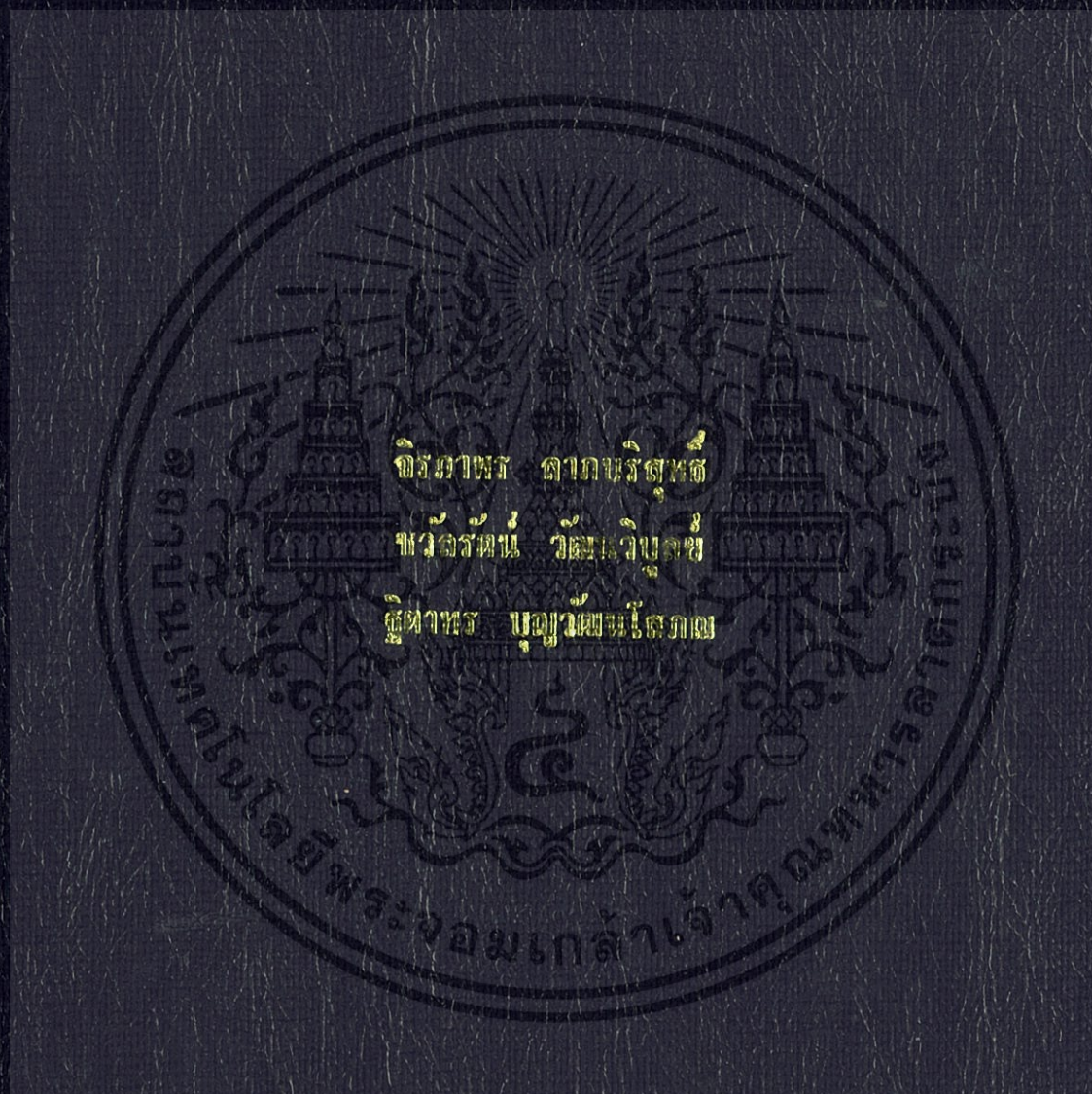


การศึกษาดูพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน  
ฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากคาร์ราเจนนและกัวร์กัม

RELEASING BEHAVIOR OF POTASSIUM DIHYDROGEN PHOSPHATE  
FROM CARRAGEENAN AND GUAR GUM HYDROGELS



โครงการพิเศษงานวิจัยของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ วิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๕

การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน  
ฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม

RELEASING BEHAVIOR OF POTASSIUM DIHYDROGEN PHOSPHATE  
FROM CARRAGEENAN AND GUAR GUM HYDROGELS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**RELEASING BEHEVIOR OF POTASSIUM DIHYDROGEN  
PHOSPHATE FROM CARRAGEENAN AND GUAR GUM  
HYDROGELS**



**JIRAPAPORN LARPBORISUT  
CHAWANRUT WATTANAWIBOON  
THITATORN BOONWATTANASOPHON**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2012**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน ฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม

Releasing Behavior of Potassium Dihydrogen Phosphate from Carrageenan And Guar Gum Hydrogels

ชื่อนักศึกษา

นางสาวจิรภาพร ลาภบริสุทธิ์

นางสาวชวัลรัตน์ วัฒนวิบูลย์

นางสาวฐิตาทร บุญวัฒนโสภณ

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา

เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม
นักศึกษา	นางสาวจิรภาพร ลาภบริสุทธิ์ นางสาวชวัลรัตน์ วัฒนวิบูลย์ นางสาวจิตาทร บุญวัฒน์ โสภณ
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปลดปล่อยสารออกซิฟอสเฟตในรูปของสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $KH_2PO_4$ ) ของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม โดยมีโซเดียมเทตระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยง โดยใช้อัตราส่วนคาร์ราจีแนนต่อกัวร์กัมเป็น 2:8, 4:6, 6:4 และ 8:2 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของโซเดียมเทตระบอเรตเท่ากับ 0.6 และ 1.0 (% โดยน้ำหนัก) โดยเตรียมไฮโดรเจลที่บรรจุสารออกซิฟอสเฟตดังกล่าว 2 แบบ คือ การเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารออกซิฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว และการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารออกซิฟอสเฟตภายหลัง จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาอัดเม็ดและศึกษาการดูดซับน้ำและการปลดปล่อยสารออกซิฟอสเฟต โดยตรวจวัดปริมาณสารออกซิฟอสเฟตโดยใช้ Vanado molybdophosphoric acid method ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตรผลการทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวพบว่าไฮโดรเจลอัดเม็ดทั้ง 9 สูตร มีค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 15-35 เท่า และพฤติกรรมการปลดปล่อยสารของเจลปุยอัดเม็ด พบว่าสารถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นจนถึงเวลา 300 นาที โดยเจลปุยอัดเม็ดที่บรรจุสารแบบสองขั้นตอนมีความสามารถในการปลดปล่อยสารภายในเวลา 48 ชั่วโมงได้ถึง 90-95% โดยมีค่าสูงกว่าเจลปุยอัดเม็ดที่บรรจุสารแบบขั้นตอนเดียวที่ปลดปล่อยสารได้ประมาณ 80% และเจลปุยอัดเม็ดที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/w สามารถปลดปล่อยได้สูงสุดถึง 100% ซึ่งมากกว่าเจลปุยอัดเม็ดที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตที่ความเข้มข้น 1.0 w/w ที่มีค่าการปลดปล่อยสูงสุดเพียง 80%

**คำสำคัญ :** ไฮโดรเจล, คาร์ราจีแนน, กัวร์กัม, การปลดปล่อย, การบวมตัว

<b>Title</b>	Releasing Behavior of Potassium Dihydrogen Phosphate from Carrageenan And Guar Gum Hydrogels
<b>Students</b>	Miss Jiraporn Larporisut Miss Chawanrut Wattanawiboon Miss Thitatorn Boonwattanasophon
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Industrial Chemistry
<b>Academic Year</b>	2012
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Pathavuth Monvisade

### Abstract

This special project studied on the releasing behavior of orthophosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) from carrageenan-guar gum hydrogels crosslinked by sodium tetraborate. The ratios of carrageenan to guar gum were 2:8, 4:6, 6:4 and 8:2 by weight. Concentration of sodium tetraborate were applied at 0.6 and 1.0 w/w. Fertilized hydrogel tablets were prepared by loading of orthophosphate in two routes, i.e. hydrogel preparing in the presence of orthophosphate and hydrogel preparing followed by the orthophosphate loaded. The fertilized hydrogel tablets were measured the water absorption and orthophosphate releasing. Orthophosphate measurement was detected in quantity by using Vanado molybdophosphoric acid method and UV-Visible Spectrophotometer with 420 nm wavelength. The results of swelling behavior of all fertilized hydrogel tablets were found that the maximum swelling values were in a range of 15-35 times. The releasing behavior of fertilized hydrogel tablets was shown the rapid releasing rate at an initial time until 300 minutes. The two-step prepared tablets could release  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  in the range of 90-95% within 48 hours higher than the one-step prepared tablets with the values of about 80%. Fertilized hydrogel tablets crosslinked by sodium tetraborate 0.6% w/w could release up to 100% within 48 hours while fertilized hydrogel tablets crosslinked by sodium tetraborate 1.0% w/w could release only 80%.

**Keywords :** hydrogel, carrageenan, guar gum, releasing, swelling

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานจากการศึกษาค้นคว้าโครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ซึ่งไม่อาจจะนำมากล่าวได้ทั้งหมด ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่คุณศึกษาใคร่ขอกราบพระคุณคือ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งให้ความกรุณา คำแนะนำ และช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่ง และผู้มีพระคุณอีกสองท่านคือ ผศ.ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี ที่ได้กรุณาให้แนวคิด คำแนะนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ หลายประการ ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ไว้ ณ โอกาสนี้

นอกจากนี้ ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้านขอขอบคุณพี่ๆ นักวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่คอยดูแลเรื่องการติดต่อขอใช้อุปกรณ์ในการทดลอง เครื่องมือในห้องทดลอง รวมถึงการเบิกสาร ขอขอบคุณพี่ๆ ประิญาเอก และ ประิญาโททุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และคอยดูแลในเวลาที่มึปัญหาในการทำงานวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในสาขาเคมีอุตสาหกรรม รุ่นที่ 28 ที่คอยเป็นกำลังใจที่คิดตลอดมา ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลืออีกหลายท่านซึ่งไม่สามารถกล่าว นามในที่นี้ได้หมด

นางสาวจิราพร ลาภบริสุทธิ  
นางสาวชวัลรัตน์ วัฒนวิบูลย์  
นางสาวฐิตาพร บุญวัฒน์ โสภณ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	X
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)	4
2.1.1 การแบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้	6
2.1.1.1 ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film)	6
2.1.1.2 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network)	6
2.1.1.3 ไฮโดรเจลแบบกราฟที่บนพื้นผิว (Surface grafted polymer)	6
2.1.1.4 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติ้งพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating polymer network, IPN)	6
2.1.2 การแบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง	8
2.1.3 การแบ่งตามขนาดของรูพรุน	8
2.2 สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of hydrogels)	9
2.3 กำเนิดจากธรรมชาติ	12
2.3.1 Seaweed extracts	12
2.3.2 Plant extracts	19

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 Plant seed gums	22
2.3.4 Plant exudate gums	23
2.3.5 Animal-derived	27
2.3.6 Microbial gums	30
2.4 ปู๋ย	31
2.5 กระบวนการปลดปล่อยสาร (Controlled Release (CR))	34
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1 สารเคมี	39
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	39
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในงานวิจัย	40
3.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต	40
3.3.2 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.2 M	40
3.3.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมเททระโบเรตความเข้มข้น 0.6 % w/w และ 1.0 % w/w	40
3.3.4 การเตรียมสารละลายวานาเดต โมลิบเดตรีเอเจนท์	40
3.4 ขั้นตอนการบรรจุสารปลดปล่อยในไฮโดรเจล	40
3.4.1 การเตรียมเจลและการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน ฟอสเฟตแบบขั้นตอนเดียว	40
3.4.2 การเตรียมเจลและการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน ฟอสเฟตแบบ 2 ขั้นตอน	42
3.4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมเจล	42
3.4.2.2 ขั้นตอนการดูดซับสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต	42
3.5 การตรวจวัดขนาดอนุภาคเจลปู๋ย	44
3.6 การหาความหนาแน่นของเจลปู๋ยอัดเม็ด	44
3.7 การทดสอบพฤติกรรมกรรมการบวมตัวของเจลในน้ำกลั่น	45

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.8 วิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต	45
3.8.1 การเตรียม Calibration Curve	45
3.8.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต ที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยอัดเม็ด	45
3.8.3 การคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในปุ๋ยอัดเม็ด	46
3.8.3.1 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต ที่อยู่ในเจตจากการทดลอง	46
3.8.3.2 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต ที่อยู่ในเจตจากการคำนวณ	46
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	
4.1 การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ด	49
4.1.1 ขนาดอนุภาคของเจลปุ๋ยอัดเม็ด	49
4.1.2 ความหนาแน่นของเจลปุ๋ยอัดเม็ด	51
4.1.3 พฤติกรรมการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ด	52
4.2 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน ฟอสเฟตของเจลปุ๋ยจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม	57
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	73
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	76
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก	79
ภาคผนวก ข	83
ภาคผนวก ค	89
ภาคผนวก ง	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างโครงสร้างของไฮโดรเจลและการนำมาประยุกต์ใช้งาน	5
3.1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างคาร์ราจีแนนกับกัวร์กัมที่มีการเชื่อมโยงด้วยโซ่เคียมเททระบอเรต	44
4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเจลปูย	51
4.2 ค่าความหนา น้ำหนัก เส้นผ่านศูนย์กลาง ปริมาตร และความหนาแน่นของเจลปูยอัดเม็ด	51
4.3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0 [1]	57
4.4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [1]	58
4.5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0 [1]	59
4.6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C8G2B1.0 [1]	60
4.7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C4G6B0.6 [1]	61
4.8 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C6G4B0.6 [1]	62
4.9 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0 [2]	63
4.10 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [2]	64
4.11 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปูยอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0 [2]	65

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์	7
2.2 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล	10
2.3 อันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล	11
2.4 หน่วยซ้ำของคาร์ราจีแนน	13
2.5 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน	14
2.6 โครงสร้างของอะกาโรส	15
2.7 กลไกการเกิดเจลของอะกาโรส	16
2.8 โครงสร้างของอัลจินต (Alginate) ชนิดต่างๆ	18
2.9 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจินต (Egg-box model)	18
2.10 Hypothetical structure of apple pectin showing I xylogalacturona,II region with arabinan side chain, III rhamnogalacturonan region making up the “hairy region”	20
2.11 ชนิดและสมบัติของเพคติน	21
2.12 กลไกการเกิดเจลของเพคตินชนิด LM	21
2.13 โครงสร้างโมเลกุลของ Locust bean gum	22
2.14 โครงสร้างโมเลกุลของกัวร์กัม	23
2.15 โครงสร้างโมเลกุลของกัมอะราบิก	24
2.16 Structure of gum karaya (Sterculiaurens)	26
2.17 Partial structure of tragacanthic acid	27
2.18 การเปรียบเทียบ โครงสร้างโมเลกุลของ chitin, chitosan และ cellulose	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 โครงสร้างโมเลกุลของ Xanthan gum	31
3.1 แผนภาพวิธีการเตรียมเจลและการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบขั้นต่อนเดียว	41
3.2 แผนภาพวิธีการเตรียมเจลและดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบ 2 ขั้นตอน	43
4.1 ภาพถ่าย OM ของอนุภาคเจลปูยบนแผ่นสไลด์ (กำลังขยาย 230X)	49
4.2 ตัวอย่างเจลปูยอัดเม็ด	52
4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตรต่างๆ ในน้ำกลั่น โดยมีปริมาณ โซเดียมเทรโบเรต 1.0 %w/w	53
4.4 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตรต่างๆ ในน้ำกลั่น โดยมีปริมาณ โซเดียมเทรโบเรต 0.6 %w/w	55
4.5 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณฟอสเฟตมาตรฐานของเจลปูยอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [1]	67
4.6 พฤติกรรมการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ โดยเปรียบเทียบจากสัดส่วนของคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม	68
4.7 พฤติกรรมการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ โดยเปรียบเทียบจากความเข้มข้นของโซเดียมเทรโบเรต	69
4.8 พฤติกรรมการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ โดยเปรียบเทียบจากขั้นตอนการบรรจุสารปลดปล่อยในไฮโดรเจล	70

## คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
HEMA	2-hydroxyethyl methacrylate
WC	ปริมาณร้อยละของน้ำที่เป็นองค์ประกอบภายใน
EWC	ปริมาณร้อยละของน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในไฮโดรเจลพองตัวเต็มที่แล้ว
SR	สัดส่วนของการบวมตัวของไฮโดรเจล
AHA	Alpha Hydroxyl Acid
PVA	Poly(vinyl alcohol)
CS	Chitosan
GG หรือ G	Guar Gum
Alg หรือ A	Alginate
Na-Alg	Sodium Alginate
Na-CMC	Sodium carboxymethylcellulose
CA หรือ C	Carageenan

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

จากการที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีพื้นที่ในการเพาะปลูกมาก ปุ๋ยจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการเกษตร ถึงแม้ว่าปัจจุบันจะมีนโยบายในการส่งเสริมให้มีการใช้ปุ๋ยชีวภาพมากขึ้น แต่ต้องยอมรับว่าการจะเพิ่มผลผลิตให้มากขึ้นและสามารถมีผลผลิตได้ตามฤดูกาลที่ต้องการนั้น การใช้ปุ๋ยเคมียังคงมีความจำเป็นอย่างมาก ดังนั้นเกษตรกรจึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้ปุ๋ยเคมีได้ เนื่องจากในปุ๋ยเคมีนั้นมีธาตุอาหารหลักที่จำเป็นของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูงมาก ซึ่งทำให้มีผลผลิตสูงมากกว่าการใช้ปุ๋ยชีวภาพ

มีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาเพื่อแก้ปัญหาของเกษตรกร เช่น การใช้เมลามีนเป็นปุ๋ยสำหรับพืชเนื่องจากเมลามีนมีส่วนประกอบของไนโตรเจนสูงมาก [1] และการใช้สารพอลิควิทยาโซลเป็นสารชะลอการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ สามารถยับยั้งการสร้างจิบเบอเรลลินภายในพืชที่ทำให้หยุดการเติบโตทางด้านกิ่งใบ แต่จะพัฒนาตาดอกขึ้นมาแทน [2] เป็นต้น ในบางวิธีมีการใช้สารเคมีซึ่งเป็นพิษกับมนุษย์และมีผลต่อค่า pH ของน้ำและดิน ดังนั้นจึงมีการนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก มีสมบัติการบวมตัวในน้ำได้ดี โดยไฮโดรเจลนั้นยังสามารถกักเก็บสารไว้ภายในเพื่อทำการปลดปล่อยและยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ การใช้ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากสารตั้งต้นจากธรรมชาตินั้นเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดปัญหาเรื่องการตกค้างของสารเคมีได้ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีการพัฒนาขึ้น เช่น การเตรียมไฮโดรเจลจากไซโตเดียมอัลจินเตและกัวร์กัม โดยมีไซโตเดียมเทระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยง [3] และไฮโดรเจลที่เตรียมจากการเชื่อมโยงคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมด้วยไซโตเดียมเทระบอเรต [4] เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้นำคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม [4] มาสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจลมีไซโตเดียมเทระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยง โดยมีอัตราส่วนของคาร์ราจีแนน (CA) และกัวร์กัม (GG) ที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับของไฮโดรเจลขึ้นกับอัตราส่วนขององค์ประกอบของไฮโดรเจล ชนิด และความเข้มข้นของสารละลายที่ดูดซับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับกลุ่มวิจัยที่ใช้อัลจินตและกัวร์กัม [3] มาสังเคราะห์เป็น ไฮโดรเจลมีโซเดียมเทตระบอเรตเป็น สารเชื่อมโยง พบว่าระยะเวลาที่เจลกเกิดการบวมตัวสูงสุดใช้เวลาสั้นกว่ากรณีของการสังเคราะห์ ไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม และจากงานวิจัยที่ศึกษาการปลดปล่อยสารละลาย โพลีแซ็กคาไรด์ไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินต และกัวร์กัม [5] พบว่าสามารถ ปลดปล่อยสารละลายออกซิฟอสเฟตได้อย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงต้นของการ ปลดปล่อย จึงได้นำคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมมาทำการวิจัยต่อในด้านการศึกษาการปลดปล่อยสารละลาย ออกซิฟอสเฟต เพื่อเป็นการเปรียบเทียบกับผลของงานวิจัยเดิม ซึ่งคาดว่าจะมีค่าการปลดปล่อยที่ช้า ลง โดยเลือกสูตรเจลที่มีอัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมเป็น 20:80, 40:60, 60:40 และ 80:20 ตามลำดับ ใช้สารเชื่อมโยงโซเดียมเทตระบอเรต 0.6% w/w และ 1.0% w/w ซึ่งเป็นสูตรเจล ที่มีความเหมาะสมเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับที่ดี สารละลายออกซิฟอสเฟตเป็นธาตุ อาหารที่สำคัญที่ช่วยบำรุงดอกและผล ในรูปของสารละลายโพลีแซ็กคาไรด์ไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยนำไฮโดรเจลดังกล่าวมาดูดซับสารละลายโพลีแซ็กคาไรด์ไฮโดรเจนฟอสเฟต และศึกษา พฤติกรรมการปลดปล่อยสาร โดยตรวจสอบปริมาณสารละลายออกซิฟอสเฟตด้วยวิธี Vanado molybdophosphoric acid method ตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพลีแซ็กคาไรด์ไฮโดรเจนฟอสเฟตของ ไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม โดยมีโซเดียมเทตระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม โดยมี โซเดียมเทตระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยง ได้แก่ อัตราส่วนของคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมและวิธีบรรจุ สารละลายโพลีแซ็กคาไรด์ไฮโดรเจนฟอสเฟตในไฮโดรเจล

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม โดยผสมกับสารละลายโพลีแซ็กคาไรด์-ไฮโดรเจนฟอสเฟตแล้วทำการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทตระบอเรต
2. เตรียมไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม โดยทำการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทตระบอเรต แล้วจึงนำมาดูดซับสารละลายโพลีแซ็กคาไรด์ไฮโดรเจนฟอสเฟต

3. ตรวจสอบปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดย Vanado molybdophosphoric acid method ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายอโรฟอสเฟตของไฮโดรเจลที่เตรียมได้
2. ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุงเพื่อการใช้งานในด้านการเกษตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels) [6]

ไฮโดรเจล (Hydrogels) เป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilics) ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแรกเป็นส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับโมเลกุลของน้ำหรือเรียกว่า ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) เช่น หมู่  $-OH$ ,  $-COOH$ ,  $-CONH_2$  และ  $-SO_3H$  เป็นต้น และส่วนที่สองเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) เช่น หมู่  $-CH_2$  และ  $-CH_3$  เป็นต้น ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ พันธะไฮโดรเจนหรือเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ ในสายโซ่ซึ่งประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมาก และโมเลกุลมีการพันกันหรือขดตัวกันของสายโซ่ ทำให้ในโครงสร้างโดยรวมเกิดรูพรุนขนาดเล็กๆ ขึ้น ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลแสดงดังตารางที่ 2.1 สมบัติเด่นของไฮโดรเจลคือ สามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network structure) ได้มากกว่า 20% พร้อมกับสามารถพองตัวหรือขยายตัวออกได้และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป นอกจากนั้นแล้วไฮโดรเจลยังไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทุกชนิดด้วย

#### การนำไฮโดรเจลมาใช้ประโยชน์

##### ทางการแพทย์

- ใช้เป็นวัสดุปิดแผลเสริมให้บาดแผลหายได้ในเวลาที่เร็วขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจลมีความสามารถในการรักษาความชุ่มชื้นให้กับบาดแผล
- ใช้ในงานศัลยกรรมตกแต่ง
- ใช้เป็นสารนำส่งยา (Drug delivery system) โดยดูดซับยาเก็บไว้และปลดปล่อยออกมาในปริมาณตามที่ต้องการ

##### ทางการเกษตร

- ช่วยอุ้มน้ำทำให้ดินมีความชุ่มชื้น และยังช่วยดูดซับแร่ธาตุต่างๆ ในดิน

##### การประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน

- ใช้ทำคอนแทคเลนส์ (Silicone hydrogels) ซึ่งให้ความสบายแก่ดวงตาและลดการระคายเคือง
- ใช้ทำแผ่นดูดซับในผ้าอ้อมสำเร็จรูปของเด็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างโครงสร้างของไฮโดรเจลและการนำมาประยุกต์ใช้งาน [6]

โครงสร้างทางเคมี	ชื่อ	ประเภทไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นได้
	<p>พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลต) (Poly(2-hydroxyethyl methacrylate))</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ฟิล์ม</li> <li>- โครงร่างตาข่าย</li> <li>- กราฟท์บนพื้นผิว</li> <li>- อินเตอร์เพเนตรตติงพอลิ-เมอร์เน็ตเวิร์ก</li> </ul>
	<p>พอลิ(อะคริลามิด) (poly(acrylamide))</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โครงร่างตาข่าย</li> <li>- กราฟท์บนพื้นผิว</li> <li>- อินเตอร์เพเนตรตติงพอลิ-เมอร์เน็ตเวิร์ก</li> </ul>
	<p>พอลิ(เมทาคริลิก แอซิด) (Poly(methacrylic acid))</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โครงร่างตาข่าย</li> <li>- กราฟท์บนพื้นผิว</li> </ul>
	<p>พอลิ(เอทิลีน ออกไซด์) (Poly(ethylene oxide))</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โครงร่างตาข่าย</li> </ul>
	<p>พอลิ(เอ็น-ไวนิล ไพโรลิโดน) (Poly(N-vinyl pyrrolidone))</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- โครงร่างตาข่าย</li> <li>- กราฟท์บนพื้นผิว</li> </ul>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ที่ใช้ดังนี้

### 2.1.1 การแบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้

#### 2.1.1.1 ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film)

ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์มมักนำไปใช้เพื่อเคลือบผิวของวัสดุต่างๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำนั้นจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่างๆ ได้ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.1 (ก)

#### 2.1.1.2 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network)

ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่ายเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ที่เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (Crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วยและจากนั้นเทลงไปในแม่พิมพ์ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.1 (ข)

#### 2.1.1.3 ไฮโดรเจลแบบกราฟที่บนพื้นผิว (Surface grafted polymer)

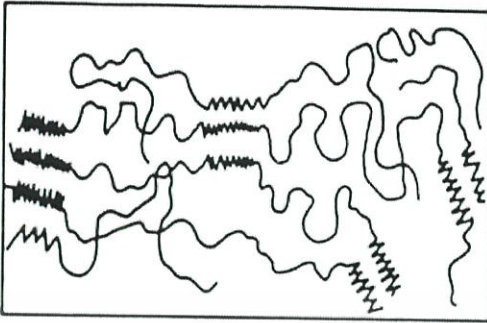
ไฮโดรเจลแบบกราฟที่บนพื้นผิวทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการเพื่อให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานได้ เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.1 (ค)

#### 2.1.1.4 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating polymer network, IPN)

ไฮโดรเจลแบบ IPN เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้น หรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.1 (ง)

นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบกึ่งอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (semi-IPN) คือ ไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่ ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่งเพื่อให้ตรงต่อการประยุกต์ใช้งานในแต่ละแบบ

## (ก) ไฮโดรเจลแบบฟิล์ม (Cast film)

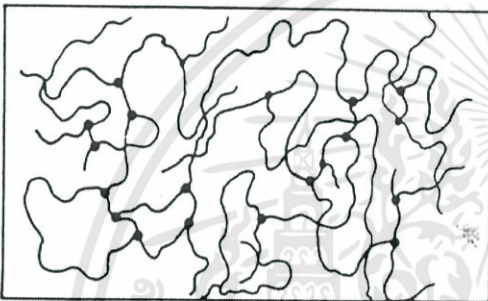


พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ



พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

## (ข) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network)



พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ

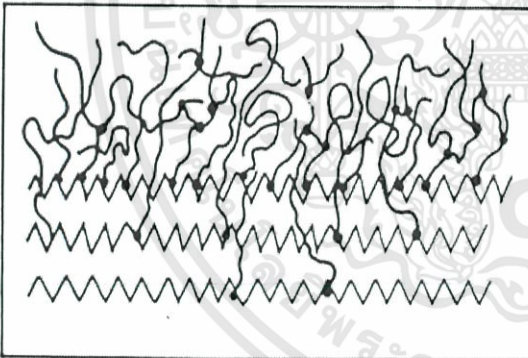


พอลิเมอร์ส่วนที่มีเกิดพันธะโควาเลนต์



พอลิเมอร์ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ

## (ค) ไฮโดรเจลแบบกราฟที่บนพื้นผิว (Surface grafted polymer)



พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ

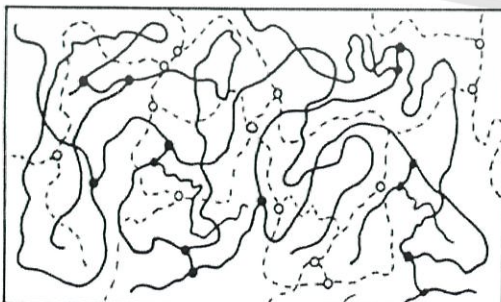


พอลิเมอร์ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ



พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ

## (ง) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตริงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating polymer network)



พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่ชอบน้ำ)



พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ)



พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อ)



พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อ)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 การแบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง [7]

ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

- ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical hydrogel) มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก โดยในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะมักมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลายตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับทางความร้อน คือไม่สามารถทำให้หลอมได้อีกหากให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัวสมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกได้อีกอย่างว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต เนื่องจากไฮโดรเจลชนิดนี้มีความคงทนไม่หลอมเหลวและไม่ละลายในตัวทำละลาย ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่มีการเชื่อมโยงด้วยเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต [8] เป็นต้น

- ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical hydrogel) การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากพันธะไฮโดรเจน แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงระหว่างประจุ ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดการผันกลับทางความร้อนได้ จึงเรียกได้อีกอย่างว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถหลอมได้เมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง ซึ่งการให้ความร้อนจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายรวมทั้งการผสมสารอื่นลงในเจลด้วย เช่น สารต้านจุลินทรีย์ ยา เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(อะคริลาไมด์-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน) (Poly(acrylamide-co-methacrylate-co-vinylamine)) [9] เป็นต้น

### 2.1.3 การแบ่งตามขนาดของรูพรุน [6]

ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

- ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายได้ โดยที่มอนอเมอร์ สารเชื่อมโยงและพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ ทำให้ได้เจลที่มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous hydrogel) เช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA : H<sub>2</sub>O เท่ากับ 2:1 เป็นต้น

- ไฮโดรเจลที่มีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous hydrogel) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดนี้ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการพอลิ-เมอไรซ์ แต่จะตกตะกอนแยกออกมา ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีสีขาวขุ่น เรียกได้ว่าเป็นไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel) เช่นพอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA : H<sub>2</sub>O เท่ากับ 1.25:1 เป็นต้น

## 2.2 สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of hydrogels)

สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล คือ สามารถพองตัวแต่ไม่ละลายในน้ำ เนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำโมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้างสามมิติของไฮโดรเจลนั้นได้ เนื่องจากแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) โมเลกุลน้ำบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวหรือเกิดการพองตัวขึ้น ซึ่งเป็นการปรับโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เกิดสมดุลใหม่ ไฮโดรเจลเมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่แยกขาดออกจากกันเนื่องจากภายในประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัดและยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยมีตัวเชื่อมต่อกัน (Crosslinker) เป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายพอลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัว แสดงดังรูปที่ 2.2 สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจลมีดังนี้คือ

- แรงดันออสโมติก เนื่องจากปริมาณน้ำภายในและภายนอกไฮโดรเจลไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจล ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมากน้ำก็จะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากขึ้น
- แรงกระทำระหว่างโมเลกุลน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสมซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นหรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วจะทำให้เป็นการเหนี่ยวนำโมเลกุลน้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก
- ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มากน้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มาก
- ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าสายโซ่มีความยืดหยุ่นที่ดีจะเป็นการลดแรงต้าน (Resistance force) ของการแพร่ของโมเลกุลน้ำ เข้าสู่สมดุลใหม่ทำให้โมเลกุลน้ำแพร่ผ่านเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก
- ความหนาแน่นของการเชื่อมต่อน้ำระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้ามีความหนาแน่นของการเชื่อมต่อน้ำมากจะเปรียบเสมือนกับการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายตัวของไฮโดรเจล ทำให้ความสามารถในการพองตัวลดลง

โมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในไฮโดรเจลมี 2 ลักษณะใหญ่ๆ แสดงดังรูปที่ 2.3 ได้แก่ โมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์เรียกว่า “โมเลกุลน้ำอิสระ” (Free water) สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระบายได้ง่ายมีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจลไม่มากนัก และโมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่ (Bound water) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยากกว่าและต้องใช้เวลาหรืออุณหภูมิหนึ่งในการระบายโมเลกุลน้ำลักษณะนี้ออก ปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮโดรเจล (Water content, WC) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบ} = \left( \frac{W_2 - W_1}{W_2} \right) \times 100 \quad \dots\dots (1)$$

เมื่อ  $W_1$  คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่แห้ง

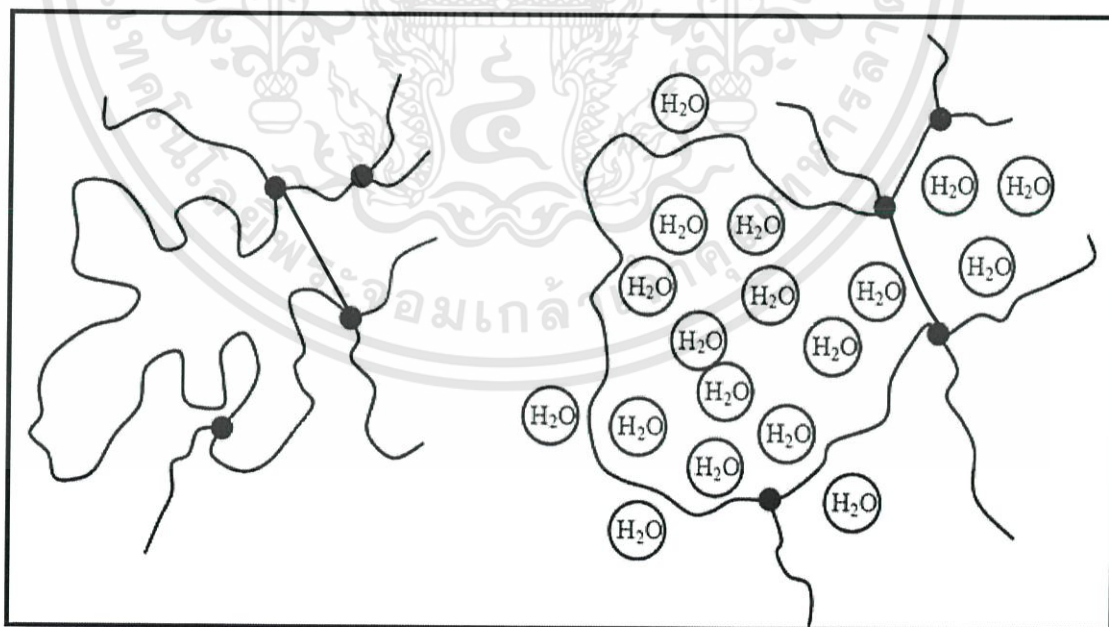
$W_2$  คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ

สำหรับปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮโดรเจลขณะที่ไฮโดรเจลพองตัวเต็มที่แล้ว เรียกว่า “ปริมาณน้ำสมดุล” (Equilibrium water content, EWC)

นอกจากการหาปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบที่อยู่ภายในไฮโดรเจลแล้ว ยังมีการศึกษาในตัวแปรสัดส่วนของการพองตัว (Swelling ratio, SR) ซึ่งเป็นการแสดงน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปเทียบกับพอลิเมอร์ การคำนวณหา SR แสดงดังสมการที่ (2)

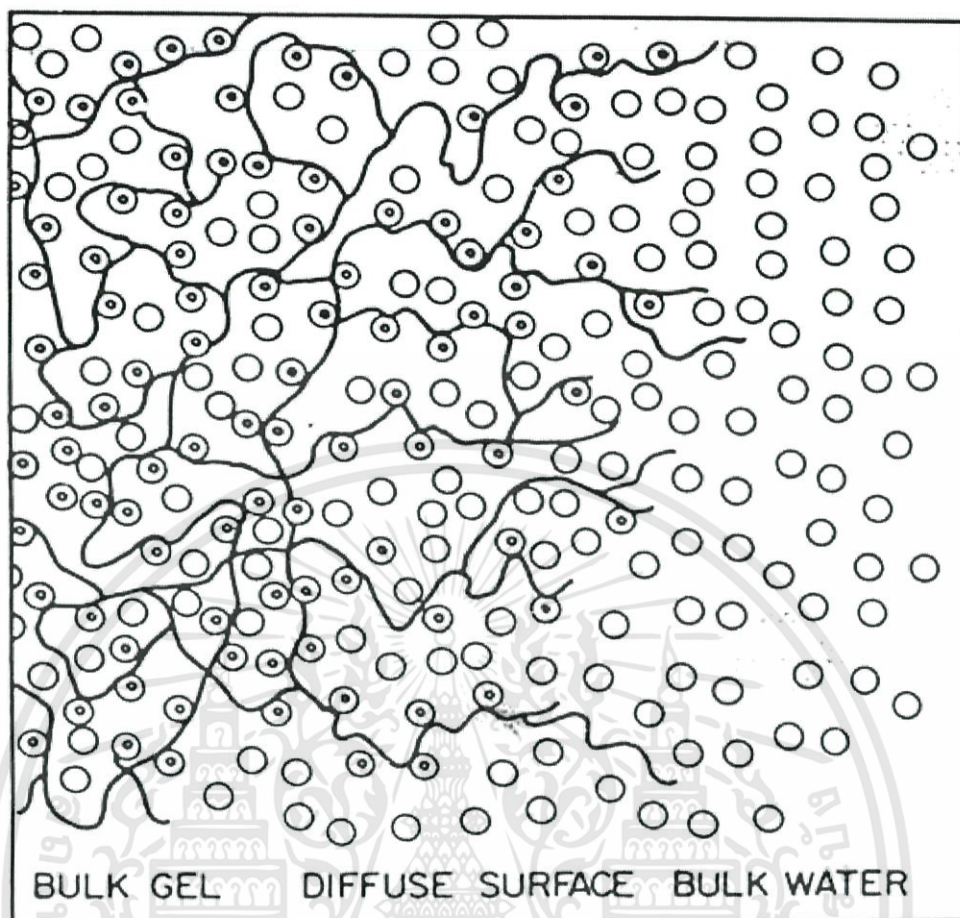
$$\text{สัดส่วนการพองตัว} = \left( \frac{W_2 - W_1}{W_2} \right) \quad \dots\dots (2)$$

สมบัติที่สำคัญอีกประการของไฮโดรเจล คือ การยอมให้มีการแพร่ผ่านของ โมเลกุลต่างๆ เช่น น้ำ โปรตีน ยาหรือแม้แต่ก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านทางการแพทย์



รูปที่ 2.2 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



คือ สายโซ่พอลิเมอร์

คือ น้ำโมเลกุลอิสระ

คือ โมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่พอลิเมอร์

รูปที่ 2.3 อันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล [6]

## 2.3 กัมจากธรรมชาติ [11]

กัม (Gum) จากธรรมชาติเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์และอนุพันธ์ของพอลิแซคคาไรด์ ส่วนใหญ่มีแหล่งที่มาจากพืช สามารถละลายได้ทั้งในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อน โดยสารที่ได้จะมีความหนืดสูง แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของกัมเพียงเล็กน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงมีการนำกัมจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดหรือสารข้น สารเพิ่มเสถียรภาพ สารช่วยให้เกิดเป็นเจล อิมัลซิไฟเออร์ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นกาวได้

กัมธรรมชาติแบ่งออกเป็นกลุ่มตามแหล่งที่มา ได้แก่

1. Seaweed extracts
2. Plant extracts
3. Plant seed gums
4. Plant exudate gums
5. Animal-derived
6. Microbial gums

### 2.3.1 Seaweed extracts

เป็นกลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเล ได้แก่ สาหร่ายสีแดง เช่น คาร์ราจีแนน (Carrageenan) อะการ์ (Agar) และเฟอเซลล์ลาราน (Furcellaran) สาหร่ายสีน้ำตาล ได้แก่ อัลจินเนต (Alginate)

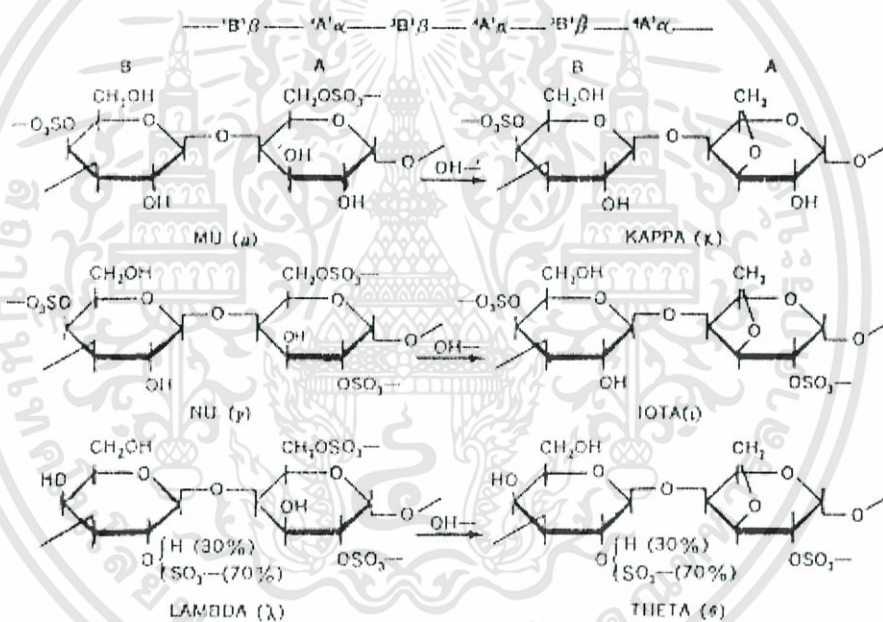
- คาร์ราจีแนน (Carrageenan) เป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ซึ่งชนิดที่ใช้ผลิตเป็นเกรดทางการค้าได้แก่ *Euchema cottonii* และ *E. spinosum* มีโครงสร้างหลักเป็น Galactose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glycosidic linkage และเป็น Sulphated polysaccharides ซึ่งคาร์ราจีแนนยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อยอีกหลายชนิดตามจำนวนและตำแหน่งของกลุ่ม Ester sulphate และจำนวน 3,6 anhydro-D-galactose (3,6-AG) ได้แก่ Kappa, Iota และ Lambda ซึ่งคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิดนี้ ประกอบด้วยโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำๆ กันหลายหน่วย ดังรูปที่ 2.4 Unit-B แสดง 1,3-linked galactoside ในขณะที่ Unit A แสดง 1,4-linked galactoside

Kappa carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked galactoside มีกลุ่มซัลเฟต (Sulphate) ที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1,4-linked 3,6-anhydro-D-galactose (3,6 AG) โดยมีสารตั้งต้นเป็น mu-carrageenan ถ้ามีปริมาณ anhydride จากการปิดวงเป็น 3,6-anhydride มากถึง 28-35% จะมีผลทำให้วุ้นอโปเตส-เซียมและมีความสามารถในการเกิดเจล ถึงแม้จะมีการตัดแปรรูปให้มี 3,6-AG สูงที่สุด แต่อาจจะมี ความแตกต่างกันที่จำนวนของซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 ใน 1,3-linked galactoside และกลุ่มซัลเฟตที่

ตำแหน่งที่ 2 หรือ 6 ใน 1,4-linked galactoside จะทำให้คาร์ราจีแนนชนิด kappa มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

Iota carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1,4-linked 3,6-AG มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 มีสารตั้งต้นเป็น nu-carrageenan ความแตกต่างระหว่าง anhydride ในคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota คือ จำนวนกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ใน 1,4-linked galactoside ของ Iota จะมีมากกว่า Kappa ประมาณ 25-50% ความไวต่อโพแทสเซียมคลอไรด์ ซึ่งจะมีผลทำให้ได้เจลที่อ่อนนุ่ม แต่ถ้ามีซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 มากถึง 80% จะไวต่อแคลเซียม

Lambda carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked galactose ซึ่งมีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 ประมาณ 70% และ 1,4-linked galactose มีกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 6 ซึ่งคาร์ราจีแนนชนิดนี้จะไม่เกิดการปิดวงเป็น 3,6-AG จึงมีผลทำให้ไม่มีคุณสมบัติในการเกิดเจล

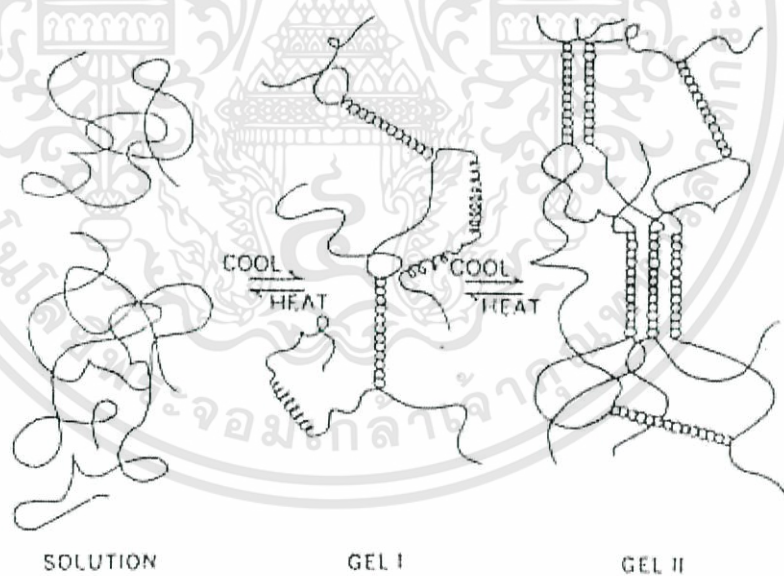


รูปที่ 2.4 หน่วยซ้ำของคาร์ราจีแนน [12]

คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายได้ในน้ำร้อน ถ้าเป็นเกลือโซเดียมของคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota จะสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ในขณะที่เกลือของไอออนชนิดอื่นๆ เช่น โพแทสเซียมหรือแคลเซียมไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Lambda จะละลายได้ในน้ำเย็นโดยไม่ขึ้นกับชนิดของไอออน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนและไอออนที่เกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota ต้องใช้อุณหภูมิในการละลาย

มากกว่า 70 °C นอกจากนี้คาร์ราจีแนนทุกชนิดจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์แต่สามารถละลายใน Water miscible solvent เช่น Alcohol และ Propylene glycol

คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota มีความสามารถที่จะเกิดเจลได้เมื่อสารละลายของคาร์ราจีแนนเย็นตัวลง ซึ่งเจลเหล่านี้จะเป็น Thermoreversible aqueous gel คือสามารถที่จะละลายเมื่อได้รับความร้อนและเกิดเจลอีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง ในปี ค.ศ. 1969 Rees ได้กล่าวว่าเมื่อคาร์ราจีแนนละลายน้ำจะเกิดเจล เนื่องจากเกิดการสร้างเป็น Double helix ที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของเจล อุณหภูมิและการปั่นกววนจะสามารถทำให้ Helices คลายตัวเป็น Random coil เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการสร้าง Polymer network 3 มิติ แต่ละสายของพอลิเมอร์จะรวมตัวกันเกิด Junction point (gel I) และเมื่อปล่อยให้เย็นลงอีกจะเกิดการเกาะกันของ Junction point (gel II) มากขึ้น ทำให้เกิดการแข็งตัวของเจลดังรูปที่ 2.5 การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น Kappa carrageenan เมื่อเติม  $K^+$  จะเกิดอีลาสติกเจล (Elastic gel) ถ้าเติม  $Ca^{2+}$  จะเกิด Rigid gel ส่วน Iota carrageenan เมื่อเติม  $Ca^{2+}$  จะเกิดอีลาสติกเจล ถ้าผสมคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับ Iota เข้าด้วยกันจะทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลได้มากขึ้น เจลที่ได้มีอีลาสติกเพิ่มขึ้นและเกิด Syneresis น้อยลง และนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น dessert gels, whipped topping และ fluid milk products

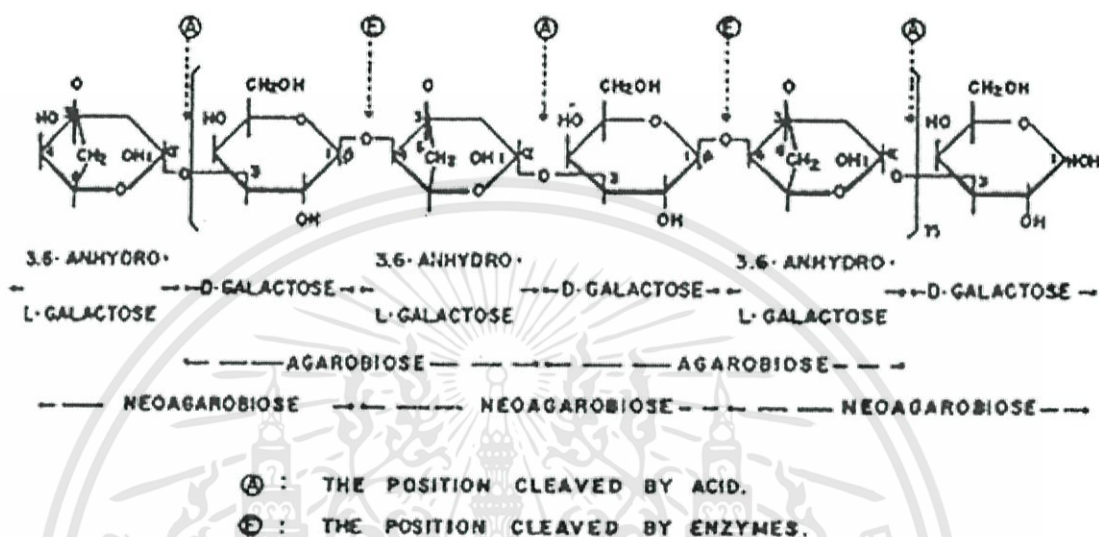


รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน [13]

- อะการ์ (Agar) เป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ที่นิยมใช้มากคือ Gelidium cartilagineum, Gracilaria confervoides และ Pteroclaia capillacea ซึ่งสองชนิดแรกใช้ผลิตอะการ์ทางการค้า ประเทศที่ผลิตได้แก่ ญี่ปุ่น สเปน ชิลี และเกาหลี อะการ์ประกอบด้วยอะกา-

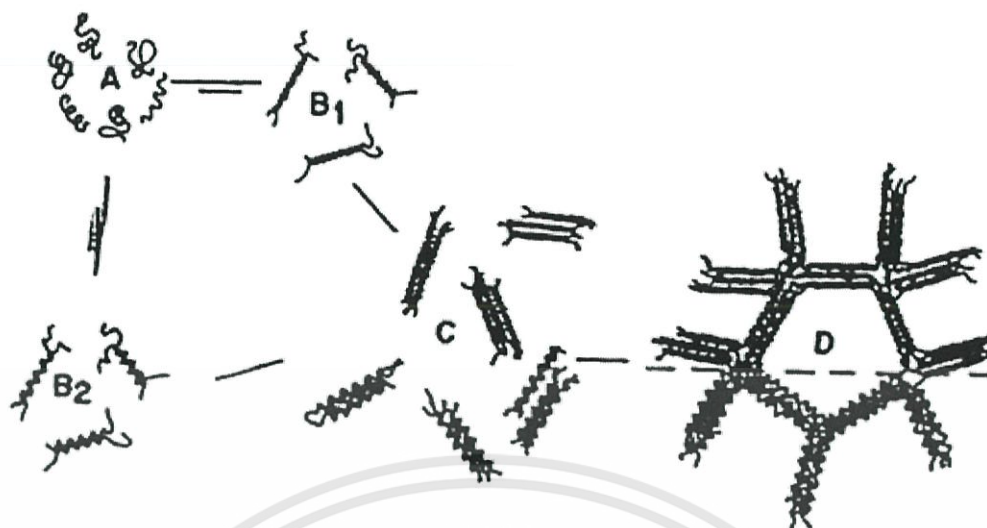
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรส (Agarose) และอะกาโรเพคติน (Agaropectin) ซึ่งอะกาโรสเป็นพอลิแซคคาไรด์ประกอบด้วย 1,4 linked 3,6-anhydro-L-galactose และ 1,3 linked b-D-galactose เรียงสลับกันไป (รูปที่ 2.6) ส่วนอะกาโรเพคตินเป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตที่มีโครงสร้างเหมือนอะกาโรส แต่ 3,6-anhydro-L-galactose บางโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยซัลเฟต ประมาณ 5-8 %



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของอะกาโรส [14]

อะการ์ไม่ละลายในน้ำเย็นแต่ละลายได้อย่างช้าๆ ในน้ำร้อน ละลายได้ดีที่ความเข้มข้นไม่เกิน 4% ในน้ำเดือด ถ้าใช้ที่ความเข้มข้นสูงให้ Autoclave ที่ 120°C เพื่อช่วยในการละลาย อะการ์มีความสามารถในการคูดน้ำได้ดี ทำให้เกิดเจลได้ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.04 % เกิดเจลได้โดยไม่ต้องอาศัยสารอื่นๆ ช่วยในการเกิดเจล ซึ่งการเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า Physical gels โดยเมื่อโมเลกุลของอะกาโรสละลายอยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็น Random coil และเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิเกิดเจลจะเกิดการจับกันของสายพอลิเมอร์เป็นแบบ B1 (Antisymmetric double helices) หรือ B2 (Symmetric double helices) และจะได้โครงสร้างลักษณะเป็นแบบ C, D (ส่วนบน) หรือ C,D (ส่วนล่าง) ตามลำดับดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดเจลของอะกาโรส [15]

การที่จะเกิดรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าลดลงเร็วจะได้โครงสร้างเป็นแบบรูป B1 และ C, D (ส่วนบน) และเจลที่ได้สมบัติเป็น Thermoreversible gel โดยทั่วไปอุณหภูมิเกิดเจล ประมาณ 35-40 °C และมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 85-90 °C เจลที่ได้มีลักษณะเนื้อแข็งขุ่น สีเหลืองอ่อน เปราะแตกได้ง่าย (Brittle) เนื้อสัมผัสเป็นแบบ Juiciness และ Crunchy และเกิด syneresis การเติมน้ำตาลหรือเดกซ์ตรินหรือผสมกับ Locust bean gum จะทำให้เจลที่เกิดขึ้นมี Gel strength และความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ลดการเกิด syneresis แต่ถ้าเติมแป้งหรือโซเดียมอัลจินเตจะให้ผลตรงกันข้าม คือทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแรงลดลง เจลที่เกิดจากอะการ์จะทนความร้อนเพราะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลและจุดหลอมเหลวของเจลมีช่วงห่างกันมาก

การใช้อะการ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีดังนี้

- Bakery Industry ใช้อะการ์เพื่อแก้ปัญหาการหลอมตัวของน้ำตาลที่เคลือบ (Icing) การเกาะติดของ Icing กับวัสดุหุ้ม ลดการแตกหักและหลุดร่วงของ Icing
- Confectioneries เช่น ใช้ใน jelly candies, meringues และ pudding
- Meat and fish product เช่น canned tuna in jelly หรือ ผสมใน fish extract ผง เพื่อใช้เตรียม flavor และผลิต soup
- Vegetarian and health products ใช้เป็น Bulking agent แทนแป้ง
- ใช้ทางเภสัชศาสตร์จะใช้เป็น slow release ingredient เพราะอะการ์ไม่สามารถย่อยในร่างกายมนุษย์ได้เนื่องจากไม่มีเอนไซม์
- ใช้เป็น tissue culture media ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เฟอเซลล์ลาแรน (Furcellaran) เฟอเซลล์ลาแรนหรือที่เรียกกันว่า Danish agar เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตชนิดหนึ่ง ที่สกัดได้จากสาหร่ายสีแดง (Furcellria fastigiata) ซึ่งพบมากในประเทศเดนมาร์ก โครงสร้างประกอบด้วย D-galactose-2-sulfate, D-galactose-4-sulfate ประมาณ 16-20 % และ 3,6-anhydro-D-galactose-2-sulfate ประมาณ 30-33 % ลักษณะโมเลกุลจะเป็นแบบมีกิ่งก้านแขนง (Branch) ที่ตำแหน่ง C3 และ C6 เฟอเซลล์ลาแรนมีโครงสร้างคล้ายคาร์ราจีแนน แต่แตกต่างกันที่ปริมาณซัลเฟต คือเฟอเซลล์ลาแรนมี 1 sulfate group ต่อ 3-4 หน่วยซ้ำ ของกาแลกโตส ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Kappa มี 1 sulfate group ต่อ 2 หน่วยซ้ำของกาแลกโตส

เฟอเซลล์ลาแรนสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้หลายประเภท ได้แก่

- นำมาเติมในน้ำนมสำหรับทำพุดดิ้งเพื่อทำให้เกิดเจลได้ดี
- สามารถใช้ทำแยมผิวส้ม (Marmalade) ได้ดีกว่าเพคตินเพราะเกิดเจลได้เร็วแม้จะมีปริมาณน้ำตาลต่ำกว่า 50-60 % และยังใช้ปริมาณเฟอเซลล์ลาแรนเพียง 0.2-0.5 % เพื่อให้เกิดเจล
- ใช้เติมในเบียร์เพื่อตกตะกอนโปรตีนทำให้เบียร์ใสขึ้น

- อัลจิเนต (Alginate) อัลจิเนตหรืออัลจินเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* มีอัลจินประมาณ 14-19 %, *Laminaria cloustoni* และ *Laminaria digitata* มีอัลจินประมาณ 15-40 % ปริมาณที่พบจะขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่วไปในโลก ประเทศที่ผลิตอัลจิเนตมากคือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น อัลจิเนตเป็น Unbranched binary copolymer ของ 1,4-b-D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วย homopolymeric regions ของ G และ M ที่เรียกว่า G- และ M-blocks ตามลำดับ และยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks แสดงดังรูปที่ 2.8 สัดส่วนของ copolymer และโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าพอลิเมอร์มี G ในปริมาณที่สูงจะมีสมบัติเป็นเจลที่แข็ง แต่ถ้าพอลิเมอร์มี M ปริมาณสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม และมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้างกว่า อัลจิเนตที่ผลิตจำหน่ายเป็นการค้ามีหลายอนุพันธ์ซึ่งมีสมบัติการละลายในน้ำที่แตกต่างกัน เช่น อนุพันธ์ของเกลือ  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$  และยังผลิตในรูปของ Propylene glycol alginate ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของ Alginic acid กับ Propylene oxide ภายใต้อุณหภูมิและความดันอนุพันธ์ของอัลจิเนตนี้ละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล และชนิดของโลหะประจุบวก อัลจิเนตบางชนิดมีสมบัติเป็นเจล และจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับ  $Ca^{2+}$  โครงสร้างของเจลมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (Egg box) โดยมี  $Ca^{2+}$  เกาะอยู่กับสายพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.9 คุณสมบัติที่ดีของอัลจิเนตคือ ทำให้เกิด Irreversible gel ในน้ำเย็นเมื่อมี



อัลจินตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 โดยเติมในอาหารกระป๋อง บางชนิดใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว ทำให้มีล้นชั้นคงตัว สารทำให้เกิดเจลและสารยับยั้งการเกิด syneresis ตัวอย่างเช่น

- Propylene glycol alginate ใช้ในน้ำสลัด (salad dressing) และเบียร์เพราะมีความสามารถละลายได้สูงที่ pH ต่ำ
- โซเดียมอัลจินตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายมะนาวที่แช่เย็นเพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่าง freeze thaw
- ใช้เคลือบผิวชิ้นเนื้อปลา ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด freeze burn กับชิ้นเนื้อปลา
- ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม, frozen dessert, sherbet, processed cheese และใช้เป็น Alginate gel restructured products เช่น onion rings และ shrimp-like fish products

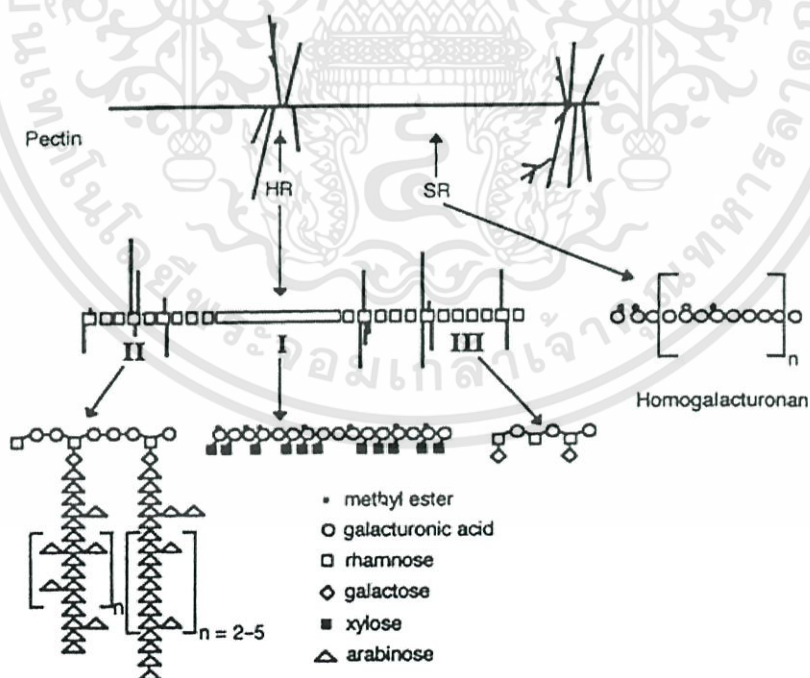
### 2.3.2 Plant extracts

สารสกัดที่ได้จากพืชและเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่สำคัญคือ เพคติน (Pectin) สกัดได้จากผลไม้ตระกูลส้ม และเพคตินยังพบเป็นส่วนประกอบในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล ฝรั่ง เป็นต้น

- เพคติน (Pectin) ได้จากการ breakdown ของ Protopectin ที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อพืช ประกอบไปด้วย neutral sugars หลายชนิด เช่น แรมโนส (Rhamnose), กาแลคโตส (Galactose), อะราบิโนส (Arabinose) และน้ำตาลอื่นๆ จำนวนเล็กน้อย เพคตินเป็น Heteropolysaccharide ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยพอลิเมอร์ของ D-galacturonic acid (ประมาณ 65 % โดยน้ำหนัก) เป็นสายหลักหรือที่เรียกว่า smooth regions และมีกิ่งแขนง (Hair regions) อาจเป็นอะราบิโนส, กาแลคโตส, แรมโนส และบางส่วนของหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่ D-galacturonic acid จะถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยหมู่เมทิล (-CH<sub>3</sub>) เป็นเมทิลเอสเทอร์และมี Degree of methylation (DM) แตกต่างกันไป จึงทำให้เพคตินจากวัตถุดิบแต่ละแหล่งมีโครงสร้างที่แตกต่างกันและเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนมาก แสดงดังรูปที่ 2.10 DM คืออัตราส่วนของหมู่ Methylated galacturonic acid ต่อหมู่ Galacturonic acid ทั้งหมด ที่มีอยู่ในโมเลกุลของเพคติน จึงทำให้แบ่งประเภทของเพคตินตามค่า DM ได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิด Low methoxyl (LM) ซึ่งมีค่า DM น้อยกว่า 50 % และชนิด High methoxyl (HM) ซึ่งมีค่า DM มากกว่า 50 % (รูปที่ 2.11) เพคตินที่สกัดได้จากธรรมชาติจะเป็นชนิด HM ที่มีค่า DM สูงถึง 75 % เมื่อนำมาทำให้เกิดปฏิกิริยา De-esterification จะได้เพคตินชนิด LM เพคตินทั้งชนิด LM และ HM จะมีสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน เพคตินชนิด LM สามารถเกิดเจลโดยมีปริมาณของ Ca<sup>2+</sup> และมีของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดตั้งแต่ 10-80 % ที่ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 2.9-5.5 เจลที่ได้จะเป็นชนิด Thermoreversible ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจะมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่น

มากกว่าเจลที่ได้จากเพคตินชนิด HM หรืออะการ์ (รูปที่ 2.12) เพคตินชนิด HM ใช้กับอาหารที่มี pH 2.0-3.5 และต้องมีของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมากกว่า 55 % ถึงจะเกิดเจลได้ เพคตินชนิดนี้ยังแบ่งย่อยออกเป็นอีก 3 ชนิดตาม Gelling time คือ เกิดเจลได้ช้า (Slow set) ปานกลาง (Medium set) และรวดเร็ว (Rapid set) ซึ่งจะแตกต่างกันที่ค่า DM เช่น ชนิดเกิดเจลได้ช้าจะมีค่า DM ประมาณ 60 % และชนิดเกิดเจลได้เร็วมีค่า DM ประมาณ 75 % การนำเพคตินมาใช้ประโยชน์จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร เพคตินนิยมใช้ในอาหารประเภท Jam, Jelly, Bakery filling, fruit topping, เครื่องดื่มและผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ เช่น

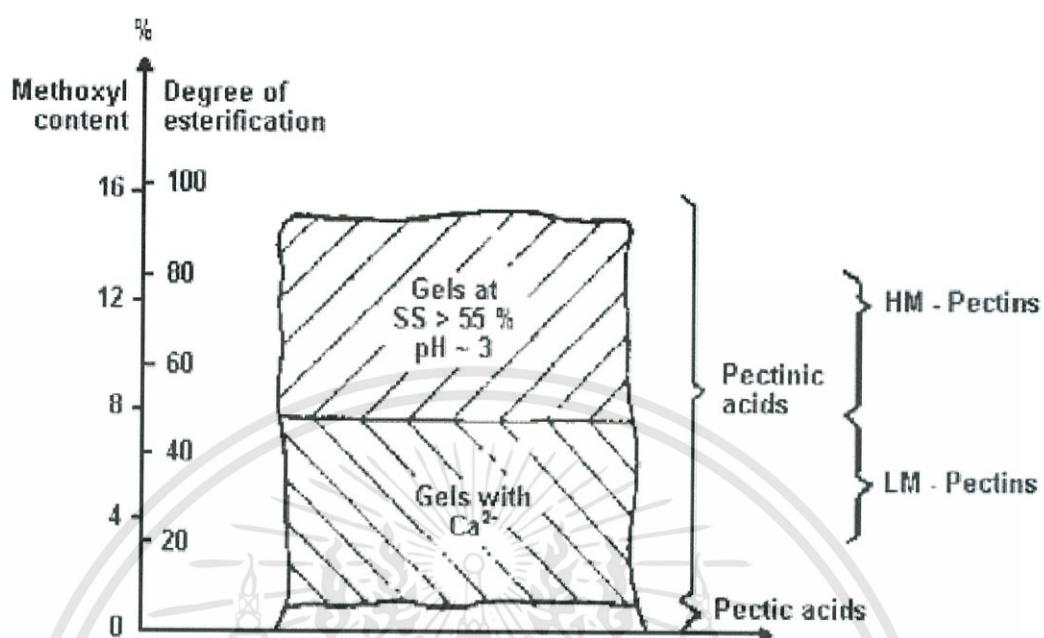
- การเติมเพคตินชนิด LM จำนวนเล็กน้อยลงในโยเกิร์ตจะช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อของโยเกิร์ตให้ดีขึ้น
- สำหรับน้ำผลไม้เข้มข้นจะเติมเพคตินชนิด HM เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอนุภาคของเนื้อผลไม้ ทำให้อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอน
- ในน้ำผลไม้ผงสำเร็จรูปจะมีการเติมเพคตินชนิด HM ลงไปเพื่อให้เกิดความรู้สึกเหมือนน้ำผลไม้ธรรมชาติขุ่น
- ในผลิตภัณฑ์ bakery เช่น jam ที่นำมาเติมใน tart จะให้ลักษณะผิวเรียบเป็นเงาหลังจากอบแล้ว และทนต่อการอบ



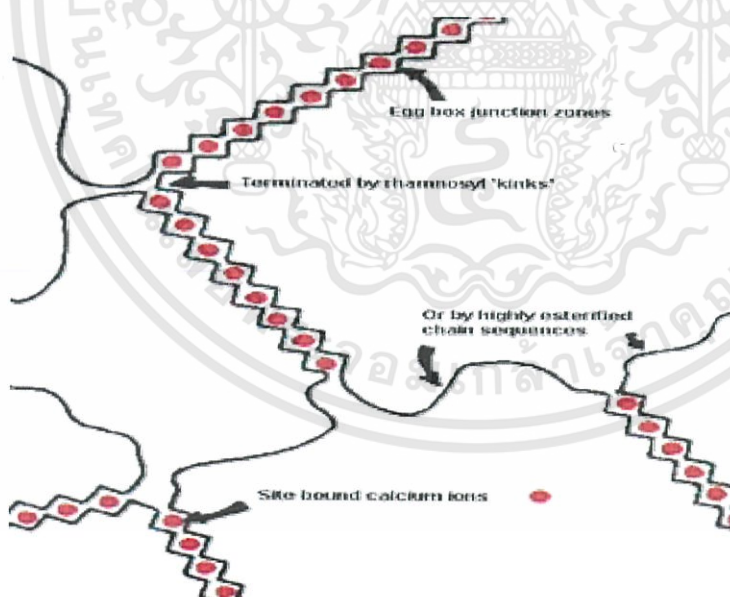
รูปที่ 2.10 Hypothetical structure of apple pectin showing I xylogalacturona, II region with arabinan side chain, III rhamnogalacturonan region making up the “hairy region”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11]



รูปที่ 2.11 ชนิดและสมบัติของเพคติน [11]



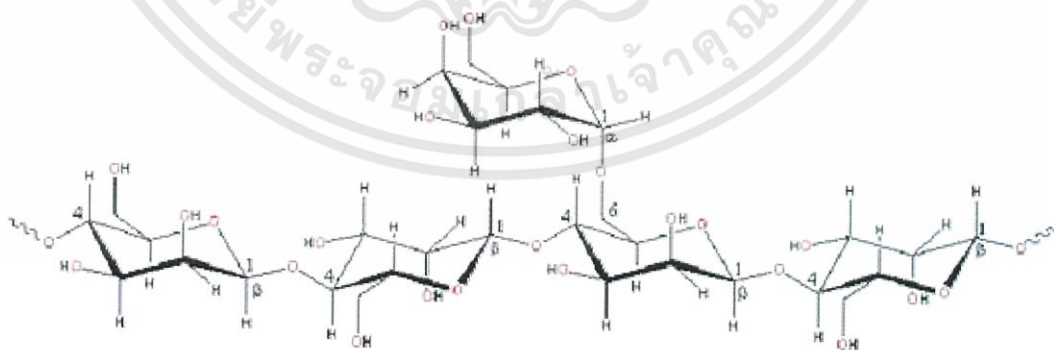
รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดเจลของเพคตินชนิด LM [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 Plant seed gums

เป็นกลุ่มของ Galactomannan gums ที่สกัดได้จากเมล็ดของพืช *Ceratonia* และ *Cyamopsis* คือ Locust bean gum และ Guar gum ตามลำดับ

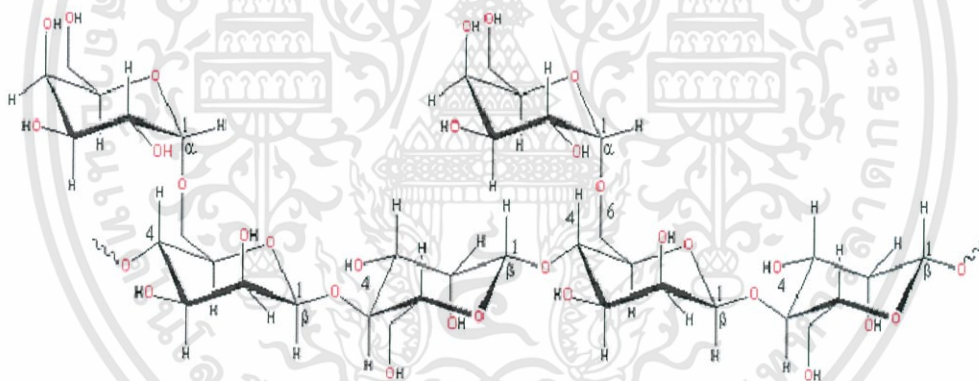
- Locust bean gum ได้จากเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) ของเมล็ดต้น Carob (*Ceratonia siliqua*) บางครั้งเรียกว่า Carob seed gum ต้น Carob เป็นพืชที่ปลูกในแถบเมดิเตอร์เรเนียน โมร็อกโก และโปรตุเกส Locust bean gum ไม่สามารถละลายในน้ำเย็นต้องใช้ความร้อนช่วยในการละลาย จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูงที่สุดเมื่อรับความร้อนสูงถึง 95°C หลังจากนั้นจึงทำให้เย็นลง ปัจจุบันได้มีการพัฒนา Locust bean gum ให้มีสมบัติพองตัวได้ในน้ำเย็นและนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์นม โครงสร้างของ Locust bean gum เป็นพอลิเมอร์สายยาวของแมนโนสที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของกาแลคโตสต่อกันด้วยพันธะ 1,6 อัตราส่วนของแมนโนสต่อกาแลคโตสเป็น 4:1 ดังรูปที่ 2.13 โดยลักษณะโครงสร้างเช่นนี้จึงทำให้โมเลกุลมีส่วนที่เป็นสายหลักของแมนโนสที่เรียกว่า smooth สลับกับส่วนที่เป็นกิ่งแขนง Locust bean gum ไม่สามารถเกิดเจลได้ต้องนำมาผสมกับ Xanthan gum จึงจะทำให้เกิดเจลได้ หรืออาจผสมรวมกับ Kappa carrageenan จะช่วยเพิ่ม Gel strength และลดการเกิด syneresis หน้าที่หลักของ Locust bean gum คือเพิ่มความหนืดและความคงตัวให้กับอิมัลชันและยับยั้งการเกิด syneresis ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ได้แก่ อาหารกระป๋อง ซอส ขนมหวาน เนยแข็ง ไอศกรีม และผลิตภัณฑ์เนื้อ ในเนยแข็ง Locust bean gum ช่วยเร่งให้เกิด coagulation เร็วขึ้น และทำให้ได้เนื้อตะกอนของ Curd เพิ่มมากขึ้นประมาณ 10% ในไอศกรีม Locust bean gum จะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัวและช่วยอุ้มน้ำ ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อเนียน นอกจากนี้ยังใช้เป็น mould สำหรับผลิต gum drops หรือ jelly candies และใช้เป็น body agent สำหรับเครื่องดื่มคนเป็นโรคเบาหวาน



รูปที่ 2.13 โครงสร้างโมเลกุลของ Locust bean gum [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กัวร์กัม (Guar gum) ได้จากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดต้น Guar (*Cyamopsis tetragonolobus*) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน ปัจจุบันมีการปลูกในรัฐเท็กซัส สหรัฐอเมริกา โครงสร้างของกัวร์กัมเป็นพอลิเมอร์สายยาวของแมนโนสที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของกาแลกโตส โดยทุกๆ 2 โมเลกุลของแมนโนสต่อกับ 1 โมเลกุลของกาแลกโตส ด้วยพันธะ 1,6 ทำให้อัตราส่วนของแมนโนสต่อกาแลกโตส เป็น 2:1 ซึ่งแสดงว่ากัวร์กัมมีกิ่งแขนงของกาแลกโตส มากกว่า Locust bean gum (รูปที่ 2.14) กัวร์กัมมีสมบัติเป็น non-gelling แต่กระจายตัวและอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัวและอุ้มน้ำ สามารถเกิดอันตรกิริยากับ Xanthan gum ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้นความหนืดของสารละลายกัวร์กัมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH เวลา ความเข้มข้น และขนาดของอนุภาค กัวร์กัมเป็น Non-ionic และทนต่อ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-10 ทำให้สามารถเติมอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่า 5% จะมีผลต่อการอุ้มน้ำและเกิดเจล กัวร์กัมมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0 ผลิตภัณฑ์อาหารที่นำกัวร์กัมไปใช้ได้แก่ ขนมหวาน ซอส ชุป ไอศกรีม น้ำสลัด ชุปผงและใช้เป็นส่วนผสมของน้ำเกรวี่



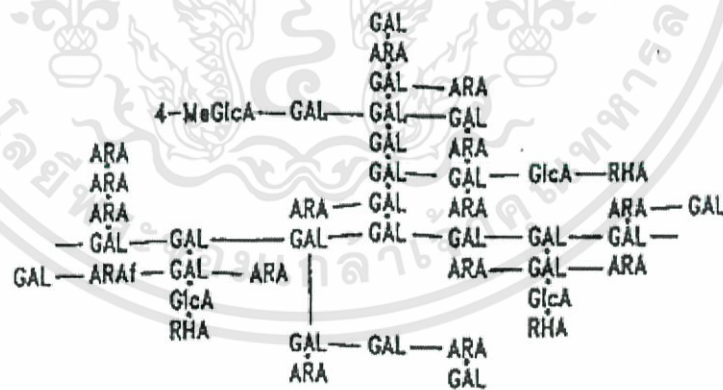
รูปที่ 2.14 โครงสร้างโมเลกุลของกัวร์กัม [17]

#### 2.3.4 Plant exudate gums

เป็นกลุ่มของกัมที่ได้จากยางต้นไม้ มีลักษณะเป็น dried resins ซึ่งจะไหลออกมาเมื่อต้นไม้มีบาดแผล กัมในกลุ่มนี้ได้แก่ Gum arabic, Gum ghatti, Gum karaya และ Gum tragacath

- กัมอะราบิก (Gum arabic) หรือ Gum acacia เป็นกัมที่ได้จากต้น Acacia Senegal และ Acacia seyal ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อนและมีไนโตรเจนจำนวนเล็กน้อย องค์ประกอบทางเคมีจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามแหล่งที่มา ภูมิอากาศ ฤดูกาลและอายุของต้น ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานที่อยู่ในโมเลกุล ประกอบด้วยน้ำตาลและอนุพันธ์ของน้ำตาล คือ กาแลกโตส (44%), อะราบีโนส (24%), glucuronic acid (14.5%), แรมโนส (13 %) และ 4-O-methylglucuronic acid เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1.5%) กัมจาก *Acacia seyal* จะมีปริมาณแรมโนส และ glucuronic acid ต่ำกว่า *Acacia Senegal* แต่มีปริมาณอะราบิโนสและ 4-O-methylglucuronic acid สูงกว่า กัมอะราบิกเป็น heteropolysaccharide ที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีกิ่งแขนง ดังโครงสร้างในรูปที่ 2.15 นอกจากนี้โมเลกุลยังประกอบด้วยกรดอะมิโน ได้แก่ hydroxyproline และ serine กัมอะราบิกละลายได้ในน้ำและให้สารละลายใสที่มีสีตั้งแต่เหลืองอ่อนจนถึงน้ำตาลส้ม แต่กัมที่ได้จาก *Acacia Senegal* มีโครงสร้างที่เป็นกิ่งแขนงมากและโมเลกุลอัดกันแน่น จึงได้สารละลายที่ข้นหนืดที่ความเข้มข้นสูง สามารถละลายได้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 55% และสารละลายที่ได้มีความหนืดต่ำจึงทำให้กัมอะราบิกมีสมบัติที่แตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ซึ่งสามารถละลายได้สูงสุดเพียง 5 % เท่านั้นเนื่องจากสารละลายที่ได้มีความหนืดสูง กัมอะราบิกถูกนำมาใช้มากที่สุดในกลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากพืช เพราะละลายได้ดีในน้ำและทนต่อ pH ส่วนใหญ่ กัมอะราบิกจะนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภท confectionery เช่น marshmallows และ toffees เพราะทำหน้าที่ขยับยั้งการตกผลึกของน้ำตาลและช่วยให้เกิดอิมัลชันได้ดี ในอุตสาหกรรมการผลิตสารที่ให้กลิ่นจะใช้ Gumarabic เป็น fixative เพราะขณะทำการพ่นสาร ที่ให้กลิ่นลงบนผลิตภัณฑ์อาหารกัมอะราบิกจะช่วยเคลือบผิวของผลิตภัณฑ์อาหาร ทำให้สารที่ให้กลิ่นติดอยู่บนผิวของอาหาร ช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันและการระเหยของสารที่ให้กลิ่นออกไปจากอาหาร และยังใช้เป็น Flavor encapsulating agent เพื่อนำไปใช้ในพวกผลิตภัณฑ์แบบผง เช่น กัมอะราบิกช่วยทำให้ฟองเบียร์คงตัวเป็นอิมัลชันโฟเออร์และ stabilizer ให้กับเครื่องดื่มที่อยู่ในรูปของอิมัลชันด้วย



GAL = Galactose ARA = Arabinose

GlcA = Glucuronic acid RHA = Rhamnose

4-MeGlcA = 4-O-methylglucuronic acid

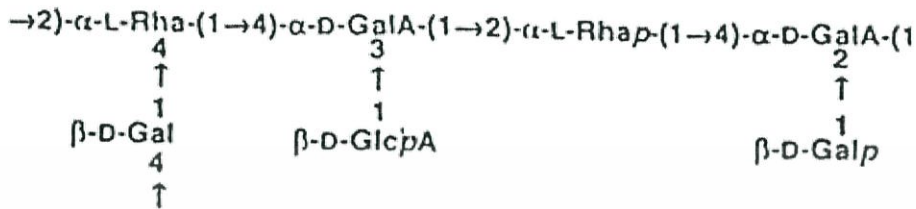
รูปที่ 2.15 โครงสร้างโมเลกุลของกัมอะราบิก [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Gum ghatti ได้จากพืชตระกูล Camgrelaceae คือต้น *Anogeissus latifolia* พบมากในประเทศอินเดียบางครั้งเรียกว่า Indian gum หรือ Havda ลักษณะยางที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม และเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อน ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปเกลือของ Ca, Mg, K และ Na แต่เมื่อนำมาไฮโดรไลซ์พบว่าประกอบไปด้วย อะราบิโนส, กาแลกโตส, แมนโนส, โซโลส และ glucuronic acid ในสัดส่วนโดยโมลเป็น 10:6:2:1:2 และมี 6-deoxyhexose จำนวนเล็กน้อย Gum ghatti ไม่สามารถละลายในน้ำได้แต่สามารถกระจายตัวได้ในน้ำและให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์ ไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้แต่ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 5% จะให้สารละลายที่มีความข้นหนืด มีความหนืดสูงสุดที่ pH 5-7 ที่ความเข้มข้นเดียวกันความหนืดจะอยู่ระหว่างความหนืดของ Gum Arabic และ Gum karaya นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีกว่ากัมอะราบิก แต่ยากต่อการใช้งาน เพราะสารละลายของ Gum ghatti จะไวต่อค่า pH กระจายตัวที่ pH 4.8 และให้ความหนืดสูงสุดที่ pH 8 และถ้า pH สูงกว่านี้จะให้ลักษณะที่เหนียว (stringy) Gum ghatti เป็นสารเพิ่มความคงตัว สารเพิ่มความหนืดและช่วยอุ้มน้ำ จึงนิยมใช้ร่วมกับเลซิดินในการทำแพนเค้กที่มีเนยผสมและในการทำ waffle syrup Gum ghatti จะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะใส นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์ในทางเภสัชศาสตร์ คือใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ให้กับวิตามินที่ละลายในน้ำมัน ใช้เป็นวัตถุจับในการผลิตอะราบิโนสโดยการ hydrolysis เป็น binder ในอุตสาหกรรมกระดาษและ drilling mud conditioner ในการขุดเจาะบ่อน้ำมัน

- Gum karaya เป็นยางแห้งที่ได้จากต้น *Sterculia urens* ซึ่งปลูกมากบริเวณตอนเหนือและตอนกลางของประเทศอินเดีย หรือจาก *S. setigera* ซึ่งพบแถวชูดานและบางประเทศทางแอฟริกาเหนือ Gum karaya เป็น branched, partially acetylated polysaccharide มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โมเลกุลประกอบด้วย D-galacturonic acid, D-galactose และ L-rhamnose ต่อกันเป็นสายหลัก และมีกิ่งแขนงเป็น D-glucuronic acid มีหมู่ uronic acid ประมาณ 35-40% และมีหมู่ acetyl อยู่ประมาณ 10-14 % (รูปที่ 2.16) ในทางการค้า Gum karaya ประกอบด้วย D-galacturonic acid 30-43 %, D-galactose 13-26 % และ L-rhamnose 15-30% นอกจากนี้ยังพบไอออนของโลหะ Ca และ Mg เชื่อมต่อกับ uronic acid Gum karaya เป็นกัมที่มีแรมโนสสูงกว่ากัมชนิดอื่นๆ ที่ได้จาก plant exudate ละลายน้ำได้น้อยเนื่องจากหมู่ acetyl ในโครงสร้างทำให้สารละลายน้ำไม่สมบูรณ์แต่ให้สารละลายที่ใส โดยการคูดน้ำอย่างรวดเร็วและให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีความหนืดที่ความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 0.02% ในน้ำเย็น และ 0.06 % ในน้ำร้อน) เมื่อทำเป็นผงละเอียดจะเป็นตัวคูดน้ำและอุ้มน้ำที่ดี และเมื่อกระจายตัวอยู่ในน้ำจะพองตัวได้ 60-100 เท่าของปริมาตรเดิม ได้เป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง ความหนืดของสารละลายจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น เมื่อใช้ในปริมาณมากจึงมีสมบัติเป็น strong adhesiveness ทำให้ได้สารละลายคอลลอยด์ที่มีความหนืดสูง ดังนั้นสมบัติของสารละลาย Gum karaya จึงขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาค

ในน้ำเย็นจะให้ความหนืดสูงกว่าในน้ำร้อน Gum karaya ทนต่อความเป็นกรดได้สูงเพราะในโมเลกุลมี uronic acid สูง และยังทนต่อการ hydrolysis ที่ความเข้มข้นของสารละลาย hydrochloric acid สูงถึง 10% ที่อุณหภูมิห้องนานอย่างน้อย 8 ชั่วโมง



รูปที่ 2.16 Structure of gum karaya (*Sterculia urens*) [18]

Gum karaya เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับ whipping cream และ meringues เนื่องจากมีสมบัติในการอุ้มน้ำที่ดี ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในผลิตภัณฑ์น้ำสลัดต่างๆ เช่น salad dressing และ French dressing นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เช่น sherbets หรือ fruit ice จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่เกินไปและป้องกันการสูญเสียน้ำเนื่องจากเกิด syneresis ในผลิตภัณฑ์เนื้อมด เช่น bologna จะใช้ Gum karaya เป็นตัวช่วยอุ้มน้ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเนื้อเนียน และยังใช้ในอุตสาหกรรมผลิต cheese spread ด้วย เพื่อให้เนยแข็งที่ได้มี spreadability ที่ดี นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น

- อุตสาหกรรมยา ได้แก่ เป็น adhesive สำหรับ stoma seal หลังจากผ่าตัด หรือเป็น dental fixatives
- อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ใช้เป็น binder เพื่อทำให้ช่วยในการ binding ของเส้นใยใน lightweight paper
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น ใช้เป็น thickener ในสีย้อมผ้าพิมพ์

- Gum tragacanth เป็นยางที่ได้จากต้น *Astragalus microcephalus*, *Astragalus gummifer* และ *Astragalus kurdicus* พบมากบริเวณกึ่งทะเลทรายและบนภูเขาของประเทศอิหร่าน ซีเรีย และตุรกี ยางที่ได้เป็นของเหลวข้นเหนียว Gum tragacanth ประกอบด้วยมอนอแซคคาไรด์หลายๆ ชนิดผสมกัน ได้แก่ D-galacturonic acid, D-galactose, L-fucose, D-xylose และ L-arabinose และ L-rhamnose ในโมเลกุลของ Gum tragacanth ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเรียกว่า Tragacanthic acid หรือ Bassorin มีอยู่ประมาณ 60-70 % เป็นพอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ละลายในน้ำแต่พองตัวกลายเป็นเจล อีกส่วนที่มีปริมาณน้อยเรียกว่า Tragacanthin เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อน เป็นส่วนที่ละลายในน้ำกระจายตัวให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์ส่วนของ Tragacanthic acid ซึ่งเป็นส่วนกรดที่ประกอบด้วย D-xylose, L-fucose, D-galacturinic acid, D-galactose และมี



เช่นกัน และมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับเซลลูโลสมากเพียงแต่แตกต่างกันในส่วนของหมู่ OH ที่ตำแหน่ง C2 ในโมเลกุลของไคตินจะเป็นหมู่ Acetylamino แทน ดังรูป 2.18 ไคตินที่ได้จากแต่ละแหล่งมีโครงสร้างและสมบัติแตกต่างกัน โดยแบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของพอลิเมอร์ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

