สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

# การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจาก โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส / โซเดียมอัลจิเนต / กัวร์กัม

# Preparation and Swelling Behaviour of Sodium Carboxymethyl Cellulose / Sodium Alginate / Guar Gum Hydrogels

**ชื่อผู้วิจัย**

นายภัทธาวุธ มนต์วิเศษ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555

ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RCH
ภ 354ก
2555

.b.12022862
.i.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.137350
วัน.เดือน.ปี 22 มิ.ย. 2558

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2555 ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เรื่องการเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส / โซเดียมอัลจิเนต / กัวร์กัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ชื่อโครงการ** (ภาษาไทย) **การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส / โซเดียมอัลจิเนต / กัวร์กัม**

(ภาษาอังกฤษ) **Preparation and Swelling Behaviour of Sodium Carboxymethyl Cellulose / Sodium Alginate / Guar Gum Hydrogels**

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงิน 50,000 บาท ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2554 ถึง 30 กันยายน พ.ศ. 2555 ✓

ชื่อผู้วิจัย ผศ.ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โทร. 02-3298400-8411 ต่อ 341

**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 งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของสารตั้งต้นเมื่อปริมาณสารเชื่อมโยงเท่า กับ 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 ผลการทดสอบพบว่า ไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบสูตร A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 23°C สูงสุดที่ 50 เท่า และไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไกสูตร A1C3G6-10Ca สามารถคงสภาพเจลได้นานที่สุดที่เวลาการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 180 นาที การบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายเกลือพบว่าค่าการบวมตัวในน้ำกลั่น>NaCl>$CaCl_2$ และเจลคงสภาพได้นานที่สุดเมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ นอกจากนี้การบวมตัวมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มสูงขึ้น การบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C พบว่าเจลบวมตัวได้น้อยกว่า ที่อุณหภูมิ 23°C และเกิดการเสียสภาพเร็วขึ้น เมื่อทดสอบการบวมตัวในสภาวะกรด-เบสพบว่า ค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 < 7 ≅ 10 และที่ pH เริ่มต้น 4 เจลเกิดการเสียสภาพได้เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**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 $\cong$ 10 and stability of swollen hydrogels at initial pH 4 was also the least.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญเรื่อง


| | หน้า |
|---|---|
| กิตติกรรมประกาศ | 2 |
| บทคัดย่อภาษาไทย | 3 |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | 4 |
| สารบัญเรื่อง | 5 |
| สารบัญตาราง | 6 |
| สารบัญภาพ | 7 |
| 1. บทนำ | 9 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา | 9 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 10 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 10 |
| 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ | 11 |
| 1.5 ทฤษฎีและหลักการ | 11 |
| 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 22 |
| 2. วิธีการดำเนินงานวิจัย | 24 |
| 3. อภิปราย/วิจารณ์ผลการทดลอง | 30 |
| 4. สรุปผลการวิจัย | 68 |
| 5. เอกสารอ้างอิง | 70 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง


| | หน้า |
|---|---|
| ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัม แบบเชื่อมโยงกลไกเดียว | 25 |
| ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกัวร์กัม แบบเชื่อมโยงกลไกเดียว | 25 |
| ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว | 26 |
| ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก | 27 |
| ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก | 28 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ


| | หน้า |
|---|---|
| รูปที่ 1.1 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล | 15 |
| รูปที่ 1.2 อันตรกิริยาของไฮโดรเจลกับโมเลกุลของน้ำ | 15 |
| รูปที่ 1.3 โครงสร้างของอัลจิเนต | 17 |
| รูปที่ 1.4 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจิเนตแบบ Egg-box model | 18 |
| รูปที่ 1.5 โครงสร้างของกัวร์กัม | 19 |
| รูปที่ 1.6 โครงสร้างของเซลลูโลส | 20 |
| รูปที่ 1.7 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส | 20 |
| รูปที่ 3.1 การเกิดพันธะเมื่อใช้บอแร็กเป็นสารเชื่อมโยง | 31 |
| รูปที่ 3.2 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลสูตร A4G6-10 | 32 |
| รูปที่ 3.3 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นแตกต่างกัน | 33 |
| รูปที่ 3.4 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นแตกต่างกัน | 35 |
| รูปที่ 3.5 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล AG | 37 |
| รูปที่ 3.6 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล CG | 39 |
| รูปที่ 3.7 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล AG | 40 |
| รูปที่ 3.8 การเชื่อมโยงด้วย $Ca^{2+}$ เมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ | 41 |
| รูปที่ 3.9 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล CG | 42 |
| รูปที่ 3.10 การบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้ม 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล AG | 43 |
| รูปที่ 3.11 การบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้ม 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล CG | 44 |
| รูปที่ 3.12 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG | 45 |
| รูปที่ 3.13 การบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG | 46 |
| รูปที่ 3.14 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้สารละลายบอแร็ก 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร | 48 |
| รูปที่ 3.15 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้สารละลายบอแร็ก 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร | 49 |
| รูปที่ 3.16 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล ACG | 50 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญภาพ (ต่อ)


| | หน้า |
|---|---|
| รูปที่ 3.17 การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล ACG | 52 |
| รูปที่ 3.18 การบวมตัวในสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล ACG | 53 |
| รูปที่ 3.19 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG | 54 |
| รูปที่ 3.20 การบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG | 55 |
| รูปที่ 3.21 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่างๆ | 57 |
| รูปที่ 3.22 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่างๆ | 58 |
| รูปที่ 3.23 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca | 60 |
| รูปที่ 3.24 การบวมตัวที่สภาวะกรด-เบสเริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca | 62 |
| รูปที่ 3.25 การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลแบบ ACG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่างๆ | 63 |
| รูปที่ 3.26 การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG-Ca | 65 |
| รูปที่ 3.27 การบวมตัวที่สภาวะกรด - เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG-Ca | 66 |


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 1.บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก (Superabsorbent) เตรียมได้จากการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถบวมตัวในน้ำได้ดีหรือมอนอเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ ความสามารถในการดูดซับน้ำหรือบวมตัวของไฮโดรเจลเนื่องมาจากความยืดหยุ่น หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น -OH, -COOH, $-NH_2$ เป็นต้น รวมถึงปริมาตรอิสระภายใน สายโซ่โมเลกุล ไฮโดรเจลทางการค้าส่วนใหญ่เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ อาทิ พอลิเมทาคริเลต พอลิอะคริเลต พอลิอะคริลาไมด์ รวมถึงพอลิเมอร์ร่วม เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่างอะคริลาไมด์ กับกรดอะคริลิก [1] เป็นต้น ไฮโดรเจลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น ในทางการแพทย์ นำไปใช้เป็นวัสดุปิดแผล ใช้ในการทำศัลยกรรม รวมทั้งใช้บรรจุยาให้มีการปลดปล่อยได้ตามที่ ต้องการ ในการเกษตรที่ใช้โรยในดินเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้น ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ในผ้าอ้อม เด็กแบบใช้แล้วทิ้ง คอนแทคเลนส์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในงานเฉพาะทางที่ต้องการ ความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมที่ใช้งาน เช่น การใช้เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างหรืออุณหภูมิของสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลง [2] ดังนั้นไฮโดรเจลที่ใช้จึงต้องว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างหรืออุณหภูมิ ไฮโดรเจลที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นมีสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดีเยี่ยม แต่มอนอเมอร์ที่ตกค้างอยู่ในชิ้นงานนั้นเป็น พิษและเป็นสารก่อมะเร็ง การตกค้างของมอนอเมอร์จึงกลายเป็นปัญหาในการนำไปใช้งานทำให้ การเลือกใช้สารตั้งต้นที่ได้จากธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะลดปัญหาดังกล่าวได้ และเพื่อเป็น การลดการใช้มอนอเมอร์ จึงมีงานวิจัยมากมายที่ใช้สารตั้งต้นที่ได้จากธรรมชาติร่วมกับมอนอเมอร์ มาสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ร่วม เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิอะคริลิกแอซิดกับกัวร์กัม [3] เป็นต้น ต่อมาจึงมีการพัฒนาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมด อาทิ การเตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลสและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยมีอีพิคลอโรไฮดริน เป็นสารเชื่อมโยง [4], ไฮโดรเจลที่เตรียมจากการเชื่อมโยงโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยเมทิลบิสอะคริลาไมด์ (MBA) [5] เป็นต้น

เพื่อลดการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ในการเตรียมไฮโดรเจล ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากวัตถุดิบประเภทพอลิแซคคาไรด์ ได้แก่ โซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมไฮโดรเจล เนื่องจากไม่เป็นพิษ เป็นมิตร ต่อสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้ง่าย และสามารถละลายหรือบวมตัวในน้ำได้ดีเพราะในโครงสร้างมี หมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ คือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของสารตั้งต้นทั้งสามชนิด และหมู่คาร์บอกซิเลต $(-COO)^-$ ที่มีอยู่ในโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับน้ำของกัวร์กัมไม่มีผลของประจุเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงช่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้การบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายอิเล็กโตรไลต์คงรูปอยู่ได้ ประจุลบในรูปของหมู่คาร์บอกซิเลตในโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะช่วยให้สามารถเชื่อม โยงแบบประจุด้วยตัวเชื่อมโยงที่เป็นไดหรือไตรวาเลนต์ได้ [6-7] เช่น $Ca^{2+}$, $Al^{3+}$ เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซคคาไรด์ โดยแบ่งการเชื่อมโยงออกเป็นสองแบบ คือ การเชื่อมโยงแบบกลไกเดียวด้วยโซเดียมเททระบอเรตซึ่งเป็นการเชื่อมโยงหมู่ไฮดรอกซิล และการเชื่อมโยงแบบสองกลไกด้วยโซเดียมเททระบอเรตและแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งแคลเซียมคลอไรด์จะเชื่อมโยงด้วยแรงทางประจุกับหมู่คาร์บอกซิเลตของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส นอกจากนี้ยังได้แบ่งการเตรียมไฮโดรเจลออกเป็นสองระบบด้วย คือ ระบบสององค์ประกอบ (Binary system) ระหว่างโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกัวร์กัม และระบบสามองค์ประกอบ (Ternary system) ของโซเดียมอัลจิเนต, โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนขององค์ประกอบ ต่อความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 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

## 1.2วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลพอลิแซคคาไรด์มีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม และพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจล

## 1.3ขอบเขตการวิจัย

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิแซคคาไรด์ได้
2. ได้ไฮโดรเจลที่สามารถควบคุมพฤติกรรมการบวมตัวได้

## 1.5ทฤษฎีและหลักการ

### 1.5.1 ไฮโดรเจล (Hydrogel)

ไฮโดรเจล (Hydrogel) [8] เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้จนถึงจุดสมดุลโดยไม่เกิดการละลาย สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล คือ บวมตัวเมื่ออยู่ในน้ำและหดตัวได้เมื่อไม่มีน้ำ ซึ่งลักษณะของไฮโดรเจล จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ก่อนการดูดซับน้ำจะคล้ายผลึกควอร์ซ ชิ้นเล็กๆ แต่เมื่อดูดซับน้ำแล้วจะบวมตัว อ่อนนุ่มคล้ายกับเยลลี่ โครงสร้างของไฮโดรเจล ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เช่น -OH, -COOH, $-CONH_2$ และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) เช่น $-CH_2-$, $-CH_3$ ในโครงสร้างของไฮโดรเจลมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะไฮโดรเจน รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ ในสายโซ่ ทำให้ไฮโดรเจลสามารถคงรูปอยู่ในสภาพที่บวมตัวได้ ส่วนไฮโดรเจลในสภาพที่แห้งเรียกอีกอย่างว่า เซโรเจล (Xerogel) โดยความสามารถในการบวมตัว ของไฮโดรเจลนั้นขึ้นอยู่กับความชอบน้ำ (Hydrophilicity) ของสายโซ่พอลิเมอร์ในโครงสร้าง รวมถึงความหนาแน่นของการเชื่อมโยง (Crosslink density) ด้วย ไฮโดรเจลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น

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

**ประเภทของไฮโดรเจล**

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ที่ใช้ ดังนี้

**1. ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้ [9]**

*1) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์* ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic monomer) และมอนอเมอร์ร่วมที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Polyfunctional comonomer) โครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ดัดแปลง เผยแพร่ หรือแสวงหาประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันของแต่ละมอนอเมอร์ ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำที่นิยมใช้กัน เช่น เมทาคริเลต เมทาคริลาไมด์ เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 2-ไฮดรอกซี-เอทิลเมทาคริเลต ((2-hydroxyethyl) methacrylate (HEMA)) กับเอทิลีนไกลคอลบิสเมทาคริเลต (Ethyleneglycol bismethacrylate (EGDMA)) ไฮโดรเจลที่ได้นำมาใช้เป็น คอนแทคเลนส์แบบนิ่ม การพอลิเมอไรซ์ของไวนิลมอนอเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้ตัวริเริ่มแบบอนุมูล-อิสระ เช่น เปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบเอโซ เป็นต้น โดยที่ตัวริเริ่มจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระ เมื่อมีการให้ความร้อน หรืออาจใช้ตัวริเริ่มแบบรีดอกซ์ เช่น แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตคู่กับ N,N-tetramethyl ethylene diamine (TEMED) รวมไปถึงการใช้ตัวริเริ่มด้วยแสง (Photo initiator)

*2) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์* ไฮโดรเจลประเภทนี้เตรียมโดยการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือโอลิโกเมอร์ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยง $\alpha,\omega$-hydroxyl poly(ethylene glycol) ด้วยไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) ซึ่งเป็นตัว เชื่อมโยงแบบไตรออล ไฮโดรเจลที่ได้จัดเป็นพอลิยูริเทนที่ชอบน้ำ

*3) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ* ไฮโดรเจลประเภทนี้เกิดจากการเชื่อมโยงทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยงโมเลกุลของโปรตีนด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ หรือกลูตารอลดีไฮด์ นอกจากนี้ไอออนิกพอลิเมอร์ยังสามารถเชื่อมโยงได้ด้วยการใช้ ตัวเชื่อมโยงที่มีประจุเป็น 2+ หรือ 3+ เช่น การสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตด้วยตัวเชื่อมโยงที่ให้แคลเซียมไอออน ($Ca^{2+}$)

**2. ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [10]**

*1) ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film hydrogel)* ไฮโดรเจลแบบนี้มักนำไปใช้เคลือบผิววัสดุต่างๆ มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) เพื่อป้องกันไม่ให้เจลละลายในตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหรือในบางกรณีหลังจากที่เคลือบบนพื้นผิววัสดุแล้วอาจจะทำการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะโควาเลนต์ โครงสร้างของไฮโดรเจลแบบนี้ประ-กอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ 2-ไฮดรอกซี-เมทิลเมทาคริเลต (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)* ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียม โดยการนำพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำไปทำการต่อกิ่งบนพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำ ทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้ ไม่ละลายน้ำ วิธีการนี้สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้ด้วย โดยการนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจลไปต่อกิ่งบนพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น การต่อกิ่งบนพื้นผิวด้วยพอลิเมอร์ร่วมของเจลาติน/พอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต/พอลิบิวทิลอะคริเลต [12]

*4) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์พีเนเทรติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (Interpenetrating polymer network hydrogel)* ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นการแทรกพอลิเมอร์สองชนิดที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายเข้า ด้วยกัน โดยโครงร่างทั้งสองไม่สามารถแยกออกจากกันได้และมีความแข็งแรง วิธีการนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง เช่น พอลิไวนิลอัลกอฮอล์/พอลิอะคริลิกแอซิด อินเตอร์พีเนเทรติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ค (Poly(vinyl alcohol)/Poly(acrylic acid) IPN) [13] เป็นต้น

**3. ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง [14]**

*1) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical hydrogel)* มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก โดยในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะมักมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลายตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับทางความร้อน คือ ไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก แต่หากให้ความร้อนจนถึงจุด ที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัวสมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกได้อีกอย่าง ว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต เนื่องจากไฮโดรเจลชนิดนี้มีความคงทน ไม่หลอมเหลว และไม่ละลาย ในตัวทำละลายทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูป ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ที่เชื่อมโยงด้วยเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต [15] เป็นต้น

*2) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical hydrogel)* การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่ พอลิเมอร์เกิดจากพันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลล์ หรือแรงระหว่างประจุ ซึ่งมีความแข็งแรง น้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดการผันกลับทางความร้อนได้จึงเรียกได้อีกอย่างว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมได้เมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง ซึ่งการให้ ความร้อนไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ไฮโดรเจล ชนิดนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิดทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายรวมทั้งการผสมสารอื่นลงใน เจลด้วย เช่น สารต้านจุลินทรีย์ เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิอะคริลาไมด์-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน (Poly(acrylamide-co-methymethacrylate-co-vinylamine)) [16] เป็นต้น

**4. ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามขนาดของรูพรุน [10]**

*1) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel)* เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดี โดยที่มอนอเมอร์ สารเชื่อมโยง และพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ เจลที่ได้มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่าไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

hydrogel) เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA:$H_2O$ เท่ากับ 2:1 เป็นต้น

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

### 1.5.2 การบวมตัวและปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล [10]

สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจลคือสามารถบวมตัวได้เมื่ออยู่ในน้ำ เนื่องจากโครงสร้างของไฮโดรเจลที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำและส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ทั้งยังมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ด้วยพันธะโควาเลนต์รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ เมื่อแช่เซโรเจลในน้ำ แรงดันออสโมติก (Osmotic driving force) จะผลักดันน้ำให้แทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ของไฮโดรเจลซึ่งไม่มีน้ำอยู่ ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวและปรับตัวเข้าสู่สมดุลใหม่ หากน้ำสามารถเกิดอันตรกิริยา กับหมู่ต่างๆ ในสายโซ่ของพอลิเมอร์นั้น เช่น พันธะไฮโดรเจน จะเป็นแรงเสริมที่ทำให้น้ำเข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจลได้มากขึ้น น้ำที่เข้าไปในไฮโดรเจลจะดันสายโซ่ให้ยืดออก แต่เนื่องจากสายโซ่ชอบอยู่ในสภาวะเดิมซึ่งมีเอนโทรปีต่ำจึงมีแรงต้านการขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เกิดขึ้น เช่น แรงต้านการขยายตัวที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล เป็นต้น เมื่อแรงดันออสโมติกที่ผลัก ดันให้น้ำเข้าไปแทรกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ของไฮโดรเจลกับแรงที่ต้านการขยายตัวของสายโซ่มีค่าเท่ากันการบวมตัวของไฮโดรเจลจะถึงจุดสมดุลและปริมาณน้ำในโครงสร้าง ณ จุดนี้เรียกว่า ปริมาณน้ำสมดุล (Equilibrium water content) ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับโดยไฮโดรเจลสามารถคำนวณ ได้จากสมการ

