

การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรต  
ของเม็ดปิดจากอัลจิเนต

RELEASING BEHAVIOR OF POTASSIUM NITRATE FROM  
ALGINATE BEADS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรต  
ของเม็ดปิดจากอัลจิเนต

RELEASING BEHAVIOR OF POTASSIUM NITRATE FROM  
ALGINATE BEADS

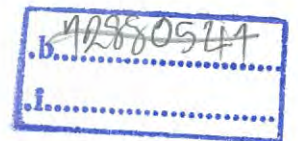


T149219

ปรนันทน์ ปารีชาตวุฒิกุล  
มารีศา ว่องกิตติสิน  
เมธวี เมธาวนิช

2/167 ก  
2558

เลขหมู่.....149219  
เลขทะเบียน.....  
วันเดือนปี.....29 ส.ค. 2561



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# RELEASING BEHAVIOR OF POTASSIUM NITRATE FROM ALGINATE BEADS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดจากอัลจิเนต  
Releasing Behavior of Potassium Nitrate from Alginate Beads

ชื่อนักศึกษา นางสาวปรนันทน์ ปารีชาตวุฒิกุล รหัสนักศึกษา 55050720  
นางสาวมาริตา ว่องกิตติสิน รหัสนักศึกษา 55050772  
นางสาวเมธวี เมธาวณิช รหัสนักศึกษา 55050774

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)  
ภาควิชา เคมี  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร ประธานกรรมการ	
ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ กรรมการ	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงวิชาการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดจากอัลจินต		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปรนันท์ ปารีชาตวุฒิกุล	รหัสนักศึกษา	55050720
	นางสาวมารีศา ว่องกิตติสิน	รหัสนักศึกษา	55050772
	นางสาวเมธวี เมธาวนิช	รหัสนักศึกษา	55050774
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
คณะ	วิทยาศาสตร์		
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)		
ปีการศึกษา	2558		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารซึ่งเตรียมจากโซเดียมอัลจินตความเข้มข้น 7.0 %w/v ผสมกับโพแทสเซียมไนเตรดแล้วขึ้นรูปเป็นเม็ดปิด จากนั้นเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ และ 4 โมลาร์ เป็นเวลา 5 หรือ 15 นาที ซึ่งเป็นการเตรียมเม็ดปิดพร้อมบรรจุสารโพแทสเซียมไนเตรตในขั้นตอนเดียว แต่เม็ดปิดที่เตรียมได้มีการหน่วงการปลดปล่อยที่ต่ำ จึงนำมาปรับปรุงโดยทำการเชื่อมโยงสองขั้นตอนด้วยการเคลือบผิวด้วยโซเดียมอัลจินตความเข้มข้น 7.0 %w/v กับแคลเซียมคลอไรด์ 4 โมลาร์, การเคลือบผิวด้วยเพอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 30 วินาที และ 1 นาที หรือการเคลือบผิวด้วยไคโตซานความเข้มข้น 1.0 %w/v ภาพตัดขวางของเม็ดปิดชุดสูตร ACaX-ACa4/5 และชุดสูตร ACaX-C พบว่ามีลักษณะเป็น Core-Shell จากนั้นศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตและศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดโดยใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร พบว่าเม็ดปิดสูตร ACa4/5 มีประสิทธิภาพในการกักเก็บที่มากที่สุดคือ 98% และเม็ดปิดที่ปรับปรุงด้วยการเคลือบอัลจินตมีการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตที่เป็นแบบเชิงเส้นในช่วงต้น เมื่อพิจารณาผลของประสิทธิภาพการกักเก็บและพฤติกรรมการปลดปล่อย พบว่าสูตร ACa4/5-ACa4/5 และ สูตร ACa4/15-ACa4/5 เหมาะแก่การนำไปทำเม็ดปิดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร

**คำสำคัญ :** แคลเซียมคลอไรด์ เม็ดปิด อัลจินต ไฮโดรเจล

<b>Title</b>	Releasing Behavior of Potassium Nitrate from Alginate Beads		
<b>Students</b>	Miss Poranunt Parichatwuttikoon	Student ID	55050720
	Miss Marisa Wongkittisin	Student ID	55050772
	Miss Methavee Methavanich	Student ID	55050774
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Faculty</b>	Science		
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)		
<b>Academic Year</b>	2015		
<b>Advisor</b>	Asst.Prof.Dr.Pathavuth Monvisade		

### Abstract

This special project studied on the releasing behavior of potassium nitrate from alginate beads. The beads were firstly prepared by the mixing of sodium alginate concentration of 7.0% w/v with potassium nitrate and shaping with subsequently crosslinked by 2 M or 4 M calcium chloride for 5 or 15 minutes as appropriate. These alginate beads containing potassium nitrate are called a single-crosslink bead. Unfortunately, these beads demonstrated none or less releasing retardation. Therefore, to conquer this problem, the beads were further crosslinked by coating with sodium alginate concentration of 7.0% w/v and suddenly with calcium chloride 4 M, coating with ferric sulfate concentration of 1 M for 30 seconds or 1 minute, or coating with chitosan concentration of 1.0% w/v. Crosssection pictures of the A<sub>CaX</sub>-A<sub>Ca4/5</sub> and A<sub>CaX</sub>-C beads showed Core-Shell pattern suggesting the membrane diffusion releasing profile. The efficiency retention of potassium nitrate in the beads and the releasing behavior of potassium nitrate from the beads using a UV-Visible spectrophotometer at wavelength of 220 nm were studied. It was found that the A<sub>Ca4/5</sub> beads have the most efficiency retention at 98%. The series of A<sub>CaX</sub>-A<sub>Ca4/5</sub> beads showed the linear releasing behavior at initial step. Considering to the efficiency retention behavior and releasing profile the A<sub>Ca4/5</sub>-A<sub>Ca4/5</sub> and A<sub>Ca4/15</sub>-A<sub>Ca4/5</sub> beads are the most suitable for control release beads.

**Keyword:** Alginate, Beads, Calcium chloride, Hydrogel

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดบีดจากอัลจินेट สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์ในด้านต่าง ๆ จากหลายบุคคล คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ซึ่งท่านอาจารย์กรุณาให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับความรู้ ตลอดจนแก้ไขปัญหาในทุก ๆ ด้านเป็นอย่างดี และขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฬารัตน์ ปรัชญาวรากร และ อ.ดร.กิตติมนต์ จิระกิตติคุณ อาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ที่ช่วยให้ความอนุเคราะห์ในการให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ทำให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวก ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ รวมทั้งการเบิกสารเคมี จนโครงการพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์

นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน รวมถึงนักศึกษาปริญญาเอกและปริญญาโท ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ แนะนำข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการพิเศษชิ้นนี้ และขอบคุณ เพื่อน ๆ สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจ ช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยนี้ ตลอดจนถึงผู้ให้ความช่วยเหลืออีกหลายท่านที่ไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้

ปรนันทน์ ปารีชาตวุฒิกุล  
มาริศา ว่องกิตติสิน  
เมธวี เมธาวนิช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ข
กิตติกรรมประกาศ .....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญรูป .....	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์ .....	ฎ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels) .....	3
2.1.1 สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจล .....	3
2.1.2 การจำแนกประเภท .....	4
2.1.3 วิธีเตรียมไฮโดรเจล .....	8
2.1.3.1 Physical crosslinking .....	8
2.1.3.2 Chemical crosslinking .....	11
2.1.3.3 Radiation crosslinking .....	15
2.2 กัมธรรมชาติ (Natural gums) .....	16
2.2.1 Seaweed extracts .....	16
2.2.1.1 คาร์ราจีแนน (Carrageenan) .....	16
2.2.1.2 อะการ์ (Agar) .....	19
2.2.1.3 เฟอเซลลาแรน (Furcellaran) .....	21
2.2.1.4 อัลจิเนต (Alginate) .....	21
2.2.2 Plant extracts .....	23
2.2.2.1 เพคติน (Pectin) .....	23
2.2.3 Plant seed gums .....	25
2.2.3.1 Locust bean gum .....	25
2.2.3.2 Guar gum .....	26
2.2.4 Plant exuded gums .....	27
2.2.4.1 Gum Arabic .....	27
2.2.4.2 Gum ghatti .....	28
2.2.4.3 Gum karaya .....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.4.4 Gum tragacanth .....	30
2.2.5 Animal-derived .....	31
2.2.5.1 Chitin-Chitosan .....	31
2.2.6 Microbial gums .....	33
2.2.6.1 Xanthan gum .....	33
2.3 ปุ๋ย .....	34
2.3.1 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหาร .....	35
2.3.1.1 ธาตุอาหารหลัก .....	35
2.3.1.2 ธาตุอาหารรอง .....	35
2.3.1.3 ธาตุอาหารเสริม .....	36
2.3.2 ประเภทของปุ๋ย .....	37
2.3.2.1 ปุ๋ยอินทรีย์ .....	37
2.3.2.2 ปุ๋ยเคมี .....	37
2.3.3 สูตรปุ๋ย .....	37
2.3.3.1 การบ่งบอกปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยเคมี .....	37
2.3.4 ปุ๋ยละลายช้า .....	38
2.3.4.1 ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled released fertilizers, CRF) .....	38
2.3.4.2 ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizers, SRF) .....	40
2.3.5 การจำแนกปุ๋ยละลายช้า .....	41
2.4 ระบบเชื่อมโยง .....	41
2.4.1 การเชื่อมโยงด้วยประจุ .....	41
2.4.1.1 การเชื่อมโยงประจุแบบโมโนวาเลนต์ .....	41
2.4.1.2 การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์ .....	42
2.4.1.3 การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์ .....	42
2.4.2 แคลเซียมคลอไรด์ .....	42
2.4.2.1 ลักษณะจำเพาะ .....	42
2.4.2.2 ประโยชน์แคลเซียมคลอไรด์ .....	42
2.4.2.3 พืชแคลเซียมคลอไรด์ .....	43
2.4.2.4 ข้อควรระวังในการใช้ .....	43
2.5 การบวนการปลดปล่อยสาร (Controlled release, CR) .....	43
2.5.1 การแพร่ผ่านเมมเบรน (Membrane control) .....	43
2.5.2 การแพร่ผ่านเมทริกซ์ (Matrix device) .....	44
2.5.3 การปลดปล่อยโดยอาศัยความดันออสโมซิส (Osmosis device) .....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4 อัดสารที่ต้องการปลดปล่อยในลักษณะเม็ด (Compression coated table) .....	44
2.5.5 การแลกเปลี่ยนประจุโดยใช้เรซิน (Ion exchange resin) .....	44
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	44
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b> .....	<b>48</b>
3.1 สารเคมี .....	48
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ .....	48
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย .....	48
3.3.1 สารละลายอัลจินต .....	48
3.3.2 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ .....	49
3.3.3 สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต .....	49
3.3.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก .....	49
3.3.5 สารละลายโคโคซาน .....	49
3.3.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ .....	49
3.3.7 สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต .....	49
3.4 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร .....	49
3.4.1 การเตรียมเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารเชื่อมโยงระบบเดี่ยวโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ .....	49
3.4.2 การปรับปรุงเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรต .....	50
3.4.2.1 โดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟต .....	50
3.4.2.2 โดยใช้อัลจินต .....	50
3.4.2.3 โดยใช้โคโคซาน .....	50
3.5 การตรวจวิเคราะห์ .....	51
3.5.1 การทดสอบการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร .....	51
3.5.2 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร .....	51
3.5.2.1 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) .....	51
3.5.2.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไนเตรตที่บรรจุอยู่ภายในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร .....	51
3.5.2.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไนเตรตที่ปลดปล่อยออกมาจากภายในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร .....	52
3.5.3 ประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร .....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.3.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของ เม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร.....	52
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....</b>	<b>53</b>
4.1 การเตรียมเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร.....	55
4.1.1 ลักษณะพื้นผิวด้านนอกและขนาดอนุภาคของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร.....	55
4.1.2 ลักษณะพื้นผิวด้านในของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร.....	57
4.2 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปไนเตรต.....	59
4.3 ประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร.....	61
4.4 การคำนวณความเข้มข้นของธาตุอาหารในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารสูตรต่างๆ.....	63
4.5 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุ อาหาร.....	65
4.5.1 การคำนวณหาปริมาณการปลดปล่อยของไนโตรเจนในรูปไนเตรตจากเม็ด ปิดบรรจุธาตุอาหาร.....	65
4.5.2 การคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร ทั้งหมดที่เชื่อมโยงแล้ว.....	66
4.5.3 ผลของการปลดปล่อยธาตุอาหารของเม็ดปิดเชื่อมโยงระบบเดี่ยวด้วย CaCl <sub>2</sub> .....	66
4.5.4 ผลของการปลดปล่อยธาตุอาหารของเม็ดปิดเชื่อมโยงสองระบบ.....	69
4.5.5 ผลของการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยเกรตการค้าชนิดละลายช้า.....	75
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>76</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 องค์ประกอบเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารของสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดียว .....	53
4.2 องค์ประกอบเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารของสูตรที่เชื่อมโยงสองระบบ .....	54
4.3 ค่าน้ำหนัก, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ปริมาตร และความหนาแน่นเฉลี่ยของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารแต่ละสูตร (ในวงเล็บแสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) .....	56
4.4 เปอร์เซ็นต์การกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร .....	63
4.5 ปริมาณธาตุอาหารในเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารสูตรต่างๆ .....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกการดูดน้ำของ poly(sodium acrylate).....	3
2.2 การเกิดโพลีคีเลตโทเจนระหว่างโลหะหนักกับไฮโดรเจล.....	4
2.3 แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจล PNIPAAm.....	5
2.4 การเตรียม Surface grafted polymer.....	5
2.5 การเตรียมโคพอลิเมอร์ของ PNIPAAm/MaBP.....	6
2.6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ AAm/AAGA/AMPS ไฮโดรเจล.....	7
2.7 การเตรียมไฮโดรเจล (P(AM-co-HEMA)/PVA semi-IPN.....	8
2.8 แผนภาพการเกิดการเชื่อมขวางเป็นไฮโดรเจลโดยการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของพอลิเมอร์ และ Ca <sup>2+</sup> .....	9
2.9 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล.....	9
2.10 แผนภาพการสังเคราะห์พอลิไอออนิกไฮโดรเจลของ xanthane/chitosan.....	10
2.11 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด Carboxymethylcellulose.....	10
2.12 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยใช้สารเชื่อมขวาง EGDMA.....	11
2.13 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด APS-co-HEMA hydrogels.....	12
2.14 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล poly(VP-co-MA).....	12
2.15 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์.....	13
2.16 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล poly[NVP-PAC]-chitosan.....	14
2.17 การสังเคราะห์ Cts-g-PRAEE copolymer.....	15
2.18 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด PEGDM และPEGUDM.....	16
2.19 Repeating units of carrageenan.....	17
2.20 กลไกการเกิดเจลของ Carrageenan.....	18
2.21 โครงสร้างของ agarose.....	19
2.22 กลไกการเกิดเจลของ Agarose.....	20
2.23 โครงสร้างของอัลจินเตชนิดต่างๆ.....	22
2.24 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model).....	22
2.25 แบบจำลองโครงสร้างของ apple pectin I xylogalacturona, II region with arabina side chain, III rhamnogalacturonan region making up the “hairy region”.....	24
2.26 ชนิดและสมบัติของเพคติน.....	24
2.27 กลไกการเกิดเจลของเพคตินชนิด LM.....	25
2.28 โครงสร้างโมเลกุลของ Locust bean gum.....	26
2.29 โครงสร้างโมเลกุลของ Guar gum.....	26
2.30 โครงสร้างโมเลกุลของ Gum Arabic.....	28
2.31 โครงสร้างของ gum karaya (Sterculia urens).....	29
2.32 โครงสร้างบางส่วนของ tragacanthic acid.....	30
2.33 เปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของ chitin, chitosan และ cellulose.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.34 โครงสร้างโมเลกุลของ Xanthan gum .....	34
4.1 ลักษณะตัวอย่างเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารในแต่ละสูตร .....	55
4.2 ภาพถ่ายพื้นผิวภายในของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารจากกล้อง Digital Microscope (กำลังขยาย 60x) .....	58
4.3 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต .....	60
4.4 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดี่ยว (ก) สูตร A <sub>Ca2/15</sub> , (ข) สูตร A <sub>Ca4/5</sub> และ (ค) สูตร A <sub>Ca4/15</sub> .....	67
4.5 โมเดลการปลดปล่อย (ก.) แบบ Matrix diffusion, (ข.) แบบ Membrane diffusion .....	68
4.6 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตสะสมของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารที่เชื่อมโยง 2 ระบบของสูตร A <sub>Ca2/15</sub> (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจิเนต (ค) ปรับปรุงโดยแซฟเฟอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที (ง) ปรับปรุงโดยแซฟเฟอร์ริกซัลเฟต 1 นาที (จ) ปรับปรุงโดยเคลือบไคโตซาน .....	70
4.7 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตสะสมของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารที่เชื่อมโยง 2 ระบบของสูตร A <sub>Ca4/5</sub> (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจิเนต (ค) ปรับปรุงโดยแซฟเฟอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที (ง) ปรับปรุงโดยแซฟเฟอร์ริกซัลเฟต 1 นาที (จ) ปรับปรุงโดยเคลือบไคโตซาน .....	71
4.8 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตสะสมของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารที่เชื่อมโยง 2 ระบบของสูตร A <sub>Ca4/15</sub> (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจิเนต (ค) ปรับปรุงโดยแซฟเฟอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที (ง) ปรับปรุงโดยแซฟเฟอร์ริกซัลเฟต 1 นาที (จ) ปรับปรุงโดยเคลือบไคโตซาน .....	72
4.9 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตสะสมของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารที่เชื่อมโยง 2 ระบบของสูตรที่ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจิเนต (ก) สูตร A <sub>Ca2/15</sub> , (ข) สูตร A <sub>Ca4/5</sub> และ (ค) สูตร A <sub>Ca4/15</sub> .....	74
4.10 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตของปุ๋ยเกรดการค้าชนิดละลายช้า .....	75

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
AIBN	Azobisisobutyronitrile
AHA	Alpha hydroxyl acid
BIS	N,N-methylenebisacrylamide
CR	Controlled released
CRF	Controlled released fertilizers
CMS	Carboxymethyl starch
LCST	Lower Critical Solution Temperature
KPS	Potassium persulfate
PNIPAAm/MaBP	Poly(N-isopropylacrylamide/methacryloylbenzophenone
IPN	Interpenetrating Network Hydrogel
GA	Glutaraldehyde
PVA	Poly(vinyl alcohol
EGDMA	Ethylene glycol dimethacrylate
MBA	Methylene-bis-acrylamide
NVP	N-vinyl pyrrolidone
PAC	Poly(ethylene glycol diacrylate)
PEGDM	Poly(ethylene glycol) dimethacrylates
PEGUDM	Poly(ethylene glycol) urethane-dimethacrylates
M	1,4-D-manuronic acid
G	L-guluronic acid
SCU	Sulfer-coated urea
SRF	Slow- release fertilizers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพด้านเกษตรกรรม แต่ในปัจจุบันเกษตรกรกำลังประสบปัญหาหลายด้าน ทั้งปัญหาจำนวนผลผลิตตกต่ำ ผลผลิตไม่ออกตรงตามฤดูกาล นอกจากนี้ยังเสียค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาเป็นจำนวนมาก เกษตรกรจึงหันมาพึ่งสารเคมีในการเพาะปลูกมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ได้ผลผลิตตรงตามต้องการ อาทิเช่น การใช้สารเคมีกำจัดวัชพืช การใช้สารเคมีกำจัดแมลง และปุ๋ยเคมี โดยปุ๋ยเคมีเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งในปุ๋ยเคมีนั้นมีธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อพืชทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จึงส่งผลให้เกษตรกรเก็บเกี่ยวผลผลิตได้จำนวนมากยิ่งขึ้น ท้นต่อความต้องการของผู้บริโภค และลดต้นทุนในการดูแลรักษาในระหว่างการเพาะปลูก แต่ในปัจจุบันเกิดความเข้าใจผิดในการใช้ปุ๋ย โดยคิดว่าปุ๋ยที่ใส่ลงไปในวันนั้นให้ประสิทธิภาพ 100% แต่แท้ที่จริงแล้วปุ๋ยที่ใส่ลงไปในวันนั้น พืชไม่สามารถนำมาใช้ได้ทั้งหมด เนื่องจากธาตุไนโตรเจนและธาตุโพแทสเซียมจะเกิดการสูญเสียธาตุอาหารมากกว่าครึ่งหนึ่งของธาตุที่มีอยู่ ในการถูกชะล้างไปกับฝนหรือน้ำ ส่วนธาตุฟอสฟอรัสนั้นพืชสามารถดึงไปใช้ประโยชน์ได้ไม่เกิน 10% ของปริมาณที่ใส่ลงไปในวันนั้น เนื่องจากส่วนที่เหลือทั้งหมดจะทำปฏิกิริยากับดินกลายเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยาก ทำให้พืชไม่สามารถดึงดูดไปใช้ได้ ดังนั้นการใส่ปุ๋ยลงไปในวันเดียวทำให้สูญเสียธาตุอาหารไปอย่างเปล่าประโยชน์และมีผลกระทบที่ตามมา อาทิเช่น ประสิทธิภาพของปุ๋ยเคมีต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ดินเสื่อมโทรม สารเคมีตกค้างอยู่ในดิน ต้นทุนในการใช้ปุ๋ยสูงเกินความจำเป็น ผลผลิตไม่ตรงตามความต้องการ ซึ่งจะส่งผลต่อเกษตรกรในระยะยาว

จึงมีการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ย เช่น ปุ๋ยไนโตรเจน โดยการใช้ปุ๋ยละลายช้าสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งหนึ่งในนั้น คือปุ๋ยที่มีสิ่งกีดขวางทางกายภาพ (physical barrier) เพื่อควบคุมการปลดปล่อยการปล่อยธาตุอาหาร โดยทำให้ปุ๋ยมีลักษณะเป็นเม็ดเคลือบโดยรอบด้วยพอลิเมอร์ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymers) หรือเป็นเมทริกซ์ (matrices) ซึ่งมีปุ๋ยกระจายอยู่ภายในเนื้อวัสดุดังกล่าวโดยจะแทรกอยู่ระหว่างเนื้อปุ๋ยและจำกัดการละลายของปุ๋ยนั้น สำหรับปุ๋ยที่มีสารเคลือบแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ เคลือบผิวเม็ดด้วยพอลิเมอร์ เช่น พลาสติกหรือเรซิน (resins) และเคลือบผิวเม็ดด้วยอินทรีย์สาร เช่น กำมะถัน

สำหรับปุ๋ยละลายช้าชนิดเมทริกซ์ (matrix–base slow–release fertilizers) นั้นสารที่ใช้เป็นเมทริกซ์ยังแบ่งเป็นสารไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิโอเลฟิน (polyolefines) และยาง นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจล (hydrogels) ซึ่งเป็นสารที่ชอบน้ำ [1]

ไฮโดรเจลได้มาจากธรรมชาติหรือการสังเคราะห์ โดยไฮโดรเจลที่ได้จากธรรมชาติจะย่อยสลายได้และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นประโยชน์ในอุตสาหกรรมการเพาะปลูกเป็นอย่างมาก เพื่อใช้ในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร เนื่องจากไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้มาก และสมบัติการบวมตัวในน้ำได้ดีทำให้สามารถกักเก็บสารไว้ภายในได้นานขึ้นกว่าปกติและสามารถควบคุมความเข้มข้นของธาตุเหล่านั้นตามจุดประสงค์ที่ต้องการใช้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการนำไฮโดรเจลมาใช้ในงานวิจัยหลายลักษณะ เช่น จากงานวิจัยของเฉลิมขวัญ เวชสกุล และคณะ ซึ่งเป็นการทำเจลพียูแอตเม็ดจากโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม [2] หรือจากงานวิจัยของ A.K. Nayak และคณะ ซึ่งเป็นการทำเม็ดปิดปลดปล่อยยาจากอัลจิเนตและสารสกัดจากเม็ดมะขามเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ [3]

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมเม็ดไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจากโครงสร้างของอัลจิเนตมีหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylate,  $-COO^-$ ) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบ ทำให้สามารถเกิดอันตรกิริยาระหว่างประจุ (Charge interaction) กับแคลเซียมคลอไรด์ ( $Ca^{2+}$ ) ที่เป็นสารเชื่อมโยง จึงทำให้เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรง ซึ่งสามารถกักเก็บสารไว้อยู่ในเม็ดไฮโดรเจลได้นานขึ้น โดยจะศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยของเม็ดไฮโดรเจลโดยควบคุมอัตราการให้น้ำที่ 20 มิลลิลิตรต่อ 5 นาที โดยตรวจสอบปริมาณของไนโตรเจนในรูปของไนเตรตที่ละลายออกมากับน้ำด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการเตรียมเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารจากโซเดียมอัลจิเนต โดยมีแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมโยง
- 2) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร โดยมีปัจจัยศึกษา ได้แก่ เวลาและความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงแคลเซียมคลอไรด์ และการเคลือบผิวด้วยอัลจิเนต, เพอร์ริกซัลเฟต หรือโคโคซาน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมเม็ดปิดจากโซเดียมอัลจิเนต โดยมีแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเชื่อมโยง
- 2) ปรับเปลี่ยนเวลาในการเชื่อมโยง และความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง
- 3) นำมาปรับปรุงสมบัติโดยการเคลือบผิวด้วยโซเดียมอัลจิเนตและเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ,เคลือบผิวด้วยเพอร์ริกซัลเฟตหรือเคลือบผิวด้วยโคโคซาน
- 4) นำเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารมาทดสอบการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตที่อัตราการให้น้ำ 20 มิลลิลิตร ต่อ 5 นาที โดยตรวจวัดปริมาณของไนโตรเจนในรูปไนเตรตด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารได้
- 2) ทราบถึงพฤติกรรมการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

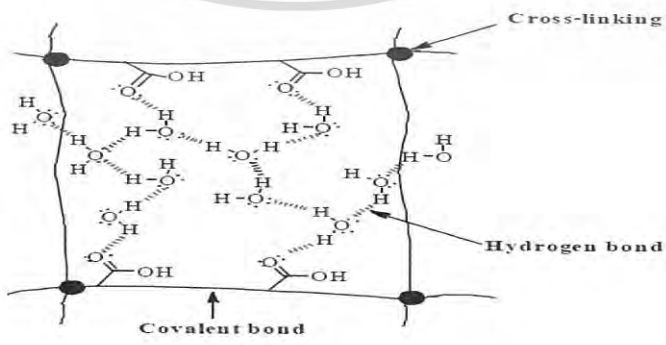
### 2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (hydrophilics) ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับโมเลกุลของน้ำหรือเรียกว่าส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) เช่น หมู่ -OH, -COOH, -CONH<sub>2</sub>, -CONH- และ -SO<sub>3</sub>H เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) เช่น หมู่ -CH<sub>2</sub>- และ -CH<sub>3</sub> เป็นต้น [5] ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่าง ๆ ในสายโซ่ ประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมากและโมเลกุลมีการพันตัวกันหรือขดตัวกันอยู่ ทำให้ภายในโครงสร้างโดยรวมเกิดรูพรุนขนาดเล็ก ๆ มากมาย [6] สมบัติเด่นของไฮโดรเจลคือสามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นร่างตาข่าย (crosslinked network structure) (ได้มากกว่า 20%) พร้อมกับสามารถพองตัวหรือขยายตัวออกได้ และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไปนอกจากนั้นยังไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทุกชนิด [7]

#### 2.1.1 สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจล

##### 1) การดูดน้ำของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้โดยการเกิดปฏิกิริยาหรืออันตรกิริยาทางเคมีระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำกับโมเลกุลของน้ำและในระหว่างการดูดซับน้ำ ไฮโดรเจลสามารถคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายในน้ำเนื่องจากมีโครงสร้างทางเคมีเป็นโครงร่างตาข่าย รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างกลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลจาก poly(sodium acrylate) โดยการดูดน้ำของไฮโดรเจลสามารถเกิดขึ้นโดยการเกิดปฏิกิริยาหรือการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำกับคู่อิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (lone pair electron) ของอะตอมออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) จากนั้นโมเลกุลของน้ำจะดึงดูดน้ำโมเลกุลอื่นๆเข้ามาเก็บไว้ในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจล โดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง [4]

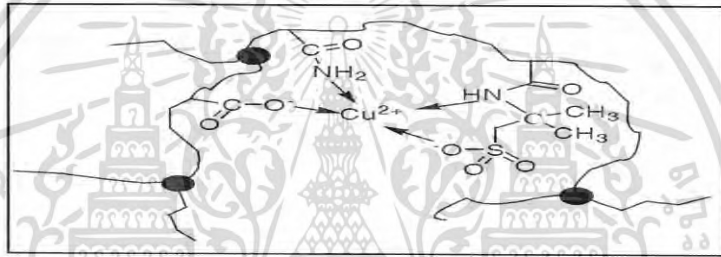


รูปที่ 2.1 กลไกการดูดน้ำของ poly(sodium acrylate) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) การดูดซับโลหะหนัก (Heavy metal adsorption)

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักที่เป็นพิษหลายชนิด เช่น ทองแดง แคดเมียม สารหนู และสารอื่น ๆ ซึ่งหากทิ้งน้ำเสียลงสู่แม่น้ำลำคลองจะก่อให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมตามมา โดยหากโรงงานอุตสาหกรรมมีการบำบัดน้ำเสีย ก่อนปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำก็จะลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่จะตามมาได้ ไฮโดรเจลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับใช้กำจัดหรือแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำโดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ระหว่างโลหะหนักกับไฮโดรเจล การแลกเปลี่ยนไอออน และการเกิดคีเลตระหว่างไอออนโลหะหนักกับพอลิเมอร์เรียกว่า “โพลีคีเลตโทเจน” (polychelators) โดยไอออนโลหะหนักจะคีเลตกับอะตอมที่ให้อิเล็กตรอน (electron donor atoms) ของพอลิเมอร์ เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ออกซิเจน และฟอสฟอรัส โดยสร้างพันธะโคออดิเนตโคเวเลนต์ (coordinate covalent bonds) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ส่วนมากจะมีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล เอมีน และแอมโมเนียมอยู่ในโครงสร้างด้วย ซึ่งสามารถจับหรือเกิดโพลีคีเลตโทเจนกับไอออนโลหะหนักได้ [4]



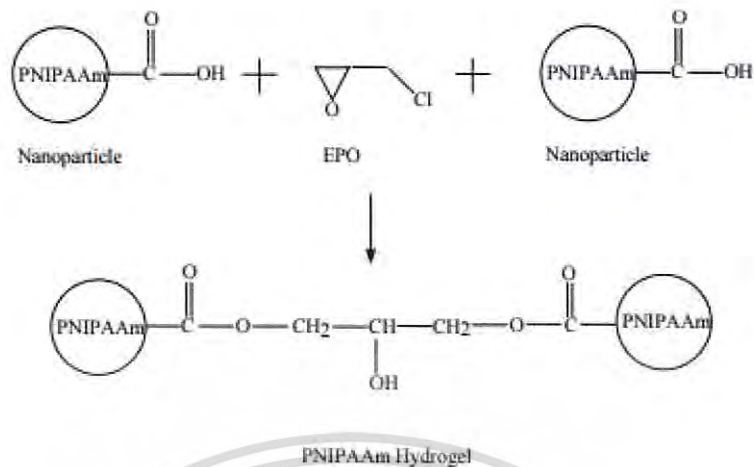
รูปที่ 2.2 การเกิดโพลีคีเลตโทเจนระหว่างโลหะหนักกับไฮโดรเจล [4]