- แบบอัลฟา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสวนทางกัน มีความแข็งแรงสูง ได้แก่ ไคตินจากเปลือกกุ้ง และกระดองปู
- แบบเบตา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในทิศทางเดียวกัน จึงจับกันได้ไม่ค่อยแข็งแรงมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากแกนปลาหมึก
- แบบแกมมา การเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะที่ไม่แน่นอน (สวนทางกัน สลับทิศทางเดียวกัน) มีความแข็งแรงรองจากแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากเห็ด รา และพืชชั้นต่ำ

- ไคโตซาน (Chitosan) คือ อนุพันธ์ของไคตินที่ตัดเอาหมู่ acetyl ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ออกเรียกว่า Deacetylation คือเปลี่ยนน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine เป็น glucosamine ที่ไม่เสถียร (Unstable) มีความเป็นขั้วสูง (Strong positive polarity) จึงทำให้ไคโตซานมีสมบัติพิเศษ พร้อมจะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว มีคุณสมบัติละลายได้ในกรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้น 2-3% ปกติแล้วไคโตซานที่ได้จะมีส่วนผสมของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine และ glucosamine อยู่ในสายพอลิเมอร์เดียวกัน ซึ่งระดับการกำจัดหมู่ acetyl (หรือ%การเกิด deacetylation) นี้มีผลต่อสมบัติและการทำงานของไคโตซานนอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลก็มีส่วนต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีสายยาวและสารละลายมีความหนืดมากกว่า ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นต้น ดังนั้นการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาทั้ง%การเกิด deacetylation และน้ำหนักโมเลกุล

การใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตซาน

ไคติน-ไคโตซานสามารถทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน โดยตัวสร้างตะกอนจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอยในน้ำเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้นๆ และเมื่อใหญ่มากพอก็จะตกเป็นตะกอนลงมา ส่วนตัวตกตะกอนจะทำงานคล้ายๆ กันคือ จะไปจับกับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา ไคโตซานจะทำหน้าที่ทั้งสองแบบได้ดีเนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกมาก จึงทำให้พวกประจุลบอย่างโปรตีน สีย้อม กรดไขมันอิสระ คอลเลสเตอรอล (ในร่างกาย) เข้ามาเกาะกับประจุบวกของไคโตซาน ส่วนโลหะหนักซึ่งเป็นประจุบวกอยู่แล้วจะจับกับอิเล็กตรอนจากไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานทำให้เกิดพันธะเคมีที่เรียกว่า “พันธะเชิงซ้อน” ขึ้นมา และจากการทดลองพบว่าหมู่อะมิโนในไคโตซาน จะสามารถจับ

กับโลหะหนักในน้ำได้ดีกว่าหมู่อะซิทธิลของไคติน-ไคโตซานจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้

- อุตสาหกรรมอาหาร ไคโตซานมีสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิด โดยมีกลไกคือ ไคโตซานมีประจุบวกสามารถจับกับเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบได้ ทำให้เกิดจับกันของโปรตีนและสารอื่นของเซลล์ ในหลายประเทศได้ขึ้นทะเบียนไคตินและไคโตซานให้เป็นสารที่ใช้เติมในอาหารได้ โดยนำไปใช้เป็นสารกันบูด สารช่วยรักษากลิ่น รส และสารให้ความข้นหนืด ใช้เป็นสารเคลือบอาหาร ผัก และผลไม้ เพื่อรักษาความสดหรือผลิตในรูปแบบฟิล์มที่รับประทานได้ (Edible film) สำหรับบรรจุอาหาร

- อุตสาหกรรมกำจัดของเสีย โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารมีสารแขวนลอยสูง ไคโตซานมีประจุบวกสามารถจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี ซึ่งโปรตีนที่ได้สามารถนำมาแยกไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักและจับสี (Dye) ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย

- ด้านอาหารเสริม ไคโตซานช่วยลดคอเลสเตอรอล และไขมันในเส้นเลือด โดยไคโตซานไปจับกับคอเลสเตอรอลทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมไปใช้หรือดูดซึมได้น้อยลงและคนไม่สามารถย่อยไคตินและไคโตซานได้ทั้งหมดจึงถูกขับออกมาพร้อมกับอุจจาระ โดยที่มีคอเลสเตอรอลและไขมันส่วนเกินตามออกมาด้วย แต่ไคโตซานสามารถจับวิตามินที่ละลายได้ดีในไขมัน (วิตามินเอ ดี อี เค) อาจทำให้ขาดวิตามินเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ทางการแพทย์มีรายงานการนำ N-acetyl-D-glucosamine ไปใช้รักษาไขข้อเสื่อม โดยอธิบายว่าข้อเสื่อมเกิดเนื่องจากการสึกกร่อนของเนื้อเยื่ออ่อนที่เคลือบอยู่ระหว่างข้อกระดูกซึ่ง glucosamine เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ proteoglycan และ matrix ของกระดูกอ่อน จึงช่วยทำให้เยื่อหุ้มกระดูกอ่อนหนาขึ้น

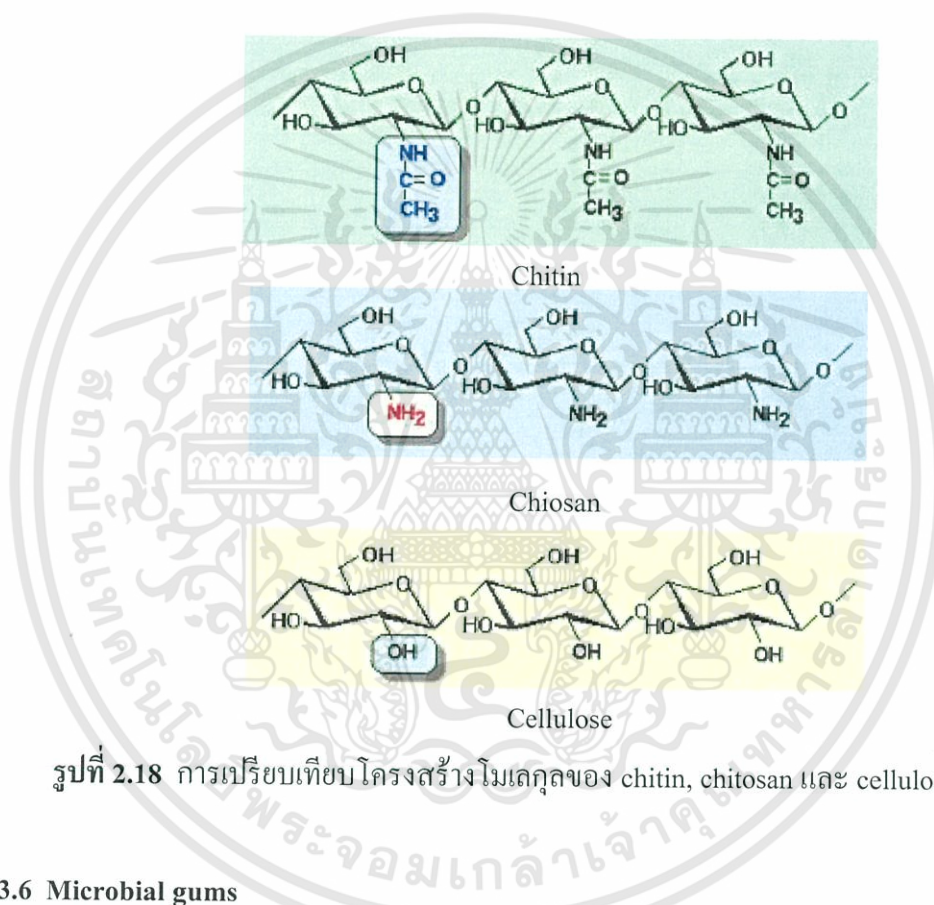
- อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ ไคโตซานถูกนำไปใส่ในเครื่องสำอางค์สำหรับผิวหน้าและเส้นผม ไคโตซานมีประจุบวกทำให้สามารถเกาะกับประจุลบของผิวหน้าและเส้นผมได้เป็นอย่างดี จึงถูกนำไปใส่ในเครื่องสำอางค์ที่มีส่วนผสมของกรดผลไม้ธรรมชาติที่เรียกว่า กรดแอลฟา-ไฮดรอกซี (Alpha hydroxyl acid; AHA) กรดพวกนี้จะกระตุ้นให้ผิวหน้าเก่าหลุดลอกเพื่อสร้างผิวใหม่ทำให้ผิวดูอ่อนเยาว์ขึ้น ส่วนในการบำรุงเส้นผมไคโตซานจะก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมไว้ทำให้เส้นผมคงสภาพนุ่มสลวยไม่เสียหาย

- ใช้ในทางการแพทย์ ไคตินและไคโตซานได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในทางการแพทย์และเภสัชภัณฑ์มีรายงานการวิจัยพบว่า ไคตินและไคโตซานมีคุณสมบัติสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Antimicrobial activity) เป็นสารแอนตี้ออกซิแดนซ์ (Antioxidant activity) มีคุณสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม (film forming agent) สามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะบางใส นำมาปิดรักษาบาดแผลผ่าตัด แผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ช่วยป้องกันการติดเชื้อของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผล กระตุ้นให้มีการผลิตและสร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษกว่าพลาสติกปิดแผลทั่วไป ใช้ผลิตหนังเทียม ผลิตยาลดไขมันในเลือด ใช้เคลือบยาเม็ดแคปซูล ใช้เป็นสารตัวกลางที่จะปลดปล่อยยาออกมาอย่างช้าๆ ควบคุมคอเรสเตอรอล ยับยั้งการเกิดมะเร็ง ต้านไวรัส ทำคอนแทกเลนส์ เป็นต้น

- อุตสาหกรรมการเกษตร เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม และเจลใสไม่มีสี ไม่มีกลิ่นสามารถนำมาฉีดพ่นเคลือบผิวเพื่อรักษาอายุของผลผลิตทางการเกษตร และมีสมบัติยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรียบางชนิดที่ก่อโรคแก่พืชได้



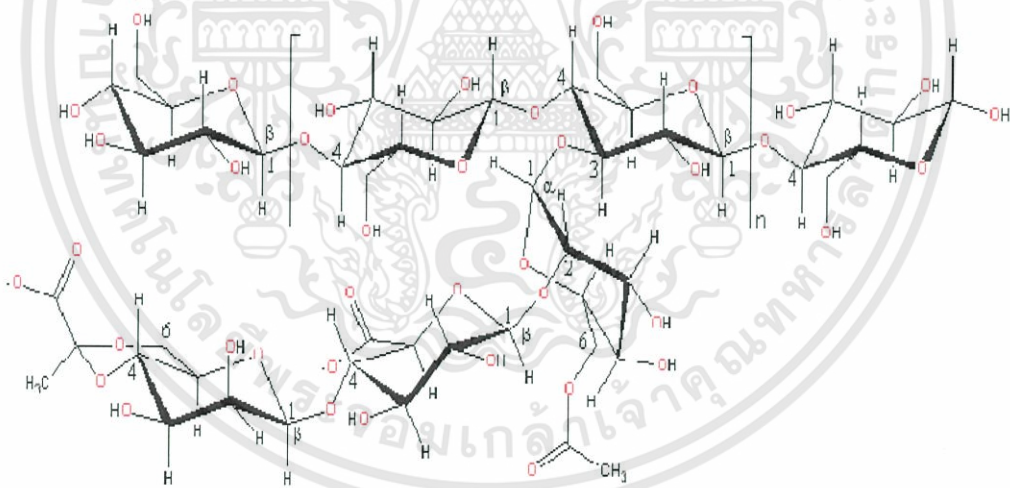
รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของ chitin, chitosan และ cellulose [11]

### 2.3.6 Microbial gums

- Xanthan gum เป็นกัมที่ได้โดยการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรียบริสุทธิ์ คือ *Xanthomonas campestris* หลังจากกระบวนการหมักแล้วจะนำมาตกตะกอนด้วย Isopropyl alcohol แยกเอา Xanthan gum ออกมาทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียด Xanthan gum หรือเรียกชื่อทางการค้าว่า “Keltol” มีโครงสร้างเป็น Heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยกลูโคส, แมนโนส และ glucuronic acid ในอัตราส่วน 2.8:3:2 มีหมู่ acetyl ประมาณ 4.7 % และ pyruvic acid ประมาณ 3 % โดยกลูโคสต่อกับแมนโนส ด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4 และแมนโนสที่เป็นสายแขนงต่อกับสายหลักด้วยพันธะ 1,2 หรือ 1,3 ส่วน glucuronic acid ต่อกับพันธะ  $\beta$ -1,2 (รูปที่ 2.19) Xanthan gum ไม่มีสมบัติเป็น Gelling agent แต่สามารถเกิด Elastic thermoreversible gel ได้เมื่อรวมกับ Locust bean gum และเมื่อรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับกัวร์กัมจะให้สารละลายที่มีความหนืดสูง Xanthan gum ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สารละลายที่ได้มีความหนืดสูง ทนต่อการย่อย ด้วยเอนไซม์มีความคงตัวสูงต่อความร้อนและ pH ความหนืดของสารละลาย Xanthan gum จะคงที่ถึงแม้ อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงในช่วง 0-100 °C หรือ pH จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 1-13 ก็ตาม นอกจากนั้นสารละลาย Xanthan gum ยังมีคุณสมบัติ เป็น pseudoplastic ซึ่งมีความสำคัญต่อกลิ่น ลิ้นขณะปรากฏและความรู้สึก เมื่ออาหารอยู่ในปาก (mouthfeel) Xanthan gum ใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดเพิ่มความคงตัวและทำให้อุณหภูมิแขวนลอยได้ดี เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม ถ้านำ Xanthan gum มาผสมกับ Locust bean gum จะนิยมนำมาใช้กับอาหารประเภท ขนมหวาน ซอสมะเขือเทศสำหรับพิซซ่า ใส่นมอบ และ ใส่น้ำยา เป็นต้น นอกจากนั้นยังผสมกับทั้ง Locust - bean gum และ Guar gum ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความข้นหนืด และสมบัติเฉพาะตามความต้องการสำหรับอาหารชนิดต่างๆ เช่น ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภท frozen desserts, pasteurized, pasteurized process cheese spread, cottage cheese, salad dressing , sour cream และ fruitsyrups เป็นต้น



รูปที่ 2.19 โครงสร้างโมเลกุลของ Xanthan gum [19]

## 2.4 ปู่ย [20]

"ปู่ย"ตามพระราชบัญญัติปู่ย พ.ศ. ๒๕๑๘ "ได้บัญญัติไว้ดังนี้ "ปู่ย หมายถึง สารอินทรีย์หรือ สารอนินทรีย์ไม่ว่าจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือทำขึ้นก็ตาม ใช้เป็นธาตุอาหารพืชได้ ไม่ว่าโดยวิธีใดหรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในดิน เพื่อบำรุงความเติบโตแก่พืช"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความหมายของปุ๋ยตามพระราชบัญญัติปุ๋ย พ.ศ. ๒๕๑๘ ดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า ปุ๋ย คือวัตถุใดก็ตามที่นำมาใช้ในการเพาะปลูกแล้วทำให้พืชเจริญเติบโต เพิ่มผลผลิต ไม่เป็นพิษต่อพืชและเกิดผลเสียต่อดิน ซึ่งส่วนใหญ่หลักที่สำคัญของปุ๋ยก็คือ ธาตุอาหารพืช ซึ่งหมายถึง ธาตุอาหารหลัก คือ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม

ปุ๋ยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ [21]

- ปุ๋ยเคมี คือสารประกอบอนินทรีย์ที่ให้ธาตุอาหารพืชเป็นสารประกอบที่ผ่านกระบวนการผลิตทางเคมีเมื่อใส่ลงไปในดินที่มีความชื้นที่เหมาะสมปุ๋ยเคมีจะละลายให้พืชดูดไปใช้ประโยชน์ได้อย่างรวดเร็วแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ

- ปุ๋ยเดี่ยวหรือแม่ปุ๋ย ได้แก่ ปุ๋ยพวกแอมโมเนียมซัลเฟต โพแทสเซียมคลอไรด์ ฯลฯ ซึ่งเป็นสารประกอบทางเคมีมีธาตุอาหาร ปุ๋ยคือ N หรือ P หรือ K เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยหนึ่งหรือสองธาตุแล้วแต่ชนิดของสารประกอบที่เป็นแม่ปุ๋ยนั้นๆ มีปริมาณของธาตุอาหาร ปุ๋ยที่คงที่ เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต มีไนโตรเจน 20% N ส่วนโพแทสเซียมไนเตรด มีไนโตรเจน 13% N และโพแทสเซียม 46% K(2)O อยู่ร่วมกันสองธาตุ
- ปุ๋ยผสม ได้แก่ ปุ๋ยที่มีการนำเอาแม่ปุ๋ยหลาย ๆ ชนิดมาผสมรวมกันเพื่อให้ปุ๋ยที่ผสมได้มีปริมาณและสัดส่วนของธาตุอาหาร N P และ K ตามที่ต้องการทั้งนี้เพื่อให้ได้ปุ๋ยที่มีสูตรหรือเกรดปุ๋ยเหมาะที่จะใช้กับพืชและดินที่แตกต่างกันปุ๋ยผสมนี้จะมีขายอยู่ในท้องตลาดทั่วไปเพราะนิยมใช้กันมากปัจจุบันเทคโนโลยีในการทำปุ๋ยผสมได้พัฒนาไปไกลมากสามารถผลิตปุ๋ยผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอมีการปั้นเป็นเม็ดขนาดสม่ำเสมอสะดวกในการใส่ลงไปในไร่ นา ปุ๋ยพวกนี้เก็บไว้นานๆจะไม่จับกันเป็นก้อนแข็ง สะดวกแก่การใช้เป็นอย่างยิ่ง

ธาตุอาหารหลักในปุ๋ยเคมี

- ไนโตรเจน (N) : ในปุ๋ยเคมีอาจจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมหรือไนเตรดหรือยูเรีย ปริมาณไนโตรเจนในสูตรปุ๋ยหมายถึงปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในปุ๋ยเคมี เมื่อใส่ลงไปในดินพืชสามารถดูดกินได้ทันที
- ฟอสฟอรัส (P) : ในปุ๋ยเคมีอาจจะมีอยู่ทั้งในรูปที่พืชดูดกินได้ที่เรียกว่า รูปที่เป็นประโยชน์และบางส่วนอาจจะอยู่ในรูปที่พืชดูดกินไม่ได้ตัวเลขที่บอกปริมาณฟอสฟอรัสในสูตรปุ๋ยจะหมายถึง เฉพาะรูปที่เป็นประโยชน์เท่านั้นตัวอย่างเช่น ปุ๋ยหินฟอสเฟตบด ถ้ามีฟอสฟอรัสทั้งหมด 30% แต่อยู่ในรูปที่พืชดูดกินได้ เพียง 3% ก็จะมีสูตรเป็น 0-3-0 เท่านั้น

- โปแทสเซียม (K) : ในปุ๋ยเคมีก็อาจจะมียู๋ทั้งในรูปที่พืชดูดกินได้ หรือที่เรียกว่ารูปที่ละลายน้ำได้ และรูปที่พืชดูดกินไม่ได้ซึ่งตัวเลขในสูตรปุ๋ยก็จะหมายถึงเฉพาะรูปที่พืชดูดกินได้เท่านั้น

- ปุ๋ยอินทรีย์ คือสารประกอบที่ได้จากสิ่งที่มีชีวิต ได้แก่ พืช สัตว์และจุลินทรีย์ ผ่านกระบวนการผลิตทางธรรมชาติปุ๋ยอินทรีย์ส่วนใหญ่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน ทำให้ดินโปร่ง ร่วนซุยระบายน้ำและถ่ายเทอากาศได้ดี รากพืชจึงชอนไชไปหาธาตุอาหารได้ง่ายขึ้น ปุ๋ยอินทรีย์มีปริมาณธาตุอาหารอยู่น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีและธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไนโตรเจนอยู่ในสารประกอบจำพวกโปรตีนเมื่อใส่ลงไปดินพืชจะไม่สามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ทันทีแต่ต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดินแล้วปลดปล่อยธาตุอาหารเหล่านั้นออกมาในรูปสารประกอบอินทรีย์เช่นเดียวกันกับปุ๋ยเคมี จากนั้นพืชจึงดูดไปใช้ประโยชน์ได้ปุ๋ยอินทรีย์มี 3 ประเภทคือ

- ปุ๋ยคอก เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์เลี้ยง เช่น โค กระบือ สุกร เป็ด ไก่ และห่าน ฯลฯ โดยอาจจะใช้ในรูปแบบปุ๋ยคอกแบบสด แบบแห้ง หรือนำไปหมักให้เกิดการย่อยสลายก่อนแล้วค่อยนำไปใช้ก็ได้ซึ่งต้องคำนึงถึงชนิดของดินและพืชที่ปลูกด้วยโดยเฉพาะการใช้แบบสดอาจทำให้เกิดความร้อนและมีการดึงธาตุอาหารบางตัวไปใช้ในการย่อยสลายมูลสัตว์ซึ่งอาจจะทำให้พืชเหี่ยวตายได้ การใช้ปุ๋ยคอกนั้น นอกจากจะมีประโยชน์ในการช่วยเพิ่มธาตุอาหารพืชในดินแล้วยังช่วยทำให้ดินโปร่งและร่วนซุย ทำให้การเตรียมดินง่ายการตั้งตัวของต้นกล้าเร็วทำให้มีโอกาสรอดได้มากด้วย
- ปุ๋ยหมัก เป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการนำชิ้นส่วนของพืช วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น หญ้าแห้ง ใบไม้ ฟางข้าว ชังข้าวโพด กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล และแกลบจากโรงสีข้าว ขึ้นีเหลือจากโรงงานแปรรูปไม้ เป็นต้น มาหมักในรูปของการกองซ้อนกันบนพื้นดิน หรืออยู่ในหลุมเพื่อให้ผ่านกระบวนการย่อยสลายให้เน่าเปื่อยเสียก่อนโดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์จนกระทั่งได้สารอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน ไม่มีกลิ่นมีสีน้ำตาลปนดำ
- ปุ๋ยพืชสด เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการปลูกพืชบำรุงดินซึ่งได้แก่พืชตระกูลถั่วต่างๆ แล้วทำการไถกลบเมื่อพืชเจริญเติบโตมากที่สุด ซึ่งเป็นช่วงที่กำลังออกดอกพืชตระกูลถั่วที่ควรใช้เป็นปุ๋ยพืชสดควรมีอายุสั้น มีระบบรากลึก ทนแล้งทน โรคและแมลงได้ดี เป็นพืชที่ปลูกง่าย

และมีเมล็ดมาก ตัวอย่างพืชเหล่านี้ก็ได้แก่ ถั่วพุ่ม ถั่วเขียว ถั่วลาย ปอเทือง ถั่วขอ ถั่วแปบ และโสน เป็นต้น

### ข้อดีและข้อเสียของปุ๋ยอินทรีย์-ปุ๋ยเคมี

ข้อดีของปุ๋ยอินทรีย์	ข้อเสียของปุ๋ยอินทรีย์
ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินให้ดีขึ้น	ปริมาณธาตุอาหารต่ำ
อยู่ในดินได้นาน (ค่อยๆปลดปล่อยธาตุอาหาร)	ใช้เวลานานกว่าจะเป็นประโยชน์
ส่งเสริมปุ๋ยเคมีให้เป็นประโยชน์ดีขึ้น	ราคาแพงต่อหน่วยธาตุอาหารพืช
ส่งเสริมสิ่งมีชีวิตที่เป็นประโยชน์ในดิน	หายาก
มีจุลธาตุ	

ข้อดีของปุ๋ยเคมี	ข้อเสียของปุ๋ยเคมี
มีปริมาณธาตุอาหารสูงมาก	ปุ๋ยพวกแอมโมเนียมทำให้ดินเป็นกรด
ราคาถูก	ไม่มีคุณสมบัติปรับปรุงดิน
หาง่าย, ใช้ง่าย	มีความเค็ม
ให้ผลเร็ว	การใช้ต้องการความรู้พอสมควร

## 2.5 กระบวนการปลดปล่อยสาร (Controlled Release (CR)) [22]

กระบวนการปลดปล่อยสาร (Controlled Release (CR)) คือ การออกแบบให้มีการปลดปล่อยสารในอัตราที่ต้องการ และความเข้มข้นของสารไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อมีการดูดซับสาร รูปแบบการปลดปล่อยสารมีหลายรูปแบบ เช่น

- การแพร่ผ่านเมมเบรน (Membrane controlled device) สารจะถูกกักเก็บอยู่ภายในไฮโดรเจล ซึ่งผิวหน้าถูกเคลือบหรือห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์และพอลิเมอร์นี้เองจะทำหน้าที่ในการควบคุมการปลดปล่อยสารสู่ภายนอก แบ่งออกเป็น

- Membrane diffusion ใช้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่เกิดการพองตัวได้ ทำให้เกิดรูภายในโครงสร้างสารจึงแพร่ผ่านรูของพอลิเมอร์
- Membrane dissolution สารที่ต้องการปลดปล่อยจะถูกปลดปล่อยออกโดยการละลายออกมาอย่างช้าๆ ทำให้มีระยะเวลาในการปลดปล่อยยาวนานขึ้น ทำได้โดยการเคลือบอนุภาคสารที่ต้องการปลดปล่อยด้วยสารที่ละลายช้าให้มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาต่างๆกัน เมื่อผิวหน้าที่เคลือบละลายหมดสารที่ต้องการปลดปล่อยจะถูกปลดปล่อยออกมา โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอัตราเร็วในการละลายของสารคือความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ และความเร็วในการละลายของสารเคลือบ (พอลิเมอร์)

- การแพร่ผ่านเมทริกซ์ (Matrix device) สารที่ต้องการปลดปล่อยจะกระจายอยู่ในพอลิเมอร์ แบ่งเป็น

- Matrix diffusion สารที่ต้องการปลดปล่อยจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในส่วนกักเก็บของไฮโดรเจล (พอลิเมอร์) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยสารคือรูพรุนและช่องภายใน รูพรุนของพอลิเมอร์ พื้นที่ผิวของเมทริกซ์ ความเข้มข้นของสารที่ปลดปล่อย
- Matrix dissolution ผสมพอลิเมอร์ที่ละลายได้เข้ากับสารที่ต้องการปลดปล่อย เพื่อลดการละลายให้ช้าลง สารจะละลายออกมาช้าๆ พร้อมๆ กับการละลายของพอลิเมอร์ โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยสาร คืออัตราการละลายของพอลิเมอร์ พื้นที่ผิวของเมทริกซ์ อัตราส่วนของพอลิเมอร์ต่อสารที่ต้องการปลดปล่อย การพองตัวของพอลิเมอร์

- การปลดปล่อยโดยอาศัยความดันออสโมซิส (Osmosis device) ประกอบไปด้วยสารที่ดูดน้ำได้และทำให้เกิดแรงดันออสโมซิส เยื่อเลือกผ่านยอมให้น้ำผ่านแต่ไม่ยอมให้สารละลายอื่นผ่าน แต่ได้ฟิล์มที่ไม่ละลายและไม่ยืดหยุ่น

- การอัดสารที่ต้องการปลดปล่อยในลักษณะเม็ด (Compression coated tablet) อัดเม็ดเป็นชั้นๆ 2-3 ชั้น โดยให้สารที่ต้องการปลดปล่อยอยู่ตรงกลาง แล้วนำพอลิเมอร์มาประกบชั้นบนและชั้นล่าง โดยชั้นพอลิเมอร์ที่มาประกบจะเป็นตัวควบคุมการปลดปล่อย

- การแลกเปลี่ยนประจุโดยใช้เรซิน (Ion exchange resin) ใช้กับสารที่ต้องการปลดปล่อยที่มีประจุ โดยใช้เรซินที่มีประจุตรงข้ามกับสารที่ต้องการปลดปล่อยและเมื่อสารที่ต้องการปลดปล่อยอยู่ในสถานะที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ก็จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน จึงทำให้สารที่ต้องการปลดปล่อยถูกปลดปล่อยออกมา

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

M. Prabaharan (2554) [23] ได้ศึกษาการกราฟท์และการทำอนุพันธ์ของกั้วร์กัม (GG) ในหลายรูปแบบได้แก่ การทำเป็นสารเคลือบ, การอัดเม็ด, ไฮโดรเจล และอนุภาคนาโน/ไมโคร เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ใช้งานทางด้านการแพทย์ได้กว้างขวางมากยิ่งขึ้น โดยมุ่งเน้นระบบขนส่งยาในด้านการรักษาโรคที่เกี่ยวกับลำไส้ใหญ่, การลดความดันโลหิต, แผ่นยาแปะผิวหนัง ผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่า GG และอนุพันธ์สามารถย่อยสลายได้ โดยอนุพันธ์ที่ทำการอัดเม็ดและการเคลือบผิวยา สามารถใช้ขนส่งยาเพื่อรักษาโรคที่เกี่ยวกับลำไส้ใหญ่ได้ ส่วนการเชื่อมโยง GG ด้วยบอแรกซ์, กลูตารัลดีไฮด์ และไตรโซเดียม ไตรเมตาฟอสเฟต สามารถรักษาผู้ป่วยโรคความดันโลหิตสูงได้ ส่วนการทำอนุพันธ์ของ GG ในรูปแบบฟิล์ม สามารถใช้เป็นแผ่นยาแปะผิวหนังได้