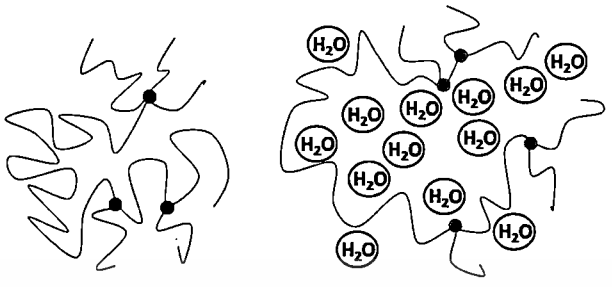
$$\text{ปริมาณน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ที่แห้ง}} \times 100\%$$

เมื่อไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวในน้ำ น้ำที่อยู่ในไฮโดรเจลจะมีลักษณะดังต่อไปนี้ [17-18]

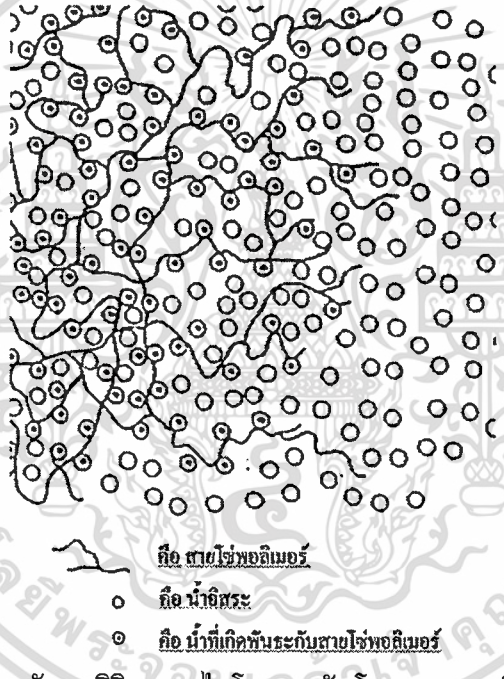
1. Free water คือ น้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจล ซึ่งไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์ โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระเหยง่าย ไม่มีผลของสายโซ่ พอลิเมอร์มาเกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Bound water คือ น้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโมเลกุลน้ำที่เคลื่อน ที่ได้ยาก ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงในการเอาน้ำนี้ออกจากโครงสร้างไฮโดรเจล




**รูปที่ 1.1** การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล [10]




**รูปที่ 1.2** อันตรกิริยาของไฮโดรเจลกับโมเลกุลของน้ำ [10]

ปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล ได้แก่

1. แรงดันออสโมติก เนื่องจากปริมาณน้ำภายในและภายนอกไฮโดรเจลมีไม่เท่ากันจึงทำให้ เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุน ของไฮโดรเจลนั้น ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมาก น้ำก็จะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากขึ้น

2. อันตรกิริยาระหว่างน้ำกับสายโซ่ของไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์มีโครงสร้างที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เกิดพันธะไฮโดรเจนได้จะทำให้น้ำแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้มากขึ้นทำให้ ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าการเชื่อมโยงมีปริมาณมาก จะทำให้สายโซ่อยู่ใกล้กันมากขึ้น มีช่องว่างระหว่างสายโซ่น้อยลง รวมถึงสายโซ่มีความยืดหยุ่น ลดลง ทำให้การขยายตัวของสายโซ่เกิดได้น้อยเนื่องจากเกิดการดึงรั้งกันของสายโซ่ แรงต้านการ ขยายตัวของไฮโดรเจลจึงมีค่าสูงทำให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวได้น้อย

4. ความยืดหยุ่นของสายโซ่ หากสายโซ่มีความยืดหยุ่นมากน้ำสามารถแทรกเข้าไประหว่าง สายโซ่ได้ง่ายและมีแรงต้านการขยายตัวของสายโซ่น้อย ทำให้ปริมาณน้ำสมดุลมีค่าสูงและเกิดการ บวมตัวได้มาก

### 1.5.3 กัมจากธรรมชาติ (Natural gums) [19]

กัมจากธรรมชาติ (Natural gums) เป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์และอนุพันธ์ของพอลิแซคคาไรด์ ส่วนใหญ่มีแหล่งที่มาจากพืช สามารถละลายได้ทั้งในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อน โดยสารละลายที่ได้จะมีความหนืดสูงแม้ว่ามีความเข้มข้นของกัมน้อย ดังนั้นจึงมีการนำกัมจาก แหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้เป็น สารเพิ่มความหนืดหรือสารข้น 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)

**อัลจิเนต (Alginate)**

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

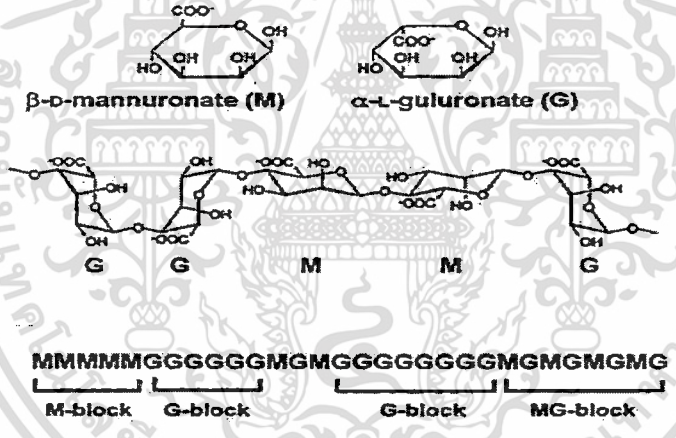
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



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 1.3 สัดส่วนของพอลิเมอร์ร่วมและโครงสร้างที่แตกต่างจะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าในสายโซ่มีพอลิเมอร์ G ในปริมาณสูงจะมีสมบัติเป็นเจลแข็งที่ความเข้มข้นหนึ่งๆ ของประจุบวกของโลหะ แต่ถ้าในสายโซ่มีพอลิเมอร์ M ในปริมาณสูง เจลที่เกิดจะมีแนวโน้มอ่อนนุ่มและมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้างกว่าสายโซ่ที่มีพอลิเมอร์ G ปริมาณสูง

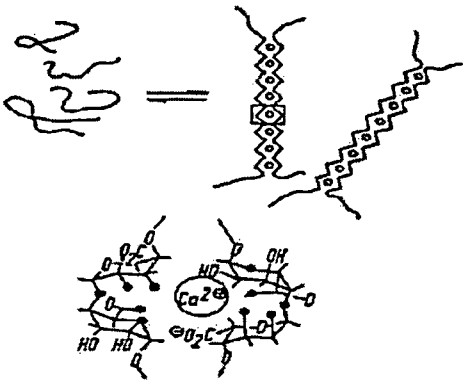



**รูปที่ 1.3** โครงสร้างของอัลจิเนต [20]

อัลจิเนตบางชนิดไม่มีสมบัติเป็นเจลและจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไอออน ($Ca^{2+}$) โครงสร้างของเจลที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกล่องใส่ไข่ (Egg box) โดยมี $Ca^{2+}$ เกาะอยู่กับสายโซ่พอลิเมอร์ดังรูปที่ 1.4 สมบัติที่ดีของอัลจิเนตเมื่อเกิดเป็นเจลคือเจลที่ได้จะไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible gel) เมื่ออยู่ในน้ำเย็นที่มีแคลเซียมไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

137350



**รูปที่ 1.4** กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจิเนตแบบ Egg-box model [20]

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

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

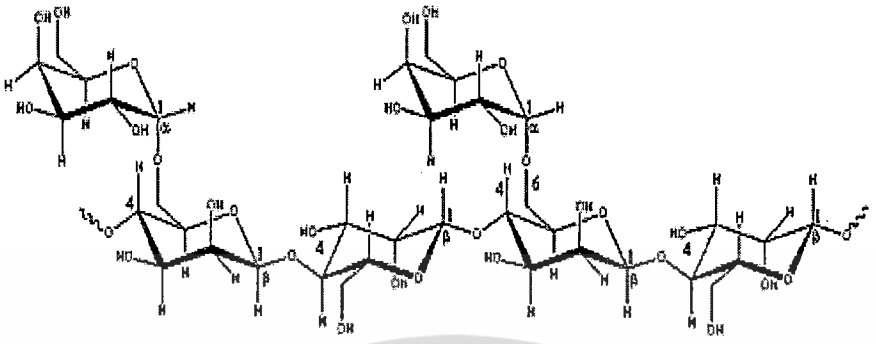
- ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารข้นหรือสารทำให้เกิดเจลในซุป เครื่องดื่ม ไอศครีม และเยลลี
- ใช้เป็นสารข้นในการผลิตเครื่องสำอางค์
- แคลเซียมอัลจิเนตใช้ทำเป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้ซึ่งจะช่วยให้แผลหายเร็วขึ้นและช่วยลดอาการบาดเจ็บได้ดีกว่าแผ่นปิดแผลแบบดั้งเดิม
- ช่วยดูดซึมโลหะที่เป็นพิษจากเลือด
- เอสเตอร์อัลจิเนตใช้เป็นสารลดแรงตึงผิว และอิมัลซิไฟเออร์

**กัวร์กัม (Guar gum)**

กัวร์กัมได้จาก Endosperm ของเมล็ดต้นกัวร์ (Cyamopsis tetragonolobus) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน ปัจจุบันมีปลูกในรัฐเทกซัส สหรัฐอเมริกา โครงสร้างของกัวร์กัมเป็นพอลิเมอร์สายยาวของแมนโนสที่ต่อกันด้วย 1,4-linked และมีกิ่งแขนงของกาแลคโตส โดยทุกๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 โมเลกุลของแมนโนสจะต่อกับ 1 โมเลกุลของกาแลคโตสด้วย 1,6 linked ทำให้อัตราส่วนโดยโมลของแมนโนสต่อกาแลคโตสเป็น 2:1 กัวร์กัมมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 220,000



**รูปที่ 1.5** โครงสร้างของกัวร์กัม [21]

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

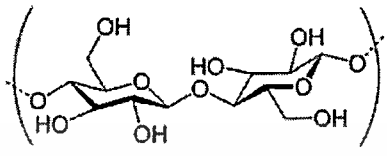
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น Sizing agent และ Thickener
- อุตสาหกรรมกระดาษ
- อุตสาหกรรมอาหาร เช่น เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพในไอศครีม และพวกอาหารแช่แข็ง หรือใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์

### 1.5.4 เซลลูโลส [19]

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จัดเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่พบมากที่สุดใน โลก เซลลูโลสเป็นโฮโมพอลิเมอร์ของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose) ซึ่งเหมือนกับแป้ง และไกลโคเจน อาจจะมีค่าองศาการพอลิเมอไรซ์ (DP) ถึง 3,500 แต่โครงสร้างของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสที่ต่อกันจะเป็นแบบ 1,4-β-linkage ซึ่งทำให้เซลลูโลสมีสมบัติแตกต่างกับแป้งและไกลโคเจน

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

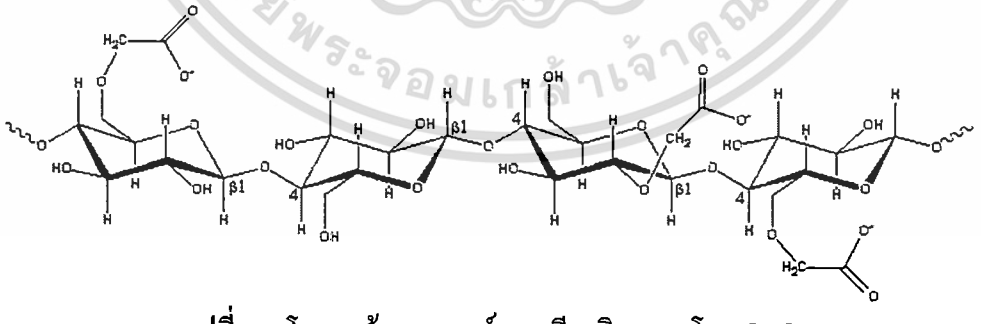
เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงโดยที่สายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวแบบ Fully extended chains ซึ่งมีแรงดึงดูดระหว่างสายโซ่โมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนมีผลทำให้เกิดโครงสร้างผลึกขึ้น ดังนั้นเซลลูโลสจะไม่ละลายในน้ำและเป็นวัสดุในอุดมคติสำหรับเป็นสารเสริมแรง เมื่อเปรียบเทียบ กับแป้งพบว่าเซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูงกว่าแป้งมาก



**รูปที่ 1.6** โครงสร้างของเซลลูโลส [22]

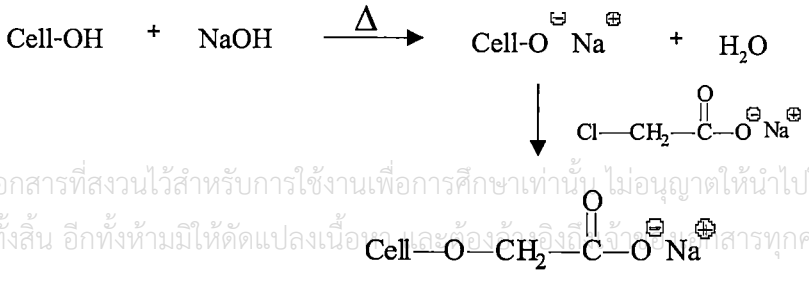
**คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose, CMC)**

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสที่เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างโดยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างของเซลลูโลสถูกแทนที่ด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิล ($OCH_2COOH$) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นของแข็ง สีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตราย ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถละลายน้ำได้หากอยู่ในรูปของเกลือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเกลือ เช่น เกลือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose salt) โดยทั่วไปมีค่าองศาการแทนที่ประมาณ 0.4-1.5 ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ในขณะที่คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีค่าองศาการแทนที่ 0.1-0.3 จะละลายน้ำได้ไม่ดี คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแบ่งออกเป็นเกรดต่างๆ ตามการใช้ประโยชน์ซึ่งการแบ่งเกรดขึ้นกับค่าองศาการแทนที่ ความสม่ำเสมอของหมู่แทนที่ องศาการเกิดพอลิเมอร์ และองศาความบริสุทธิ์



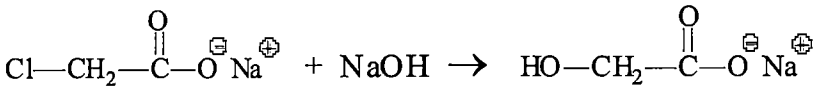
**รูปที่ 1.7** โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [23]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีปฏิกิริยาข้างเคียงดังนี้



การนำไปใช้ประโยชน์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติเป็นสารเพิ่มความหนืดที่ช่วยในการยึดเกาะและเป็นสารคงสภาพ สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิ

- ใช้เป็นสารให้ความหนืดในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ไอศครีม
- ใช้เป็นสารเคลือบผิวแคปซูลยาหรือสารก่อให้เกิดเจลทางด้านเภสัชกรรม
- ส่วนผสมในผงซักฟอก เป็น Antiredeposition agent ป้องกันสิ่งสกปรกไม่ให้กลับเข้ามาเกาะเนื้อผ้าระหว่างการซักล้าง
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้ผสมในสีพิมพ์ผ้าให้มีเนื้อข้น เพื่อเคลือบเนื้อผ้า ซึ่งช่วยให้ผ้าไม่สกปรกง่ายและช่วยให้สามารถล้างสิ่งสกปรกออกได้ง่าย เคลือบเส้นใยทำให้เส้นใยลื่นและทนต่อแรงดึงรวมทั้งแรงเสียดทานในระหว่างการทอผ้า
- อุตสาหกรรมอาหารและยา
  - เกรดที่มีความบริสุทธิ์สูงใส่ในไอศครีม ช่วยในการคงรูปของไอศครีม
  - เป็นสารช่วยป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลในอาหารประเภทน้ำเชื่อม
  - เป็นส่วนผสมในอาหารแห้งประเภทผงเพื่อช่วยในการละลายเป็นตัวประสาน
  - สารปรับความหนืดในอาหารพวก เยลลี สังขยา และขนมพุดดิง
  - สารป้องกันคอลลอยด์ ช่วยให้อาหารจำพวกครีมไม่ตกตะกอนหรือ แยกเป็นสองชั้นเมื่อเก็บไว้นาน เป็นส่วนผสมในการทำเค้ก เพื่อช่วยให้เค้กฟู และเก็บได้นาน
  - อาหารลดความอ้วน เนื่องจากร่างกายไม่สามารถย่อยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้
  - สารข้นในยาประเภทครีมตัวประสานในยาเม็ด
- อุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เป็น Sizing agent
- อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์เป็นสารข้นและสารป้องกันการเกิดคอลลอยด์ในผลิตภัณฑ์พวกครีมทามือ ยาสีฟัน
- ในสารยึดติด (Adhesives) ใช้เป็นตัวปรับความหนืด
- เซรามิก ใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นตัวประสานในการผสมเพื่อให้เนื้อดินและส่วนผสมอื่นรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น
- อุตสาหกรรมสี ใช้เป็นสารป้องกันการเกิดคอลลอยด์ในสีอิมัลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

– สารหล่อลื่นในการขุดเจาะน้ำมัน (Drilling Colloid)

## 1.6 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 พบว่าความสามารถในการบวมตัว ในสารละลายเกลือเป็นดังนี้ $NaCl > CaCl_2 > AlCl_3$

Nie, H. Liu และคณะ (2004) [6] ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยในการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลสและพฤติกรรมการย่อยสลายของไฮโดรเจลในดิน ซึ่งเตรียมไฮโดรเจลโดยการเชื่อม- โยงโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) ด้วยอะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) พร้อมใส่สาร ฆ่าเชื้อและสารอาหารไว้ภายในด้วย จากนั้นทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน จากการทดลอง พบว่าปริมาณของสารฆ่าเชื้อ สารอาหารและประเภทของดินที่ต่างกันมีผลต่อการ ย่อยสลายของไฮโดรเจล 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 การบวมตัวของไฮโดรเจลขึ้น กับความเข้มข้นของกลูตารอลดีไฮด์ อัตราส่วนระหว่างอัลจิเนตต่อกัวร์กัม และค่า pH จากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์เข้มข้น 0.3% โดยน้ำหนัก มีการบวมตัวดีที่สุดทั้ง pH 1.2 และ 7.4 แต่อัตราส่วนระหว่างอัลจิเนตต่อกัวร์กัมที่บวมตัวดีที่สุดในแต่ละค่า pH ต่างกัน

Gliko-Kabir, I. และคณะ (1999) [24] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางความร้อนของกัวร์กัมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์เข้มข้น 25% โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ที่อุณหภูมิ 50-500°C และ Thermogravimetric analysis (TGA) ที่อุณหภูมิ 70-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

600°C ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่าเมื่อปริมาณของกลูตารอลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มสูงขึ้นและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น