### 2.1.2 การจำแนกประเภท

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทใหญ่ ๆ ตามลักษณะของการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้ [8]

#### 1) ไฮโดรเจลชนิดแผ่นฟิล์ม (Cast films)

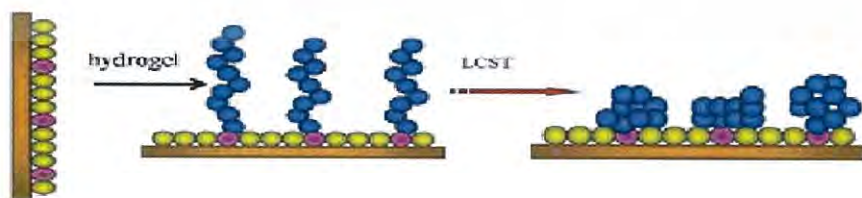
ไฮโดรเจลชนิดแผ่นฟิล์ม จะนำไปใช้เคลือบพื้นผิวของวัสดุต่าง ๆ ตัวอย่างการเตรียมไฮโดรเจลชนิดแผ่นฟิล์มเช่น การเตรียมไฮโดรเจลชนิด poly(*N*-isopropylacrylamide) (PNIPAAm) ซึ่งเตรียมด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์ *N*-isopropylacrylamide (NIPAAm), *N,N'*-methylene-bis-acrylamide (BIS) และ acrylic acid (AA) โดยมีตัวริเริ่มปฏิกิริยา คือ potassium persulfate ( $K_2S_2O_8$ , KPS) และใช้ epichlorohydrin เป็นสารเชื่อมขวาง ซึ่งมีแผนภาพการสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการเตรียมไฮโดรเจล PNIPAAm [4]

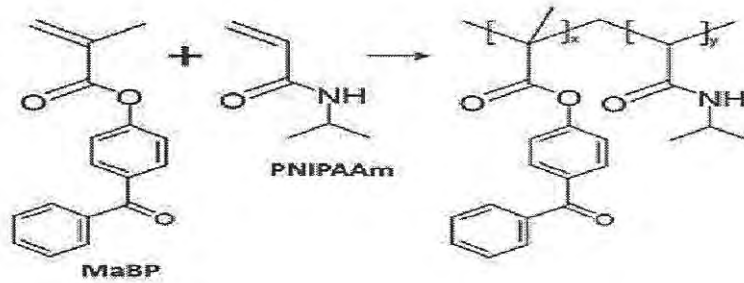
## 2) ไฮโดรเจลชนิดกราฟท์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer)

ไฮโดรเจลชนิดกราฟท์บนพื้นผิว สามารถเตรียมได้โดยให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำ [9] ซึ่งพิจารณาจากอุณหภูมิวิกฤติล่างที่ทำให้พอลิเมอร์ไม่รวมตัวกับน้ำ (Lower Critical Solution Temperature (LCST) โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า LCST พอลิเมอร์จะเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ดีกับน้ำ จึงแสดงพฤติกรรมการบวมตัว ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า LCST พอลิเมอร์จะมีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงแสดงพฤติกรรมการหดตัว ขั้นตอนในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดกราฟท์บนพื้นผิวแสดงดังรูปที่ 2.4 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยเทคนิคนี้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสังเคราะห์ง่าย สามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการเพื่อให้เหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ เช่น การเตรียมตัวอย่างโคพอลิเมอร์ของ poly(*N*-isopropylacrylamide/methacryloylbenzophenone (PNIPAAm/MaBP) [10] ซึ่งเตรียมได้โดยการนำ PNIPAAm ไปกราฟท์บนพื้นผิวของ MaBP ลักษณะแผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การเตรียม Surface grafted polymer [9]

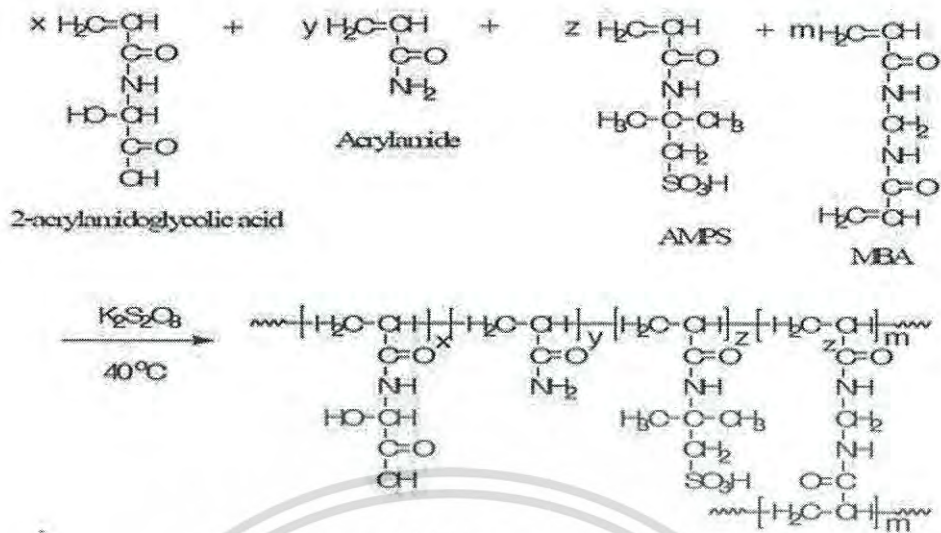
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเตรียมโคพอลิเมอร์ของ PNIPAAm/MaBP [10]

### 3) ไฮโดรเจลชนิดโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network)

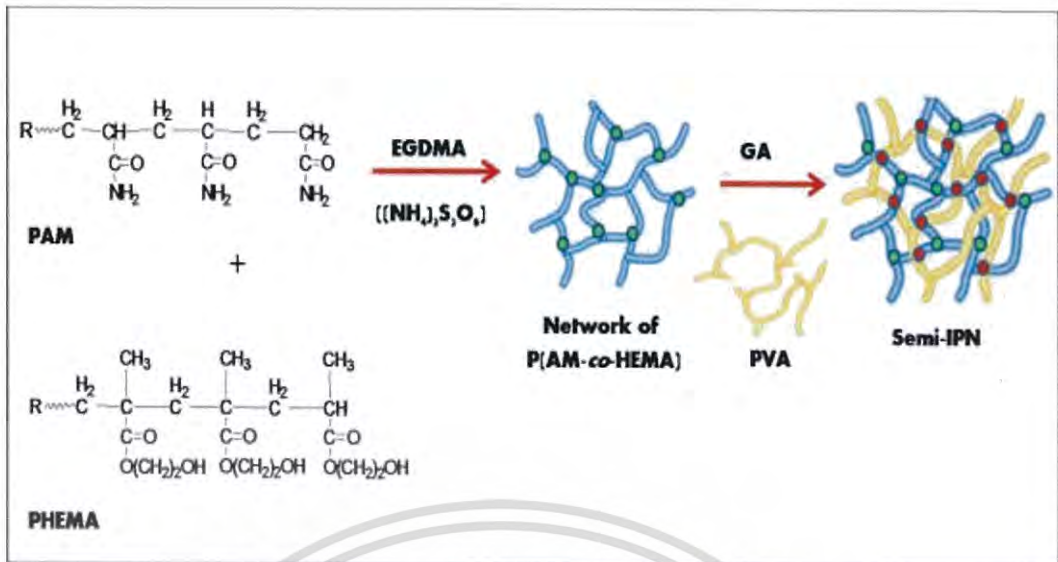
ไฮโดรเจลชนิดโครงร่างตาข่าย เตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสารละลายผสมของมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และสารเชื่อมขวางหรือบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วย จากนั้นเทลงไปในแม่พิมพ์ตัวอย่างเช่น การเตรียมไฮโดรเจลชนิด Acrylamide (AAm)/ 2-acrylamidoglycolic acid (AAGA)/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPS) ซึ่งเตรียมโดยใช้มอนอเมอร์ acrylamide (AAm), 2-acrylamidoglycolic acid (AAGA) และ 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid (AMPS) ด้วยวิธีการพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัล (free-radical polymerization) ที่อุณหภูมิ 40 °C ในตัวทำละลายที่มี KPS และ *N,N'*-methylene-bis-acrylamide (MBA) และ/หรือ ethyleneglycol dimethacrylate (EGDMA) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบฟรีแรดิคัลและสารเชื่อมขวาง [11] สมการปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.6 ลักษณะของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ด้วยวิธีนี้ จะมีลักษณะใส เหนียวและค่อนข้างคงรูป แต่มีขนาดได้ง่ายดังนั้นจึงได้พัฒนาวิธีการเตรียมไฮโดรเจลให้เป็นพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายชนิดแทรกสอด (Interpenetrating Network, IPN) ขึ้น ซึ่งเป็นการรวมกันของพอลิเมอร์สองเฟสที่มีความเข้ากันได้ยากให้สามารถเข้ากันได้ง่ายขึ้นโดยอาศัยหลักการการผสมทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งส่งผลให้ประสบปัญหาการแยกเฟสน้อยมาก เนื่องจากมีจุดเชื่อมขวางที่มากและยึดเหนี่ยวไว้อย่างแข็งแรง ดังนั้นไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอดจึงมีจุดเด่นในเรื่องของสมบัติเชิงกลที่ดีมาก และมีความสามารถในการดูดซับน้ำในเกณฑ์ที่ดีเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างตาข่ายแบบชนิดเดียว



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ AAm/AAGA/AMPS ไฮโดรเจล [11]

#### 4) ไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอด (Interpenetrating Network Hydrogel, IPN)

เทคนิคการสร้างตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอดเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมอย่างมากใน โดยสามารถปรับปรุงและพัฒนาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลได้เป็นอย่างดี ซึ่งตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอด IPN คือ การรวมกันของพอลิเมอร์สองชนิด ในลักษณะที่เป็นโครงร่างตาข่ายโดย อย่างน้อยจะต้องมีโครงร่างตาข่ายหนึ่งเกิดขึ้นมาก่อนหรือถูกสังเคราะห์ขึ้นมาก่อน จากนั้นสายโซ่ของ พอลิเมอร์อีกตัวหนึ่งจะเข้าไปแทรกสอดแล้วสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายอีกอันขึ้นมา การเตรียมไฮโดร เจลโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอด เช่นการเตรียมไฮโดรเจล ของ P(AM-co-HEMA)/PVA ทำได้โดยการสร้างโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์แรกขึ้นมาก่อนโดยการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชัน ระหว่าง acrylamide กับ hydroxyethyl methacrylate โดยมี EGDMA เป็นสารเชื่อมขวาง จากนั้นในขั้นตอนที่สองจะเติม glutaraldehyde (GA) ซึ่งเป็นสารเชื่อมขวางตัวที่สองลงไปในระบบ ซึ่งในขั้นตอนนี้สายโซ่ของพอลิเมอร์ poly(vinyl alcohol) (PVA) ซึ่งมีอยู่ในระบบอยู่แล้วจะเข้าไปทำ ปฏิกิริยา โดยเกิดพันธะเชื่อมขวางขึ้นพร้อมทั้งเกิดการแทรกสอดและเกี่ยวพัน [12] โดยมี GA เป็น สารเชื่อมไขว้ที่มีหมู่ฟังก์ชัน 2 หมู่ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้ทั้งหมู่ไฮดรอกซิลของ hydroxyethyl methacrylate และหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA และจะได้ลักษณะที่เป็นตาข่ายพอลิเมอร์ชนิดแทรกสอด กลไกการเตรียมแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเตรียมไฮโดรเจล (P(AM-co-HEMA)/PVA semi-IPN [12]

### 2.1.3 วิธีเตรียมไฮโดรเจล (Preparation methods of hydrogels)

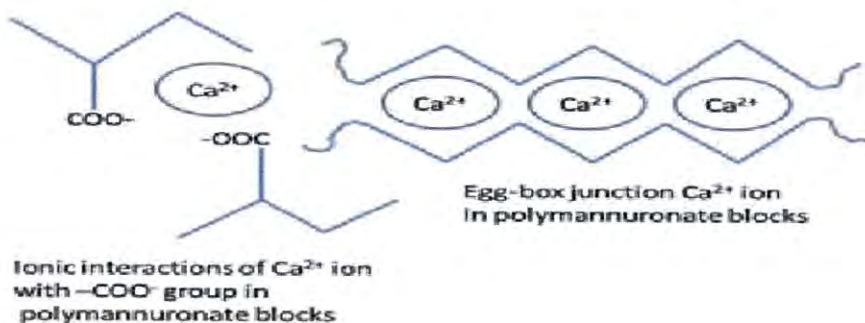
วิธีการเตรียมไฮโดรเจลถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีสมบัติตามต้องการ และเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานที่เจาะจง โดยไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้หลายวิธีดังนี้ [4]

#### 2.1.3.1 Physical crosslinking

วิธีการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสูงเนื่องจากสะดวกทำได้ง่าย และมีข้อดี คือ ไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมขวางซึ่งช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพมีหลายวิธี ได้แก่

##### 1) Ionic interaction

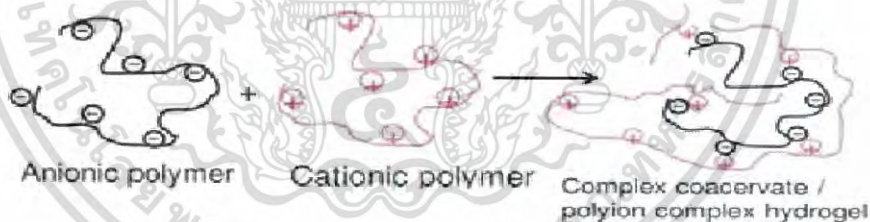
การเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้อาศัยการเกิดอันตรกิริยาแบบไอออนิกระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในสายโซ่ของไฮโดรเจล Bajpai และ Sharma [13] ได้เตรียมไฮโดรเจลโดยการเติม  $CaCl_2$  ลงใน polymanuronate ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอนไอออนิก คือ  $COO^-$  จึงทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นแอนไอออนิกและเกิดเป็นไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นไอออนิกพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพการเกิดการเชื่อมขวางเป็นไฮโดรเจลโดยการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของพอลิเมอร์ และ  $\text{Ca}^{2+}$  [13]

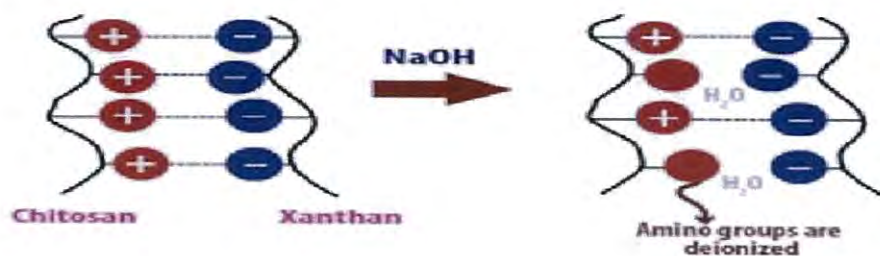
## 2) Complex coacervation หรือ Coacervation-Phase Separation

การเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้ ทำโดยการนำพอลิเมอร์ที่เป็นแอนไอออนิกมาเชื่อมขวางกับพอลิเมอร์ที่เป็นแคทไอออนิก [14] แสดงดังรูปที่ 2.9 หลักการพื้นฐานของวิธีนี้คือพอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมจะต้องมีประจุตรงข้ามกัน เมื่อนำมาผสมกันจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน Argin และคณะ [15] ได้เตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจลโดยนำ xanthan ซึ่งเป็นแอนไอออนิกพอลิเมอร์มาเชื่อมขวางกับ chitosan ซึ่งเป็นแคทไอออนิกพอลิเมอร์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนพอลิไอออนิกไฮโดรเจลดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล [14]

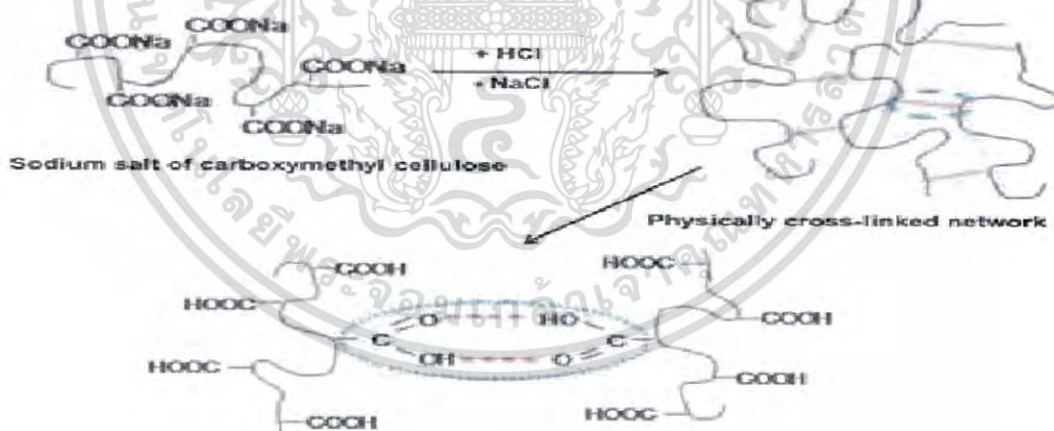
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนภาพการสังเคราะห์พอลิไอออนิกไฮโดรเจลของ xanthane/chitosan [15]

### 3) H-bonding

การเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้ อาศัยการสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล Xiao และ Gao [16] ได้เตรียมไฮโดรเจลชนิด carboxymethyl cellulose ดังรูปที่ 2.11 โดยการเชื่อมขวางโมเลกุลของ poly(carboxymethyl cellulose) ด้วยการลดค่าพีเอชของสารละลายพอลิเมอร์ เพื่อให้สารละลายมีความเป็นกรด และเกิดการถ่ายโอนประจุของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) จากนั้นโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกด้วยกันเองจนเกิดการเชื่อมขวางและเกิดเป็นเจลในที่สุด

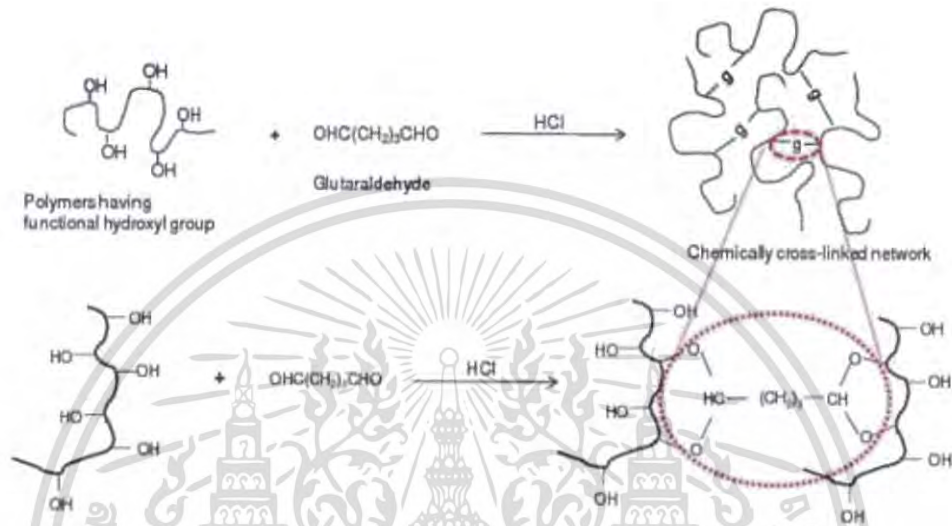


รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด Carboxymethylcellulose [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.2 Chemical crosslinking

การเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้ ใช้วิธีเชื่อมขวางทางเคมีซึ่งเกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงของมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ การเตรียมด้วยวิธีนี้ต้องอาศัยการเติมสารเชื่อมขวางเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์สองสายโซ่เข้าด้วยกันทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายดังรูปที่ 2.12

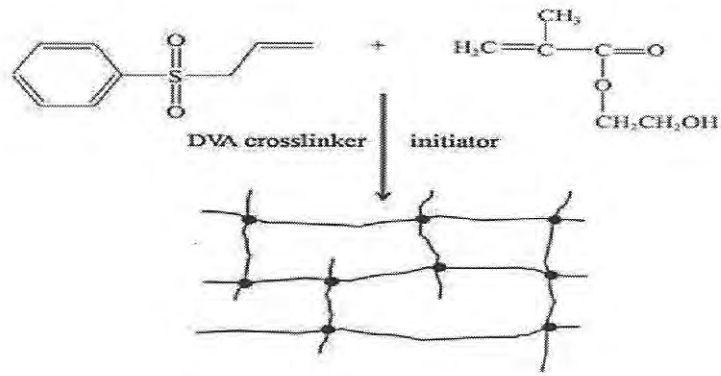


รูปที่ 2.12 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยการใช้สารเชื่อมขวาง EGDMA [17]

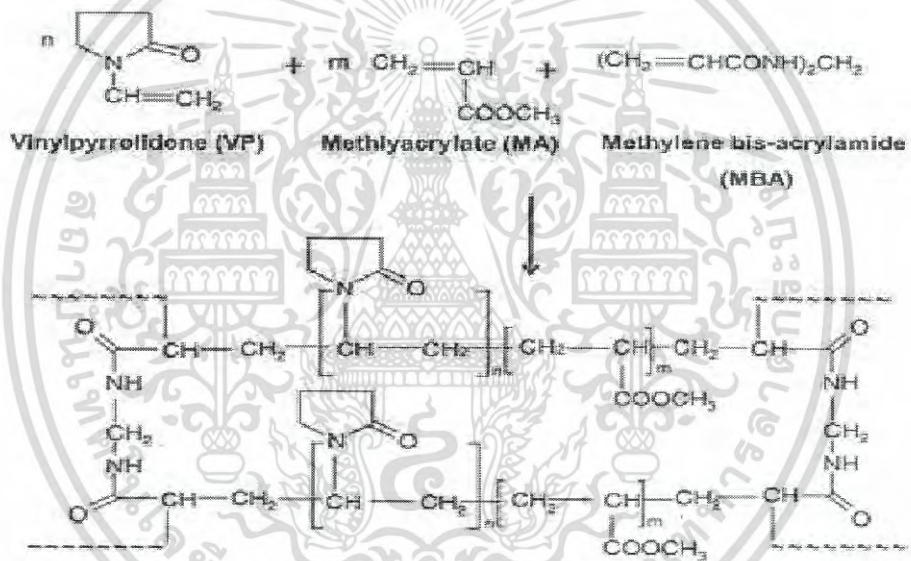
สารเชื่อมขวางที่นิยมใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้ ได้แก่ ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) และ glutaraldehyde (GA) เป็นต้น ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอเกี่ยวกับวิธีเตรียมไฮโดรเจลโดยอาศัยวิธีการเชื่อมขวางทางเคมี 2 แบบ ดังนี้

#### 1) การเติมสารเชื่อมขวาง (Chemical crosslinkers)

เป็นวิธีการเตรียมไฮโดรเจลโดยการเติมสารเชื่อมขวาง และอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่พอลิเมอร์ Zhihui และคณะ [18] ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลร่วมชนิด allyl phenyl sulfone/hydrophilic 2-hydroxyethyl methacrylate (APS-co-HEMA) โดยใช้ไดไวนิลเบนซีน (DVB) เป็นสารเชื่อมขวาง โดยนำเสนอกลไกในการเกิดปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.13 ขณะที่ Essawy และ Ibrahim [19] ได้ใช้ methylene bisacrylamide (MBA) เป็นสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด poly(VP-co-MA) (รูปที่ 2.14) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการขับไอออนโลหะหนัก



รูปที่ 2.13 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด APS-co-HEMA hydrogels [18]

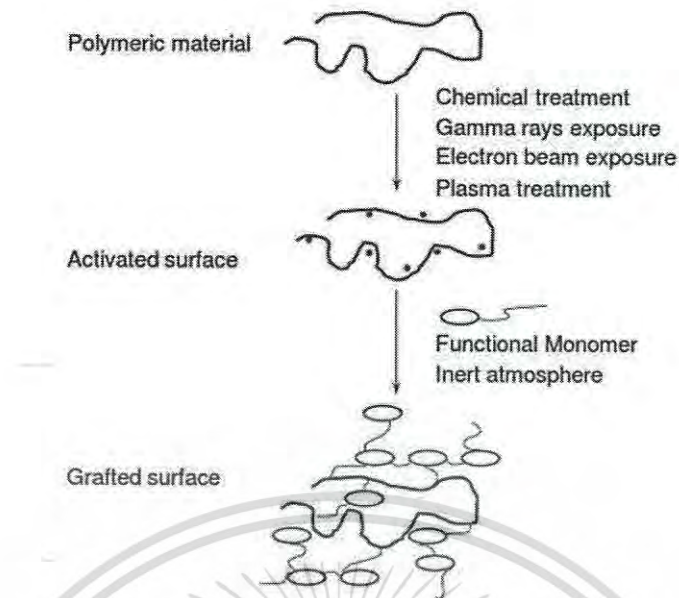


รูปที่ 2.14 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล poly(VP-co-MA) [19]

## 2) การกราฟต์ (Grafting)

เป็นวิธีการเตรียมไฮโดรเจลที่เกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอนอเมอร์บนสายโซ่พอลิเมอร์ โดยใช้สารเชื่อมขวางหรือรังสีความร้อนช่วยให้เกิดตำแหน่งว่องไว (active site) ขึ้นมา จากนั้นมอนอเมอร์จะเข้าไปกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์ และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันขึ้น จึงเกิดการเชื่อมไขว่กันภายในสายโซ่ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งการทำให้เกิดการกราฟต์ของมอนอเมอร์บนสายโซ่พอลิเมอร์สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

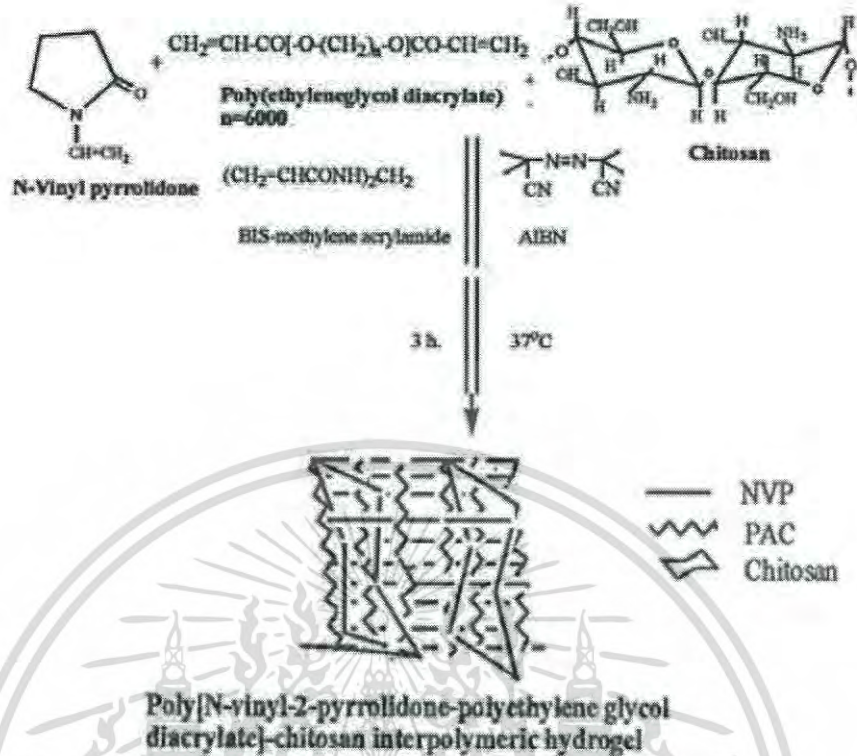


รูปที่ 2.15 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์ [20]

● Chemical grafting

เป็นวิธีเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้สารเคมีเชื่อมขวางทำให้เกิด active sites แล้วเติมมอนอเมอร์เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเมอร์ Saboktakin และคณะ [21] ได้เตรียมไฮโดรเจลโคพอลิเมอร์ของ carboxymethyl starch graft-poly(methacrylic acid) (CMS-g-PMAA) สำหรับประยุกต์ใช้ในการขนส่งยา ซึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาฟรีแรดิคัลพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้ bis-acrylamide เป็นสารเชื่อมขวางและสารประกอบเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา ในการสังเคราะห์ที่ใช้สารเชื่อมขวาง ทำให้เกิด active sites บนสายโซ่ของ carboxymethyl starch (CMS) จากนั้นจึงเติม poly(methacrylic acid) เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ จุฬารัตน์ นามเพ็ง และคณะ [22] ได้เตรียมกราฟต์โคพอลิเมอร์ของไคโตซาน และไดเมทิลอะซิโนเอทิลเมทาคริเลต (Chitosan g-PDMAEMA) และทำการเชื่อมขวางโมเลกุลของไคโตซานโดยใช้ GA เป็นสารเชื่อมขวาง โดยศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อระดับการเชื่อมขวาง จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ปริมาณ GA มาก การเชื่อมขวางของโมเลกุลไคโตซานจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณ GA มากเกินไปจะไม่มีผลต่อระดับการเชื่อมขวาง เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน  $-NH_2$  ของไคโตซานที่ทำปฏิกิริยากับ GA มีจำนวนจำกัด Shantha และ Harding [23] ได้เตรียมไฮโดรเจลกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ poly[NVP-PAC]-chitosan ดังรูปที่ 2.16 โดยการนำโคพอลิเมอร์ระหว่าง N-vinyl pyrrolidone (NVP) และ poly(ethylene glycol diacrylate) (PAC) เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของไคโตซาน โดยใช้สารเชื่อมขวาง N,N-methylenebisacrylamide (BIS) ในการเชื่อมโยงสายโซ่และใช้ azobisisobutyronitrile (AIBN) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการขนส่งยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

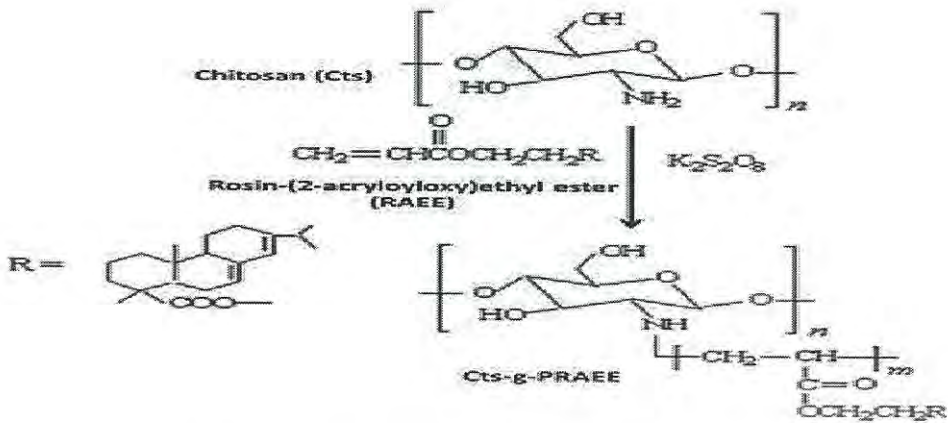


รูปที่ 2.16 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล poly[NVP-PAC]-chitosan [23]