T. Jamnongkan และ S.Keawpirom (2010) [24] ได้ศึกษาการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย (controlled-release fertilizer, CRF) โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA), โคลโคซาน (CS) และพอลิเมอร์ผสมทั้ง 2 ตัวนี้ และใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง โดยกลไกการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจาก CRF hydrogels นั้นจะพิจารณาโดยใช้โมเดลของ Korsmeyer-Peppas พบว่า CRF hydrogels ที่มีปริมาณ PVA มาก ทำให้การดูดซึมของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น โดยดินที่อยู่ใน CRF hydrogels จะมีบางส่วนที่สามารถอุ้มน้ำได้ ในขณะที่ดินที่ไม่ได้อยู่ใน CRF hydrogels จะปล่อยน้ำออกไปจนเกือบหมด โดยการกักเก็บน้ำของดินขึ้นอยู่กับปริมาณ PVA ที่มีอยู่ในโครงสร้างของ CRF hydrogels และในส่วนของการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจะแปรผันตามอัตราส่วนของ PVA กล่าวคือยิ่งอัตราส่วนมากยิ่งมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสมาก

ชาญวิทย์ ลิ้มไพบูลย์ และคณะ (2554) [25] ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซคคาไรด์ ได้แก่ อัลจินเนต (Alg) และ กัวร์กัม (GG) โดยใช้โซเดียมเททระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยง และเติมสารที่ช่วยยับยั้งแบคทีเรีย คือ สารละลายซิลเวอร์ลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alg:GG คือ 4:6 และ 6:4 รวมถึงความเข้มข้นที่แตกต่างกันของโซเดียมเททระบอเรตซึ่งใช้เป็นสารเชื่อมโยง 3 ค่า คือ 0.2, 0.4 และ 0.6 % โดยน้ำหนัก หลังจากนั้น ไฮโดรเจลที่เตรียมได้นำไปเติมซิลเวอร์ด้วยการแช่ในสารละลายซิลเวอร์ในเทรต และใช้โซเดียมบอโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์ นำไฮโดรเจลที่ปรับปรุงสมบัติไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, XRF, TGA, ทดสอบการบวมตัว และ ทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบได้แก่ *Bacillus subtilis* และ *Escherichia coli* จากผลงานวิจัยพบว่า การทดสอบการฆ่าเชื้อโดยวิธี Agar well diffusion สามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Bacillus subtilis* ได้ดีกว่า *Escherichia coli* โดยสูตรไฮโดรเจลที่ต้านเชื้อดีที่สุดคือ A4G6B0.6, 20 จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD พบว่าเจล ทุกสูตรมีซิลเวอร์และซิลเวอร์ออกไซด์อยู่ในโครงสร้าง จากการหาปริมาณซิลเวอร์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าไฮโดรเจลมีปริมาณซิลเวอร์อยู่ 12 ถึง 45 % โดยน้ำหนัก โดยสูตรที่มีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุดคือ A6G4B0.4, 20 จากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าการสลายตัวของอัลจินเนตและกัวร์กัมอยู่ที่ 220-245°C นอกจากนี้นำเจลมาบวมตัวในน้ำกลั่นพบว่าสูตร A6G4B0.6, 20 และ A6G4B0.4, 1 มีการบวมตัวสูงสุด โดยมีค่าการบวมตัวสูงสุดที่ 60 % โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก และสูตรที่เหมาะสมจะใช้งานในการด้านเชื้อที่ระยะเวลานานคือ A6G4B0.4, 20 เพราะว่ามีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุดและมีอัตราการแพร่ของซิลเวอร์ช้าที่สุด

ชามาศ มินสาคร (2555) [3] ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซ็กคาไรด์ได้แก่ โซเดียมอัลจินต (Na-Alg) โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) และกัวร์กัม (GG) ด้วยการเชื่อมโยงสองแบบ คือ การเชื่อมโยงแบบขั้นตอนเดียวด้วยโซเดียมเทรโบเรต และการเชื่อมโยงแบบสองขั้นตอนด้วยโซเดียมเทรโบเรตและแคลเซียมคลอไรด์ นอกจากนี้ยังได้แบ่งการเตรียมไฮโดรเจลเป็นสองระบบ คือ ระบบสององค์ประกอบของ Na-Alg/GG และ Na-CMC/GG อีกระบบเป็นระบบสามองค์ประกอบของ Na-Alg/Na-CMC/GG ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Na-Alg : GG, Na-CMC :GG และ Na-Alg : Na-CMC : GG ตั้งแต่ 0-100 % รวมถึงความเข้มข้นที่แตกต่างกันของโซเดียมเทรโบเรตซึ่งใช้เป็นสารเชื่อมโยง 4 ค่า คือ 0 %, 0.2 %, 0.6 % และ 1.0 % โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจลที่ได้นำไปทดสอบสมบัติการบวมตัวในสภาวะต่างๆ คือ ในน้ำกลั่น ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 2, 5, 7.4, 8 และ 12 ในสารละลาย NaCl และ CaCl<sub>2</sub> ที่ความเข้มข้นต่างๆ และอุณหภูมิต่างกัน จากผลงานวิจัยพบว่าไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบสูตร A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C สูงที่สุดที่ 50 เท่า และไฮโดรเจลสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไกสูตร A1C3G6-10Ca สามารถคงสภาพเจลได้นานที่สุดที่เวลา 180 นาที การบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายเกลือ พบว่าค่าการบวมตัวใน น้ำกลั่น > NaCl > CaCl<sub>2</sub> และคงสภาพได้นานที่สุดเมื่อบวมตัวในสารละลาย CaCl<sub>2</sub> นอกจากนี้การบวมตัวมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้น การบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่ 37°C พบว่าเจลบวมตัวได้น้อยกว่าที่ 23°C และเกิดการเสียสภาพเร็วขึ้น เมื่อทดสอบการบวมตัวในสภาวะกรด-เบส พบว่าค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น 4 < 7 ≅ 10 และที่ pH เริ่มต้น 4 เจลเกิดการเสียสภาพได้เร็ว

เพชรรัตน์ พลับเจริญสุข และคณะ (2554) [4] ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซ็กคาไรด์ได้แก่ กัวร์กัม (GG) และคาร์ราจีแนน (CA) โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนตั้งแต่ 0:10 ถึง 10:0 โดยน้ำหนักและเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทรโบเรตที่ 0.6 % และ 1.0% โดยน้ำหนัก นำไฮโดรเจลที่เตรียมได้ไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชัน O-H-stretching, เลขคลื่นของ C-O-stretching ของหมู่แอลกอฮอล์และ C-H-stretching ของ CH<sub>2</sub> และ CH<sub>3</sub> และ ซึ่งเลขคลื่นที่พบทั้งหมดพบทั้งใน โครงสร้างโมเลกุลของคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม และทดสอบการบวมตัวในสภาวะน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 20 และ 37°C ในสารละลายเกลือ NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 M ,ในสารละลายเกลือ CaCl<sub>2</sub> เข้มข้น 0.1 M และที่สภาวะกรด-ด่าง จากผลการทดลองพบว่า เจลเมื่อบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 20°C ให้ค่าการบวมตัวสูงที่สุด จากนั้นทำการบวมตัวในสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกลือที่มีความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 M พบว่ามีการบวมตัวลดลงกว่าในน้ำกลั่น และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นถึง 0.25 และ 0.5 M เจลมีเสถียรภาพการบวมตัวที่ยาวนานมากขึ้น สูตร C4G6 (หมายถึง องค์ประกอบของคาร์ราจีแนน 60 % โดยน้ำหนัก และกัวร์กัม 40 % โดยน้ำหนัก) และ C5G5 (หมายถึง องค์ประกอบของคาร์ราจีแนน 50 % โดยน้ำหนัก และกัวร์กัม 50 % โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.6 % และ 1.0% โดยน้ำหนัก พบว่ามีการบวมตัวสูงสุดเมื่อ 24 ชั่วโมงผ่านไป เมื่อเปลี่ยนเป็นสารละลายเกลือ  $\text{CaCl}_2$  ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าการบวมตัวน้อยที่สุด จากนั้นทำการบวมตัวในสารละลาย pH ต่างกันที่ 5.5 และ 8.5 พบว่าไม่มีผลต่อการบวมตัวของเจล

จิตรานุช จิรปฐมกุล และคณะ (2554) [5] ได้ศึกษาการปลดปล่อยสารออกซิฟอสเฟตในรูปของสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนต (A) และกัวร์กัม (G) โดยใช้โซเดียมเทตระบอเรตเป็นตัวเชื่อมโยง และใช้อัตราส่วนโซเดียมอัลจิเนตต่อกัวร์กัมเป็น 6:4 และ 4:6 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมไฮโดรเจลที่บรรจุสารออกซิฟอสเฟตดังกล่าว 2 แบบ คือ การเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารออกซิฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว (1) และการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารออกซิฟอสเฟตแบบสองขั้นตอน (2) จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาศึกษาการดูดซับน้ำและการปลดปล่อยสารออกซิฟอสเฟต แล้วทำการตรวจวัดปริมาณสารออกซิฟอสเฟตโดยใช้ Vanado molybdophosphoric acid method ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ผลการทดสอบพฤติกรรมบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ดทั้ง 4 สูตร ได้แก่ A4G6(1), A6G4(1), A4G6(2) และ A6G4(2) พบว่ามีค่าการบวมตัวอยู่ในช่วงประมาณ 8-10 เท่า และพฤติกรรมปลดปล่อยสารของเจลปุ๋ยอัดเม็ด พบว่าเจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เตรียมแบบสองขั้นตอนสูตร A4G6(2) และ A6G4(2) สามารถปลดปล่อยสารออกมาได้เกือบ 100 % ภายในเวลาไม่ถึง 24 ชั่วโมง ขณะที่เจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เตรียมแบบขั้นตอนเดียวสูตร A4G6(1) และ A6G4(1) สามารถปลดปล่อยสารออกมาได้ประมาณ 70-80 % ที่เวลา 24 ชั่วโมง

โดยในงานวิจัยนี้ ได้เลือกไฮโดรเจล 2 ชนิดคือคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมมาทำการวิจัยต่อเพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารละลายออกซิฟอสเฟต อ้างอิงจากงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้ซึ่งมีการทดสอบการบวมตัวแล้วพบว่า มีระยะเวลาที่เจลเกิดการบวมตัวสูงสูคนานกว่าอัลจิเนตและกัวร์กัม โดยใช้อัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมเป็น C2G8, C4G6, C6G4 และ C8G2

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. กัวร์กัม (Guar Gum : GG) เกรดการค้า บริษัท รวมเคมี จำกัด
2. แคลปคาร์ราจีแนน (K-Carrageenan) เกรดอาหาร บริษัท รวมเคมี จำกัด
3. โซเดียมเตตระบอเรต (Sodium tetraborate :  $\text{Na}[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})].8\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท RFCL จำกัด
4. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassiumdihydrogenphosphate :  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Apex Chemicals จำกัด
5. แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium molybdate :  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}.4\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Mallinckrodt จำกัด
6. แอมโมเนียมเมตาแวนาเดต (Ammonium metavanadate :  $(\text{NH}_4\text{VO}_3)$  เกรดวิเคราะห์ บริษัท อิตัลมาร์(ประเทศไทย) จำกัด
7. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. Hydrochloric Acid : HCl) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents Group จำกัด

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน รุ่น C-MAG HS 7 บริษัท IKA จำกัด
2. แท่งแม่เหล็กคนสาร
3. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. เครื่องแก้ว
5. ตะแกรงลวดขนาด 400 เมช
6. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น Model GENESYS los UV-Vis บริษัท เบทไทย กรุงเทพฯอุปกรณ์เคมีภัณฑ์ จำกัด
7. เครื่องกรองแบบสุญญากาศ
8. เครื่องอัดเม็ด แรงดัน 5 ตัน จากบริษัท Sang Thai Intertrade จำกัด
9. กล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2 บริษัท ANMO Electronic Corporation จำกัด
10. ตู้อบลมร้อน รุ่น OF-01 E บริษัท เบทไทย กรุงเทพฯอุปกรณ์เคมีภัณฑ์ จำกัด
11. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียสคาลิปเปอร์
12. โกร่งบดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในงานวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

1. ชั่งสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปริมาณ 219.5 มิลลิกรัม
2. ละลายสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตด้วยน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรตามที่กำหนด สารละลายนี้  $1.00 \text{ มิลลิกรัม} = 50 \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$

#### 3.3.2 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.2 M

1. ชั่งสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปริมาณ 27.218 กรัม
2. ละลายสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตด้วยน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรตามที่กำหนด

#### 3.3.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมเททระโบเรตความเข้มข้น 0.6 % w/w และ 1.0 % w/w

1. ชั่งสารโซเดียมเททระโบเรต จำนวน 0.3 และ 0.5 กรัมตามลำดับ
2. ละลายโซเดียมเททระโบเรตในน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร

#### 3.3.4 การเตรียมสารละลายวานาเดียมโมลิบเดตรีเอเจนต์

1. ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 25 กรัม ในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร
2. ละลายแอมโมเนียมเมตาวานาเดต 1.25 กรัม ในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc.HCl) ปริมาตร 330 มิลลิลิตร
3. เติสารละลายของแอมโมเนียมโมลิบเดตที่เตรียมไว้ใส่ลงรวมกับสารละลายแอมโมเนียมเมตาวานาเดตแล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 มิลลิลิตร

### 3.4 ขั้นตอนการบรรจุสารปลดปล่อยในไฮโดรเจล

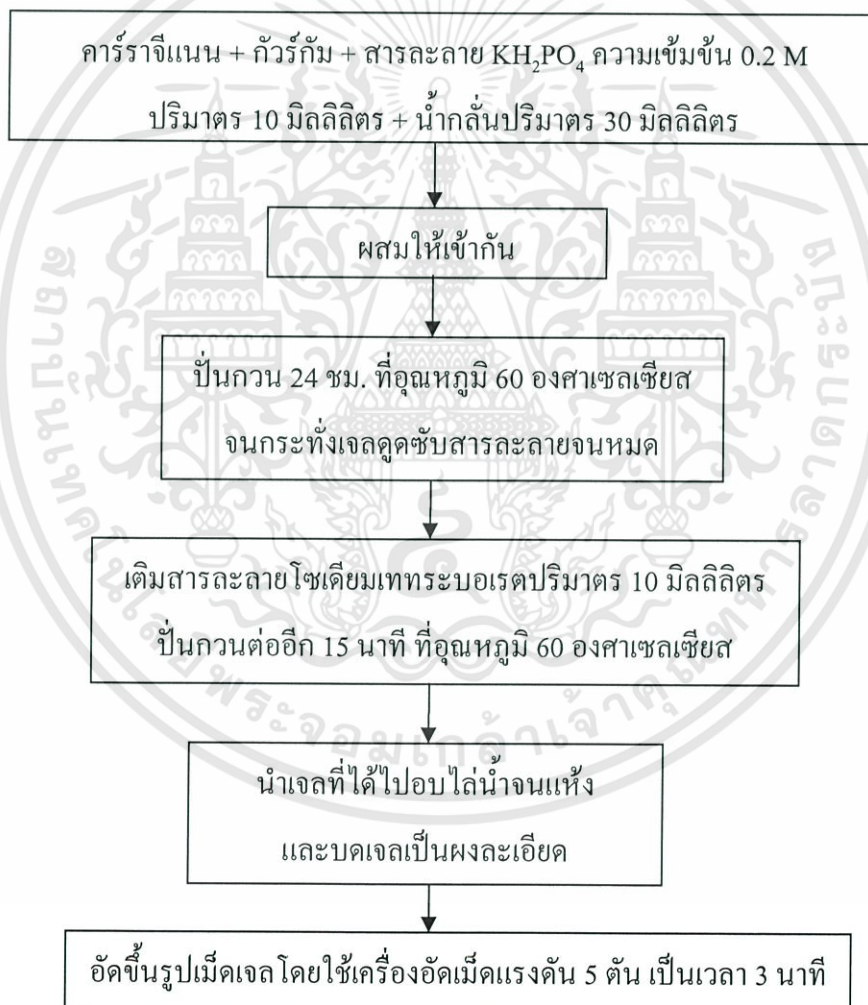
#### 3.4.1 วิธีที่ 1 การเตรียมเจลและการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบขั้นตอนเดียว

1. ชั่งคาร์ราจีแนน และกัวร์กัม จำนวน 0.6 กรัมและ 0.4 กรัมตามลำดับ
2. ผสมคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ด้วยอัตราส่วนของน้ำหนักของของผสมต่อปริมาตรของสารละลาย เท่ากับ 1:40 (สารละลายประกอบด้วย สารละลาย

โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร) พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเจลดูดซับสารละลายจนหมด

4. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรต 10 มิลลิลิตร
5. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
6. อบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนกว่าจะแห้ง และบดเจดเป็นผงละเอียด ก่อนอัดขึ้นรูปเม็ดเจดโดยใช้เครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน เป็นเวลา 3 นาที
7. ทำซ้ำโดยการปรับปริมาณคาร์ราจีแนน, กัวร์กัม และโซเดียมเททระบอเรตตามตารางที่

3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการเตรียมเจด และการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบขั้นตอนเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

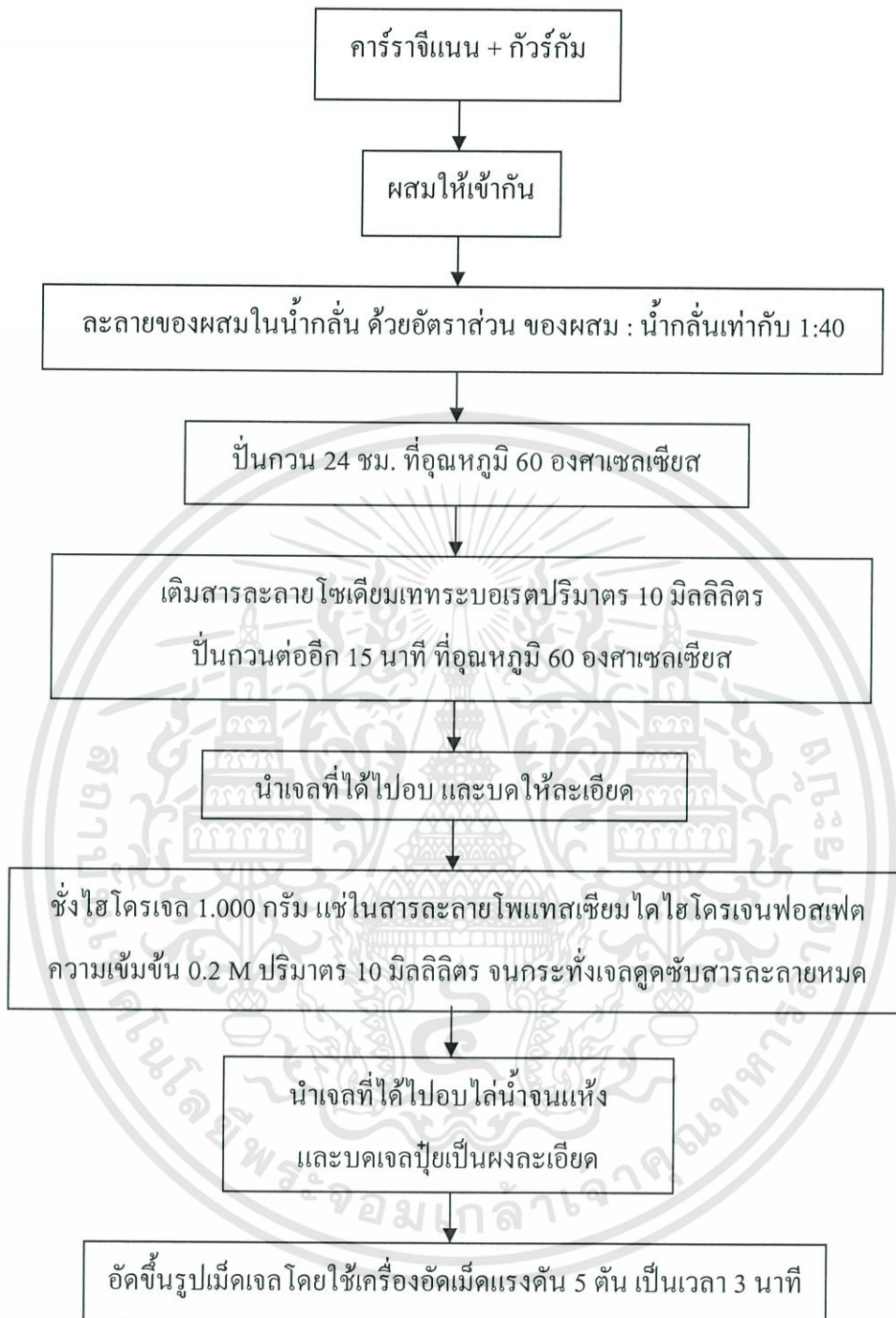
### 3.4.2 วิธีที่ 2 การเตรียมเจลและการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบ 2 ขั้นตอน

#### 3.4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมเจล

1. ชั่งคาร์ราจีแนน และกัวร์กัม จำนวน 0.6 กรัมและ 0.4 กรัมตามลำดับ
2. ผสมคาร์ราจีแนน และกัวร์กัมเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ด้วยอัตราส่วนของน้ำหนักของของผสมต่อปริมาตรของสารละลาย เท่ากับ 1:40 พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
4. เติมสารละลายโซเดียมเททระบอเรตปริมาณ 10 มิลลิลิตร
5. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
6. นำเจลที่ได้ไปอบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสจนกว่าจะแห้ง และบดเจลเป็นผงละเอียด
7. ทำซ้ำโดยการปรับปริมาณคาร์ราจีแนน, กัวร์กัมและโซเดียมเททระบอเรตตามตารางที่ 3.1

#### 3.4.2.2 ขั้นตอนการดูดซับสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

1. ชั่งเจลที่บดละเอียดมาประมาณ 1.000 กรัม
2. แช่เจลลงในสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จนกระทั่งเจลดูดซับสารละลายจนหมด
3. นำเจลที่ได้ไปอบไล่ไอน้ำจนกว่าจะแห้ง และบดให้ละเอียด พร้อมอัดขึ้นรูปเม็ดเจลโดยใช้เครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน เป็นเวลา 3 นาที



**รูปที่ 3.2** แผนภาพวิธีการเตรียมเจล และดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต  
แบบ 2 ขั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างคาร์ราจีแนนกับกัวร์กัมที่มีการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระโบเรต

สูตร	องค์ประกอบ		ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเททระโบเรต (% โดยน้ำหนัก)
	คาร์ราจีแนน	กัวร์กัม	
C2G8B1.0	20	80	1.0
C4G6B1.0	40	60	
C6G4B1.0	60	40	
C8G2B1.0	80	20	0.6
C4G6B0.6	40	60	
C6G4B0.6	60	40	

### 3.5 การตรวจวัดขนาดอนุภาคเจลปุย

- นำเจลปุยอบแห้งมาบดเป็นผงให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร
- เตรียมเจลปุยบดละเอียดใส่แผ่น glass slide แล้วปิดทับด้วย cover slit
- นำเจลปุยบดละเอียดที่เตรียมไว้ไปตรวจวัดขนาดอนุภาคโดยใช้กล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2 กำลังขยาย 230x โดยสุ่มวัดขนาดอนุภาค 50 จุด พร้อมหาค่าเฉลี่ย

### 3.6 การหาความหนาแน่นของเจลปุยอัดเม็ด

- ชั่งน้ำหนักเจลปุยที่บดแล้ว ความละเอียดให้มีทศนิยม 4 ตำแหน่ง ประมาณ 0.1500 กรัม
- นำผงเจลปุยบดละเอียดที่ชั่งมาใส่แม่พิมพ์
- อัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน เป็นเวลา 3 นาที
- วัดค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และชั่งน้ำหนักเจลปุยอัดเม็ด โดยทำทั้งหมด 3 ซ้ำ
- คำนวณหาค่าความหนาแน่นโดยใช้สูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ความหนาแน่นเจลปฏี้อัดเม็ด} = \frac{\text{น้ำหนักเจลปฏี้อัดเม็ด}}{\pi r^2 \times \text{ความหนาของเจลปฏี้อัดเม็ด}}$$

### 3.7 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของเจลในน้ำกลั่น

1. ชั่งน้ำหนักเจลปฏีบดให้มีมวลละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ประมาณ 0.1500 กรัม
2. อัดขึ้นรูปเม็ดเจลโดยใช้เครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน
3. ชั่งน้ำหนักตะแกรงลวดเปล่า
4. ห่อเจลปฏี้อัดเม็ดด้วยตะแกรงลวดขนาด 400 เมช พร้อมชั่งน้ำหนัก
5. แช่ตะแกรงลวดที่มีเจลปฏี้อัดเม็ดอยู่ภายในลงในน้ำกลั่น
6. ชั่งน้ำหนักที่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 นาทีแรก และทุกๆ 1 ชม. ถัดไป โดยแต่ละสูตรจะทำทั้งหมด 3 ซ้ำ
7. คำนวณหาการบวมตัว ตามสมการดังต่อไปนี้

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

### 3.8 วิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต

#### 3.8.1 การเตรียม Calibration Curve

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เตรียมไว้ (ข้อ 3.3.1) ตั้งแต่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติม Vanadate-Molybdate reagent ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในแต่ละขวด ผสมให้เข้ากันและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ค่า Standard phosphate reagent ที่เป็น 0 เป็น Reagent blank
3. นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณของฟอสเฟต ไปสร้างกราฟ โดยแกน X คือ ปริมาณฟอสเฟต และแกน Y เป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

#### 3.8.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อยจากปฏี้อัดเม็ด

1. นำเจลปฏี้อัดเม็ดน้ำหนักประมาณ 0.1500 กรัม แช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตรที่เวลาต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เก็บน้ำตัวอย่างในช่วงเวลา 30 นาทีแรกและทุกๆ 1 ชม. นำไปกรองด้วยชุดกรองแบบลดความดัน

3. เปิดน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่เวลาต่างๆ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

4. เติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรแล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 420 นาโนเมตร

### 3.8.3 การคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในปุ๋ยอัดเม็ด

#### 3.8.3.1 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในเจลจากการทดลอง

นำค่าการดูดกลืนแสงของเจลปุ๋ยอัดเม็ดมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน

(กำหนด  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.00 มิลลิกรัม =  $50 \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$ )

จากกราฟได้ปริมาณสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  มาตรฐานเท่ากับ X มิลลิลิตร

คิดเป็นปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เท่ากับ  $50X \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$

∴ น้ำตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัส เท่ากับ  $50X \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$

เช่น เจลในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตรมีปริมาณฟอสฟอรัส เท่ากับ  $30 \times (50X) =$

$Y \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$  ต่อเจลปุ๋ยอัดเม็ด 0.1500 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน 1.000 กรัมเจล (gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )

เจลปุ๋ยอัดเม็ด 0.1500 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เท่ากับ  $Y \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$

เจลปุ๋ยอัดเม็ด 1.000 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต =  $Y/0.1500 \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$

∴ ใน 1.0000 กรัม เจลปุ๋ยอัดเม็ดมีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต =  $Y/0.1500 \mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$

หมายเหตุ ทำการเปลี่ยนหน่วยจาก  $\mu\text{g PO}_4^{3-}\text{-P}$  เป็น  $\text{mg PO}_4^{3-}\text{-P}$  .ในผลการทดลอง

#### 3.8.3.2 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในเจลจากการคำนวณ

ซึ่งผงเจลปุ๋ยบดละเอียด 1.000 กรัม แห้งลงในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.2 M จำนวน 10 มล.

คำนวณหาปริมาณ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10 มล.

