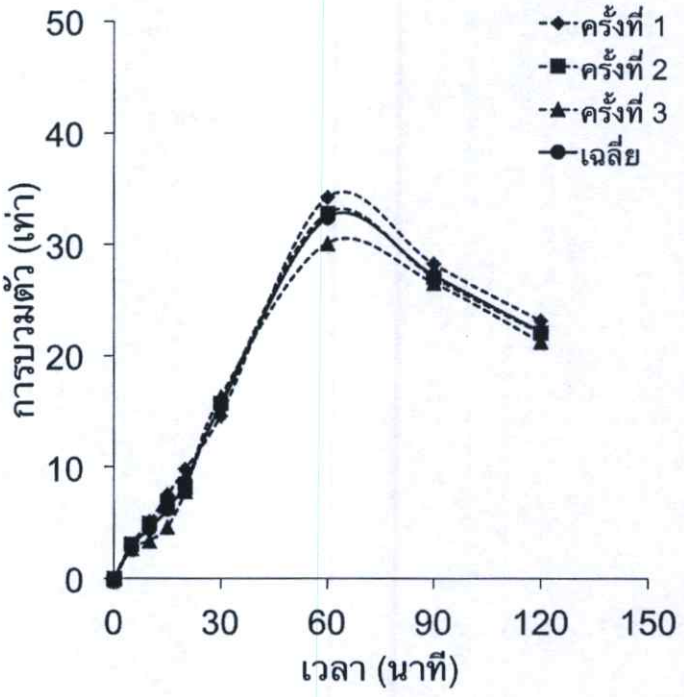
รูปที่ 4.1 การเกิดพันธะเมื่อใช้บอแร็กเป็นสารเชื่อมโยง [32]

การเสียสภาพของเจล เริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีการละลายออกของสารตั้งต้นมากกว่าการดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างของเจล ซึ่งการละลายออกเกิดขึ้นเมื่อมีการผันกลับของพันธะที่เชื่อมโยงด้วยบอเรต กล่าวคือ เมื่อมีโมเลกุลของน้ำเข้าล้อมสายโซ่โมเลกุลของสารตั้งต้นมากขึ้น ทำให้ระยะห่างของหมู่ไฮดรอกซิลของสารตั้งต้นกับบอแร็กห่างจากกันจนกระทั่งพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสารตั้งต้นกับบอเรตถูกทำลาย (รูปที่ 4.1 a) ทำให้บอเรตบางส่วนละลายหลุดออกจากโครงสร้างเจล และอีกกรณีหนึ่ง คือ เมื่อมีปริมาณน้ำในโครงสร้างมากขึ้นทำให้การเชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์

เกิดการผันกลับ (รูปที่ 4.1 b) ดังนั้น เมื่อบอเรตไม่สามารถยึดสายโซ่โมเลกุลของสารตั้งต้นไว้ได้ ทำให้โซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งสารตั้งต้นที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่ดีละลายออกจากโครงสร้างได้ แต่เนื่องจากกัวร์กัมซึ่งมีความสามารถในการละลายด้อยกว่าสารตั้งต้นอีกสองตัวข้างต้นแต่สามารถบวมตัวได้ดีกว่า ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างต่อไปได้ แต่เมื่อการละลายออกมีค่ามากกว่าการดูดซับน้ำ ทำให้ค่าการบวมตัวลดลงแสดงว่าเจลเริ่มมีการเสียสภาพ

ในการเตรียมไฮโดรเจลได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ A : G และ C : G ดังนี้ 20 : 80, 40 : 60, 60 : 40 และ 80 : 20 และปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายบอแร็กที่เป็นสารเชื่อมโยง คือ 1.0, 0.6 และ 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร หลังจากอบให้แห้งและบดให้ละเอียดแล้วนำไฮโดรเจลแต่ละสูตรไปศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายต่างๆ ด้วยวิธี Tea-bag method

โดยเลือกสูตร A4G6-10 มาศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่นและทำการทดสอบการบวมตัวซ้ำ 3 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ดังนั้นการทดสอบการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรอื่นๆ ในน้ำกลั่นและในสารละลายต่างๆจึงทำการทดสอบเพียงครั้งเดียว

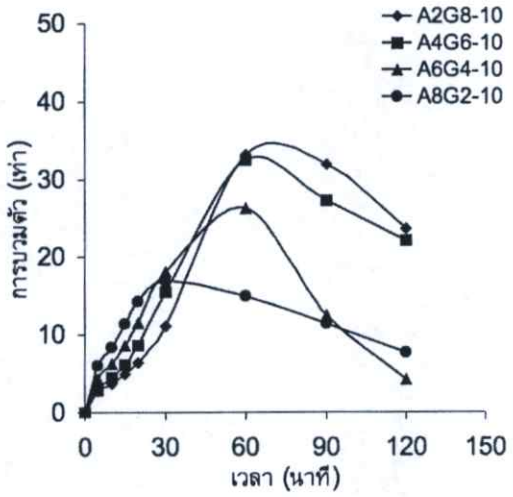


รูปที่ 4.2 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลสูตร A4G6-10

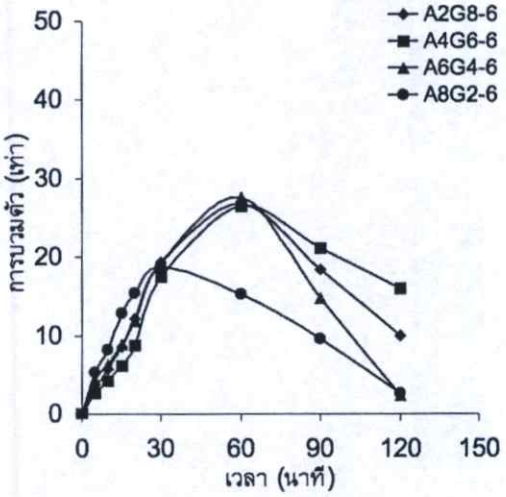
4.1.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม (AG) และไฮโดรเจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม (CG)

ไฮโดรเจล AG

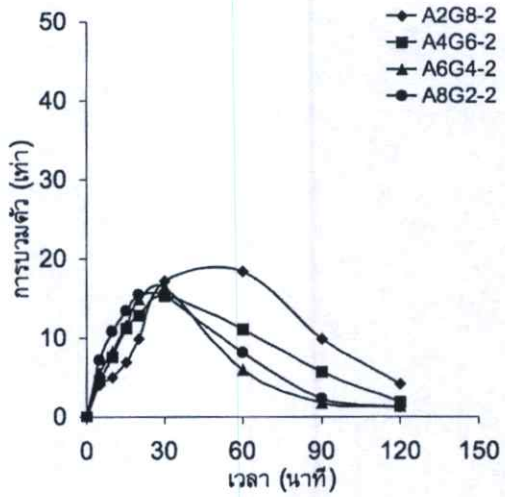
พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล AG โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ A : G และปริมาณสารเชื่อมโยงบอแร็ก แสดงดังรูปที่ 4.3



(ก) บอแร็ก 1.0% w/v



(ข) บอแร็ก 0.6% w/v



(ค) บอแร็ก 0.2% w/v

รูปที่ 4.3 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นแตกต่างกัน

ในรูปที่ 4.3 เป็นการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม (AG) การบวมตัวของไฮโดรเจลในช่วงต้นเกิดจากการที่โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าสู่โครงสร้างของเจลโดยอาศัยแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างภายนอกกับภายในของโครงสร้างเจลและความสามารถในการละลายของโซเดียมอัลจิเนต รวมถึงความสามารถในการบวมตัวของกัวร์กัมทำให้ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลสูงขึ้น แต่ในขณะที่น้ำถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้าง โซเดียมอัลจิเนตก็มีการละลายออกจากโครงสร้างด้วย ดังนั้นเมื่อถึงจุดที่มีการละลายออกมากกว่าการดูดซับน้ำ เจลจะเริ่มเสียสภาพในที่สุด ค่าการบวมตัวจึงเริ่มลดลง

จากรูปที่ 4.3 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG ที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A2G8-10 และ A4G6-10 มีค่าการบวมตัวสูงสุดใกล้เคียงกันประมาณ 30 เท่า ซึ่งสูงกว่าสูตร A6G4-10 และ A8G2-10 ไฮโดรเจลสูตร A8G2-10 มีการบวมตัวเร็วในช่วง 20 นาทีแรก เนื่องจากมีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตอยู่มากจึงเกิดการบวมตัวอย่างรวดเร็วเพราะโซเดียมอัลจิเนตมีความสามารถในการละลายดีจึงดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างเจลได้เร็ว แต่เมื่อน้ำในโครงสร้างมีมากขึ้นจึงเกิดการละลายออกของโซเดียมอัลจิเนตมากมีผลทำให้ค่าการบวมตัวลดลงหลังการบวมตัว 30 นาที

จากรูปที่ 4.3 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG โดยใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A2G8-6, A4G6-6 และ A6G4-6 มีการบวมตัวสูงสุดประมาณ 30 เท่า แต่ในสูตร A8G2-6 มีการบวมตัวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า และเสียสภาพเจลเร็วกว่าทั้งสามสูตรข้างต้น

จากรูปที่ 4.3 (ค) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG โดยใช้บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A2G8-2 มีความสามารถในการบวมตัวสูงสุด โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า และคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นานที่สุด เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 พบว่าไฮโดรเจล AG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความสามารถในการบวมตัวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลสูตรที่ใช้ความเข้มข้นของบอแร็ก 1.0 และ 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

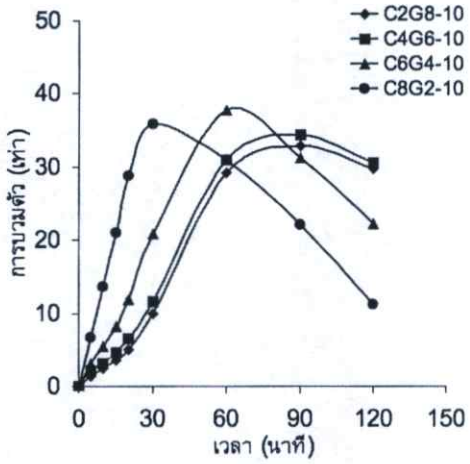
จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของบอแร็กลดลง กล่าวคือ เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0 และ 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 30 เท่า แต่เมื่อความเข้มข้นของบอแร็กเท่ากับ 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร การบวมตัวมีค่าประมาณ 15 เท่า เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของบอแร็กลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลง เมื่อการเชื่อมโยงของโครงสร้างลดลงทำให้สารตั้งต้นสามารถละลายออกจากโครงสร้างได้ง่ายเมื่อพันธะภายในโครงสร้างเริ่มผันกลับ เจลจึงเริ่มเกิดการเสียสภาพ

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของบอแร็กเท่ากัน พบว่าเมื่อปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตในสูตรเจลเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าการบวมตัวในช่วงต้นมีค่าสูง แต่ค่าการบวมตัวสูงสุดมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับสูตรเจลที่มีปริมาณโซเดียมอัลจิเนตต่ำกว่า เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงมีความสามารถในการละลายดี ทำให้เมื่อน้ำถูกดูดซับไว้ในโครงสร้างมากขึ้น โซเดียมอัลจิเนตจึงละลายออกจากโครงสร้างได้ง่าย ทำให้การละลายออกมีค่ามากกว่าการดูดซับน้ำ ดังนั้นเมื่อในโครงสร้างมีปริมาณของ โซเดียมอัลจิเนตเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าการดูดซับน้ำน้อยลงและเสียสภาพเร็ว ในทางกลับกันเมื่อมีปริมาณของกัวร์กัมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการบวมตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากกัวร์กัมเป็นสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีความสามารถในการละลายต่ำแต่สามารถบวมตัวได้ดี ทำให้เจลสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นเมื่อกัวร์กัมมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อโครงสร้างดูดซับน้ำไว้มากขึ้น

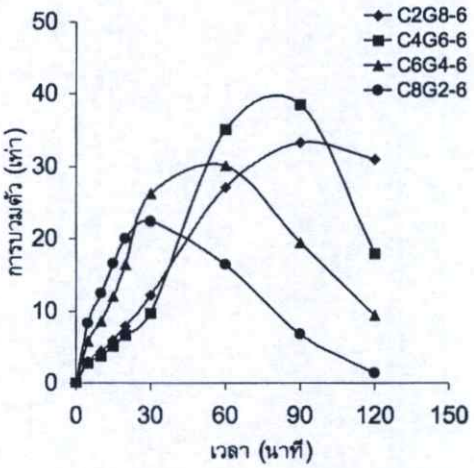
โซเดียมอัลจิเนตจะเริ่มละลายออกจากโครงสร้าง ในขณะที่กัวร์กัมละลายออกจากโครงสร้างได้ยาก กัวร์กัมจึงเป็นส่วนช่วยให้เจลสามารถคงสภาพต่อไปได้ทำให้เจลเกิดการเสียสภาพช้าลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม พบว่าในโครงสร้างโมเลกุลของกัวร์กัมมีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลบนสายโซ่มากกว่าบนสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนต ทำให้เมื่อเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับบอเรต ไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณกัวร์กัมมากจึงสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้มากกว่าสูตรที่มีปริมาณกัวร์กัมน้อย เมื่อมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้นไฮโดรเจลจึงสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดีขึ้นและเกิดการเสียสภาพช้าลง

ไฮโดรเจล CG

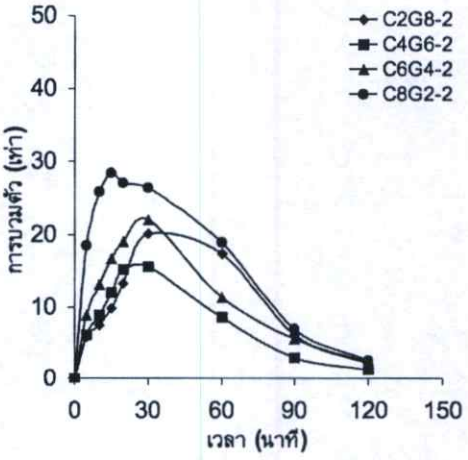
พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล CG โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน C : G และปริมาณสารเชื่อมโยงบอแร็ก แสดงดังรูปที่ 4.4



(ก) บอแร็ก 1.0% w/v



(ข) บอแร็ก 0.6% w/v



(ค) บอแร็ก 0.2% w/v

รูปที่ 4.4 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นแตกต่างกัน

ในรูปที่ 4.4 การบวมตัวของไฮโดรเจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม (CG) มีลักษณะเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG คือ เกิดจากการที่โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าสู่โครงสร้างของเจล โดยอาศัยแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างภายนอกกับภายในของโครงสร้างเจลและความสามารถในการละลายของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส รวมถึงความสามารถในการบวมตัวที่ดีของกัวร์กัม ทำให้ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลสูงขึ้น แต่ในขณะที่น้ำถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลสก็มีการละลายออกจากโครงสร้างเช่นเดียวกับโซเดียมอัลจิเนต ดังนั้นเมื่อถึงจุดที่มีการละลายออกมากกว่าการดูดซับน้ำเจลจะเริ่มเสียสภาพทำให้ค่าการบวมตัวเริ่มลดลง

จากรูปที่ 4.4 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล CG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 35 เท่า แต่สูตร C2G8-10 และ C4G6-10 สามารถคงเจลไว้ได้ดีกว่าสูตร C6G4-10 และ C8G2-10 เนื่องจากเมื่อบอเรตหลุดออกจากโครงสร้าง การละลายของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีผลทำให้เนื้อเจลหายไปทำให้การดูดซับน้ำลดลง

จากรูปที่ 4.4 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล CG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร C2G8-6 และ C4G6-6 มีค่าการบวมตัวสูงสุดประมาณ 35 เท่า ซึ่งใกล้เคียงกับสูตรที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และคงสภาพความเป็นเจลได้นานกว่าสูตร C6G4-6 และ C8G2-6 เนื่องจากเมื่อบอเรตหลุดออกจากโครงสร้างเจล การละลายของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสของสูตร C6G4-6 และ C8G2-6 มีผลทำให้การดูดซับน้ำลดลงเมื่อเทียบกับสูตร C2G8-6 และ C4G6-6 ซึ่งมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้อยกว่า

จากรูปที่ 4.4 (ค) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล CG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร C2G8-6 C4G6-6 และ C6G4-6 มีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 15 เท่า สูตร C8G2-6 มีค่าการบวมตัวสูงสุดประมาณ 30 เท่า แต่สูตร C8G2-6 เสียสภาพเจลเร็วที่สุด เพราะมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากที่สุดจึงทำให้การละลายออกส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของเจลลดลง

จากรูปที่ 4.4 เป็นผลการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG พบว่าเมื่อความเข้มข้นของบอแร็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงมีค่าลดลง ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจล CG มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG โดยไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0 และ 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าการบวมตัวประมาณ 35 เท่า และไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็ก 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าการบวมตัวประมาณ 15-30 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงน้อยจึงยึดโมเลกุลของสารตั้งต้นได้ไม่ดี และเมื่อพันธะภายในโครงสร้างเกิดการผันกลับ โมเลกุลของทั้งโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัมหลุดออกจากโครงสร้างเจลได้ง่าย เจลจึงเริ่มเสียสภาพทำให้ค่าการบวมตัวลดลง

เมื่อพิจารณาการบวมตัวของไฮโดรเจล CG เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นเท่ากัน พบว่าเมื่อปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นทำให้เจลเริ่มเสียสภาพเร็วขึ้น เนื่องจากโซเดียมคาร์-บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงมีความสามารถในการละลายดี ดังนั้นเมื่อมีน้ำในโครง-สร้างมากขึ้น โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงละลายออกจากโครงสร้างได้ง่าย ทำให้เจลถึงจุดที่การละลายออกมากกว่าการดูดซับน้ำเร็วขึ้น เจลจึงเกิดการเสียสภาพเร็ว แต่ในทางตรงกันข้ามเมื่อมีปริมาณของกัวร์กัมเพิ่มขึ้น เจลจะคงสภาพได้นานขึ้น เนื่องจากกัวร์กัมเป็นสารตั้งต้นที่มีน้ำ-

หนักโมเลกุลสูงและมีความสามารถในการบวมตัวดี ทำให้กัวร์กัมละลายออกจากโครงสร้างได้ยากกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส กัวร์กัมจึงเป็นส่วนช่วยให้เจลคงสภาพต่อไปได้เมื่อมีน้ำในโครงสร้างมากขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าไฮโดรเจล CG มีแนวโน้มค่าการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจล AG เนื่องจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าโซเดียมอัลจิเนตทำให้ไฮโดรเจล CG สามารถดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้ดี เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตต่อกัวร์กัม และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อกัวร์กัมกัม พบว่าเมื่อมีปริมาณโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้นค่าการบวมตัวจะลดลงและเสียสภาพความเป็นเจลได้เร็วขึ้น เนื่องจากเมื่อพันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับทำให้โซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีการละลายออกมากขึ้น เมื่อมีการละลายออกมากกว่าการดูดซับน้ำ เจลจึงเริ่มเสียสภาพทำให้ค่าการบวมตัวลดลง แต่ทั้งไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG เริ่มเสียสภาพเจลที่ระยะเวลาใกล้เคียงกัน แม้โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าโซเดียมอัลจิเนต เนื่องจากกัวร์กัมที่อยู่ในโครงสร้างเป็นส่วนช่วยให้เจลเกิดการเสียสภาพได้ช้า ดังนั้นไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของกัวร์กัมเท่ากัน จึงมีระยะเวลาที่เจลเริ่มเสียสภาพใกล้เคียงกัน

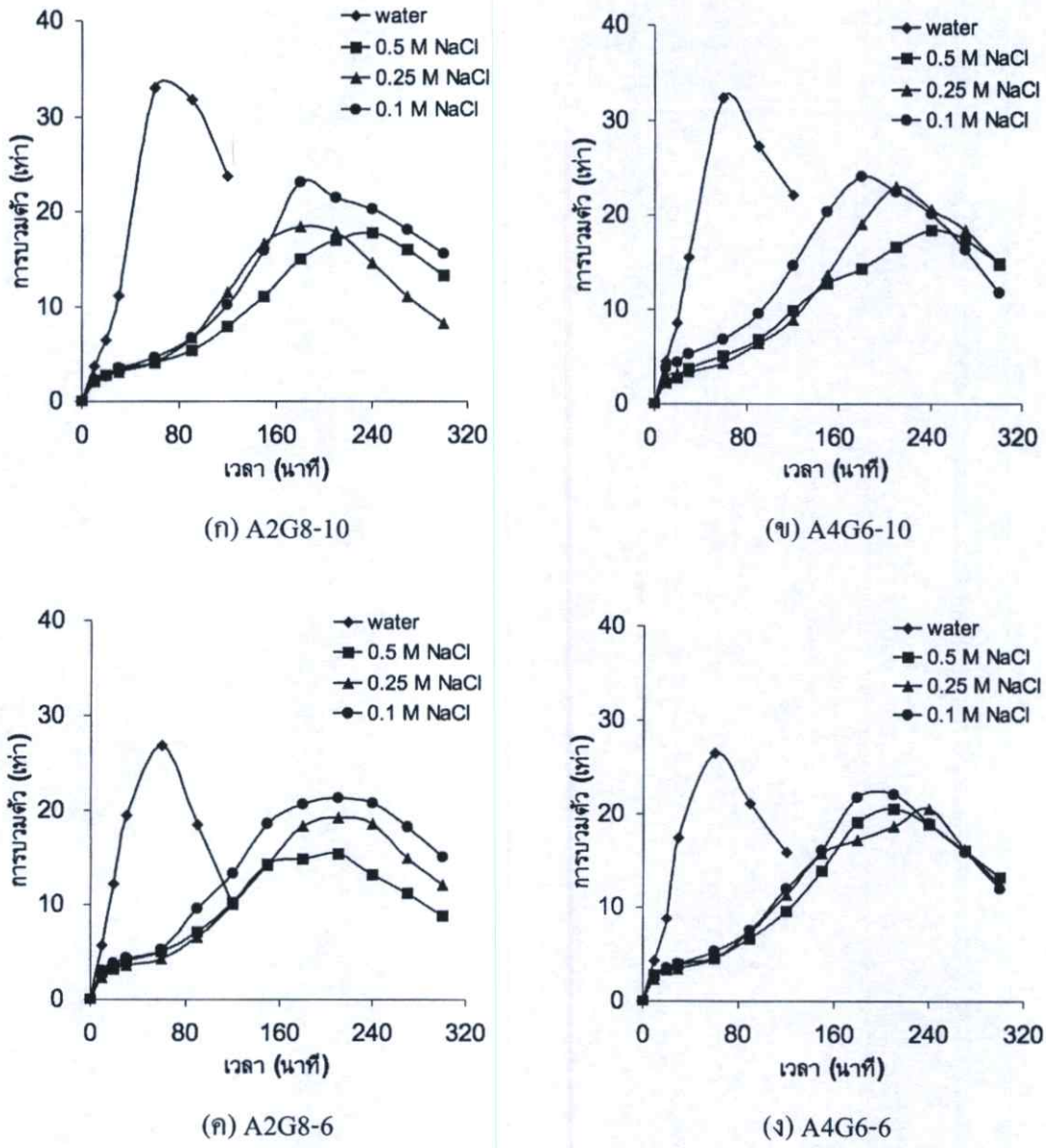
จากข้างต้น จึงได้เลือกสูตรที่ใช้ความเข้มข้นของบอแร็ก 1.0 และ 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยมีอัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อกัวร์กัมที่ 20 : 80 และ 40 ต่อ 60 ได้แก่สูตร A2G8-10, A4G6-10, A2G8-6, A4G6-6, C2G8-10, C4G6-10, C2G8-6 และ C4G6-6 ไปใช้ในการศึกษาการบวมตัวในสารละลายเกลือต่อไป