- Radiation grafting

เป็นการเตรียมไฮโดรเจลกราฟต์พอลิเมอร์โดยอาศัยการฉายรังสีความร้อนที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมาไมโครเวฟ และลำแสงอิเล็กตรอน เป็นต้น เพื่อให้เกิด active site ก่อน แล้วจึงเติมมอนอเมอร์เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเมอร์ Yoshii และคณะ [24] ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลกราฟต์โคพอลิเมอร์ระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และแป้ง (PVA/starch grafted) โดยใช้รังสีแกมมาและลำแสงอิเล็กตรอน ช่วยให้เกิดการรวมตัวกันของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และแป้ง พบว่าการฉายรังสีช่วยในการสังเคราะห์ทำให้พอลิเมอร์เกิดการกราฟต์ได้ดี Duan และคณะ [25] ได้เตรียมไฮโดรเจลกราฟต์โคพอลิเมอร์ของ Rosin-(2-acryloyloxy)ethyl ester (RAEE)/chitosan (Cts) (Cts-g-PRAEE) ภายใต้การฉายรังสีไมโครเวฟ และใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาสำหรับการขนส่งยา การสังเคราะห์แสดงดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

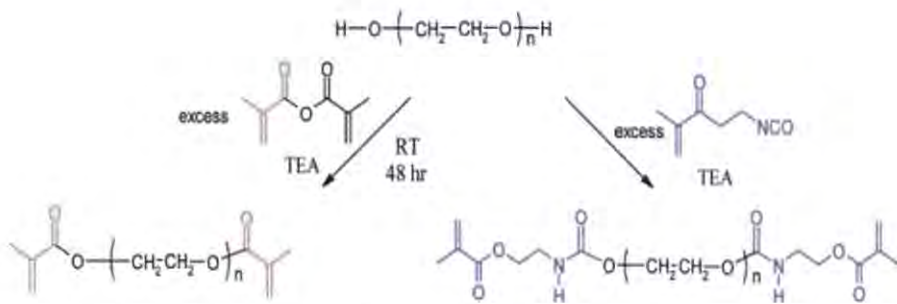


รูปที่ 2.17 การสังเคราะห์ Cts-g-PRAEE copolymer [25]

### 2.1.3.3 Radiation crosslinking

เป็นอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้โดยอาศัยการฉายรังสีเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมต่อของมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งเชื่อว่าการเตรียมไฮโดรเจลวิธีนี้ โครงร่างตาข่ายที่เกิดขึ้นจะช่วยปรับปรุงสมบัติทั้งด้านโครงสร้างและสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยส่วนมากแล้ววิธีนี้นิยมเตรียมเป็นสารละลายแบบชั้นตอนเดียว ซึ่งทำให้ลดขั้นตอนการสังเคราะห์ สะดวกรวดเร็วและยังช่วยลดต้นทุนในการผลิต กุลกีร์ติ โกยอนุกรรชกุล และกิตติชิน ปลั่งพงษ์พันธ์ [26] ได้เตรียมไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ผสมระหว่าง poly(vinyl alcohol) กับ poly(vinyl pyrrolidone) และพอลิเมอร์ผสมระหว่าง methyl hydroxyethyl cellulose กับ poly(pyrrolidone) โดยการฉายรังสีแกมมา เพื่อประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาดินเค็ม และพบว่าการเชื่อมขวางของไฮโดรเจลนั้นขึ้นกับปริมาณรังสี ซึ่งส่งผลต่อโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจล นั่นคือ ถ้าปริมาณรังสีต่ำจะส่งผลให้ไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมขวางต่ำ และเมื่อปริมาณรังสีสูงขึ้นไฮโดรเจลจะเกิดการเชื่อมขวางสูงขึ้น Sheng และคณะ [27] ใช้วิธีการฉายรังสีไมโครเวฟช่วยในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด poly(ethylene glycol) dimethacrylates (PEGDM) และ poly(ethylene glycol) urethane-dimethacrylates (PEGUDM) (รูปที่ 2.18) พบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์โดยการอาศัยคลื่นไมโครเวฟช่วย สามารถลดระยะเวลาในการสังเคราะห์และปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด PEGDM และ PEGUDM [27]

## 2.2 กัมธรรมชาติ (Natural gums)

กัม (Gum) จากแหล่งธรรมชาติเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์และอนุพันธ์ของพอลิแซคคาไรด์ส่วนใหญ่ได้จากพืช สามารถละลายได้ในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อนโดยสารละลายที่ได้มีความหนืดสูง แม้ว่าความเข้มข้นของกัมจะน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงมีการนำกัมจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมประเภทอาหารโดยใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดหรือสารข้น สารช่วยให้เกิดเป็นเจล อิมัลซิไฟเออร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นกาวได้ [28]

แบ่งออกเป็นกลุ่มตามแหล่งที่มา ได้แก่

### 2.2.1 Seaweed extracts

Seaweed extracts เป็นกลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเล ได้แก่ สาหร่ายสีแดง เช่น คาร์ราจีแนน (carrageenan) อะการ์ (agar) และเฟอเซลล์แลรอน (fucellaran) สาหร่ายสีน้ำตาล ได้แก่ อัลจีเนต (Alginate) [28]

#### 2.2.1.1. คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

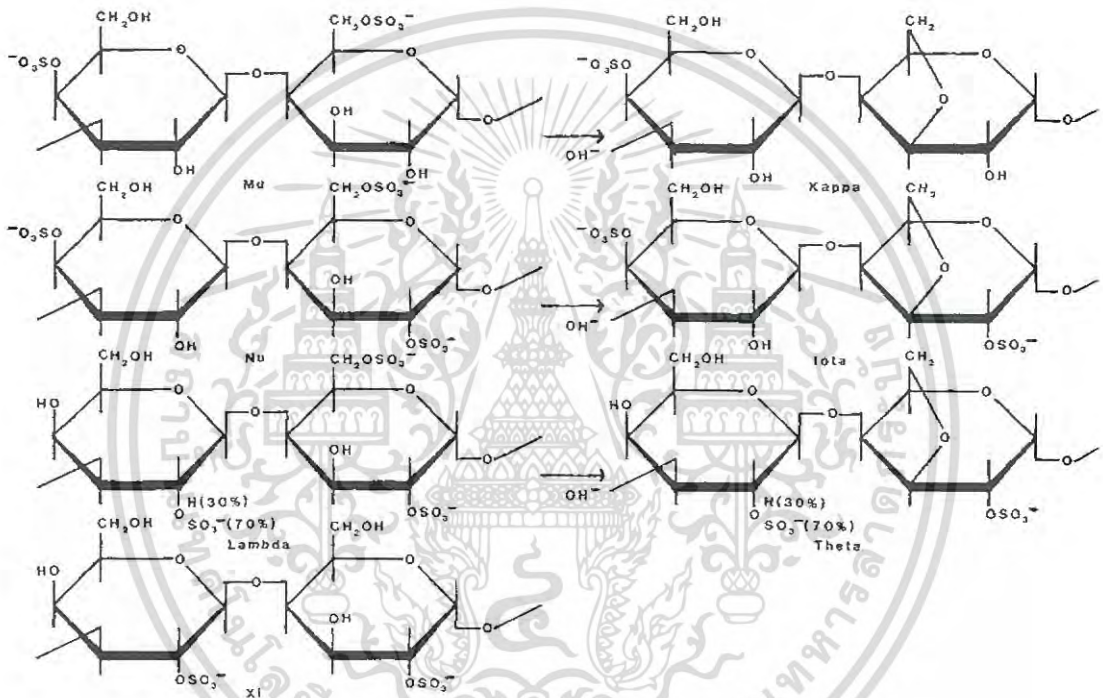
คาร์ราจีแนนเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ซึ่งชนิดที่ใช้ผลิตเป็นทางการค้า ได้แก่ *Euchema cottonii* และ *E. spinosum* มีโครงสร้างหลักเป็น galactose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ glycosidic linkage และเป็น sulphated polysaccharides ซึ่งคาร์ราจีแนนยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อยอีกหลายชนิดตามจำนวนและตำแหน่งของกลุ่ม ester sulphate และจำนวน 3,6 anhydro-D-galactose (3,6-AG) ได้แก่ Kappa, Iota และ Lambda ซึ่ง carrageenan ทั้ง 3 ชนิดนี้ ประกอบด้วยโครงสร้างของโพลีแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำๆ กันหลายหน่วย ดังรูปที่ 2.19 Unit-B แสดง 1,3-linked galactoside ในขณะที่ Unit A แสดง 1,4-linked galactoside

Kappa carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked galactoside มีกลุ่ม 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% จะส่งผลทำให้ไวต่อโปรแทสเซียมและมีความสามารถในการเกิดเจล ถึงแม้จะมีการตัดแปรให้มี 3,6-AG สูงที่สุดแต่อาจมีความแตกต่างกันที่จำนวนของ sulphate ที่ตำแหน่งที่ 4 ใน 1,3-linked galactoside และกลุ่ม sulphate ที่ตำแหน่งที่ 2 หรือ 6 ใน 1,4-linked galactoside จะทำให้คาร์ราจีแนนชนิด kappa มีสมบัติแตกต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Iota carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked galactose มีกลุ่ม sulphate ที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1,4-linked 3,6-AG มีกลุ่ม sulphate ที่ตำแหน่งที่ 2 มีสารตั้งต้นเป็น nu-carrageenan ความแตกต่างระหว่าง anhydride ในคาร์ราจีแนนชนิด kappa และ iota คือ จำนวนกลุ่ม sulphate ที่ตำแหน่งที่ 2 ใน 1,4-linked galactoside ของ iota จะมีมากกว่า kappa ประมาณ 25-50% ความไวต่อโปแตสเซียมลดลง ซึ่งจะมีผลทำให้ได้เจลที่อ่อนนุ่ม แต่ถ้ามี sulphate ที่ตำแหน่งที่ 2 มากถึง 80% จะไวต่อแคลเซียม

Lambda carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked galactose ซึ่งมีกลุ่ม sulphate ที่ตำแหน่งที่ 2 ประมาณ 70% และ 1,4-linked galactose มีกลุ่ม sulphate ที่ตำแหน่งที่ 6 ซึ่ง carrageenan ชนิดนี้จะไม่เกิดการปิดวงเป็น 3,6 AG จึงมีผลทำให้ไม่มีสมบัติในการเกิดเจล



รูปที่ 2.19 Repeating units of carrageenan[29]

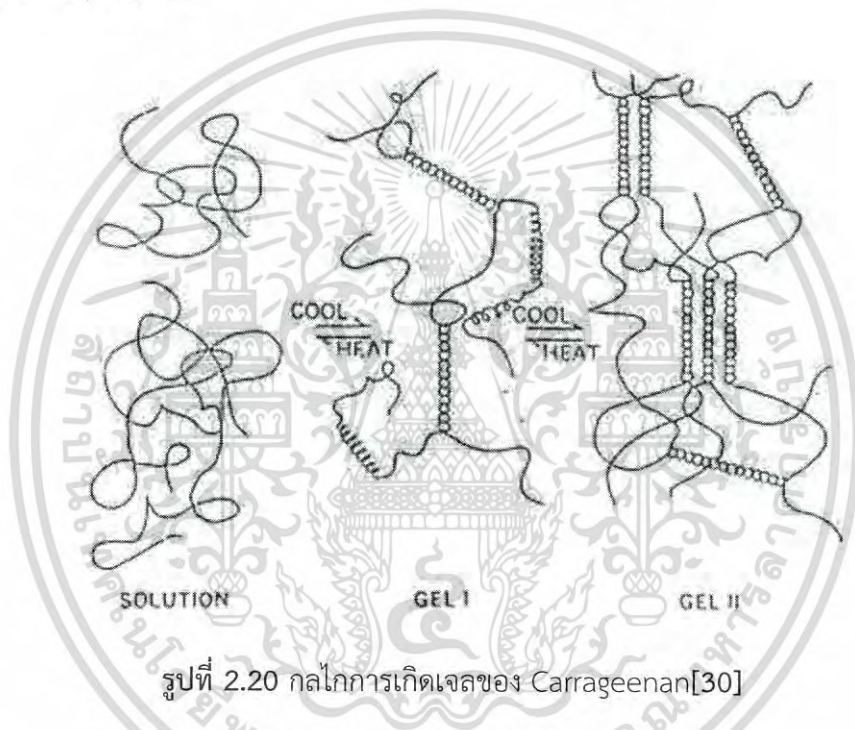
คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายได้ในน้ำร้อน ถ้าเป็นเกลือ sodium ของ Carrageenan ชนิด Kappa และ Iota จะสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ในขณะที่เกลือของอออนชนิดอื่นๆ เช่น โปแตสเซียมหรือแคลเซียมไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วน Carrageenan ชนิด lambda จะละลายได้ในน้ำเย็นโดยไม่ขึ้นกับชนิดของอออน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ Carrageenan และอออนที่เกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota ต้องใช้อุณหภูมิในการละลายมากกว่า 70 °C นอกจากนี้คาร์ราจีแนนทุกชนิดจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายใน water miscible solvent เช่น alcohol และ propylene glycol

คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota มีความสามารถที่จะเกิดเจลได้เมื่อสารละลายของคาร์ราจีแนนเย็นตัวลง ซึ่งเจลเหล่านี้จะเป็น thermoreversible aqueous gel คือ สามารถที่จะละลายเมื่อได้รับความร้อนและเกิดเจลอีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง ในปี ค.ศ. 1969 Rees [30] ได้กล่าวว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 149219 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคาร์ราจีแนนละลายน้ำจะเกิดเจล เนื่องจากเกิดการ form เป็น double helix ที่อุณหภูมิต่ำเหนือจุดหลอมเหลวของเจล อุณหภูมิและการปั่นกวนจะสามารถทำให้ helices คลายตัวเป็น random coil เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการสร้าง polymer network 3 มิติ แต่ละสายของโพลิเมอร์จะรวมตัวกันเข้าเกิด junction point (gel I) และเมื่อปล่อยให้เย็นลงอีกจะเกิดการเกาะกันของ junction point (gel II) มากขึ้น ทำให้เกิดการแข็งตัวของเจลดังรูปที่ 2.20 การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น Kappa carrageenan เมื่อเติม  $K^+$  จะเกิด elastic gel ถ้าเติม  $Ca^{2+}$  จะเกิด rigid gel ส่วน Iota carrageenan เมื่อเติม  $Ca^{2+}$  จะเกิด elastic gel ถ้าผสมคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับ Iota เข้าด้วยกันจะทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลได้มากขึ้น เจลที่ได้มี elastic เพิ่มขึ้นและเกิด syneresis น้อยลง และนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น dessert gels, whipped topping และ fluid milk products



รูปที่ 2.20 กลไกการเกิดเจลของ Carrageenan[30]

ถ้าผสม locust bean gum ใน kappa carrageenan จะช่วยเสริมให้มี gel strength เพิ่มขึ้น เปลี่ยนลักษณะเนื้อเจลจากที่เปราะและแตกง่ายเป็นมีความยืดหยุ่นดีและเกิด syneresis ลดลง อัตราส่วนที่เหมาะสมของ kappa ต่อ locust bean gum คือ 2:1 จะทำให้เกิด gel strength เพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วน 1:4 จะทำให้เกิด syneresis น้อยที่สุด ในการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารต้องทำให้ทั้งคาร์ราจีแนนและ locust bean gum ละลายให้หมดเสียก่อนที่จะเกิดเจล นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารเช่น fish gels และ dessert gels แต่การผสม locust bean gum กับ Iota carrageenan จะไม่มีผลต่อ gel strength แต่จะมีผลต่ออุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจล (gelling temperature) และความชื้นหนืดของเจล ถ้าผสม locust bean gum 1 ส่วนกับคาร์ราจีแนนชนิด Iota 10 ส่วน จะช่วยทำให้เกิดเจลที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเจลที่ได้มีสมบัติเป็น pseudoplastic [28]

คาร์ราจีแนนส่วนใหญ่จะคงตัวที่ pH เป็นกลางถึงเป็นด่าง ในขณะที่ถ้า pH ต่ำจะเกิดการ hydrolysis ของ glycosidic linkage มีผลทำให้สูญเสียความหนืดและการเกิดเจล นอกจากนี้ความร้อนยังเป็นตัวเร่งการเกิดไฮโดรไลซ์มากขึ้นที่ pH ต่ำ คาร์ราจีแนนสามารถนำมาใช้ร่วมกับวัตถุบ่อน้ำตาลได้ เช่น แป้ง น้ำตาล กัม เนื่องจากคาร์ราจีแนนเป็น anionic ซึ่งจะเข้ากันได้กับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

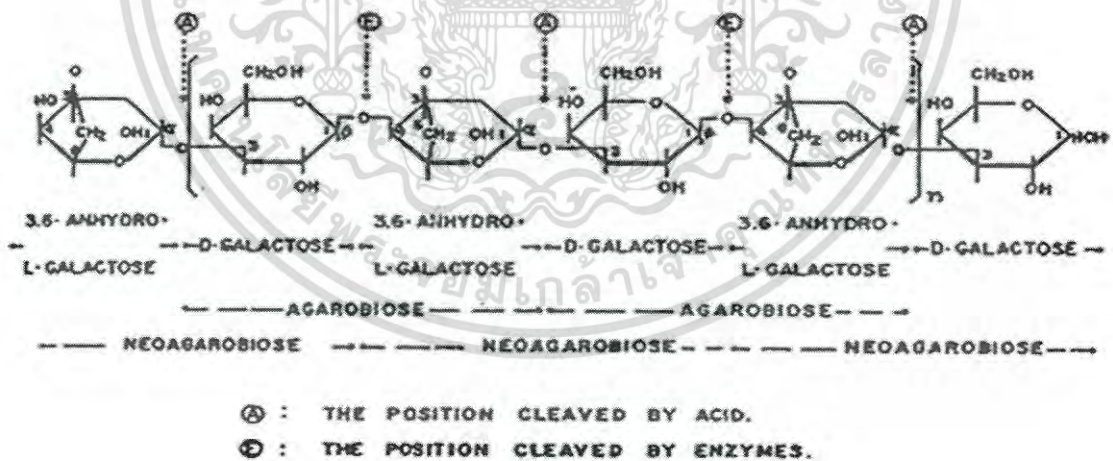
anionic อื่นๆ รวมทั้งกับ nonionic อย่างไรก็ตามคาร์ราจีแนนจะไม่สามารถเข้ากันกับ cation เช่น ปฏิกริยากับ gelatin และโปรตีนอื่นๆ

ในการนำคาร์ราจีแนนไปใช้ในอุตสาหกรรมต้องคำนึงถึง Ionic content ของผลิตภัณฑ์นั้นๆ ด้วย เช่น ใช้คาร์ราจีแนนผสมลงในอาหารที่มีโปรตีน หมู้อัลเฟตในโมเลกุลของคาร์ราจีแนน จะทำปฏิกริยากับหมู้อัลเฟตที่มีประจุในโมเลกุลของโปรตีนได้ ได้แก่ การนำ Carrageenan ไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์นม เช่น Calcium fortified milk, Chocolate milk, Mousse, Pudding และ Ice cream ซึ่งจะเติมคาร์ราจีแนนลงในส่วนผสมของไอศกรีมเพื่อเป็นสารเพิ่มความคงตัว ช่วยให้ส่วนผสมของไอศกรีมผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ง่าย และไม่มีส่วนที่เป็นของเหลวแยกตัวออกมา (whey off) ระหว่างการเก็บรักษา ปริมาณคาร์ราจีแนนที่ใช้ประมาณ 0.01-0.02 % ของส่วนผสมทั้งหมด นอกจากนี้ยังนำไปใช้ใน Water-based food systems เช่น Fruits in gel, Fruit beverages, Pie filling และ Surimi เป็นต้น

### 2.2.1.2 อะการ์ (Agar)

อะการ์เป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ที่นิยมใช้มากคือ *Gelidium cartilagineum*, *Gracilaria confervoides* และ *Pteroclaia capillacea* ซึ่งสองชนิดแรกใช้ผลิตอะการ์ทางการค้า ประเทศที่ผลิตได้แก่ ญี่ปุ่น สเปน ชิลี และเกาหลี

อะการ์ประกอบด้วย agarose และ agaropectin ซึ่ง agarose เป็นพอลิแซคคาไรด์ ประกอบด้วย 1,4 linked 3,6-anhydro-L-galactose และ 1,3 linked  $\beta$ -D-galactose เรียงสลับกันไป (รูปที่ 2.21) ส่วน agaropectin เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตที่มีโครงสร้างเหมือน agarose แต่ 3,6-anhydro-L-galactose บางโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยซัลเฟตประมาณ 5-8 %



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของ agarose[31]

อะการ์ไม่ละลายในน้ำเย็น ละลายได้อย่างช้า ๆ ในน้ำร้อน ละลายได้ดีที่ความเข้มข้นไม่เกิน 4% ในน้ำเดือด ถ้าใช้ที่ความเข้มข้นสูงให้ autoclave ที่ 120°C เพื่อช่วยในการละลาย อะการ์มีความสามารถดูดน้ำได้ดีทำให้เกิดเจลได้ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.04 % เกิดเจลได้โดยไม่ต้องอาศัยสารอื่น ๆ ช่วยในการเกิดเจลซึ่งการเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า physical gels โดยเมื่อโมเลกุลของ agarose ละลายอยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็น random coil และเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิเกิดเจล จะเกิดการจับกันของสายพอลิเมอร์เป็นแบบ B1 (antisymmetric double helices) หรือ B2 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(symmetric double helices) และจะได้โครงสร้างลักษณะเป็นแบบ C, D (ส่วนบน) หรือ C, D (ส่วนล่าง) ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.22 การที่จะเกิดรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าลดลงเร็วจะได้โครงสร้างเป็นแบบรูป B1 และ C, D (ส่วนบน) และเจลที่ได้สมบัติเป็น thermoreversible gel โดยทั่วไปอุณหภูมิเกิดเจลประมาณ 35-40 °C และมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 85-90 °C เจลที่ได้มีลักษณะเนื้อแข็ง ชุ่มสีเหลืองอ่อน เปราะแตกได้ง่าย (brittle) เนื้อสัมผัสเป็นแบบ juiciness และ crunchy และเกิด syneresis การเติมน้ำตาลหรือเดกซ์ตรินหรือผสมกับ locust bean gum จะทำให้เจลที่เกิดขึ้นมี gel strength และความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ลดการเกิด syneresis แต่ถ้าเติมแป้งหรือโซเดียมอัลจิเนตจะให้ผลตรงกันข้ามคือทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแรงลดลง เจลที่เกิดจากอะการันความร้อนเพราะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลและจุดหลอมเหลวของเจลมีช่วงห่างกันมาก

การใช้อะการันในอุตสาหกรรมต่างๆ มีดังนี้

- Bakery Industry ใช้อะการันเพื่อแก้ปัญหาการหลอมตัวของน้ำตาลที่เคลือบ (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 ผงเพื่อใช้เตรียม flavor และผลิต soup
- Vegetarian and health products ใช้เป็น Bulking agent แทนแป้ง
- ใช้ทางเภสัชศาสตร์จะใช้เป็น slow release ingredient เพราะอะการันไม่สามารถย่อยในร่างกายมนุษย์ได้เนื่องจากไม่มีเอนไซม์
- ใช้เป็น tissue culture media ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ



รูปที่ 2.22 กลไกการเกิดเจลของ Agarose [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.3 เฟอเซลลาแรน (Furcellaran)

เฟอเซลลาแรนหรือที่เรียกกันว่า Danish agar เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ซัลเฟตชนิดหนึ่ง ที่สกัดได้จากสาหร่ายสีแดง (*Furcellaria fastigiata*) ซึ่งพบมากในประเทศเดนมาร์ก โครงสร้างประกอบด้วย D-galactose-2-sulfate, D-galactose-4-sulfate, D-galactose-6-sulfate ประมาณ 16-20 % และ 3,6-anhydro-D-galactose-2-sulfate ประมาณ 30-33 % ลักษณะโมเลกุลเป็นแบบมีกิ่งแขนง (branch) ที่ตำแหน่ง C3 และ C6 เฟอเซลลาแรนมีโครงสร้างคล้ายคาร์ราจีแนน แต่แตกต่างกันที่ปริมาณซัลเฟต คือ furcellaran มีหมู่ ซัลเฟต 1 หมู่ต่อมอนอเมอร์ของ galactose 3-4 หน่วย ส่วนคาร์ราจีแนน ชนิด kappa มีหมู่ sulfate 1 หมู่ ต่อมอนอเมอร์ของ galactose 2 หน่วย

เฟอเซลลาแรนสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้หลายประเภท ได้แก่

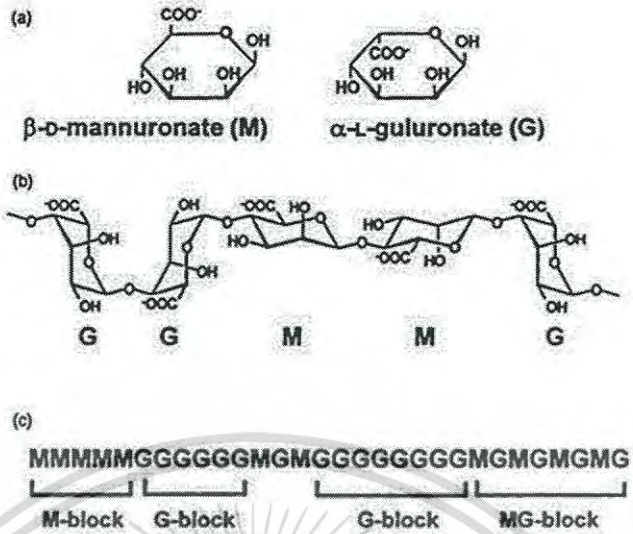
- นำมาเติมในนํ้านมสำหรับทำ pudding เพื่อทำให้เกิดเจลได้ดี
- นำมาใช้ทำแยมผิวส้ม (marmalade) ได้ดีกว่าเพคตินเพราะเกิดเจลได้เร็วแม้จะมีปริมาณนํ้าตาลต่ำกว่า 50-60 % และยังใช้ปริมาณเฟอเซลลาแรนเพียง 0.2-0.5 % เพื่อให้เกิดเจล
- ใช้เติมในเบียร์เพื่อตกตะกอนโปรตีนทำให้เบียร์ใสขึ้น

### 2.2.1.4 อัลจิเนต (Alginate)

อัลจิเนตหรืออัลจินเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ในการผลิตอัลจิเนตเป็นอุตสาหกรรมสาหร่ายทะเลที่ใช้ ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* มีอัลจินประมาณ 14-19 %, *Laminaria cloustoni* และ *Laminaria digitata* มีอัลจินประมาณ 15-40 % ปริมาณที่พบจะขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั่ว ๆ ไปในโลก ประเทศที่ผลิตอัลจิเนต มาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น

อัลจิเนตเป็น unbranched binary copolymer ของ 1,4-D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วย homopolymeric regions ของ G และ M ที่เรียกว่า G- และ M-blocks ตามลำดับและยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks ดังรูปที่ 2.23 สัดส่วนของ copolymer และโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าพอลิเมอร์มี G ในปริมาณที่สูงจะมีสมบัติเป็นเจลที่แข็งเมื่อมีไอออนประจุบวก (polyvalent metal cation) ในโครงสร้าง แต่ถ้าพอลิเมอร์มี M ปริมาณสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม และมีสภาวะในการเกิดเจล ที่กว้างกว่า อัลจิเนตที่ผลิตจำหน่ายเป็นการค้ามีหลายอนุพันธ์จึงมีสมบัติการละลายน้ำที่แตกต่างกัน เช่น อนุพันธ์ ของเกลือ  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$  และยังมีผลิตในรูปของ propylene glycol alginate ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของ alginic acid กับ propylene oxide ภายใต้อุณหภูมิ อนุพันธ์เหล่านี้จะละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายอัลจิเนตที่เพิ่มขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล และการมีโลหะประจุบวก

อัลจิเนตบางชนิดมีสมบัติเป็นเจลโดยจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับ  $Ca^{2+}$  โครงสร้างของเจลมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (egg box) โดยมี  $Ca^{2+}$  เกาะอยู่กับสายโพลิเมอร์ดังรูปที่ 2.24 คุณสมบัติที่ดีของอัลจิเนตคือ ทำให้เกิด Irreversible gel ในน้ำเย็นเมื่อมี  $Ca^{2+}$  รวมอยู่ด้วย ซึ่งสมบัติในการเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำนี้ทำให้อัลจิเนต แตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากสาหร่ายสีแดง



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของอัลจิเนตชนิดต่างๆ[33]



รูปที่ 2.24 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model) [28]

อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 โดยเติมในอาหารกระป๋อง บางชนิด ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว ทำให้มีลื่นขึ้นคงตัว สารทำให้เกิดเจล และสารยับยั้งการเกิด syneresis ตัวอย่างเช่น

- Propylene glycol alginate ใช้ในน้ำสลัด (salad dressing) และเปียร์ เพราะสามารถละลายได้ดีที่ค่า pH ต่ำ
- โซเดียมอัลจิเนตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายมะนาวที่แช่เย็นเพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่างกระบวนการ freeze-thaw
- ใช้เคลือบผิวชิ้นเนื้อปลาก่อนนำไปแช่เยือกแข็งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด freeze burn กับชิ้นเนื้อปลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม, frozen dessert, sherbet, processed cheese และใช้เป็น Alginate gel restructured products เช่น Onion rings และ Shrimp-like fish products

## 2.2.2 Plant extract

สารสกัดที่ได้จากพืชและเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่สำคัญคือ เพคติน (pectin) สกัดได้จากผลไม้ตระกูลส้มและเพคตินยังพบเป็นส่วนประกอบในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล ฝรั่ง เป็นต้น [28]

### 2.2.2.1 เพคติน (Pectin)

เพคตินได้จากการสลาย Protopectin ที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อพืช ประกอบไปด้วย neutral sugars หลายชนิด เช่น rhamnose, galactose, arabinose และน้ำตาลอื่นๆ จำนวนเล็กน้อย เพคตินเป็น heteropolysaccharide ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยพอลิเมอร์ของ D-galacturonic acid (ประมาณ 65 % โดยน้ำหนัก) เป็นสายหลักหรือที่เรียกว่า smooth regions และส่วนที่มีกิ่งแขนง (hair regions) อาจเป็น arabinose, galactose, rhamnose และบางส่วนของหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ที่ D-galacturonic acid จะถูกเปลี่ยนเป็นหมู่เอสเทอร์ด้วยหมู่เมทิล (-CH<sub>3</sub>) เป็นเมทิลเอสเทอร์และมี degree of methylation (DM) แตกต่างกัน จึงทำให้เพคตินจากวัตถุดิบแต่ละแหล่งมีโครงสร้างที่แตกต่างกันและเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนมากดังรูปที่ 2.25 เป็นโครงสร้างตามสมมุติฐานของ apple pectin โดย Schols และคณะ (1998)

DM คืออัตราส่วนของหมู่ methylated galacturonic acid ต่อหมู่ galacturonic acid ทั้งหมดที่มีอยู่ในโมเลกุลของเพคติน จึงทำให้แบ่งประเภทของเพคตินตามค่า DM ได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิด Low methoxyl (LM) ซึ่งจะมีค่า DM น้อยกว่า 50 % และชนิด high methoxyl (HM) ซึ่งมีค่า DM มากกว่า 50 % (รูปที่ 2.26) 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 % ที่ค่า pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 2.9-5.5 เจลที่ได้จะเป็นชนิด thermoreversible ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจะมีความอ่อนนุ่มและยืดหยุ่นมากกว่าเจลที่ได้จากเพคตินชนิด HM หรืออะการ์ (รูปที่ 2.27)