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1000 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  27.2167 กรัม

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $(27.2167 \times 10)/1000 = 0.27217$  กรัม

∴ ในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10 มล. ที่ดูดซับเข้าในเจลปุ๋ยอัดเม็ด มีปริมาณ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  เท่ากับ 0.27217 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.27167 กรัม

ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  136.0838 กรัม มี P 31

ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.27217 กรัม มี P  $(31 \times 0.27217)/136.0838 = 0.0620$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

∴ ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.27217 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.0620 กรัม

∴ เจลปุยอัดเม็ด มีน้ำหนักรวม =  $1.0000 + 0.27217 = 1.27217$  กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน 1 กรัมเจล ( $\text{gel} + \text{KH}_2\text{PO}_4$ )

$\text{gel} + \text{KH}_2\text{PO}_4$  1.27217 กรัม มี P 0.0620 กรัม

$\text{gel} + \text{KH}_2\text{PO}_4$  1.0000 กรัม มี P  $(0.0620 \times 1.0000) / 1.27217 = 0.04873$  กรัม หรือ 48.73 มิลลิกรัม

∴ ใน 1 กรัมเจล ( $\text{gel} + \text{KH}_2\text{PO}_4$ ) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 48.73 มิลลิกรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัม [5] โดยโครงการพิเศษนี้เลือกใช้ไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม โดยมีโซเดียมเทรอะบอไรด์เป็นตัวเชื่อมโยง ซึ่งพิจารณาสัดส่วนของคาร์ราจีแนนต่อกัวร์กัม จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เป็นการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม [4] ที่อัตราส่วนของคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมแตกต่างกัน ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนคาร์ราจีแนนต่อกัวร์กัมเป็น 2:8, 4:6, 6:4 และ 8:2 โดยน้ำหนัก เป็นสูตรที่มีอัตราการบวมตัวที่ดีที่สุดจึงได้นำมาใช้ในโครงการพิเศษนี้ ในโครงการพิเศษนี้มีวิธีการบรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 2 แบบ คือ การเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว และการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในภายหลัง จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้ มาศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโดยทำการอัดเม็ดแล้วแช่ลงในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ กัน แล้วทำการตรวจวัดปริมาณสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโดยใช้ Vanado molybdophosphoric acid method และตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร และศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลทั้งแบบที่บรรจุและไม่บรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

#### การกำหนดตัวแปร

C2G8	คือ ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Carragenan (C) : Guar Gum เท่ากับ 2:8
C4G6	คือ ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Carragenan (C) : Guar Gum เท่ากับ 4:6
C6G4	คือ ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Carragenan (C) : Guar Gum เท่ากับ 6:4
C8G2	คือ ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Carragenan (C) : Guar Gum เท่ากับ 8:2
B1.0	คือ สารละลายโซเดียมเทรอะบอไรด์ 1.0% w/w

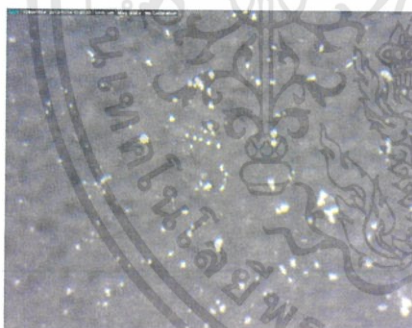
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B0.6	คือ สารละลายโซเดียมเททระบอเรต 0.6% w/w
C2G8B1.0 [1]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C2G8 B1.0 ที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว
C2G8B1.0 [2]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C2G8 B1.0 ที่บรรจุสารแบบสองชั้นตอน
C4G6B1.0 [1]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C4G6 B1.0 ที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว
C4G6B1.0 [2]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C4G6 B1.0 ที่บรรจุสารแบบสองชั้นตอน
C6G4B1.0 [1]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C6G4 B1.0 ที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว
C6G4B1.0 [2]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C6G4 B1.0 ที่บรรจุสารแบบสองชั้นตอน
C8G2B1.0 [1]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C8G2 B1.0 ที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว
C4G6B0.6 [1]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C4G6 B0.6 ที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว
C6G4B0.6 [1]	คือ ไฮโดรเจลสูตร C6G4 B0.6 ที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว

#### 4.1 การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของเจลปียูอัดเม็ด

##### 4.1.1 ขนาดอนุภาคของเจลปียูอัดเม็ด

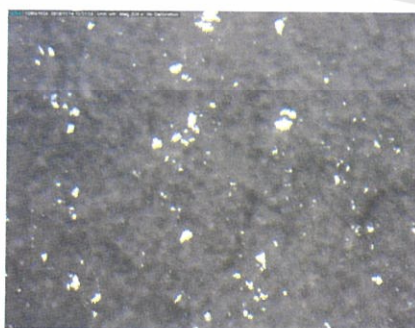
นำไฮโดรเจลอบแห้งมาบดเป็นผงด้วยโกร่งบดสาร แล้วนำไปวัดขนาดอนุภาคด้วยกล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2 กำลังขยาย 230X ถ่ายภาพอนุภาคเจลปียู แสดงดังรูปที่ 4.1 จุดสีขาวคืออนุภาคของเจลปียู



C2G8B1.0 [1]



C2G8B1.0 [2]

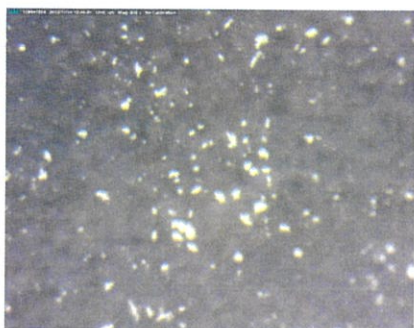


C4G6B1.0 [1]

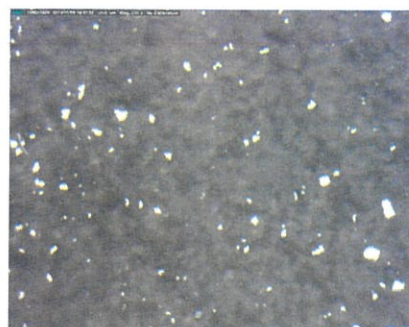


C4G6B1.0 [2]

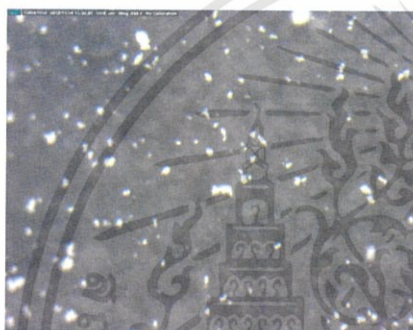
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



C6G4B1.0 [1]



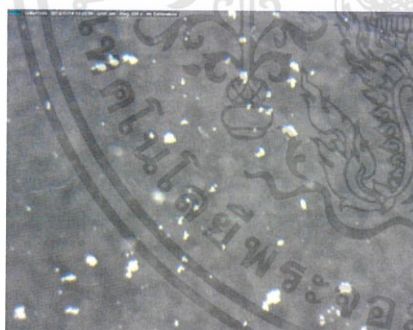
C6G4B1.0 [2]



C4G6B0.6 [1]



C6G4B0.6 [1]



C8G2B1.0 [1]

รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย OM ของอนุภาคเจลนึ่ยบนแผ่นสไลด์ (กำลังขยาย 230X)

จากการตรวจวัดขนาดอนุภาคของเจลนึ่ยทั้ง 9 สูตร คือสูตร C2G8B1.0 [1], C4G6B1.0 [1], C6G4B1.0 [1], C8G2B1.0 [1], C4G6B0.6 [1], C6G4B0.6 [1], C2G8B1.0 [2], C4G6B1.0 [2] และ C6G4B1.0 [2] พบว่าแต่ละสูตรมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 60-70  $\mu\text{m}$  ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเจลปุย

สูตร	ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )
C2G8B1.0 [1]	60.71 $\pm$ 10
C4G6B1.0 [1]	62.98 $\pm$ 11
C6G4B1.0 [1]	62.23 $\pm$ 10
C8G2B1.0 [1]	61.45 $\pm$ 9
C4G6B0.6 [1]	63.28 $\pm$ 10
C6G4B0.6 [1]	62.04 $\pm$ 9
C2G8B1.0 [2]	62.48 $\pm$ 11
C4G6B1.0 [2]	66.06 $\pm$ 15
C6G4B1.0 [2]	65.48 $\pm$ 11

#### 4.1.2 ความหนาแน่นของเจลปุยอัดเม็ด

นำไฮโดรเจลแบบผงมาอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตันเป็นเวลา 3 นาที ได้เจลปุยอัดเม็ดแสดงดังรูปที่ 4.2 จากนั้นนำเจลปุยอัดเม็ดมาหาความหนาแน่น โดยวัดความหนา, เส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนัก ทำการคำนวณหาความหนาแน่น ผลแสดงดังตารางที่ 4.2 โดยเจลปุยอัดเม็ดมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.18 – 1.32  $\text{g}/\text{cm}^3$

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนา น้ำหนัก เส้นผ่านศูนย์กลาง ปริมาตร และความหนาแน่นของเจลปุยอัดเม็ด

สูตร	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร ( $\text{cm}^3$ )	ความหนาแน่น ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
C2G8B1.0 [1]	0.0834	0.1481	1.31	0.1124	1.32
C4G6B1.0 [1]	0.0868	0.1496	1.316	0.118	1.27
C6G4B1.0 [1]	0.0854	0.1512	1.315	0.1162	1.3
C8G2B1.0 [1]	0.0842	0.1527	1.32	0.116	1.32
C4G6B0.6 [1]	0.0951	0.1529	1.319	0.13	1.18
C6G4B0.6 [1]	0.0872	0.1522	1.314	0.1182	1.29
C2G8B1.0 [2]	0.0862	0.1508	1.316	0.1174	1.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ค่าความหนา น้ำหนัก เส้นผ่านศูนย์กลาง ปริมาตร และความหนาแน่นของเจลปฏุยอัดเม็ด

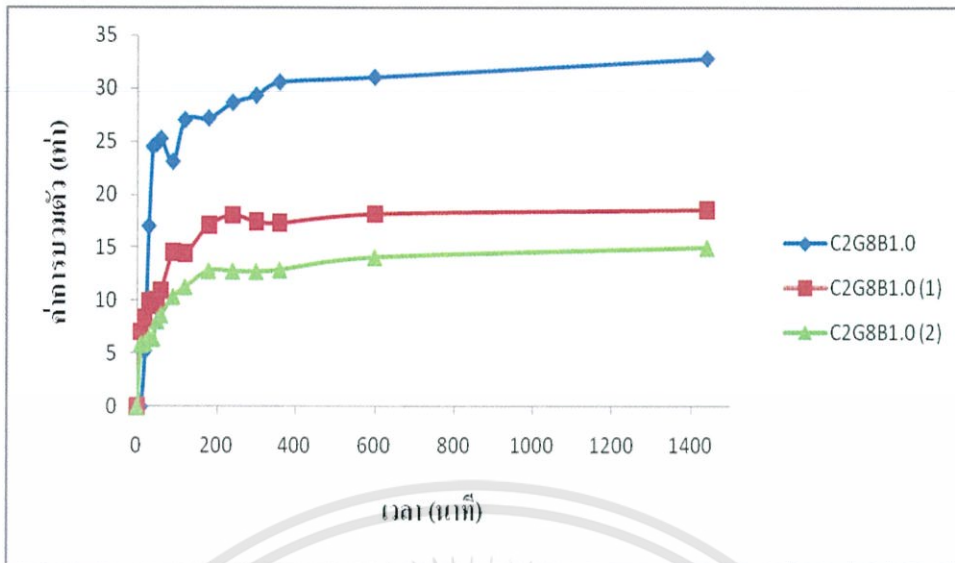
สูตร	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความ หนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
C4G6B1.0 [2]	0.0873	0.1472	1.31	0.1174	1.26
C6G4B1.0 [2]	0.0837	0.1524	1.312	0.1132	1.3



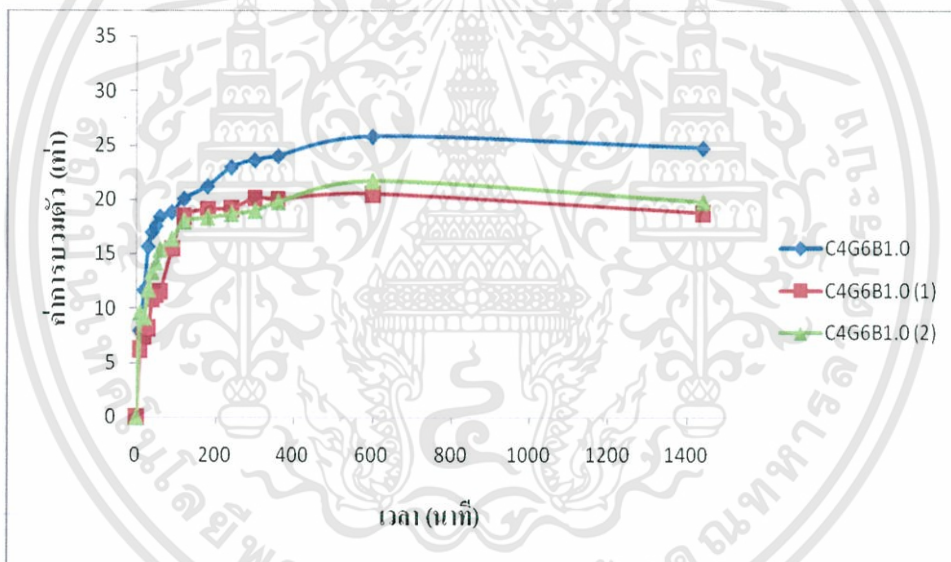
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างเจลปฏุยอัดเม็ด

#### 4.1.3 พฤติกรรมการบวมตัวของเจลปฏุยอัดเม็ด

พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของเจลปฏุยอัดเม็ดจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมในอัตราส่วนต่างๆ โดยมีการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรตปริมาณ 0.6% w/w และ 1.0% w/w แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

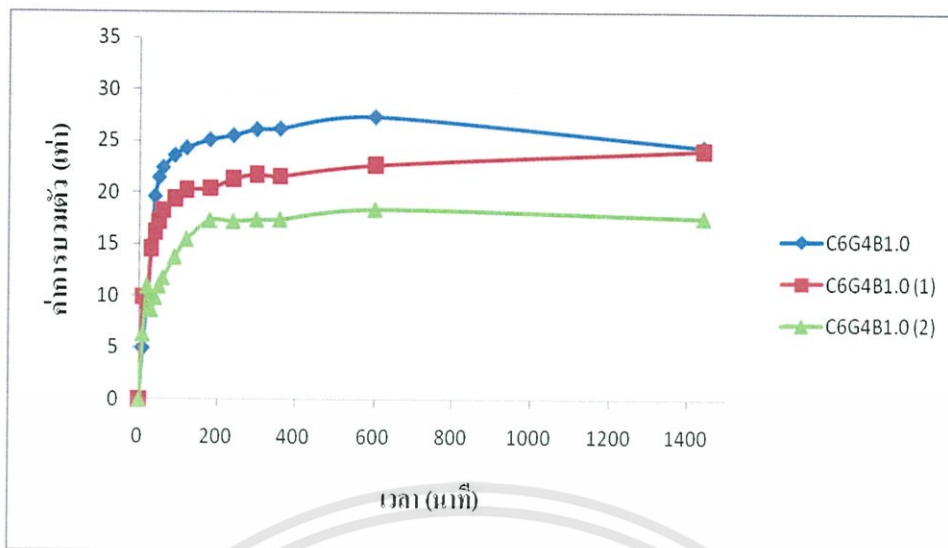


(ก) ไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร C2G8B1.0

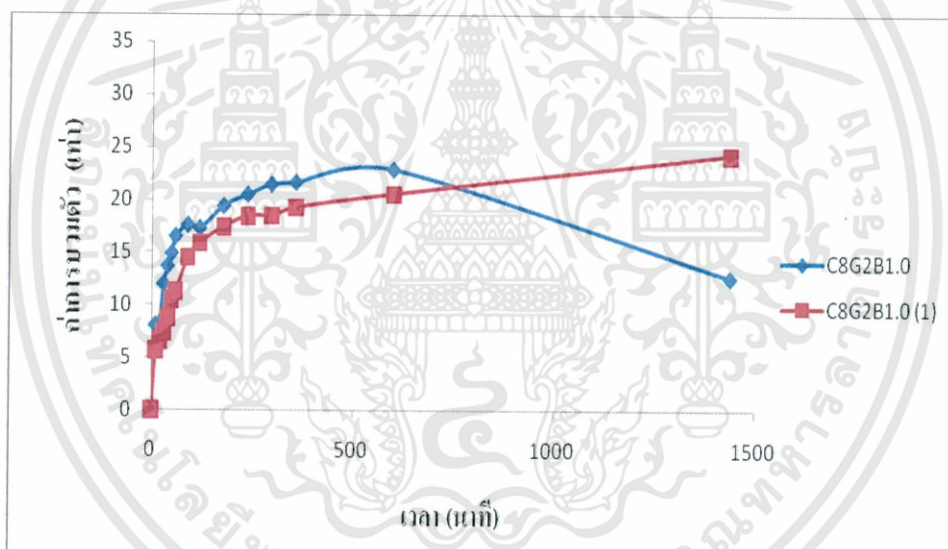


(ข) ไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร C4G6B1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร C6G4B1.0

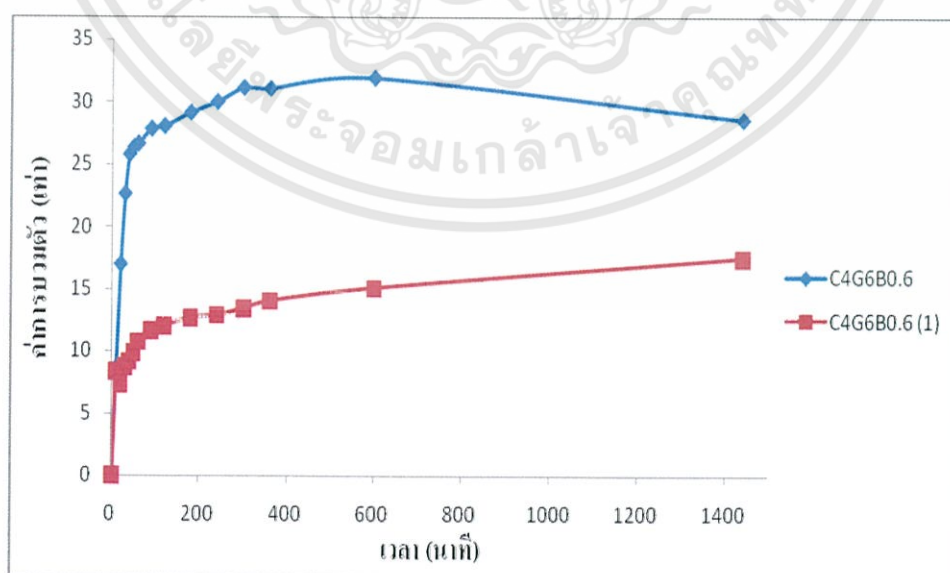


(ง) ไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร C8G2B1.0

รูปที่ 4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตรต่างๆ ในน้ำกลั่น โดยมีปริมาณโซเดียมเททระบอเรต 1.0%w/w

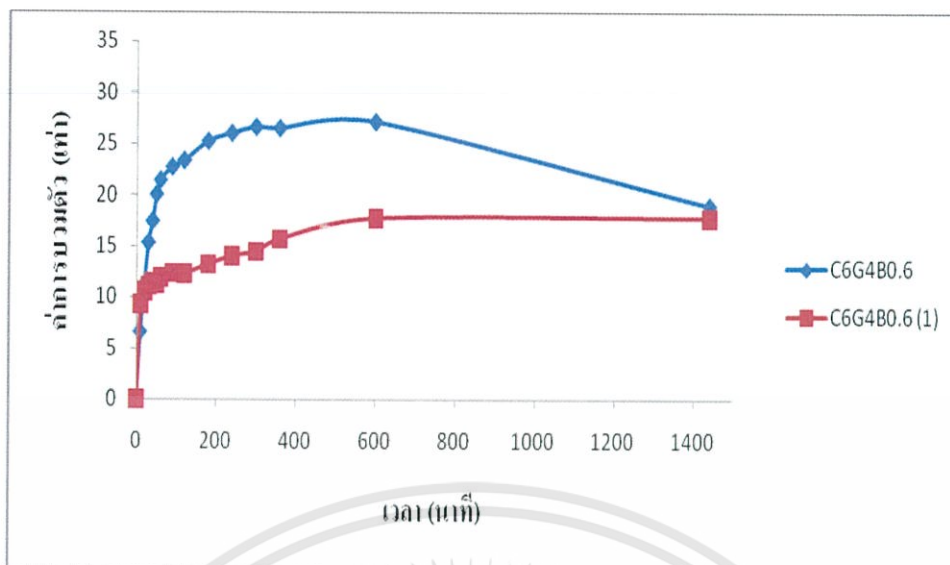
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 พบว่าเจลเม็ดที่ไม่มีการบรรจุปุ๋ยมีอัตราการบวมตัวสูงกว่าเจลปุ๋ยอัดเม็ดซึ่งมีการบรรจุปุ๋ยเข้าไปทั้งแบบชั้นตอนเดียวและสองชั้นตอน โดยมีค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 600 นาทีและเริ่มคงที่ตั้งแต่ประมาณช่วง 200 - 600 นาทีเป็นต้นไปจนถึง 1440 นาที ยกเว้นสูตร C8G2B1.0 (รูปที่ 4.3 (ง)) ที่มีค่าการบวมตัวสูงสุดแล้วลดต่ำลงอย่างชัดเจน เนื่องจากปริมาณคาร์ราจีแนนซึ่งที่มีมากในสูตรนี้ทำให้เสถียรภาพในการบวมตัวไม่ดี เนื่องจากคาร์ราจีแนนสามารถละลายออกมาได้เมื่อมีน้ำเข้าแทรกภายในโมเลกุลในปริมาณที่มากพอ โดยค่าการบวมตัวสูงสุดของไฮโดรเจลเม็ดสูตรต่างๆ ได้แก่ C2G8B1.0, C4G6B1.0, C6G4B1.0 และ C8G2B1.0 มีค่าเท่ากับ 33 เท่า, 26 เท่า, 27 เท่า และ 23 เท่าตามลำดับ เมื่อนำเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตรต่างๆ มาทำการทดสอบการบวมตัวพบว่า อัตราการบวมตัวลดลงจากไฮโดรเจลเม็ดซึ่งไม่มีปุ๋ย เนื่องจากการบรรจุปุ๋ยเข้าไปในเจลปุ๋ยอัดเม็ดจะทำให้โครงสร้างไฮโดรเจลมีประจุที่สูงขึ้น และพฤติกรรมบวมตัวมีเสถียรภาพดีขึ้นทำให้มีค่าการบวมตัวลดลงเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลเม็ด เมื่อมีการเปลี่ยนสูตรเจลปุ๋ยอัดเม็ดจะพบว่า อัตราการบวมตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณคาร์ราจีแนนในปุ๋ยมากขึ้น โดยเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0[1], C2G8B1.0[2], C6G4B1.0[1] และ C8G2B1.0 [1] มีค่าการบวมตัวสูงสุดที่เวลา 1,440 นาที เท่ากับ 19 เท่า, 15 เท่า, 24 เท่า, และ 24 เท่า ตามลำดับ และเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0[1], C4G6B1.0[2] และ C6G4B1.0[2] มีค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ที่เวลา 600 นาที เท่ากับ 21 เท่า, 22 เท่า และ 18 เท่าตามลำดับ และพบว่า สูตร C2G8B1.0 และ C4G6B1.0 ในการบรรจุปุ๋ยทั้งแบบชั้นตอนเดียวและสองชั้นตอนมีอัตราการบวมตัวที่ใกล้เคียงกัน แต่สูตร C6G4B1.0 มีความแตกต่างกัน โดยแบบสองชั้นตอนมีการบวมตัวค่อนข้างต่ำ อาจเนื่องจากการผสมของคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมที่เข้ากันไม่ดีทำให้เกิดการละลายออกของคาร์ราจีแนนเกิดขึ้นได้ง่าย เนื่องจากมีการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลกับกัวร์กัมไม่ดีพอ



(ก) ไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร C4G6B0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 4.2 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลปฏิกายจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม

นำเจลปฏิกายอัดเม็ดแต่ละสูตรมาแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลาต่างๆ กันปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาวัดค่าดูดกลืนแสงโดยใช้เทคนิค Vanado molybdophosphoric acid ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 - 4.11

ตารางที่ 4.3 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปฏิกายอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0 [1]

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเจลปฏิกายอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการดูดกลืนแสง (A)	ปริมาณฟอสฟอรัสในสารตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณฟอสฟอรัส/เจลปฏิกายอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปฏิกายอัดเม็ด (%)
30	0.1531	0.098	4.7250	30.8622	63.4
60	0.1525	0.098	4.7500	31.1475	64.0
120	0.1540	0.104	5.0500	32.7922	67.3
180	0.1526	0.107	5.2000	34.0760	70.0
240	0.1540	0.107	5.2000	33.7662	69.3
300	0.1546	0.109	5.3000	34.2820	70.4
360	0.1526	0.118	5.7500	37.6802	77.4
720	0.1523	0.116	5.6500	37.0978	76.2
1440	0.1528	0.125	6.0968	39.9004	82.0
2880	0.1464	0.124	5.8125	39.6758	81.2

ตารางที่ 4.4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [1]

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง (A)	ปริมาณฟอสฟอรัส ในสารตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส/เจล ปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณฟอสฟอรัส ที่ปลดปล่อยจาก เจลปุ๋ยอัดเม็ด (%)
30	0.1524	0.089	4.4500	29.1995	50.9
60	0.1529	0.096	4.7903	31.3298	64.3
120	0.1527	0.101	4.6875	30.8998	63.4
180	0.1520	0.098	4.8871	32.1520	66.0
240	0.1528	0.096	4.7903	31.3501	64.4
300	0.1521	0.103	5.1290	33.7215	69.2
360	0.1512	0.098	4.8871	32.3221	66.4
720	0.1520	0.115	5.7097	37.5637	77.1
1440	0.1512	0.117	5.8064	38.3771	78.8
2880	0.1520	0.110	5.4677	35.9720	73.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0 [1]

เวลา (นาทิจ)	น้ำหนักเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง (A)	ปริมาณ ฟอสฟอรัสในสาร ตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส/เจล ปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณฟอสฟอรัส ที่ปลดปล่อยจากเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (%)
30	0.1528	0.099	4.9355	32.3001	66.3
60	0.1522	0.102	5.0806	33.3814	68.5
120	0.1532	0.116	5.8065	37.9011	77.8
180	0.1525	0.114	5.6613	37.1232	76.2
240	0.1521	0.111	5.5161	36.2665	74.5
300	0.1523	0.117	5.8064	38.1501	78.3
360	0.1514	0.129	6.4000	42.2721	86.8
720	0.1527	0.123	6.1000	39.9476	82.0
1440	0.1536	0.126	6.2500	40.6901	83.5
2880	0.1520	0.127	6.3000	41.3386	84.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C8G2B1.0 [1]

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง (A)	ปริมาณ ฟอสฟอรัสในสาร ตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส/เจล ปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณ ฟอสฟอรัสที่ ปลดปล่อยจากเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (%)
30	0.1529	0.080	3.8710	25.3170	52.0
60	0.1528	0.090	4.3549	28.5003	58.5
120	0.1531	0.099	4.8000	31.3521	64.4
180	0.1523	0.109	5.3000	34.7997	71.5
240	0.1538	0.109	5.3000	34.4603	70.8
300	0.1509	0.105	5.3500	35.4539	72.8
360	0.1508	0.107	5.4500	36.1406	74.2
720	0.1516	0.117	5.4500	36.3333	74.6
1440	0.1522	0.130	5.9500	39.2480	80.6
2880	0.1500	0.119	6.0517	40.3448	82.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C4G6B0.6 [1]

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง (A)	ปริมาณ ฟอสฟอรัสในสาร ตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส/เจล ปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณฟอสฟอรัสที่ ปลดปล่อยจากเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (%)
30	0.1521	0.063	2.9545	19.4250	39.9
60	0.1522	0.064	3.0000	19.7109	40.5
120	0.1536	0.065	3.0469	19.8364	40.7
180	0.1525	0.067	3.3387	21.8931	45.0
240	0.1528	0.073	3.6290	23.7657	48.8
300	0.1507	0.084	4.1613	27.6314	56.7
360	0.1521	0.097	4.8000	31.5581	64.8
720	0.1517	0.133	6.6000	43.5356	89.4
1440	0.1520	0.147	7.3000	47.7124	98.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C6G4B0.6 [1]

เวลา (นาท)	น้ำหนักเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง (A)	ปริมาณ ฟอสฟอรัสในสาร ตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส/เจล ปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณฟอสฟอรัส ที่ปลดปล่อยจาก เจลปุ๋ยอัดเม็ด (%)
30	0.1539	0.044	2.1774	14.1482	29.1
60	0.1537	0.061	3.0000	19.5185	40.1
120	0.1527	0.060	2.9758	19.4879	40.0
180	0.1534	0.068	3.3500	21.8383	44.8
240	0.1536	0.109	5.400	35.1562	72.2
300	0.1535	0.118	5.8500	38.1107	78.3
360	0.1532	0.120	5.9500	38.8381	80.0
720	0.1546	0.128	6.3500	41.0737	84.3
1440	0.1516	0.138	6.8500	45.1847	92.8
2880	0.1546	0.154	7.6500	49.4825	100.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0 [2]

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง (A)	ปริมาณ ฟอสฟอรัสในสาร ตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส/เจล ปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณ ฟอสฟอรัสที่ ปลดปล่อยจากเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (%)
30	0.1530	0.045	2.3275	15.2129	31.2
60	0.1571	0.037	1.9137	12.1820	25.0
120	0.1562	0.069	3.5689	22.8486	47.0
180	0.1585	0.080	4.1379	26.1068	53.6
240	0.1560	0.090	4.6500	29.8076	61.2
300	0.1537	0.103	5.3000	34.4827	70.8
360	0.1535	0.115	5.9000	38.4364	79.0
720	0.1557	0.138	7.0862	45.5119	93.5
1440	0.1535	0.135	6.9310	45.1533	92.7
2880	0.1582	0.143	7.3448	46.42748	95.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [2]

เวลา (นาทิจ)	น้ำหนักเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง (A)	ปริมาณฟอสฟอรัส ในสารตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส/เจล ปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณฟอสฟอรัส ที่ปลดปล่อยจาก เจลปุ๋ยอัดเม็ด (%)
30	0.1569	0.115	5.7500	36.6475	75.3
60	0.1579	0.108	5.4000	34.1988	70.2
120	0.1550	0.115	5.7500	37.0967	76.2
180	0.1502	0.113	5.6500	37.6165	77.2
240	0.1563	0.110	5.5000	35.1887	72.3
300	0.1566	0.116	5.8000	37.0370	76.1
360	0.1565	0.114	5.7000	36.4217	74.8
720	0.1578	0.132	6.6000	41.8251	85.9
1440	0.1540	0.133	6.6500	43.1818	88.7
2880	0.1557	0.134	6.7250	43.1920	88.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0 [2]

เวลา (นาทีก)	น้ำหนักเจล ปุ๋ยอัดเม็ด (กรัม)	ค่าการ ดูดกลืน แสง (%)	ปริมาณฟอสฟอรัส ในสารตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส/เจล ปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)	ปริมาณฟอสฟอรัส ที่ปลดปล่อยจาก เจลปุ๋ยอัดเม็ด (%)
30	0.1506	0.096	4.5900	32.8685	67.5
60	0.1584	0.110	5.6500	35.6691	73.2
120	0.1523	0.095	4.9000	32.1733	66.1
180	0.1522	0.113	5.8000	38.1077	78.3
240	0.1529	0.102	5.2500	34.3361	70.5
300	0.1572	0.090	4.6500	29.5613	60.7
360	0.1553	0.110	5.6500	36.3812	74.7
720	0.1544	0.127	6.5172	42.2101	86.7
1440	0.1584	0.128	6.5689	41.4707	85.2
2880	0.1571	0.121	6.2068	39.5092	81.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การคำนวณปริมาณมิลลิกรัมของฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในเจลปุยอัดเม็ด

ทำการแช่เจลปุยบดละเอียดในน้ำหนักประมาณ 1.0000 กรัม แช่ลงในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.2 M จำนวน 10 มล.

คำนวณหาปริมาณ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10 มล.