4.1.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่างๆ ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

4.1.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl

ไฮโดรเจล AG

พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ของไฮโดรเจล AG โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน A : G และปริมาณสารเชื่อมโยงบอแร็ก แสดงดังรูปที่ 4.5



(ก) A2G8-10 (ข) A4G6-10

(ค) A2G8-6 (ง) A4G6-6

รูปที่ 4.5 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล AG

จากรูปที่ 4.5 ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลาย NaCl มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลาย NaCl มีค่า Ionic strength สูงกว่า น้ำกลั่น กล่าวคือ เมื่อ NaCl ละลายน้ำจะแตกตัวให้ Na^+ ทำให้เกิดการผลักกันระหว่างประจุบวกที่อยู่ในโครงสร้างเจล (Na^+) กับประจุบวกที่อยู่ในสารละลายทำให้น้ำแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้ยากขึ้นเพราะแรงต้านที่เกิดขึ้นจากแรงผลักของประจุค่าการบวมตัวจึงลดลง นอกจากนี้ แรงผลักที่เกิดขึ้นทำให้น้ำสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้ช้า ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้จึงน้อยส่งผลให้โครงสร้างเจลเกิดได้ช้ากว่าในน้ำกลั่น เจลจึงเกิดการเสียสภาพได้ช้ากว่าในน้ำกลั่น เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มสูงขึ้น พบว่าการบวมตัวของไฮโดรเจลมีค่าลดลง กล่าวคือ ค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีค่ามากกว่าค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ และการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ มีค่ามากกว่าการบวมตัว

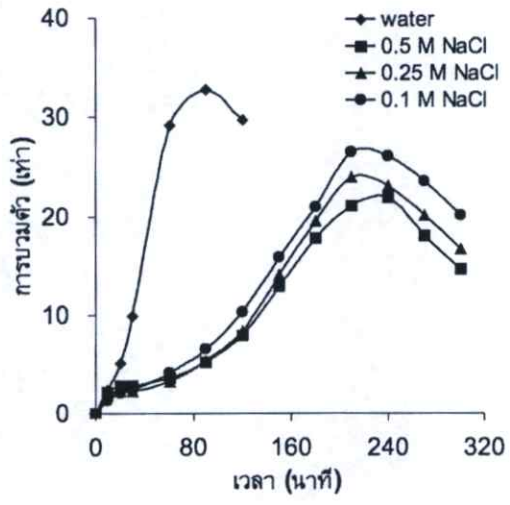
ในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มทำให้สารละลายมีแรงดันออสโมซิสลดลง น้ำจึงแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้น้อยลงค่าการบวมตัวในสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นสูงจึงมีค่าน้อยกว่าสารละลายเกลือที่มีความเข้มข้นต่ำ

จากรูปที่ 4.5 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล AG ที่ใช้บอแร็กความเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าค่าบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงประมาณ 25 เท่า และค่าการบวมตัวลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาในการดูดซับน้ำที่ค่าการบวมตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 60 นาที ในระบบน้ำกลั่นเป็นช่วง 180-240 นาที ในระบบสารละลายเกลือ NaCl

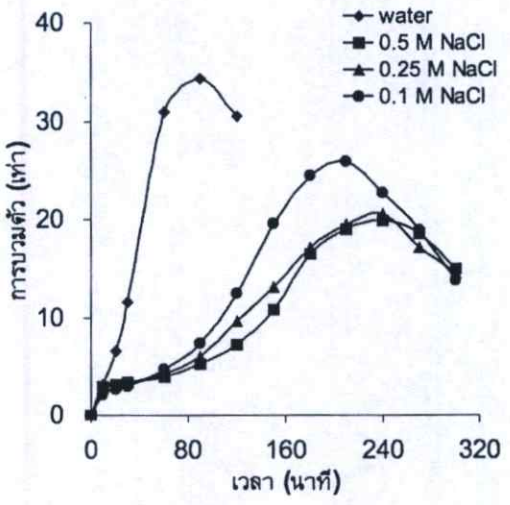
จากรูปที่ 4.5 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล AG ที่ใช้บอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าแนวโน้มของการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของสูตร A2G8-6 และ A4G6-6 มีลักษณะเช่นเดียวกับสูตร A2G8-10 และ A4G6-10 กล่าวคือ การบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของสูตร A2G8-6 และ A4G6-6 มีค่าประมาณ 23 เท่า ซึ่งสูงกว่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ และค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ของทั้งสองสูตรมีค่าต่ำที่สุด โดยระยะเวลาในการดูดซับน้ำที่ค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ในช่วง 180-240 นาที

ไฮโดรเจล CG

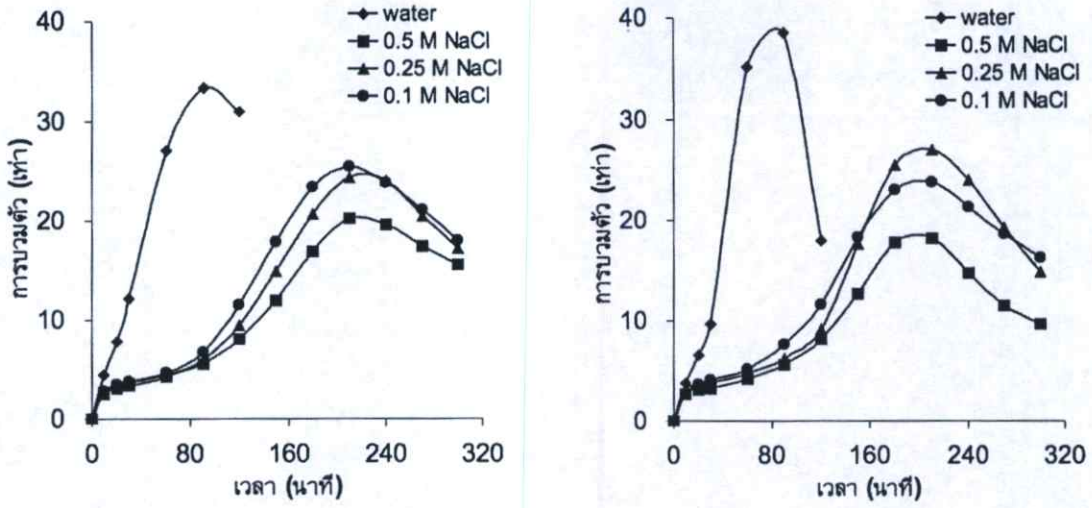
พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ของไฮโดรเจล CG โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน C : G และปริมาณสารเชื่อมโยงบอแร็ก แสดงดังรูปที่ 4.6



(ก) C2G8-10



(ข) C4G6-10



(ค) C2G8-6 (ง) C4G6-6

รูปที่ 4.6 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล CG

จากรูปที่ 4.6 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล CG มีแนวโน้มเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG กล่าวคือ ค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลายมีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่น และไฮโดรเจลสามารถคงสภาพได้นานขึ้นเมื่อบวมตัวในสารละลาย NaCl เพราะเจลเกิดการผันกลับช้ากว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มสูงขึ้น การบวมตัวของไฮโดรเจลมีค่าลดลง กล่าวคือ ค่าการบวมตัวสูงสุดในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีค่ามากกว่าค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ และค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ มีค่ามากกว่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เนื่องสารละลายมีแรงดันออสโมซิสต่ำลง น้ำจึงแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้น้อยลง

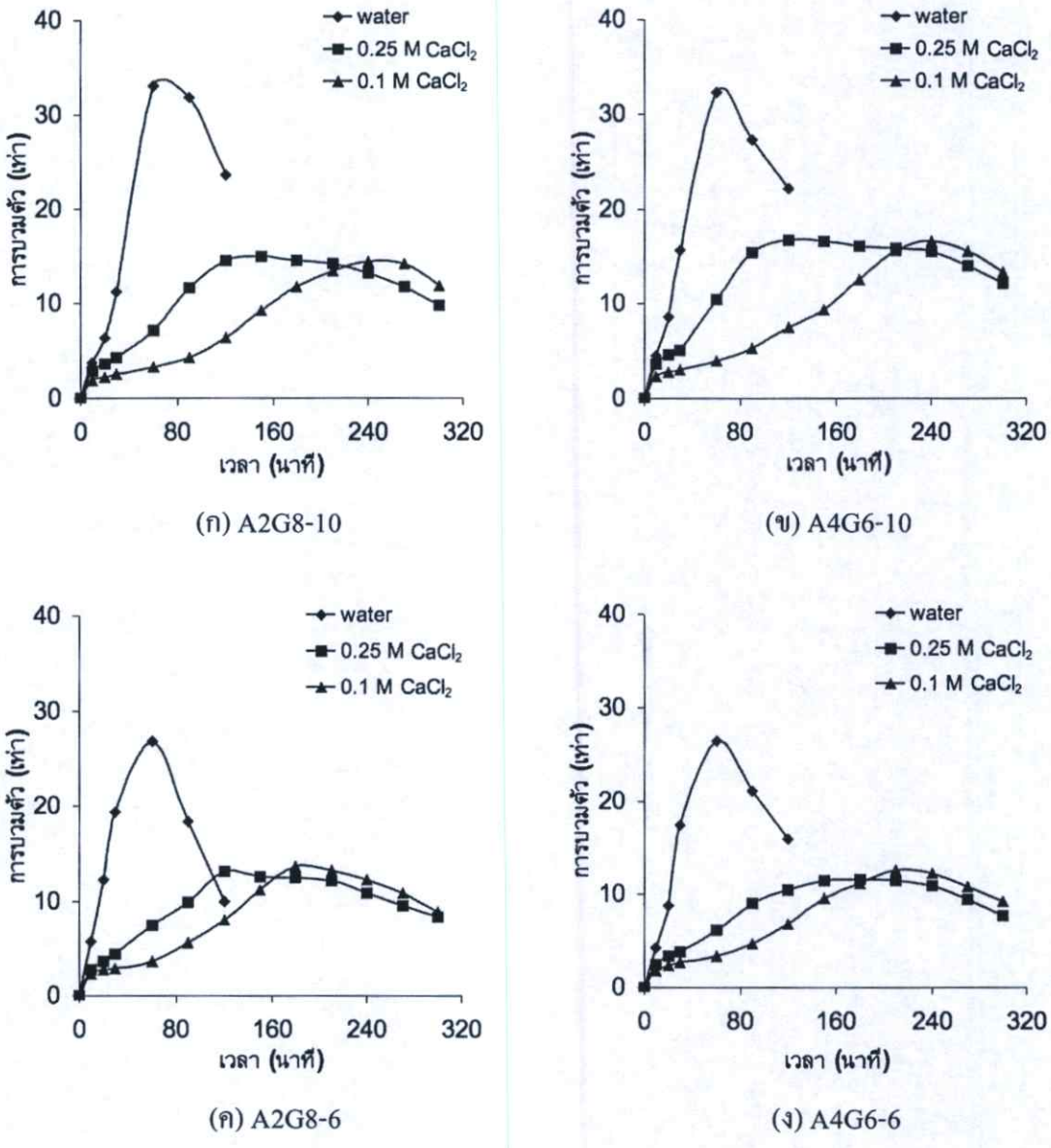
จากรูปที่ 4.6 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล CG ที่ใช้บอแร็กความเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าค่าบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 28 เท่า และค่าการบวมตัวลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มสูงขึ้น ไฮโดรเจลสูตร C2G8-10 มีค่าการบวมตัวในแต่ละความเข้มข้นแตกต่างกันชัดเจน แต่สูตร C4G6-10 มีค่าการบวมในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.6 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล CG ที่ใช้บอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าแนวโน้มของการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของสูตร C2G8-6 และ C4G6-6 มีลักษณะเช่นเดียวกับสูตร C2G8-10 และ C4G6-10 กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้น ค่าการบวมตัวจะต่ำลง โดยสูตร C2G8-6 และ C4G6-6 มีค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ประมาณ 25 เท่า แต่สูตร C4G6-6 มีค่าการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ สูงกว่าที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์เล็กน้อย และค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ของไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีต่ำที่สุด

ไฮโดรเจลสี่สูตรมีระยะเวลาที่ค่าการบวมตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นจากในระบบน้ำกลั่นที่ 90 นาที เป็น 210 นาที ในระบบสารละลายเกลือ NaCl

4.1.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$

ไฮโดรเจล AG



(ก) A2G8-10 (ข) A4G6-10

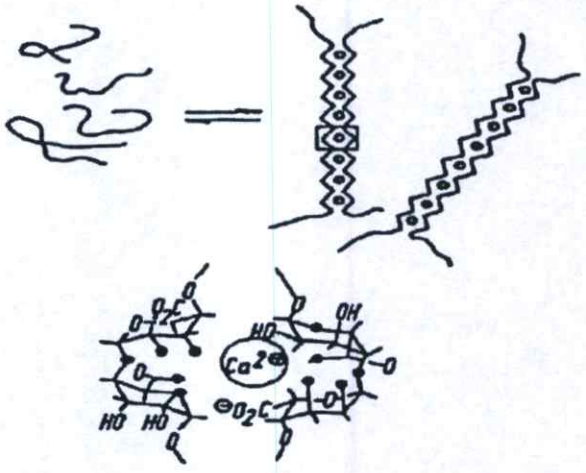
(ค) A2G8-6 (ง) A4G6-6

รูปที่ 4.7 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล AG

จากรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ของไฮโดรเจล AG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A2G8-10 และ A4G6-10 มีค่าการบวมตัวในสารละลายที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์ ใกล้เคียงกันประมาณ 15 เท่า

จากรูปที่ 4.7 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ของไฮโดรเจล AG เมื่อใช้บอแร็กเข้มเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A2G8-10 และ A4G6-10 มีค่าการบวมตัวในสารละลายที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์ ใกล้เคียงกันประมาณ 13 เท่า

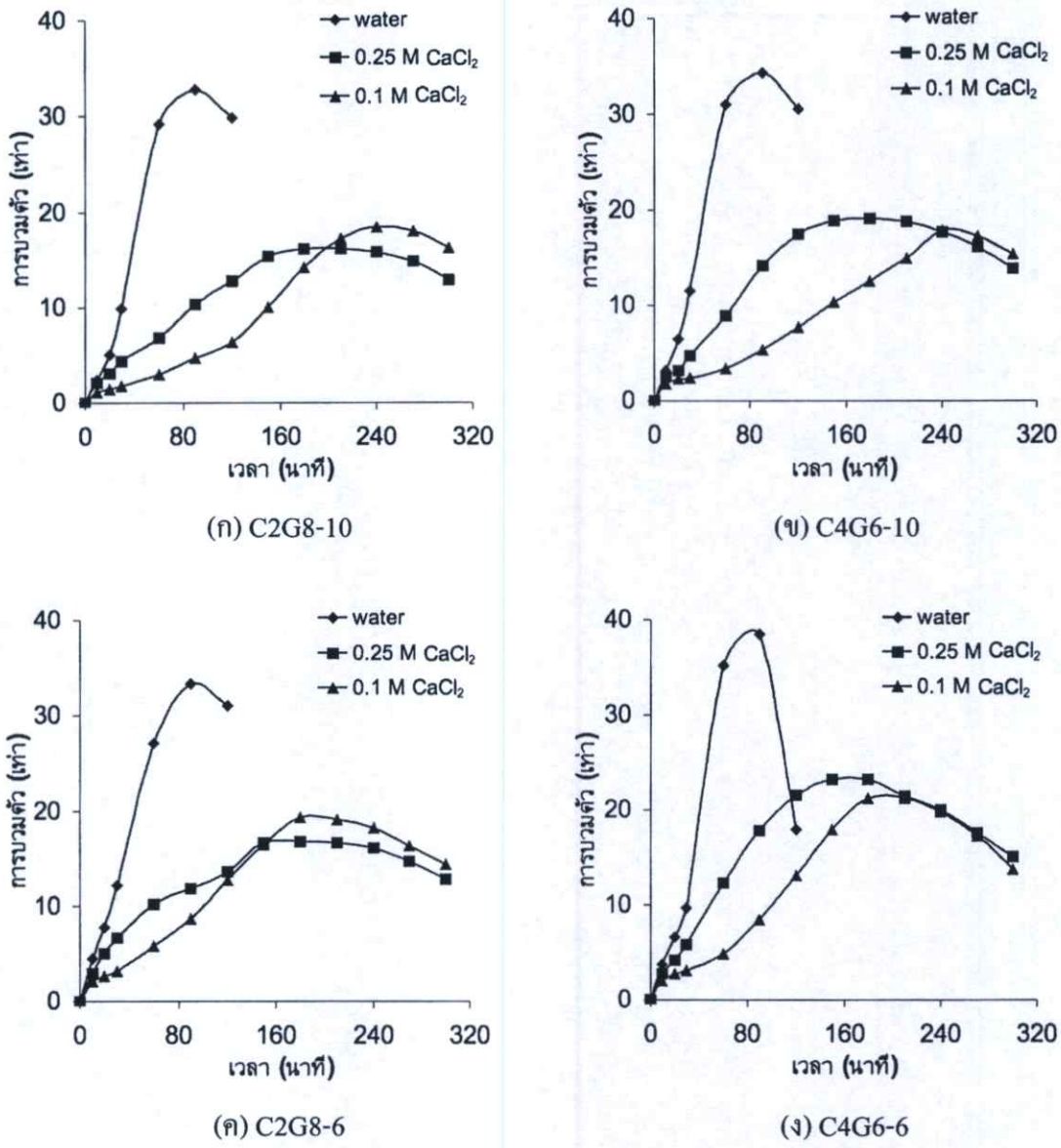
จากข้างต้น พบว่าการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าการบวมตัวต่ำกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลาย $CaCl_2$ มีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่น นอกจากนี้เมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ เจลเกิดการเชื่อมโยงทางประจุระหว่าง Ca^{2+} และหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) ที่อยู่บนสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนตได้ 2 หมู่ (รูปที่ 4.8) ทำให้เจลมีความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และโครงสร้างมีความยืดหยุ่นลดลงส่งผลให้เจลดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ยากขึ้น การบวมตัวใน สารละลาย $CaCl_2$ จึงมีค่าลดลง นอกจากนี้การเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำเข้าสู่โครงสร้างได้น้อยลงส่งผลให้บอเรตเกิดการผันกลับน้อยลง เจลจึงสามารถคงสภาพได้นานกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $CaCl_2$ เพิ่มขึ้น พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกัน เนื่องจากไฮโดรเจลมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้ใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงต้นของการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้เร็วกว่าการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เนื่องจากเมื่อ Ca^{2+} เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างเจลจะพาโมเลกุลของน้ำเข้าไปด้วย ดังนั้น เมื่อ Ca^{2+} มีปริมาณมากขึ้นและเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างได้มากจึงสามารถพาโมเลกุลของน้ำเข้าไปได้เร็ว ทำให้เจลบวมตัวเร็วในช่วงต้น



รูปที่ 4.8 การเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} เมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ [21]

เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจล AG ที่ใช้บอแร็ก 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับไฮโดรเจล AG ที่ใช้บอแร็ก 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลทั้งสองกลุ่มมีค่าการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ใกล้เคียงกัน

ไฮโดรเจล CG



(ก) C2G8-10 (ข) C4G6-10

(ค) C2G8-6 (ง) C4G6-6

รูปที่ 4.9 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล CG

จากรูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ของไฮโดรเจล CG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และรูปที่ 4.8 (ค) และ (ง) เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจล CG แต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์ ใกล้เคียงกันประมาณ 20 เท่า นอกจากนี้การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าการบวมตัวต่ำกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากเมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ เจลเกิดการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG มีผลให้โครงสร้างมีความยืดหยุ่นลดลง เจลจึงดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ยากขึ้น เมื่อน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้น้อยลงทำให้การเชื่อมโยงของบอเรตเกิดการผันกลับน้อยและช้ากว่าทำให้เจลสามารถคงสภาพได้นานกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น

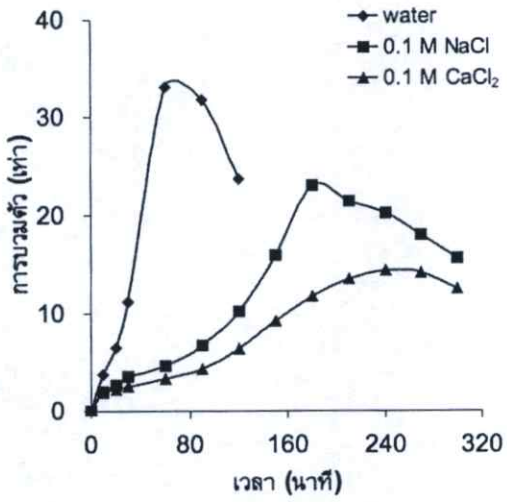
และเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $CaCl_2$ เพิ่มขึ้น พบว่าไฮโดรเจลมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG กล่าวคือ ในช่วงต้นของการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้เร็วกว่าการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เนื่องจากเมื่อ Ca^{2+} มีปริมาณมากขึ้นและเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างได้มากจึงสามารถพาโมเลกุลของน้ำเข้าสู่โครงสร้างของเจลได้มากขึ้น ส่งผลให้เจลมีการบวมตัวเร็วในช่วงต้น

เมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจล CG กับไฮโดรเจล AG พบว่าไฮโดรเจล AG มีค่าการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ น้อยกว่าไฮโดรเจล CG เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} ได้ดีกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพราะการเชื่อมโยงของโซเดียมอัลจิเนตด้วย Ca^{2+} เกิดเป็นรูปแบบที่เรียกว่า Egg Box [21] ซึ่งมีความเป็นระเบียบและแน่นหนา ส่งผลให้ไฮโดรเจล AG บวมตัวได้น้อยกว่าไฮโดรเจล CG

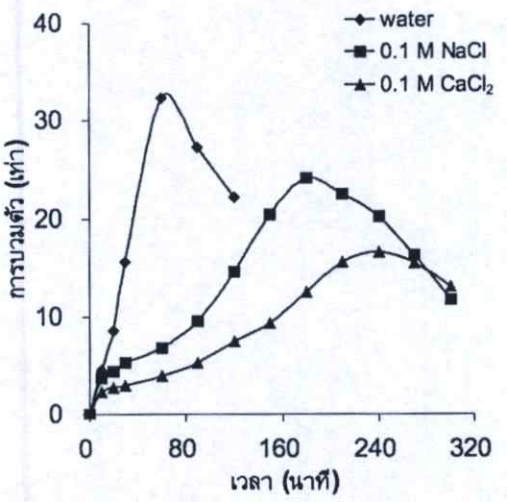
4.1.2.3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl และ $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจล AG และ ไฮโดรเจล CG ในน้ำกลั่น สารละลายเกลือ NaCl และ $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ แสดงดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11

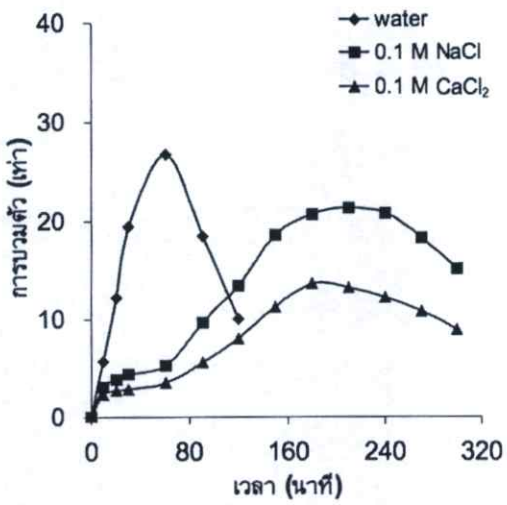
ไฮโดรเจลชนิด AG



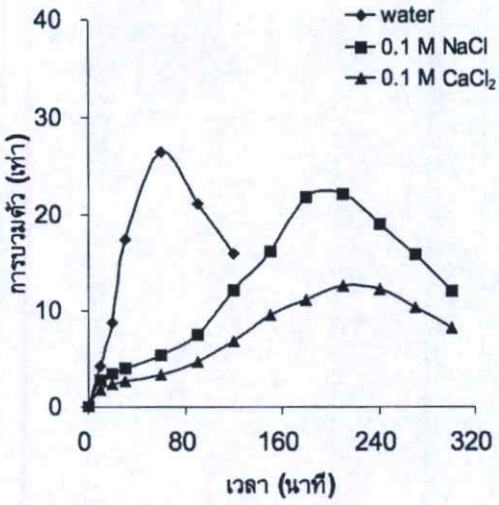
(ก) A2G8-10



(ข) A4G6-10



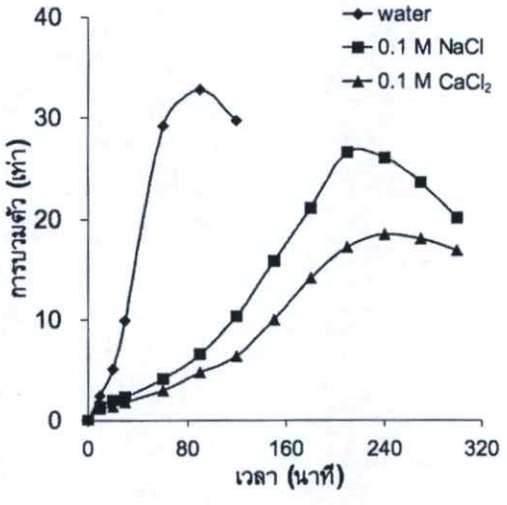
(ค) A2G8-6



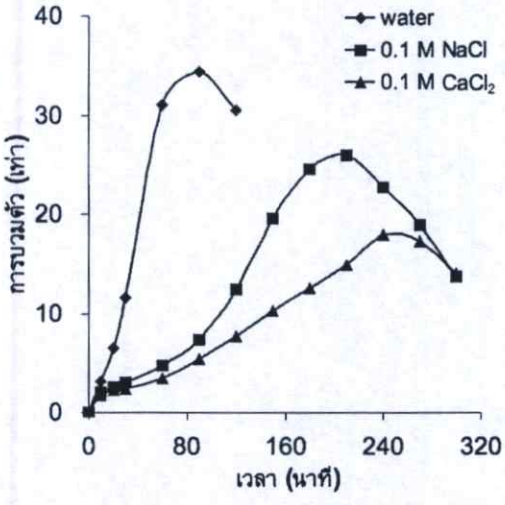
(ง) A4G6-6

รูปที่ 4.10 การบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้ม 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล AG

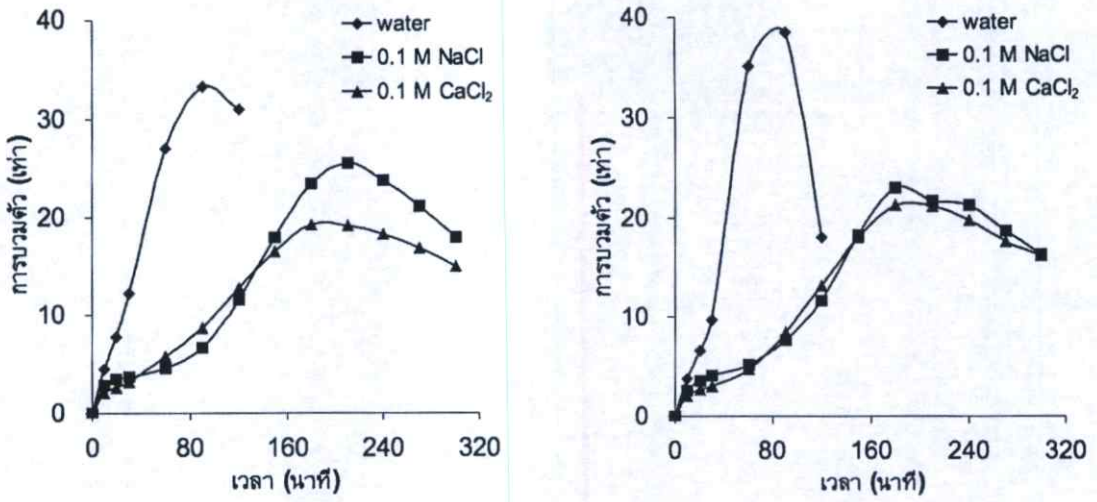
ไฮโดรเจลชนิด CG



(ก) C2G8-10



(ข) C4G6-10



(ค) C2G8-6 (ง) C4G6-6

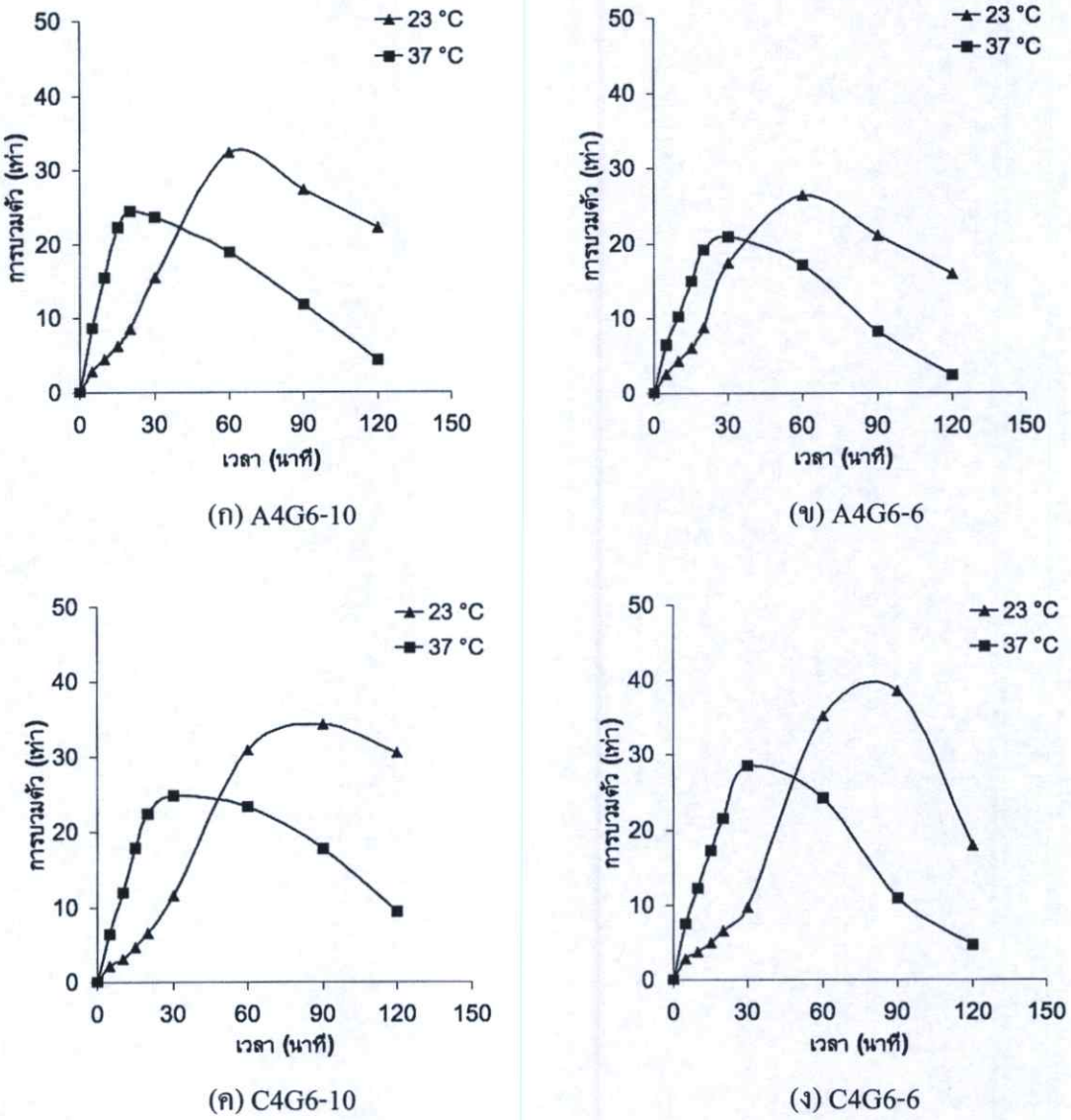
รูปที่ 4.11 การบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้ม 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล CG

จากรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 พบว่าการบวมตัวของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG ในน้ำกลั่นมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับการบวมตัวในสารละลาย NaCl และ $CaCl_2$ เนื่องจากสารละลายเกลือทั้งสองชนิดมีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่นทำให้น้ำแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้น้อย แต่การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าต่ำที่สุด เนื่องมาจากสองสาเหตุ คือ สารละลาย $CaCl_2$ มีค่า Ionic strength สูงกว่าทั้งน้ำกลั่นและสารละลาย NaCl และเจลมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโยงโดย Ca^{2+} ที่อยู่ในสารละลายทำให้เจลมีความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นและทำให้โครงสร้างมีความยืดหยุ่นลดลงส่งผลให้เจลดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้น้อยลง การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ จึงมีค่าน้อย นอกจากนี้การเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เจลสามารถคงสภาพไว้ได้นานกว่าในน้ำกลั่นและในสารละลาย NaCl โดยเจลเริ่มเสียสภาพได้เร็วที่สุดเมื่อบวมตัวในน้ำกลั่นเพราะเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้มากทำให้พันธะภายในโครงสร้างเกิดการผันกลับเร็ว การเสียสภาพของเจลเมื่อบวมตัวในน้ำกลั่นจึงเกิดขึ้นเร็วกว่าการบวมตัวในสารละลายเกลือทั้งสองชนิด

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 4.1.2.1 และ 4.1.2.2 จึงได้เลือกไฮโดรเจลสูตร A4G6-10, A4G6-6, C4G6-10 และ C4G6-6 ไปศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวในปัจจัยอื่นต่อไป

4.1.3 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

การบวมตัวของไฮโดรเจลแบบ AG และ CG สูตรต่างๆ ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C แสดงผลดังรูปที่ 4.12



(ก) A4G6-10 (ข) A4G6-6

(ค) C4G6-10 (ง) C4G6-6

รูปที่ 4.12 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

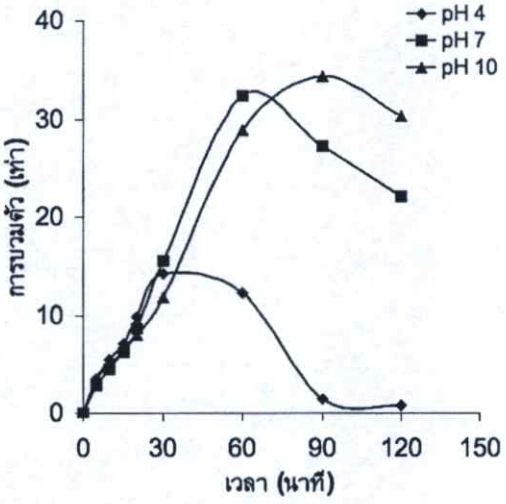
จากรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) เป็นไฮโดรเจลที่เตรียมจากโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม โดยใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A4G6-10 มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ประมาณ 25 เท่า ดีกว่าสูตร A4G6-6 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัวลดลงเมื่อเทียบกับการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้พลังงานจลน์ของน้ำและโมเลกุลต่างๆ ในระบบ เพิ่มสูงขึ้น น้ำจึงเข้าล้อมสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนต กัวร์กัม และบอเรตได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะห่างของพันธะ

ภายในโครงสร้างมากขึ้น เจลจึงเกิดการผันกลับและเสียสภาพได้เร็วเพราะบอเรตหลุดออกจากโครงสร้างเร็วและโซเดียมอัลจิเนตมีการละลายสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อบวมตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้ในช่วงต้นเจลสามารถดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำและเกิดการผันกลับของพันธะเชื่อมโยงในโครงสร้าง รวมทั้งโซเดียมอัลจิเนตละลายออกได้เร็วขึ้นมีผลให้เจลเกิดการเสียสภาพได้เร็วขึ้น

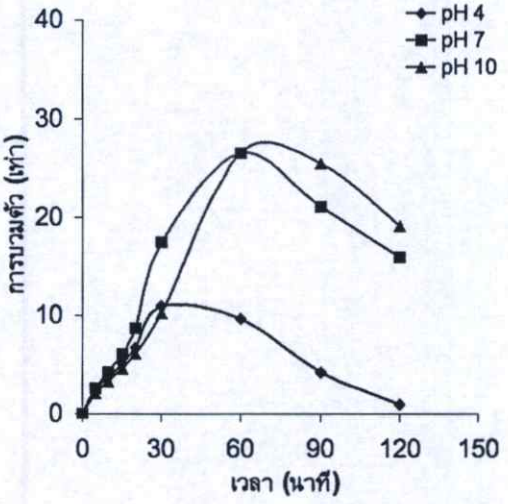
จากรูปที่ 4.12 (ค) และ (ง) สูตร C4G6-6 มีค่าการบวมตัวสูงสุดในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ประมาณ 30 เท่า ซึ่งดีกว่าสูตรที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากสูตร C4G6-10 มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากกว่าสูตร C4G6-6 ทำให้เมื่อดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างแล้วขยายตัวได้ยาก ค่าการบวมตัวจึงน้อย ทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัวลดลงเมื่อเทียบกับการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C เนื่องจากการบวมตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้พันธะเชื่อมโยงในโครงสร้างเกิดการผันกลับได้เร็วและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถละลายได้ดีขึ้นจึงมีผลให้เจลเสียสภาพเร็วขึ้น

4.1.4 พฤติกรรมการบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

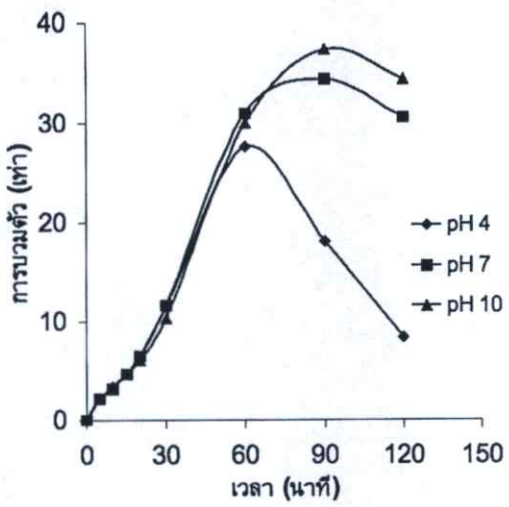
การบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร A4G6-10, A4G6-6, C4G6-10 และ C4G6-6 สภาวะที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 แสดงดังรูปที่ 4.13



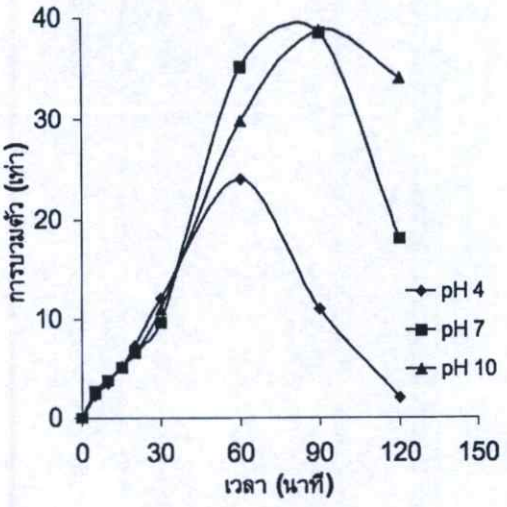
(ก) A4G6-10



(ข) A4G6-6



(ค) C4G6-10



(ง) C4G6-6

รูปที่ 4.13 การบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

จากรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร A4G6-10 และ A4G6-6 ในสภาวะกรด-เบสที่มีค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 พบว่าสูตร A4G6-10 มีค่าการบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 7 และ 10 มีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 35 เท่า สูตร A4G6-6 มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10 มีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 30 เท่า แต่การบวมตัวในสภาวะกรดที่ค่า pH เริ่มต้น 4 มีค่าต่ำที่สุด โดยการบวมตัวของสูตร A4G6-10 มีการบวมตัวประมาณ 15 เท่า และสูตร A4G6-6 มีการบวมตัวที่สภาวะกรด 10 เท่า นอกจากนี้ไฮโดรเจลยังเสียสภาพได้เร็วที่สุดเมื่อบวมตัวในสภาวะกรด

จากรูปที่ 4.13 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร C4G6-10 และ C4G6-6 ในสภาวะกรด-เบสที่มีค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 พบว่าไฮโดรเจลสูตร C4G6-10 และ C4G6-6 มีค่าการบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 7 และ 10 ใกล้เคียงกัน โดยสูตร C4G6-10 มีค่าการบวมตัวประมาณ 35 เท่า และสูตร C4G6-6 มีค่าการบวมตัวประมาณ 40 เท่า ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัวที่สภาวะกรดต่ำที่สุด โดยสูตร C4G6-10 มีค่าการบวมตัวประมาณ 27 เท่า และสูตร C4G6-6 มีค่าประมาณ 25 เท่า การเสียสภาพเจลเกิดขึ้นได้เร็วเมื่อบวมตัวในสภาวะกรด

จากข้างต้น ไฮโดรเจลมีค่าการบวมตัวในสารละลายที่สภาวะเบส (pH เริ่มต้น 10) ใกล้เคียงกับสารละลายที่สภาวะเป็นกลาง (pH เริ่มต้น 7) แต่ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลลดลงเมื่อบวมตัวในสารละลายที่สภาวะกรด (pH เริ่มต้น 4) เนื่องจากโปรตอน (H^+) ที่อยู่ในสารละลายเข้ารวมตัวกับหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) ที่อยู่บนสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ทำให้สารตั้งต้นทั้งสองมีโครงสร้างที่อยู่ในรูปกรดซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำจึงไม่เอื้อต่อการบวมตัวของเจลเพราะทำให้เจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง นอกจากนี้ H^+ ยังสามารถรวมตัวกับบอเรตทำให้เจลเกิดการผันกลับได้ [31] ทำให้ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลลดลงและไฮโดรเจลเกิดการเสียสภาพได้เร็วขึ้นเมื่อบวมตัวในสภาวะกรด