Barbucci, R. และคณะ (2008) [25] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมในการไหลและการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมจากการเชื่อมโยงกัวร์กัมด้วย PEGDGE (Polyethylene glycol diglycidyl ether) ในสารละลายด่าง ในการศึกษาพฤติกรรมการไหล พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ทำให้ความหนืดของไฮโดรเจลลดลง ส่วนการบวมตัวในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ค่า pH 2, 4, 5, 9, และ 11 พบว่าหลังจากผ่านไปสี่วัน ไฮโดรเจลสามารถ บวมตัวได้ดีที่สุดเมื่อมีค่า pH เท่ากับ 4

Coviello, T และคณะ (2005) [26] 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) [27] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์และตรวจวิเคราะห์ไฮโดรเจล ที่ว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH, Ionic strength และอุณหภูมิ ซึ่งไฮโดรเจลนี้เตรียมจากการเชื่อมโยงคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับกรดอะคริลิกด้วยไวนิลไทรเอทอกซีไซเลน (Vinyltriethoxy silane: VTESi) โดยมีโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มที่อุณหภูมิ 60°C แล้วล้างชิ้นงานด้วย น้ำกลั่น และทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50°C ภายใต้สุญญากาศ จากนั้นนำไปทดสอบการบวมตัวที่ สภาวะต่างๆ โดยใช้เจลแห้งหนัก 50 กรัม แช่ลงในสารละลาย 100 มิลลิลิตร พบว่าเมื่อค่า pH และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เจลมีแนวโน้มที่จะบวมตัวได้มากขึ้น แต่หากความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงและ Ionic strength มีค่าเพิ่มขึ้น เจลมีแนวโน้มที่จะบวมตัวได้น้อยลง

Zhang, K. และคณะ (2007) [28] 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 ที่มีต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล โดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 1.4 และ 7.4 ในการศึกษา พบว่าการบวมตัวของไฮโดรเจล เพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น แต่การบวมตัวลดลงเมื่อค่า Ionic strength เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 2.การวิจัยและการดำเนินงาน

## 2.1 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล

2.1.1 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

1. ชั่งโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม ตามตารางที่ 2.1 และ 2.2
2. ผสมโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัมเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 น้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C
4. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรตลงในสารละลายในข้อ 3 จนกระทั่งได้ ความเข้มข้นของสารละลายดังตารางที่ 2.1 และ 2.2
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 เชื่อมโยงด้วยบอแร็ก ความเข้มข้น 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัมแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

| สูตร | องค์ประกอบ (%) | | สารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% 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 2.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกัวร์กัมแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

| สูตร | องค์ประกอบ (%) | | สารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% 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 | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.1.2 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบการเชื่อมโยงกลไกเดียว**

1. เลือกสูตรที่บวมตัวในน้ำกลั่นได้ดีจากตอนที่ 2.1.1
2. ชั่งโซเดียมอัลจิเนต, โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม ตามตารางที่ 2.3
3. ผสมโซเดียมอัลจิเนต, โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม เข้าด้วยกัน
4. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 น้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C
5. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรต ลงในสารละลายในข้อ 4 จนกระทั่งได้ความเข้มข้น ของสารละลายดังตารางที่ 2.3
6. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60°C
7. ชะเจลที่ได้ด้วยน้ำกลั่น
8. นำไปอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
9. บดให้ละเอียด

**ตารางที่ 2.3** องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

| สูตร | องค์ประกอบ (%) | | | สารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% 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 | |

**2.1.3 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก**

1. เลือกสูตรที่บวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายเกลือได้ดีจากตอนที่ 2.1.1
2. ชั่งโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม ตามตารางที่ 2.4
3. ผสมโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสหรือโซเดียมอัลจิเนต และกัวร์กัม เข้าด้วยกัน
4. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 น้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรต ลงในสารละลายในข้อ 4 จนกระทั่งได้ความเข้มข้น ของสารละลายดังตารางที่ 2.4
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% โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร และเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วยแคลเซียมคลอไรด์

สำหรับไฮโดรเจลสูตรอื่นๆ ใช้สัญลักษณ์ในลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก

| สูตร | องค์ประกอบ (%) | | | สารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% 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 | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.1.4 การเตรียมไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก**

1. เลือกสูตรที่บวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายเกลือได้ดีจากตอนที่ 2.1.1
2. ชั่งโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม ตามตารางที่ 2.5
3. ผสมโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, โซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม เข้าด้วยกัน
4. ละลายของผสมในน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน ของผสม:น้ำกลั่น เท่ากับ 1:40 น้ำหนักต่อปริมาตร พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C
5. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรต ลงในสารละลายในข้อ 4 จนกระทั่งได้ความเข้มข้น ของสารละลายดังตารางที่ 2.5
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 2.5** องค์ประกอบของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบแบบเชื่อมโยงสองกลไก

| สูตร | องค์ประกอบ (%) | | | สารละลายโซเดียมเททระบอเรต (% 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 | |

## 2.2 การทดสอบการบวมตัว

**2.2.1 การทดสอบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่ pH 7 อุณหภูมิต่าง ๆ**

1. ชั่งไฮโดรเจลแห้งที่บดแล้ว หนัก 50 $\pm$ 0.3 มิลลิกรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
2. ห่อด้วยตะแกรงลวดความละเอียด 400 เมช ขนาด 2.0 x 2.5 x 1.0 $cm^3$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

**2.2.2 การทดสอบการบวมตัวในสารละลายเกลือต่าง ๆ**

1. เลือกไฮโดรเจลที่บวมตัวในน้ำกลั่นได้ดี
2. ชั่งไฮโดรเจลแห้งที่บดแล้ว หนัก 50 $\pm$ 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

**2.2.3 การทดสอบการบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 4 และ 10**

1. เลือกไฮโดรเจลที่บวมตัวในน้ำกลั่นได้ดี
2. ชั่งไฮโดรเจลแห้งที่บดแล้ว หนัก 50 $\pm$ 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 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 สำหรับสูตรที่เชื่อมโยง สองกลไก
6. คำนวณหาค่าการบวมตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมจากโซเดียมอัลจิเนต (Sodium Alginate : A) โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose : C) และกัวร์กัม (Guar gum : G) โดยใช้โซเดียมเททระบอเรต (บอแร็ก) และแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมโยง (Crosslinker) โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจล ที่เตรียมได้ 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 แบบเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วยบอแร็กและแบบเชื่อมโยง สองกลไกด้วยบอแร็กและแคลเซียมคลอไรด์ โดยแต่ละแบบแบ่งออกเป็นสองประเภท ดังนี้

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

โดยสัญลักษณ์ของสูตรไฮโดรเจลแสดงดังนี้

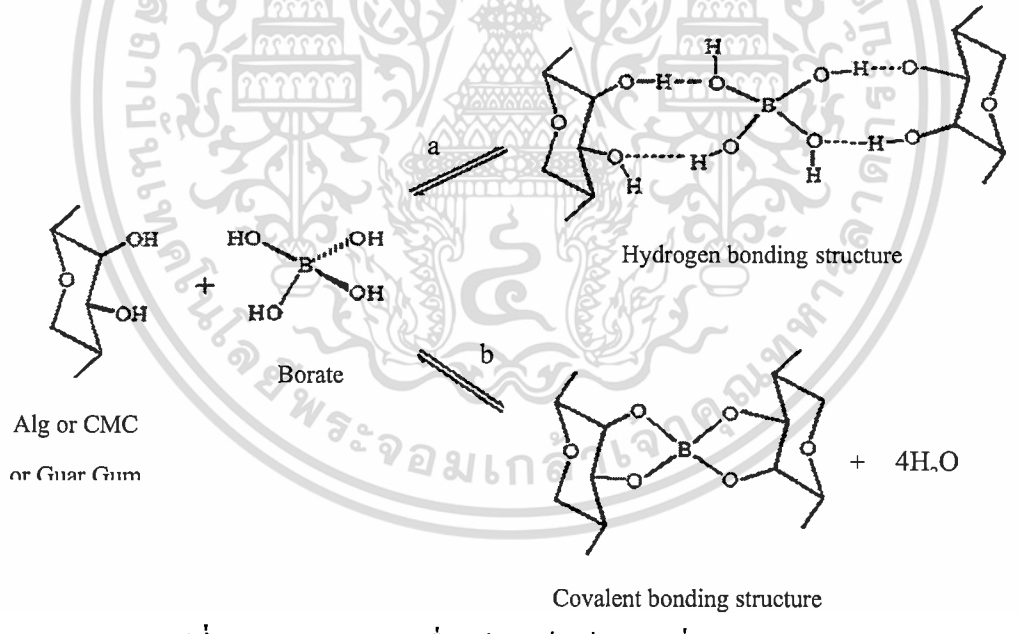
- A4G6-6 คือ โซเดียมอัลจิเนต 40 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงด้วยบอแร็ก ความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- C4G6-6Ca คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 40 ส่วน ต่อกัวร์กัม 60 ส่วน เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วยแคลเซียมคลอไรด์
- A1C3G6-6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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.1 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบที่เชื่อมโยงกลไกเดียว

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติ มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเป็นจำนวนมากทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี แต่มีความสามารถในการละลายแตกต่างกัน โดยโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายน้ำได้ดี ส่วนกัวร์กัม ละลายน้ำได้ยากแต่บวมตัวได้ดี ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียวเกิดจากการที่หมู่ไฮดรอกซิล (OH) บนสายโซ่โมเลกุลของสารตั้งต้นถูกเชื่อมโยงด้วยบอแร็ก ซึ่งเมื่อบอแร็กละลายน้ำแล้วจะได้บอเรต ($B(OH)_4^-$) จากนั้นบอเรตจะเข้าจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่บนสายโซ่โมเลกุลของโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัม โดยบางโมเลกุลของบอเรตเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิล ด้วยพันธะไฮโดรเจน (รูปที่ 3.1 a) และบางโมเลกุลเชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์ (รูปที่ 3.1 b) การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบนี้ทำให้โครงสร้างของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ โครงสร้างดังกล่าวช่วยให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้เพราะ สารตั้งต้นถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกันไม่ให้ละลายออกไปกับน้ำหรือสารละลายต่างๆ แต่การเชื่อมโยง ดังกล่าวสามารถเกิดการผันกลับได้เป็นผลให้เจลสามารถเกิดการเสียสภาพ [32]




**รูปที่ 3.1** การเกิดพันธะเมื่อใช้บอแร็กเป็นสารเชื่อมโยง [29]

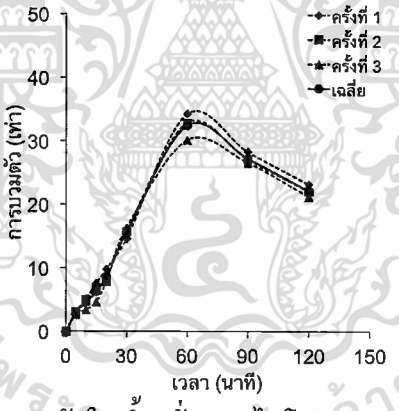
การเสียสภาพของเจล เริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีการละลายออกของสารตั้งต้นมากกว่าการดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างของเจล ซึ่งการละลายออกเกิดขึ้นเมื่อมีการผันกลับของพันธะที่เชื่อมโยงด้วยบอเรต กล่าวคือ เมื่อมีโมเลกุลของน้ำเข้าล้อมสายโซ่โมเลกุลของสารตั้งต้นมากขึ้น ทำให้ระยะห่างของหมู่ไฮดรอกซิลของสารตั้งต้นกับบอแร็กห่างจากกันจนกระทั่งพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสารตั้งต้นกับบอเรตถูกทำลาย (รูปที่ 3.1 a) ทำให้บอเรตบางส่วนละลายหลุดออกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเจล และอีกกรณีหนึ่ง คือ เมื่อมีปริมาณน้ำในโครงสร้างมากขึ้นทำให้การเชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์ เกิดการผันกลับ (รูปที่ 3.1 b) ดังนั้น เมื่อบอเรตไม่สามารถยึดสายโซ่โมเลกุลของสารตั้งต้นไว้ได้ ทำให้โซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งสารตั้งต้นที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่ดีละลายออกจากโครงสร้างได้ แต่เนื่องจากกัวร์กัมซึ่งมีความสามารถในการละลายด้อยกว่า สารตั้งต้นอีกสองตัวข้างต้นแต่สามารถบวมตัวได้ดีกว่า ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างต่อไปได้ แต่เมื่อการละลายออกมีค่ามากกว่าการดูดซับน้ำ ทำให้ค่าการบวมตัวลดลงแสดงว่า เจลเริ่มมีการเสียสภาพ

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 หลังจากอบให้แห้งและบดให้ละเอียดแล้วนำไฮโดร-เจลแต่ละสูตรไปศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายต่างๆ ด้วยวิธี Tea-bag method

โดยเลือกสูตร A4G6-10 มาศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่นและทำการทดสอบการบวมตัวซ้ำ 3 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันทั้ง 3 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ดังนั้นการทดสอบการบวมตัวของไฮโดรเจลสูตรอื่นๆ ในน้ำกลั่นและในสารละลายต่างๆจึงทำการทดสอบเพียงครั้งเดียว



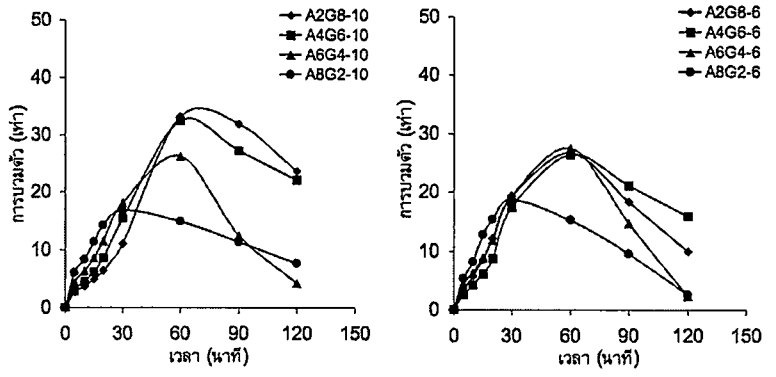

**รูปที่ 3.2** การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลสูตร A4G6-10

### 3.1.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม (AG) และไฮโดรเจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม (CG)

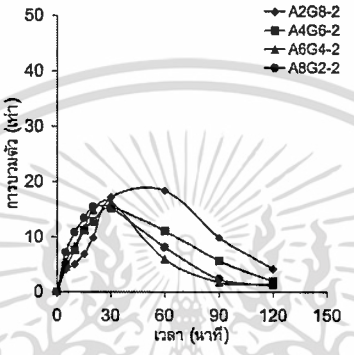
*ไฮโดรเจล AG*

พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล AG โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ A : G และปริมาณสารเชื่อมโยงบอแร็ก แสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




**(ก) บอแร็ก** 1.0% w/v **(ข) บอแร็ก** 0.6% w/v




**(ค) บอแร็ก** 0.2% w/v

**รูปที่ 3.3** การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นแตกต่างกัน

รูปที่ 3.3 เป็นการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/กัวร์กัม (AG) การบวมตัวของไฮโดรเจลในช่วงต้นเกิดจากการที่โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าสู่โครงสร้างของเจลโดยอาศัยแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างภายนอกกับภายในของโครงสร้างเจลและความสามารถในการละลายของโซเดียมอัลจิเนต รวมถึงความสามารถในการบวมตัวของกัวร์กัมทำให้ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลสูงขึ้น แต่ในขณะที่น้ำถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้าง โซเดียมอัลจิเนตก็มีการละลายออกจากโครงสร้างด้วย ดังนั้นเมื่อถึงจุดที่มีการละลายออกมากกว่าการดูดซับน้ำ เจลจะเริ่มเสียสภาพในที่สุด ค่าการบวมตัว จึงเริ่มลดลง

จากรูปที่ 3.3 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG ที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A2G8-10 และ A4G6-10 มีค่าการบวมตัวสูงสุดใกล้เคียง กันประมาณ 30 เท่า ซึ่งสูงกว่าสูตร A6G4-10 และ A8G2-10 ไฮโดรเจลสูตร A8G2-10 มีการบวมตัวเร็วในช่วง 20 นาทีแรก เนื่องจากมีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตอยู่มากจึงเกิดการบวมตัวอย่างรวดเร็วเพราะโซเดียมอัลจิเนตมีความสามารถในการละลายดีจึงดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างเจลได้เร็ว แต่เมื่อน้ำในโครงสร้างมีมากขึ้นจึงเกิดการละลายออกของโซเดียมอัลจิเนตมากมีผลทำให้ค่าการบวมตัวลดลงหลังการบวมตัว 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG โดยใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร พบว่าสูตร A2G8-6, A4G6-6 และ A6G4-6 มีการบวมตัวสูงสุดประมาณ 30 เท่า แต่ในสูตร A8G2-6 มีการบวมตัวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า และเสียสภาพเจลเร็วกว่าทั้งสามสูตรข้างต้น

จากรูปที่ 3.3 (ค) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG โดยใช้บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร พบว่าสูตร A2G8-2 มีความสามารถในการบวมตัวสูงสุด โดยมีค่าอยู่ที่ประมาณ 20 เท่า และคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นานที่สุด เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 พบว่าไฮโดรเจล AG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีความสามารถในการบวมตัวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลสูตรที่ใช้ความเข้มข้นของบอแร็ก 1.0 และ 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

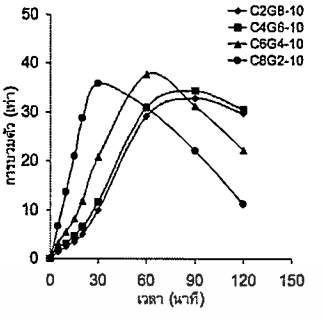
จากรูปที่ 3.3 พบว่าค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของบอแร็กลดลง กล่าวคือ เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0 และ 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 30 เท่า แต่เมื่อความเข้มข้นของบอแร็กเท่ากับ 0.2% โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร การบวมตัวมีค่าประมาณ 15 เท่า เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของบอแร็กลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลง เมื่อการเชื่อมโยงของโครงสร้างลดลงทำให้สารตั้งต้นสามารถละลายออกจากโครงสร้างได้ง่ายเมื่อพันธะภายในโครงสร้างเริ่มผันกลับ เจลจึงเริ่มเกิดการเสียสภาพ