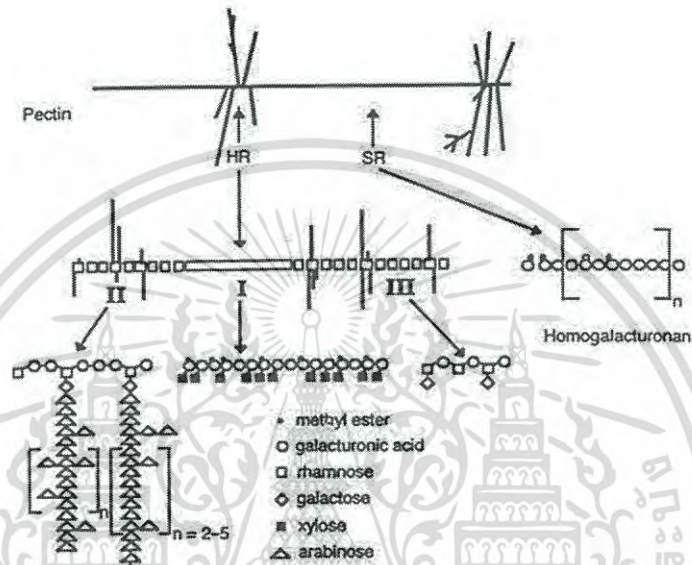
เพคตินชนิด HM ใช้กับอาหารที่มีค่า pH 2.0-3.5 และต้องมีของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมากกว่า 55 % ถึงจะเกิดเจลได้ เพคตินชนิดนี้ยังแบ่งย่อยออกเป็นอีก 3 ชนิดตาม gelling time คือ เกิดเจลได้ช้า (slow set) ปานกลาง (medium set) และรวดเร็ว (rapid set) ซึ่งจะแตกต่างกันที่ค่า DM เช่น ชนิดเกิดเจลได้ช้าจะมีค่า DM ประมาณ 60 % และชนิดเกิดเจลได้เร็วมีค่า DM ประมาณ 75 % การนำเพคตินมาใช้ประโยชน์จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร

เพคตินนิยมใช้ในอาหารประเภท Jam, Jelly, Bakery filling, fruit topping, เครื่องดื่มและ ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ เช่น

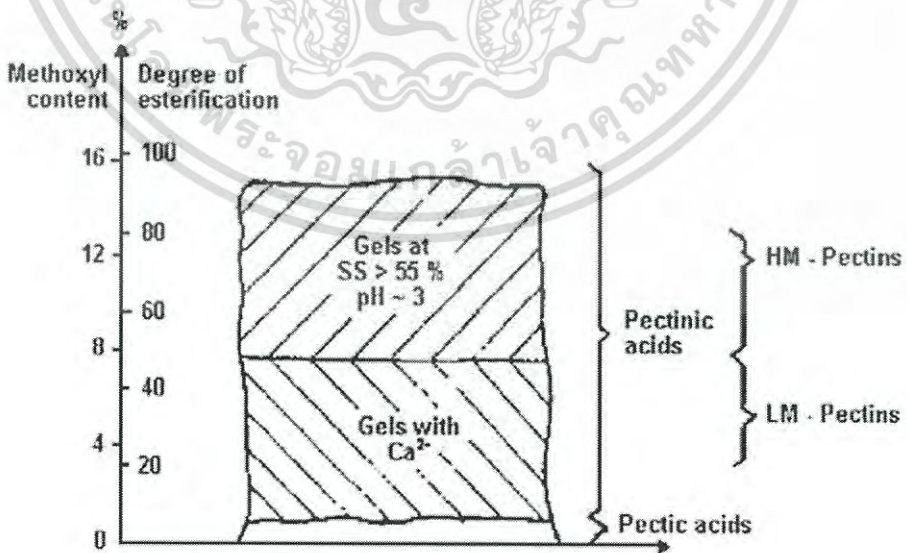
- การเติมเพคตินชนิด LM จำนวนเล็กน้อยลงในโยเกิร์ตจะช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อของโยเกิร์ตให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สำหรับน้ำผลไม้เข้มข้นจะเติมเพคตินชนิด HM เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอนุภาคของเนื้อผลไม้ ทำให้อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอน
- ในน้ำผลไม้ผงสำเร็จรูปจะมีการเติมเพคตินชนิด HM ลงไปเพื่อให้เกิดความรู้สึกเหมือนน้ำผลไม้ธรรมชาติขณะดื่ม
- ในผลิตภัณฑ์ bakery เช่น jam ที่นำมาเติมใน tart จะให้ลักษณะผิวเรียบเป็นเงาหลังจากอบแล้ว และทนต่อการอบ

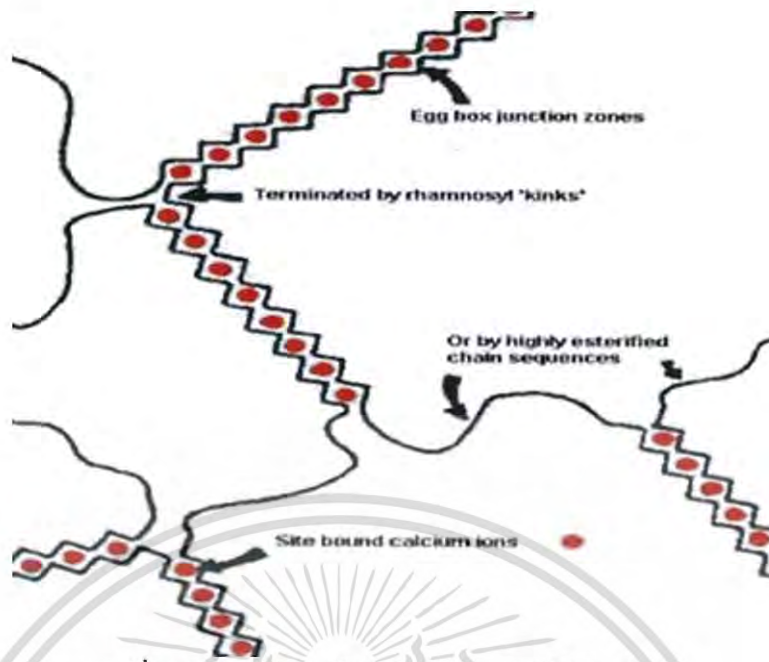


รูปที่ 2.25 แบบจำลองโครงสร้างของ apple pectin I xylogalacturona, II region with arabinan side chain, III rhamnogalacturonan region making up the “hairy region” [34]



รูปที่ 2.26 ชนิดและสมบัติของเพคติน [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 กลไกการเกิดเจลของเพคตินชนิด LM [28]

### 2.2.3 Plant seed gums

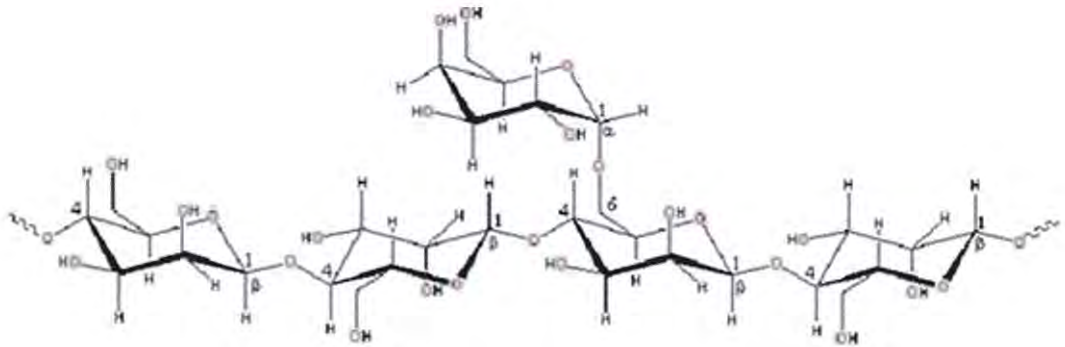
เป็นกลุ่มของ galactomannan gums ที่สกัดได้จากเมล็ดของพืช *Ceratonia* และ *Cyamopsis* คือ Locust bean gum และ Guar gum ตามลำดับ [28]

#### 2.2.3.1 Locust bean gum

Locust bean gum ได้จาก endosperm ของเมล็ดต้น carob (*Ceratonia siliqua*) บางครั้งเรียกว่า carob seed gum ต้น carob เป็นพืชที่ปลูกในแถบเมดิเตอร์เรเนียน โมร็อกโคและโปรตุเกส Locust bean gum ไม่สามารถละลายในน้ำเย็นต้องใช้ความร้อนช่วยในการละลาย จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูงที่สุดเมื่อรับความร้อนสูงถึง  $95^{\circ}\text{C}$  หลังจากนั้นจึงทำให้เย็นลง ปัจจุบันได้มีการพัฒนา Locust bean gum ให้มีสมบัติพองตัวได้ในน้ำเย็นและนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์นม โครงสร้างของ Locust bean gum เป็น พอลิเมอร์สายยาวของ mannose ที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของ galactose ต่อกันด้วยพันธะ 1,6 อัตราส่วนของ mannose ต่อ galactose เป็น 4:1 ดังรูปที่ 2.28 โดยลักษณะโครงสร้างเช่นนี้จึงทำให้โมเลกุลมีส่วนที่เป็นสายหลักของ mannose ที่เรียกว่า smooth สลับกับส่วนที่เป็นกิ่งแขนง

Locust bean gum ไม่สามารถเกิดเจลได้ต้องนำมาผสมกับ Xanthan gum จึงจะทำให้เกิดเจลได้หรืออาจผสมรวมกับ Kappa carrageenan จะช่วยเพิ่ม gel strength และลดการเกิด syneresis หน้าที่หลักของ Locust bean gum คือ เพิ่มความหนืดและความคงตัวให้กับอิมัลชันและยับยั้งการเกิด syneresis ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ได้แก่ อาหารกระป๋อง ซอสขนมหวาน 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 สำหรับเครื่องตีคนเป็นโรคเบาหวาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



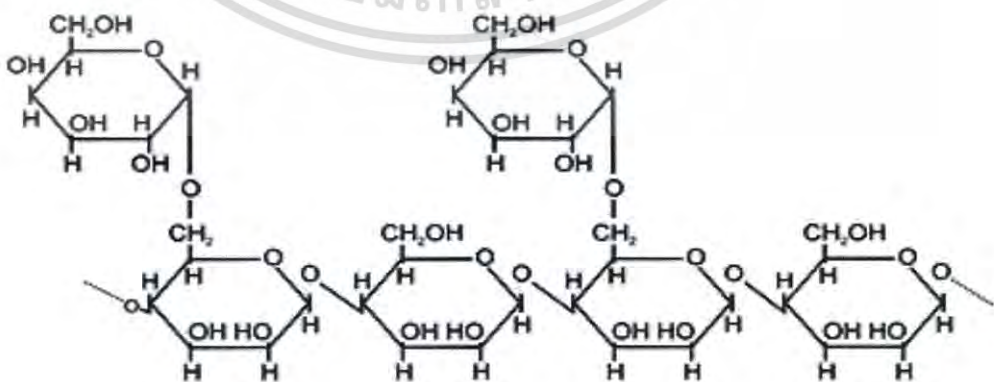
รูปที่ 2.28 โครงสร้างโมเลกุลของ Locust bean gum [35]

### 2.2.3.2 Guar gum

Guar gum ได้จาก endosperm ของเมล็ดต้น guar (*Cyamopsis tetragonolobus*) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน ปัจจุบันมีปลูกในรัฐเท็กซัส สหรัฐอเมริกา โครงสร้างของ Guar gum เป็น พอลิเมอร์สายยาวของ mannose ที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของ galactose โดยทุก ๆ 2 โมเลกุลของ mannose ต่อกับ 1 โมเลกุลของ galactose ด้วยพันธะ 1,6 ทำให้อัตราส่วนของ mannose ต่อ galactose เป็น 2:1 ซึ่งแสดงว่า Guar gum มีกิ่งแขนงของ galactose มากกว่า locust bean gum (รูปที่ 2.29)

Guar gum มีสมบัติเป็น non-gelling แต่กระจายตัวและอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัวและอุ้มน้ำ สามารถเกิด interact กับ Xanthan gum ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลาย Guar gum ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่า pH เวลา ความเข้มข้น และขนาดของอนุภาค Guar gum เป็น non-ionic และทนต่อค่า pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-10 ทำให้สามารถเติมสารอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่า 5 % จะมีผลต่อการอุ้มน้ำและเกิดเจล Guar gum มีความสามารถในการอุ้มน้ำ ได้สูงสุดที่ค่า pH 7.5-9.0

ผลิตภัณฑ์อาหารที่นำ Guar gum ไปใช้ได้แก่ ขนมหวาน ซอส ชุป ไอศกรีม น้ำสลัด ชุปผงและใช้เป็นส่วนผสมของน้ำเกรวี่



รูปที่ 2.29 โครงสร้างโมเลกุลของ Guar gum [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

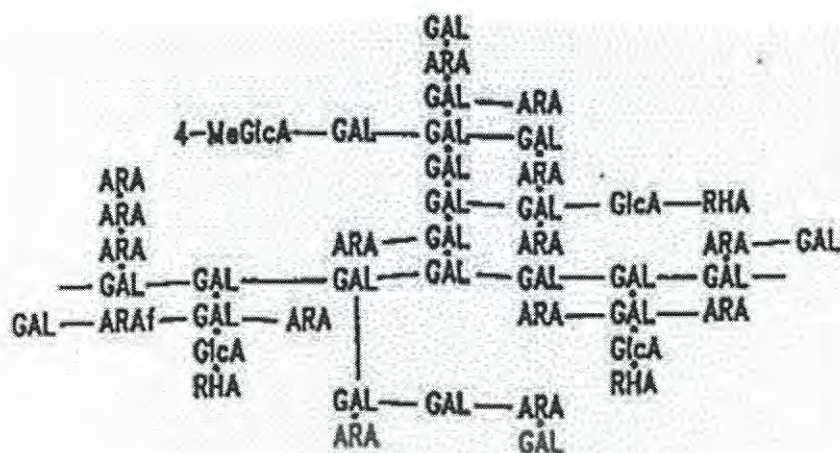
## 2.2.4 Plant exuded gums

เป็นกลุ่มของ gums ที่ได้จากยางต้นไม้มีลักษณะเป็น dried resins ซึ่งจะไหลออกมาเมื่อต้นไม้มิมีบาดแผล gums ในกลุ่มนี้ได้แก่ Gum arabic, Gum ghatti, Gum karaya และ Gum tragacath [28]

### 2.2.4.1 Gum Arabic

Gum arabic หรือ Gum acacia เป็น gum ที่ได้จากต้น Acacia Senegal และ Acacia seyal ซึ่งเป็น พอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อนและมีไนโตรเจนจำนวนเล็กน้อย องค์ประกอบทางเคมีจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามแหล่งที่มา ภูมิภาค และอายุของต้น ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานที่อยู่ในโมเลกุลประกอบด้วยน้ำตาลและอนุพันธ์ของน้ำตาล คือ galactose (44%), arabinose (24%), glucuronic acid (14.5%), rhamnose (13 %) และ 4-O-methylglucuronic acid (1.5%) gum จาก Acacia seyal จะมีปริมาณ rhamnose และ glucuronic acid ต่ำกว่า Acacia Senegal แต่มีปริมาณ arabinose และ 4-O-methylglucuronic acid สูงกว่า Gum arabic เป็น heteropolysaccharide ที่มีโครงสร้างซับซ้อน มีกิ่งแขนงตั้งโครงสร้างในรูปที่ 2.30 นอกจากนี้โมเลกุลยังประกอบด้วย amino acid ได้แก่ hydroxyproline และ serine

Gum arabic ละลายได้ในน้ำและให้สารละลายใสที่มีสีตั้งแต่เหลืองอ่อนจนถึงน้ำตาลส้ม แต่ gum ที่ได้จาก Acacia Senegal มีโครงสร้างที่เป็นกิ่งแขนงมากและโมเลกุลอัดกันแน่น จึงทำให้สารละลายที่ขึ้นหนืดที่ความเข้มข้นสูง สามารถละลายได้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 55% และสารละลายที่ได้มีความหนืดต่ำ จึงทำให้ Gum arabic มีสมบัติที่แตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ซึ่งสามารถละลายได้สูงสุดเพียง 5 % เท่านั้นเนื่องจากสารละลายที่ได้มีความหนืดสูง Gum arabic ถูกนำมาใช้มากที่สุดในกลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากพืช เพราะละลายได้ดีในน้ำและทนต่อค่า pH ส่วนใหญ่ Gum arabic จะนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภท confectionery เช่น marshmallows และ toffees เพราะทำหน้าที่ยับยั้งการตกผลึกของน้ำตาลและช่วยให้เกิดอิมัลชันได้ดี ในอุตสาหกรรมการผลิตสารที่ให้กลิ่นจะใช้ Gum arabic เป็น fixative เพราะขณะทำการพ่นสารที่ให้กลิ่นลงบนผลิตภัณฑ์อาหาร Gum arabic จะช่วยเคลือบผิวของผลิตภัณฑ์อาหาร ทำให้สารที่ให้กลิ่นติดอยู่บนผิวของอาหาร ช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชันและการระเหยของสารที่ให้กลิ่นออกไปจากอาหารอีกด้วย และยังใช้เป็น Flavor encapsulating agent เพื่อนำไปใช้ในพวกผลิตภัณฑ์แบบผง เช่น ชูปัง ในเบียร์ Gum arabic จะช่วยทำให้ฟองเบียร์คงตัว และจะช่วยเป็น emulsifier และ stabilizer ให้กับเครื่องดื่มที่อยู่ในรูปของอิมัลชันด้วย



GAL = Galactose

ARA = Arabinose

GlcA = Glucuronic acid

RHA = Rhamnose

4-MeGlcA = 4-O-methylglucuronic acid

รูปที่ 2.30 โครงสร้างโมเลกุลของ Gum arabic [28]

#### 2.2.4.2 Gum ghatti

Gum ghatti ได้จากพืชตระกูล Camgrelaceae คือต้น *Anogeissus latifolia* พบมากในประเทศอินเดียบางครั้งเรียกว่า Indian gum หรือ havda ลักษณะยางที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม และเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อน ในธรรมชาติจะอยู่ในรูปเกลือของ Ca, Mg, K และ Na แต่เมื่อนำมาไฮโดรไลซ์พบว่าประกอบไปด้วย arabinose, galactose, mannose, xylose และ glucuronic acid ในสัดส่วนโดยโมลเป็น 10:6:2:1:2 และมี 6-deoxyhexose จำนวนเล็กน้อย

Gum ghatti ไม่สามารถละลายในน้ำได้แต่สามารถกระจายตัวได้ในน้ำและให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์ ไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้แต่ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 5% จะให้สารละลายที่มีความข้นหนืด มีความหนืดสูงสุดที่ค่า pH 5-7 ที่ความเข้มข้นเดียวกันความหนืดจะอยู่ระหว่างความหนืดของ Gum Arabic และ Gum karaya Gum ghatti ยังทำหน้าที่เป็น emulsifier ที่ดีกว่า Gum arabic แต่ยากที่จะใช้งานเพราะสารละลายของ Gum ghatti จะไวต่อค่า pH กระจายตัวที่ค่า pH 4.8 และให้ความหนืดสูงสุดที่ค่า pH 8 และถ้าค่า pH สูงกว่านี้จะให้ลักษณะที่เหนียว (stringy)

Gum ghatti เป็นสารเพิ่มความคงตัว สารเพิ่มความหนืดและช่วยอุ้มน้ำด้วย จึงมักนิยมใช้ร่วมกับเลซิตินในการทำแพนเค้กที่มีเนยผสมและในการทำ waffle syrup Gum ghatti จะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะใส นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์ในทางเภสัชศาสตร์ คือใช้เป็น emulsifier ให้กับวิตามินที่ละลายในน้ำมัน ใช้เป็นวัตถุเติมในการผลิต arabinose เชิงการค้าโดยการ hydrolysis เป็น binder ในอุตสาหกรรมกระดาษและ drilling mud conditioner ในการขุดเจาะบ่อน้ำมัน

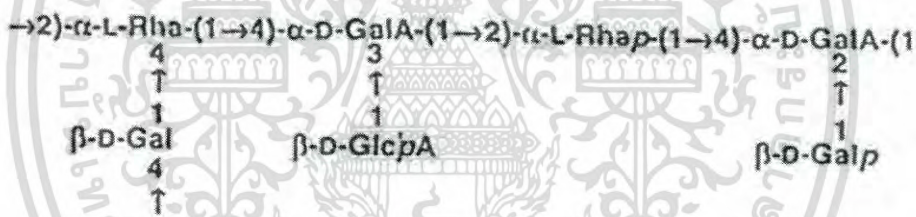
#### 2.2.4.3 Gum karaya

Gum karaya เป็นยางแห้งที่ได้จากต้น *Sterculia urens* ซึ่งปลูกมากบริเวณตอนเหนือและตอนกลางของประเทศอินเดีย หรือจาก *S. setigera* ซึ่งพบแถวซูดานและบางประเทศทางแอฟริกาเหนือ Gum karaya เป็น branched, partially acetylated polysaccharide เชิงซ้อนที่มี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักรโม่เลกุลสูง ในโม่เลกุลประกอบด้วย D-gulacturonic acid, D-galactose และ L-rhamnose ต่อกันเป็นสายหลัก และมีกิ่งแขนงเป็น D-glucuronic acid มีหมู่ uronic acid ประมาณ 35-40% และมีหมู่ acetyl อยู่ประมาณ 10-14 % (รูปที่ 2.31) ในทางการค้า Gum karaya จะประกอบด้วย D-gulacturonic acid 30-43 %, D-galactose 13-26% และ L-rhamnose 15-30% นอกจากนี้ยังพบไอออนของโลหะ Ca และ Mg เชื่อมต่อกับ uronic acid Gum karaya เป็น gum ที่มี rhamnose สูงกว่า gum ชนิดอื่น ๆ ที่ได้จาก plant exudate

Gum karaya ละลายน้ำได้น้อยเนื่องจากหมู่ acetyl ในโครงสร้างทำให้ Gum karaya ละลายน้ำได้ไม่สมบูรณ์แต่ให้สารละลายที่ใส โดยการดูดน้ำอย่างรวดเร็วและให้ลักษณะเป็น คอลลอยด์ที่มีความหนืดที่ความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 0.02 % ในน้ำเย็น และ 0.06 % ในน้ำร้อน) เมื่อทำเป็นผงละเอียดจะเป็นตัวดูดน้ำและอุ้มน้ำที่ดี และเมื่อกระจายตัวอยู่ในน้ำจะพองตัวได้ 60-100 เท่าของปริมาตรเดิม ได้เป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง ความหนืดของสารละลายจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น เมื่อใช้ในปริมาณมากจึงมีสมบัติเป็น strong adhesiveness ทำให้ได้สารละลาย คอลลอยด์ที่มีความหนืดสูง ดังนั้นสมบัติของสารละลาย Gum karaya จึงขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาคในน้ำเย็นจะให้ความหนืดสูงกว่าในน้ำร้อน Gum karaya ทนต่อความเป็น กรดได้สูงเพราะในโม่เลกุลมี uronic acid สูง และยังทนต่อการ hydrolysis ที่ความเข้มข้นของ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกสูงถึง 10% ที่อุณหภูมิห้องนานอย่างน้อย 8 ชั่วโมง



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของ gum karaya (*Sterculia urens*) [36]

Gum karaya เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับ whipping cream และ meringues เนื่องจากมีสมบัติในการอุ้มน้ำที่ดี ใช้เป็น emulsifier ในผลิตภัณฑ์น้ำสลัดต่าง ๆ เช่น salad dressing และ French dressing นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เช่น sherbets หรือ fruit ice จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่เกินไปและป้องกันการสูญเสียน้ำเนื่องจากเกิด syneresis ในผลิตภัณฑ์เนือบด เช่น bologna จะใช้ Gum karaya เป็นตัวช่วยอุ้มน้ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเนื้อเนียน และยังใช้ในอุตสาหกรรมผลิต cheese spread ด้วย เพื่อให้เหนียว แข็งที่ได้มี spreadability ที่ดี นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น

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

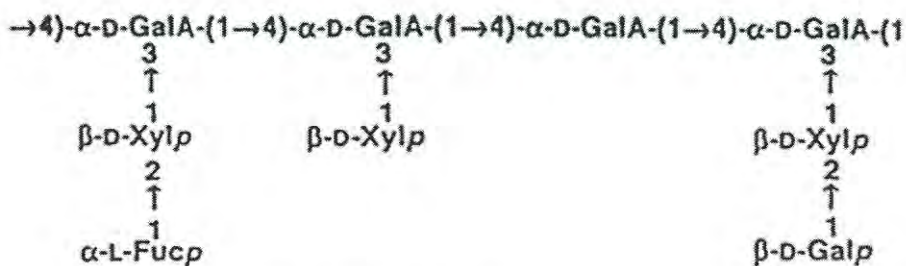
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.2.4.4 Gum tragacanth

Gum tragacanth เป็นยางที่ได้จากต้น *Astragalus microcephalus*, *Astragalus gummifer* และ *Astragalus kurdicus* พบมากบริเวณกึ่งทะเลทรายและบนภูเขาของประเทศอิหร่าน ซีเรีย และตุรกี ยางที่ได้เป็นของเหลวข้นเหนียว Gum tragacanth ประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์หลาย ๆ 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 % เป็นพอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ละลายในน้ำ แต่พองตัวกลายเป็นเจล อีกส่วนที่มีปริมาณน้อยเรียกว่า Tragacanthin เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อน เป็นส่วนที่ละลายในน้ำกระจายตัวให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์

ส่วนของ Tragacanthic acid ซึ่งเป็นส่วนกรดที่ประกอบด้วย D-xylose, L-fucose, D-galacturonic acid, D-galactose และมี L-rhamnose จำนวนเล็กน้อย และส่วนนี้จะเกาะอยู่กับโลหะไอออน คือ Mg, Ca และ K สมบัติของ Gum tragacanth จะขึ้นกับส่วนนี้เพราะเป็นองค์ประกอบหลัก เป็นส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีรูปร่างโมเลกุลเป็นแท่ง (rod like) บางส่วนของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.32 ซึ่งสายหลักจะประกอบด้วย D-galacturonic acid ต่อกันด้วยพันธะ (1,4) และมีกิ่งแขนงสั้น ๆ ของ D-xylose ต่อกับสายหลักด้วยพันธะ (1,3) และอาจจะมี L-fucose และ D-galactose ต่อกับกิ่งแขนงอีกด้วย อีกส่วนที่มีปริมาณน้อยที่เรียกว่า Tragacanthin เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อนของ arabinogalactan ที่โมเลกุลมีกิ่งก้านมาก รูปร่างของโมเลกุลเป็นทรงกลม (spheroidal) ตรงกลางโมเลกุลจะประกอบไปด้วย D-galactose และมี L-arabinose เป็นกิ่งก้านแขนงที่ต่อจาก D-galactose

สารละลาย Gum tragacanth มีความหนืดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากพืชทั้งหมด มีลักษณะเนื้อคล้าย soft gel Gum tragacanth ละลายได้ในน้ำเย็น มีความคงตัวต่อความร้อนและทนกรดได้เป็นอย่างดีจนถึงค่า pH 2 นิยมใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับน้ำสลัด มายองเนส และซอส เพราะผลิตภัณฑ์อาหารเหล่านี้มีลักษณะเนื้อเป็นครีม จึงต้องการความคงตัวสูง ส่วนเครื่องเทศที่ใช้ปรุงรส เช่น มีสตาร์ดเทลและซอสมะเขือเทศ จะใช้ Gum tragacanth เป็นสารเพิ่มความคงตัวและเพิ่มความหนืด ส่วนผลิตภัณฑ์ผลไม้ที่ใช้เป็น filling หรือ topping จะเติม Gum tragacanth เพื่อให้มีลักษณะเนื้อข้นเป็นแกมมันเหมือนธรรมชาติและขึ้นผลไม้มักระบายตัวอยู่ได้โดยไม่แยกออกจากส่วนที่เป็นของเหลว นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีม ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อเนียนและมีความคงตัวดี



รูปที่ 2.32 โครงสร้างบางส่วนของ tragacanthic acid [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.5 Animal-derived

เป็นกลุ่มของสารที่สกัดได้จากเปลือกของสัตว์ เช่น เปลือกหอย ปู กุ้ง เปลือกของแมลง ผึ้ง เซลล์ของสาหร่าย ยีสต์ และเห็ดรา [28]

### 2.2.5.1 Chitin-Chitosan

ไคติน (chitin) เป็นพอลิเมอร์สายยาวที่ประกอบด้วยน้ำตาลหน่วยย่อย คือ N-acetyl-D-glucosamine มาเรียงต่อกัน เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น เปลือกหอย ปู กุ้ง เปลือกของแมลง ผึ้ง เซลล์ของสาหร่าย ยีสต์ และเห็ดราก็พบว่ามีไคตินเป็นองค์ประกอบด้วยเช่นกัน และมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับเซลลูโลสมากเพียงแต่แตกต่างกันในส่วนของหมู่ OH ที่ตำแหน่ง C2 ในโมเลกุลของไคตินจะเป็นหมู่ acetylamino แทน ดังรูปที่ 2.33 ไคตินที่ได้จากแต่ละแหล่งมีโครงสร้างและสมบัติแตกต่างกันโดยแบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของพอลิเมอร์ได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. แบบอัลฟา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสวนทางกัน มีความแข็งแรงสูง ได้แก่ ไคตินจากเปลือกกุ้ง และกระดองปู
2. แบบเบตา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในทิศทางเดียวกัน จึงจับกันได้ไม่ค่อยแข็งแรงมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากแกนปลาหมึก
3. แบบแกมมา มีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะที่ไม่แน่นอน (สวนทางกันสลับทิศทางเดียวกัน) มีความแข็งแรงรองจากแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากเห็ด รา และพืชชั้นต่ำ

ส่วนไคโตซาน คือ อนุพันธ์ของไคตินที่ตัดเอาหมู่ acetyl ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ออกเรียกว่า deacetylation คือ เปลี่ยนน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine เป็น glucosamine ที่ไม่เสถียร (unstable) มีความเป็นขั้วสูง (strong positive polarity) จึงทำให้ไคโตซานมีสมบัติพิเศษพร้อมจะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว มีสมบัติละลายได้ในกรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้น 1-3% ปกติแล้วไคโตซานที่ได้จะมีส่วนผสมของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine และ glucosamine อยู่ในสายพอลิเมอร์เดียวกัน ซึ่งระดับการกำจัดหมู่ acetyl (หรือเปอร์เซ็นต์การเกิด deacetylation) นี้มีผลต่อสมบัติและการทำงานของไคโตซานนอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลก็มีผลต่อความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จะมีสายยาวและสารละลายมีความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นต้น ดังนั้นการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาทั้งเปอร์เซ็นต์การเกิด deacetylation และน้ำหนักโมเลกุล

การใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตซาน

ไคติน-ไคโตซานสามารถทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอนและตัวตกตะกอน โดยตัวสร้างตะกอนจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอย ในน้ำเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น และเมื่อใหญ่มากพอก็จะตกเป็นตะกอนลงมา ส่วนตัวตกตะกอนจะทำงานคล้าย ๆ กันคือ จะไปจับกับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา ไคโตซานจะทำหน้าที่ทั้งสองแบบได้ดีเนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกมาก จึงทำให้พวกประจุลบอย่างโปรตีน สีย้อม กรดไขมันอิสระ คอเลสเตอรอล (ในร่างกาย) เข้ามาเกาะกับประจุบวกของไคโตซาน ส่วนโลหะหนักซึ่งเป็นประจุบวกอยู่แล้ว จะจับกับอิเล็กตรอนจากไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซานทำให้เกิดพันธะเคมีที่เรียกว่า “พันธะเชิงซ้อน” ขึ้นมาและจากการทดลองพบว่าหมู่อะมิโนในไคโตซานสามารถจับกับโลหะหนักในน้ำได้

อีกว่าหมู่เอซิดของไคติน ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไคโตซานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนี้