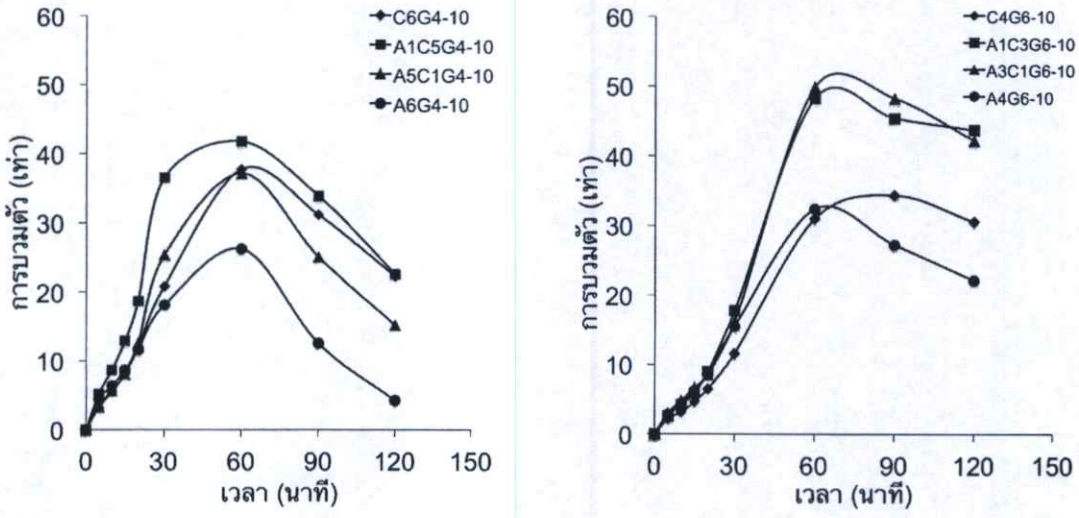
จากพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ ได้แก่ ไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG พบว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกัวร์กัมในไฮโดรเจล CG น่าจะมีความสามารถในเข้ากันได้ดีกว่าโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัมในไฮโดรเจล AG เนื่องจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าโซเดียมอัลจิเนตทำให้สายโซ่โมเลกุลของโซเดียมคาร์บอซีเมทิลเซลลูโลสสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลของกัวร์กัมได้ดี ทำให้ค่าการบวมตัวสูงสุดของไฮโดรเจล CG ในสภาวะต่างๆ มีแนวโน้มดีกว่าไฮโดรเจล AG แต่ไฮโดรเจล AG สามารถเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} ได้ดีกว่าไฮโดรเจล CG ทำให้เจลเสียสภาพยาก ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงให้ไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบมีสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดีขึ้น จึงได้ทำการเตรียมไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบขึ้น

4.2 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงกลไกเดียว

4.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม (ACG)

จากการศึกษาการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสูตรต่างๆ ในน้ำกลั่น ให้ผลการบวมตัว แสดงดังรูปที่ 4.14

บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



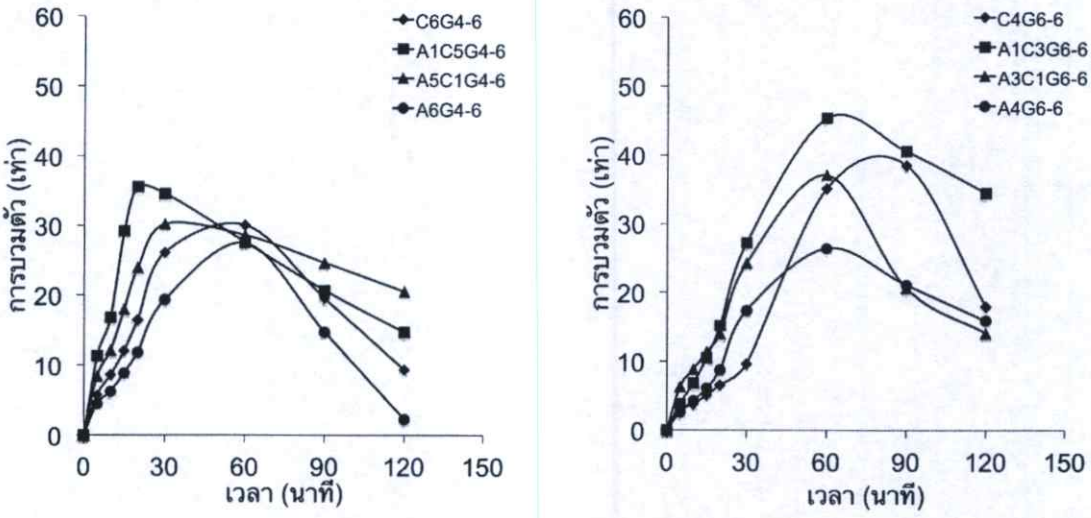
(ก) กัวร์กัม 40% โดยน้ำหนัก (ข) กัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.14 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้สารละลายบอแร็ก 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

จากรูปที่ 4.14 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่มีปริมาณกัวร์กัม 40% โดยน้ำหนัก และเชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C5G4-10 และ A5C1G4-10 มีค่าการบวมตัวสูงสุดประมาณ 40 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ ได้แก่ สูตร A6G4-10 และ C6G4-10 พบว่าสูตร A1C5G4-10 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร C6G4-10 และสูตร A5C1G4-10 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร A6G4-10 และไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสามารถคงสภาพเจลได้ใกล้เคียงกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ

จากรูปที่ 4.14 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่มีปริมาณกัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A1C3G6-10 และ A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวสูงสุดประมาณ 50 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ ได้แก่ สูตร A6G4-10 และ C6G4-10 พบว่าสูตร A1C3G6-10 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร C4G6-10 และสูตร A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร A6G4-10 และไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสามารถคงสภาพเจลได้ใกล้เคียงกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ

<u>บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร</u>



(ก) กัวร์กัม 40% โดยน้ำหนัก

(ข) กัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.15 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้สารละลายบอแร็ก 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

จากรูปที่ 4.15 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่มีปริมาณกัวร์กัม 40% โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A1C5G4-6 มีค่าการบวมตัว 35 เท่า และสูตร A5C1G4-6 มีค่าการบวมตัว 30 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ ได้แก่ สูตร A6G4-6 และ C6G4-6 พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C5G4-6 มีค่าการบวมตัวสูงกว่าแต่เสียสภาพเจลเร็วกว่าสูตร C6G4-6 เช่นเดียวกับสูตร A5C1G4-6 ซึ่งมีค่าการบวมตัวดีกว่าและเสียสภาพเร็วกว่าสูตร A6G4-6

จากรูปที่ 4.15 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่มีปริมาณกัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A1C3G6-6 มีค่าการบวมตัวประมาณ 45 เท่า และสูตร A3C1G6-6 มีค่าการบวมตัวประมาณ 35 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ ได้แก่ สูตร A6G4-6 และ C6G4-6 พบว่าสูตร A1C3G6-6 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร C4G6-10 และสูตร A3C1G6-6 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร A6G4-10 และไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสามารถคงสภาพเจลได้ใกล้เคียงกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ

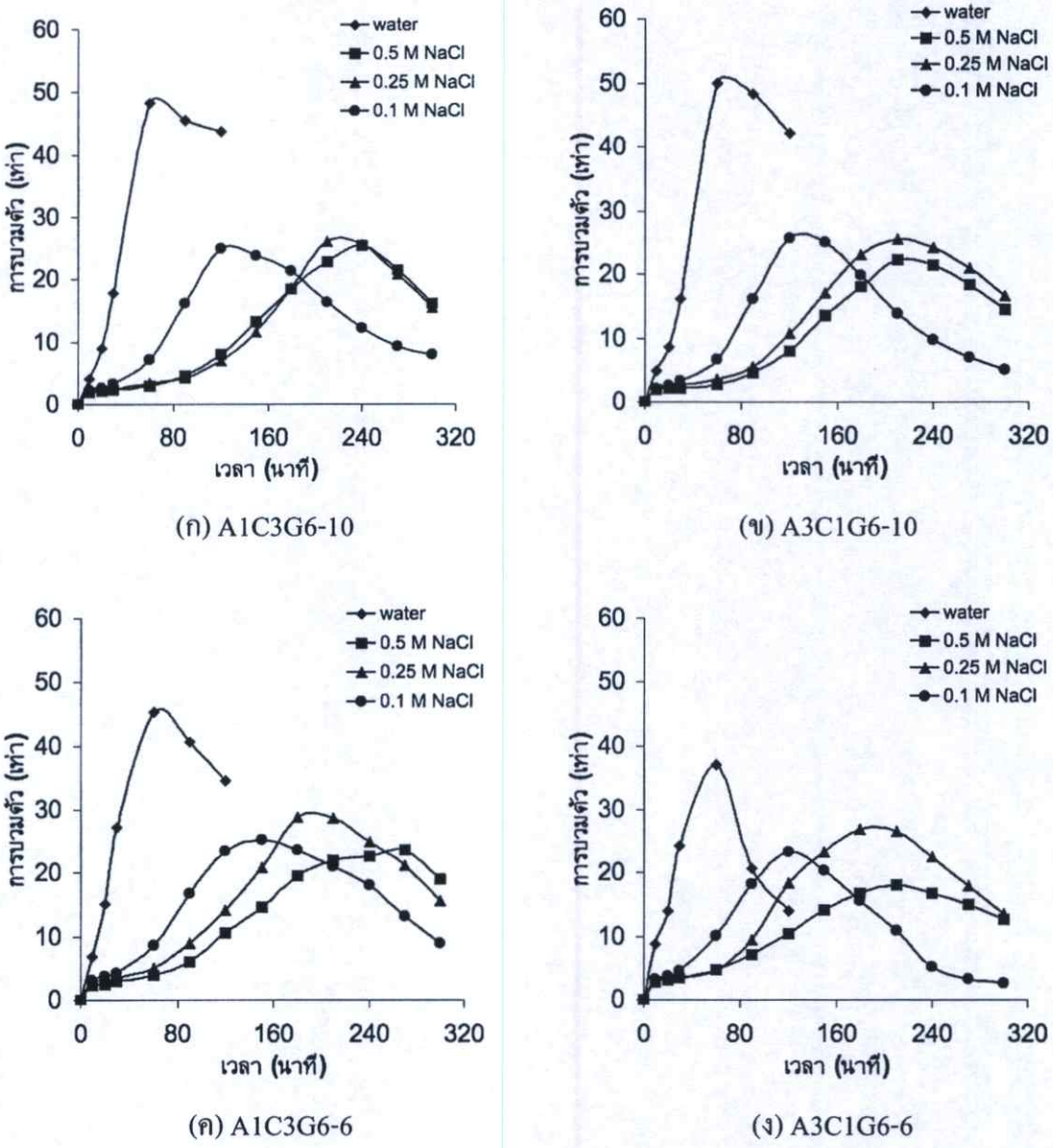
จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 ไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-10) มีการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-6) เนื่องจากไฮโดรเจล ACG-10 มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากกว่าไฮโดรเจล ACG-6 ดังนั้นเมื่อเกิดการผันกลับของพันธะเชื่อมโยงภายในไฮโดรเจล ACG-10 จึงมีบอเรตมากพอที่จะยึดโครงสร้างให้สามารถดูดซับน้ำต่อไปได้

จากข้างต้น ไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสามารถบวมตัวได้ดีกว่าไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ เนื่องจากองค์ประกอบที่สามที่เพิ่มเข้าไปทำให้เกิดการรบกวนความเป็นระเบียบของระบบเดิมที่มีสององค์ประกอบ ความไม่เป็นระเบียบของระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างของเจลที่เตรียมได้มีช่องว่างเพิ่มขึ้นทำให้มีการบวมตัวเพิ่มขึ้น กล่าวคือ องค์ประกอบที่สามทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของระบบสององค์ประกอบเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อเชื่อมโยงแต่ละสายโซ่ด้วยบอเรตจึงมีโอกาสเกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้น เมื่อมีช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้นทำให้ดูดซับน้ำได้มากขึ้น ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบจึงมีค่ามากกว่าแบบสององค์ประกอบ

ไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่มีกัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก สามารถบวมตัวได้ดีกว่าสูตรที่มีกัวร์กัม 40% โดยน้ำหนัก เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งเป็นส่วนที่มีความสามารถในการละลายที่ดีจะละลายออกจากโครงสร้าง เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงในเจลเกิดการผันกลับได้มากกว่าสูตรที่มีกัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงได้เลือกสูตร A1C3G6-10, A3C1G6-10, A1C3G6-6 และ A3C1G6-6 ไปศึกษาการบวมตัวในปัจจัยอื่นต่อไป

4.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่างๆ ของไฮโดรเจล ACG

4.2.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl



(ก) A1C3G6-10 (ข) A3C1G6-10

(ค) A1C3G6-6 (ง) A3C1G6-6

รูปที่ 4.16 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล ACG

จากรูปที่ 4.16 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10 และ A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวในสารละลายที่ความเข้มข้น 0.1 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ใกล้เคียงกันประมาณ 25 เท่า ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลาย NaCl มีค่า Ionic strengthio สูงกว่าน้ำกลั่น แต่การบวมตัวในสารละลาย NaCl สามารถคงสภาพเจลได้นานกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากพันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับได้ช้ากว่าในน้ำกลั่น การบวมตัวในสารละลายเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเกิดการเสียสภาพ

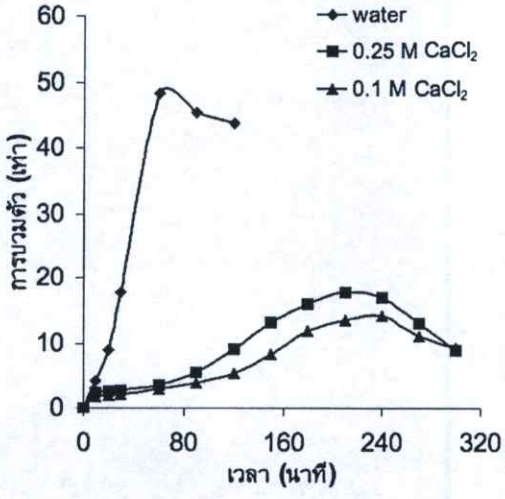
เร็วกว่าการบวมตัวในสารละลายเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มทำให้สารละลายมีแรงดันออสโมซิสลดลง น้ำจึงแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้น้อย ดังนั้นค่าการบวมตัวในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจึงมีค่าน้อยกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10 และ A3C1G6-10 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบกับไฮโดรเจลสูตร A4G6-10 และ C4G6-10 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ พบว่าไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบมีการบวมตัวในสารละลาย NaCl ดีกว่าไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ เนื่องจากองค์ประกอบที่สามที่เพิ่มเข้าสู่ระบบทำให้โครงสร้างของเจลมีช่องว่างเพิ่มขึ้นทำให้สามารถดูดซับสารละลายดีขึ้น เช่นเดียวกับการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบที่มีค่าการบวมตัวดีกว่าไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ

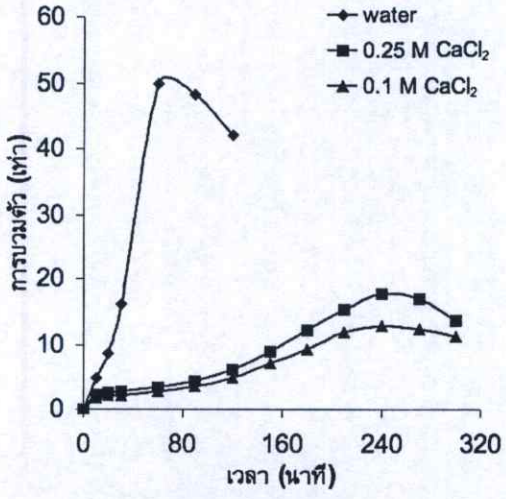
จากรูปที่ 4.16 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-6 (รูปที่ 4.16 (ค)) มีค่าการบวมตัวในสารละลายที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ใกล้เคียงกันประมาณ 25 เท่า แต่ในสารละลายเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เจลสามารถเกิดการเสียสภาพได้เร็วที่สุดและการบวมตัวในสารละลายเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เกิดการเสียสภาพช้าที่สุด การบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-6 (รูปที่ 4.16 (ง)) ในสารละลายความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 25 เท่า และในสารละลาย NaCl เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สามารถบวมตัวได้ 20 เท่า การบวมตัวของไฮโดรเจลทั้งสองสูตรในสารละลาย NaCl มีค่าน้อยกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลาย NaCl มีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่น และการบวมตัวในสารละลาย NaCl สามารถคงสภาพเจลได้นานกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากพันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับได้ช้ากว่าในน้ำกลั่น

เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลสูตร A4G6-6 และ C4G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ พบว่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบมีค่าสูงกว่าไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ

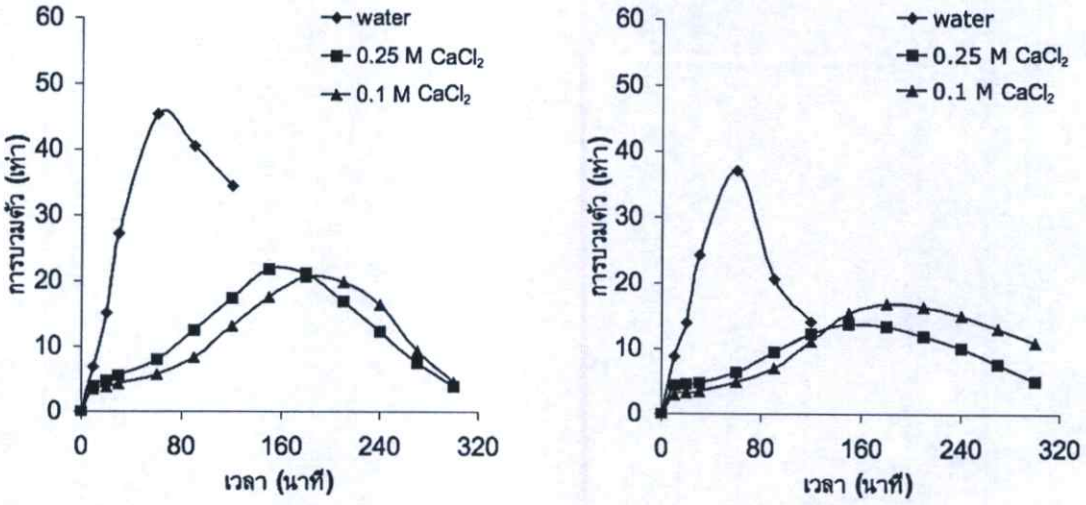
4.2.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$



(ก) A1C3G6-10



(ข) A3C1G6-10



(ค) A1C3G6-6 (ง) A3C1G6-6

รูปที่ 4.17 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล ACG

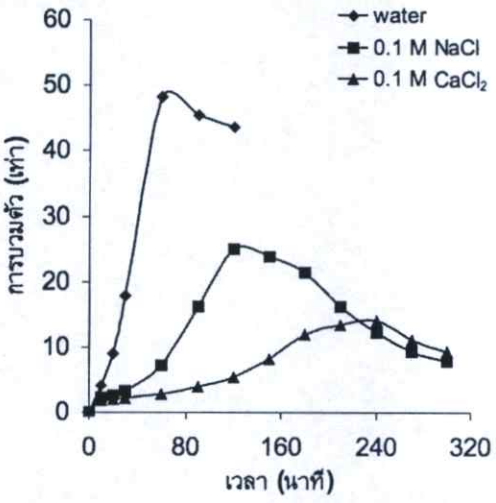
จากรูปที่ 4.17 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-10) และรูปที่ 4.17 (ค) และ (ง) เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-6) พบว่าไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวในสารละลายความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์ ใกล้เคียงกันประมาณ 15 เท่า ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากเมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ เจลเกิดการเชื่อมโยงทางประจุระหว่าง Ca^{2+} และหมู่ COO^- เมื่อโครงสร้างมีความยืดหยุ่นลดลงเจลจึงดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ยากขึ้น ดังนั้นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ จึงมีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อโครงสร้างมีความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นทำให้พันธะเชื่อมโยงของบอเรตเกิดการผันกลับน้อย ไฮโดรเจลจึงสามารถคงสภาพได้นานกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น

เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $CaCl_2$ เพิ่มขึ้น พบว่าการบวมตัวมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงต้นของการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้เร็วกว่าการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เนื่องจากเมื่อ Ca^{2+} มีปริมาณมากขึ้นและเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างได้มากจึงสามารถพาโมเลกุลของน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้เร็ว เจลจึงบวมตัวเร็วในช่วงต้น

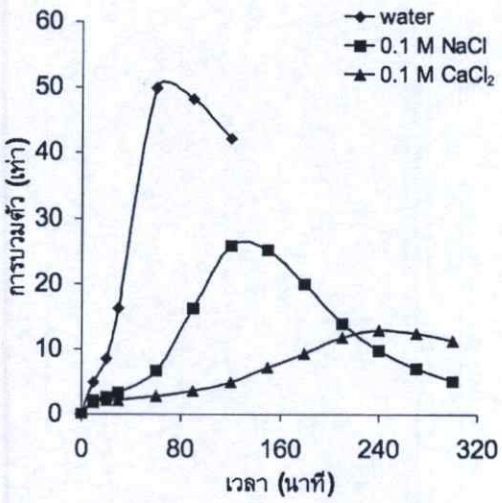
เมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจล ACG-10 กับ ACG-6 พบว่าไฮโดรเจล ACG-6 เกิดการเสียสภาพเร็วกว่าไฮโดรเจล ACG-10 เนื่องจากเมื่อมีน้ำเข้าสู่โครงสร้างมากและเกิดการผันกลับของพันธะเชื่อมโยงบอเรต ไฮโดรเจล ACG-10 ยังมีปริมาณการเชื่อมโยงด้วยบอเรตมากทำให้สามารถบวมตัวได้นานกว่าไฮโดรเจล ACG-6

เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของ A : C : G พบว่าไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของ A : C : G เท่ากับ 1 : 3 : 6 มีแนวโน้มในการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ดีกว่าไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของ A : C : G เท่ากับ 3 : 1 : 6 เนื่องจากสูตรที่มีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตมากเมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ สามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} ได้มากกว่าสูตรที่มีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากทำให้โครงสร้างเจลมีความยืดหยุ่นลดลง ดังนั้นไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตมากจึงบวมตัวน้อยกว่าสูตรที่มีปริมาณโซเดียมอัลจิเนตน้อย

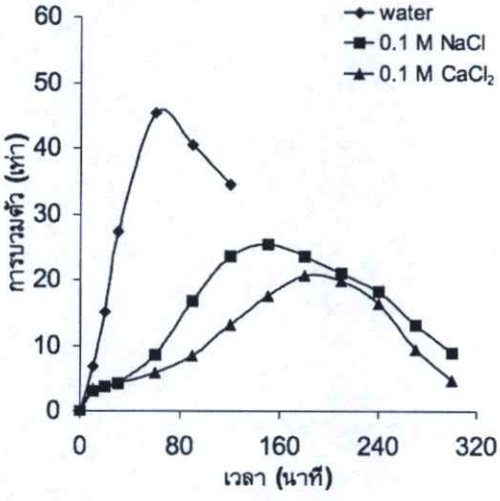
4.2.2.3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl และ $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์