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของบอแร็กเท่ากัน พบว่าเมื่อปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตในสูตรเจล เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้ค่าการบวมตัวในช่วงต้นมีค่าสูง แต่ค่าการบวมตัวสูงสุดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเทียบกับสูตรเจลที่มีปริมาณโซเดียมอัลจิเนตต่ำกว่า เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงมีความสามารถในการละลายดี ทำให้เมื่อน้ำถูกดูดซับไว้ในโครงสร้างมากขึ้น โซเดียมอัลจิเนต จึงละลายออกจากโครงสร้างได้ง่าย ทำให้การละลายออกมีค่ามากกว่าการดูดซับน้ำ ดังนั้นเมื่อในโครงสร้างมีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าการดูดซับน้ำน้อยลงและเสียสภาพเร็ว ในทางกลับกันเมื่อมีปริมาณของกัวร์กัมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าการบวมตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากกัวร์กัมเป็นสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีความสามารถในการละลายต่ำแต่สามารถบวมตัวได้ดี ทำให้เจลสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นเมื่อกัวร์กัมมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อโครงสร้างดูดซับน้ำไว้มากขึ้น โซเดียมอัลจิเนตจะเริ่มละลายออกจากโครงสร้าง ในขณะที่กัวร์กัมละลายออกจากโครงสร้างได้ยาก กัวร์กัมจึงเป็นส่วนช่วยให้เจลสามารถคงสภาพต่อไปได้ทำให้เจลเกิดการเสียสภาพช้าลง นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม พบว่าในโครงสร้างโมเลกุลของกัวร์กัมมีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลบนสายโซ่มากกว่าบนสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนต ทำให้เมื่อเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับบอเรต ไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณกัวร์กัมมากจึงสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้มากกว่าสูตรที่มีปริมาณกัวร์กัมน้อย เมื่อมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้นไฮโดรเจลจึงสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดีขึ้นและเกิดการเสียสภาพช้าลง

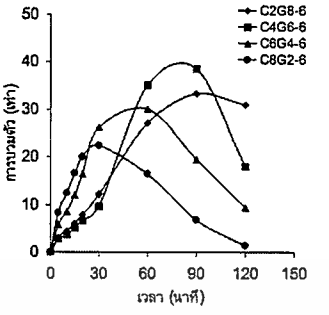
*ไฮโดรเจล CG*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

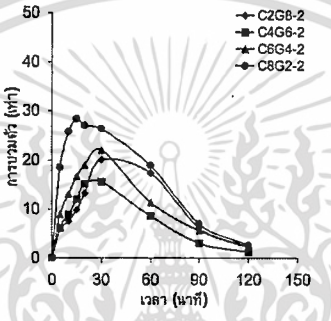
พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C ค่า pH เริ่มต้น 7 ของไฮโดรเจล CG โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน C : G และปริมาณสารเชื่อมโยงบอแร็ก แสดงดังรูปที่ 3.4




(ก) **บอแร็ก** 1.0% w/v




(ข) **บอแร็ก** 0.6% w/v




(ค) **บอแร็ก** 0.2% w/v

**รูปที่ 3.4** การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG ในอัตราส่วนต่างๆ เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นแตกต่างกัน

ในรูปที่ 3.4 การบวมตัวของไฮโดรเจลโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม (CG) มีลักษณะเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG คือ เกิดจากการที่โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าสู่โครงสร้างของเจล โดยอาศัยแรงดันที่แตกต่างกันระหว่างภายนอกกับภายในของโครงสร้างเจลและความสามารถในการละลายของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส รวมถึงความสามารถในการบวมตัวที่ดีของกัวร์กัม ทำให้ค่า การบวมตัวของไฮโดรเจลสูงขึ้น แต่ในขณะที่น้ำถูกดูดซับเข้าสู่โครงสร้างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลสก็มีการละลายออกจากโครงสร้างเช่นเดียวกับโซเดียมอัลจิเนต ดังนั้นเมื่อถึงจุดที่มีการ ละลายออกมากกว่าการดูดซับน้ำเจลจะเริ่มเสียสภาพทำให้ค่าการบวมตัวเริ่มลดลง

จากรูปที่ 3.4 (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 3.4 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล CG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร C2G8-6 และ C4G6-6 มีค่าการบวมตัวสูงสุดประมาณ 35 เท่า ซึ่งใกล้เคียงกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และคงสภาพความเป็นเจลได้นานกว่าสูตร C6G4-6 และ C8G2-6 เนื่องจากเมื่อบอเรตหลุดออกจากโครงสร้างเจล การละลายของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสของสูตร C6G4-6 และ C8G2-6 มีผลทำให้การดูดซับน้ำลดลง เมื่อเทียบกับสูตร C2G8-6 และ C4G6-6 ซึ่งมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้อยกว่า

จากรูปที่ 3.4 (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 3.4 เป็นผลการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG พบว่าเมื่อความเข้มข้นของบอแร็กซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงมีค่าลดลง ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจล CG มีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG โดยไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0 และ 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าการบวมตัวประมาณ 35 เท่า และไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็ก 0.2% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่า การบวมตัวประมาณ 15-30 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.2% โดยน้ำหนักต่อ ปริมาตร มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงน้อยจึงยึดโมเลกุลของสารตั้งต้นได้ไม่ดี และเมื่อพันธะภายในโครงสร้างเกิดการผันกลับ โมเลกุลของทั้งโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัมหลุดออก จากโครงสร้างเจลได้ง่าย เจลจึงเริ่มเสียสภาพทำให้ค่าการบวมตัวลดลง

เมื่อพิจารณาการบวมตัวของไฮโดรเจล CG เมื่อใช้บอแร็กความเข้มข้นเท่ากัน พบว่าเมื่อปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้นทำให้เจลเริ่มเสียสภาพเร็วขึ้น เนื่องจากโซเดียมคาร์-บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจึงมีความสามารถในการละลายดี ดังนั้นเมื่อมีน้ำในโครงสร้างมากขึ้น โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจึงละลายออกจากโครงสร้างได้ง่าย ทำให้เจลถึงจุดที่การละลายออกมากกว่าการดูดซับน้ำเร็วขึ้น เจลจึงเกิดการเสียสภาพเร็ว แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อมีปริมาณของกัวร์กัมเพิ่มขึ้น เจลจะคงสภาพได้นานขึ้น เนื่องจากกัวร์กัมเป็นสารตั้งต้นที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีความสามารถในการบวมตัวดี ทำให้กัวร์กัมละลายออกจากโครงสร้างได้ยาก กว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส กัวร์กัมจึงเป็นส่วนช่วยให้เจลคงสภาพต่อไปได้เมื่อมีน้ำในโครงสร้างมากขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.3 และ 3.4 พบว่าไฮโดรเจล CG มีแนวโน้มค่าการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจล AG เนื่องจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าโซเดียมอัลจิเนตทำให้ไฮโดรเจล CG สามารถดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้ดี เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนต ต่อกัวร์กัม และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อกัวร์กัมกัม พบว่าเมื่อมีปริมาณโซเดียมอัลจิเนต หรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้นค่าการบวมตัวจะลดลงและเสียสภาพความเป็นเจลได้เร็วขึ้น เนื่องจากเมื่อพันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับทำให้โซเดียมอัลจิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีการละลายออกมากขึ้น เมื่อมีการละลายออกมากกว่าการดูดซับน้ำ เจลจึงเริ่มเสียสภาพทำให้ค่าการบวมตัวลดลง แต่ทั้งไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG เริ่มเสีย สภาพเจลที่ระยะเวลาใกล้เคียงกัน แม้โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า โซเดียมอัลจิเนต เนื่องจากกัวร์กัมที่อยู่ในโครงสร้างเป็นส่วนช่วยให้เจลเกิดการเสียสภาพได้ช้า ดังนั้นไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของกัวร์กัมเท่ากัน จึงมีระยะเวลาที่เจลเริ่มเสียสภาพใกล้เคียงกัน

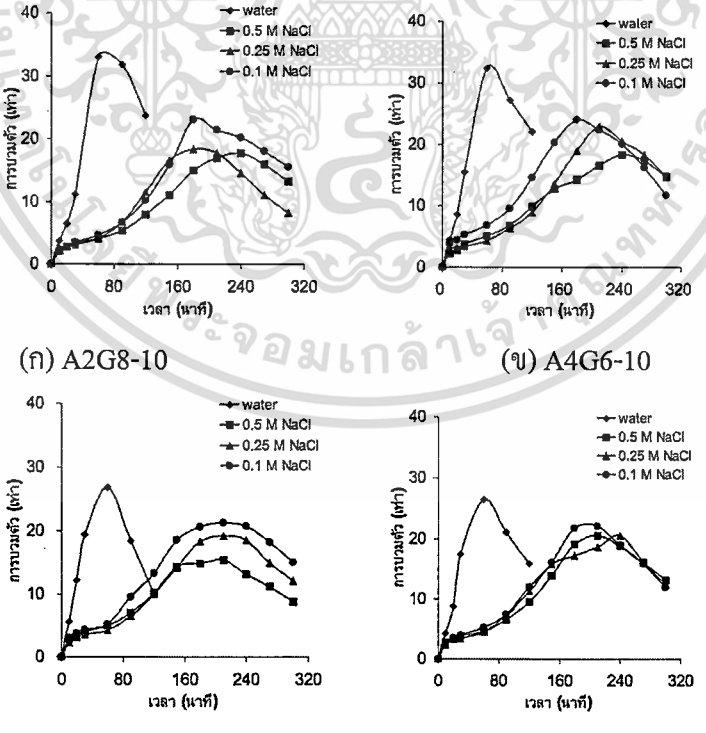
จากข้างต้น จึงได้เลือกสูตรที่ใช้ความเข้มข้นของบอแร็ก 1.0 และ 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยมีอัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตหรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อกัวร์กัมที่ 20 : 80 และ 40 ต่อ 60 ได้แก่สูตร A2G8-10, A4G6-10, A2G8-6, A4G6-6, C2G8-10, C4G6-10, C2G8-6 และ C4G6-6 ไปใช้ในการศึกษาการบวมตัวในสารละลายเกลือต่อไป

### 3.1.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่างๆ ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

#### 3.1.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl

*ไฮโดรเจล AG*

พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ของไฮโดรเจล AG โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน A : G และปริมาณสารเชื่อมโยงบอแร็ก แสดงดังรูปที่ 3.5




(ก) A2G8-10 (ข) A4G6-10

(ค) A2G8-6 (ง) A4G6-6

**รูปที่ 3.5** การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล AG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลาย NaCl มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลาย NaCl มีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่น กล่าวคือเมื่อ NaCl ละลายน้ำจะแตกตัวให้ $Na^+$ ทำให้เกิดการผลักกันระหว่างประจุบวกที่อยู่ในโครงสร้างเจล ($Na^+$) กับประจุบวกที่อยู่ในสารละลายทำให้น้ำแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้ยากขึ้นเพราะแรงต้านที่เกิดขึ้นจากแรงผลักของประจุค่าการบวมตัวจึงลดลง นอกจากนี้ แรงผลักที่เกิดขึ้นทำให้น้ำสามารถแพร่ เข้าสู่โครงสร้างได้ช้า ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับไว้จึงน้อยส่งผลให้โครงสร้างเจลเกิดได้ช้ากว่าในน้ำกลั่น เจลจึงเกิดการเสียสภาพได้ช้ากว่าในน้ำกลั่น เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มสูงขึ้น พบว่าการบวมตัวของไฮโดรเจลมีค่าลดลง กล่าวคือค่าการบวมตัวในสารละลาย 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

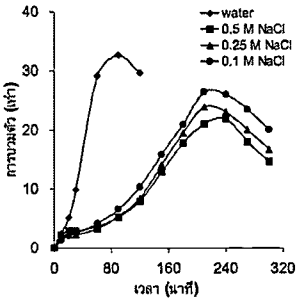
จากรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล AG ที่ใช้บอแร็กความเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าค่าบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงประมาณ 25 เท่า และค่าการบวมตัวลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาในการดูดซับน้ำที่ค่าการบวมตัวสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 60 นาที ในระบบน้ำกลั่นเป็นช่วง 180-240 นาที ในระบบสารละลายเกลือ NaCl

จากรูปที่ 3.5 (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

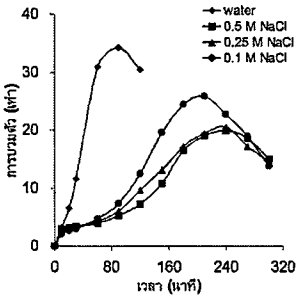
*ไฮโดรเจล CG*

พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ของไฮโดรเจล CG โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วน C : G และปริมาณสารเชื่อมโยงบอแร็ก แสดงดังรูปที่ 3.6

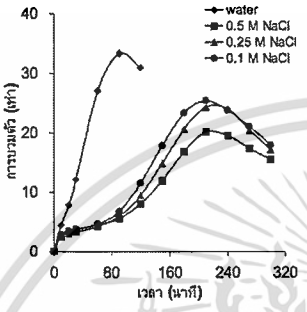
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



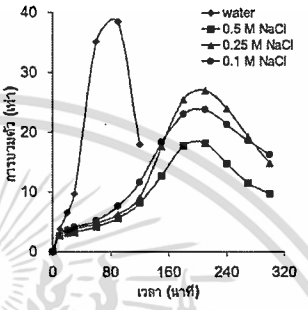

(ก) C2G8-10




(ข) C4G6-10




(ค) C2G8-6




(ง) C4G6-6

**รูปที่ 3.6** การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล CG

จากรูปที่ 3.6 การบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล CG มีแนวโน้มเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG กล่าวคือ ค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับการบวมตัว ในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลายมีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่น และไฮโดรเจลสามารถคงสภาพได้นานขึ้นเมื่อบวมตัวในสารละลาย NaCl เพราะเจลเกิดการผันกลับช้ากว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มสูงขึ้น การบวมตัวของไฮโดรเจลมีค่าลดลง กล่าวคือ ค่าการบวมตัวสูงสุดในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีค่ามากกว่าค่าการบวม ตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ และค่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ มีค่ามากกว่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เนื่องสารละลายมีแรงดันออสโมซิสต่ำลง น้ำจึงแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้น้อยลง

จากรูปที่ 3.6 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล CG ที่ใช้บอแร็ก ความเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าค่าบวมตัวในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 28 เท่า และค่าการบวมตัวลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มสูงขึ้น ไฮโดรเจลสูตร C2G8-10 มีค่าการบวมตัวในแต่ละ ความเข้มข้นแตกต่างกันชัดเจน แต่สูตร C4G6-10 มีค่าการบวมในสารละลาย NaCl ความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ใกล้เคียงกัน

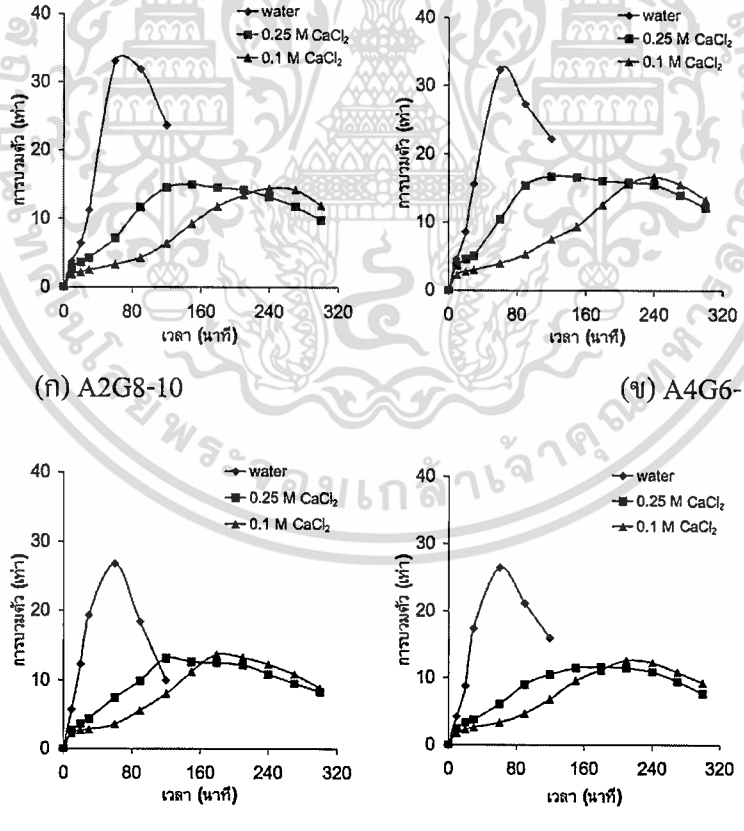
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.6 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจล CG ที่ใช้บอแร็ก ความเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยง พบว่าแนวโน้มของการบวมตัวใน สารละลาย 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

### 3.1.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$

*ไฮโดรเจล AG*




(ก) A2G8-10 (ข) A4G6-10

(ค) A2G8-6 (ง) A4G6-6

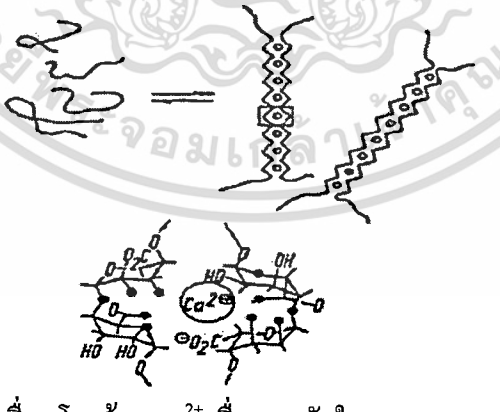
**รูปที่ 3.7** การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล AG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ของไฮโดรเจล AG เมื่อใช้บอแร็ก เข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A2G8-10 และ A4G6-10 มีค่าการบวม ตัวในสารละลายที่ความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์ ใกล้เคียงกันประมาณ 15 เท่า

จากรูปที่ 3.7 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ของไฮโดรเจล AG เมื่อใช้บอแร็ก เข้มเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A2G8-10 และ A4G6-10 มีค่าการ บวมตัวในสารละลายที่ความเข้มข้น 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 3.8) ทำให้เจลมีความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้น และโครงสร้างมี ความยืดหยุ่นลดลงส่งผลให้เจลดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้ยากขึ้น การบวมตัวใน สารละลาย $CaCl_2$ จึงมีค่าลดลง นอกจากนี้การเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำเข้าสู่โครงสร้างได้น้อยลงส่งผลให้บอเรตเกิด การผันกลับน้อยลง เจลจึงสามารถคงสภาพได้นานกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เมื่อความเข้มข้นของ สารละลาย $CaCl_2$ เพิ่มขึ้น พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกัน เนื่องจากไฮโดรเจลมีความสามารถ สูงสุดในการดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้ใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงต้นของการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้เร็วกว่าการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เนื่องจาก เมื่อ $Ca^{2+}$ เคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างเจลจะพาโมเลกุลของน้ำเข้าไปด้วย ดังนั้น เมื่อ $Ca^{2+}$ มีปริมาณมาก ขึ้นและเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างได้มากจึงสามารถพาโมเลกุลของน้ำเข้าไปได้เร็ว ทำให้เจลบวมตัวเร็ว ในช่วงต้น