- อุตสาหกรรมอาหาร ไคโตซานมีสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์และเชื้อราบางชนิด โดยมีกลไกคือ ไคโตซานมีประจุบวกสามารถจับกับเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบได้ ทำให้เกิดการรั่วไหลของโปรตีนและสารอื่นของเซลล์ ในหลายประเทศได้ขึ้นทะเบียนไคตินและไคโตซานให้เป็นสารที่ใส่เติมในอาหารได้ โดยนำไปใช้เป็นสารกักตุน สารช่วยรักษากลิ่น รส และสารให้ความชุ่มชื้น ใช้เป็นสารเคลือบอาหาร ผัก และผลไม้ เพื่อรักษาความสดหรือผลิตในรูปฟิล์มที่รับประทานได้ (edible film) สำหรับบรรจุอาหาร

- อุตสาหกรรมกำจัดของเสีย โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร มีสารแขวนลอยสูง ไคโตซานมีประจุบวกสามารถจับกับโปรตีนและไขมันได้ดี ซึ่งโปรตีนที่ได้สามารถนำมาแยกไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักและจับสี (dye) ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย

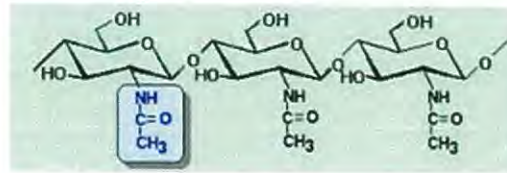
- ด้านอาหารเสริม ไคโตซานช่วยลดคอเลสเตอรอล และไขมันในเส้นเลือด โดยไคโตซานไปจับกับคอเลสเตอรอลทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมไปใช้หรือดูดซึมน้อยลงและมนุษย์ไม่สามารถย่อยไคตินและไคโตซานได้จึงถูกขับออกมาพร้อมกับอุจจาระโดยที่มีคอเลสเตอรอลและไขมันส่วนเกินตามออกมาด้วย แต่ไคโตซานสามารถจับวิตามินที่ละลายได้ดีในไขมัน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

- อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ไคโตซานถูกนำไปใช้ในเครื่องสำอางสำหรับผิวหน้าและเส้นผม ไคโตซานมีประจุบวกทำให้มันสามารถเกาะกับประจุลบของผิวหน้าและเส้นผมได้เป็นอย่างดี จึงถูกนำไปใช้ในเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของกรดผลไม้ธรรมชาติที่เรียกว่า กรดแอลฟาไฮดรอกซี (alpha hydroxyl acid; AHA) กรดพวกนี้จะกระตุ้นให้ผิวหนังเก่าหลุดลอกเพื่อสร้างผิวใหม่ทำให้ผิวดูอ่อนเยาว์ขึ้น ส่วนในการบำรุงเส้นผมไคโตซานจะก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมไว้ทำให้เส้นผมคงสภาพนุ่มสลวยไม่เสียง่าย

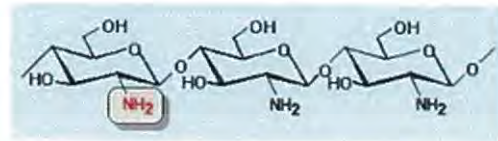
- ใช้ในทางการแพทย์ ไคตินและไคโตซาน ได้รับความนิยมน้อยมากในทางการแพทย์และเภสัชภัณฑ์ มีรายงานการวิจัยพบว่า ไคตินและไคโตซานมีสมบัติยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (antimicrobial activity) เป็นสารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant activity) มีสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม (film forming agent) สามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะบางใส นำมาปิดรักษาบาดแผลผ่าตัด แผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ช่วยป้องกันการติดเชื้อของแผล กระตุ้นให้มีการผลิตและสร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งมีสมบัติพิเศษกว่าพลาสติกปิดแผลทั่วไป ใช้ผลิตหนังเทียม ผลิตยาลดไขมันในเลือด ใช้เคลือบยาเม็ดแคปซูล ใช้เป็นสารตัวกลางที่จะปลดปล่อยยาออกมาอย่างช้าๆ ควบคุมคลอเรสเตอรอล ยับยั้งการเกิดมะเร็ง ต้านไวรัส ทำคอนแทคเลนส์ เป็นต้น

- อุตสาหกรรมการเกษตร เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม และเจลใสไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถนำมาฉีดพ่นเคลือบผิวเพื่อรักษาอายุของผลผลิตทางการเกษตร และมีสมบัติยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรียบางชนิดที่ก่อโรคแก่พืชได้

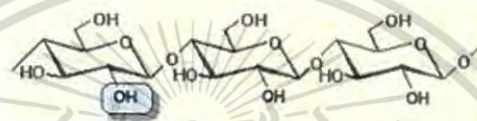
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Chitin



Chitosan



Cellulose

รูปที่ 2.33 เปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของ chitin, chitosan และ cellulose [28]

### 2.2.6 Microbial gums

เป็นกลุ่มของสารที่ได้จากการหมักของเชื้อแบคทีเรีย [28]

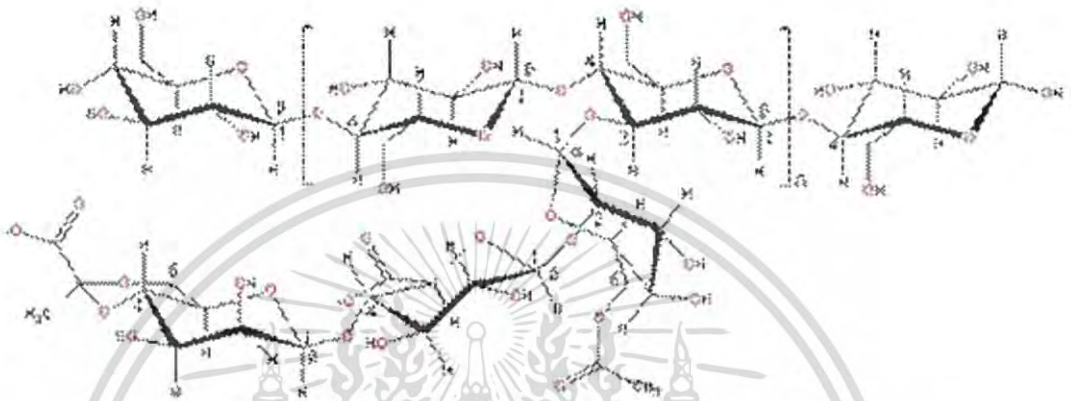
#### 2.2.6.1 Xanthan gum

Xanthan gum เป็น gum ที่ได้จากการหมักน้ำตาลด้วยเชื้อแบคทีเรียปริสทุธี คือ *Xanthomonas campestris* หลังจากกระบวนการหมักแล้วจะนำมาตกตะกอนด้วย isopropyl alcohol แยกเอา xanthan gum ออกมาทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียด Xanthan gum หรือเรียกชื่อทางการค้าว่า Keltol มีโครงสร้างเป็น heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วย glucose, mannose และ glucuronic acid ในอัตราส่วน 2.8:3:2 มีหมู่ acetyl ประมาณ 4.7 % และ pyruvic acid ประมาณ 3 % โดย glucose ต่อกับ mannose ด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4 และ mannose ที่เป็นสายแขนงต่อกับสายหลักด้วยพันธะ 1,2 หรือ 1,3 ส่วน glucuronic acid ต่อด้วยพันธะ  $\beta$ -1,2 (รูปที่ 2.34) Xanthan gum ไม่มีสมบัติเป็น gelling agent แต่สามารถเกิด elastic thermoreversible gel ได้เมื่อรวมกับ Locust bean gum และเมื่อรวมกับ Guar gum จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูง

Xanthan gum ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ มีความคงตัวสูงต่อความร้อนและค่า pH ความหนืดของสารละลาย Xanthan gum จะคงที่ถึงแม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงในช่วง 0-100°C หรือค่า pH จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 1-13 ก็ตาม นอกจากนั้นสารละลาย Xanthan gum ยังมีสมบัติเป็น pseudoplastic ซึ่งมีความสำคัญต่อกลิ่น ลักษณะปรากฏและความรู้สึกเมื่ออาหารอยู่ในปาก (mouthfeel)

Xanthan gum ใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดเพิ่มความคงตัวและทำให้อนุภาคแขวนลอยได้ดี เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับเอ็กสารถนเป็นเอ็กสารถนส่งวนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการรักษาเท่านั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นใช้ประโยชน์ในการทำกรูมไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอศกรีม ถ้านำ Xanthan gum มาผสมกับ Locust bean gum จะนิยมนำมาใช้กับอาหารประเภทขนมหวาน ซอสมะเขือเทศสำหรับ พิซซา ไส้ขนมอบ และไส้พาย เป็นต้น นอกจากนั้นยังผสมกับทั้ง Locust bean gum และ Guar gum ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ความข้นหนืดและสมบัติเฉพาะตามความต้องการสำหรับอาหารชนิดหนึ่ง ๆ เช่น ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภท frozen desserts, pasteurized, pasteurized process cheese spread, cottage cheese, salad dressing, sour cream และ fruit syrups เป็นต้น



รูปที่ 2.34 โครงสร้างโมเลกุลของ Xanthan gum [28]

### 2.3 ปุ๋ย

ปุ๋ย คือ สิ่งที่มีธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช และช่วยปรับปรุงดินให้เหมาะสมกับการเพาะปลูก โดยปกติแล้วพืชจะได้รับสารอาหารบางส่วนจากน้ำและอากาศ แต่ธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในปริมาณมาก คือ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งในดินมักจะมีปริมาณไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชจึงมีความจำเป็นต้องเพิ่มธาตุเหล่านี้ โดยการให้ปุ๋ยซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต งอกงามและให้ผลผลิตสูง

ธาตุอาหารของพืชประกอบด้วย 16 ธาตุ คือ คาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P), โพแทสเซียม (K), แคลเซียม (Ca), แมกนีเซียม (Mg), กำมะถัน (S), เหล็ก (Fe), แมงกานีส (Mn), โบรอน (B), โมลิบดีนัม (Mo), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn) และคลอรีน (Cl) สำหรับ 3 ธาตุแรก คือ C, H, O พืชสามารถรับได้จากน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ธาตุที่เหลืออีก 13 ธาตุได้จากดิน ในกรณีที่ดินมีธาตุอาหารไม่เพียงพออาจทำให้พืชไม่เจริญเติบโตเต็มที่ จึงต้องได้รับการใส่ปุ๋ยลงไป ธาตุอาหารของพืช 13 ชนิดที่มีอยู่ในดินสามารถแบ่งได้ดังนี้ [1]

- กลุ่มที่ 1 ธาตุอาหารหลัก (primary elements) ได้แก่ N, P และ K เป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก แต่มีปริมาณน้อยในดินซึ่งไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตจึงต้องใส่ปุ๋ยลงไป
- กลุ่มที่ 2 ธาตุอาหารรอง (secondary elements) ได้แก่ Ca, Mg และ S เป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการมาก แต่โดยปกติจะมีอยู่ในดินค่อนข้างมากและเพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงมักไม่จำเป็นที่จะต้องใส่ปุ๋ยในกลุ่มนี้
- กลุ่มที่ 3 ธาตุอาหารเสริม ได้แก่ Fe, Mn, B, Mo, Cu, Zn และ Cl พืชต้องการในปริมาณน้อยและมักมีเพียงพอในดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 หน้าที่สำคัญของธาตุอาหาร

#### 2.3.1.1 ธาตุอาหารหลัก

##### 1) ธาตุไนโตรเจน (N)

พืชโดยทั่วไปมีความต้องการธาตุไนโตรเจนเป็นจำนวนมาก เนื่องจากไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของกรดอะมิโน ซึ่งประกอบขึ้นเป็นโปรตีนที่มีอยู่ในพืชช่วยให้พืชเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว พืชที่ได้รับธาตุไนโตรเจนอย่างเพียงพอจะมีใบสีเขียวสด แข็งแรง โตเร็ว ให้ดอกและผลที่สมบูรณ์ โดยเฉพาะพวกผักที่รับประทานใบ ถ้าได้ธาตุไนโตรเจนมากจะทำให้อวบ กรอบ มีเส้นใยน้อย และน้ำหนักดี ในกรณีที่ขาดธาตุไนโตรเจน พืชจะแคระแกรน ใบเหลืองผิดปกติและเหี่ยวเฉา ออกดอกและผลช้า ในดินทั่วๆ ไปมักมีธาตุไนโตรเจนไม่เพียงพอจึงต้องใส่ปุ๋ยที่มีธาตุไนโตรเจนลงไป ซึ่งจะไปช่วยเร่งให้ต้นและใบเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าพืชได้รับธาตุไนโตรเจนมากเกินไปอาจจะเกิดผลเสีย เช่น ทำให้อวบน้ำมาก ลำต้นอ่อนล้าง่าย โรงและแมลงเข้ารบกวนหรือทำลายง่าย เป็นต้น

##### 2) ธาตุฟอสฟอรัส (P)

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสารประกอบพวก nucleoprotein และ phospholipids ซึ่งมีอยู่ในเมล็ดพืชทุกชนิด สารประกอบทั้งสองนี้เป็นส่วนโครงสร้างของโปรตีนและเซลล์พืช นอกจากนี้ยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ในเอนไซม์หลายชนิดที่จำเป็นต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของฟอสเฟต เช่น  $H_2PO_4^-$  และ  $HPO_4^{2-}$  โดยจะละลายน้ำอยู่ในดินแต่ในดินมักมีธาตุฟอสฟอรัสหรือฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ไม่เพียงพอกับความต้องการของพืชจึงต้องใส่ปุ๋ยที่มีธาตุฟอสฟอรัส ถ้าพืชได้รับธาตุฟอสฟอรัสเพียงพอจะมีระบบรากที่แข็งแรง แพร่กระจายในดินอย่างกว้างขวาง ทำให้พืชสามารถดูดน้ำและธาตุอาหารได้ดี การออกดอกและผลจึงเกิดเร็ว ในกรณีที่ขาดธาตุฟอสฟอรัสพืชจะแคระแกรน ใบมีสีเขียวคล้ำ รากจะชะงักการเจริญเติบโต ทำให้ไม่ออกดอกและผล

##### 3) ธาตุโพแทสเซียม (K)

โพแทสเซียมเป็นธาตุที่จำเป็นในการสร้างแป้ง และช่วยให้ใบมีประสิทธิภาพในการดูดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีส่วนร่วมในการสร้างคลอโรฟิลล์ ส่งเสริมการเจริญเติบโตของรากและหัวสร้างเนื้อไม้ที่แข็งแรงของลำต้น และทำให้ผลไม้มีรสหวาน คุณภาพดี เส้นใยน้อย แต่ถ้าพืชขาดธาตุนี้เมล็ดจะลีบและมีน้ำหนักเบาผิดปกติ หากเป็นผลไม้รสชาติจะกร่อย ลำต้นแคระแกรน พืชจะใช้ธาตุโพแทสเซียมได้เมื่ออยู่ในรูปของไอออน  $K^+$  เท่านั้น ถ้าอยู่ในรูปอื่นๆ ที่ไม่ได้แตกตัวเป็น  $K^+$  ถึงแม้ว่าพืชจะได้รับเข้าไปก็ยังคงนำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ ธาตุโพแทสเซียมมีความสำคัญในการสร้างและเคลื่อนย้ายอาหารพวกแป้งและน้ำตาลไปเลี้ยงส่วนต่างๆ ของพืช และส่งไปเก็บไว้ที่ส่วนหัวหรือลำต้น ดังนั้นพวกพืชอ้อย มะพร้าวและมัน จึงต้องการธาตุโพแทสเซียมมาก ถ้าขาดธาตุโพแทสเซียมหัวจะลีบเหี่ยวง่าย แคระแกรน ใบเหลือง

#### 2.3.1.2 ธาตุอาหารรอง

##### 1) ธาตุแคลเซียม (Ca)

ทำหน้าที่สลายและละลายอาหารพืชในดิน ช่วยเร่งให้เมล็ดงอก และรากที่เริ่มเกิดจะเจริญเติบโตเร็ว เป็นการเพิ่มแคลเซียมให้กับพืชผลที่ใช้เป็นอาหาร ถ้าพืชขาดธาตุนี้ยอดพืชจะหยุดชะงักการเจริญเติบโตและไม่ไหล่พ้นจากลำต้น

## 2) ธาตุแมกนีเซียม (Mg)

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของคลอโรฟิลล์ ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายธาตุฟอสฟอรัสเข้าไปในเมล็ด พบว่าธาตุแมกนีเซียมจะทำงานร่วมกับธาตุแคลเซียมในการหมุนเวียนธาตุอาหาร ขณะเดียวกันก็ช่วยเร่งสร้างน้ำมันและไขมัน ถ้าพืชขาดธาตุนี้ใบจะเริ่มแก่ก่อนส่วนอื่น คือใบจะสูญเสียคลอโรฟิลล์โดยมีลักษณะเป็นดวงระหว่างเส้นใบและจะตายในที่สุด พืชยืนต้นเมื่ออยู่ระหว่างฤดูออกดอกออกผล ใบอาจแสดงอาการขาดธาตุแมกนีเซียม เพราะแมกนีเซียมจะย้ายไปสร้างผลหมดใบจึงร่วงผิดปกติ

## 3) ธาตุกำมะถัน (S)

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของโปรตีนและกรดอะมิโน ช่วยสร้างโปรตีนและน้ำมันพืช ถ้าพืชขาดธาตุนี้ทั้งใบบนและใบล่างจะมีสีเหลืองซีด และต้นอ่อนแอ

### 2.3.1.3 ธาตุอาหารเสริม

#### 1) ธาตุเหล็ก (Fe)

เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในเอนไซม์หลายชนิด ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการต่างๆ เช่น หายใจ สังเคราะห์ด้วยแสงมีบทบาทสำคัญในการสร้างคลอโรฟิลล์ ถ้าพืชขาดธาตุนี้การสร้างคลอโรฟิลล์จะหยุดชะงัก ใบจะเหลืองและใบที่ผลิออกจะเล็กผิดปกติ

#### 2) ธาตุแมงกานีส (Mn)

ทำหน้าที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาต่างๆ ในพืชให้เกิดเร็วและง่ายขึ้น เช่น ในการแปลงสภาพหมู่นิเตรตและไฮดรอกซิลามีนให้เป็นไนโตรเจนในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ เป็นธาตุที่ร่วมอยู่ในกระบวนการสังเคราะห์แสง สร้างโปรตีนและวิตามินซี ถ้าพืชขาดธาตุนี้อาการจะเกิดขึ้นทางใบล่างก่อน คือใบชั้นล่างของลำต้นจะเหลืองตามบริเวณระหว่างเส้นใบ เนื่องจากเป็นบริเวณที่ขาดคลอโรฟิลล์

#### 3) ธาตุสังกะสี (Zn)

มีบทบาทในกระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์ และควบคุมการสุก-แก่ ของผล ถ้าพืชขาดธาตุนี้ต้นจะเตี้ยแคระแกรน ปล้องของลำต้นและกิ่งก้านอ่อนจะสั้น

#### 4) ธาตุโบรอน (B)

ธาตุนี้จำเป็นสำหรับการแบ่งเซลล์ การก่อตัวของเซลล์ที่จะเป็นดอก ผลและราก ส่งเสริมกระบวนการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารและแร่ธาตุไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของลำต้น ถ้าพืชขาดธาตุนี้บริเวณ cortex จะเกิดการสะสมสารพวกเรซินหรือที่เรียกว่า gummosis ซึ่งจะทำให้ท่อส่งน้ำและอาหารอุดตัน ทำให้การส่งน้ำและอาหารดำเนินไปไม่สะดวกและมีจุดสีน้ำตาลหรือดำอยู่ภายในส่วนต่างๆของพืชซึ่งสังเกตได้จากพืชพวกผักกาดหัว กะหล่ำดอก เป็นต้น

#### 5) ธาตุทองแดง (Cu)

เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ในเอนไซม์พืช ส่งเสริมการสร้างวิตามินเอ มีหน้าที่ทางอ้อมคือมีส่วนร่วมในกระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์ ถ้าพืชขาดธาตุนี้ใบจะเหลือง

#### 6) ธาตุโมลิบดีนัม (Mo)

มีบทบาทในกระบวนการรีดักชันของไนเตรตให้เป็นแอมโมเนียและกระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์และเอนไซม์ ถ้าพืชขาดธาตุนี้ขอบใบจะม้วน บริเวณระหว่างเส้นใบจะมีสีเหลือง บางส่วนเขียว ปลายใบจะมีรอยไหม้และตายในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 7) ธาตุคลอรีน (Cl)

มีบทบาทบางประการเกี่ยวกับฮอร์โมนในพืช ถ้าขาดธาตุนี้พืชจะเหี่ยวง่าย ใบสีซีด และบางส่วนแห้งตาย

### 2.3.2 ประเภทของปุ๋ย

**2.3.2.1 ปุ๋ยอินทรีย์** คือ ปุ๋ยที่ได้จากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์กลุ่มใช้ออกซิเจน (Aerobic Microorganisms) จนมีสารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด ชี้ค่างควา กระดุกป่น เลือดแห้ง เศษเนื้อพังผืด กากเมล็ดฝ้าย กากเมล็ดลมหุ่น กากน้ำปลา กระดุกป่น หินฟอสเฟต ฯลฯ เป็นต้น

**2.3.2.2 ปุ๋ยเคมี** คือ ปุ๋ยที่ได้จากสิ่งไม่มีชีวิต เช่น จากหิน เหมืองแร่ต่าง ๆ หรือจากการสังเคราะห์ขึ้นทางวิทยาศาสตร์ เช่น ปุ๋ยยูเรีย แอมโมเนียมซัลเฟต หินฟอสเฟตบด ปุ๋ยเคมีสูตรต่าง ๆ ปุ๋ยเคมีจะมีส่วนผสมของธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ในปริมาณที่เข้มข้นมากกว่าปุ๋ยอินทรีย์ จึงทำให้ปุ๋ยเคมีได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าปุ๋ยอินทรีย์ ถึงแม้ว่าปุ๋ยเคมีจะมีธาตุอาหารพืชเข้มข้นกว่าปุ๋ยอินทรีย์แต่ปุ๋ยเคมีไม่มีสมบัติในการปรับปรุงโครงสร้างของดินให้โปร่งและร่วนซุยได้ นอกจากนี้ปุ๋ยเคมีส่วนใหญ่มักจะไม่มีการรองและธาตุอาหารเสริม ที่มีในปุ๋ยอินทรีย์ แต่อย่างไรก็ตามในตลาดปุ๋ยเคมีปัจจุบัน มีปุ๋ยหลายประเภทที่มีการผสมธาตุอาหารรองเข้าไปเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหา ปุ๋ยเคมีสามารถแบ่งได้เป็น

- 1) ปุ๋ยไนโตรเจน ได้แก่ ปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารไนโตรเจนเป็นหลัก เช่น ปุ๋ยยูเรีย ซึ่งมีธาตุไนโตรเจน 46% หรือปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต ซึ่งมีธาตุไนโตรเจน 21%
- 2) ปุ๋ยฟอสฟอรัส ได้แก่ ปุ๋ยที่ให้ธาตุฟอสฟอรัสเป็นหลัก ได้แก่ ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตซึ่งมีฟอสฟอรัส 46% หรือปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต ซึ่งมีฟอสฟอรัส 46% และมีไนโตรเจน 18%
- 3) ปุ๋ยโพแทสเซียม ได้แก่ ปุ๋ยที่ให้โพแทสเซียมเป็นหลัก ได้แก่ ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์มีโพแทสเซียม 60% หรือปุ๋ยโพแทสเซียมซัลเฟตมีโพแทสเซียม 50%

### 2.3.3 สูตรปุ๋ย

สูตรปุ๋ย แสดงด้วยตัวเลข 3 ตัว โดยมีขีดคั่นกลาง เป็นตัวเลขที่ใช้บอกสัดส่วนปริมาณธาตุอาหารหลัก 3 ชนิดของปุ๋ยได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม ตามลำดับ เช่น ปุ๋ยกระสอบละ 100 กิโลกรัม สูตร 46-0-0 แสดงว่าจะมีส่วนผสมเนื้อธาตุไนโตรเจน 46 กิโลกรัม, ปุ๋ย 16-20-0 แสดงว่าจะมีส่วนผสมของเนื้อธาตุไนโตรเจน 16 กิโลกรัมและเนื้อธาตุฟอสฟอรัส 20 กิโลกรัม, ปุ๋ย 15-15-15 แสดงว่าจะมีส่วนผสมเนื้อธาตุไนโตรเจน 15 กิโลกรัมและเนื้อธาตุฟอสฟอรัส 15 กิโลกรัมและเนื้อธาตุโพแทสเซียม 15 กิโลกรัม ปุ๋ยบางชนิดจะมีธาตุอาหารรองหรือบางครั้งเรียกว่า “จุลธาตุ” อยู่ด้วยและมักจะต่อท้ายสูตรปุ๋ยด้วย “TE” ซึ่งมาจากคำว่า Trace Element หมายถึง จุลธาตุ [1]

#### 2.3.3.1 การบ่งบอกปริมาณธาตุอาหารหลักในปุ๋ยเคมี

บนฉลากปุ๋ยเคมีทุกชนิดจะระบุปริมาณธาตุอาหารหลักเป็นตัวเลข 3 จำนวนเรียงกัน เรียกว่า “สูตรปุ๋ย” โดยตัวเลขจะหมายถึง % โดยน้ำหนักของไนโตรเจน-ฟอสฟอรัส-โพแทสเซียม หรือ เอ็น-พี-เค เรียงตามลำดับ ตัวอย่างเช่น ปุ๋ยสูตร 13-0-46 แสดงว่ามีไนโตรเจน 13% ไม่มีฟอสฟอรัส และมีโพแทสเซียม 46% สำหรับธาตุอาหารอื่นๆ ในปุ๋ยเคมี ผู้ผลิตจะระบุหรือไม่ก็ได้ แต่ถ้าวางปุ๋ยก็จะเขียนบอกบนฉลากปุ๋ยว่ามีธาตุอะไรบ้าง และมีเท่าไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 ปุ๋ยละลายช้า

ปุ๋ยละลายช้า หมายถึง ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาให้พืชอย่างช้า ๆ ซึ่งเป็นปุ๋ยเคมีที่มีการพัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีใหม่ ๆ เพื่อให้ปุ๋ยเคมีมีประสิทธิภาพในการใช้งานมากขึ้นและให้พืชได้รับธาตุอาหารอย่างต่อเนื่อง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ [1]

#### 2.3.4.1 ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled released fertilizers, CRF)

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย หมายถึง ปุ๋ยที่มีการผลิตให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ นอกจากนี้ยังทราบชัดเจนว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่ออัตราและช่วงเวลาที่ปุ๋ยนั้นจะปลดปล่อยธาตุอาหาร ทั้งมีกลไกที่ควบคุมการปลดปล่อยอยู่แล้วในปุ๋ยที่ผลิต เช่น ปุ๋ยเคลือบ (coated fertilizer)

##### 1) ปุ๋ยเคลือบ (coated fertilizers)

การเคลือบเม็ดปุ๋ยนั้นมีไว้เพื่อควบคุมอัตราการละลายของเม็ดปุ๋ย ซึ่งปุ๋ยที่มีสารไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิเมอร์เคลือบ ผิวเคลือบสามารถควบคุมการปลดปล่อยของธาตุอาหารได้ดี สำหรับรูปแบบการปลดปล่อย (pattern) มีทั้งแบบพาราโบลา (parabolic release) เชิงเส้น (liner) และแบบซิกมอยด์ การปลดปล่อยที่มีลักษณะเชิงเส้นและแบบซิกมอยด์ สอดคล้องกับแบบอย่างการดูดธาตุอาหารของพืชมากกว่าแบบพาราโบลา แม้ว่าแบบซิกมอยด์จะมีช่วงการชะลอการปลดปล่อย (lag period) จึงมีผู้ทำการศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยประเภทนี้มากพอสมควร โดยมีหลักการโดยการเคลือบผิวที่มีความหนาตามแบบที่กำหนด เพื่อให้ได้ปุ๋ยที่ละลายในอัตราที่ต้องการ มีวิธีการเคลือบที่แน่นอนเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตามมาตรฐาน สำหรับสารที่ใช้เคลือบ ได้แก่ กำมะถันและสารพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

- ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน (sulfur-coated urea หรือ SCU)

เกิดจากการนำเม็ดปุ๋ยมาทำให้ร้อน ระหว่างนั้นหลอมกำมะถันที่อุณหภูมิ 156 องศาเซลเซียส แล้วพ่นไปเคลือบเม็ดปุ๋ยยูเรีย จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีไนโตรเจน 31 และ 38 % แต่ถ้าเคลือบเพียงกำมะถันอย่างเดียว ผิวของเม็ดปุ๋ยจะมีรูพรุนมากเกินไป ทำให้ควบคุมการละลายได้ไม่ดีนัก จึงมีการคิดค้นการแก้ไขโดยการผสมสารอีก 2 ชนิดลงไป คือ การใช้ไขเป็นวัสดุอุดรูรั่ว (wax sealant) เพื่อกันการซึมของน้ำ กับอีกชนิดคือ เพิ่มสารควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ (microbiocide) เพื่อป้องกันมิให้จุลินทรีย์ออกซิไดส์กำมะถันเร็วเกินไป จากนั้นเคลือบชั้นนอกสุดด้วยวัสดุปรับสภาพปุ๋ย (conditioner) เช่น ดินเหนียวแอตตาปูล์ไจต์ (attapulgit) ซึ่งอัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนจากปุ๋ยขึ้นอยู่กับคุณภาพของการเคลือบซึ่งมีการกำหนดเกณฑ์ไว้ดังนี้ เม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบแล้วแบ่งได้เป็น 3 ชั้น คือ 1. ชั้นที่มีรอยร้าวที่ผิวเคลือบ 2. ชั้นที่สมานรอยร้าวบนผิวเคลือบไขแล้ว 3. ชั้นที่เคลือบหนาและผิวเคลือบสมบูรณ์ เมื่อใส่ปุ๋ยลงดิน ปุ๋ยส่วนแรกจะละลายน้ำและยูเรียก็จะละลายออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชทันที สำหรับส่วนที่ 2 และ 3 จะทยอยปล่อยออกมา โดยส่วนที่ 3 จะใช้เวลาในการละลายนานที่สุด สำหรับปริมาณของยูเรียในเม็ดปุ๋ยที่เคลือบหนาและสมบูรณ์นี้เรียกว่า “locked off” ซึ่งยืดเวลาการปลดปล่อยได้นานกว่าสองส่วนแรก

- ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถันและเคลือบทับด้วยพอลิเมอร์ (polymer coating of SCU)

เนื่องจากยูเรียที่เคลือบเพียงกำมะถันอย่างเดียวจะควบคุมการปลดปล่อยยูเรียจากเม็ดปุ๋ยได้ไม่ค่อยดี จึงมีการปรับเปลี่ยนวิธีการ โดยใช้วิธีเคลือบพอลิเมอร์พวกเทอร์โมพลาสติกหรือเรซินเพิ่มอีกชั้นหนึ่ง จะได้ปุ๋ยที่เรียกกันว่า PSCU (polymer coated SCU) สำหรับ

สมบัติด้านการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารดีกว่า SCU มาก นอกจากนี้ชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบทับยังช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขัดสี (attrition resistance) ระหว่างเม็ดปุ๋ยข้างเคียงอีกด้วย