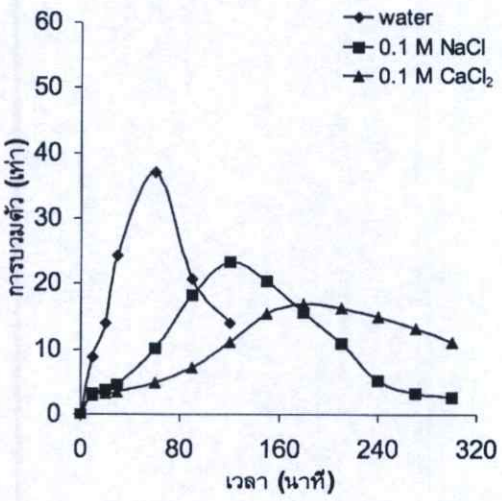
(ก) A1C3G6-10



(ข) A3C1G6-10



(ค) A1C3G6-6

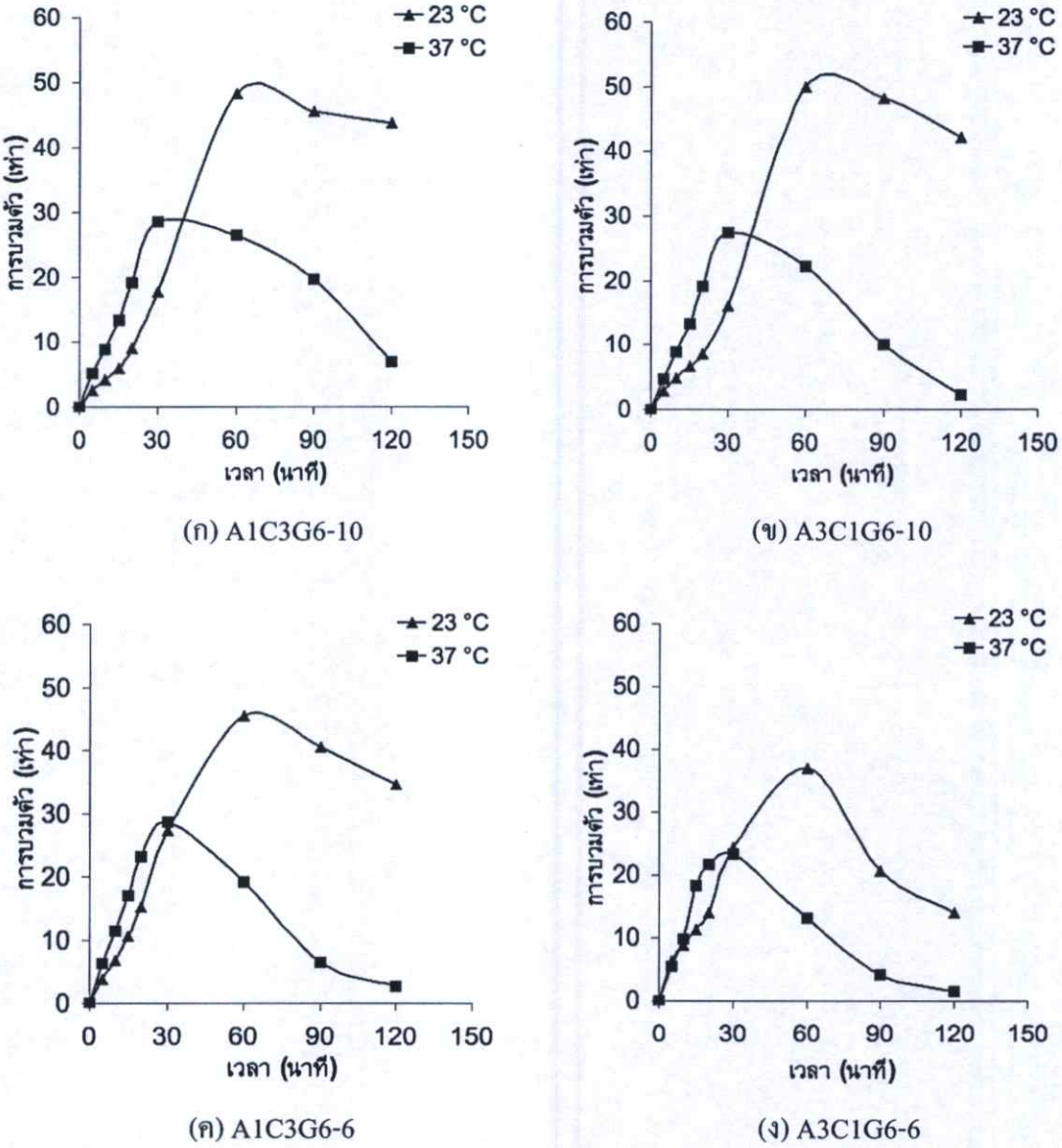


(ง) A3C1G6-6

รูปที่ 4.18 การบวมตัวในสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล ACG

จากรูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลายเกลือสองชนิด คือ NaCl และ $CaCl_2$ ของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-10) และรูป (ค) และ (ง) เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-6) พบว่าไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวในสารละลายเกลือทั้งสองชนิดต่ำกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลายเกลือทั้งสองชนิดมีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่น และการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุดแต่สามารถคงสภาพเจลได้นานที่สุด เนื่องจากเจลมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโยงโดย Ca^{2+}

4.2.3 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG



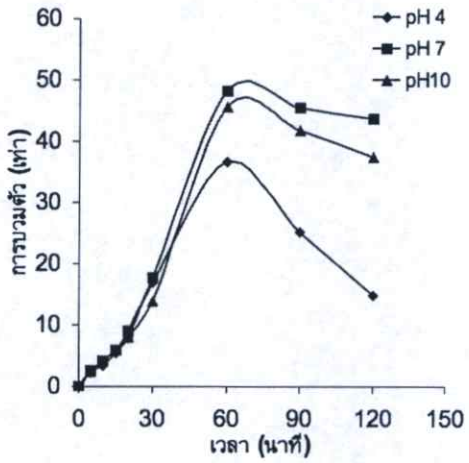
(ก) A1C3G6-10 (ข) A3C1G6-10

(ค) A1C3G6-6 (ง) A3C1G6-6

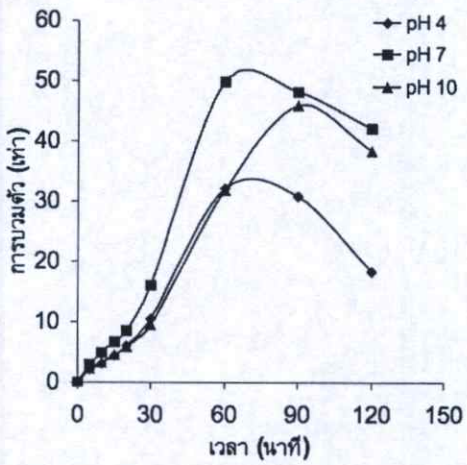
รูปที่ 4.19 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG

จากรูปที่ 4.19 เป็นการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG โดยรูปที่ 4.18 (ก) และ (ข) เป็นไฮโดรเจล ACG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10 และสูตร A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวใกล้กันประมาณ 30 เท่า และรูปที่ 4.19 (ค) และ (ง) เป็นไฮโดรเจล ACG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-6 มีค่าการบวมตัวประมาณ 45 เท่า และสูตร A3C1G6-6 มีค่าการบวมตัวประมาณ 28 เท่า ไฮโดรเจลทั้งสี่สูตรมีค่าการบวมตัวที่อุณหภูมิ 37°C น้อยกว่าการบวมตัวที่อุณหภูมิ 23°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลสมีการละลายมากขึ้นและพันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างเกิดการผันกลับเร็วขึ้นทำให้เจลเกิดการเสียสภาพได้เร็วและบวมตัวได้น้อย

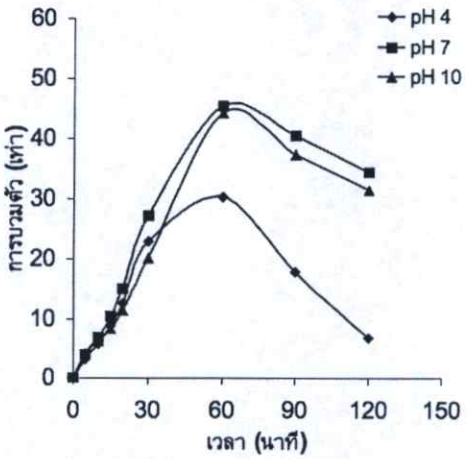
4.2.4 พฤติกรรมการบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG



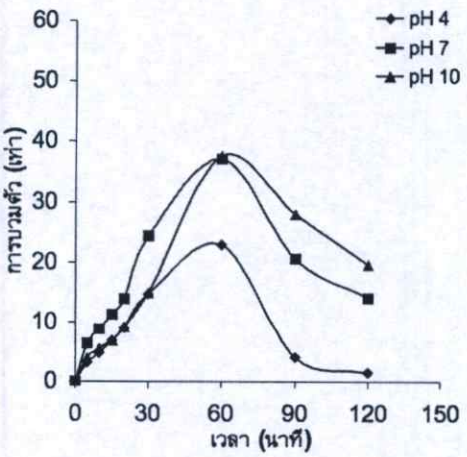
(ก) A1C3G6-10



(ข) A3C1G6-10



(ค) A1C3G6-6



(ง) A3C1G6-6

รูปที่ 4.20 การบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG

จากรูปที่ 4.20 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล ACG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10 และ A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 ใกล้เคียงกับการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 10 ประมาณ 50 เท่า แต่การบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 มีค่าลดลง คือ มีค่าการบวมตัวประมาณ 35 เท่า ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเริ่มเสียสภาพเมื่อบวมตัวในสภาวะต่างๆ ที่เวลาใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร A4G6-10 และสูตร C4G6-10 พบว่าไฮโดรเจล ACG มีค่าการบวมตัวดีขึ้น

จากรูปที่ 4.20 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล ACG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-6 มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10 ประมาณ 45 เท่า และมีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 ประมาณ 30 เท่า ไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-6 มีแนวโน้มการบวมตัวเช่นเดียวกับสูตร A1C3G6-6 แต่มีค่าต่ำกว่า กล่าวคือ มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10 ประมาณ 40 และมีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 ประมาณ 20 เท่า ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเริ่มเสียสภาพเมื่อบวมตัวในสภาวะต่างๆ เท่ากัน คือ หลังจาก 60 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับสูตร A4G6-6 และสูตร C4G6-6 พบว่าไฮโดรเจล ACG มีค่าการบวมตัวดีขึ้น

จากรูปที่ 4.20 ไฮโดรเจล ACG มีแนวโน้มในการบวมตัวเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG และ CG โดยไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวในสารละลายที่สภาวะเป็นกลางใกล้เคียงกับการบวมตัวในสารละลายที่สภาวะเบส แต่ค่าการบวมตัวลดลงเมื่อบวมตัวในสารละลายที่สภาวะกรด และการเสียสภาพเจลเกิดเร็วขึ้นเมื่อบวมตัวในสารละลายที่สภาวะกรด เนื่องจากโครงสร้างของสารตั้งต้นทั้งสองถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปกรดซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำจึงไม่เอื้อต่อการบวมตัวของเจล และในสารละลายกรดบอเรตจะเกิดการผันกลับเร็วขึ้น ทำให้เจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง นอกจากนี้ไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีแนวโน้มในการบวมตัวที่ดีกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมาก

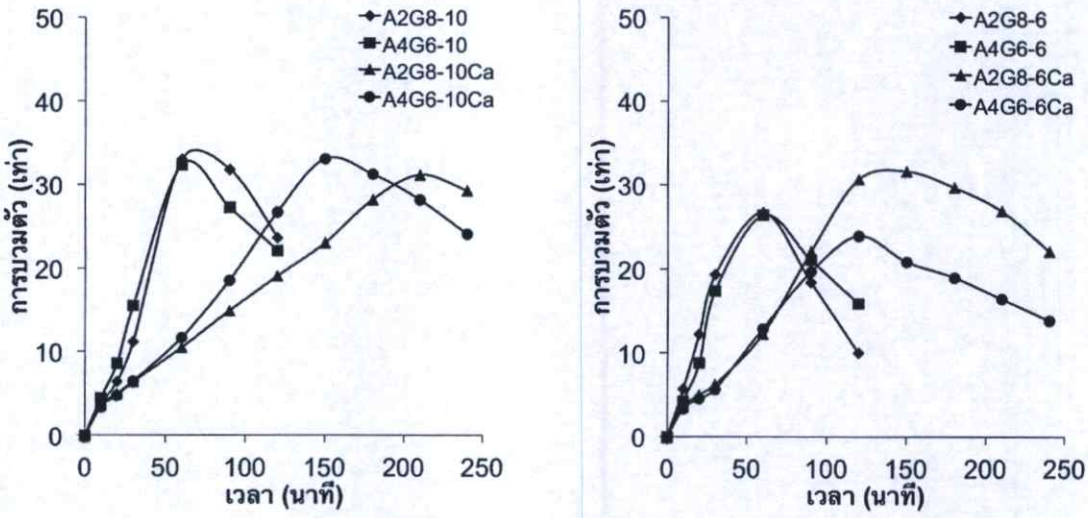
4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไก

ไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไกนี้ การเชื่อมโยงในกลไกสองเตรียมโดยการแช่ไฮโดรเจลแห้งที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กลงในสารละลาย $CaCl_2$ โดยใช้ความเข้มข้นของ $CaCl_2$ เท่ากับ 0.1 โมลาร์เป็นเวลา 30 นาที โดยพิจารณาเลือกใช้ความเข้มข้นดังกล่าวจากพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลาย $CaCl_2$ พบว่าไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีความสามารถการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไก ในกลไกแรกเป็นการเชื่อมโยงด้วยบอแร็กและกลไกที่สองเป็นการเชื่อมโยงด้วยไดวาเลนต์ คือ Ca^{2+} ที่ได้จากการแตกตัวของ $CaCl_2$ การเชื่อมโยงดังกล่าวเป็นการเชื่อมโยงด้วยแรงทางประจุ โดย Ca^{2+} จะเข้าไปแทนที่ Na^+ ที่อยู่บนโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

4.3.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (AG-Ca) และไฮโดรเจล CG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (CG-Ca)

ไฮโดรเจล AG-Ca



(ก) บอแร็ก 1.0% w/v

(ข) บอแร็ก 0.6 % w/v

รูปที่ 4.21 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 4.21 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG-Ca โดยกลไกแรกเชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A4G6-10Ca และ สูตร A2G8-10Ca มีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 30 เท่า แต่สูตร A2G8-10Ca สามารถคงสภาพเจลไว้ได้นานกว่า โดยเริ่มเสียสภาพเจลหลังจาก 210 นาทีไปแล้ว แต่สูตร A4G6-10Ca เริ่มเสียสภาพเจลเมื่อนาทีที่ 150 เนื่องจากสูตร A4G6-10Ca มีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตมากกว่าทำให้เมื่อเจลเกิดการผันกลับการละลายออกมีผลมากกว่าสูตร A2G8-10Ca

เมื่อเปรียบเทียบกับ A2G8-10 และ A4G6-10 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วยบอแร็ก พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 30 เท่า แต่ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นานกว่า เนื่องมาจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย Ca^{2+} จะเกิดพันธะกับหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) โดยเข้าไปแทนที่ Na^+ ที่มีอยู่บนสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนตทำให้มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากกว่าการเชื่อมโยงด้วยบอเรตเพียงอย่างเดียว การเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดพันธะของ Ca^{2+} กับ COO^- ทำให้เจลยังคงความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้แม้บอเรตจะเริ่มหลุดออกจากโครงสร้างแล้ว

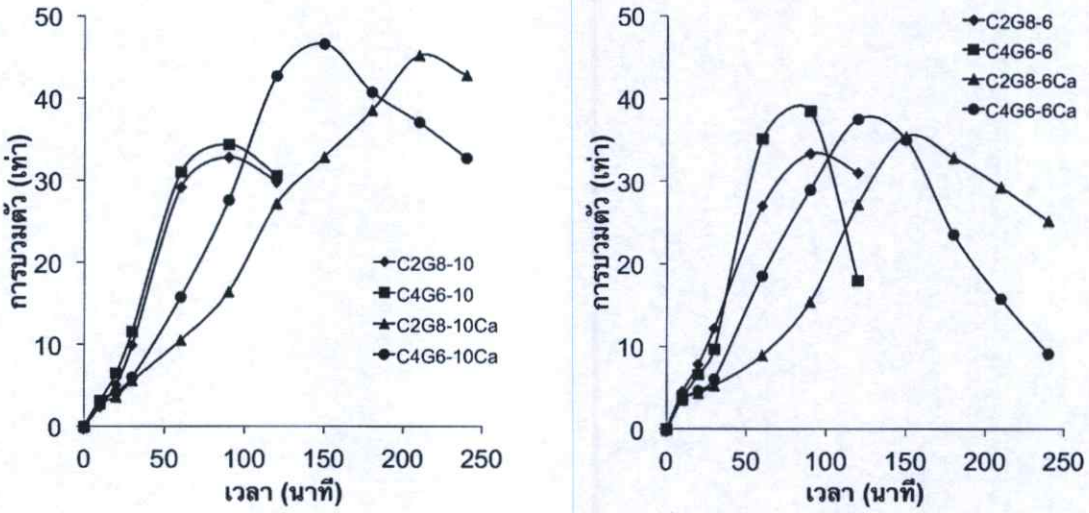
จากรูปที่ 4.21 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AC-Ca โดยกลไกแรกเชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A2G8-6Ca มีค่าการบวมตัวสูงสุดที่ 31 เท่า สูตร A4G6-6Ca ที่มีค่าการบวมตัวสูงสุด 24 เท่า โดยสูตร A2G8-10Ca เริ่มเสียสภาพเมื่อนาทีที่ 150

โดยสามารถคงสภาพเจลได้นานกว่าสูตร A4G6-6Ca เนื่องจากมีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตมากกว่าทำให้พันธะภายในโครงสร้างของเจลเกิดการผันกลับ การละลายออกของโซเดียมอัลจิเนตจึงมีผลมากกว่าสูตร A2G8-6Ca

เมื่อเปรียบเทียบกับ A2G8-6 และ A4G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วยบอแร็ก พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกัน แต่ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นานกว่าเนื่องมาจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย Ca^{2+}

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.21 ไฮโดรเจลสูตร A2G8-10Ca และสูตร A4G6-10Ca มีค่าการบวมตัวดีกว่าและคงสภาพเจลได้นานกว่าไฮโดรเจลสูตร A2G8-6Ca และสูตร A4G6-6Ca และเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่าไฮโดรเจลทั้งสองกลุ่มมีการบวมใกล้เคียงกัน แต่ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพเจลได้นานขึ้น

ไฮโดรเจล CG-Ca



(ก) บอแร็ก 1.0% w/v

(ข) บอแร็ก 0.6% w/v

รูปที่ 4.22 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.22 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล CG-Ca โดยกลไกแรกเชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร C4G6-10Ca และ C2G8-10Ca มีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 45 เท่า แต่สูตร C2G8-10Ca สามารถคงสภาพความเป็นเจลได้นานกว่าสูตร C4G6-10Ca เนื่องจากมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากกว่าทำให้พันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับ การละลายออกของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงมีผลมากกว่าสูตร C2G8-10Ca

เมื่อเปรียบเทียบกับ C2G8-10 และ C4G6-10 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วยบอแร็ก พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวมตัวมากกว่าและคงสภาพเจลได้นานกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว ทั้งนี้เนื่องจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย Ca^{2+} ทำให้โครงสร้างมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้นกว่าการเชื่อมโยงด้วยบอเรตเพียงอย่างเดียว และการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้เจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้แม้บอเรตจะเริ่มหลุดออกจากโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.22 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล CG-Ca โดยเชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร C4G6-6Ca และ C2G8-6Ca มีการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 35 เท่า โดยไฮโดรเจลสูตร C2G8-10Ca เริ่มเสียสภาพหลังนาทีที่ 150 โดยสามารถคงสภาพเจลได้นานกว่าสูตร C4G6-10Ca ซึ่งเริ่มเสียสภาพเจลหลังนาทีที่ 120 เนื่องจากสูตร C4G6-6Ca มีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากกว่าทำให้พันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับ ดังนั้นการละลายออกของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในสูตร C4G6-6Ca จึงมีผลมากกว่าสูตร C2G8-6Ca

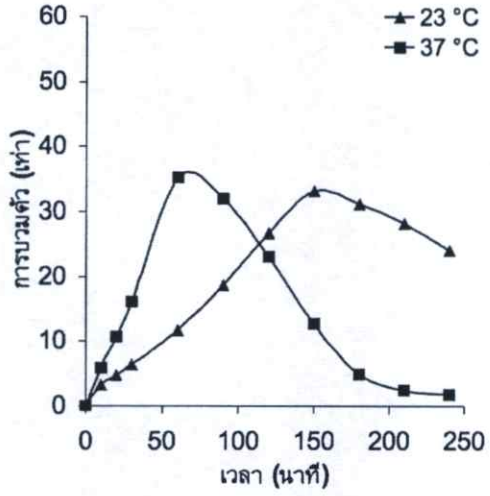
เมื่อเปรียบเทียบกับ C2G8-6 และ C4G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วยบอแร็ก พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกัน แต่ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นานกว่าเนื่องมาจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย Ca^{2+}

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.22 ไฮโดรเจล CG-Ca ที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มเข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าการบวมตัวที่ดีกว่าและคงสภาพเจลได้นานกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย Ca^{2+} มีค่าการบวมใกล้เคียงกัน และเนื่องจากโครงสร้างของไฮโดรเจลมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นทำให้สารตั้งต้นละลายออกจากโครงสร้างได้ยาก ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกจึงสามารถคงสภาพได้ดีกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว