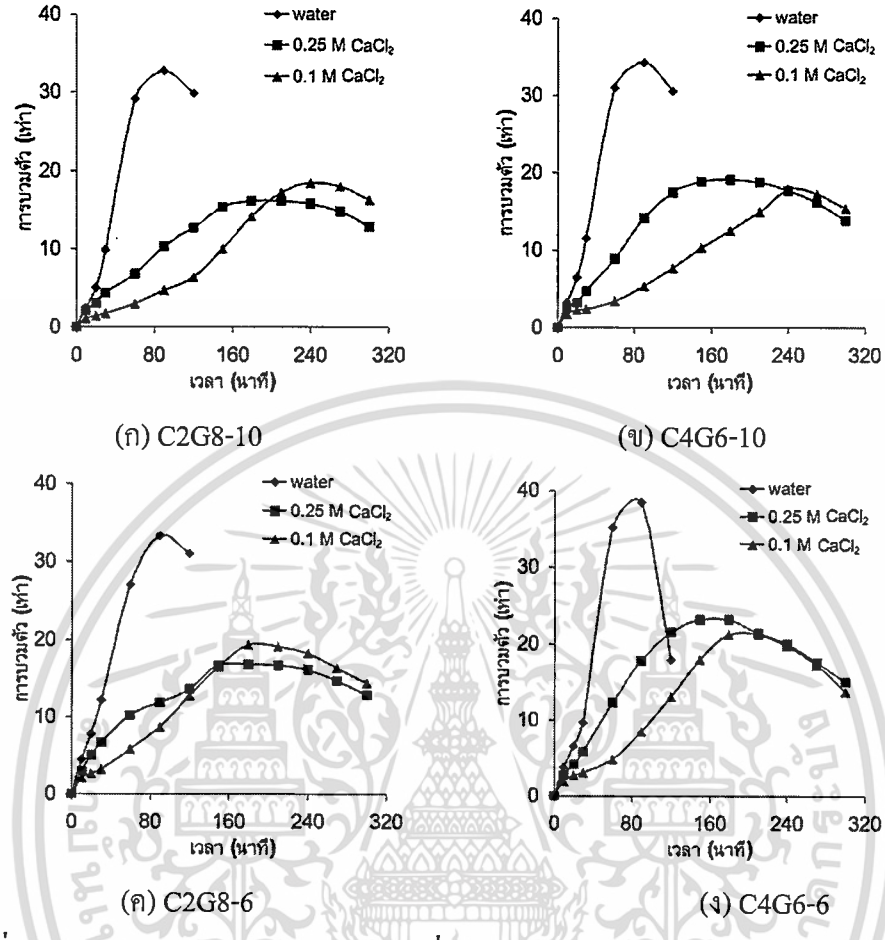


**รูปที่ 3.8** การเชื่อมโยงด้วย $Ca^{2+}$ เมื่อบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ [21]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*ไฮโดรเจล CG*




(ก) C2G8-10 (ข) C4G6-10

(ค) C2G8-6 (ง) C4G6-6

**รูปที่ 3.9** การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล CG

จากรูปที่ 3.9 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ของไฮโดรเจล CG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และรูปที่ 3.9 (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 เมื่อน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้น้อยลงทำให้การเชื่อมโยงของ บอเรตเกิดการผันกลับน้อยและช้ากว่าทำให้เจลสามารถคงสภาพได้นานกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น และเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $CaCl_2$ เพิ่มขึ้น พบว่าไฮโดรเจลมีความสามารถสูงสุดในการ ดูดซับใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG กล่าวคือ ในช่วงต้นของการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้เร็วกว่าการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เนื่องจากเมื่อ $Ca^{2+}$ มีปริมาณมากขึ้นและเคลื่อนที่เข้าสู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

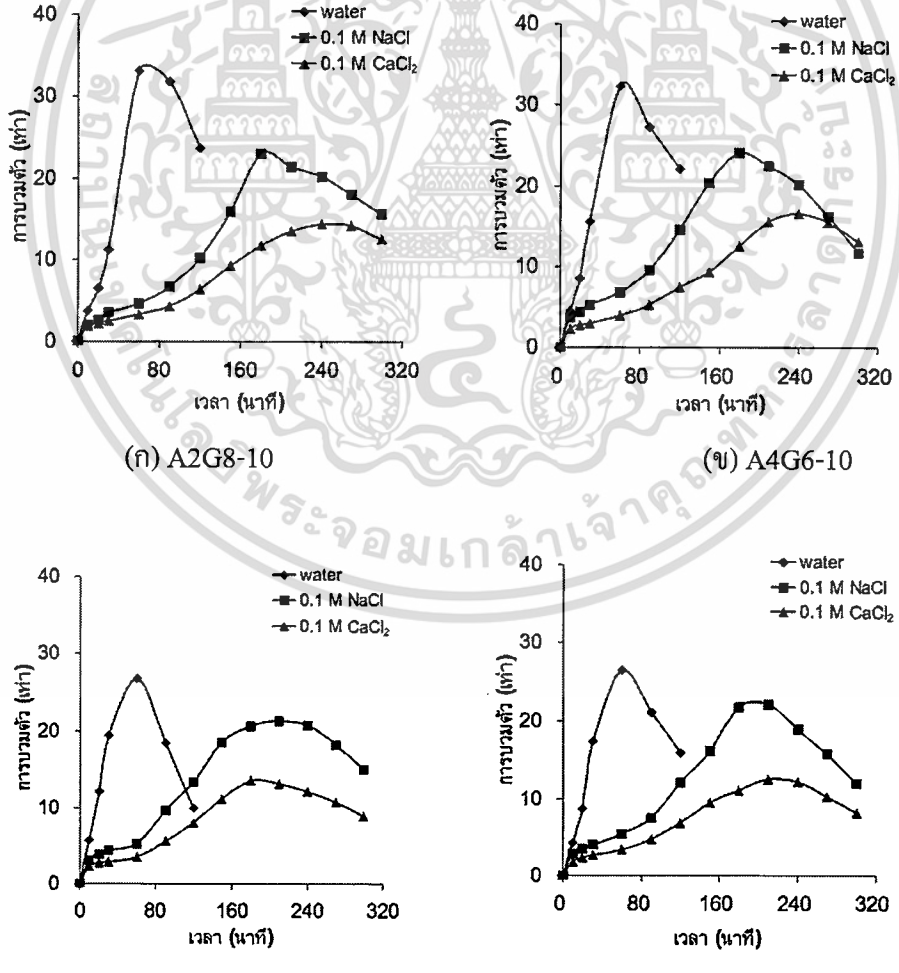
โครงสร้าง ได้มากจึงสามารถพาโมเลกุลของน้ำเข้าสู่โครงสร้างของเจลได้มากขึ้น ส่งผลให้เจลมีการบวมตัวเร็ว ในช่วงต้น

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

### 3.1.2.3 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 3.10 และรูปที่ 3.11

*ไฮโดรเจลชนิด AG*



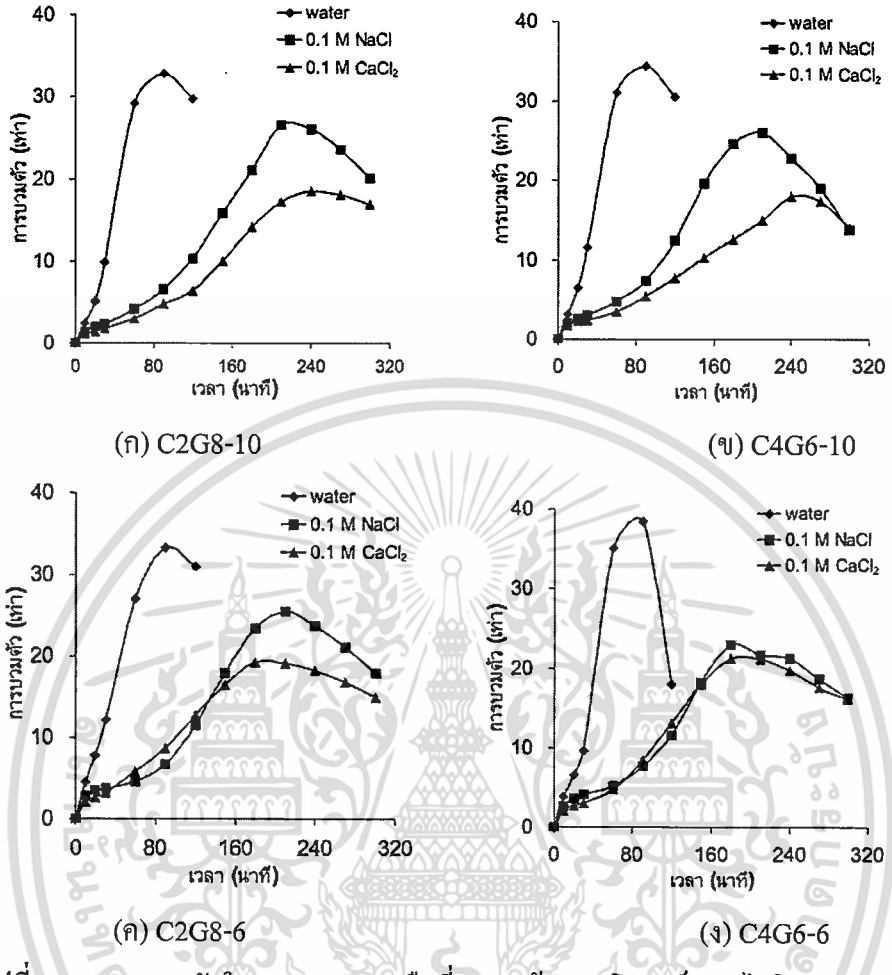

(ก) A2G8-10 (ข) A4G6-10

(ค) A2G8-6 (ง) A4G6-6

**รูปที่ 3.10** การบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้ม 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล AG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*ไฮโดรเจลชนิด CG*




(ก) C2G8-10 (ข) C4G6-10

(ค) C2G8-6 (ง) C4G6-6

**รูปที่ 3.11** การบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้ม 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล CG

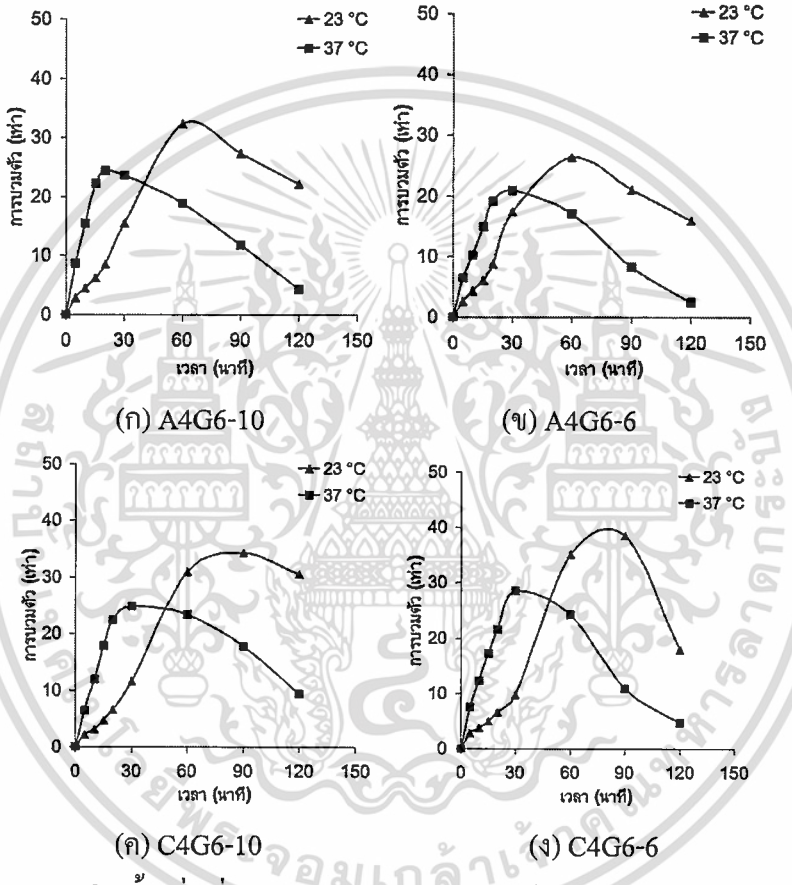
จากรูปที่ 3.10 และรูปที่ 3.11 พบว่าการบวมตัวของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG ในน้ำกลั่นมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับการบวมตัวในสารละลาย NaCl และ $CaCl_2$ เนื่องจากสารละลายเกลือทั้งสองชนิดมีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่นทำให้น้ำแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้น้อย แต่การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าต่ำที่สุด เนื่องมาจากสองสาเหตุ คือ สารละลาย $CaCl_2$ มีค่า Ionic strength สูงกว่าทั้งน้ำกลั่นและสารละลาย NaCl และเจลมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโยงโดย $Ca^{2+}$ ที่อยู่ในสารละลายทำให้เจลมีความหนาแน่นเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นและทำให้โครงสร้างมี ความยืดหยุ่นลดลงส่งผลให้เจลดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้น้อยลง การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ จึงมีค่าน้อย นอกจากนี้การเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เจลสามารถคงสภาพไว้ได้นานกว่าในน้ำกลั่นและในสารละลาย NaCl โดยเจลเริ่มเสียสภาพได้เร็วที่สุดเมื่อบวมตัวในน้ำกลั่นเพราะเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้มากทำให้พันธะภายในโครงสร้างเกิดการผันกลับเร็ว การเสียสภาพของเจลเมื่อบวมตัวในน้ำกลั่นจึงเกิดขึ้นเร็วกว่าการบวมตัวในสารละลายเกลือทั้งสองชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบในหัวข้อ 3.1.2.1 และ 3.1.2.2 จึงได้เลือกไฮโดรเจลสูตร A4G6-10, A4G6-6, C4G6-10 และ C4G6-6 ไปศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวในปัจจัยอื่นต่อไป

### 3.1.3 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

การบวมตัวของไฮโดรเจลแบบ AG และ CG สูตรต่างๆ ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C แสดงผลดังรูปที่ 3.12




**รูปที่ 3.12** การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

จากรูปที่ 3.12 (ก) และ (ข) เป็นไฮโดรเจลที่เตรียมจากโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม โดยใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A4G6-10 มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 37°C ประมาณ 25 เท่า ดีกว่าสูตร A4G6-6 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัวลดลงเมื่อเทียบกับการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้พลังงานจลน์ของน้ำและโมเลกุลต่างๆ ในระบบเพิ่มสูงขึ้น น้ำจึงเข้าล้อมสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนต กัวร์กัม และบอเรตได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ระยะห่างของพันธะ ภายในโครงสร้างมากขึ้น เจลจึงเกิดการผันกลับและเสียสภาพได้เร็วเพราะบอเรตหลุดออกจากโครง-สร้างเร็วและโซเดียมอัลจิเนตมีการละลายสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อบวมตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้

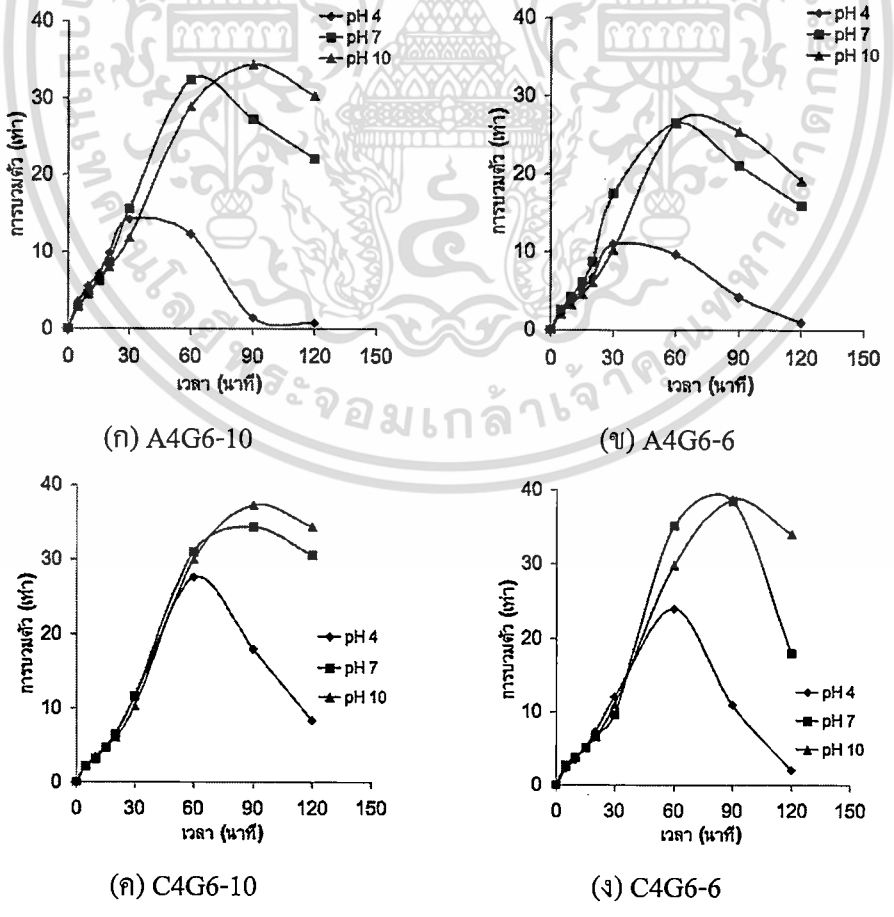
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงต้นเจล สามารถดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิต่ำและเกิดการผันกลับของพันธะเชื่อมโยงใน โครงสร้าง รวมทั้งโซเดียมอัลจิเนตละลายออกได้เร็วขึ้นมีผลให้เจลเกิดการเสียสภาพได้เร็วขึ้น

จากรูปที่ 3.12 (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 เนื่องจากการบวมตัวที่อุณหภูมิสูงทำให้พันธะเชื่อมโยงในโครงสร้าง เกิดการผันกลับได้เร็วและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถละลายได้ดีขึ้นจึงมีผลให้เจลเสียสภาพเร็วขึ้น

### 3.1.4 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 3.13




**รูปที่ 3.13** การบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.13 (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 3.13 (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 ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัว ที่สภาวะกรดต่ำที่สุด 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] ทำให้ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลลดลงและไฮโดรเจล เกิดการเสียสภาพได้เร็วขึ้นเมื่อบวมตัวในสภาวะกรด

จากพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ ได้แก่ ไฮโดรเจล AG และไฮโดรเจล CG พบว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกัวร์กัมในไฮโดรเจล CG น่าจะมีความสามารถในเข้ากันได้ดีกว่าโซเดียมอัลจิเนตกับกัวร์กัมในไฮโดรเจล AG เนื่องจากโซเดียมคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าโซเดียมอัลจิเนตทำให้สายโซ่โมเลกุลของโซเดียมคาร์บอซี-เมทิลเซลลูโลสสามารถแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุลของกัวร์กัมได้ดี ทำให้ค่าการบวมตัวสูง สุดของไฮโดรเจล CG ในสภาวะต่างๆ มีแนวโน้มดีกว่าไฮโดรเจล AG แต่ไฮโดรเจล AG สามารถ เชื่อมโยงด้วย $Ca^{2+}$ ได้ดีกว่าไฮโดรเจล CG ทำให้เจลเสียสภาพยาก ดังนั้นเพื่อเป็นการปรับปรุงให้ ไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบมีสมบัติในการดูดซับน้ำที่ดีขึ้น จึงได้ทำการเตรียมไฮโดรเจลแบบ สามองค์ประกอบขึ้น