โดยการปลดปล่อยด้วยหลักการทั่วไปมีหลายระยะ คือระยะแรกจะเป็นการซึมของน้ำ (ส่วนมากเป็นไอน้ำ) ผ่านเคลือบผิว หากความดันภายในเม็ดปุ๋ยสูงกว่าความต้านทานของวัสดุที่หุ้มเม็ดปุ๋ยอยู่ ผิวเคลือบก็จะแตกออก เนื้อปุ๋ยทะลักออกมาทั้งหมดในทันที เรียกเหตุการณ์นี้ว่า “กลไกล้มเหลว” (failure mechanism) หรือการปลดปล่อยแบบล้มละลาย แต่ถ้าผิวหุ้มเม็ดปุ๋ยยังสามารถทนต่อแรงดันภายในได้ดี ปุ๋ยก็จะถูกปลดปล่อยด้วยการแพร่ เนื่องจากความเข้มข้นภายในมากกว่าภายนอก และการเคลื่อนมวล (mass flow) เนื่องจากแรงดันภายในสูงกว่า สำหรับกลไกล้มเหลวหรือการปลดปล่อยแบบล้มละลายมักเกิดกับเม็ดปุ๋ยที่มีการเคลือบที่ไม่ดี เปราะง่ายและไม่ยืดหยุ่น เช่น กำมะถันหรือสารอนินทรีย์อื่น ๆ ส่วนการปลดปล่อยปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ เช่น อัลคิลดีเรซินและพอลิโอเลฟิน (โอเลฟินหรืออัลคีน คือ ไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวและมีพันธะคู่ในโมเลกุลอย่างน้อยหนึ่งคู่) จะไม่มีปัญหาดังกล่าว

ในปุ๋ยเม็ดหนึ่งจะปลดปล่อยธาตุอาหารแบบล้มเหลวได้เพียงหนึ่งครั้ง แต่กลไกการแพร่จะปลดปล่อยออกมาทีละน้อยๆ ในการปลดปล่อยด้วยการแพร่ มีทั้งสิ้น 3 ระยะด้วยกัน คือ ระยะแรกจะเป็นระยะที่ไม่มีมีการปลดปล่อย (lag period หรือ ช่วงนิ่ง) เป็นระยะที่เกิดไอน้ำซึมเข้าไปในเม็ดปุ๋ยช้าๆ และเริ่มละลายปุ๋ยที่อยู่ใกล้ผิวเคลือบก่อน ช่วงนี้จะมีพลังขับเคลื่อนที่เกิดจากความแตกต่างของความดันไอ (vapor pressure) ระหว่างสารเคลือบทั้ง 2 ด้าน เมื่อไอน้ำเข้าไปภายในชั้นผิวเคลือบ ก็จะเข้าอยู่ในเฉพาะที่ช่องว่างที่จำกัดสองส่วน คือ รูพรุนภายในเนื้อปุ๋ยและช่องว่างระหว่างผิวเคลือบ สิ่งเหล่านี้ทำให้น้ำหนักของเม็ดปุ๋ยเพิ่มขึ้นทีละน้อย แรงดันภายในสูงขึ้นและปริมาตรปุ๋ยโตขึ้น โดยเฉพาะเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยอัลคิลดีเรซิน สำหรับเวลาที่ใช้ในช่วงนี้ คือช่วงที่ทำให้ช่องทั้งหมดมีของเหลวเต็ม ช่วงนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อสารละลายปุ๋ยเริ่มต้นตัวเคลือบออกมาและเป็นจุดเริ่มต้นของระยะที่ 2 ในระยะที่ 2 คือ ระยะปลดปล่อยคงที่ ทรายใดที่สารละลายอิ่มตัวของปุ๋ยยังคงสมดุลกับปุ๋ยแข็งที่เหลืออยู่ในเม็ด เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยซึ่งอิ่มตัวและคงที่ทำให้ระดับความเข้มข้น (concentration gradient) และระดับของแรงดัน (pressure gradient) คงที่ จึงเป็นปัจจัยกำหนดค่าของแรงที่ใช้สำหรับขับปุ๋ยให้ออกมาภายนอกอัตราคงที่ระยะนี้ ปริมาตรของเม็ดปุ๋ยจะคงที่ แสดงว่าปริมาตรซึ่งลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของปุ๋ยออกไปและได้มีน้ำจากภายนอกเข้ามาชดเชยในปริมาณที่ใกล้เคียง และระยะที่ 3 คือ ระยะปลดปล่อยลงทีละน้อย เกิดขึ้นเมื่อปุ๋ยในเม็ดได้ละลายออกหมด แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนก็จะเริ่มลดลงไปเรื่อยๆ ช่วงท้ายปุ๋ยจะออกมาน้อยมากจนกระทั่งหมดไป

- ปุ๋ยเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์อินทรีย์ (fertilizers coated with organic polymers)

ปุ๋ยเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์อินทรีย์ หมายถึง ปุ๋ยที่เคลือบด้วยเรซินและเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์

- ปุ๋ยเคลือบด้วยเรซิน (resin - coated fertilizers) เรซินสังเคราะห์ หมายถึง พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นในรูปของเม็ดหรือผง ยังไม่ได้นำไปผ่านกระบวนการแปรรูปทำเป็นผลิตภัณฑ์ โครงสร้างระหว่างโมเลกุลมีลักษณะของการเชื่อมไขว้ (crosslink) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) สำหรับเรซินที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยเป็นพวกที่ละลายได้เมื่อโดน

เอกสาคความร้อนสูง (thermosetting resin) เรซินที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยมี 2 ชนิด คือ อัลคิลดีเรซิน (alkyld

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

resin) คือพลาสติกชนิดหนึ่ง เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่างไดไซโคลเพนทาไดอิน (dicyclopentadiene) กับกลีเซอรอลเอสเทอร์ (glycerol ester) พลาสติกชนิดนี้ เกิดการเชื่อมไขว้ระหว่างโมเลกุล จึงไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปและสารคล้ายพอลิยูรีเทน (polyurethane like compound) ซึ่งผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนต (diisocyanate) กับแอลกอฮอล์ที่มี - OH อยู่หลายหมู่หรือพอลิโออล (polyols) ซึ่งการเคลือบด้วยเรซินชนิดนี้ มีลักษณะพิเศษแตกต่างจากเรซินชนิดอื่นคือ พอลิไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับเนื้อปุ๋ยที่ผิวเม็ด สารเคลือบจึงติดแน่นและช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกร่อน การขัดสีระหว่างเม็ดปุ๋ย ทำให้ช่วยเคลือบปุ๋ยด้วยเรซินแบบแกรนูลาร์และแบบพริล (prilled fertilizer) ได้อย่างกว้างขวาง ปุ๋ยที่อยู่ภายในสารเคลือบนั้นจะละลายน้ำได้ง่าย จะเป็นปุ๋ยยูเรียหรือปุ๋ยเชิงประกอบที่มีจุลธาตุหรือไม่มีจุลธาตุก็ได้ ปัจจัยด้านการเคลือบที่ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารออกจากเม็ดปุ๋ยต่างกัน มี 2 ประเภท คือ ใช้เรซินที่มีองค์ประกอบต่างกัน ซึ่งแต่ละอย่างมีสมบัติในการยอมให้น้ำซึมผ่านไม่เท่ากันและเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยให้มีความหนาต่างกัน และสำหรับปัจจัยภายนอกที่ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยคือ อุณหภูมิ ในสภาพที่วัสดุปลูกมีอุณหภูมิสูง อัตราการปลดปล่อยจะสูงกว่าที่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นช่วงเวลากการปลดปล่อยธาตุในแถบฤดูร้อนจะสั้นกว่าในแถบฤดูหนาว ซึ่งผู้ผลิตจะเป็นผู้ระบุว่าปุ๋ยจะปลดปล่อยธาตุอาหารได้เป็นเวลากี่เดือน ในแต่ละแถบจะต่างกัน และปัจจัยอื่น ๆ เช่น การทำงานของจุลินทรีย์ดิน ค่า pH และความชื้นในดิน แทบจะไม่มีผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยประเภทนี้

- ปุ๋ยเคลือบด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (thermoplastic polymer-coated fertilizers) พอลิเมอร์ที่ใช้เคลือบเม็ดปุ๋ยคือ พอลิเอทิลีน วิธีการเคลือบคือนำพอลิเอทิลีนมาละลายในตัวทำละลายพวกคลอริเนเต็ดไฮโดรคาร์บอน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปฉีดพ่นบนผิวเม็ดปุ๋ยในเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะ สำหรับการควบคุมอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารออกจากเม็ดปุ๋ย ส่วนที่ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนซึ่งยอมให้น้ำซึมผ่านได้ช้ากับเอทิลีนไวนิลแอสซิเตต ซึ่งยอมให้น้ำซึมได้เร็ว โดยวิธีการลดอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทำได้โดยการเติมฝุ่นของแร่ระหว่างการเคลือบ ซึ่งมีผลในการควบคุม Q10 (คือ การเปลี่ยนแปลงของอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหาร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส) ของการปลดปล่อยให้มีค่าระหว่าง 1.5 - 2.0

เทคโนโลยีการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์นี้ ใช้ได้กับปุ๋ยแบบแกรนูลาร์และแบบพริลทั่วไป ส่วนวิธีการควบคุมอัตราการปลดปล่อย คือ ปรับสัดส่วนของพอลิเอทิลีนกับเอทิลีน-ไวนิล-แอสซิเตต (ethylene vinyl acetate, EVA) และปรับเปอร์เซ็นต์ของฝุ่นแร่ที่เติมระหว่างการเคลือบ ให้ได้ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารเร็ว ปานกลาง ช้าและช้ามาก แล้วนำปุ๋ยเหล่านั้นผสมกันในสัดส่วนที่ต้องการ

#### 2.3.4.2 ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizers, SRF)

ปุ๋ยปลดปล่อยช้า หมายถึง ปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป แต่ไม่สามารถควบคุมอัตราและช่วงเวลาในการปลดปล่อยอาหารได้มากนัก เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้นของดินและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน เป็นต้น ปุ๋ยประเภทนี้ได้แก่ ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ (urea-formaldehyde)

สังเกตได้ว่าปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย เนื้อปุ๋ยภายในจะเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำได้สูง (high solubility) การที่แต่เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยไว้เพื่อควบคุมการปลดปล่อย จึงควรเรียกว่า “ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย” ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลดปล่อย (CRF)” ส่วนปุ๋ยปลดปล่อยช้า เช่น ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์เป็นปุ๋ยเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่จาก ยูเรียที่มีสภาพละลายน้ำได้สูงแต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้ว เป็นปุ๋ยที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ (low solubility) และปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาช้าตามสภาพละลายน้ำได้ จึงเรียกว่า “ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (SRF)” เมื่อต้องการเรียกปุ๋ย 2 ชนิดนี้รวมกัน เรียกว่า “SRF/CRFs” ส่วนปุ๋ยแอมโมเนียมหรือยูเรีย ที่ผสมสารยับยั้ง (inhibitors) เพื่อทำให้ปุ๋ยเป็นประโยชน์ต่อพืชได้นานขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มี ประจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนปานกลางถึงสูง จึงอาจจำแนกปุ๋ยแอมโมเนียมหรือยูเรียที่ผสมสาร ยับยั้ง เป็นปุ๋ยไนโตรเจนออกฤทธิ์ช้า (slow – acting nitrogen)

### 2.3.5 การจำแนกปุ๋ยละลายช้า

การจำแนกปุ๋ยละลายช้าตามองค์ประกอบและกระบวนการผลิตแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้[1]

1) สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจนที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ (organic –N low-solubility compounds) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 พวก คือ สารประกอบที่เกิดจากการควบแน่น (condensation) ระหว่างยูเรียกับอัลดีไฮด์ เช่น ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งสลายตัวด้วยกิจกรรมของ จุลินทรีย์กับพวกที่ 2 เป็นสารประกอบอินทรีย์ซึ่งส่วนใหญ่สลายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมี เช่น ไอโซบิวทิล ไดอินไดยูเรีย (isobutylidene – diurea, IBDU) ปุ๋ยพวกนี้เป็น “ปุ๋ยปลดปล่อยช้า”

2) ปุ๋ยที่มีสิ่งกีดขวางทางฟิสิกส์ (physical barrier) เพื่อควบคุมการปลดปล่อยธาตุ อาหาร ปุ๋ยมีลักษณะเป็นเม็ดเคลือบโดยรอบด้วยพอลิเมอร์ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymers) หรือเป็นเมทริกซ์ซึ่งมีปุ๋ยกระจายอยู่ภายใน สำหรับเนื้อวัสดุดังกล่าวจะแทรกอยู่ระหว่างเนื้อปุ๋ยและ จำกัการละลายของปุ๋ยนั้น สำหรับปุ๋ยที่มีสารเคลือบแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ เคลือบผิวเม็ด ด้วยพอลิเมอร์ เช่น พลาสติกหรือเรซิน (resins) และเคลือบผิวเม็ดด้วยอินทรีย์สาร เช่น กำมะถัน สำหรับปุ๋ยละลายช้าชนิดเมทริกซ์ (matrix-base slow-release fertilizers) นั้น สารที่ใช้เป็นเมทริกซ์ยังแบ่งเป็นสารไม่ชอบน้ำ เช่น พอลิโอเลฟิน (polyolefines) และยาง นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจล (hydrogels) ซึ่งเป็นสารที่ชอบน้ำ ช่วยลดการละลายของปุ๋ย โดยอุ่มน้ำแล้วพองตัว สำหรับการใส่เมทริกซ์ในการผลิตยังมีน้อย ส่วนสารพวกไฮโดรเจล กำลังอยู่ในช่วงพัฒนาผลิตภัณฑ์ ปุ๋ยจำพวกนี้เป็น “ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (CRF)”

3) สารประกอบอนินทรีย์ที่มีสภาพละลายน้ำต่ำ (inorganic-low-solubility compounds) ได้แก่ แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต และหินฟอสเฟตที่ทำปฏิกิริยากับกรด บางส่วน (partially acidulated phosphate rock) ปุ๋ยพวกนี้เป็น “ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (SRF)”

## 2.4 ระบบเชื่อมโยง

### 2.4.1 การเชื่อมโยงด้วยประจุ

พอลิแซคคาไรด์ในกลุ่มกัมมธรรมชาติมีหลายชนิดที่มีหมู่คาร์บอกซิเลต ( $\text{COO}^-$ ) อยู่ใน โครงสร้าง ซึ่งสามารถเชื่อมโยงทางประจุด้วยพันธะไอออนิกได้ โดยการใช้สารเชื่อมโยงแบบโมโนวาเลนต์ เช่น  $\text{Ag}^+$  โดยมีการเกิดโคออร์ดิเนชันร่วม [40], การใช้สารเชื่อมโยงแบบไดวาเลนต์ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  [41] หรือการใช้สารเชื่อมโยงแบบไตรวาเลนต์ เช่น  $\text{Fe}^{3+}$  [43]

#### 2.4.1.1 การเชื่อมโยงประจุแบบโมโนวาเลนต์

การเชื่อมโยงประจุแบบโมโนวาเลนต์สามารถใช้ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate,  $\text{AgNO}_3$ ) เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยงได้ มีงานวิจัยเกี่ยวกับการเติมซิลเวอร์ไอออนลงในพอลิเอมิกแอซิด (Poly amic acid)) โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ionexchange) ได้เป็นซิลเวอร์คาร์บอกซิเลต ซึ่งด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พบว่าซิลเวอร์ไนเตรดสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโคโตซานได้ในสภาพที่ไม่รุนแรงเช่น ที่อุณหภูมิห้อง และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาสั้น โดยซิลเวอร์ไอออนจะเกิดโคออร์ดิเนชันกับคู่อิเล็กตรอน (Electron pair) ที่ตำแหน่งไนโตรเจนของหมู่เอมีนในโครงสร้างของโคโตซาน

#### 2.4.1.2 การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์

การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์สามารถใช้แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride,  $\text{CaCl}_2$ ) เป็นสารก่อกันระเชื่อมโยงได้ ซึ่งแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ จึงนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย D.Bergmann และคณะ [47] ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแซนแทนกัมและ Divalent cation เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Pb}^{2+}$  โดยจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิเลตของโพรูเวต

Bajpai และ Sharma [48] ได้เตรียมไฮโดรเจลโดยการเติม  $\text{CaCl}_2$  ลงใน Polymannuronate ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอนไอออนิก คือ  $\text{COO}^-$  ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างไอออนบวกและหมู่ฟังก์ชันที่เป็นแอนไอออนิกแล้วเกิดการเชื่อมโยงเป็นไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นไอออนิกพอลิเมอร์

#### 2.4.1.3 การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์

การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์สามารถใช้เฟอริกซัลเฟต ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) เป็นสารก่อกันระเชื่อมโยงได้ โดยการเชื่อมโยงจะเกิดผ่านหมู่คาร์บอกซิลิกของอัลจินต ไอออนของเหล็ก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) จะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับหมู่คาร์บอกซิลิกบนสายโซ่หลักของอัลจินตหลายหมู่ ทำให้สายโซ่ของอัลจินตเกิดการเชื่อมโยงกันเอง หรือเกิดการเชื่อมโยงกับสายโซ่อื่นเกิดเป็นเจลขึ้นได้

### 2.4.2 แคลเซียมคลอไรด์

มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว ใช้มากในงานอุตสาหกรรมทั่วไป อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมการเกษตร เป็นสารที่ดูดซับความชื้น และละลายได้ดีในน้ำ เมื่อละลายน้ำจะเกิดกรดไฮโดรคลอริก และเกิดแคลเซียมประจุบวก มักใช้ในรูป  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  หรือ  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [37]

#### 2.4.2.1 ลักษณะจำเพาะ

- สถานะ : ของแข็ง สีขาวเงิน
- จุดหลอมเหลว : 851 องศาเซลเซียส
- ความร้อนในการหลอมเหลว : 2.23 kcal/mol
- จุดเดือด : 1,482 องศาเซลเซียส
- ความร้อนในการกลายเป็นไอ : 36.7kcal/mol ที่ 1,482 องศาเซลเซียส
- ความหนาแน่น : 1.54 g/cc ที่ 20 องศาเซลเซียส
- ความร้อนเมื่อเผาไหม้ : 151.9 cal/g
- ละลายได้ดีในน้ำ ได้กรดไฮโดรคลอริก ดังสมการ  $\text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{CaO} + 2\text{HCl}$

#### 2.4.2.2 ประโยชน์แคลเซียมคลอไรด์

- งานเทคนิคกรีนนิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเร่งการแข็งตัว และเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นๆ

- สารละลายแคลเซียมคลอไรด์นิยมใช้รักษา และยืดอายุ ผลผลิตทางการเกษตร เช่น ผัก ผลไม้หลายชนิด โดยการฉีดพ่นสารละลายทั้งก่อน และหลังการเก็บเกี่ยว หรือจุ่มผลผลิตใน

เอกสารสารละลายโดยตรงนี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในอุตสาหกรรมบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์สำหรับดูดซับความชื้นหรือดูดซับน้ำออกจากตัวทำละลาย
- ในอุตสาหกรรมอาหารผลไม้กระป๋อง นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเพิ่มความกรอบให้แก่ผลไม้- ในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพิ่มความนุ่มของผลิตภัณฑ์เนื้อต่างๆ เช่น เนื้อโค เนื้อไก่ เป็นต้น- ในอุตสาหกรรมบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์ สำหรับยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหาร
- ในอุตสาหกรรมอาหารบางชนิด นิยมใช้แคลเซียมคลอไรด์เพื่อเพิ่มรสชาติ และสกัดโปรตีนออกจากเนื้อ เช่น การผลิตไส้กรอก การผลิตเนื้อหมัก

#### 2.4.2.3 ความเป็นพิษของแคลเซียมคลอไรด์

- สามารถกัดกร่อนโลหะให้เกิดสนิม หากใช้ในงานเทคนิคกรัดมักทำให้คอนกรีตมีการหดตัว และคอนกรีตมีความต้านทานซัลเฟตลดลง
- สารละลายมีฤทธิ์เป็นกรด (กรดไฮโดรคลอริก) ทำให้เกิดการระคายเคืองเมื่อสัมผัสทั้งบริเวณผิวหนัง และตา หากสัมผัสกับสารละลายที่มีความเข้มข้นมากจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองอย่างรุนแรงทำให้เนื้อเยื่อบริเวณนั้นตายได้
- การใช้แคลเซียมคลอไรด์ในผลิตภัณฑ์ผัก ผลไม้ และอาหารทุกชนิด อาจมีการตกค้างของคลอรีนทำให้เกิดความเป็นพิษได้ นอกจากนี้ ผลของการตกค้างของคลอรีนมักทำให้อาหารมีกลิ่นไม่รับประทาน และมีรสขม

#### 2.4.2.4 ข้อควรระวังในการใช้

- ขณะใช้ต้องสวมผ้าปิดจมูก แวนตากันสารเคมี สวมเสื้อผ้า รองเท้าบูท สวมถุงมือ และอุปกรณ์ป้องกันสารเคมีอื่น ๆ ทุกครั้ง
- เมื่อละลายน้ำไม่ควรสูดดม เพราะจะได้รับไอระเหยของคลอรีนได้ง่าย
- ระวังการสัมผัสกับโลหะทุกชนิด เพราะจะเกิดการกัดกร่อน

### 2.5 กระบวนการปลดปล่อยสาร (Controlled release, CR)

กระบวนการปลดปล่อยสาร (Controlled release , CR) คือ การออกแบบให้มีการปลดปล่อยสารในอัตราคงที่ และความเข้มข้นของสารไม่เปลี่ยนแปลงตามกาลเวลาเมื่อมีการดูดซับสาร รูปแบบการปลดปล่อยสารมีหลายรูปแบบ ดังนี้

#### 2.5.1 การแพร่ผ่านเมมเบรน (Membrane controlled device)

สารจะถูกกักเก็บอยู่ภายในไฮโดรเจล ซึ่งผิวหนังถูกเคลือบหรือห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์นี้เองจะทำหน้าที่ในการควบคุมการปลดปล่อยสารสู่ภายนอก แบ่งออกเป็น

1) Membrane diffusion : ใช้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่เกิดการพองตัวได้ทำให้เกิดรูภายในโครงสร้างสารจึงแพร่ผ่านรูของพอลิเมอร์

2) Membrane dissolution : สารที่ต้องการปลดปล่อยจะถูกปลดปล่อยออกโดยการละลายออกมาอย่างช้า ๆ ทำให้มีระยะเวลาในการปลดปล่อยยาวนานขึ้น ทำได้โดยการเคลือบอนุภาคสารที่ต้องการปลดปล่อยด้วยสารที่ละลายช้าให้มีความหนาต่าง ๆ กัน เมื่อผิวหนังที่เคลือบละลายหมดสารที่ต้องการปลดปล่อยก็จะถูกปล่อยออกมา โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอัตราเร็วในการละลายของสาร คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.1) ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์
- 2.2) ความเร็วในการละลายของสารเคลือบ (พอลิเมอร์)

### 2.5.2 การแพร่ผ่านเมทริกซ์ (Matrix device)

สารที่ต้องการปลดปล่อยจะกระจายอยู่ในพอลิเมอร์ แบ่งเป็น

1) Matrix diffusion : สารที่ต้องการปลดปล่อยจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในส่วนกักเก็บของไฮโดรเจล (พอลิเมอร์) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยสาร คือ

- 1.1) รูพรุนและช่องภายในรูพรุนของพอลิเมอร์
- 1.2) พื้นที่ผิวของเมทริกซ์
- 1.3) ความเข้มข้นของสารที่ปลดปล่อย

2) Matrix dissolution : ผสมพอลิเมอร์ที่ละลายได้เข้ากับสารที่ต้องการปลดปล่อย เพื่อลดการละลายให้ช้าลง สารจะละลายออกมาช้า ๆ พร้อม ๆ กับการละลายของพอลิเมอร์โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยสาร คือ

- 2.1) อัตราการละลายของพอลิเมอร์
- 2.2) พื้นที่ผิวของเมทริกซ์
- 2.3) อัตราส่วนของพอลิเมอร์ต่อสารที่ต้องการปลดปล่อย
- 2.4) การพองตัวของพอลิเมอร์

### 2.5.3 การปลดปล่อยโดยอาศัยความดันออสโมซิส (Osmosis device)

การปลดปล่อยโดยใช้แรงดันออสโมซิสประกอบด้วย

1) สารที่ดูดน้ำได้และทำให้เกิดแรงดัน osmosis  
 2) เยื่อเลือกผ่าน ยอมให้น้ำผ่านแต่ไม่ยอมให้สารละลายอื่นผ่าน แต่ได้ฟิล์มที่ไม่ละลายและไม่ยืดหยุ่น

3) ช่องที่เปิดให้สารเข้า-ออก (orifice pore)

### 2.5.4 อัดสารที่ต้องการปลดปล่อยในลักษณะเม็ด (Compression coated table)

อัดเม็ดเป็นชั้น 2-3 ชั้น โดยให้สารที่ต้องการปลดปล่อยอยู่ตรงกลาง แล้วนำพอลิเมอร์มาประกบชั้นบนและชั้นล่าง โดยชั้นพอลิเมอร์ที่มาประกบจะเป็นตัวควบคุมการปลดปล่อย

### 2.5.5 การแลกเปลี่ยนประจุโดยใช้เรซิน (Ion exchange resin)

ใช้กับสารที่ต้องการปลดปล่อยที่มีประจุ โดยใช้เรซินที่มีประจุตรงข้ามกับสารที่ต้องการปลดปล่อยและเมื่อสารที่ต้องการปลดปล่อยอยู่ในสภาวะที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ก็จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน จึงทำให้สารที่ต้องการถูกปลดปล่อยออกมา

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เฉลิมขวัญ เวชสกล และคณะ (2012) [2] ศึกษาการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม โดยมีโซเดียมเททระโบเรต ความเข้มข้น (0.6 % w/w) และแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ความเข้มข้น (0.05, 0.10 และ 0.23 M) เป็นสารเชื่อมโยง โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมอัลจิเนตต่อกัวร์กัมเป็น 4:6 และ 6:4 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมไฮโดรเจล พร้อมบรรจุสาร  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ในชั้นตอนเดียว จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มา

ศึกษาการบวมตัวและการปลดปล่อยสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ด้วยการตรวจวัดปริมาตรสารละลาย คำนวณค่าการปลดปล่อย และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์คอมพิวเตอร์ (CT) และเทคนิคการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ (X-ray) โดยพบว่าโครงสร้างไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความแข็งแรงและทนทานต่อการบวมตัวและการปลดปล่อยสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม การศึกษาครั้งนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{KH}_2\text{PO}_4$  ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer และพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ของเจลปุยอัดเม็ด พบว่าปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ในเจลปุยส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยสารลดลง โดยสูตร A4G6 และ A6G4 ปลดปล่อยสารออกมาได้เกือบ 100% สูตร A4G6-Ca25 และ A6G4-Ca25 มีค่าการปลดปล่อยสูงสุดเท่ากับ 80 % และ 91% ตามลำดับ และสูตรที่มีปริมาณ  $\text{CaCl}_2$  สูงขึ้นส่งผลให้มีการปลดปล่อยสารลดลง

โพลิน นิมิตรพรชัย และคณะ (2014) [38] ศึกษาการเตรียมเม็ดไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างไคโตซาน (Chitosan) กับ แซนแทนกัม (Xanthan Gum) โดยมีสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์และเฟอริกซัลเฟตเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารเชื่อมโยงทางประจุแบบไดวาเลนต์และไตรวาเลนต์ โดยเริ่มจากเตรียมเม็ดไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นของไคโตซาน 0.5, 1.0 และ 1.5 (%w/v) ภาพตัดขวางของเม็ดไฮโดรเจลที่ได้แสดงลักษณะของชั้นเจลโดยชั้นนอก (Shell) เป็นส่วนของไคโตซานและชั้นใน (Core) เป็นส่วนของแซนแทนกัม โดยสูตร C5X-CaFe10P มีชั้นเจลที่มีการเชื่อมโยงบริเวณขอบนอกที่หนาที่สุด ผลการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) ในสภาวะต่าง ๆ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ได้แก่ สภาวะจำลองกรดในกระเพาะอาหาร (Simulated gastric fluid: SGF, pH 1.2), สภาวะเลียนแบบลำไส้ (Phosphate buffer solution: PBS, pH 7.4), สภาวะสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution, pH 7) ที่อุณหภูมิ 25 และ 37 องศาเซลเซียส พบว่าเม็ดไฮโดรเจลทุกสูตรมีความสามารถในการบวมตัวได้นานโดยมีค่าสูงสุดประมาณ 3,000 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือทั้งที่ 1 และ 24 ชั่วโมงสูง ผลการศึกษามบัตติเบื้องต้นของการปลดปล่อยยาพาราเซตามอล ซึ่งเป็นตัวแทนของยากลุ่มละลายน้ำได้ดีในสภาวะต่าง ๆ พบว่าสูตร C10X-CaFe10P สามารถหน่วงการปลดปล่อยยาได้ดีที่สุด จึงเลือกมาศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยยาพาราเซตามอลในสภาวะจำลองระบบย่อยอาหาร พบว่ามีการปลดปล่อยยาออกมาเร็วในช่วงต้นขณะที่แช่อยู่ในสารละลาย SGF และสามารถปลดปล่อยยาพาราเซตามอลได้สูงสุด 92% และเมื่อเพิ่มการเชื่อมโยงในส่วนของแซนแทนกัมด้วยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ในสูตร C10X-CaFe10P\* และ C10X-CaFe10P\*\* พบว่าทั้งสองสูตรมีการหน่วงการปลดปล่อยยาได้มากกว่าสูตร C10X-CaFe10P

จิตราหนู จิรปฐมกุล และคณะ (2011) [39] ศึกษาการปลดปล่อยสารอโรฟอสเฟตในรูปแบบของสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม โดยมีโซเดียมเททระบอเรตเป็นตัวเชื่อมโยง โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมอัลจิเนตต่อกัวร์กัมเป็น 6:4 และ 4:6 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมไฮโดรเจลที่บรรจุสารอโรฟอสเฟตดังกล่าว 2 แบบ คือ การเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารอโรฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว และการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารอโรฟอสเฟตแบบสองขั้นตอน จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาศึกษาการดูดซับน้ำและการปลดปล่อยสารอโรฟอสเฟต แล้วทำการตรวจวัดปริมาณสารอโรฟอสเฟตโดยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A.K.Nayak และคณะ (2015) [3] ได้ศึกษาการบวมตัวและการปลดปล่อยยาจากบีดระหว่างอัลจินเตและสารสกัดจากเมล็ดมะขาม เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ โดยเบื้องต้นศึกษาการเตรียมเม็ดบีดและการปลดปล่อยยาเมตฟอร์มิน พบว่า เม็ดบีดมีการปลดปล่อยอย่างรวดเร็วในสภาวะที่เป็นกรดในเวลา 2 ชั่วโมง และ มีการปลดปล่อยอย่างช้าๆในสภาวะที่เป็นด่าง โดยอัตราการปลดปล่อยสารเมตฟอร์มินขึ้นอยู่กับจุดสมมูลของการบวมตัวของเม็ดบีด