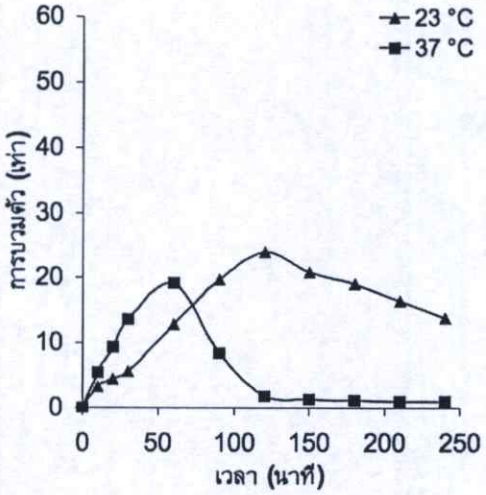
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.21 และรูปที่ 4.22 พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกมีการเสียสภาพเจลช้ากว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียว แต่มีค่าการบวมตัวสูงสุดใกล้เคียงกัน เนื่องจากในขั้นตอนของการเชื่อมโยงกลไกที่สองเป็นการแช่ไฮโดรเจลแห้งลงในสารละลาย $CaCl_2$ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกลไกที่สองที่พื้นผิวด้านนอก ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างนานขึ้น เนื่องจากที่พื้นผิวด้านนอกมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงสูง แต่เมื่อน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้ถึงจุดสูงสุดแล้วพันธะภายในโครงสร้างจึงเริ่มเกิดการผันกลับ เจลจึงเริ่มเกิดการเสียสภาพ ส่งผลให้ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกเสียสภาพช้ากว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียวแต่มีค่าการบวมตัวสูงสุดใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 ไฮโดรเจล CG-Ca มีความสามารถในการบวมตัวที่ดีกว่าไฮโดรเจล AG-Ca เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} ได้ดีกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงทำให้ไฮโดรเจล AG-Ca มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากกว่าไฮโดรเจล CG-Ca จึงทำให้บวมตัวได้ยาก นอกจากนี้ยังพบว่าสูตรที่มีปริมาณกัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่บวมตัวดี จึงได้เลือกสูตร A4G6-10Ca, A4G6-6Ca, C4G6-10Ca และ C4G6-6Ca ไปศึกษาการบวมตัวในปัจจัยอื่นต่อไป

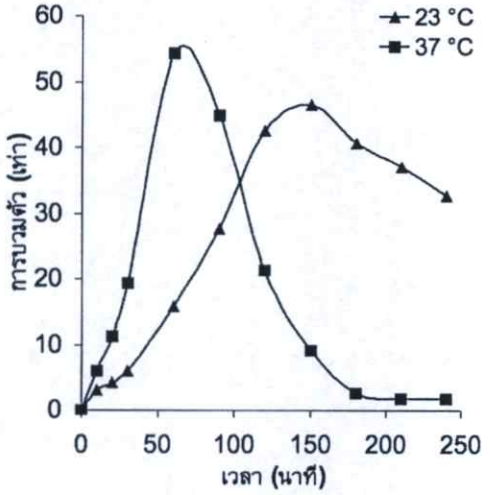
4.3.2 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca



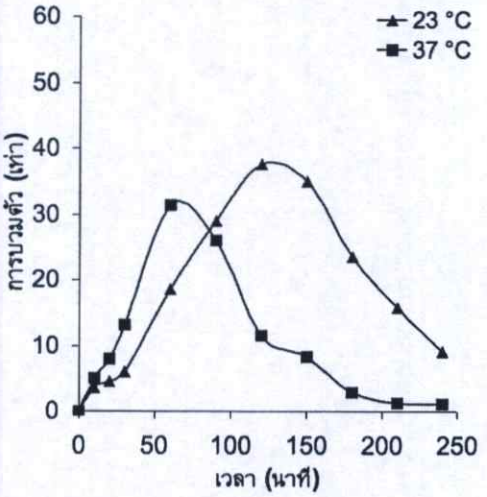
(ก) A4G6-10Ca



(ข) A4G6-6Ca



(ค) C4G6-10Ca



(ง) C4G6-6Ca

รูปที่ 4.23 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca

จากรูปที่ 4.23 (ก) และ (ข) ไฮโดรเจลสูตร A4G6-10Ca การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ประมาณ 35 เท่า ซึ่งมากกว่าสูตร A4G6-6Ca ที่มีการบวมตัวประมาณ 20 เท่า เพราะสูตร A4G6-10Ca มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมาก แม้พันธะภายในโครงสร้างเจลจะเกิดการผันกลับเมื่อมีน้ำแทรกเข้ามาในโครงสร้าง แต่มีการละลายออกของโซเดียมอัลจิเนตน้อยทำให้เจลยังคงบวมตัวได้ การบวมตัวที่อุณหภูมิ 37°C ทำให้ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเสียสภาพเร็วกว่าการบวมตัวที่อุณหภูมิ 23°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้บอเรตผันกลับเร็วและโซเดียมอัลจิเนตละลายออกจากโครงสร้างได้มากขึ้น การเสียสภาพเจลจึงเกิดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ระหว่างไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว คือ สูตร A4G6-10 และ A4G6-6 กับไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไก คือ สูตร A4G6-10Ca และ A4G6-6Ca พบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกมีการบวมตัวที่ดีกว่าและสามารถคงสภาพเจลได้นานกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว เนื่องจากมีการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นทำให้โซเดียมอัลจิเนตหลุดออกจากโครงสร้างได้ยากขึ้น

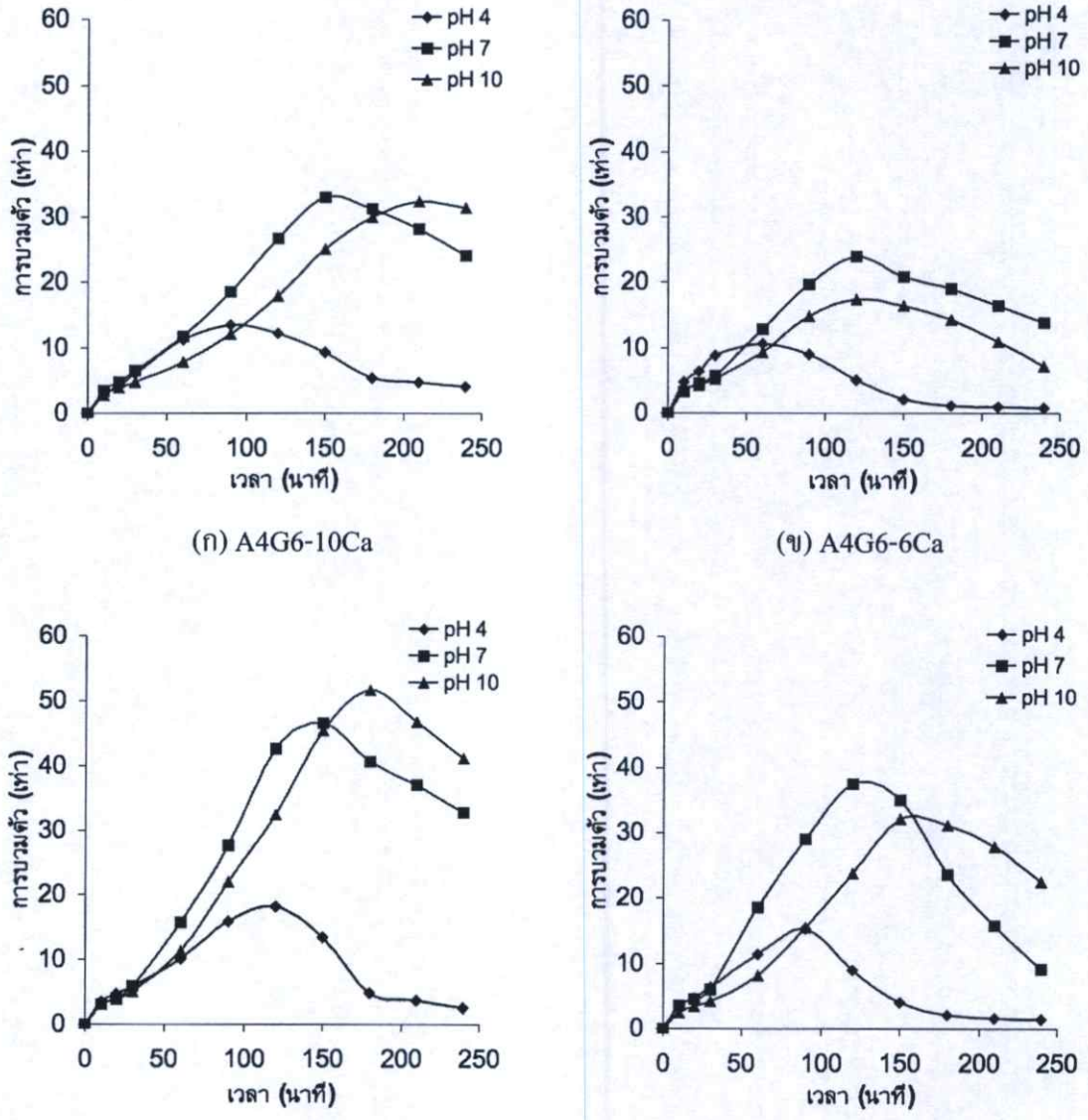
จากรูปที่ 4.23 (ค) และ (ง) ไฮโดรเจลสูตร C4G6-10Ca มีการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ประมาณ 55 เท่า ซึ่งมากกว่าสูตร C4G6-6Ca ที่มีการบวมตัวประมาณ 30 เท่า เนื่องจากสูตร C4G6-6Ca มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงน้อยกว่าทำให้เมื่อเจลเกิดการผันกลับโซเดียมคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลสจึงละลายออกจากโครงสร้างได้มากทำให้การบวมตัวมีค่าน้อย การบวมตัวที่อุณหภูมิ 37°C ทำให้ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเสียสภาพเจลเร็วว่าการบวมตัวที่อุณหภูมิ 23°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้บอเรตสามารถผันกลับได้เร็วและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายออกจากโครงสร้างได้มากขึ้น การเสียสภาพเจลจึงเกิดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ระหว่างไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว คือ สูตร C4G6-10 และ C4G6-6 กับไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไก คือ สูตร C4G6-10Ca และ C4G6-6Ca พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพเจลไว้ได้นานกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงเพียงกลไกเดียว เนื่องจากมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นทำให้โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหลุดออกจากโครงสร้างยากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับไฮโดรเจล AG-Ca

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรเจล AG-Ca กับไฮโดรเจล CG-Ca พบว่าไฮโดรเจล CG-Ca สามารถบวมตัวได้ดีกว่าไฮโดรเจล AG-Ca เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} ได้ดีกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงทำให้ไฮโดรเจล AG-Ca มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากกว่าไฮโดรเจล CG-Ca จึงทำให้บวมตัวได้ยาก และเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโซ-เดียมอัลจิเนตสามารถละลายน้ำดีกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงทำให้โซเดียมอัลจิเนตละ-ลายออกจากโครงสร้างมากกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

4.3.3 พฤติกรรมการบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca

การบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบเชื่อมโยงสองกลไก แสดงดังรูปที่ 4.21



(ก) A4G6-10Ca (ข) A4G6-6Ca

(ค) C4G6-10Ca (ง) C4G6-6Ca

รูปที่ 4.24 การบวมตัวที่สภาวะกรด-เบสเริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจลของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca

จากรูปที่ 4.24 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG-Ca ที่ pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 พบว่าการบวมตัวที่สภาวะกรดของไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 10 เท่า ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการบวมที่สภาวะเป็นกลางและสภาวะเบส การบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10 ของสูตร A4G6-10Ca มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 35 เท่า ซึ่งมีค่าสูงกว่าสูตร A4G6-6Ca ที่มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10 ประมาณ 25 เท่า

จากรูปที่ 4.24 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล CG-Ca ที่ pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 พบว่าการบวมตัวที่สภาวะกรดของไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 15 เท่า ซึ่งมีค่าน้อยกว่าการบวมที่สภาวะเป็นกลางและสภาวะเบส การบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10 ของสูตร C4G6-10Ca มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 50 เท่า และมีค่าการบวมตัวสูงกว่าสูตร C4G6-6Ca ที่มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10 ประมาณ 40 เท่า

จากรูปที่ 4.24 ค่าการบวมตัวที่สภาวะเป็นกลาง (pH เริ่มต้น 7) ใกล้เคียงกับค่าการบวมตัวที่สภาวะเบส (pH เริ่มต้น 10) และค่าการบวมตัวลดลงเมื่อบวมตัวที่สภาวะกรด (pH เริ่มต้น 4) เนื่องจากในสภาวะกรด H^+ ในสารละลายเข้าจับกับหมู่คาร์บอกซิเลตบนสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้สารทั้งสองอยู่ในรูปกรดซึ่งไม่ละลายน้ำและ H^+ สามารถจับกับบอเรตทำให้พันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับได้ ดังนั้นการบวมตัวที่สภาวะกรดจึงมีค่าต่ำกว่าที่สภาวะเป็นกลางและเบสอย่างชัดเจน

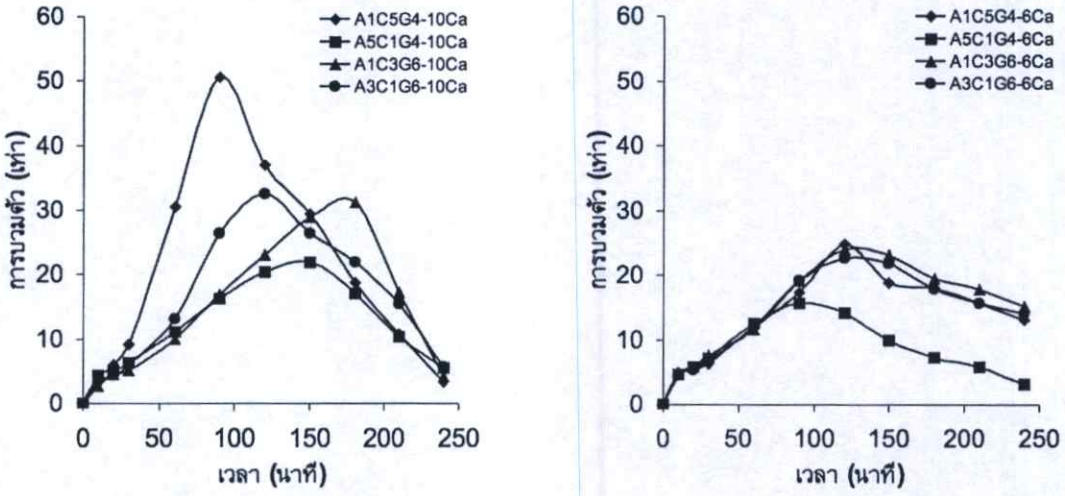
ไฮโดรเจล CG-Ca มีแนวโน้มการบวมตัวดีกว่าไฮโดรเจล AG-Ca เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} ได้ดีกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้ไฮโดรเจล AG-Ca มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากกว่าไฮโดรเจล CG-Ca จึงบวมตัวได้น้อย นอกจากนี้ ไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยงในกลไกแรกมีแนวโน้มค่าการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากสารตั้งต้นสามารถละลายออกจากโครงสร้างได้น้อยกว่าเมื่อพันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับ

เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกกับไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวมตัวสูงสุดดีกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว และไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพเจลได้นานขึ้น

4.4 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไก

ไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไก การเชื่อมโยงในกลไกที่สองเตรียมโดยการแช่ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กลงในสารละลาย $CaCl_2$ โดยใช้ความเข้มข้นของ $CaCl_2$ เท่ากับ 0.1 โมลาร์เป็นเวลา 30 นาที โดยพิจารณาเลือกใช้ความเข้มข้นดังกล่าวเช่นเดียวกับการเตรียมไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบเชื่อมโยงสองกลไก กล่าวคือ พิจารณาจากพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลาย $CaCl_2$ ซึ่งไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีความสามารถในการบวมตัวใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ในสารละลาย $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

4.4.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (ACG-Ca)



(ก) บอแร็ก 1.0% w/v

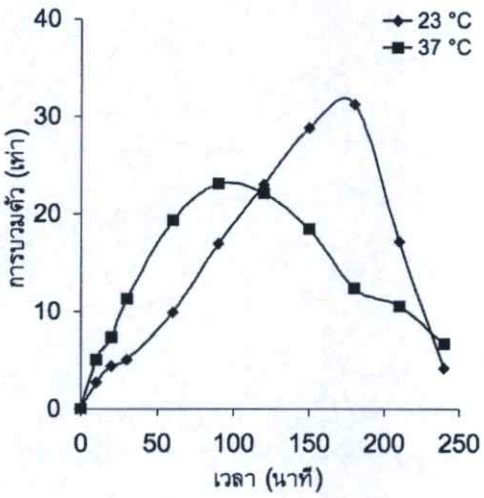
(ข) บอแร็ก 0.6% w/v

รูปที่ 4.25 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลแบบ ACG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่างๆ

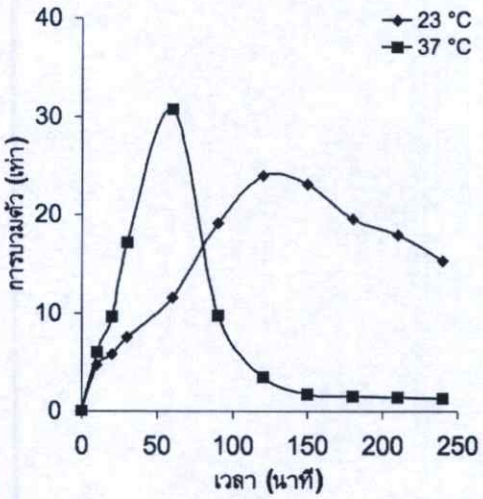
จากรูปที่ 4.25 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัมที่เชื่อมโยงสองกลไก โดยกลไกแรกใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าA1C5G4-10Ca มีค่าบวมตัว 50 เท่า และเจลเกิดการเสียสภาพเจลเร็วที่สุด สูตร A1C3G6-10Ca และ A3C1G6-10Ca มีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 30 เท่า แต่สามารถคงสภาพเจลได้นาน เนื่องจากมีปริมาณโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในโครงสร้างน้อยกว่าสูตร A1C5G4-10Ca ดังนั้นเมื่อพันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับสูตร A1C3G6-10Ca และ A3C1G6-10Ca จึงมีการละลายออกของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้อยกว่า ทำให้มีการบวมตัวที่ดีกว่าสูตร A1C5G4-10Ca

จากรูปที่ 4.25 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบระหว่างโซเดียม-อัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัมที่เชื่อมโยงสองกลไก โดยกลไกแรกใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 25 เท่า และสามารถคงสภาพเจลไว้ได้ใกล้เคียงกันถึงนาทีที่ 120 แต่สูตร A5C1G4-6Ca มีค่าการบวมตัว 15 เท่า เนื่องจากสูตร A5C1G4-6Ca มีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตในโครงสร้างมาก ซึ่งโซเดียม-อัลจิเนตสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} ได้ดี จึงมีการเชื่อมโยงด้วยกลไกที่สองมากทำให้โครง-สร้างของเจลมีความยืดหยุ่นต่ำ เจลจึงดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้น้อย และการที่ในสูตรเจลมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้อยทำให้การเข้ากันได้ของทั้งสามองค์ประกอบลดลง เป็นผลให้มีการละลายออกเร็วขึ้น เจลจึงเริ่มเสียสภาพเจลตั้งแต่นาทีที่ 90 ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งมีขนาดสั้นกว่าสายโซ่โมเลกุลของโซเดียมอัลจิเนตทำหน้าที่คล้ายพลาสติไซเซอร์ช่วยให้มีสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนตแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ของกัวร์กัมได้ดีขึ้น ดังนั้นเมื่อมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในสูตรเจลน้อยจึงส่งผลให้ความเข้ากันได้ของทั้งสามองค์ประกอบลดลง เจลจึงเกิดการเสียสภาพได้เร็ว

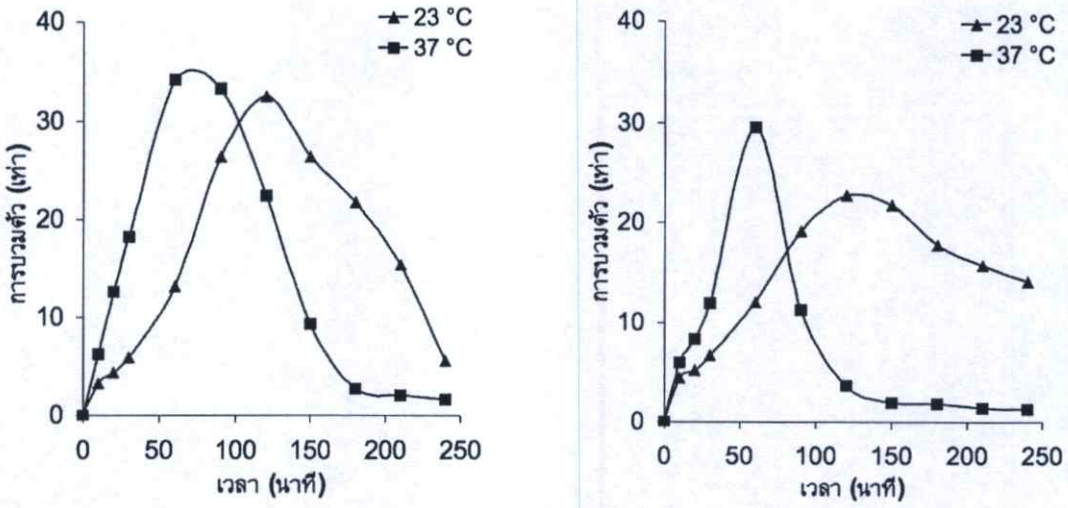
4.4.2 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG-Ca