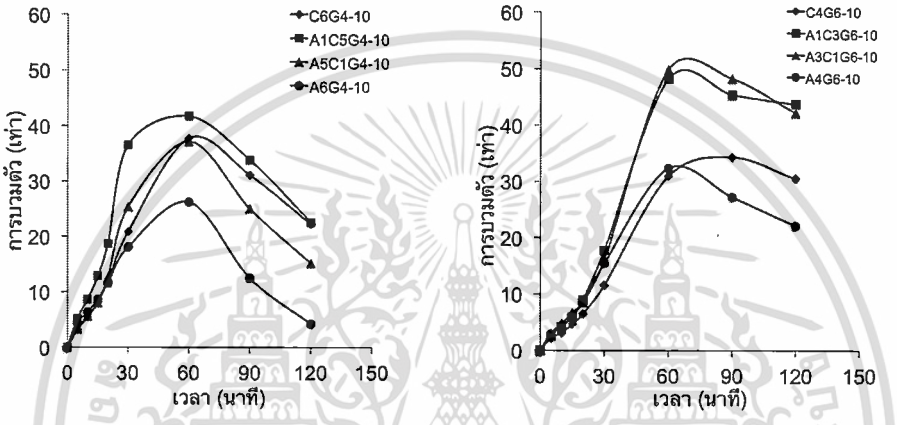
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงกลไกเดียว

### 3.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลโซเดียมอัลจิเนต/โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม (ACG)

จากการศึกษาการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสูตรต่างๆ ในน้ำกลั่น ให้ผลการบวมตัว แสดงดังรูปที่ 3.14

*<u>บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร</u>*




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

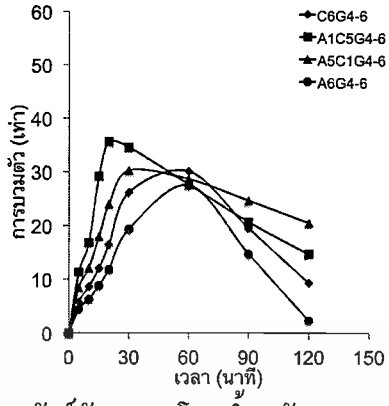
**รูปที่ 3.14** การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้สารละลายบอแร็ก 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

จากรูปที่ 3.14 (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

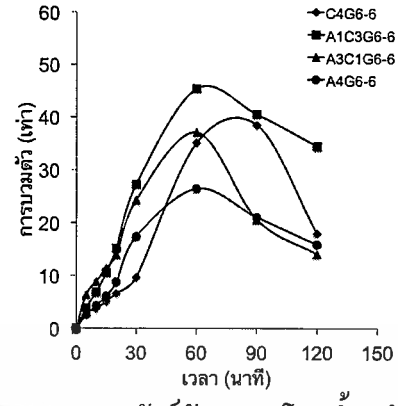
จากรูปที่ 3.14 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่มีปริมาณกัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A1C3G6-10 และ A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวสูงสุดประมาณ 50 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ ได้แก่ สูตร A6G4-10 และ C6G4-10 พบว่าสูตร A1C3G6-10 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร C4G6-10 และสูตร A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร A6G4-10 และไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสามารถคงสภาพเจลได้ใกล้เคียงกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*<u>บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร</u>*




(ก) กัวร์กัม 40% โดยน้ำหนัก




(ข) กัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก

**รูปที่ 3.15** การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้สารละลายบอแร็ก 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

จากรูปที่ 3.15 (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 ซึ่งมีค่า การบวมตัวดีกว่าและเสียสภาพเร็วกว่าสูตร A6G4-6

จากรูปที่ 3.15 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่มีปริมาณกัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A1C3G6-6 มีค่าการบวมตัวประมาณ 45 เท่า และสูตร A3C1G6-6 มีค่าการบวมตัวประมาณ 35 เท่า เมื่อเปรียบ เทียบกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ ได้แก่ สูตร A6G4-6 และ C6G4-6 พบว่าสูตร A1C3G6-6 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร C4G6-10 และสูตร A3C1G6-6 มีค่าการบวมตัวดีกว่าสูตร A6G4-10 และไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสามารถคงสภาพเจลได้ใกล้เคียงกับไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ

จากรูปที่ 3.14 และ 3.15 ไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนัก ต่อปริมาตร (ACG-10) มีการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-6) เนื่องจากไฮโดรเจล ACG-10 มีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากกว่าไฮโดรเจล ACG-6 ดังนั้นเมื่อเกิดการผันกลับของพันธะเชื่อมโยงภายในไฮโดรเจล ACG-10 จึงมีบอเรตมากพอที่จะยึดโครงสร้างให้สามารถดูดซับน้ำต่อไปได้

จากข้างต้น ไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบสามารถบวมตัวได้ดีกว่าไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ เนื่องจากองค์ประกอบที่สามที่เพิ่มเข้าไปทำให้เกิดการรบกวนความเป็นระเบียบของ

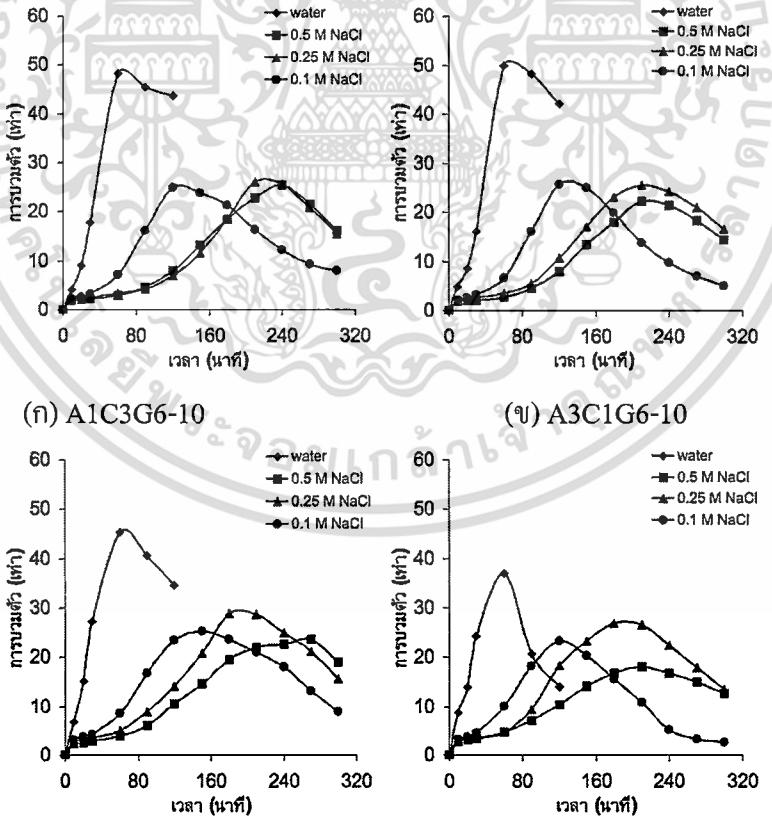
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ เดิมที่มีสององค์ประกอบ ความไม่เป็นระเบียบของระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้โครงสร้างของเจลที่เตรียม ได้มีช่องว่างเพิ่มขึ้นทำให้มีการบวมตัวเพิ่มขึ้น กล่าวคือ องค์ประกอบที่สามทำให้การจัดเรียงตัวของ สายโซ่โมเลกุลของระบบสององค์ประกอบเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่อเชื่อมโยงแต่ละสายโซ่ด้วยบอเรตจึง มีโอกาสเกิดช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้น เมื่อมีช่องว่างในโครงสร้างมากขึ้นทำให้ดูดซับน้ำได้มากขึ้น ค่าการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบจึงมีค่ามากกว่าแบบสององค์ประกอบ

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

### 3.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายเกลือชนิดต่างๆ ของไฮโดรเจล ACG

#### 3.2.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl




(ก) A1C3G6-10 (ข) A3C1G6-10

(ค) A1C3G6-6 (ง) A3C1G6-6

**รูปที่ 3.16** การบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล ACG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.16 (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 ของไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเกิดการเสียสภาพเร็วกว่าการบวมตัวในสารละลายเข้มข้น 0.25 และ 0.5 โมลาร์ เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มทำให้สารละลายมีแรงดันออสโมซิสลดลง น้ำจึงแพร่เข้าสู่โครงสร้างเจลได้น้อย ดังนั้นค่าการบวมตัวในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงจึงมีค่าน้อยกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ

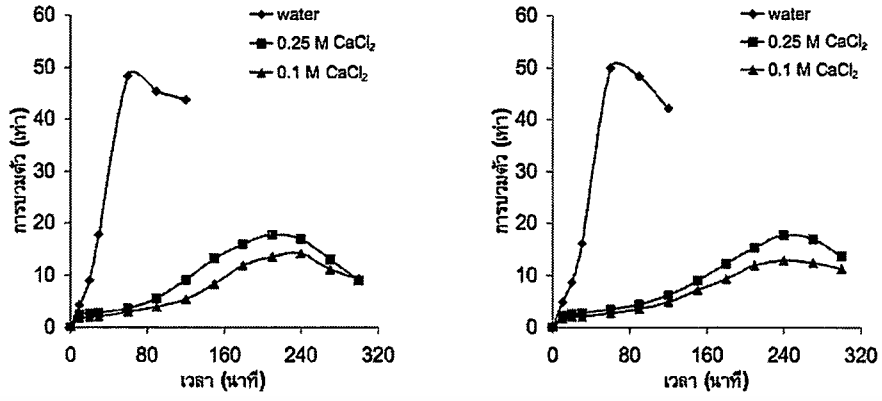
เมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10 และ A3C1G6-10 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบกับไฮโดรเจลสูตร A4G6-10 และ C4G6-10 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ พบว่าไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบมีการบวมตัวในสารละลาย NaCl ดีกว่าไฮโดรเจลระบบสอง องค์ประกอบ เนื่องจากองค์ประกอบที่สามที่เพิ่มเข้าสู่ระบบทำให้โครงสร้างของเจลมีช่องว่างเพิ่ม ขึ้นทำให้สามารถดูดซับสารละลายดีขึ้น เช่นเดียวกับการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลระบบสาม องค์ประกอบที่มีค่าการบวมตัวดีกว่าไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบ

จากรูปที่ 3.16 (ค) และ (ง) เป็นการบวมตัวในสารละลาย NaCl ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-6 (รูปที่ 3.16 (ค)) มีค่าการบวมตัวในสารละลายที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ใกล้เคียงกันประมาณ 25 เท่า แต่ในสารละลายเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เจลสามารถเกิดการเสียสภาพได้ เร็วที่สุดและการบวมตัวในสารละลายเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เกิดการเสียสภาพช้าที่สุด การบวมตัวของไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-6 (รูปที่ 3.16 (ง)) ในสารละลายความเข้มข้น 0.1 และ 0.25 โมลาร์ มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 25 เท่า และในสารละลาย NaCl เข้มข้น 0.5 โมลาร์ สามารถบวมตัวได้ 20 เท่า การบวมตัวของไฮโดรเจลทั้งสองสูตรในสารละลาย NaCl มีค่าน้อยกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลาย NaCl มีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่น และการบวมตัวในสารละลาย NaCl สามารถคงสภาพเจลได้นานกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากพันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับได้ช้ากว่าในน้ำกลั่น

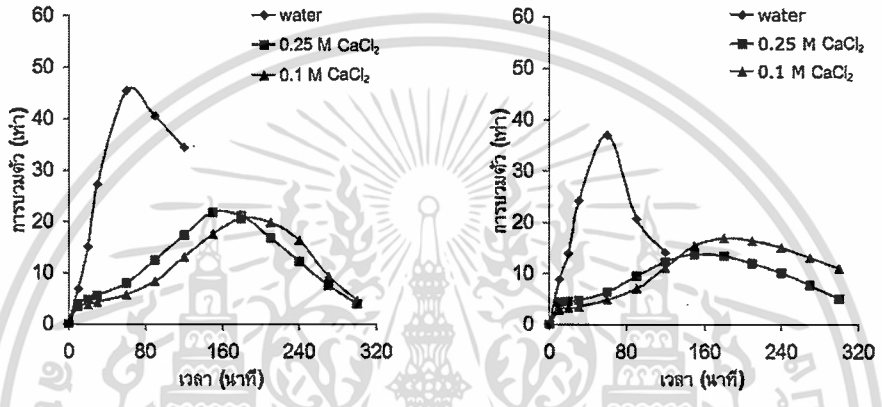
เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลสูตร A4G6-6 และ C4G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ พบว่าการบวมตัวในสารละลาย NaCl ของไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบมีค่าสูงกว่าไฮโดรเจลระบบสององค์ประกอบ

**3.2.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ก) A1C3G6-10 (ข) A3C1G6-10




(ค) A1C3G6-6 (ง) A3C1G6-6

**รูปที่ 3.17** การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันของไฮโดรเจล ACG

จากรูปที่ 3.17 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-10) และรูปที่ 3.17 (ค) และ (ง) เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-6) พบว่าไฮโดรเจลแต่ละ สูตรมีค่าการบวมตัวในสารละลายความเข้มข้น 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

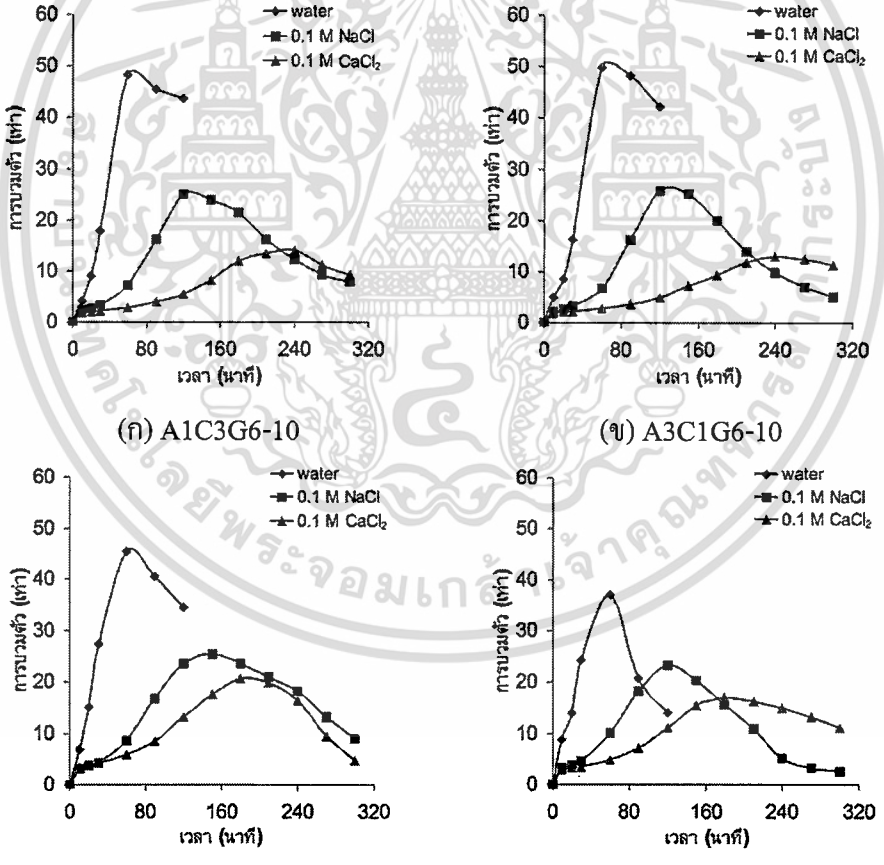
เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย $CaCl_2$ เพิ่มขึ้น พบว่าการบวมตัวมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดใกล้เคียงกัน แต่ในช่วงต้นของการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้เร็วกว่าการบวมตัวที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เนื่องจากเมื่อ $Ca^{2+}$ มีปริมาณมากขึ้นและเคลื่อนที่เข้าสู่โครงสร้างได้มากจึงสามารถพาโมเลกุลของน้ำเข้าสู่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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 $Ca^{2+}$ ได้มากกว่าสูตรที่มีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มากทำให้โครงสร้างเจลมีความยืดหยุ่นลดลง ดังนั้นไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนต มากจึงบวมตัวน้อยกว่าสูตรที่มีปริมาณโซเดียมอัลจิเนตน้อย

### 3.2.2.3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย NaCl และ $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์




(ก) A1C3G6-10 (ข) A3C1G6-10

(ค) A1C3G6-6 (ง) A3C1G6-6

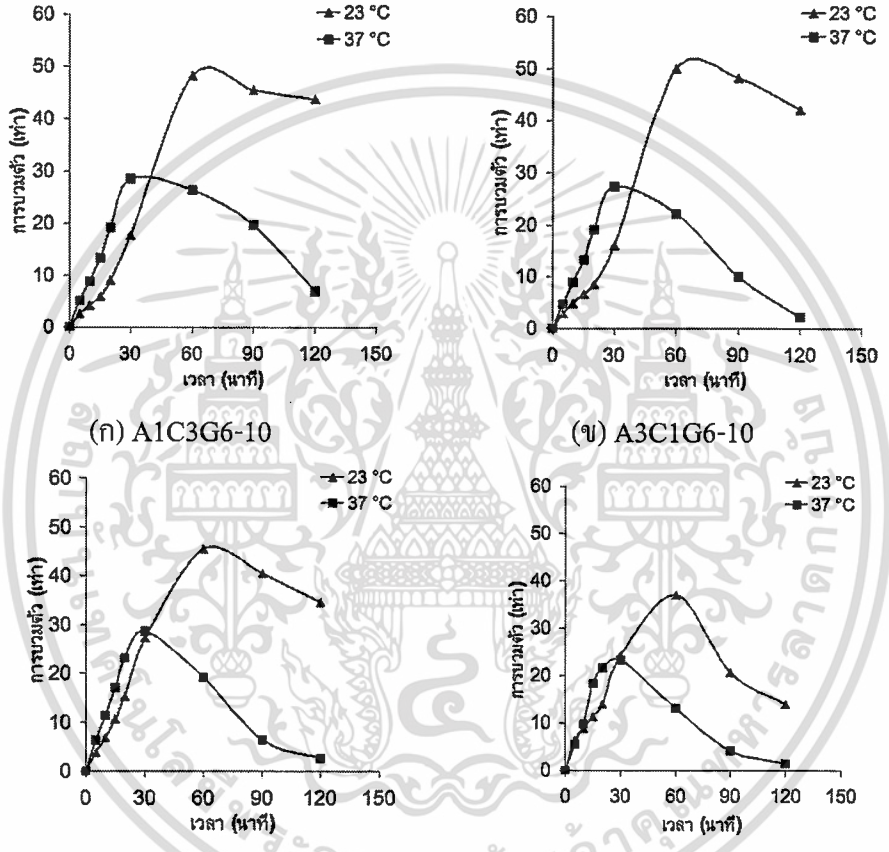
**รูปที่ 3.18** การบวมตัวในสารละลายเกลือความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ของไฮโดรเจล ACG