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1000 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  27.2167 กรัม

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $(27.2167 \times 10)/1000 = 0.27217$  กรัม

∴ ในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  10 มล. ที่ดูดซับเข้าในเจลปุยอัดเม็ด มีปริมาณ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  เท่ากับ 0.27217 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.27167 กรัม

ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  136.0838 กรัม มี P 31

ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.27217 กรัม มี P  $(31 \times 0.27217)/136.0838 = 0.0620$

∴ ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.27217 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.0620 กรัม

∴ เจลปุยอัดเม็ด มีน้ำหนักรวม =  $1.0000 + 0.27217 = 1.27217$  กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน 1 กรัมเจล (gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )

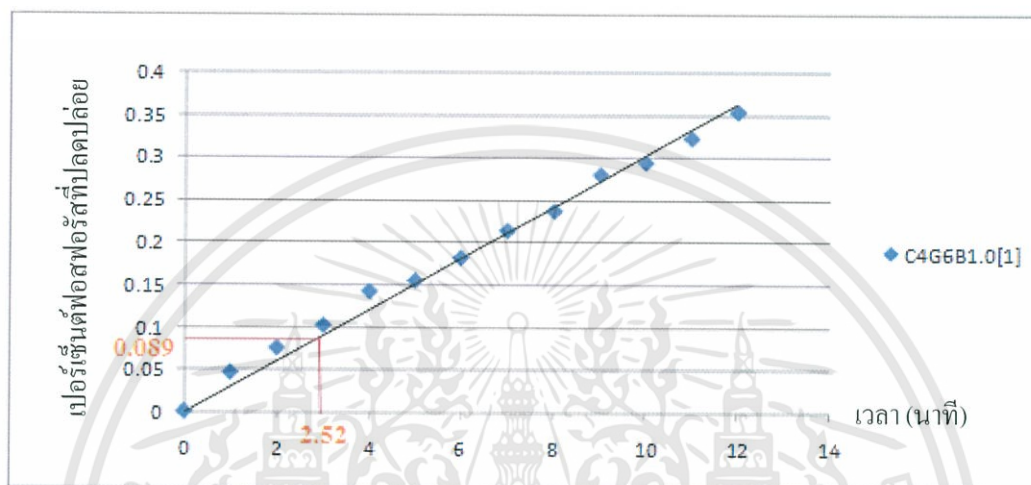
gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.27217 กรัม มี P 0.0620 กรัม

gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.0000 กรัม มี P  $(0.0620 \times 1.0000)/1.27217 = 0.04873$  กรัม หรือ 48.73 มิลลิกรัม

∴ ใน 1 กรัมเจล (gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 48.73 มิลลิกรัม

ตัวอย่างแสดงการคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาจากเจลปฏิกิริยาอัดเม็ดในสารตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)

ตัวอย่างเช่น นำน้ำตัวอย่างของเจลปฏิกิริยาอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [1] ที่เวลา 30 นาที ซึ่งเจลปฏิกิริยาอัดเม็ดมีน้ำหนักเฉลี่ย 0.1524 กรัม มาวัดค่าดูดกลืนแสงโดยใช้เทคนิค Vanado molybdophosphoric acid นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาปริมาณฟอสฟอรัสจากกราฟมาตรฐาน



รูปที่ 4.5 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและปริมาณฟอสเฟตมาตรฐานของเจลปฏิกิริยาอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [1]

จากกราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 1 มิลลิกรัม มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต = 50 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต ( $\mu\text{g PO}_4^{-3} -\text{P}$ ) โดยเจลปฏิกิริยาอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [1] มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.089 เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานจะมีปริมาณฟอสเฟตเท่ากับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 2.52 มิลลิกรัม หรือคิดเป็นปริมาณของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตเท่ากับ

$$2.52 \text{ มล.} \times 50 = 125.9 \mu\text{g PO}_4^{-3} -\text{P} \text{ หรือ } 0.1259 \text{ มก. PO}_4^{-3} -\text{P}$$

จากการทดลองได้นำเจลปฏิกิริยาอัดเม็ดหนัก 0.1524 กรัม แช่ในน้ำกลั่น จำนวน 30 มล. แต่เก็บน้ำตัวอย่างมาตรวจวัด 1 มล. ดังนั้นจะมีปริมาณฟอสเฟตที่ปลดปล่อยจากเจลปฏิกิริยาอัดเม็ดที่เวลา 30 นาทีเท่ากับ  $0.1259 \times 30 = 3.78 \text{ มก. PO}_4^{-3} -\text{P}$  ต่อเจลปฏิกิริยาอัดเม็ด 0.1524 กรัม

### คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัส/เจลปุยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)

gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.1524 กรัม มีปริมาณฟอสเฟต 3.78 มก.  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.0000 กรัม มีปริมาณฟอสเฟต  $3.78 \times 1/0.1524 = 24.7886$  มก.  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

∴ ใน 1.0000 กรัมเจลปุยอัดเม็ด (gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) มีปริมาณฟอสเฟต 24.7886 มก.  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

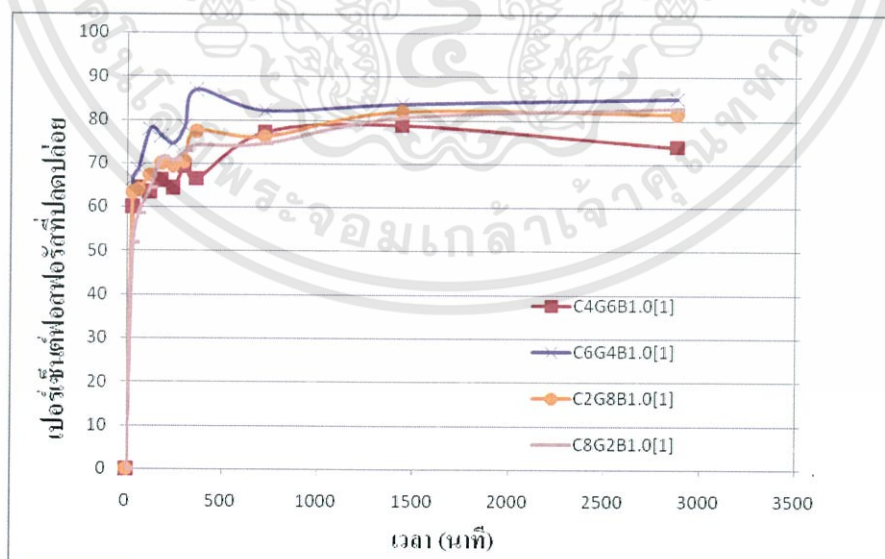
หมายเหตุ สำหรับค่าอื่นๆ ทำการคำนวณในลักษณะเดียวกัน และค่าทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.3 -4.11

### คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุยอัดเม็ด

จากข้อมูลเบื้องต้น ใน 1 กรัมเจล (gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 48.7 mg ณ เวลา 30 นาที คิดเป็นปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัส เท่ากับ  $24.7886 \times 100/48.7 = 50.9\%$

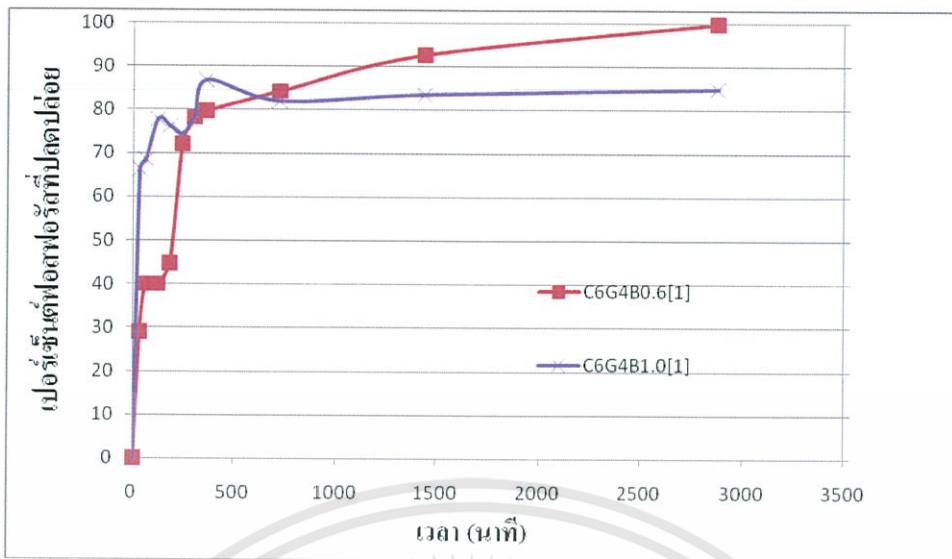
หมายเหตุ สำหรับค่าอื่นๆ ทำการคำนวณในลักษณะเดียวกัน และค่าทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.3 -4.11

นำค่าจากตารางที่ 4.3 – 4.11 มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อ 1 กรัมเจลปุย และเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยของเจลปุยอัดเม็ดสูตรต่างๆ ทั้งแบบการเตรียมชั้นตอนเดียวและการเตรียมสองชั้นตอน แสดงดังรูปที่ 4.6 – 4.8

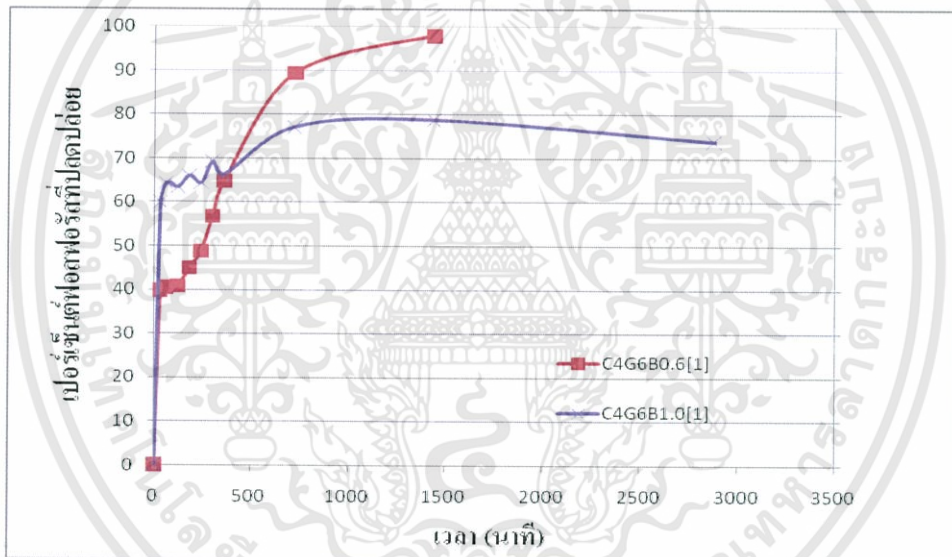


รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ โดยเปรียบเทียบสัดส่วนของ คาร์ราจีแนนและกัวร์กัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



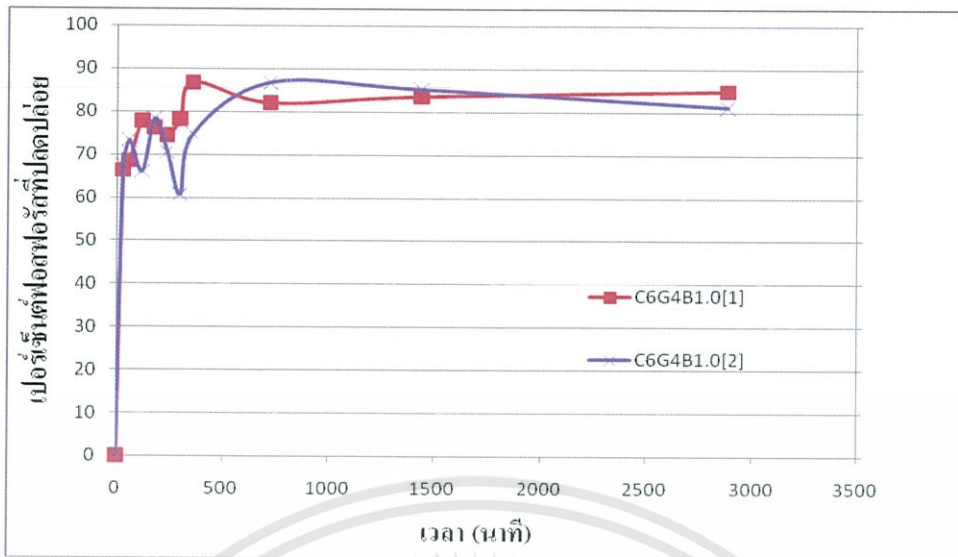
ก. ไฮโดรเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C6G4B0.6 [1] และ C6G4B1.0 [1]



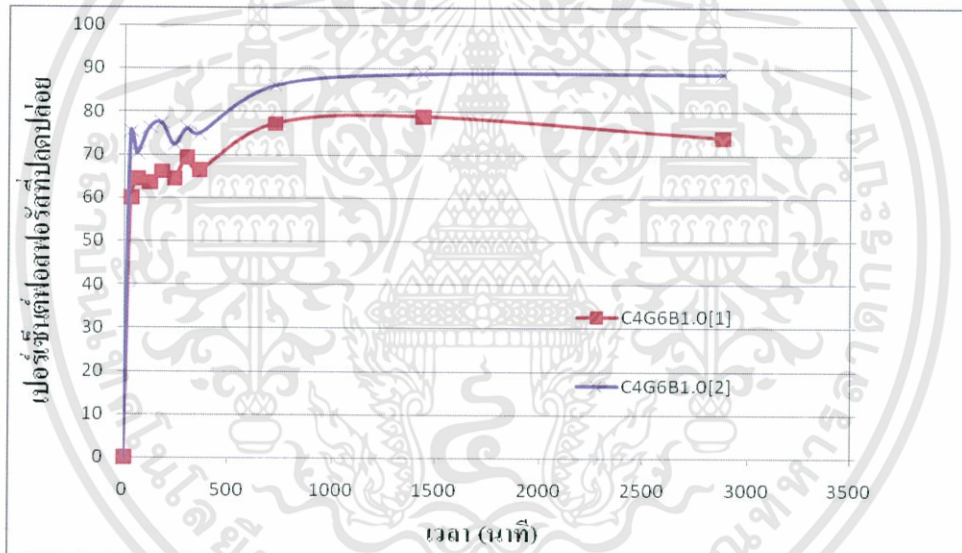
ข. ไฮโดรเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C4G6B0.6 [1] และ C4G6B1.0 [1]

รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ โดยเปรียบเทียบความเข้มข้นของโซเดียมเททระบอเรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

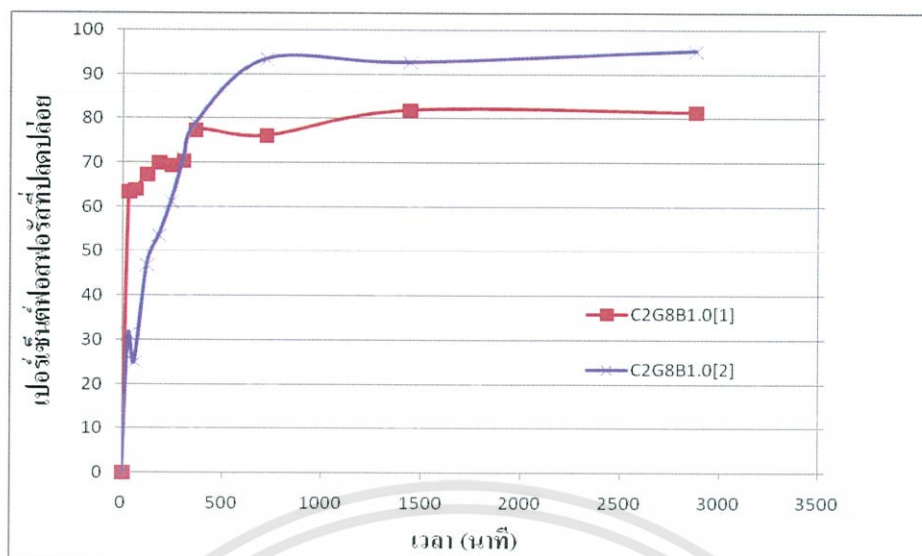


ก. ไฮโดรเจลปูยัดเม็ดสูตร C6G4B1.0 [1] และ C6G4B1.0 [2]



ข. ไฮโดรเจลปูยัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [1] และ C4G6B1.0 [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ค. ไฮโดรเจลญี่ปุ่นัดเม็ดสูตร C2G8B1.0 [1] และ C2G8B1.0 [2]

รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ โดยเปรียบเทียบขั้นตอนการบรรจุสารปลดปล่อยในไฮโดรเจล

จากกราฟรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมที่แตกต่างกันในแต่ละสูตร พบว่าเจลญี่ปุ่นัดเม็ดที่มีสัดส่วนต่างกันทั้งสี่สูตร มีความสามารถในการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตด้วยแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นได้ว่าเจลญี่ปุ่นัดเม็ดมีการปลดปล่อยสารอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากช่วงแรกเจลญี่ปุ่นัดเม็ดอยู่ในสภาพที่แห้ง เมื่อแช่ในน้ำทำให้น้ำแทรกเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้สารที่อยู่ภายในถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว แล้วค่อยๆคงที่ โดยที่เวลา 48 ชั่วโมง (2,880 นาทื) เจลญี่ปุ่นัดเม็ดทั้งสี่สูตร มีค่าการปลดปล่อยสารสูงสุดอยู่ในช่วง 79 -87%

จากกราฟรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบผลของการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรตในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าเจลญี่ปุ่นัดเม็ดที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/w มีความสามารถในการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตได้ดีกว่าเจลญี่ปุ่นัดเม็ดที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตที่ความเข้มข้น 1.0% w/w โดยมีค่าการปลดปล่อยได้สูงสุดถึง 100% ภายในเวลา 48 ชั่วโมง ในขณะที่เจลญี่ปุ่นัดเม็ดที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตที่ความเข้มข้น 1.0% w/w มีค่าการปลดปล่อยสูงสุดที่ 48 ชั่วโมง ประมาณ 80% ทั้งนี้เนื่องมาจากการเชื่อมโยงที่มากขึ้นจะทำให้ไฮโดรเจลมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงที่มากกว่า สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจึงถูกกักอยู่ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลภายหลังการเชื่อมโยงได้มากกว่า ทำให้ค่าการปลดปล่อยที่ควรจะได้มีค่าน้อย

จากกราฟรูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบผลของขั้นตอนบรรจุสารปลดปล่อยในไฮโดรเจล พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เจลปฏิกิริยาที่บรรจุสารแบบสองชั้นตอนมีความสามารถในการปลดปล่อยสารละลาย โพลีเอทิลีนไดออกไซด์โครเจนฟอสเฟตได้ดีกว่าเจลปฏิกิริยาที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว ภายในเวลา 48 ชั่วโมง สามารถปลดปล่อยสารได้ถึง 90 - 95% ในขณะที่เจลปฏิกิริยาที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียวสามารถปลดปล่อยสารได้ประมาณ 80% ทั้งนี้เนื่องมาจากการสารละลายโพลีเอทิลีนไดออกไซด์โครเจนฟอสเฟตบางส่วนอาจถูกกักไว้ภายใน โครงสร้างของเจลส่วนที่มีการเชื่อมโยงหนาแน่น เนื่องจากการเชื่อมโยงเกิดขึ้นหลังจากบรรจุสารแล้ว มีผลทำให้สารถูกปลดปล่อยจากตัวเจลได้ไม่หมดในช่วงเวลาดังกล่าว ส่วนเจลปฏิกิริยาที่เตรียมแบบสองชั้นตอน มีแนวโน้มเข้าสู่ค่าการปลดปล่อยสูงสุดที่ 100% ด้วยระยะเวลาที่เร็วกว่าเจลปฏิกิริยาที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว เนื่องจากตัวเจลเกิดการเชื่อมโยงก่อนที่จะบรรจุสาร ซึ่งปฏิกิริยาจะไม่สามารถเข้าไปอยู่หรือเข้าไปได้เพียงเล็กน้อย ในบริเวณที่มีการเชื่อมโยงอย่างหนาแน่น สารจึงไม่ถูกกักเก็บไว้เหมือนการเตรียมเจลปฏิกิริยาแบบชั้นตอนเดียว ส่งผลให้สารถูกปลดปล่อยออกมาได้หมดในระยะเวลาที่เร็วกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากการรั่วไหลและกักเก็บ โดยนำเจลปุ๋ยอัดเม็ดมาศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวและการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ทำการตรวจวัดโดยใช้เทคนิค Vanado molybdophosphoric acid แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร สามารถนำผลจากการศึกษามาสรุปได้ดังนี้ จากพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลทั้ง 9 สูตร พบว่าค่าอัตราการบวมตัวสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 600 นาทีโดยเริ่มคงที่ตั้งแต่ประมาณช่วง 200 – 600 นาทีเป็นต้นไปจนถึง 1440 นาที การบวมตัวของไฮโดรเจลเม็ดและไฮโดรเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตรต่างๆ พบว่าเมื่อมีการบรรจุสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ลงในไฮโดรเจล ไม่ว่าจะเป็วิธีแบบขั้นตอนเดียวหรือแบบสองขั้นตอนก็ตาม มีผลทำให้พฤติกรรมการบวมตัวลดลง แต่มีเสถียรภาพของการบวมตัวสูงกว่าไฮโดรเจลเม็ดในสูตรเดียวกัน ผลการทดลองการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ดแต่ละสูตร แสดงดังนี้

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0[1] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 19 เท่า ที่เวลา 1440 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0[1] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 21 เท่า ที่เวลา 600 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0[1] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 24 เท่า ที่เวลา 1440 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C8G2B1.0[1] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 24 เท่า ที่เวลา 1440 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C4G6B0.6[1] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 17 เท่า ที่เวลา 1440 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C6G4B0.6[1] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 18 เท่า ที่เวลา 1440 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0[2] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 15 เท่า ที่เวลา 1440 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0[2] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 22 เท่า ที่เวลา 600 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0[2] มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 18 เท่า ที่เวลา 600 นาที

โดยผลการทดสอบการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ดทั้ง 9 สูตร มีค่าการบวมตัวอยู่ในช่วงประมาณ 15 – 24 เท่า

จากผลการทดลองพฤติกรรมการปลดปล่อยสารของเจล มีค่าความสามารถในการปลดปล่อยดังนี้

เจลขี้เหล็กสูตร C2G8B1.0[1] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 82.0 % ที่เวลา 1440 นาที  
 เจลขี้เหล็กสูตร C4G6B1.0[1] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 78.8 % ที่เวลา 1440 นาที  
 เจลขี้เหล็กสูตร C6G4B1.0[1] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 86.8 % ที่เวลา 360 นาที  
 เจลขี้เหล็กสูตร C8G2B1.0[1] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 82.8 % ที่เวลา 2880 นาที  
 เจลขี้เหล็กสูตร C4G6B0.6[1] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 98.0 % ที่เวลา 1440 นาที  
 เจลขี้เหล็กสูตร C6G4B0.6[1] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 100 % ที่เวลา 2880 นาที  
 เจลขี้เหล็กสูตร C2G8B1.0[2] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 95.3 % ที่เวลา 2880 นาที  
 เจลขี้เหล็กสูตร C4G6B1.0[2] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 88.7 % ที่เวลา 1440 นาที  
 เจลขี้เหล็กสูตร C6G4B1.0[2] สามารถปลดปล่อยได้เท่ากับ 86.7 % ที่เวลา 720 นาที

โดยพฤติกรรมการปลดปล่อยของเจลขี้เหล็กแต่ละสูตร พบว่าในช่วงเริ่มต้นจนถึงเวลา 300 นาที มีความสามารถในการปลดปล่อยสารด้วยอัตราที่รวดเร็ว เนื่องจากช่วงแรกเจลขี้เหล็กอยู่ในสภาพที่แห้ง เมื่อแช่น้ำทำให้น้ำแทรกเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างอย่างรวดเร็ว โครงสร้างจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้สารที่อยู่ภายในถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว โดยพบว่าเจลขี้เหล็กที่บรรจุสารแบบสองชั้นตอนมีความสามารถในการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตได้ดีกว่าเจลขี้เหล็กที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว โดยสามารถปลดปล่อยสารได้ถึง 90 - 95% ในขณะที่เจลขี้เหล็กที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียวสามารถปลดปล่อยสารได้ประมาณ 80% ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเจลขี้เหล็กที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/w มีความสามารถในการปลดปล่อยสารได้ดีกว่าเจลขี้เหล็กที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตที่ความเข้มข้น 1.0% w/w โดยสามารถปลดปล่อยได้สูงสุดถึง 100% ภายในเวลา 48 ชั่วโมง ในขณะที่เจลขี้เหล็กที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตที่ความเข้มข้น 1.0% w/w มีค่าการปลดปล่อยสูงสุดที่ 48 ชั่วโมงประมาณ 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยสาร  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ของเจลปุ๋ยอัดเม็ด เช่น สภาวะกรด-เบส สภาวะสารละลายต่างๆ และอุณหภูมิ เป็นต้น
2. ปรับเปลี่ยนชนิดและปริมาณของสารตั้งต้น สารเชื่อมโยงและกระบวนการเตรียม เพื่อเป็นการพัฒนาสูตรเจลให้มีการปลดปล่อยในช่วงต้นที่ช้าลง
3. ปรับเปลี่ยนชนิดของสารที่นำมาใช้ในการปลดปล่อย เช่น ปุ๋ยชนิดอื่นๆ
4. ทดสอบกับสภาพใช้งานที่เป็นจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2555). “เมลามีน.” [Online].  
Available :<http://th.wikipedia.org/wiki/เมลามีน>.
2. ไทยเกษตรศาสตร์. (2555). “สารเร่งดอกมะม่วง.” [Online].  
Available: <http://www.thaikasetsart.com>
3. ชามาศ มินสาคร. (2555). “การเตรียมและตรวจวิเคราะห์ไฮโดรเจลจากโพลีเอทิลีนคาร์บอกซี-เมทิลเซลลูโลส/กั้วร์กัม/โพลีเอทิลีนอัลจินเตกัม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
4. เพชรรัตน์ พลับเจริญสุข, มณีรัตน์ วงศิริไพศาล และสุวดี พันธุ์ควนิชย์. (2554). “การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนน/กั้วร์กัม.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
5. จิตรานุช จิรปฐมกุล, จุติมา ชัยสิทธิ์ และภัทรานิษฐ์ ชวลิตเอื้ออังกูร. (2554). “การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินเตกัมและกั้วร์กัม.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
6. Ratner, B.D. (1981). “Biocompatibility of Clinical Implant Materials.” Biomedical Application of Hydrogel, 2, 145-152.
7. Guenet, J-M. (1992). Introduction. In “Thermoreversible Gelation of Polymers and Biopolymers.” 1-4, London: Academic Press.
8. Liu, Y., Huglin, M.B. and Mao, R. (1996). “Characteristics of copolymerisations involving dimethacrylamide and swelling behaviour of the copolymers in water.” Polymer, 37, 5069-5075.
9. Seflon, M.V. and Yamamoto, Y. (1996). “Hofmann degradation of acrylamine copolymer : Synthesis of amine function thermoplastic hydrogel.” Journal Applied Polymer Science, 61, 351-358.
10. คุษฎี อุตภาพ. (2555). “Carbohydrate Technology.” [Online].  
Available:<http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap4/chapter4.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Thomus, W.R. (1992). **“Carrageenan.”** in Thickening and Gelling Agents for Food, Edited by Imeson, A., London, Blackie Academic & Professional, 25-39.
12. Rees, R.A., (1969). **“Structure Conformation and Mechanism.”** in the Formation of Polysaccharide Gels and Networks, edited by Wolfrom, M.L., Tipson, R.S. and Horton, D., New York, Academic Press, 104-148.
13. Lahaya, M. and Rochas, C., (1991). **“Chemical structure and physico-chemical properties of agar.”** Hydrobiologia, 126, 137-148.
14. Medin, A., (1995), **“Studies of structure and properties of agarose.”** Ph.D. Thesis., Acta Universitatis Upsaliensis, 126.
15. Phillips, G.O. and Williams, P.A., (2000). **“Handbook of hydrocolloids.”** New York, CRC Press, 87-213.
16. Martin Chaplin. (2012). **“Water Structure and Science.”** [Online]. Available: <http://www.lsbu.ac.uk/water/hyloc.html>.
17. Stephen, A.M. and Churm, S.C., (1995). **“Gum and Mucilages.”** in Food polysaccharides and their applications, Edited by Stephen, A.M., New York, Marcel Dekker Inc., 377-425.
18. Martin Chaplin. (2012). **“Water Structure and Science.”** [Online]. Available: <http://www.lsbu.ac.uk/water/hyxan.html>.
19. สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดินกรมพัฒนาที่ดินกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2555). **“ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ย.”** [Online]. Available: [http://oss101.ldd.go.th/web\\_soils\\_for\\_youth/s\\_fertilizer.htm](http://oss101.ldd.go.th/web_soils_for_youth/s_fertilizer.htm).
20. ทักษิณีย์ อัดตะนันท์. (2555). **“ปุ๋ยและสารประกอบที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช.”** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [Online]. Available: <http://www.ssnm.info/know/ferti>.
21. ณรงค์ สาริสุต. (2555). **“การผลิตยาออกฤทธิ์ขึ้นและการนำส่งยาแบบต่างๆ.”** คณะเภสัชกรรม. มหาวิทยาลัยมหิดล. [Online]. Available: <http://www.jspphama.com/Phama-knowledge/3-Oral-Contralled-Release.html>.
22. Prabakaran, M. (2011). **“International Journal of Biological Macromolecules.”** Department of Chemistry, Faculty of Engineering and Technology, SRM University, Kattankulathur 603 203, India., 117-124.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23. Jamnongkan, T. and Kaewpiron, S. (2010). “**Controlled-Release Fertilizer Based on ChitosanHydrogel : Phosphorus Release Kinetics.**” Science Journal UB University, 1, No.1. 43-50.
24. ชาญวิทย์ ลิ้มไพบูลย์, ปิยะธิดา หะสิตะพงษ์ และภูษิต จันทาวุฒิ. (2554). “การศึกษาสมบัติการด้านเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัมปรับปรุงด้วยซิลเวอร์.”โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.





ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก1 ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ ) ของเจลสูตรต่างๆ ที่เชื่อมโยง 1 ชั้นตอน

ครั้งที่	ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )					
	C2G8B1.0	C4G6B1.0	C6G4B1.0	C8G2B1.0	C4G6B0.6	C6G4B0.6
1	55.41	70.69	72.19	58.04	60.61	51.70
2	64.64	63.97	64.23	63.97	64.23	51.32
3	54.73	52.63	60.52	67.58	63.81	59.58
4	51.21	53.16	49.64	50.55	62.00	64.23
5	44.22	74.27	59.58	60.61	54.27	50.88
6	74.65	63.17	50.55	62.81	54.21	47.07
7	75.18	83.52	43.84	62.00	50.88	75.85
8	85.12	75.85	54.73	53.16	61.81	63.79
9	51.32	66.99	54.32	68.08	68.58	53.16
10	57.26	58.72	71.95	66.06	70.69	63.97
11	50.88	60.61	59.58	58.72	64.93	54.73
12	43.84	64.67	59.48	60.89	76.67	64.93
13	57.26	62.00	73.82	70.61	54.21	57.26
14	47.79	88.00	63.88	52.20	58.72	50.04
15	58.72	64.67	53.90	61.35	48.14	60.89
16	44.32	48.14	89.71	64.67	66.21	63.88
17	54.73	74.04	59.58	57.16	53.16	61.72
18	54.73	66.23	57.26	53.16	64.23	72.19
19	67.24	62.00	49.64	87.68	75.56	64.93
20	44.86	55.45	77.62	66.23	66.74	55.45
21	53.90	60.14	64.59	50.88	75.85	80.97
22	54.21	74.65	57.26	50.55	50.55	54.32
23	52.20	50.43	64.23	62.81	55.45	71.88
24	54.21	45.73	52.52	47.19	52.20	63.97
25	54.73	64.67	61.35	57.26	62.54	64.67
26	74.04	84.66	66.74	53.90	64.67	62.00
27	63.44	84.32	64.67	60.89	54.75	58.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก1 (ต่อ)

ครั้งที่	ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )					
	C2G8B1.0	C4G6B1.0	C6G4B1.0	C8G2B1.0	C4G6B0.6	C6G4B0.6
28	70.69	60.61	83.04	49.66	85.12	60.89
29	60.89	60.52	77.62	81.87	65.29	58.72
30	70.93	54.24	61.81	78.71	70.69	72.19
31	57.85	63.88	57.45	47.55	51.43	53.16
32	64.93	68.58	44.22	63.79	45.73	60.14
33	43.84	58.72	86.77	53.16	70.69	53.16
34	73.43	67.24	47.19	50.55	58.72	53.16
35	84.12	63.88	57.06	54.73	66.74	72.42
36	68.58	51.41	57.26	71.88	53.80	89.71
37	61.35	54.21	65.28	48.95	58.04	60.61
38	69.96	62.81	69.23	57.55	84.05	76.67
39	69.31	70.93	46.83	72.19	84.86	51.21
40	64.23	47.55	53.90	70.69	62.54	49.64
41	66.99	51.32	59.86	70.69	52.63	69.31
42	65.28	58.04	65.28	50.88	78.78	57.16
43	67.24	76.23	70.61	69.31	60.89	62.00
44	60.61	64.93	66.23	69.23	67.58	60.61
45	57.85	66.06	53.90	48.95	65.28	68.00
46	62.00	58.72	72.74	50.88	67.33	58.72
47	69.23	62.00	68.00	64.23	68.00	47.07
48	68.00	50.45	47.55	69.31	57.26	57.45
49	53.16	48.14	50.43	66.74	46.71	54.21
50	67.66	43.71	57.26	59.48	71.48	65.29
เฉลี่ย	60.71	62.98	62.21	61.45	63.28	62.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก2 ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ ) ของเจลสูตรต่างๆ ที่เชื่อมโยง 2 ชั้นตอน

ครั้งที่	ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )			ครั้งที่	ขนาดอนุภาค ( $\mu\text{m}$ )		
	C2G8B1.0	C4G6B1.0	C6G4B1.0		C2G8B1.0	C4G6B1.0	C6G4B1.0
1	87.68	61.81	76.74	28	84.05	59.86	68
2	66.23	82.08	67.58	29	52.52	86.18	82.43
3	67.24	51.43	41.57	30	55.45	77.33	73.74
4	57.26	40.49	60.61	31	43.06	67.24	80.97
5	65.28	50.55	54.32	32	57.26	75.18	60.61
6	61.35	54.73	61.72	33	70.69	72.19	66.99
7	57.26	43.71	68.99	34	49.64	76.67	45.73
8	49.98	75.18	66.99	35	58.81	81.81	41.33
9	51.16	59.36	60.61	36	46.71	54.32	60.89
10	50.55	45.11	60.61	37	78.2	54.04	75.56
11	49.98	87.41	52.2	38	53.16	59.86	54.73
12	70.69	47.07	40.49	39	69.31	76.67	67.24
13	48.14	54.73	64.24	40	62	86.44	72.42
14	68.08	91.82	68.99	41	55.14	55.96	71.88
15	71.48	50.55	71.33	42	65.85	69.31	68
16	86.77	50.43	76.67	43	69.31	66.99	65.28
17	71.32	74.04	51.21	44	70.93	81.87	72.74
18	53.16	57.85	68.58	45	64.67	47.79	75.56
19	47.55	75.56	66.06	46	54.73	74.04	69.31
20	55.45	88.25	80.69	47	61.81	70.61	67.58
21	49.64	64.67	87.68	48	69.31	54.21	69.31
22	70.2	75.18	68.58	49	60.14	77.4	51.43
23	43.71	80.2	92.75	50	63.97	72.42	67.66
24	70.93	43.71	72.58	เฉลี่ย	62.48	66.06	65.48
25	76.82	51.43	74.04				
26	72.58	86.77	54.32				
27	74.04	75.56	61.82				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข1 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียัดเม็ดสูตร C2G8B1.0 [1]

เม็ดที่	ความหนาแน่น (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0810	0.1475	1.310	0.109	1.35
2	0.0848	0.1488	1.310	0.114	1.31
3	0.0862	0.1499	1.310	0.116	1.29
4	0.0791	0.1464	1.310	0.107	1.37
5	0.0862	0.1482	1.310	0.116	1.28
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.32

ตารางที่ ข2 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [1]

เม็ดที่	ความหนาแน่น (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0868	0.1502	1.320	0.119	1.26
2	0.0880	0.1512	1.320	0.120	1.26
3	0.0887	0.1504	1.320	0.121	1.24
4	0.0870	0.1483	1.310	0.117	1.27
5	0.0837	0.1481	1.310	0.113	1.31
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.27

ตารางที่ ข3 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียูอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0 [1]

เม็ดที่	ความหนาแน่น (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0858	0.1528	1.310	0.116	1.32
2	0.0882	0.1532	1.320	0.121	1.27
3	0.0871	0.1517	1.320	0.119	1.27
4	0.0870	0.1487	1.315	0.118	1.26
5	0.0791	0.1498	1.310	0.107	1.40
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.30

ตารางที่ ข4 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียูอัดเม็ดสูตร C8G2B1.0 [1]

เม็ดที่	ความหนาแน่น (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0862	0.1525	1.320	0.118	1.29
2	0.0831	0.1526	1.320	0.114	1.34
3	0.0849	0.1541	1.320	0.116	1.33
4	0.0849	0.1533	1.320	0.116	1.32
5	0.0845	0.1510	1.320	0.116	1.30
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข5 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียัดเม็ดสูตร C4G6B0.6 [1]

เม็ดที่	ความหนาแน่น (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0962	0.1532	1.315	0.131	1.17
2	0.0950	0.1527	1.320	0.130	1.17
3	0.0967	0.1520	1.320	0.132	1.15
4	0.0988	0.1532	1.320	0.135	1.13
5	0.0889	0.1534	1.320	0.122	1.26
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.18

ตารางที่ ข6 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียัดเม็ดสูตร C6G4B0.6 [1]

เม็ดที่	ความหนาแน่น (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0881	0.1540	1.320	0.121	1.27
2	0.0924	0.1548	1.320	0.126	1.23
3	0.0862	0.1519	1.310	0.116	1.31
4	0.0855	0.1507	1.310	0.115	1.31
5	0.0840	0.1496	1.310	0.113	1.32
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.29

ตารางที่ ข7 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียูอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0 [2]

เม็ดที่	ความหนาแน่น (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0851	0.1524	1.320	0.116	1.31
2	0.0882	0.1509	1.320	0.121	1.25
3	0.0900	0.1561	1.320	0.123	1.27
4	0.0822	0.1483	1.310	0.111	1.34
5	0.0858	0.1466	1.310	0.116	1.26
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.29

ตารางที่ ข8 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียูอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0 [2]

เม็ดที่	ความหนา (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0842	0.1486	1.310	0.113	1.32
2	0.0848	0.1415	1.310	0.114	1.24
3	0.0829	0.1497	1.310	0.112	1.34
4	0.0959	0.1469	1.310	0.129	1.14
5	0.0885	0.1491	1.310	0.119	1.25
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.26

ตารางที่ ข9 ความหนาแน่นเส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนักของเจลปียูอักเม็ดสูตร C6G4B1.0 [2]

เม็ดที่	ความหนา (เซนติเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (เซนติเมตร)	ปริมาตร (ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	ความหนาแน่น (กรัม/ลูกบาศก์ เซนติเมตร)
1	0.0855	0.1538	1.315	0.116	1.33
2	0.0831	0.1544	1.310	0.112	1.38
3	0.0922	0.1533	1.310	0.124	1.24
4	0.0829	0.1519	1.315	0.113	1.23
5	0.0751	0.1488	1.310	0.101	1.47
ความหนาแน่นเฉลี่ย					1.295



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค1 ค่าการบวมตัว (เท่า) ของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

เวลา (นาที)	C2G8B1.0				C4G6B1.0		
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่		เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	
10	4.44	5.44	5.93	5.27	8.14	7.74	7.94
20	11.06	19.91	20.12	17.03	11.68	11.79	11.73
30	16.56	29.47	27.49	24.51	13.65	17.79	15.72
40	16.96	29.78	27.58	24.78	14.78	19.3	17.04
50	17.25	29.93	28.59	25.26	15.28	19.96	17.62
60	17.78	23.00	28.54	23.10	16.39	20.54	18.47
90	19.68	31.61	29.74	27.01	16.4	21.38	18.89
120	19.49	31.74	30.26	27.16	17.69	22.52	20.10
180	20.72	33.26	31.94	28.64	18.68	23.84	21.26
240	22.12	33.44	32.34	29.30	21.49	24.55	23.02
300	23.03	34.93	33.75	30.57	21.99	25.37	23.68
360	23.74	35.51	33.85	31.04	22.42	25.70	24.06
600	26.56	36.69	35.11	32.79	24.44	27.26	25.85
1440	28.34	35.85	34.04	32.75	23.83	25.72	24.78
2880	20.59	19.87	21.50	20.65	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค2 ค่าการบวมตัว (เท่า) ของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

เวลา (นาที)	C6G4B1.0				C8G2B1.0			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
10	5.55	5.22	4.32	5.03	7.89	8.16	8.28	8.11
20	10.39	9.41	9.19	9.66	11.1	6.99	6.71	8.27
30	15.45	13.4	16.59	15.15	14.63	9.61	11.79	12.01
40	21.44	15.05	22.55	19.68	16.77	12.52	11.82	13.70
50	24.16	16.02	24.36	21.51	18.36	13.59	12.78	14.91
60	25.62	16.89	24.91	22.47	19.77	15.14	14.72	16.54
90	26.38	18.74	25.90	23.67	21.88	15.19	15.72	17.60
120	27.02	19.46	26.63	24.37	22.39	15.65	13.84	17.29
180	27.26	20.39	27.89	25.18	23.17	17.26	17.83	19.42
240	28.04	21.03	27.72	25.60	23.74	18.45	19.29	20.49
300	28.23	22.60	27.78	26.21	24.40	18.96	21.05	21.47
360	28.52	22.74	27.58	26.28	24.54	19.06	21.37	21.66
600	29.33	24.84	28.19	27.45	25.13	20.99	22.52	22.88
1440	26.24	25.71	21.66	24.54	10.70	14.05	13.19	12.65
2880	12.87	11.68	11.59	12.05	3.62	2.55	2.12	2.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓3 ค่าการบวมตัว (เท่า) ของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

เวลา (นาที)	C4G6B0.6				C6G4B0.6			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
10	8.36	9.05	8.53	8.65	7.52	5.56	6.73	6.60
20	15.93	15.09	20.02	17.01	11.36	11.32	11.15	11.27
30	22.74	21.64	23.62	22.67	15.73	14.63	15.68	15.35
40	24.72	24.93	27.84	25.83	17.34	16.34	18.70	17.46
50	24.77	25.49	28.96	26.41	19.21	18.03	22.97	20.07
60	24.70	26.02	29.31	26.68	20.24	20.08	24.07	21.46
90	25.82	27.41	30.40	27.87	21.72	21.82	24.67	22.74
120	26.11	27.42	30.75	28.09	22.22	22.86	25.07	23.38
180	27.26	28.83	31.45	29.18	23.40	26.46	25.94	25.27
240	28.06	30.01	32.04	30.04	23.93	27.16	27.06	26.05
300	29.02	31.51	32.99	31.17	25.24	27.70	27.03	26.66
360	29.32	31.41	32.59	31.11	26.41	27.63	25.62	26.56
600	29.69	32.64	33.57	31.97	28.25	28.23	25.01	27.17
1440	29.50	28.92	27.47	28.63	17.40	21.04	18.47	18.97
2880	19.82	14.11	12.09	15.34	5.05	7.52	8.00	6.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓4 ค่าการบวมตัว (เท่า) ของเจลนึ้ยอ้ดเม้คสูตรต่างๆ

เวลา (นาที)	C2G8B1.0[1]				C4G6B1.0[1]			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
10	6.27	8.4	6.55	7.07	5.27	6.58	6.89	6.25
20	8.37	8.92	7.76	8.35	7.23	7.34	7.73	7.43
30	10.57	10.89	8.19	9.88	8.10	6.98	9.47	8.18
40	9.96	9.36	9.26	9.53	10.62	10.63	11.41	10.89
50	9.53	10.29	10.22	10.01	12.45	9.85	11.45	11.25
60	11.32	10.63	10.89	10.95	12.92	9.78	12.02	11.57
90	17.02	13.34	13.21	14.52	18.39	14.30	13.81	15.50
120	17.05	12.67	13.49	14.41	19.98	18.61	16.81	18.47
180	20.38	17.21	13.78	17.12	20.51	17.24	19.60	19.12
240	20.91	18.94	14.29	18.04	21.48	16.69	19.43	19.20
300	19.94	18.45	13.93	17.44	21.29	18.91	20.33	20.18
360	19.43	18.54	13.96	17.31	21.37	18.47	20.40	20.08
600	20.98	20.14	13.38	18.17	22.40	18.69	20.60	20.57
1440	19.25	22.50	13.92	18.56	18.68	18.01	19.72	18.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค5 ค่าการบวมตัว (เท่า) ของเจลนั้ยอ้ดเม้ค้ศูตรต้งต้ง

เวลา (นาที)	C6G4B1.0[1]				C8G2B1.0[1]			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
10	10.28	9.98	9.55	9.94	6.05	6.30	4.70	5.68
20	10.17	9.81	8.63	9.54	8.16	5.25	6.39	6.60
30	13.96	13.12	16.77	14.61	7.89	6.67	7.74	7.43
40	14.91	14.61	19.15	16.22	10.00	6.83	9.53	8.78
50	15.98	15.36	20.31	17.22	12.29	8.36	10.89	10.51
60	18.03	15.92	20.90	18.28	13.40	8.10	12.43	11.31
90	20.12	17.10	21.00	19.41	18.21	10.56	14.83	14.53
120	21.38	17.90	21.55	20.28	19.41	12.13	16.16	15.90
180	21.41	18.09	21.78	20.43	20.36	14.18	17.72	17.42
240	22.09	19.55	22.42	21.35	22.62	14.91	17.87	18.47
300	23.13	19.56	22.7	21.79	22.21	14.88	18.39	18.49
360	22.99	19.24	22.66	21.63	23.10	15.49	19.26	19.28
600	23.74	20.63	23.77	22.71	25.39	16.29	20.00	20.56
1440	23.58	24.08	24.80	24.16	28.16	18.24	26.42	24.27
2880	10.18	15.62	18.75	14.85	19.56	22.22	-	20.89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑๖ ค่าการบวมตัว (เท่า) ของเจลปฏิกิริยาอิมัลชันต่างๆ

เวลา (นาที)	C4G6B0.6[1]				C6G4B0.6[1]			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
10	7.68	7.60	9.79	8.36	11.22	10.85	5.81	9.29
20	7.49	8.56	5.96	7.34	11.15	11.13	9.29	10.52
30	7.61	11.16	7.41	8.73	10.22	11.03	12.06	11.10
40	7.51	12.32	7.60	9.14	10.19	11.69	12.28	11.39
50	6.87	13.26	9.49	9.87	10.26	11.24	12.41	11.30
60	7.34	12.90	11.98	10.74	10.79	11.76	13.11	11.89
90	8.88	13.92	12.17	11.66	11.79	12.01	13.09	12.30
120	8.63	14.57	12.86	12.02	10.58	12.59	13.68	12.28
180	9.57	14.43	14.07	12.69	11.66	13.27	14.58	13.17
240	10.28	15.02	13.41	12.90	12.24	14.19	15.57	14.00
300	11.14	15.07	14.08	13.43	12.56	14.20	16.52	14.43
360	11.59	15.58	14.91	14.03	13.30	15.77	17.91	15.66
600	12.64	17.80	14.78	15.08	14.97	17.96	20.10	17.68
1440	15.47	18.41	18.54	17.47	16.33	17.82	19.03	17.72
2880	12.87	13.28	13.17	13.10	18.65	22.65	17.56	19.62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓7 ค่าการบวมตัว (เท่า) ของเจลปฏิกิริยาอิมัลชันสูตรต่างๆ

เวลา (นาที)	C2G8B1.0[2]				C4G6B1.0[2]			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
10	5.63	7.13	5.03	5.93	7.87	9.54	11.47	9.63
20	5.60	7.88	4.67	6.05	8.18	8.78	10.8	9.25
30	6.68	7.49	5.26	6.47	10.61	9.26	15.52	11.80
40	6.91	7.22	5.19	6.44	11.63	12.14	16.41	13.39
50	8.48	9.92	5.95	8.12	11.92	14.41	16.42	14.25
60	10.07	8.72	7.16	8.65	12.4	15.79	18.23	15.47
90	9.63	11.63	9.91	10.39	12.84	17.67	18.84	16.45
120	11.35	13.08	9.49	11.31	15.72	19.32	19.07	18.04
180	10.97	14.14	13.4	12.84	14.98	20.3	19.91	18.40
240	11.65	13.97	12.80	12.81	15.94	20.23	20.06	18.74
300	11.91	14.37	11.98	12.75	16.07	20.60	20.43	19.03
360	11.95	14.35	12.49	12.93	16.99	21.86	20.66	19.84
600	13.07	16.41	12.85	14.11	19.02	23.91	22.44	21.79
1440	15.30	15.48	14.31	15.03	19.79	20.50	19.31	19.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓8 ค่าการบวมตัว (เท่า) ของเจลนึ้ยอ็คเม็คสุตรต่างๆ

เวลา (นาที)	C6G4B1.0[2]			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3	
10	6.06	6.56	6.43	6.35
20	10.46	9.75	12.76	10.99
30	7.87	9.29	9.02	8.73
40	8.38	10.38	10.92	9.89
50	9.16	11.19	12.58	10.98
60	9.45	12.12	13.7	11.76
90	11.07	14.26	15.97	13.76
120	12.07	15.19	19.21	15.49
180	13.76	16.4	21.85	17.34
240	14.43	15.63	21.71	17.26
300	15.06	16.29	20.91	17.42
360	15.07	16.37	20.9	17.45
600	15.97	17.77	21.63	18.46
1440	17.58	13.44	21.95	17.66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑1 ค่าน้ำหนักและค่าการดุดกลืนแสงของเจลปฏีอค์เม็ดสูตร C2G8B1.0[1]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดุดกลืนแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	0.1529	0.1533	-	0.1531	0.097	0.098	-	0.098
60	0.1538	0.1537	0.1501	0.1525	0.090	0.101	0.102	0.098
120	0.1543	0.1535	0.1542	0.1540	0.100	0.105	0.108	0.104
180	0.1524	0.1519	0.1534	0.1526	0.103	0.109	0.110	0.107
240	0.1536	0.1540	0.1544	0.1540	0.105	0.109	0.108	0.107
300	0.1552	0.1533	0.1552	0.1546	0.096	0.115	0.116	0.109
360	-	0.1528	0.1524	0.1526	-	0.116	0.120	0.118
720	0.1524	0.1527	0.1519	0.1523	0.111	0.117	0.119	0.116
1440	0.1538	0.1520	0.1525	0.1528	0.121	0.128	0.127	0.125
2880	0.1466	0.1465	0.1464	0.1464	0.125	0.123	0.124	0.124

ตารางที่ ๑2 ค่าน้ำหนักและค่าการดุดกลืนแสงของเจลปฏีอค์เม็ดสูตร C4G6B1.0[1]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดุดกลืนแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	0.1538	0.1519	0.1515	0.1524	0.092	0.087	0.089	0.089
60	-	0.1524	0.1534	0.1529	-	0.093	0.098	0.096
120	0.1545	0.1520	0.1515	0.1527	0.093	0.099	0.111	0.101
180	0.1500	0.1529	0.1532	0.1520	0.094	0.100	0.100	0.098
240	0.1525	0.1529	0.1529	0.1528	0.088	0.104	0.095	0.096
300	0.1533	0.1528	0.1502	0.1521	0.092	0.110	0.108	0.103
360	0.1526	0.1500	0.1510	0.1512	0.094	0.105	0.096	0.098
720	-	0.1504	0.1535	0.1520	-	0.114	0.116	0.115
1440	-	0.1535	0.1490	0.1512	-	0.116	0.118	0.117
2880	0.1521	0.1518	0.1521	0.1520	0.109	0.109	0.113	0.110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3 ค่าน้ำหนักและค่าการดูคกลืนแสงของเจลปฏีอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0[1]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดูคกลืนแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	0.1531	0.1525	-	0.1528	0.094	0.104	-	0.099
60	0.1533	0.1526	0.1508	0.1522	0.108	0.090	0.107	0.102
120	-	0.1540	0.1523	0.1532	-	0.114	0.119	0.116
180	0.1529	0.1521	0.1524	0.1525	0.105	0.115	0.123	0.114
240	0.1518	0.1521	0.1524	0.1521	0.106	0.115	0.111	0.111
300	0.1517	0.1524	0.1528	0.1523	0.106	0.125	0.121	0.117
360	0.1520	0.1510	0.1513	0.1514	0.121	0.132	0.133	0.129
720	-	0.1528	0.1525	0.1527	-	0.116	0.130	0.123
1440	0.1542	0.1530	-	0.1536	0.131	0.121	-	0.126
2880	0.1521	0.1518	0.1521	0.1520	0.126	0.127	0.128	0.127

ตารางที่ 4 ค่าน้ำหนักและค่าการดูคกลืนแสงของเจลปฏีอัดเม็ดสูตร C8G2B1.0[1]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดูคกลืนแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	-	0.1525	0.1533	0.1529	-	0.073	0.087	0.080
60	0.1532	0.1515	0.1537	0.1528	0.097	0.088	0.084	0.090
120	0.1551	0.1542	0.1500	0.1531	0.087	0.104	0.107	0.099
180	0.1518	0.1527	0.1524	0.1523	0.100	0.112	0.116	0.109
240	0.1523	0.1548	0.1544	0.1538	0.102	0.106	0.118	0.109
300	0.1536	0.1531	0.1461	0.1509	0.103	0.107	0.105	0.105
360	0.1507	0.1508	0.1509	0.1508	0.107	0.107	-	0.107
720	0.1516	0.1515	0.1517	0.1516	0.119	0.115	0.117	0.117
1440	0.1522	0.1527	0.1517	0.1522	0.130	0.129	0.131	0.130
2880	0.1500	0.1500	-	0.1500	0.113	0.125	-	0.119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๕ ค่าน้ำหนักและค่าการดุดกดินแสงของเจลปุยอัดเม็ดสูตร C4G6B0.6[1]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดุดกดินแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	0.1522	0.1521	0.1523	0.1521	0.061	0.063	0.065	0.063
60	0.1522	-	0.1522	0.1522	0.071	-	0.057	0.064
120	0.1536	0.1534	0.1538	0.1536	0.065	0.066	0.064	0.065
180	0.1515	0.1530	0.1531	0.1525	0.064	0.066	0.070	0.067
240	0.1535	-	0.1520	0.1528	0.073	-	0.073	0.073
300	0.1514	0.1504	0.1502	0.1507	0.078	0.087	0.087	0.084
360	0.1517	0.1520	0.1526	0.1521	0.086	0.097	0.108	0.097
720	0.1518	0.1517	0.1515	0.1517	0.130	0.131	0.138	0.133
1440	-	0.1526	0.1514	0.1520	-	0.143	0.151	0.147

ตารางที่ ๖ ค่าน้ำหนักและค่าการดุดกดินแสงของเจลปุยอัดเม็ดสูตร C6G4B0.6[1]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดุดกดินแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	0.1536	0.1535	0.1546	0.1539	0.053	0.035	0.043	0.044
60	0.1548	0.1525	0.1539	0.1537	0.060	0.067	0.055	0.061
120	0.1523	0.1531	-	0.1527	0.060	0.061	-	0.060
180	0.1540	0.1527	-	0.1534	0.067	0.069	-	0.068
240	0.1545	0.1529	0.1534	0.1536	0.112	0.115	0.101	0.109
300	0.1524	0.1542	0.1540	0.1535	0.114	0.127	0.113	0.118
360	0.1539	0.1532	0.1525	0.1532	0.110	0.123	0.128	0.120
720	0.1548	0.1543	-	0.1546	0.122	0.134	-	0.128
1440	0.1523	0.1503	0.1521	0.1516	0.134	0.137	0.143	0.138
2880	0.1550	0.1547	0.1542	0.1546	0.148	0.159	0.155	0.154

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗ ค่าน้ำหนักและค่าการดุดกลืนแสงของเจลปียูอัดเม็ดสูตร C2G8B1.0[2]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดุดกลืนแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	0.1562	0.1498	-	0.1530	0.046	0.047	-	0.045
60	0.1574	0.1568	-	0.1571	0.039	0.035	-	0.037
120	0.1561	0.1554	0.1571	0.1562	0.069	0.060	0.078	0.069
180	0.1600	-	0.1570	0.1585	0.088	-	0.072	0.080
240	0.1577	0.1561	0.1541	0.1560	0.090	0.087	0.93	0.090
300	0.1544	0.1486	0.1582	0.1537	0.101	0.103	0.105	0.103
360	-	0.1520	0.1549	0.1535	-	0.105	0.125	0.115
720	0.1564	0.1555	0.1552	0.1557	0.138	0.139	0.137	0.138
1440	0.1584	0.1516	0.1504	0.1535	0.133	0.135	0.137	0.135
2880	-	0.1600	0.1564	0.1582	-	0.149	0.137	0.143

ตารางที่ ๘ ค่าน้ำหนักและค่าการดุดกลืนแสงของเจลปียูอัดเม็ดสูตร C4G6B1.0[2]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดุดกลืนแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	0.1571	0.1558	0.1579	0.1569	0.115	0.116	0.114	0.115
60	0.1543	0.1615	-	0.1579	0.100	0.116	-	0.108
120	0.1491	0.1555	0.1603	0.1550	0.119	0.115	0.111	0.115
180	0.1528	0.1549	0.1428	0.1502	0.103	0.113	0.123	0.113
240	0.1574	0.1564	0.1551	0.1563	0.110	0.115	0.105	0.110
300	0.1577	0.1582	0.1538	0.1566	0.114	0.122	0.113	0.116
360	0.1569	0.1561	-	0.1565	0.116	0.112	-	0.114
720	0.1579	0.1582	0.1574	0.1578	0.130	0.131	0.136	0.132
1440	0.1550	0.1533	0.1537	0.1540	0.128	0.135	0.137	0.133
2880	-	0.1552	0.1562	0.1557	-	0.136	0.132	0.134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑๙ ค่าน้ำหนักและค่าการดุดกลืนแสงของเจลปฏิกิริยาอัดเม็ดสูตร C6G4B1.0[2]

เวลา (นาที)	น้ำหนัก				ค่าการดุดกลืนแสง			
	เม็ดที่ 1	เม็ดที่ 2	เม็ดที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
30	0.1505	0.1485	0.1527	0.1506	0.094	0.096	0.098	0.096
60	0.1564	0.1506	0.1683	0.1584	0.110	0.115	0.105	0.110
120	-	0.1527	0.1519	0.1523	-	0.089	0.101	0.095
180	0.1557	0.1501	0.1508	0.1522	0.110	0.119	0.111	0.113
240	0.1498	0.1577	0.1512	0.1529	0.108	0.098	0.101	0.102
300	-	0.1581	0.1564	0.1572	-	0.099	0.081	0.090
360	0.1553	0.1523	0.1582	0.1553	0.099	0.113	0.118	0.110
720	0.1574	0.1537	0.1521	0.1544	0.137	0.125	0.119	0.127
1440	0.1592	0.1583	0.1577	0.1584	0.120	0.137	0.126	0.128
2880	0.1570	0.1570	0.1573	0.1571	0.115	0.132	0.117	0.121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้