(ก) A1C3G6-10Ca



(ข) A1C3G6-6Ca



(ค) A3C1G6-10Ca (ง) A3C1G6-6Ca

รูปที่ 4.26 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG-Ca

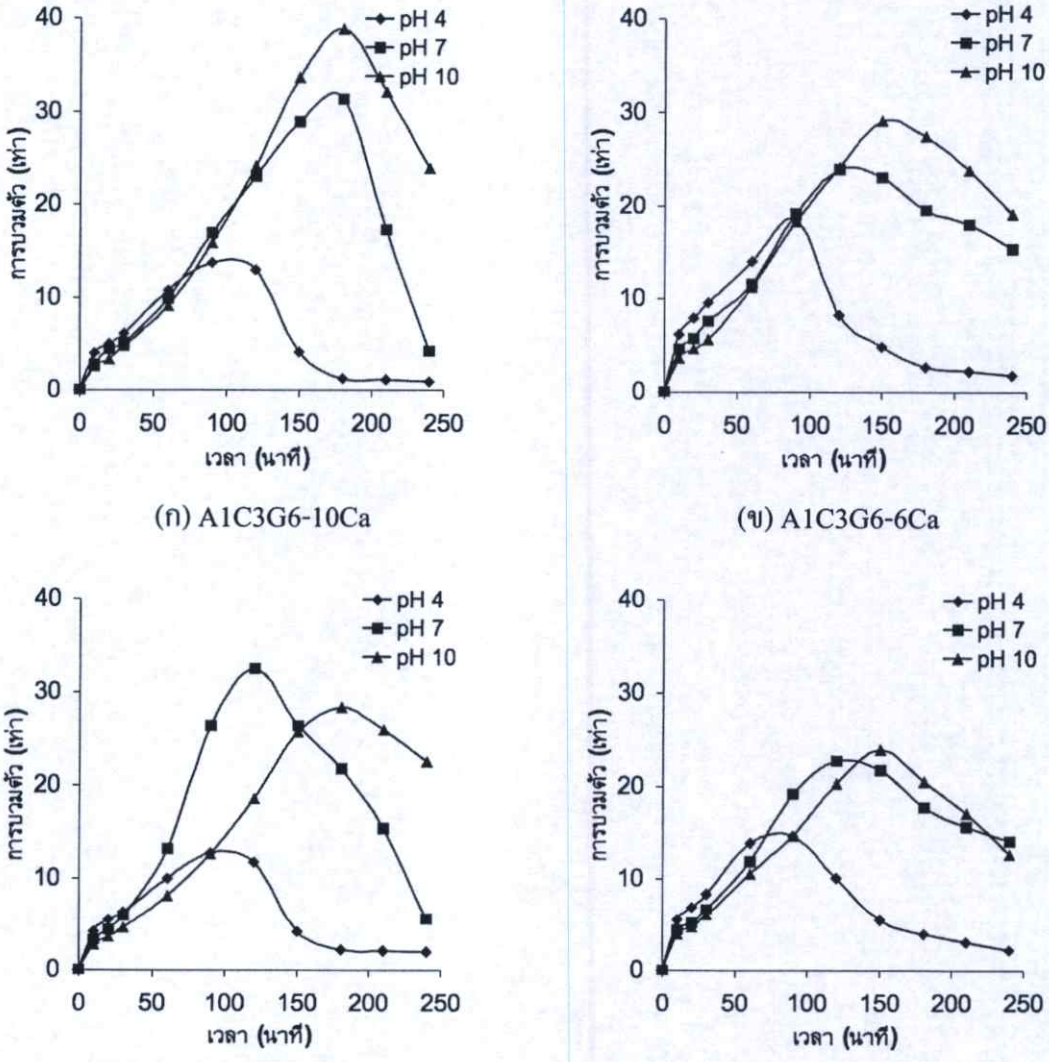
จากรูปที่ 4.26 (ก) และ (ข) ไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-10Ca มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ประมาณ 35 เท่า ซึ่งมากกว่าสูตร A3C1G6-6Ca ที่มีค่าการบวมตัวประมาณ 30 เท่า เนื่องจาก A3C1G6-10Ca มีการเชื่อมโยงในกลไกแรกมากกว่าทำให้เจลสามารถขยายตัวได้มาก ค่าการบวมตัวจึงสูง ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัวต่ำลงเมื่อเทียบกับการบวมตัวที่อุณหภูมิ 23°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการละลายของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสดีขึ้นทำให้ละลายออกจากโครงสร้างเจลได้ง่าย และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นบอเรตสามารถเกิดการผันกลับได้เร็วทำให้พันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 23°C การละลายออกของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงมีผลทำให้เจลเสียสภาพ

เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ของไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10Ca และ A1C3G6-6Ca ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกกับไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10 และ A1C3G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 25 - 30 เท่า แต่ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพเจลไว้ได้นานกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว เนื่องจากมีความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย Ca^{2+} ทำให้เจลสามารถยึดโครงสร้างไว้ได้นานแม้บอเรตจะเกิดการผันกลับเมื่อมีน้ำแทรกเข้าสู่โครงสร้าง โดยสูตร A1C3G6-10Ca เริ่มเสียสภาพเจลหลังนาทีที่ 90 และสูตร A1C3G6-6Ca เริ่มเสียสภาพเจลหลังนาทีที่ 60 ในขณะที่ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียวเริ่มเสียสภาพเจลหลังนาทีที่ 30

จากรูปที่ 4.26 (ค) และ (ง) ไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-10Ca มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 37°C ประมาณ 30 เท่า ซึ่งมากกว่าสูตร A3C1G6-6Ca ที่มีค่าการบวมตัวประมาณ 25 เท่า เนื่องจาก A1C3G6-10Ca มีการเชื่อมโยงมากทำให้เจลสามารถขยายตัวดีส่งผลให้ค่าการบวมตัวสูง ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัวต่ำลงเมื่อเทียบกับการบวมตัวที่อุณหภูมิ 23°C เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายออกจากโครงสร้างเจลได้ง่าย รวมทั้งที่อุณหภูมิ 37°C มีการผันกลับของพันธะภายในโครงสร้างเร็วขึ้นส่งผลให้เมื่อการละลายออกมีผลต่อการบวมตัวมากกว่าการดูดซับน้ำ เจลจึงเสียสภาพ

เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ของไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-10Ca และ A3C1G6-6Ca ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกกับไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-10 และ A3C1G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวมตัวและความสามารถในการคงสภาพเจลที่ดีกว่า โดยไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวมตัวประมาณ 30-35 เท่าและเริ่มเสียสภาพเจลหลังนาทีที่ 60 ส่วนไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียวมีค่าการบวมตัวประมาณ 20-25 เท่า และเริ่มเสียสภาพเจลหลังนาทีที่ 30 เนื่องจากความหนาแน่นการเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย Ca^{2+} ส่งผลให้เจลสามารถขยายตัวได้ดีมากขึ้นเมื่อมีน้ำแทรกเข้ามาในโครงสร้างและยึดโครงสร้างไว้ได้นานขึ้น ทำให้ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นาน

4.4.3 พฤติกรรมการบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG-Ca



(ก) A1C3G6-10Ca (ข) A1C3G6-6Ca

(ค) A3C1G6-10Ca (ง) A3C1G6-6Ca

รูปที่ 4.27 การบวมตัวที่สภาวะกรด - เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG-Ca

จากรูปที่ 4.27 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล ACG-Ca ที่มีอัตราส่วนของ A : C : G เท่ากับ 1 : 3 : 6 พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10Ca มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 10 ประมาณ 40 เท่า ซึ่งสูงกว่าที่ pH เริ่มต้น 7 แต่การบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 มีค่าน้อยที่สุดประมาณ 15 เท่า ไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-6Ca มีแนวโน้มการบวมตัวเช่นเดียวกับสูตร A1C3G6-10Ca กล่าวคือ มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 10 ประมาณ 30 เท่า ซึ่งสูงกว่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 7 และมีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 ประมาณ 20 เท่า ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 10 สูงกว่าที่ pH เริ่มต้น 7 เนื่องจากองค์ประกอบทั้งสามในไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีความเข้ากันได้ดีมากกว่าสูตรอื่น ทำให้เจลสามารถบวมตัวได้ดีแม้จะมีการผันกลับของโครงสร้างเมื่อสารละลายมีค่า pH เริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น และไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเริ่มเสียสภาพที่ pH เริ่มต้น 4 ได้เร็วกว่าที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10

จากรูปที่ 4.27 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล ACG-Ca ที่มีอัตราส่วนของ A : C : G เท่ากับ 3 : 1 : 6 พบว่าไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-10Ca มีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 10 ประมาณ 35 เท่า และมีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 ประมาณ 13 เท่า ไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-6Ca มีแนวโน้มเช่นเดียวกันแต่มีค่าลดลง กล่าวคือมีค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 10 ประมาณ 25 เท่า และมีค่าการบวมตัวลดลงเมื่อบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเริ่มเสียสภาพที่ pH เริ่มต้น 4 ได้เร็วกว่าที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10

จากรูปที่ 4.27 ไฮโดรเจล ACG-Ca มีการบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4 ต่ำที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของสารตั้งต้นทั้งสองถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปกรดซึ่งไม่ละลายน้ำและพันธะภายในโครงสร้างเกิดการผันกลับเร็วขึ้น ส่งผลให้เจลดูดซับน้ำได้น้อย ดังนั้นการบวมตัวที่สภาวะกรดจึงมีค่าต่ำกว่าที่สภาวะเป็นกลางและเบสอย่างชัดเจน นอกจากนี้เมื่อเจลเกิดการผันกลับ ไฮโดรเจล ACG-Ca ที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ยังมีการเชื่อมโยงเหลือมากกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จึงสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจล ACG-Ca กับไฮโดรเจล ACG พบว่าไฮโดรเจลทั้งสองกลุ่มมีแนวโน้มในการบวมตัวเช่นเดียวกัน กล่าวคือไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวในสารละลายที่สภาวะเป็นกลางใกล้เคียงกับการบวมตัวในสารละลายที่สภาวะเบส แต่ในสารละลายที่สภาวะกรดการบวมตัวมีค่าลดลงและเจลเสียสภาพได้เร็วขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจล ACG-Ca ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวมตัวและการคงสภาพที่ดีกว่าไฮโดรเจล ACG ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว เนื่องจากไฮโดรเจล ACG-Ca มีการเชื่อมโยงมากขึ้นโดยการเชื่อมโยงของ Ca^{2+} ซึ่งการเชื่อมโยงด้วย Ca^{2+} ทำให้เจลสามารถดูดซับน้ำต่อไปได้แม้บอเรตเกิดการผันกลับ

เมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจล ACG-Ca กับไฮโดรเจล AG-Ca และ CG-Ca ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไก พบว่าไฮโดรเจล ACG-Ca ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีสามองค์ประกอบมีค่าการบวมตัวที่สภาวะต่างๆ ใกล้เคียงกับไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีสององค์ประกอบ แต่ไฮโดรเจล ACG-Ca สามารถคงสภาพเจลไว้ได้นานขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจลที่มีสามองค์ประกอบมีความเข้ากันได้ดีกว่าไฮโดรเจลที่มีสององค์ประกอบ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมจากโซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate : A) โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose : C) และกัวร์กัม (Guar gum : G) โดยใช้โซเดียมเททระบอเรต (บอแร็ก) และแคลเซียมคลอไรด์ เป็นสารเชื่อมโยง (Crosslinker) ไฮโดรเจลที่เตรียมได้แบ่งเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. ไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบเชื่อมโยงกลไกเดียว
2. ไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบเชื่อมโยงกลไกเดียว
3. ไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบเชื่อมโยงสองกลไก
4. ไฮโดรเจลระบบสามองค์ปะกอบเชื่อมโยงสองกลไก

โดยศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่ pH เริ่มต้น 7 อุณหภูมิ 23 และ 37 °C, สารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์, สารละลาย $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์ และที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 โดยมีข้อสรุปดังนี้

- ไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม มีแนวโน้มการบวมตัวในสภาวะต่างๆ ต่ำกว่าไฮโดร-เจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม
- ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0 และ 0.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- ไฮโดรเจลที่มีปริมาณกัวร์กัม 60 และ 80 % โดยน้ำหนัก มีการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจลที่มีปริมาณกัวร์กัม 20 และ 40 % โดยน้ำหนัก
- ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงขั้นตอนเดียวมีแนวโน้มการบวมตัวในสภาวะต่างๆ สูงกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองขั้นตอนแต่คงสภาพเจลได้ไม่ดี และไฮโดรเจลที่มีสามองค์ประกอบมีแนวโน้มการบวมตัวในสภาวะต่าง ๆ สูงกว่าไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ

ไฮโดรเจลที่มีการบวมตัวในน้ำกลั่นได้ดี ได้แก่

- สูตร C4G6-6 มีการบวมตัว 40 เท่า เริ่มเสียสภาพนาทีที่ 90
- สูตร A3C1G6-10 มีการบวมตัว 50 เท่า เริ่มเสียสภาพนาทีที่ 60
- สูตร C4G6-10Ca มีการบวมตัว 45 เท่า เริ่มเสียสภาพนาทีที่ 150
- สูตร A1C3G6-10Ca มีการบวมตัว 30 เท่า เริ่มเสียสภาพนาทีที่ 180

- การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ มีค่าน้อยกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น และค่าการบวมตัวลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ค่าการบวมตัวในสารละลายเข้มข้น 0.1 โมลาร์ > 0.25 โมลาร์ > 0.5 โมลาร์ แต่การคงสภาพเจลเป็นไปในทางตรงข้าม กล่าวคือ เสถียรภาพเจลในสารละลายเข้มข้น 0.5 โมลาร์ > 0.25 โมลาร์ > 0.1 โมลาร์ และไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบมีพฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl ดีกว่าไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ

- การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าน้อยกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลาย NaCl แต่เจลสามารถคงสภาพได้นานกว่าในน้ำกลั่นและสารละลาย NaCl และความเข้มข้นของสารละลาย $CaCl_2$ ที่เปลี่ยนจาก 0.1 โมลาร์ เป็น 0.25 โมลาร์ ไม่ส่งผลต่อค่าการบวมตัวและการคงสภาพเจลอย่างชัดเจน และไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบมีพฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ดีกว่าไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ

- การบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นค่า pH เริ่มต้น 7 ที่อุณหภูมิ 37 °C มีค่าน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 23 °C ไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบเชื่อมโยงสองกลไกมีพฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นค่า pH เริ่มต้น 7 ที่อุณหภูมิ 37 °C ดีที่สุด

- ค่าการบวมตัวและการคงสภาพเจลของไฮโดรเจลที่ค่า pH เริ่มต้น $4 < 7 \cong 10$ ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวมและคงสภาพเจลที่สภาวะกรด-เบสดีกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงขั้นตอนเดียว

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

พัฒนาไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ให้มีสมบัติตามที่ต้องการและให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง โดยทดสอบในสภาวะจำลองการใช้งาน เช่น เพื่อใช้งานในด้านการเกษตร ควรทดสอบการบวมตัวโดยการฝังดินแทนการแช่ในน้ำหรือสารละลายต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

[1] Nagashima, S. Ando, S. Tsukamoto, T. Ohshima H. and Makino, K. "Preparation of Monodisperse Poly(acrylamide-co-acrylic acid) Hydrogel Microspheres by a Membrane Emulsification Technique and their Size-dependent Surface Properties" **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces,** vol. 11, 1998. Pp. 47–56.

[2] Richter, A. Paschew, G. Klatt, S. Lienig, J. Arndt, K.F. and Adler, H.P. "Review on Hydrogel-based pH Sensors and Microsensors" **Sensors,** vol. 8, 2008. Pp. 561-581.

[3] Li, X. Wu, W. Wang, J. and Duan, Y. "The Swelling Behavior and Network Parameters of Guar gum/poly(acrylic acid) Semi-interpenetrating Polymer Network Hydrogels" **Carbohydrate Polymers,** vol. 66, 2006. Pp. 473–479.

[4] Chang, C. Duan, B. Cai, J. and Zhang, L. "Superabsorbent Hydrogels Based on Cellulose for Smart Swelling and Controllable Delivery" **European Polymer Journal,** vol. 46, 2010. Pp. 92–100.

[5] Pourjavadi, A. Barzegar, S. and Mahdavinia, G.R. "MBA-crosslinked Na-Alg/CMC as a Smart Full-polysaccharide Superabsorbent Hydrogels" **Carbohydrate Polymers,** vol. 66, 2006. Pp. 386–395.

[6] Nie, H. Liu, M. Zhan, F. and Guo, M. "Factors on the Preparation of Carboxymethylcellulose Hydrogel and its Degradation Behavior in Soil" **Carbohydrate Polymers,** vol. 58, 2004. Pp. 185–189.

[7] George, M. and Abraham, T.E. "pH Sensitive Alginate–guar gum Hydrogel for the Controlled Delivery of Protein Drugs" **International Journal of Pharmaceutics,** vol. 335, 2007. Pp. 123–129.

[8] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. "**ไฮโดรเจล (Hydrogels) เจลมหัศจรรย์.**" [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.nanotec.or.th/nanotec_th/view/index.php?c_id=96. 2550.

[9] Schacht, E.H. "Polymer Chemistry and Hydrogel Systems." **Journal of Physics: Conference,** no. 3, 2004. Pp. 22–28.

[10] Ratner, B.D. (1981). "Biomedical Application of Hydrogel; Review and Critical Appraisal. in D.F. Williams." **Biocompatibility of Clinical Implant Material,** vol. 2, 1981. Pp. 145-152.

[11] Lui, Y. Huglin, M.B. and Davis, T.P. "Preparation and Characterization of Some Linear Copolymer as Precursors to Thermoplastic Hydrogels" **European Polymer Journal,** vol. 30, 1994. Pp. 457-463.

[12] Babu, P.R. Sastry, I.P. Rose C. and Rao N.M. "Hydrogels Based on Gelation Poly(hydroxyethyl methacrylate) and Poly(butyl acrylate) Graft Gopolymer Imprenated with Fibrin" **Journal of Applied Polymer Science**, vol. 65, 1997. Pp. 555-560.

[13] Gudeman, L.F. and Peppas, N.A. "Preparation and Characterization of pH-sensitive, Interprenatrating Network of Pol(vinyl alcohol) and Poly(acrylic acid)" **Journal of Applied Polymer Science,** vol. 55, 1995. Pp. 919-928.

[14] Guenet, J. **Thermoreversible Gelation of Polymers and Biopolymers.** London : Academic Press. 1992.

[15] Liu, Y. Huglin, M.B. and Mao, R. "Characteristics of Copolymerisations Involving Dimethacrylamide and Swelling Behaviour of the Copolymers in Water" **Polymer,** vol. 37, 1996. Pp. 5069-5075.

[16] Seflon, M.V. and Yamamoto, Y. "Hofmann Degradation of Acrylamide Copolymer : Synthesis of Amine Function Thermoplastic Hydrogel" **Journal of Applied Polymer Science,** vol. 61, 1996. Pp. 351-358.

[17] Ahmad, M.B. and Huglin, M.B. "State of Water in Poly(methyl methacrylate-co-*N*-vinyl-2-pyrrolidone) Hydrogels During Swelling" **Polymer,** vol. 35, 1994. Pp. 1997-2000.

[18] Pathe, F.M. "Different states of water in hydrogels" **Macromolecles,** vol. 31, 1998. Pp. 6721-6723.

[19] ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ. **"ไบโอพอลิเมอร์."** [เอกสารการสอน]. 2553.

[20] Martin Chaplin. **"Guar Gum"** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.lsbu.ac.uk/water/hyagar.htmlagarose. 2553.

[21] ดุษฎี อุตภาพ. **"Carbohydrate Technology."** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/subject.html. 2553.

[20] Martin Chaplin. **"Guar Gum"** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.lsbu.ac.uk/water/hygua.html. 2553.

[23] Benhura, M. A. N. and Chidewe, C. "Characterization of the Polysaccharide Material that is Isolated From the Fruit of Cordia Abyssinica" **African Journal of Biochemistry Research,** vol. 5, 2011. Pp. 95-101.

[24] Martin Chaplin. **"Xanthan"** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.lsbu.ac.uk/water/hyxan.html. 2553.

[25] **"Silicones 7. Polymer Chemistry, Thermochemistry and Kinetics"** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://chemwiki.ucdavis.edu/xApproaches/ChemCases/Heat_and_Chemical_Resistant_Silicone_Rubber/Silicones_7._Polymer_Chemistry,_Thermochemistry_and_Kinetics. 2553.

[26] Martin Chaplin. **"Carboxymethyl cellulose"** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://www.lsbu.ac.uk/water/hycmc.html. 2553.

[27] Gliko-Kabir, I. Penhasi, A. and Rubinstein, A. "Characterization of Crosslinked Guar by Thermal Analysis" **Carbohydrate Research,** vol. 316, 1999. Pp. 6–13.

[28] Barbucci, R. Pasqui, D. Favaloro R. and Panariello, G. "A Thixotropic Hydrogel From Chemically Cross-linked Guar Gum: Synthesis, Characterization and Rheological Behaviour" **Carbohydrate Research,** vol. 343, 2008. Pp. 3058–3065.

[29] Coviello, T. Grassi, M. Palleschi, A. Bocchinfuso, G. Coluzzi, G. Banishoeib, F. and Alhaique, F. "A new Scleroglucan/borax Hydrogel: Swelling and Drug Release Studies" **International Journal of Pharmaceutics,** vol. 289, 2005. Pp. 97–107.

[30] Rasool, N. Yasin, T. Heng, J. and Akhter, Z. "Synthesis and Characterization of Novel pH-, Ionic Strength and Temperature-Sensitive Hydrogel for Insulin Delivery" **Polymer,** vol. 51, 2010. Pp. 687-1693.

[31] Zhang, K. Luo, Y. and Li, Z. "Synthesis and Characterization of a pH and Ionic Strength Responsive Hydrogel" **Soft Materials,** vol.5, 2007. Pp. 183-195.

[32] Hai Truong. **"Applications of Guar galactomannan in food and oil field industries"** [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : http://cheminfo2010.wikispaces.com/Hai+Truong-Final+Project. 2555.