จากรูปที่ 3.18 (ก) และ (ข) เป็นการบวมตัวในสารละลายเกลือสองชนิด คือ NaCl และ $CaCl_2$ ของไฮโดรเจล ACG เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-10) และรูป (ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ (ง) เมื่อใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ACG-6) พบว่าไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวในสารละลายเกลือทั้งสองชนิดต่ำกว่าการบวมตัวในน้ำกลั่น เนื่องจากสารละลายเกลือทั้งสองชนิดมีค่า Ionic strength สูงกว่าน้ำกลั่น และการบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุดแต่สามารถคงสภาพเจลได้นานที่สุด เนื่องจากเจลมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโยงโดย $Ca^{2+}$

### 3.2.3 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG




(ก) A1C3G6-10 (ข) A3C1G6-10

(ค) A1C3G6-6 (ง) A3C1G6-6

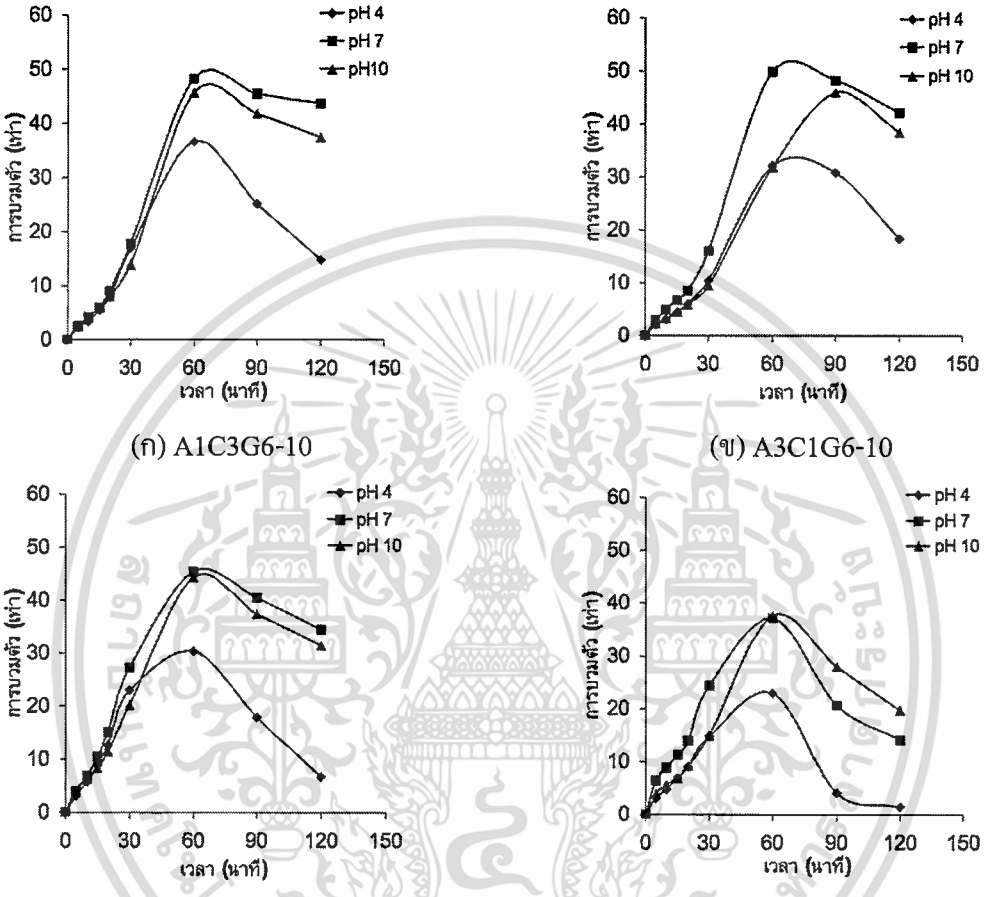
**รูปที่ 3.19** การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG

จากรูปที่ 3.19 เป็นการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG โดยรูปที่ 3.18 (ก) และ (ข) เป็นไฮโดรเจล ACG ที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าไฮโดรเจลสูตร A1C3G6-10 และสูตร A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวใกล้กันประมาณ 30 เท่า และรูปที่ 3.19 (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 เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การละลายมากขึ้นและพันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างเกิดการผันกลับเร็วขึ้นทำให้เจล เกิดการเสียสภาพได้เร็วและบวมตัวได้น้อย

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




(ก) A1C3G6-10 (ข) A3C1G6-10

(ค) A1C3G6-6 (ง) A3C1G6-6

**รูปที่ 3.20** การบวมตัวที่ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG

จากรูปที่ 3.20 (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 3.20 (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 มี

เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มการบวมตัวเช่นเดียวกับสูตร 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 3.20 ไฮโดรเจล ACG มีแนวโน้มในการบวมตัวเช่นเดียวกับไฮโดรเจล AG และ CG โดยไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวในสารละลายที่สภาวะเป็นกลางใกล้เคียงกับการบวมตัวในสารละลายที่สภาวะเบส แต่ค่าการบวมตัวลดลงเมื่อบวมตัวในสารละลายที่สภาวะกรด และการเสียสภาพเจลเกิดเร็วขึ้นเมื่อบวมตัวในสารละลายที่สภาวะกรด เนื่องจากโครงสร้างของสารตั้งต้นทั้งสองถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปกรดซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำจึงไม่เอื้อต่อการบวมตัวของเจล และในสารละลายกรดบอเรตจะเกิดการผันกลับเร็วขึ้น ทำให้เจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง นอกจากนี้ไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีแนวโน้มในการบวมตัวที่ดีกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมาก

## 3.3 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไก

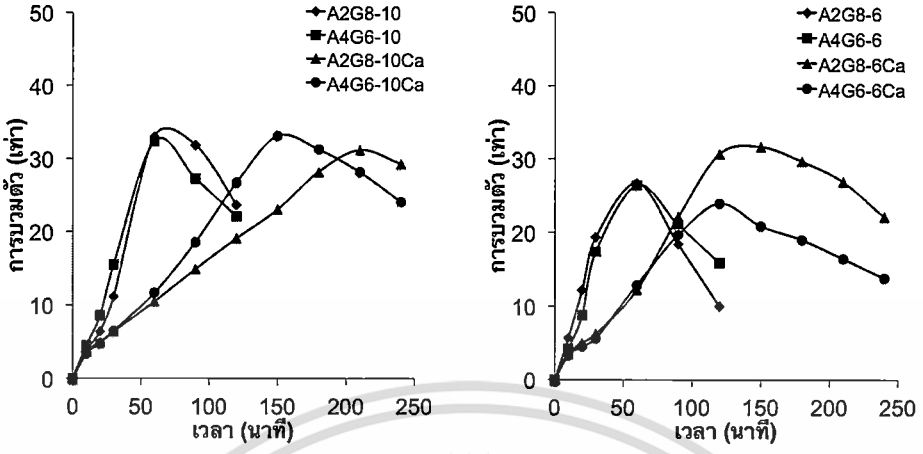
ไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไกนี้ การเชื่อมโยงในกลไกสองเตรียมโดยการ แช่ไฮโดรเจลแห้งที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กลงในสารละลาย $CaCl_2$ โดยใช้ความเข้มข้นของ $CaCl_2$ เท่ากับ 0.1 โมลาร์เป็นเวลา 30 นาที โดยพิจารณาเลือกใช้ความเข้มข้นดังกล่าวจาก พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลาย $CaCl_2$ พบว่าไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีความสามารถ การบวมตัวในสารละลาย $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที

ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไก ในกลไกแรกเป็นการเชื่อมโยงด้วยบอแร็กและกลไกที่สองเป็น การเชื่อมโยงด้วยไดวาเลนต์ คือ $Ca^{2+}$ ที่ได้จากการแตกตัวของ $CaCl_2$ การเชื่อมโยงดังกล่าวเป็นการ เชื่อมโยงด้วยแรงทางประจุ โดย $Ca^{2+}$ จะเข้าไปแทนที่ $Na^{+}$ ที่อยู่บนโครงสร้างของโซเดียมอัลจิเนต และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

### 3.3.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (AG-Ca) และไฮโดรเจล CG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (CG-Ca)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

*ไฮโดรเจล AG-Ca*




(ก) บอแร็ก 1.0% w/v (ข) บอแร็ก 0.6 % w/v

**รูปที่ 3.21** การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล AG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่างๆ

จากรูปที่ 3.21 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจล AG-Ca โดยกลไกแรกเชื่อมโยงด้วยบอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าสูตร A4G6-10Ca และ สูตร A2G8-10Ca มีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 30 เท่า แต่สูตร A2G8-10Ca สามารถคงสภาพเจลไว้ได้ นานกว่า โดยเริ่มเสียสภาพเจลหลังจาก 210 นาทีไปแล้ว แต่สูตร A4G6-10Ca เริ่มเสียสภาพเจล เมื่อนาทีที่ 150 เนื่องจากสูตร A4G6-10Ca มีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตมากกว่าทำให้เมื่อเจลเกิด การผันกลับการละลายออกมีผลมากกว่าสูตร 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 3.21 (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 เนื่องจากมีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตมากกว่าทำ

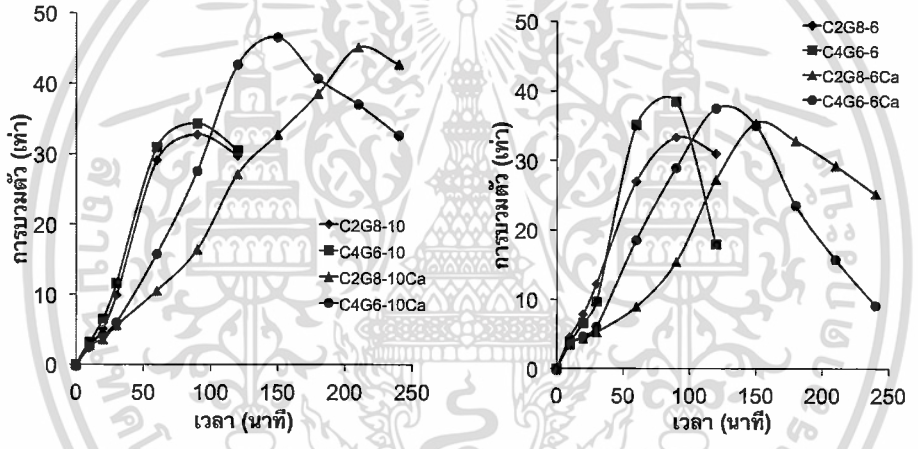
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้พันธะภายในโครงสร้างของเจลเกิดการผันกลับ การละลายออกของโซเดียมอัลจิเนตจึงมี ผลมากกว่าสูตร A2G8-6Ca

เมื่อเปรียบเทียบกับ A2G8-6 และ A4G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียว ด้วยบอแร็ก พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกัน แต่ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกสามารถ คงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นานกว่าเนื่องมาจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย $Ca^{2+}$

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.21 ไฮโดรเจลสูตร A2G8-10Ca และสูตร A4G6-10Ca มีค่าการบวมตัวดีกว่า และคงสภาพเจลได้นานกว่าไฮโดรเจลสูตร A2G8-6Ca และสูตร A4G6-6Ca และเมื่อเปรียบเทียบกับ ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่าไฮโดรเจลทั้งสองกลุ่มมีการบวมใกล้เคียงกัน แต่ไฮโดรเจลที่ เชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพเจลได้นานขึ้น

*ไฮโดรเจล CG-Ca*




(ก) บอแร็ก 1.0% w/v (ข) บอแร็ก 0.6% w/v

**รูปที่ 3.22** การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล CG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.22 (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 $Ca^{2+}$ ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครง- สร้างมีความหนาแน่นเชื่อมโยงมากขึ้นกว่าการเชื่อมโยงด้วยบอเรตเพียงอย่างเดียว และการเชื่อมโยง ที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลให้เจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้แม้บอเรตจะเริ่มหลุดออกจากโครงสร้าง

จากรูปที่ 3.22 (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 มีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากกว่าทำให้พันธะภาย ในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับ ดังนั้นการละลายออกของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในสูตร C4G6-6Ca จึงมีผลมากกว่าสูตร C2G8-6Ca

เมื่อเปรียบเทียบกับ C2G8-6 และ C4G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วย บอแร็ก พบว่ามีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกัน แต่ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นานกว่าเนื่องมาจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย $Ca^{2+}$

เมื่อพิจารณารูปที่ 3.22 ไฮโดรเจล CG-Ca ที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มเข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าการบวมตัวที่ดีกว่าและคงสภาพเจลได้นานกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย $Ca^{2+}$ มีค่าการบวมใกล้เคียงกัน และเนื่องจากโครงสร้างของไฮโดรเจลมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นทำให้สารตั้งต้นละลายออกจากโครงสร้างได้ยาก ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกจึงสามารถคงสภาพได้ดีกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว

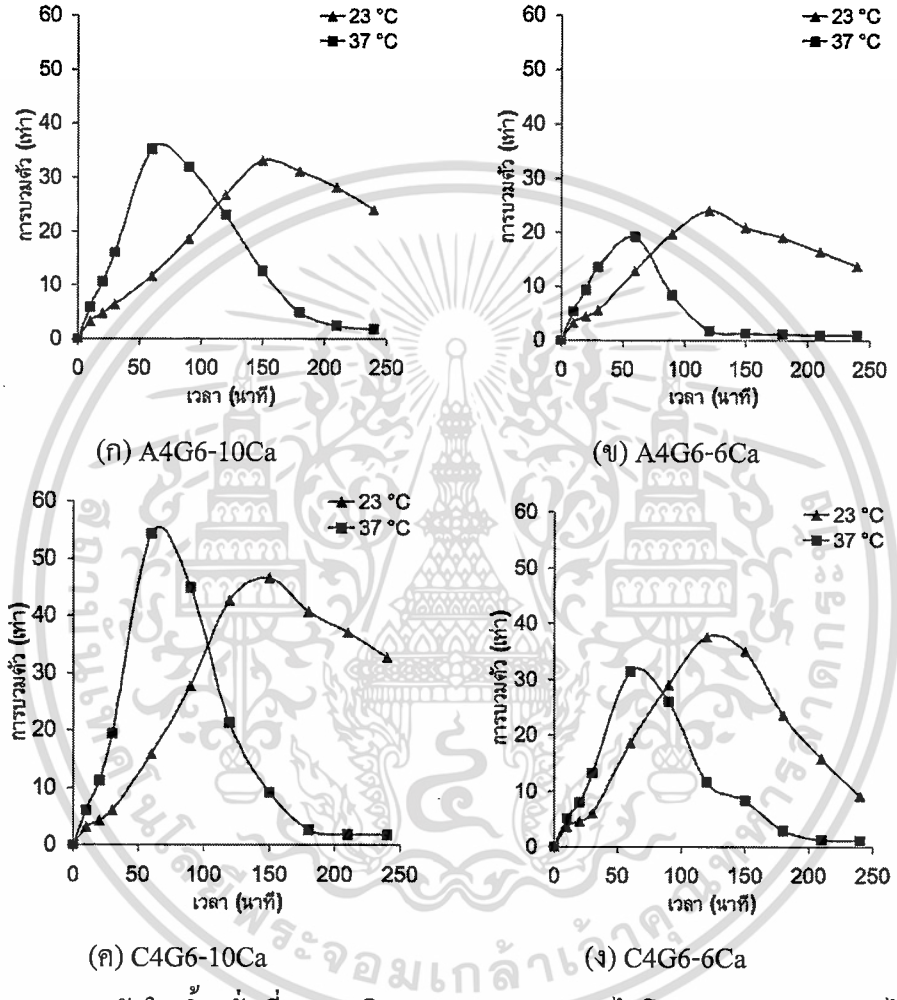
เมื่อพิจารณารูปที่ 3.21 และรูปที่ 3.22 พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกมีการเสียสภาพ เจลช้ากว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียว แต่มีค่าการบวมตัวสูงสุดใกล้เคียงกัน เนื่องจากใน ขั้นตอนของการเชื่อมโยงกลไกที่สองเป็นการแช่ไฮโดรเจลแห้งลงในสารละลาย $CaCl_2$ ทำให้เกิดการ เชื่อมโยงกลไกที่สองที่พื้นผิวด้านนอก ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่โครง-สร้างนานขึ้น เนื่องจากที่พื้นผิวด้านนอกมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงสูง แต่เมื่อน้ำเข้าสู่โครงสร้าง ได้ถึงจุดสูงสุดแล้วพันธะภายในโครงสร้างจึงเริ่มเกิดการผันกลับ เจลจึงเริ่มเกิดการเสียสภาพ ส่งผลให้ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกเสียสภาพช้ากว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียวแต่มีค่าการบวมตัวสูงสุดใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 3.21 และ 3.22 ไฮโดรเจล CG-Ca มีความสามารถในการบวมตัวที่ดีกว่าไฮโดรเจล AG-Ca เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย $Ca^{2+}$ ได้ดีกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลสจึงทำให้ไฮโดรเจล AG-Ca มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากกว่าไฮโดรเจล CG-Ca จึง ทำให้บวมตัวได้ยาก นอกจากนี้ยังพบว่าสูตรที่มีปริมาณกัวร์กัม 60% โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวม ตัวดี จึงได้เลือกสูตร A4G6-10Ca, A4G6-6Ca, C4G6-10Ca และ C4G6-6Ca ไปศึกษาการบวมตัวในปัจจัยอื่นต่อไป

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




(ก) A4G6-10Ca (ข) A4G6-6Ca

(ค) C4G6-10Ca (ง) C4G6-6Ca

**รูปที่ 3.23** การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca

จากรูปที่ 3.23 (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 ทำให้ไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเสียสภาพเร็วกว่าการบวมตัวที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 23°C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้บอเรตผันกลับเร็วและโซเดียมอัลจิเนตละลายออกจากโครงสร้างได้มากขึ้น การเสียสภาพเจลจึงเกิดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

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

จากรูปที่ 3.23 (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 เนื่องจากเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้บอเรตสามารถผันกลับได้เร็วและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายออก จากโครงสร้างได้มากขึ้น การเสียสภาพเจลจึงเกิดเร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