เกตุแก้ว กามุณี (2554) [40] ศึกษาการเตรียมและการปลดปล่อยเพนติเมทาลินของเม็ดบีดอัลจินเตคอมโพสิตโดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาสูตรสำหรับเม็ดบีดโคโตซานและโคโตซาน-อัลจินเตที่มีเพนติเมทาลิน เพื่อศึกษาการปลดปล่อยเพนติเมทาลิน ในเบื้องต้นได้ศึกษาการเตรียมเม็ดบีดไฮโดรเจลของโคโตซาน-เพนติเมทาลินและพบว่า การปลดปล่อยเพนติเมทาลินที่เก็บในเม็ดบีดโคโตซานมีปริมาณน้อยไม่เพียงพอ เพื่อที่จะเพิ่มอัตราการปลดปล่อยของเพนติเมทาลิน จึงใช้อัลจินเตซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ดี และสามารถเกิดเป็นไฮโดรเจลได้กับโคโตซาน การศึกษาแสดงให้เห็นว่าเม็ดบีดโคโตซาน และโคโตซาน-อัลจินเตมีอัตราการปลดปล่อยที่ต่ำ ซึ่งทำให้จำเป็นต้องใช้เม็ดบีดมากขึ้นในแปลงเกษตร เพื่อที่จะแก้ปัญหาเรื่องนี้จึงเตรียมเม็ดบีดอัลจินเตเพื่อใช้ในการควบคุมการปลดปล่อย เมื่อเม็ดบีดแห้งพบว่าเม็ดบีดสูญเสียรูปร่างกลมและหดตัวลง จึงเตรียมเม็ดบีดโดยใช้อัลจินเตกับแป้ง จาก SEM ยืนยันว่าเม็ดบีดมีรูปร่างกลม และ FTIR ยืนยันความคงตัวของเคมีของเพนติเมทาลินในอัลจินเต-แป้ง ได้เตรียมเม็ดบีดที่ต่างกันโดยการแปรชนิดของแป้ง อัตราส่วนของอัลจินเตต่อแป้ง ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ และเวลาในการแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าหากความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ และเวลาที่ใช้แช่ในแคลเซียมคลอไรด์มากขึ้น การบวมตัวและการปลดปล่อยลดลง กลไกการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ของเม็ดบีดอัลจินเต-แป้งสามารถปลดปล่อยเพนติเมทาลินโดยเริ่มจากเม็ดบีดบวมตัว และสลายตัวพร้อมปลดปล่อยเพนติเมทาลิน จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเม็ดบีดอัลจินเต-แป้ง มีการปลดปล่อยของเพนติเมทาลินเพียงพอที่สามารถกำจัดวัชพืชได้ จากการศึกษาประสิทธิภาพพบว่าเม็ดบีดอัลจินเต-แป้งสามารถควบคุมการงอกของวัชพืชได้

พีรพงศ์ หาญพิชาญชัย (2002) [41] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยของเม็ดปุ๋ยโดยวิธีเคลือบด้วยโคโตซาน โคโตซานที่มีร้อยละของการกำจัดหมู่อะซิทธิล ร้อยละ 79 และร้อยละ 95 จะละลายได้ในกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ เพื่อให้ได้สารละลายโคโตซานที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ศึกษาผลกระทบจากปริมาณของธาตุอาหารในปุ๋ยต่ออัตราการละลาย สารละลายโคโตซานจะถูกพ่นลงบนเม็ดปุ๋ยภายในถังเคลือบ และนำไปอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ปุ๋ยที่เคลือบด้วยโคโตซานจะนำไปศึกษาการละลายของธาตุอาหารในน้ำกลั่น และวัดปริมาณของธาตุอาหารซึ่งได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ตามเวลาที่กำหนด จากผลการทดลองพบว่า ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ที่ปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยที่เคลือบด้วยโคโตซาน มีปริมาณน้อยกว่าปุ๋ยที่ไม่ได้เคลือบ อัตราการปลดปล่อยของธาตุอาหารจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายโคโตซาน และค่าร้อยละของการกำจัดหมู่อะซิทธิลของโคโตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายโคโตซานที่มีความเข้มข้นสูง และปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารละลายโคโตซานที่มีค่าร้อยละของการลดหมู่อะซิโตน้อย จะมีอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารช้าลง อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่เคลือบด้วยโคโตซานจะขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุอาหารในปุ๋ยเคลือบ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมเม็ดปิดจากโซเดียมอัลจิเนตซึ่งเป็นกัมธรรมชาติมาผสมกับโพแทสเซียมไนเตรตแล้วแช่ในแคลเซียมคลอไรด์เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยง และศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไนเตรต นอกจากนี้ทำการปรับปรุงเม็ดปิดโดยนำไปเคลือบผิวด้วยโซเดียมอัลจิเนต เพอร์ริกซัลเฟตหรือโคโตซานเพื่อควบคุมการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

- 1) อัลจีเนต (Alginate) เกรดการค้า
- 2) โพแทสเซียมไนเตรต ( $\text{KNO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba.,Ltd
- 3) แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) บริษัท Merck จำกัด
- 4) เพอร์ริกซัลเฟต ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Loba Chemie Co.,Ltd
- 5) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% บริษัท Carlo Erba.,Ltd
- 6) ไคโตซาน (Chitosan) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Eland จำกัด
- 7) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Laboratory Reagent & Fine Chemicals จำกัด
- 8) กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba.,Ltd

#### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 1) บริษัทเครื่องแก้ว
- 2) เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน บริษัท IKA จำกัด รุ่น HS-7
- 3) เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument จำกัด รุ่น SI-234
- 4) ตู้อบ บริษัท Memmert จำกัด รุ่น UN55
- 5) เครื่อง UV-Vis spectrophotometer (Thermo Scientific genesis 10s)
- 6) แท่งแม่เหล็กคนสาร
- 7) ผ้าสกรีน
- 8) เครื่องกรองแบบสุญญากาศ
- 9) แม่พิมพ์ซิลิโคน
- 10) เวย์เนอร์คาลิปเปอร์
- 11) Peristaltic pump บริษัท Lead Fluid จำกัด รุ่น YZ15
- 12) Desiccator
- 13) Fan Oven ยี่ห้อ OTTO รุ่น CO-705
- 14) กล้อง Digital Microscopie (กำลังขยาย 60X) รุ่น Dino-lite pro2

#### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

##### 3.3.1 สารละลายอัลจีเนต

- 1) ชั่งอัลจีเนต 7.0 กรัม
- 2) ตวงน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร และให้ความร้อนกับน้ำกลั่น
- 3) ละลายอัลจีเนตในน้ำกลั่นที่ร้อนโดยปั่นกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
- 4) ได้รับความเข้มข้นของสารละลายอัลจีเนต 7 %w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 สารละลายแคลเซียมคลอไรด์

- 1) ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ 29.4 และ 58.8 กรัม
- 2) ละลายในน้ำกลั่นใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตรและปรับปริมาตร
- 3) ได้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2.0 และ 4.0 โมลาร์ ตามลำดับ

### 3.3.3 สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

- 1) ชั่งเฟอร์ริกซัลเฟต 41.80 กรัม
- 2) ละลายในน้ำกลั่นใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตร
- 3) ได้สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเข้มข้น 1.0 โมลาร์

### 3.3.4 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก

- 1) ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 โมลาร์ มา 83 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
- 2) ได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์

### 3.3.5 สารละลายโคโคซาน

- 1) ชั่งโคโคซานจำนวน 1 กรัม และ กรดอะซิติกจำนวน 1 กรัม
- 2) ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำ 100 มิลลิลิตร พร้อมทั้งปั่นกวนเป็นเวลา 1 คืน
- 3) ได้สารละลายโคโคซานเข้มข้น 1 %w/v

### 3.3.6 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

- 1) ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 0.4 กรัม
- 2) ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตร
- 2) ได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์

### 3.3.7 สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต

- 1) นำโพแทสเซียมไนเตรตไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน
- 2) ชั่งโพแทสเซียมไนเตรตมา 0.1804 กรัม ในขวดปรับปริมาตร 250 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
- 3) ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตในข้อ 2 มา 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร 250 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
- 4) สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต 1 มิลลิลิตร มีปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตเท่ากับ 10 ไมโครกรัม

## 3.4 ขั้นตอนการเตรียมเมล็ดบัตร์จุลินทรีย์อาหาร

### 3.4.1 การเตรียมเมล็ดบัตร์จุลินทรีย์อาหารเชื่อมโยงระบบเดียวโดยใช้แคลเซียมคลอไรด์

- 1) เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 2 โมลาร์, 4 โมลาร์ และอัลจินต

เข้มข้น 7.0 %w/v

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ใส่โพแทสเซียมไนเตรต 15 กรัมในสารละลายอัลจินต 20 มิลลิลิตร ปั่นกวนให้เข้ากันดี

3) ระบายน้ำออกจากสารละลายในข้อ 2 ประมาณ 5 กรัม

4) เทใส่แม่พิมพ์จนเต็ม และนำไปแช่ในตู้เย็น (-5°C-0°C) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

5) นำเม็ดบีดออกจากแม่พิมพ์แช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 และ 4 โมลาร์ ปริมาณ 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 3-5 องศาเซลเซียส และทิ้งไว้ 5 หรือ 15 นาที

6) ตักเม็ดบีดออกมาซับให้แห้ง และอบใน Fan oven ที่อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

7) นำออกมาเข้าตู้อบอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน และเก็บในเดซิเคเตอร์

### 3.4.2 การปรับปรุงเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรต

#### 3.4.2.1 โดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟต

1) นำเม็ดบีดที่ได้จากข้อ 3.4.1 มาแช่ในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 30 วินาที หรือ 1 นาที

2) ตักเม็ดบีดออกมาซับให้แห้ง และอบใน Fan oven อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3) นำออกมาเข้าตู้อบอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน และเก็บในเดซิเคเตอร์

#### 3.4.2.2 โดยใช้อัลจินต

1) นำเม็ดบีดที่ได้จากข้อ 3.4.1 มาแช่ในสารละลายอัลจินตเข้มข้น 7% w/v เป็นเวลา 10 วินาที

2) ตักเม็ดบีดขึ้นมาแช่ในแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 4 โมลาร์ เป็นเวลา 5 นาที

3) ตักเม็ดบีดออกมาซับให้แห้ง และอบใน Fan oven อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4) นำออกมาเข้าตู้อบอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน และเก็บในเดซิเคเตอร์

#### 3.4.2.3 โดยใช้ไคโตซาน

1) นำเม็ดบีดที่ได้จากข้อ 3.4.1 มาแช่ในสารละลายไคโตซานเข้มข้น 1% w/v เป็นเวลา 10 วินาที

2) ตักเม็ดบีดออกมา และอบใน Fan oven อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3) แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 10 วินาที

4) ล้างด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ตักเม็ดบีดออกมาซั้บให้แห้ง และอบใน Fan oven อุณหภูมิ 125 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 6) นำออกมาเข้าตู้อบอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน และเก็บในเดซิเคเตอร์

### 3.5 การตรวจวิเคราะห์

#### 3.5.1 การทดสอบการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตในเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

- 1) ชั่งน้ำหนักเม็ดบีดที่จะทดสอบ
- 2) หยดน้ำผ่านเม็ดบีดจำนวน 1 เม็ด ที่มีผ้าสกรีนรองอยู่ โดยใช้ Peristaltic pump ด้วยอัตรา 20 มิลลิลิตร ต่อ 5 นาที
- 3) รองน้ำที่ผ่านเม็ดลงมาเก็บไว้ในบีกเกอร์
- 4) ทำซ้ำข้อ 1 และข้อ 2 โดยฝั่งเม็ดไว้ 55 นาที ก่อนเริ่มรอบต่อไป

#### 3.5.2 การศึกษาพฤติกรรมของการปลดปล่อยโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

##### 3.5.2.1 การเตรียมกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve)

- 1) ปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตจากข้อ 3.3.7 เป็นจำนวน 0, 1, 2, 4, 7, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 มิลลิลิตร
- 2) เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ จำนวน 1 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 50 มิลลิลิตร
- 3) ได้สารละลายไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่มีความเข้มข้น 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.4, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 และ 7.0 mg/L ตามลำดับ
- 4) ทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร
- 5) พล็อตกราฟระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไนเตรตและความเข้มข้นของไนโตรเจน โดยแกน X คือ ความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปไนเตรต และแกน Y คือ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไนเตรต

##### 3.5.2.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไนเตรตที่บรรจุอยู่ภายในเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

- 1) ชั่งน้ำหนักเม็ดบีด (ใช้เม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร 1 เม็ด ที่มีน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.09 -0.22 g)
- 2) นำเม็ดบีดที่ได้มาบดให้ละเอียดและเติมน้ำ 20 มิลลิลิตร
- 3) ทำการปั่นกวนพร้อมให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
- 4) ทิ้งให้เย็น แล้วนำไปกรองแบบลดความดัน
- 5) นำน้ำที่ได้มาใส่ขวดปรับปริมาตร 50 มิลลิลิตรและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
- 6) ปิเปตมา 0.1 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 8) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตรและทิ้งไว้ 10 นาที
- 9) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร
- 10) นำค่าการดูดกลืนแสงของไนโตรเจนที่ปลดปล่อยจากเม็ดไฮโดรเจลมาเทียบกับกราฟมาตรฐานจะได้ความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่อยู่ในเม็ดไฮโดรเจลที่ปลดปล่อยออกมา 100%

### 3.5.2.3 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไนเตรตที่ปลดปล่อยออกมาจากภายในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร

- 1) เปิดน้ำที่ได้จากข้อ 3.5.1 มาในปริมาณที่เหมาะสม
- 2) ใส่กรดไฮโดรคลอริก 1 มิลลิลิตร
- 3) ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปรับปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตรและทิ้งไว้ 10 นาที
- 4) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร
- 5) นำค่าการดูดกลืนแสงของไนโตรเจนที่ปลดปล่อยจากเม็ดไฮโดรเจลมาเทียบกับกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ปลดปล่อยออกมา

### 3.5.3 ประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร

#### 3.5.3.1 การคำนวณหาประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร

เม็ดปิดที่ยังไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงแล้วในแต่ละสูตรมาทำให้ละลาย เพื่อให้ธาตุอาหารละลายออกมาทั้งหมด แล้วนำไปตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{Efficiency} = 100 - \left( \frac{A-B}{A} \times 100 \right)$$

- เมื่อ A คือ ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตต่อเม็ดไฮโดรเจลที่ยังไม่เชื่อมโยง 1 เม็ด  
B คือ ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตต่อเม็ดไฮโดรเจลที่เชื่อมโยง 1 เม็ด

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายไนโตรเจนในรูปไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารซึ่งเตรียมจากโซเดียมอัลจิเนตผสมกับโพแทสเซียมไนเตรต โดยศึกษาผลของระบบการเชื่อมโยง ได้แก่

- เม็ดปิดที่มีการเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ที่เวลาและความเข้มข้นต่าง ๆ
- เม็ดปิดที่มีการเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์และเคลือบด้วยเพอร์ริกซัลเฟตที่เวลาต่าง ๆ
- เม็ดปิดที่มีการเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์และเคลือบด้วยโคโตซาน
- เม็ดปิดที่มีการเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ และเคลือบด้วยโซเดียมอัลจิเนตแล้วเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์

เม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารเตรียมโดยใช้สารละลายอัลจิเนตความเข้มข้น 7%w/v ผสมกับโพแทสเซียมไนเตรต 15 กรัม และเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 2M กับ 4M ที่เวลา 5 นาที กับ 15 นาที ทำการปรับปรุงสมบัติของเม็ดปิดโดยการเคลือบผิวด้วยเพอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้น 1M ที่เวลา 30 วินาที กับ 1 นาที หรือเคลือบผิวด้วยโคโตซานความเข้มข้น 0.1M หรือเคลือบผิวด้วยอัลจิเนตความเข้มข้น 7%w/v จากนั้นนำเม็ดปิดที่เตรียมได้มาศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไนเตรต โดยการวัดปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร และศึกษาการกักเก็บสารโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิด สัญลักษณ์ของเม็ดปิดสูตรต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารของสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดียว

สูตร	องค์ประกอบ	แคลเซียมคลอไรด์	
	อัลจิเนต (%w/v)	ความเข้มข้น (M)	เวลา (นาที)
ACa2/15	7.0	2.0	15
ACa4/5			5
ACa4/15		4.0	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารของสูตรที่เชื่อมโยงสองระบบ

สูตร	เชื่อมโยงสองระบบ					
	อัลจินต (7%w/v) +CaCl <sub>2</sub>		Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>		โคโตซาน	
	ความเข้มข้น (M)	เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (M)	เวลา (วินาที)	ความเข้มข้น (%w/v)	เวลา (วินาที)
ACa2/15-ACa4/5	4.0	5	-	-	-	-
ACa2/15-Fe0.5	-	-	1.0	30	-	-
ACa2/15-Fe1	-	-	-	60	-	-
ACa2/15-C	-	-	-	-	1.0	10
ACa4/5-ACa4/5	4.0	5	-	-	-	-
ACa4/5-Fe0.5	-	-	1.0	30	-	-
ACa4/5-Fe1	-	-	-	60	-	-
ACa4/5-C	-	-	-	-	1.0	10
ACa4/15-ACa4/5	4.0	5	-	-	-	-
ACa4/15-Fe0.5	-	-	1.0	30	-	-
ACa4/15-Fe1	-	-	-	60	-	-
ACa4/15-C	-	-	-	-	1.0	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

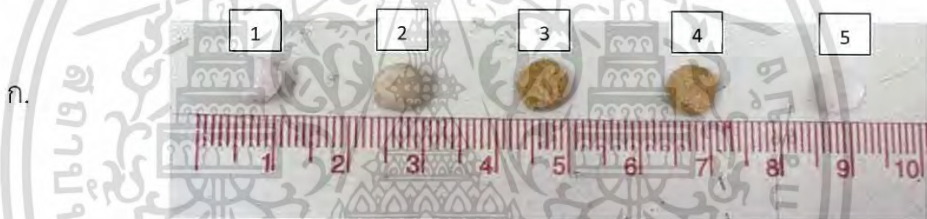
#### 4.1 การเตรียมเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

เตรียมเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารจากโซเดียมอัลจิเนตแล้วเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ นำเม็ดบีดที่ได้ไปทำการปรับปรุงโดยเชื่อมโยงสองระบบ โดยเคลือบผิวด้วยเฟอร์ริกซัลเฟต, โคโคซาน หรืออัลจิเนต จากนั้นนำเม็ดบีดที่ได้ไปศึกษาลักษณะพื้นผิวด้านนอก, ขนาดอนุภาค และพื้นผิวด้านใน

##### 4.1.1 ลักษณะพื้นผิวด้านนอกและขนาดอนุภาคของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของเม็ดบีดสูตรต่างๆ พบว่าเม็ดบีดสูตรที่ยังไม่ทำการปรับปรุงมีลักษณะแข็ง ผิวขรุขระ สีขาวขุ่น, เม็ดบีดสูตรที่ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจิเนต 1 ชั้นมีลักษณะแข็ง ผิวเรียบลื่น สีน้ำตาล มีขนาดใหญ่กว่าเม็ดบีดสูตรอื่น, เม็ดบีดสูตรที่ปรับปรุงโดยเคลือบเฟอร์ริกซัลเฟตมีลักษณะแข็งมาก ผิวขรุขระ สีเหลือง, เม็ดบีดสูตรที่ปรับปรุงโดยเคลือบโคโคซานมีลักษณะแข็ง ผิวเรียบ สีขาวขุ่น มีขนาดเล็กกว่าเม็ดบีดสูตรอื่น ภาพของเม็ดบีดทุกสูตรแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยค่าน้ำหนัก, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ปริมาตร และความหนาแน่นกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 4.1

1. เม็ดบีดจากอัลจิเนตเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 2 M เป็นเวลา 15 นาที: เม็ดที่ 1 คือ  $ACa_2/15$ , เม็ดที่ 2 คือ  $ACa_2/15-ACa_4/5$ , เม็ดที่ 3 คือ  $ACa_2/15-Fe_{0.5}$ , เม็ดที่ 4 คือ  $ACa_2/15-Fe_1$  และ เม็ดที่ 5 คือ  $ACa_2/15-C$



2. เม็ดบีดจากอัลจิเนตเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 4 M เป็นเวลา 5 นาที: เม็ดที่ 1 คือ  $ACa_4/5$ , เม็ดที่ 2 คือ  $ACa_4/5-ACa_4/5$ , เม็ดที่ 3 คือ  $ACa_4/5-Fe_{0.5}$ , เม็ดที่ 4 คือ  $ACa_4/5-Fe_1$  และ เม็ดที่ 5 คือ  $ACa_4/5-C$



3. เม็ดบีดจากอัลจิเนตเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 4 M เป็นเวลา 15 นาที: เม็ดที่ 1 คือ  $ACa_4/15$ , เม็ดที่ 2 คือ  $ACa_4/15-ACa_4/5$ , เม็ดที่ 3 คือ  $ACa_4/15-Fe_{0.5}$ , เม็ดที่ 4 คือ  $ACa_4/15-Fe_1$  และ เม็ดที่ 5 คือ  $ACa_4/15-C$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะทางเพื่อการวิจัยและพัฒนาเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารในแต่ละรูปที่ 4.1 ลักษณะตัวอย่างเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารในแต่ละสูตร ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

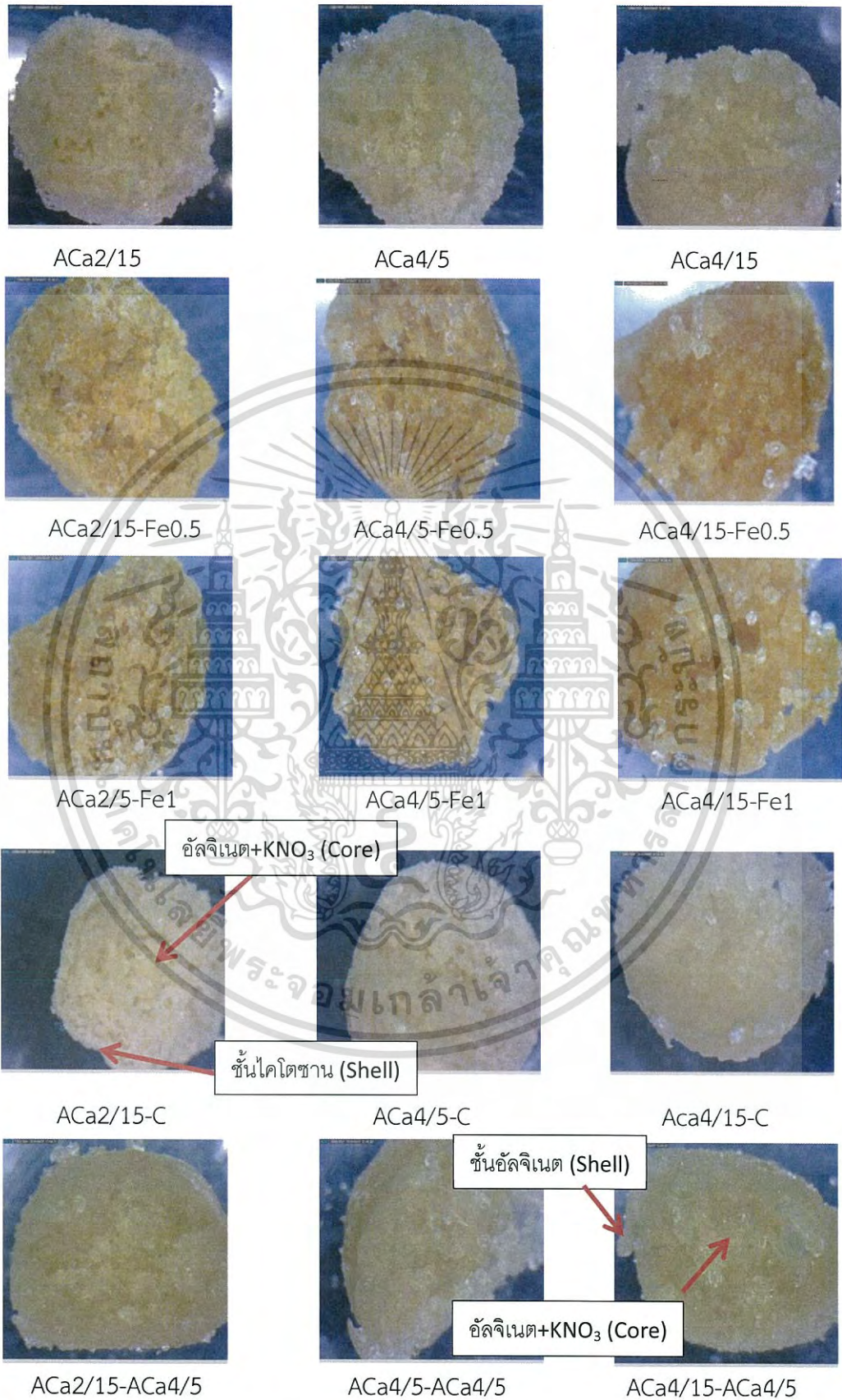
ตารางที่ 4.3 ค่าน้ำหนัก, เส้นผ่านศูนย์กลาง, ปริมาตร และความหนาแน่นเฉลี่ยกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารแต่ละสูตร

สูตร	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
ACa2/15	0.1679 ±0.0095	0.5912 ±0.0340	0.1092 ±0.0190	1.5719 ±0.2309
ACa4/5	0.1968 ±0.0133	0.6092 ±0.0232	0.1189 ±0.0140	1.6764 ±0.2320
ACa4/15	0.2238 ±0.0185	0.6385 ±0.0365	0.1375 ±0.0239	1.6762 ±0.3584
ACa2/15-Fe0.5	0.1731 ±0.0070	0.6524 ±0.0185	0.1461 ±0.0120	1.1905 ±0.0908
ACa4/5-Fe0.5	0.2052 ±0.0118	0.6786 ±0.0169	0.1646 ±0.0126	1.2286 ±0.1905
ACa4/15-Fe0.5	0.2218 ±0.0180	0.6841 ±0.0280	0.1694 ±0.0215	1.3213 ±0.1460
ACa2/5-Fe1	0.1711 ±0.0121	0.6352 ±0.0228	0.1347 ±0.0147	1.2805 ±0.1366
ACa4/5-Fe1	0.1927 ±0.0161	0.6642 ±0.0221	0.1540 ±0.0149	1.2598 ±0.1466
ACa4/15-Fe1	0.2045 ±0.0090	0.6750 ±0.0273	0.1685 ±0.0095	1.2155 ±0.0605
ACa2/15-C	0.0972 ±0.0127	0.5897 ±0.0237	0.1083 ±0.0123	0.9045 ±0.1314
ACa4/5-C	0.1349 ±0.0100	0.6302 ±0.0225	0.1316 ±0.0138	1.0319 ±0.0943
Aca4/15-C	0.1569 ±0.0072	0.6349 ±0.0232	0.1349 ±0.0148	1.1735 ±0.1243
ACa2/15- ACa4/5	0.1894 ±0.100	0.6412 ±0.0263	0.1388 ±0.0174	1.3838 ±0.1861
ACa4/5- ACa4/5	0.2075 ±0.0127	0.6502 ±0.0373	0.1452 ±0.0237	1.4697 ±0.2994
ACa4/15- ACa4/5	0.2435 ±0.0126	0.6512 ±0.0369	0.1460 ±0.0255	1.7005 ±0.2172

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 ลักษณะพื้นผิวด้านในของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร

รูปที่ 4.2 เป็นภาพถ่ายภาพตัดขวางของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารแต่ละสูตรแสดงให้เห็นถึงลักษณะของพื้นผิวด้านในโดยจากสูตร  $ACa2/15$ ,  $ACa4/5$  และ  $ACa4/15$  ซึ่งเป็นสูตรที่ยังไม่ปรับปรุง พบว่ามีช่องว่างภายในเม็ดปิด ซึ่งคาดว่าเกิดการเชื่อมโยงไม่ดีพอ ทำให้สารที่อยู่ภายในหลุดออก สำหรับสูตร  $ACa2/15-Fe0.5$ ,  $ACa4/5-Fe0.5$ ,  $ACa4/15-Fe0.5$  เป็นเม็ดปิดที่เคลือบด้วยเฟอริกซัลเฟตเป็นเวลา 30 วินาที และสูตร  $ACa2/5-Fe1$ ,  $ACa4/5-Fe1$ ,  $ACa4/15-Fe1$  เป็นเม็ดปิดที่เคลือบด้วยเฟอริกซัลเฟตเป็นเวลา 1 นาที จะเห็นว่าช่องว่างระหว่างเนื้อสารมีน้อยลง เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงที่มากขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของประจุของสารเชื่อมโยง ทำให้เม็ดปิดมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่มีความเปราะมากขึ้นเช่นกัน ส่วนสูตร  $ACa2/15-C$ ,  $ACa4/5-C$  และ  $ACa4/15-C$  เป็นเม็ดปิดที่เคลือบด้วยโคโคซาน จะเห็นว่าเม็ดปิดมีลักษณะเป็นชั้นเจลแยกกันอย่างชัดเจน โดยชั้นนอก (Shell) เป็นส่วนของโคโคซาน และชั้นใน (Core) เป็นส่วนของอัลจินเตที่ผสมสารโพแทสเซียมไนเตรต เนื่องจากโคโคซานมีหมู่เอมีนซึ่งมีประจุบวกจัดเป็นพอลิแคทไอออน ส่วนอัลจินเตมีหมู่คาร์บอกซิเลตซึ่งมีประจุลบจัดเป็นพอลิแอนไอออน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางประจุกันทันทีที่บริเวณชั้นผิว จึงเห็นลักษณะเป็น Core-Shell เกิดขึ้น เช่นเดียวกับสูตร  $ACa2/15-ACa4/5$ ,  $ACa4/5-ACa4/5$  และ  $ACa4/15-ACa4/5$  เป็นเม็ดปิดที่เคลือบทับด้วยอัลจินเตและเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งเคลือบทับลงบนอัลจินเตที่เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์แล้วจึงเห็นเป็นลักษณะ Core-Shell เช่นเดียวกัน โดยชั้นนอก (Shell) เป็นชั้นอัลจินเตที่เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ และชั้นใน (Core) เป็นชั้นอัลจินเตผสมโพแทสเซียมไนเตรตเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ แต่เม็ดปิดสูตรที่เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์หรือเฟอริกซัลเฟตไม่เห็นลักษณะดังกล่าว เนื่องจากแคลเซียมไอออนและเฟอริกไอออนที่มีประจุบวก แต่จัดเป็นมีลติแคทไอออนจะมีขนาดเล็กกว่าพอลิแคทไอออนทำให้สามารถแพร่ผ่านเข้าไปยังชั้นในได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการเชื่อมโยงทั่วทั้งเม็ดปิด ดังนั้นจึงไม่เห็นลักษณะ Core-Shell เกิดขึ้น



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายพื้นผิวภายใน (ภาพตัดขวาง) ของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารจากกล้อง Digital Microscope ที่ส่องดูสำหรับการศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