ภาคผนวก ก

ตาราง ก 1 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล AG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนัก			
	A2G8-10	A4G6-10	A6G4-10	A8G2-10
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	2.7	2.8	4.4	6.0
10	3.6	4.4	6.3	8.4
15	4.9	6.2	8.6	11.3
20	6.4	8.5	11.5	14.2
30	11.1	15.5	18.0	16.9
60	33.0	32.3	26.4	14.9
90	31.8	27.2	12.5	11.3
120	23.6	22.1	4.2	7.7
เวลา (นาที)	บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนัก			
	A2G8-6	A4G6-6	A6G4-6	A8G2-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	3.2	2.5	4.4	5.3
10	5.7	4.2	6.2	8.1
15	8.5	6.1	8.8	12.7
20	12.1	8.7	11.8	15.3
30	19.3	17.4	19.3	18.7
60	26.7	26.4	27.5	15.2
90	18.4	21.0	14.7	9.5
120	9.9	15.8	2.2	2.6
เวลา (นาที)	บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนัก			
	A2G8-2	A4G6-2	A6G4-2	A8G2-2
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	4.0	4.5	5.5	7.1
10	5.0	7.6	8.2	10.8
15	6.8	11.2	11.6	13.3
20	9.7	12.8	14.9	15.3
30	17.1	15.3	16.2	15.2
60	18.3	11.0	5.9	8.0
90	9.8	5.6	1.7	2.2
120	4.2	1.8	1.3	1.1

ตาราง ก 2 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล CG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนัก			
	C2G8-10	C4G6-10	C6G4-10	C8G2-10
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.3	2.1	3.1	6.6
10	2.4	3.1	5.4	13.6
15	3.5	4.6	8.1	20.9
20	5.0	6.5	11.9	28.7
30	9.9	11.5	20.8	35.7
60	29.1	30.9	37.7	30.9
90	32.7	34.3	31.1	22.0
120	29.7	30.5	22.2	11.1
เวลา (นาที)	บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนัก			
	C2G8-6	C4G6-6	C6G4-6	C8G2-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	3.0	2.7	5.7	8.2
10	4.4	3.7	8.5	12.3
15	5.9	5.0	12.0	16.6
20	7.8	6.5	16.4	20.0
30	12.1	9.6	26.1	22.3
60	27.0	35.1	30.0	16.4
90	33.3	38.4	19.5	6.7
120	30.9	17.9	9.3	1.3
เวลา (นาที)	บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนัก			
	C2G8-6	C4G6-6	C6G4-6	C8G2-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	5.8	6.0	8.8	18.4
10	7.4	8.9	13.1	25.8
15	9.8	11.9	16.6	28.3
20	13.2	15.1	18.9	27.0
30	20.1	15.6	21.9	26.3
60	17.3	8.5	11.3	18.8
90	6.1	2.9	5.5	6.9
120	2.1	1.1	2.4	2.5

ตาราง ก 3 การบวมตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล AG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา(นาที)	NaCl เข้มข้น 0.1 โมลาร์			
	A2G8-10	A4G6-10	A2G8-6	A4G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.9	3.7	3.0	2.7
20	2.6	4.3	3.7	3.4
30	3.4	5.3	4.3	4.0
60	4.6	6.8	5.2	5.3
90	6.6	9.5	9.6	7.4
120	10.2	14.5	13.3	12.0
150	15.9	20.3	18.5	16.0
180	23.0	24.0	20.5	21.6
210	21.3	22.4	21.2	22.0
240	20.1	20.1	20.6	18.9
270	17.9	16.2	18.2	15.8
300	15.5	11.7	15.0	12.0
เวลา (นาที)	NaCl เข้มข้น 0.25 โมลาร์			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.5	2.8	2.2	2.2
20	2.7	3.2	3.1	3.3
30	3.1	3.3	3.5	3.4
60	4.1	4.3	4.2	4.5
90	6.6	6.4	6.5	7.2
120	11.4	8.8	10.0	11.3
150	16.6	13.6	14.1	15.7
180	18.3	18.9	18.2	17.1
210	17.7	22.9	19.1	18.5
240	14.4	20.5	18.5	20.4
270	11.0	18.3	14.8	16.2
300	8.2	14.7	12.0	12.4

ตาราง ก 3 (ต่อ) การบวมตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล AG

เวลา(นาที)	การบวมตัว (เท่า)			
	NaCl เข้มข้น 0.5 โมลาร์			
	A2G8-10	A4G6-10	A2G8-6	A4G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.0	2.1	2.7	2.7
20	2.7	2.7	3.3	3.3
30	3.3	3.7	3.8	3.8
60	4.0	5.0	4.6	4.6
90	5.3	6.8	6.6	6.6
120	7.8	9.8	9.5	9.5
150	11.0	12.7	13.8	13.8
180	15.0	14.3	19.0	19.0
210	16.9	16.5	20.5	20.5
240	17.7	18.3	18.8	18.8
270	15.9	17.3	16.1	16.1
300	13.2	14.8	13.2	13.2

ตาราง ก 4 การบวมตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล CG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	NaCl เข้มข้น 0.1 โมลาร์			
	C2G8-10	C4G6-10	C2G8-6	C4G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.3	2.0	2.8	2.6
20	2.0	2.6	3.5	3.6
30	2.3	3.0	3.7	4.1
60	4.1	4.7	4.6	5.1
90	6.5	7.3	6.7	7.6
120	10.3	12.4	11.5	11.5
150	15.7	19.5	17.8	18.2
180	20.9	24.5	23.4	22.9
210	26.4	25.9	25.4	23.7
240	26.0	22.6	23.7	21.2
270	23.5	18.9	21.0	18.6
300	20.0	13.7	17.9	16.2
เวลา (นาที)	NaCl เข้มข้น 0.25 โมลาร์			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.8	2.7	2.4	3.2
20	2.2	3.0	2.9	3.4
30	2.2	3.3	3.4	3.7
60	3.2	4.2	4.2	4.6
90	5.3	5.9	6.0	6.1
120	8.3	9.5	9.5	9.1
150	14.1	13.0	14.8	17.6
180	19.5	17.1	20.6	25.4
210	23.9	19.4	24.3	26.9
240	23.1	20.5	24.0	24.0
270	20.1	17.1	20.4	19.2
300	16.6	14.5	17.1	14.8

ตาราง ก 4 (ต่อ) การบวมตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล CG

เวลา (นาที)	การบวมตัว (เท่า)			
	NaCl เข้มข้น 0.5 โมลาร์			
	C2G8-10	C4G6-10	C2G8-6	C4G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.1	2.8	2.7	2.6
20	2.7	3.1	3.3	3.1
30	2.8	3.3	3.5	3.2
60	3.5	3.9	4.4	4.2
90	5.2	5.2	5.5	5.6
120	7.8	7.1	8.0	8.1
150	12.9	10.7	11.9	12.6
180	17.7	16.4	16.8	17.7
210	21.0	19.0	20.2	18.1
240	21.8	19.8	19.5	14.7
270	17.9	18.5	17.3	11.5
300	14.6	15.0	15.5	9.6

ตาราง ก 5 การบวมตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล AG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	$CaCl_2$ เข้มข้น 0.1 โมลาร์			
	A2G8-10	A4G6-10	A2G8-6	A4G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.8	2.3	2.2	1.7
20	2.1	2.6	2.7	2.3
30	2.5	2.9	2.8	2.6
60	3.2	3.9	3.5	3.3
90	4.2	5.2	5.5	4.6
120	6.4	7.4	7.9	6.8
150	9.2	9.3	11.1	9.5
180	11.7	12.4	13.6	11.0
210	13.4	15.5	13.1	12.5
240	14.3	16.5	12.2	12.2
270	14.1	15.4	10.7	10.7
300	11.8	13.2	8.8	9.2
เวลา (นาที)	$CaCl_2$ เข้มข้น 0.25 โมลาร์			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.8	3.6	2.7	2.4
20	3.6	4.5	3.6	3.3
30	4.2	4.9	4.3	3.8
60	7.1	10.4	7.4	6.0
90	11.6	15.3	9.8	9.0
120	14.4	16.7	13.1	10.4
150	14.9	16.5	12.5	11.4
180	14.5	16.0	12.4	11.5
210	14.1	15.8	12.0	11.4
240	13.2	15.4	10.7	10.8
270	11.7	13.8	9.5	9.4
300	9.8	12.0	8.2	7.6

ตาราง ก 6 การบวมตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล CG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	$CaCl_2$ เข้มข้น 0.1 โมลาร์			
	C2G8-10	C4G6-10	C2G8-6	C4G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.1	1.7	2.0	2.0
20	1.4	2.2	2.6	2.6
30	1.7	2.3	3.2	3.0
60	3.0	3.4	5.7	4.8
90	4.7	5.3	8.6	8.4
120	6.3	7.7	12.7	13.0
150	9.9	10.3	16.4	17.9
180	14.1	12.4	19.2	21.2
210	17.1	14.9	19.0	21.1
240	18.4	17.9	18.2	19.7
270	18.0	17.2	16.3	17.2
300	16.1	15.3	14.3	13.7
เวลา (นาที)	$CaCl_2$ เข้มข้น 0.25 โมลาร์			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.0	2.5	2.9	2.7
20	3.1	3.1	5.0	4.2
30	4.4	4.7	6.7	5.8
60	6.7	8.9	10.1	12.3
90	10.3	14.1	11.8	17.8
120	12.6	17.4	13.5	21.5
150	15.3	18.8	16.6	23.1
180	16.1	19.1	16.7	23.2
210	16.0	18.7	16.6	21.4
240	15.7	17.6	16.0	20.0
270	14.7	16.1	14.6	17.6
300	12.8	13.8	12.8	15.0

ตาราง ก 7 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

เวลา (นาที)	การบวมตัว (เท่า)			
	A4G6-10	A4G6-6	C4G6-10	C4G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	8.6	6.4	6.4	7.5
10	15.5	10.2	11.9	12.2
15	22.2	14.9	17.8	17.2
20	24.4	19.1	22.4	21.5
30	23.6	20.9	24.8	28.5
60	18.9	17.1	23.3	24.2
90	11.7	8.2	17.7	10.9
120	4.3	2.4	9.3	4.7

ตาราง ก 8 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่ค่า pH เริ่มต้น 4 และ 10 ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	ค่า pH เริ่มต้น 4			
	A4G6-10	A4G6-6	C4G6-10	C4G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	3.5	2.4	2.1	2.3
10	5.5	3.6	3.3	3.4
15	7.0	5.1	4.6	5.1
20	9.8	6.7	6.4	7.2
30	14.1	11.0	11.5	12.0
60	12.2	9.7	27.6	24.0
90	1.3	4.2	17.9	10.8
120	0.7	1.0	8.3	2.0
เวลา (นาที)	ค่า pH เริ่มต้น 10			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	3.4	2.0	2.1	2.5
10	5.0	3.3	3.1	3.8
15	6.2	4.5	4.6	5.1
20	7.9	6.1	6.0	6.6
30	11.8	10.2	10.2	10.9
60	28.8	26.4	29.9	29.8
90	34.2	25.3	37.3	38.6
120	30.2	19.1	34.3	33.9

ภาคผนวก ข

ตาราง ข 1 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล ACG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนัก			
	A1C5G4-10	A5C1G4-10	A1C3G6-10	A3C1G6-10
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	5.2	3.3	2.5	2.9
10	8.6	5.6	4.1	4.8
15	12.8	8.1	5.9	6.7
20	18.6	12.6	8.9	8.5
30	36.5	25.3	17.7	16.1
60	41.7	37.1	48.2	49.9
90	33.8	25.0	45.4	48.2
120	22.6	15.1	43.7	42.1
เวลา (นาที)	บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนัก			
	A1C5G4-6	A5C1G4-6	A1C3G6-6	A3C1G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	11.2	8.4	3.8	6.3
10	16.8	12.1	6.8	8.8
15	29.1	17.9	10.5	11.3
20	35.5	23.9	15.1	13.9
30	34.5	30.2	27.2	24.3
60	27.6	28.6	45.4	37.0
90	20.6	24.6	40.5	20.6
120	14.6	20.5	34.4	14.0

ตาราง ข 2 การบวมตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล ACG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	NaCl เข้มข้น 0.1 โมลาร์			
	A1C3G6-10	A1C3G6-6	A3C1G6-10	A3C1G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.2	3.0	2.1	3.2
20	2.6	3.7	2.6	3.6
30	3.2	4.2	3.3	4.5
60	7.2	8.6	6.7	10.0
90	16.2	16.7	16.1	18.3
120	24.9	23.5	25.7	23.3
150	23.8	25.3	25.1	20.3
180	21.4	23.5	19.8	15.6
210	16.2	21.0	13.8	10.8
240	12.2	18.1	9.7	5.1
270	9.2	13.2	6.9	3.2
300	7.9	9.0	5.0	2.6
เวลา (นาที)	NaCl เข้มข้น 0.25 โมลาร์			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.9	2.5	2.0	3.0
20	2.1	3.1	2.3	3.1
30	2.4	3.4	2.5	3.3
60	3.4	4.9	3.5	4.7
90	4.2	9.0	5.4	9.3
120	7.0	14.2	10.7	18.3
150	11.6	20.9	17.0	23.2
180	18.5	28.9	23.0	26.9
210	26.0	28.7	25.4	26.5
240	25.6	24.8	24.1	22.4
270	20.8	21.1	21.0	17.8
300	15.4	15.6	16.6	13.5

ตาราง ข 2 (ต่อ) การบวมตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล ACG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	NaCl เข้มข้น 0.5 โมลาร์			
	A1C3G6-10	A1C3G6-6	A3C1G6-10	A3C1G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.9	2.3	1.8	2.7
20	2.1	2.4	2.0	3.0
30	2.2	2.8	2.1	3.3
60	2.8	3.9	2.7	4.6
90	4.6	6.0	4.5	7.1
120	8.0	10.6	8.0	10.4
150	13.2	14.7	13.4	14.1
180	18.3	19.5	18.0	16.8
210	22.7	22.0	22.2	18.1
240	25.3	22.6	21.4	16.8
270	21.5	23.6	18.4	15.0
300	16.1	19.0	14.4	12.7

ตาราง ข 3 การบวมตัวในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ของไฮโดรเจล ACG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	$CaCl_2$ เข้มข้น 0.1 โมลาร์			
	A1C3G6-10	A1C3G6-6	A3C1G6-10	A3C1G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	1.8	3.4	1.8	2.9
20	1.9	3.7	2.1	3.2
30	2.1	4.2	2.1	3.4
60	2.8	5.8	2.7	4.8
90	3.8	8.4	3.6	7.0
120	5.4	13.1	4.9	11.0
150	8.2	17.6	7.2	15.4
180	11.8	20.6	9.3	16.9
210	13.4	19.8	11.7	16.3
240	14.0	16.3	12.8	15.0
270	11.0	9.4	12.3	13.1
300	9.2	4.6	11.1	11.0
เวลา (นาที)	$CaCl_2$ เข้มข้น 0.25 โมลาร์			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.4	3.9	2.3	4.3
20	2.5	4.7	2.6	4.5
30	2.7	5.5	2.7	4.8
60	3.5	7.9	3.3	6.4
90	5.5	12.4	4.3	9.5
120	9.0	17.3	6.2	12.3
150	13.2	21.8	8.9	13.7
180	15.9	21.1	12.1	13.3
210	17.7	16.8	15.3	12.0
240	16.9	12.2	17.7	10.1
270	12.9	7.4	16.9	7.6
300	8.9	3.8	13.6	5.1

ตาราง ข 4 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ของไฮโดรเจล ACG

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	A1C3G6-10	A1C3G6-6	A3C1G6-10	A3C1G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	5.1	6.3	4.6	5.4
10	8.8	11.4	8.9	9.8
15	13.4	16.9	13.3	18.2
20	19.2	23.1	19.1	21.5
30	28.5	28.6	27.4	23.3
60	26.4	19.1	22.1	13.1
90	19.6	6.4	10.0	4.1
120	6.9	2.6	2.2	1.5

ตาราง ข 5 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่ค่า pH เริ่มต้น 4 และ 10

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	ค่า pH เริ่มต้น 4			
	A1C3G6-10	A1C3G6-6	A3C1G6-10	A3C1G6-6
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	2.3	3.1	2.1	3.1
10	3.4	5.7	3.0	4.7
15	5.5	8.8	4.4	6.8
20	7.9	12.5	6.0	9.0
30	16.9	22.9	10.5	14.6
60	36.5	30.3	32.1	22.9
90	25.1	17.7	30.8	4.0
120	14.9	6.7	18.2	1.4
เวลา (นาที)	ค่า pH เริ่มต้น 10			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	2.4	4.1	2.2	4.0
10	3.9	6.2	3.2	5.5
15	5.9	8.4	4.6	6.8
20	8.0	11.5	5.9	9.1
30	13.8	20.1	9.4	14.9
60	45.5	44.2	31.7	37.6
90	41.7	37.4	45.9	27.9
120	37.3	31.4	38.3	19.5

ภาคผนวก ค

ตาราง ค 1 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล AG-Ca

เวลา (นาที)	การบวมตัว (เท่า)			
	A2G8-10Ca	A4G6-10Ca	A2G8-6Ca	A4G6-6Ca
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	3.6	3.3	3.5	3.3
20	4.9	4.7	4.9	4.5
30	6.4	6.4	6.2	5.6
60	10.4	11.6	12.2	12.8
90	14.8	18.5	22.1	19.6
120	19.0	26.6	30.7	23.9
150	23.0	33.0	31.6	20.8
180	28.1	31.2	29.7	19.0
210	31.1	28.1	26.9	16.4
240	29.2	24.0	22.1	13.8

ตาราง ค 2 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล CG-Ca

เวลา (นาที)	การบวมตัว (เท่า)			
	C2G8-10Ca	C4G6-10Ca	C2G8-6Ca	C4G6-6Ca
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.7	3.1	3.4	3.5
20	3.6	4.1	4.3	4.6
30	5.5	5.9	5.2	6.0
60	10.5	15.7	8.9	18.5
90	16.3	27.5	15.3	28.9
120	27.1	42.6	27.2	37.4
150	32.7	46.5	35.3	35.0
180	38.4	40.6	32.8	23.5
210	45.0	36.9	29.2	15.7
240	42.6	32.6	25.2	9.1

ตาราง ค 3 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca

เวลา (นาที)	การบวมตัว (เท่า)			
	A4G6-10Ca	A4G6-6Ca	C4G6-10Ca	C4G6-6Ca
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	6.0	5.3	5.9	4.9
20	10.6	9.3	11.1	8.0
30	16.2	13.6	19.3	13.1
60	35.3	19.1	54.2	31.4
90	31.9	8.3	44.8	26.0
120	23.1	1.7	21.3	11.5
150	12.6	1.3	9.1	8.3
180	4.9	1.2	2.5	2.9
210	2.5	1.0	1.7	1.3
240	1.7	1.0	1.7	1.1

ตาราง ค 4 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่ค่า pH เริ่มต้น 4 และ 10 ของไฮโดรเจล AG-Ca และ ไฮโดรเจล CG-Ca

เวลา (นาที)	การบวมตัว (เท่า)			
	ค่า pH เริ่มต้น 4			
	A4G6-10Ca	A4G6-6Ca	C4G6-10Ca	C4G6-6Ca
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.9	4.7	3.6	3.4
20	4.2	6.3	4.7	4.6
30	5.9	8.8	5.8	6.4
60	11.2	10.5	10.2	11.4
90	13.4	9.0	15.9	15.3
120	12.2	5.0	18.2	9.0
150	9.3	2.0	13.4	4.0
180	5.3	1.1	4.9	2.0
210	4.7	0.9	3.7	1.6
240	4.0	0.7	2.7	1.5
เวลา (นาที)	ค่า pH เริ่มต้น 10			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.7	3.5	3.0	2.3
20	3.9	4.2	4.0	3.3
30	4.7	5.2	5.1	4.2
60	7.8	9.2	11.3	8.1
90	12.0	14.7	22.0	15.4
120	17.9	17.4	32.4	23.7
150	25.1	16.4	45.4	32.0
180	29.9	14.4	51.5	31.1
210	32.3	10.9	46.6	27.8
240	31.4	7.1	41.0	22.4

ภาคผนวก ง

ตาราง ง 1 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล ACG-Ca

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนัก			
	A1C5G4-10Ca	A5C1G4-10Ca	A1C3G6--10Ca	A3C1G6-10Ca
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	4.0	4.3	2.7	3.3
20	5.9	5.0	4.4	4.3
30	9.0	6.3	5.0	5.9
60	30.5	11.1	9.8	13.1
90	50.6	16.1	16.9	26.3
120	36.9	20.3	22.9	32.5
150	29.3	21.9	28.8	26.4
180	18.6	17.1	31.2	21.8
210	10.7	10.2	17.1	15.4
240	3.3	5.4	4.1	5.6
เวลา (นาที)	เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนัก			
	A1C5G4-6Ca	A5C1G4-6Ca	A1C3G6--6Ca	A3C1G6-6Ca
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	4.9	4.5	4.6	4.3
20	5.4	5.7	5.7	5.2
30	6.2	7.1	7.5	6.7
60	12.0	12.5	11.5	11.9
90	17.3	15.7	19.1	19.1
120	24.7	14.2	23.9	22.6
150	18.8	9.9	23.0	21.7
180	17.9	7.1	19.5	17.7
210	15.6	5.8	17.9	15.6
240	12.9	3.1	15.2	14.0

ตาราง ง 2 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ของไฮโดรเจล ACG-Ca

เวลา (นาที)	การบวมตัว (เท่า)			
	A1C3G6-10Ca	A1C3G6-6Ca	A3C1G6-10Ca	A3C1G6-6Ca
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	5.0	6.0	6.2	5.9
20	7.3	9.6	12.6	8.3
30	11.3	17.1	18.1	11.9
60	19.3	30.7	34.2	29.4
90	23.0	9.7	33.3	11.2
120	22.0	3.4	22.4	3.6
150	18.4	1.8	9.3	1.9
180	12.4	1.5	2.8	1.8
210	10.5	1.4	2.1	1.3
240	6.7	1.3	1.6	1.3

ตาราง ง 3 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่ค่า pH เริ่มต้น 4 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG-Ca

การบวมตัว (เท่า)				
เวลา (นาที)	ค่า pH เริ่มต้น 4			
	A1C3G6-10Ca	A1C3G6-6Ca	A3C1G6-10Ca	A3C1G6-6Ca
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	3.9	6.1	4.1	5.5
20	4.9	7.9	5.4	6.9
30	6.0	9.5	6.3	8.4
60	10.7	14.0	9.9	13.9
90	13.6	18.5	12.7	14.6
120	12.8	8.2	11.7	10.1
150	4.0	4.7	4.1	5.4
180	1.2	2.6	2.2	3.9
210	1.0	2.2	2.0	3.0
240	0.9	1.8	1.9	2.2
เวลา (นาที)	ค่า pH เริ่มต้น 10			
0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	2.5	3.6	2.7	3.9
20	3.3	4.6	3.5	4.7
30	4.7	5.6	4.5	6.0
60	9.0	11.2	8.1	10.5
90	15.7	18.3	12.6	14.6
120	24.0	24.1	18.6	20.2
150	33.6	29.1	25.6	23.9
180	38.8	27.4	28.3	20.4
210	32.0	23.8	25.9	17.1
240	23.8	19.0	22.5	12.7