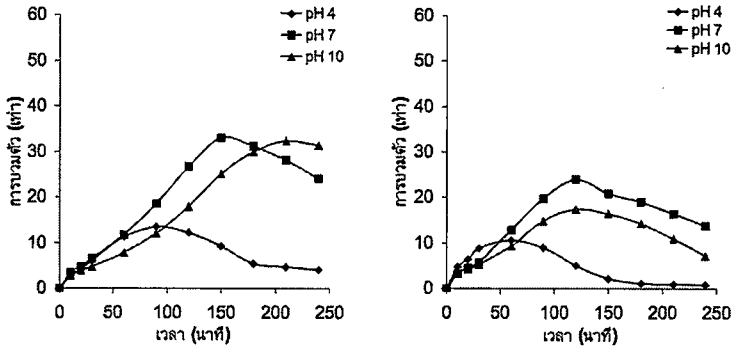
เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ระหว่างไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว คือ สูตร C4G6-10 และ C4G6-6 กับไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไก คือ สูตร C4G6-10Ca และ C4G6-6Ca พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพเจลไว้ได้นานกว่าไฮโดรเจล ที่เชื่อมโยงเพียงกลไกเดียว เนื่องจากมีการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นทำให้โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หลุดออกจากโครงสร้างยากขึ้น 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

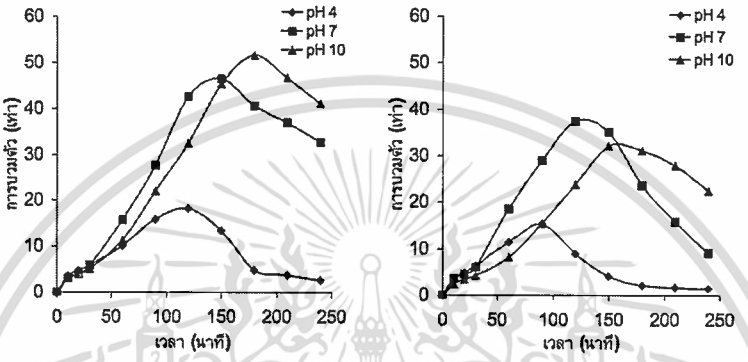
### 3.3.3 พฤติกรรมการบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca

การบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบเชื่อมโยงสองกลไก แสดงดังรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ก) A4G6-10Ca (ข) A4G6-6Ca




(ค) C4G6-10Ca (ง) C4G6-6Ca

**รูปที่ 3.24** การบวมตัวที่สภาวะกรด-เบสเริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจลของไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca

จากรูปที่ 3.24 (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 3.24 (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 3.24 ค่าการบวมตัวที่สภาวะเป็นกลาง (pH เริ่มต้น 7) ใกล้เคียงกับค่าการบวมตัวที่สภาวะเบส (pH เริ่มต้น 10) และค่าการบวมตัวลดลงเมื่อบวมตัวที่สภาวะกรด (pH เริ่มต้น 4) เนื่องจากในสภาวะกรด $H^+$ ในสารละลายเข้าจับกับหมู่คาร์บอกซิเลตบนสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนต และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้สารทั้งสองอยู่ในรูปกรดซึ่งไม่ละลายน้ำและ $H^+$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถ จับกับบอเรตทำให้พันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับได้ ดังนั้นการบวมตัวที่สภาวะกรดจึง มีค่าต่ำกว่าที่สภาวะเป็นกลางและเบสอย่างชัดเจน

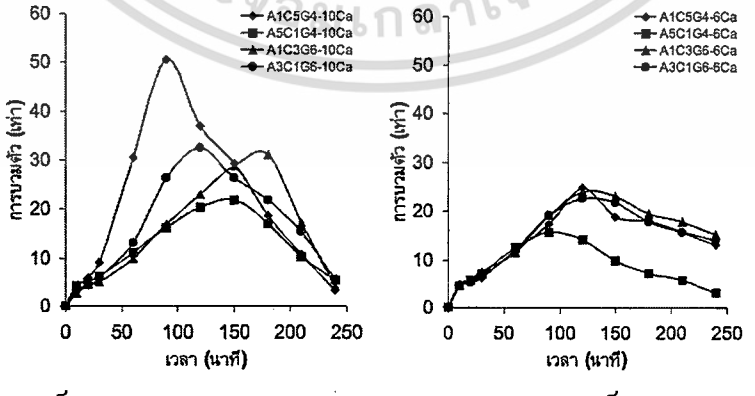
ไฮโดรเจล CG-Ca มีแนวโน้มการบวมตัวดีกว่าไฮโดรเจล AG-Ca เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย $Ca^{2+}$ ได้ดีกว่าโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสทำให้ไฮโดรเจล AG-Ca มีความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากกว่าไฮโดรเจล CG-Ca จึงบวมตัวได้น้อย นอกจากนี้ ไฮโดรเจลที่ใช้ บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารเชื่อมโยงในกลไกแรกมีแนวโน้มค่าการบวม ตัวสูงกว่าไฮโดรเจลที่ใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เนื่องจากสารตั้งต้นสามารถ ละลายออกจากโครงสร้างได้น้อยกว่าเมื่อพันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับ

เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกกับไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวมตัวสูงสุดดีกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว และไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกสามารถคงสภาพเจลได้นานขึ้น

## 3.4 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไก

ไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไก การเชื่อมโยงในกลไกที่สองเตรียมโดยการ แช่ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กลงในสารละลาย $CaCl_2$ โดยใช้ความเข้มข้นของ $CaCl_2$ เท่ากับ 0.1 โมลาร์เป็นเวลา 30 นาที โดยพิจารณาเลือกใช้ความเข้มข้นดังกล่าวเช่นเดียวกับการเตรียมไฮโดรเจลแบบสององค์ประกอบเชื่อมโยงสองกลไก กล่าวคือ พิจารณาจากพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลาย $CaCl_2$ ซึ่งไฮโดรเจลแต่ละสูตรมีความสามารถในการบวมตัว ใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที ในสารละลาย $CaCl_2$ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

### 3.4.1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจล ACG ที่เชื่อมโยงสองกลไก (ACG-Ca)




(ก) บอแร็ก 1.0% w/v (ข) บอแร็ก 0.6% w/v

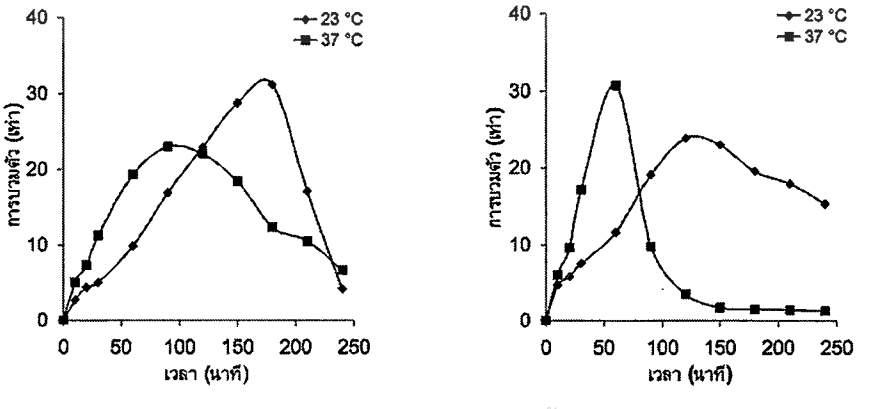
**รูปที่ 3.25** การบวมตัวในน้ำกลั่นของไฮโดรเจลแบบ ACG-Ca เชื่อมโยงกลไกแรกด้วยบอแร็กความเข้มข้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.25 (ก) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัมที่เชื่อมโยงสองกลไก โดยกลไกแรกใช้บอแร็กเข้มข้น 1.0% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่า A1C5G4-10Ca 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

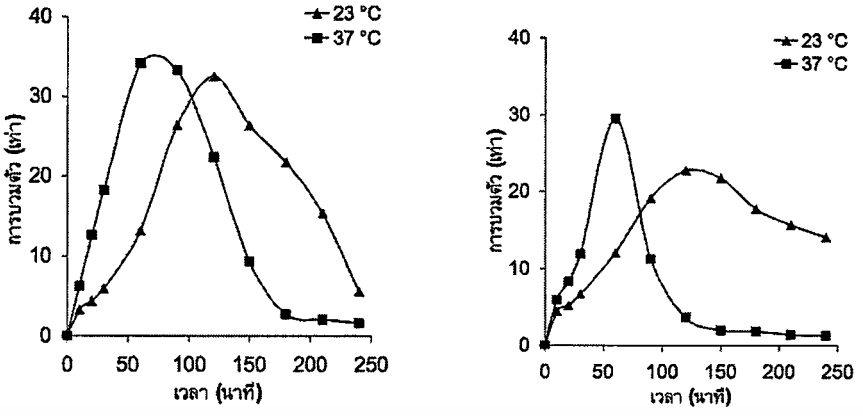
จากรูปที่ 3.25 (ข) เป็นการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบสามองค์ประกอบระหว่างโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและกัวร์กัมที่เชื่อมโยงสองกลไก โดยกลไกแรกใช้บอแร็กเข้มข้น 0.6% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าแต่ละสูตรมีค่าการบวมตัวใกล้เคียงกันประมาณ 25 เท่า และสามารถคงสภาพเจลไว้ได้ใกล้เคียงกันถึงนาทีที่ 120 แต่สูตร A5C1G4-6Ca มีค่าการบวมตัว 15 เท่า เนื่องจากสูตร A5C1G4-6Ca มีปริมาณของโซเดียมอัลจิเนตในโครงสร้างมาก ซึ่งโซเดียม-อัลจิเนตสามารถเกิดการเชื่อมโยงด้วย $Ca^{2+}$ ได้ดี จึงมีการเชื่อมโยงด้วยกลไกที่สองมากทำให้โครง-สร้างของเจลมีความยืดหยุ่นต่ำ เจลจึงดูดซับน้ำเข้าสู่โครงสร้างได้น้อย และการที่ในสูตรเจลมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้อยทำให้การเข้ากันได้ของทั้งสามองค์ประกอบลดลง เป็นผลให้มีการละลายออกเร็วขึ้น เจลจึงเริ่มเสียสภาพเจลตั้งแต่นาทีที่ 90 ทั้งนี้เนื่องจากสายโซ่ โมเลกุลของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งมีขนาดสั้นกว่าสายโซ่โมเลกุลของโซเดียมอัลจิเนต ทำหน้าที่คล้ายพลาสติไซเซอร์ช่วยให้มีสายโซ่ของโซเดียมอัลจิเนตแทรกเข้าไประหว่างสายโซ่ของ กัวร์กัมได้ดีขึ้น ดังนั้นเมื่อมีปริมาณของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในสูตรเจลน้อยจึงส่งผลให้ ความเข้ากันได้ของทั้งสามองค์ประกอบลดลง เจลจึงเกิดการเสียสภาพได้เร็ว

### 3.4.2 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG-Ca




(ก) A1C3G6-10Ca (ข) A1C3G6-6Ca

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




(ค) A3C1G6-10Ca (ง) A3C1G6-6Ca

**รูปที่ 3.26** การบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 และ 37°C ของไฮโดรเจล ACG-Ca

จากรูปที่ 3.26 (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 เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการละลายของโซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสดีขึ้นทำให้ละลายออกจากโครงสร้างเจลได้ง่าย และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นบอเรตสามารถเกิดการผันกลับได้เร็ว ทำให้พันธะภายในโครงสร้างเจลเกิดการผันกลับเร็วกว่าที่อุณหภูมิ 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

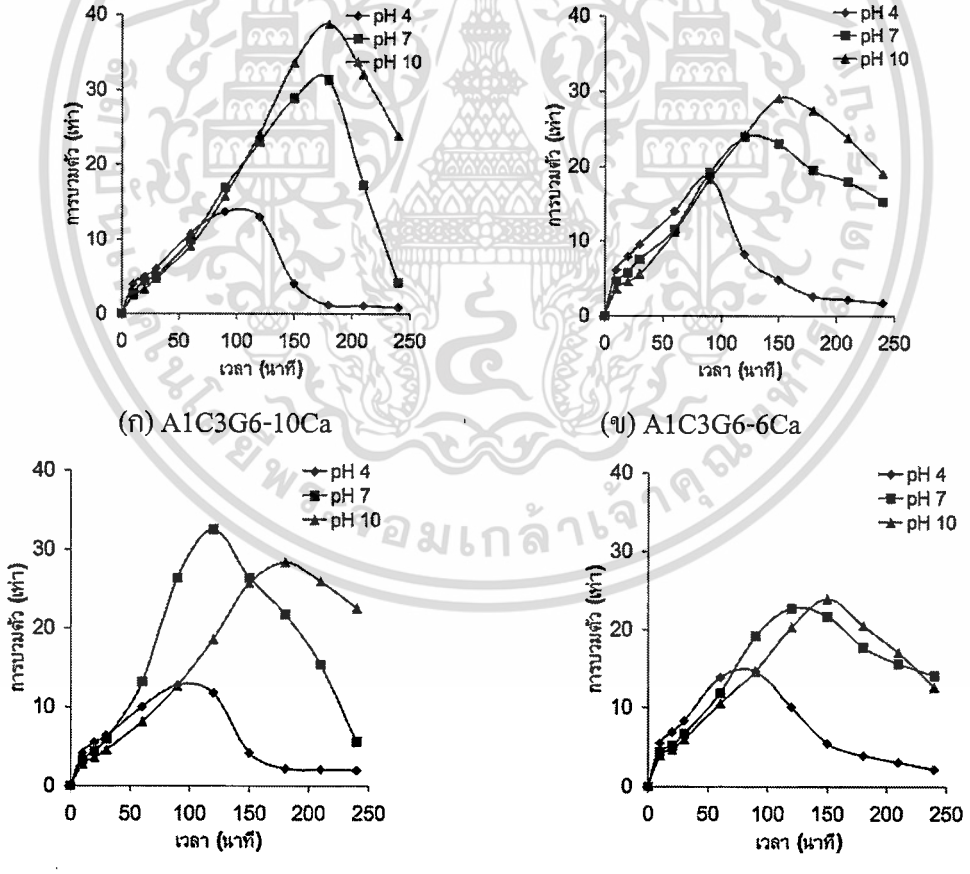
จากรูปที่ 3.26 (ค) และ (ง) ไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-10Ca มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 37°C ประมาณ 30 เท่า ซึ่งมากกว่าสูตร A3C1G6-6Ca ที่มีค่าการบวมตัวประมาณ 25 เท่า เนื่องจาก A1C3G6-10Ca มีการเชื่อมโยงมากทำให้เจลสามารถขยายตัวดีส่งผลให้ค่าการบวมตัวสูง ไฮโดรเจล ทั้งสองสูตรมีค่าการบวมตัวต่ำลงเมื่อเทียบกับการบวมตัวที่อุณหภูมิ 23°C เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้โซเดียมอัลจิเนตและโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสละลายออกจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างเจลได้ง่าย รวมทั้งที่อุณหภูมิ 37°C มีการผันกลับของพันธะภายในโครงสร้างเร็วขึ้น ส่งผลให้เมื่อการละลาย ออกมีผลต่อการบวมตัวมากกว่าการดูดซับน้ำ เจลจึงเสียสภาพ

เมื่อเปรียบเทียบการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 37°C ของไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-10Ca และ A3C1G6-6Ca ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองกลไกกับไฮโดรเจลสูตร A3C1G6-10 และ A3C1G6-6 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียว พบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวม ตัวและความสามารถในการคงสภาพเจลที่ดีกว่า โดยไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสองกลไกมีค่าการบวมตัว ประมาณ 30-35 เท่าและเริ่มเสียสภาพเจลหลังนาทีที่ 60 ส่วนไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงกลไกเดียวมีค่า การบวมตัวประมาณ 20-25 เท่า และเริ่มเสียสภาพเจลหลังนาทีที่ 30 เนื่องจากความหนาแน่น การเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นจากการเชื่อมโยงกลไกที่สองด้วย $Ca^{2+}$ ส่งผลให้เจลสามารถขยายตัวได้ดีมาก ขึ้นเมื่อมีน้ำแทรกเข้ามาในโครงสร้างและยึดโครงสร้างไว้ได้นานขึ้น ทำให้ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงสอง กลไกคงสภาพความเป็นเจลไว้ได้นาน

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




(ก) A1C3G6-10Ca (ข) A3C1G6-6Ca

(ค) A3C1G6-10Ca (ง) A3C1G6-6Ca

**รูปที่ 3.27** การบวมตัวที่สภาวะกรด - เบส ค่า pH เริ่มต้น 4, 7 และ 10 ของไฮโดรเจล ACG-Ca

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.27 (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 เนื่องจากองค์ประกอบทั้งสามในไฮโดรเจลทั้งสองสูตรมีความ เข้ากันได้ดีมากกว่าสูตรอื่น ทำให้เจลสามารถบวมตัวได้ดีแม้จะมีการผันกลับของโครงสร้างเมื่อ สารละลายมีค่า pH เริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้น และไฮโดรเจลทั้งสองสูตรเริ่มเสียสภาพที่ pH เริ่มต้น 4 ได้เร็วกว่าที่ pH เริ่มต้น 7 และ 10

จากรูปที่ 3.27 (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 3.27 ไฮโดรเจล ACG-Ca มีการบวมตัวที่สภาวะกรด-เบส ค่า pH เริ่มต้น 4 ต่ำที่สุด เนื่องจากโครงสร้างของสารตั้งต้นทั้งสองถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปกรดซึ่งไม่ละลายน้ำและพันธะภายในโครงสร้างเกิดการผันกลับเร็วขึ้น ส่งผลให้เจลดูดซับน้ำได้น้อย ดังนั้นการบวมตัวที่สภาวะกรดจึง มีค่าต่ำกว่าที่สภาวะเป็นกลางและเบสอย่างชัดเจน 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 ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีสามองค์ประกอบมีค่าการบวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัว ที่สภาวะต่างๆ ใกล้เคียงกับไฮโดรเจล AG-Ca และไฮโดรเจล CG-Ca ซึ่งเป็นไฮโดรเจลที่มีสององค์ประกอบ แต่ไฮโดรเจล ACG-Ca สามารถคงสภาพเจลไว้ได้นานขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจลที่มีสามองค์ประกอบมีความเข้ากันได้ดีกว่าไฮโดรเจลที่มีสององค์ประกอบ

## 4.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 มีการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจล ที่มีปริมาณกัวร์กัม 20 และ 40 % โดยน้ำหนัก
- ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงขั้นตอนเดียวมีแนวโน้มการบวมตัวในสภาวะต่างๆ สูงกว่าไฮโดรเจล ที่เชื่อมโยงสองขั้นตอนแต่คงสภาพเจลได้ไม่ดี และไฮโดรเจลที่มีสามองค์ประกอบมีแนวโน้มการ บวมตัวในสภาวะต่าง 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 ดีกว่าไฮโดรเจล ระบบสององค์ประกอบ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 5.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.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

[22] **"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.

[23] Martin Chaplin. **"Carboxymethyl cellulose"** [**ออนไลน์**]. **เข้าถึงได้จาก** :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

http://www.lsbu.ac.uk/water/hycmc.html. 2553.

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

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้