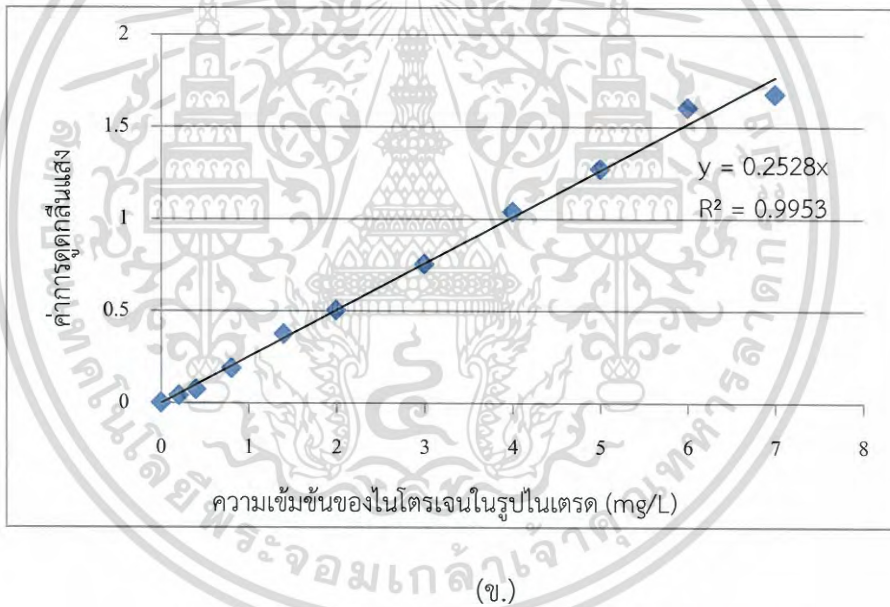
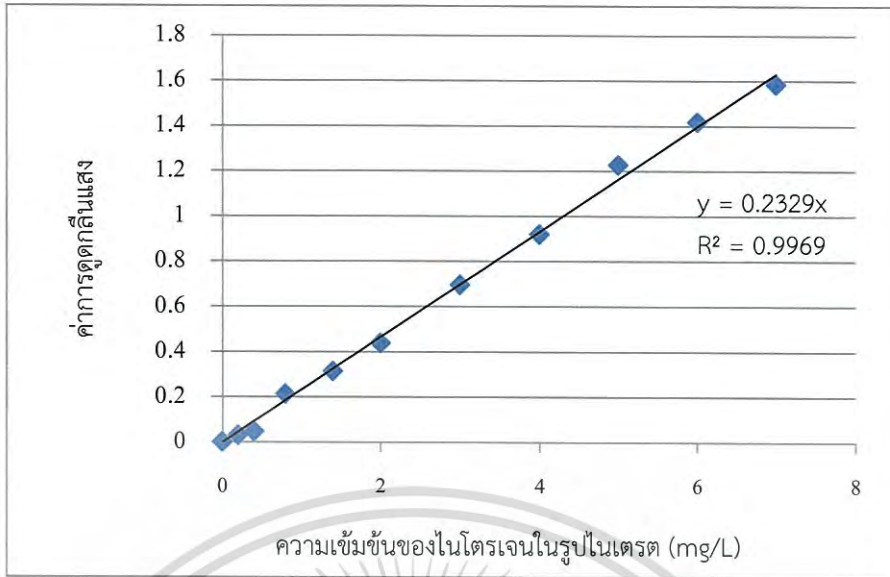
#### 4.2 การสร้างกราฟมาตรฐานความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปไนเตรต

จากหัวข้อ 3.5.2.1 จะได้กราฟมาตรฐาน โดยพลอตระหว่างแกน x เป็นความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปไนเตรตกับแกน y เป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไนเตรต

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปไนเตรตจากข้อ 3.3.7 จะได้สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต 1 มิลลิลิตร มีปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรต 10 ไมโครกรัม จากนั้นปีเปตมาจำนวน 1 มิลลิลิตร เติมกรด HCl 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโพแทสเซียมไนเตรตเจือจาง 0.02 มิลลิลิตร

สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต 1 ml	มี $\text{N-NO}_3^-$ 10 $\mu\text{g}$
สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต 0.02 ml	มี $\text{N-NO}_3^-$ 0.2 $\mu\text{g}$
ดังนั้น สารละลายโพแทสเซียมไนเตรต 1 L	มี $\text{N-NO}_3^-$ 0.2 mg

โดยมีสมการเส้นตรงคือ  $y=0.2329x$ , ค่า  $R^2=0.9969$  ดังรูปที่ 4.3 (ก.) แต่เนื่องจากมีการเตรียมกรด HCl ในการทดลองเพิ่ม จึงได้ทำกราฟมาตรฐานขึ้นอีก 1 ชุด มีสมการเส้นตรงคือ  $y=0.2528x$ , ค่า  $R^2=0.9953$  ดังรูปที่ 4.3 (ข.) ซึ่งสามารถนำกราฟมาตรฐานไปใช้ในการคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตของน้ำในแต่ละรอบ โดยกราฟมาตรฐานทั้ง 2 ชุดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งผลการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตในเม็ดบีดแต่ละสูตรเลือกคำนวณค่าตามกราฟมาตรฐานที่ใช้กรด HCl ล็อตเดียวกัน



รูปที่ 4.3 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไนเตรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3 ประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร

นำเม็ดปิดที่ยังไม่เชื่อมโยงและเชื่อมโยงแล้วในแต่ละสูตรมาทำให้ละลาย เพื่อให้ธาตุอาหารละลายออกจนหมด แล้วนำไปตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร

ประสิทธิภาพการกักเก็บ  $\text{KNO}_3$  คำนวณได้จากสูตร

$$\% \text{Efficiency} = 100 - \left( \frac{A-B}{A} \times 100 \right)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตต่อเม็ดไฮโดรเจลที่ยังไม่เชื่อมโยง 1 เม็ด

B คือ ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตต่อเม็ดไฮโดรเจลที่เชื่อมโยง 1 เม็ด

ตัวอย่างเช่น เม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารจากสูตร A Ca2/15

โดยค่า A จากสูตรข้างต้นหาได้จาก

นำน้ำตัวอย่างปริมาณ 50 ml ที่ได้ตามวิธีการทดลองจากข้อ 3.5.2.2 จากเม็ดปิดที่ยังไม่เชื่อมโยง ปิเปตมา 0.1 ml ใส่กรด HCl 1 ml ปรับปริมาตรเป็น 50 ml

เมื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ได้ค่าเท่ากับ 0.311

จากสมการของกราฟมาตรฐาน  $y = 0.2528x$

เมื่อ  $y =$  ค่าการดูดกลืนแสง และ  $x =$  ความเข้มข้นของ  $\text{N-NO}_3$

ความเข้มข้นของ  $\text{N-NO}_3$  มีค่าเท่ากับ  $\frac{0.311}{0.2528} = 1.2302 \text{ mg/L}$

ตัวอย่างที่ตรวจวัดมีปริมาตร 50 ml มีปริมาณ  $\text{N-NO}_3$  เท่ากับ  $1.2302 \times \frac{50}{1000} = 0.0615 \text{ mg}$

จากข้อมูลเบื้องต้น น้ำตัวอย่าง 50 ml มีเม็ดปิดแช่อยู่ 1 เม็ด นำมา 0.1 ml จากนั้นเจือจางเป็น 50 ml

ดังนั้น น้ำตัวอย่างของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารที่ยังไม่เชื่อมโยง ปริมาณ 50 ml

มีปริมาณของ  $\text{N-NO}_3$  เท่ากับ  $0.0615 \times \frac{50}{0.1} = 30.75 \text{ mg/1 เม็ดปิด}$

ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ โดยมีปริมาณของ  $\text{N-NO}_3$  เท่ากับ 30.75 และ 32.73 โดยได้

ค่าเฉลี่ย เท่ากับ 31.7 mg/1 เม็ดปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า B จากสูตรข้างต้นหาได้จาก

นำน้ำตัวอย่างปริมาณ 50 ml ที่ได้ตามวิธีการทดลองจากข้อ 3.5.2.2 จากเม็บบิตสูตร ACa2/15 ปีเปตมา 0.1 ml ใส่กรด 1 ml ปรับปริมาตรเป็น 50 ml

เมื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ได้ค่าเท่ากับ 0.270

จากสมการของกราฟมาตรฐาน  $y = 0.2329x$

เมื่อ  $y =$  ค่าการดูดกลืนแสง และ  $x =$  ความเข้มข้นของ  $N-NO_3^-$

$$\text{ความเข้มข้นของ } N-NO_3^- \text{ มีค่าเท่ากับ } \frac{0.270}{0.2329} = 1.1593 \text{ mg/L}$$

$$\text{ตัวอย่างที่ตรวจวัดมีปริมาตร 50 ml จะมีปริมาณ } N-NO_3^- \text{ เท่ากับ } 1.1593 \times \frac{50}{1000} = 0.0580 \text{ mg}$$

จากข้อมูลเบื้องต้น น้ำตัวอย่าง 50 ml มีเม็บบิตแช่อยู่ 1 เม็ด นำมา 0.1 ml จากนั้นเจือจางเป็น 50 ml

$$\text{ดังนั้น ตัวอย่างน้ำ ของสูตร ACa2/15 ปริมาณ 50 ml มีปริมาณของ } N-NO_3^- \text{ เท่ากับ } 0.0580 \times \frac{50}{0.1} = 29.00 \text{ mg/l เม็บบิต}$$

ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ โดยจะมีปริมาณของ  $N-NO_3^-$  เท่ากับ 29.00 และ 26.84 mg/l เม็บบิต โดยได้ค่าเฉลี่ย เท่ากับ 27.9 mg/l เม็บบิต โดยแสดงค่าดังตารางที่ 4.2

เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพการกักเก็บสารโพแทสเซียมไนเตรตของเม็บบิตบรรจุธาตุอาหาร สูตร ACa2/15 มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \% \text{Efficiency} &= 100 - \left( \frac{A-B}{A} \times 100 \right) \\ &= 100 - \left( \frac{31.7 - 27.9}{31.7} \times 100 \right) \\ &= 88 \% \end{aligned}$$

สูตรอื่น ๆ แสดงการคำนวณในทำนองเดียวกัน โดยค่า %Efficiency ของทุกสูตรแสดงดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การคำนวณความเข้มข้นของธาตุอาหารในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารสูตรต่างๆ

ตัวอย่างเช่น เม็ดปิดสูตร ACa2/15

จากหัวข้อ 4.3 และตารางที่ 4.2 มีปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรต = 27.9 mg/1 เม็ดปิด

เม็ดปิด 3 เม็ดหนักเฉลี่ยเท่ากับ 0.1642 g

ดังนั้น ตัวอย่างน้ำ ของสูตร ACa2/15 มีความเข้มข้นของ N-NO<sub>3</sub>

$$= 27.9 \times \frac{1}{0.1642}$$

$$= 169.9 \text{ mg/1g เม็ดปิด}$$

สูตรอื่นๆแสดงการคำนวณในทำนองเดียวกัน โดยค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยมีค่าปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตอยู่ในช่วง 106-170 mg/1g เม็ดปิด

ตารางที่ 4.4 เปรอ์เซ็นต์การกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหาร

สูตร	ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรต( mg/1เม็ดปิด)	%efficiency
ACa2/15	27.9	88
ACa4/5	31.0	98
ACa4/15	29.8	94
ACa2/15-ACa4/5	19.1	60
ACa4/5-ACa4/5	25.5	80
ACa4/15-ACa4/5	25.9	81
ACa2/15-Fe0.5	24.1	76
ACa4/5-Fe0.5	27.1	85
ACa4/15-Fe0.5	27.7	87
ACa2/15-Fe1	19.3	61
ACa4/5-Fe1	22.6	71
ACa4/15-Fe1	25.3	80
ACa2/15-C	15.0	47
ACa4/5-C	21.6	68
Aca4/15-C	20.7	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารของสูตรที่ยังไม่ปรับปรุงทั้ง 3 สูตรมีค่าใกล้เคียงกันและมีประสิทธิภาพการกักเก็บไนเปอร์เซ็นต์ที่สูงแต่เมื่อนำมาปรับปรุงพบว่าเม็ดปิดชุดสูตร ACa2/15-X มีประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตที่ต่ำกว่าชุดสูตร ACa4/5-X และ ACa4/15-X เนื่องจาก สูตร ACa2/15 มีการใช้ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่ำกว่าอีก 2 สูตร จึงยังเกิดการเชื่อมโยงไม่มากพอ เมื่อนำไปปรับปรุงทำให้  $KNO_3$  มีการแพร่ออกระหว่างขั้นตอนการเตรียม เมื่อเปรียบเทียบกับผลของประเภทการเชื่อมโยงต่อประสิทธิภาพการกักเก็บสาร  $KNO_3$  พบว่าเม็ดปิดที่ปรับปรุงโดยใช้โคโคซาน มีประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมไนเตรตที่ต่ำที่สุด เนื่องจากมีขั้นตอนการจุ่มล้างกรดในน้ำ 2 ครั้ง ทำให้ธาตุอาหารสูญเสียไปมากกว่าระบบการเชื่อมโยงประเภทอื่น

ตารางที่ 4.5 ปริมาณธาตุอาหารในเม็ดปิดบรรจุธาตุอาหารสูตรต่างๆ

สูตร	ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรต( mg/1g เม็ดปิด)
ACa2/15	169.9
ACa4/5	161.1
ACa4/15	137.0
ACa2/15-ACa4/5	106.5
ACa4/5-ACa4/5	128.5
ACa4/15-ACa4/5	106.1
ACa2/15-Fe0.5	140.8
ACa4/5-Fe0.5	129.8
ACa4/15-Fe0.5	125.7
ACa2/15-Fe1	122.8
ACa4/5-Fe1	123.9
ACa4/15-Fe1	124.4
ACa2/15-C	169.3
ACa4/5-C	155.4
Aca4/15-C	142.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การศึกษาพฤติกรรมกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

นำเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารแต่ละสูตรมาหยดผ่านน้ำปริมาณ 20 มิลลิลิตรด้วยอัตรา 4 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นนำตัวอย่างน้ำที่ได้ในแต่ละรอบไปตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 220 นาโนเมตร นำค่าที่ได้มาหาปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตจากกราฟมาตรฐาน

##### 4.5.1 การคำนวณหาปริมาณการปลดปล่อยของไนโตรเจนในรูปไนเตรตจากเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

ตัวอย่างเช่น จากน้ำรอบที่ 1 ของเม็ดสูตร ACa2/15

โดยปิเปตมา 0.2 มิลลิลิตร ใส่กรด HCl 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร

เมื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ได้ค่าเท่ากับ 0.532

จากสมการของกราฟมาตรฐานครั้งที่ 1 รูปที่ 4.3 (ก.)  $y = 0.2329x$

เมื่อ  $y =$  ค่าการดูดกลืนแสง และ  $x =$  ความเข้มข้นของ  $\text{N-NO}_3^-$

$$\text{ความเข้มข้นของ } \text{N-NO}_3^- \text{ มีค่าเท่ากับ } \frac{0.532}{0.2329} = 2.2842 \text{ mg/L}$$

$$\text{ตัวอย่างที่ตรวจวัดมีปริมาตร 50 ml จะมีปริมาณ } \text{N-NO}_3^- \text{ เท่ากับ } 2.2842 \times \frac{50}{1000} = 0.1142 \text{ mg}$$

จากข้อมูลเบื้องต้น น้ำตัวอย่าง 20 ml นำมา 0.2 ml จากนั้นเจือจางเป็น 50 ml

$$\text{ดังนั้น น้ำตัวอย่างจากรอบที่ 1 ของสูตร ACa2/15 ปริมาณ 20 ml มีปริมาณของ } \text{N-NO}_3^- \text{ เท่ากับ } 0.1142 \times \frac{20}{0.2} = 11.42 \text{ mg/1เม็ดบีด}$$

เม็ดบีดหนัก 0.1592 g

ดังนั้น ตัวอย่างน้ำจากรอบที่ 1 ของสูตร ACa2/15 มีความเข้มข้นของ  $\text{N-NO}_3^-$

$$= 11.42 \times \frac{1}{0.1592} \text{ mg/1g เม็ดบีด}$$

$$= 71.73 \text{ mg/1g เม็ดบีด}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ โดยจะมีปริมาณของ  $\text{N-NO}_3^-$  เท่ากับ 71.73, 71.87 และ 52.43 mg/1g เม็ดปัด โดยได้ค่าเฉลี่ย เท่ากับ 65.34 mg/1g เม็ดปัด

สูตรอื่น ๆ แสดงการคำนวณในทำนองเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตของแต่ละรอบน้ำ แสดงดังภาคผนวก ข

#### 4.5.2 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตของเม็ดปัดบรรจุธาตุอาหาร

ตัวอย่างเช่น เม็ดปัดสูตร ACa2/15

เมื่อทำการทดลองปลดปล่อยธาตุอาหารจากเม็ดปัดสูตร ACa2/15 โดยการหยดน้ำด้วยอัตรา 4 ml/นาที่ เป็นจำนวน 20 ml ในรอบที่ 1 พบว่าไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ออกมามีความเข้มข้นเท่ากับ 65.34 mg/1g เม็ดปัด ดังแสดงในภาคผนวก ข

เม็ดปัดสูตร ACa2/15 มีปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตทั้งหมดเท่ากับ 169.9 mg/1g เม็ดปัด ดังแสดงในตารางที่ 4.3

$$\begin{aligned} \text{โดยเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตของเม็ดปัด} &= \frac{65.34}{169.9} \times 100 \\ &= 38.46 \% \end{aligned}$$

สูตรอื่น ๆ แสดงการคำนวณในทำนองเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตของเม็ดปัด แสดงดังภาคผนวก ข

#### 4.5.3 ผลของการปลดปล่อยธาตุอาหารของเม็ดปัดเชื่อมโยงระบบเดี่ยวด้วย $\text{CaCl}_2$

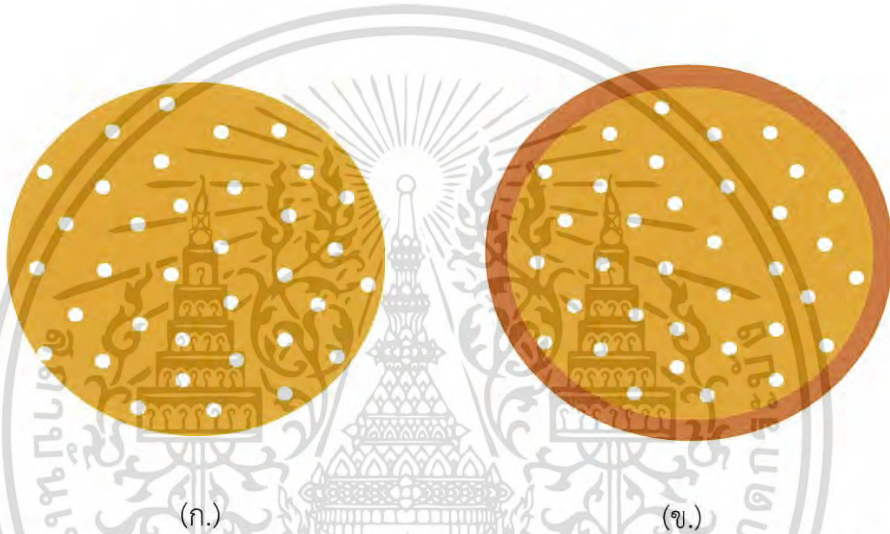
ศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารของเม็ดปัดเชื่อมโยงระบบเดี่ยวด้วย  $\text{CaCl}_2$  ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือจำนวนรอบน้ำกับแกน y คือปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรต (mg/ 1 g เม็ดปัด) และ เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรต ดังรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 พบว่าสูตร ACa2/15 มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 60 mg/1g เม็ดปัด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 4 ประมาณ 120 mg/1g เม็ดปัด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 70 % , สูตร ACa4/5 มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 50 mg/1g เม็ดปัดและมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 5 ประมาณ 90 mg/1g เม็ดปัด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 65 % , สูตร ACa4/15 มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 45 mg/1g เม็ดปัด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 4 ประมาณ 85 mg/1g เม็ดปัด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 60 % ซึ่งการที่เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตไม่ถึง 100 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

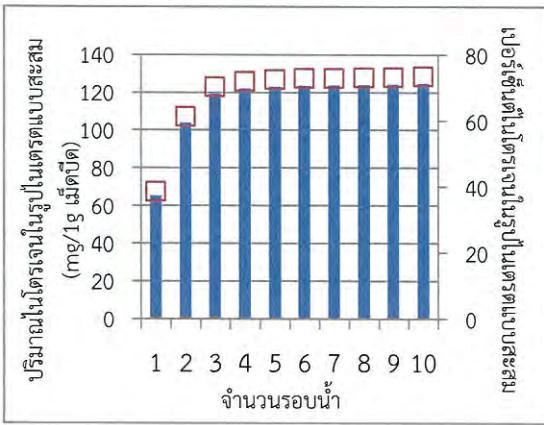
เนื่องจากเกิดการสูญเสียของธาตุอาหารระหว่างขั้นตอนการทดลองในช่วงการเคลื่อนย้ายเม็ดปิด ระหว่างการเปลี่ยนรอบน้ำ โดยมีโมเดลการปลดปล่อยแบบ Matrix diffusion แสดงดังรูปที่ 4.5 (ก.)

โดยจะเห็นว่าสูตร ACa4/5 มีการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ดีกว่าสูตร ACa2/15 และใกล้เคียงกับสูตร ACa4/15 แต่สูตรปุ๋ยทั้ง 3 สูตรยังคงไม่สามารถกักเก็บธาตุอาหารไว้ได้นานพอ โดยมีการปลดปล่อยที่รวดเร็ว เนื่องจากการปลดปล่อยแบบ Matrix diffusion ซึ่งจะทำให้เกิด ช่องว่างภายในเม็ดปิดจากส่วนของสารที่หลุดออกไปพร้อมกับน้ำ ทำให้เมื่อทำการทดสอบด้วยน้ำรอบ ต่อไป น้ำจึงแทรกเข้าไปพาสารออกมาได้ง่ายขึ้น ดังนั้นโมเดลนี้จึงช่วยหน่วยงานการปลดปล่อยในช่วงต้น เท่านั้น ทำให้ต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเม็ดปิดต่อไปให้มีโมเดลการปลดปล่อยแบบ Membrane diffusion แสดงดังรูป 4.5 (ข.)

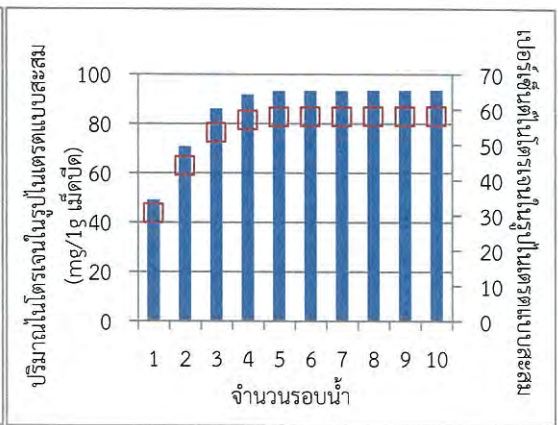


รูปที่ 4.4 โมเดลการปลดปล่อย (ก.) แบบ Matrix diffusion, (ข.) แบบ Membrane diffusion

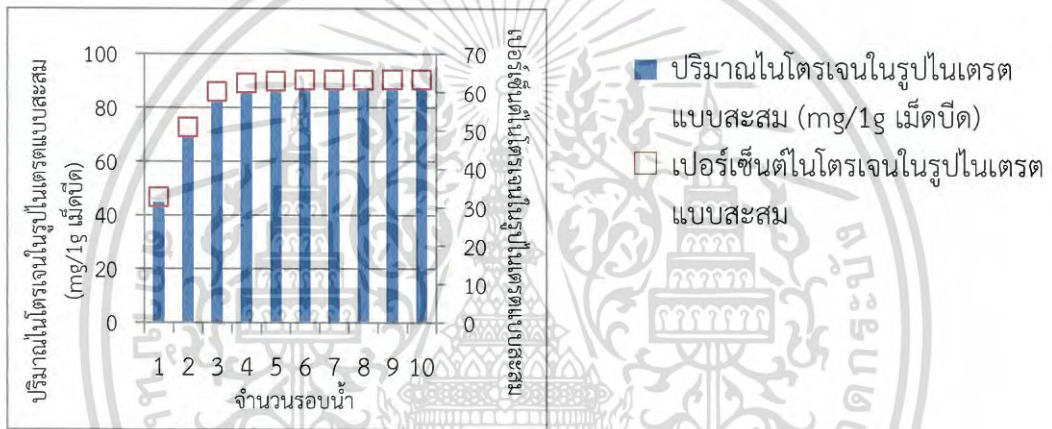
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดียว (ก) สูตร ACa2/15, (ข) สูตร ACa4/5 และ (ค) สูตร ACa4/15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.4 ผลของการปลดปล่อยธาตุอาหารของเม็ดบีดเชื่อมโยงสองระบบ

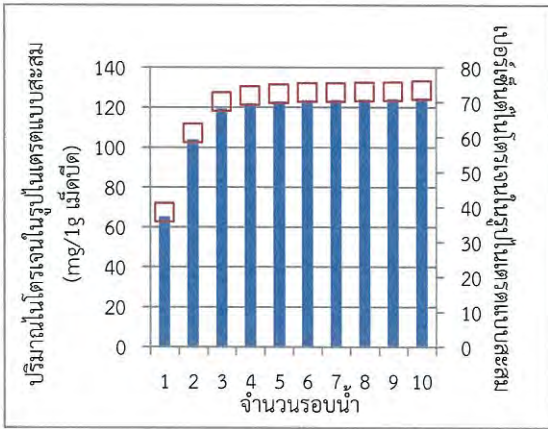
ศึกษาการปลดปล่อยธาตุอาหารของเม็ดบีดเชื่อมโยงสองระบบโดยปรับปรุงจากสูตร Aca2/15, Aca4/5 และ Aca4/15 ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือจำนวนรอบน้ำ กับแกน y คือปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรต (mg/1g เม็ดบีด) และเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรต ดังรูปที่ 4.6, 4.7 และ 4.8

##### สูตร Aca2/15

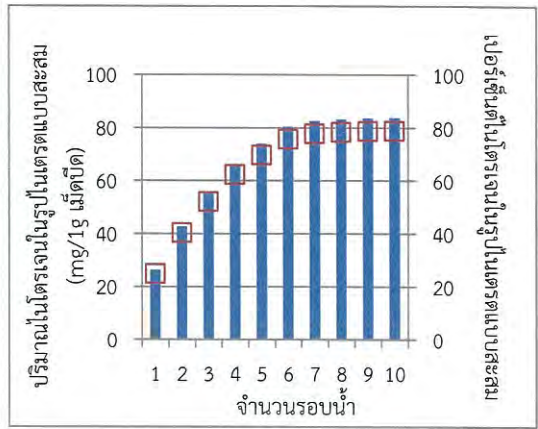
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ากราฟของเม็ดบีดที่ปรับปรุงของสูตร Aca2/15 มีการปลดปล่อยไนโตรเจนในรูปไนเตรตออกมาแตกต่างจากสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดียว โดยเม็ดบีดที่ปรับปรุงโดยใช้อัลจินตเคลือบ มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 25 mg/1g เม็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 8 ประมาณ 85 mg/1g เม็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 80 % ซึ่งควบคุมการปลดปล่อยได้ดีกว่าสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดียว เนื่องจากมีโมเดลการกระจายตัวแบบ Membrane diffusion ดังรูปที่ 4.5 (ข.) ทำให้น้ำต้องใช้เวลาในการแพร่เข้าไปพาสารออกมา ซึ่งใช้เวลานานกว่าแบบ Matrix diffusion ทำให้อายุที่ยู่ภายในแพร่ผ่านออกมาได้ช้าลง, เม็ดบีดที่ปรับปรุงโดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 60 mg/1g เม็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 4 ประมาณ 120 mg/1g เม็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 85 %, เม็ดบีดที่ปรับปรุงโดยใช้เฟอร์ริกซัลเฟต 1 นาที มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 80 mg/1g เม็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 3 ประมาณ 110 mg/1g เม็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 90 % โดยเม็ดบีดที่ปรับปรุงด้วยเฟอร์ริกซัลเฟตทั้ง 2 แบบ มีโมเดลแบบ Matrix diffusion เช่นเดียวกับสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดียว ทำให้ผลการหน่วงการปลดปล่อยมีค่าใกล้เคียงกัน, เม็ดบีดที่ปรับปรุงโดยใช้โคโตซาน มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 100 mg/1g เม็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 2 ประมาณ 110 mg/1g เม็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 65 % โดยมีโมเดลแบบ Membrane diffusion แต่โคโตซานที่บริเวณชั้นผิวถูกเชื่อมโยงกับอัลจินตได้น้อย เนื่องจากอัลจินตถูกเชื่อมโยงกับแคลเซียมคลอไรด์ไปแล้ว ทำให้ชั้นผิวที่ถูกเคลือบด้วยโคโตซานซึ่งเป็นสารที่ทนต่อน้ำเกิดช่องว่าง จึงไม่สามารถต้านทานน้ำไว้ได้และไม่ช่วยหน่วงการปลดปล่อย สำหรับสูตรที่ดีที่สุดคือเม็ดบีดที่ปรับปรุงโดยเคลือบด้วยอัลจินต 1 ชั้น

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อยออกมาทั้งหมดในแต่ละสูตรพบว่าสูตรที่ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจินต 1 ชั้น มีเปอร์เซ็นต์ที่มากขึ้น เนื่องจากสารมีการสูญหายระหว่างการทดสอบน้อยกว่าสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดียว จากการที่มีชั้นผิวเพิ่มขึ้น 1 ชั้น, สูตรที่ปรับปรุงโดยแอสสารเฟอร์ริกซัลเฟต 30 วินาทีและ 1 นาทีมีเปอร์เซ็นต์ที่มากกว่าสูตรที่เชื่อมโยงระบบเดียว เนื่องจากเฟอร์ริกไอออนมีประจุมากกว่าแคลเซียมไอออน ทำให้มีการเชื่อมโยงที่หนาแน่นมากขึ้น เม็ดบีดจึงมีการบวมตัวต่ำ ทำให้อายุการสูญหายระหว่างการทดสอบลดน้อยลง, สูตรที่ปรับปรุงโดยใช้โคโตซานมีเปอร์เซ็นต์ที่น้อยที่สุด เนื่องจากเกิดการสูญหายไประหว่างขั้นตอนการเตรียมและการทดสอบ

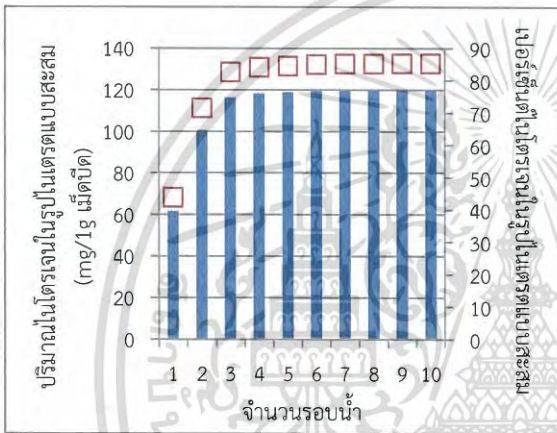
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



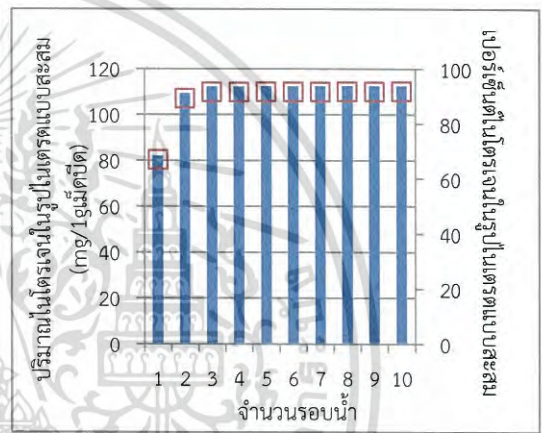
(ก)



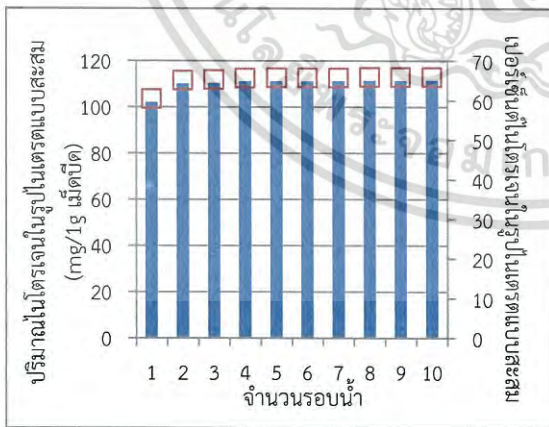
(ข)



(ค)



(ง)



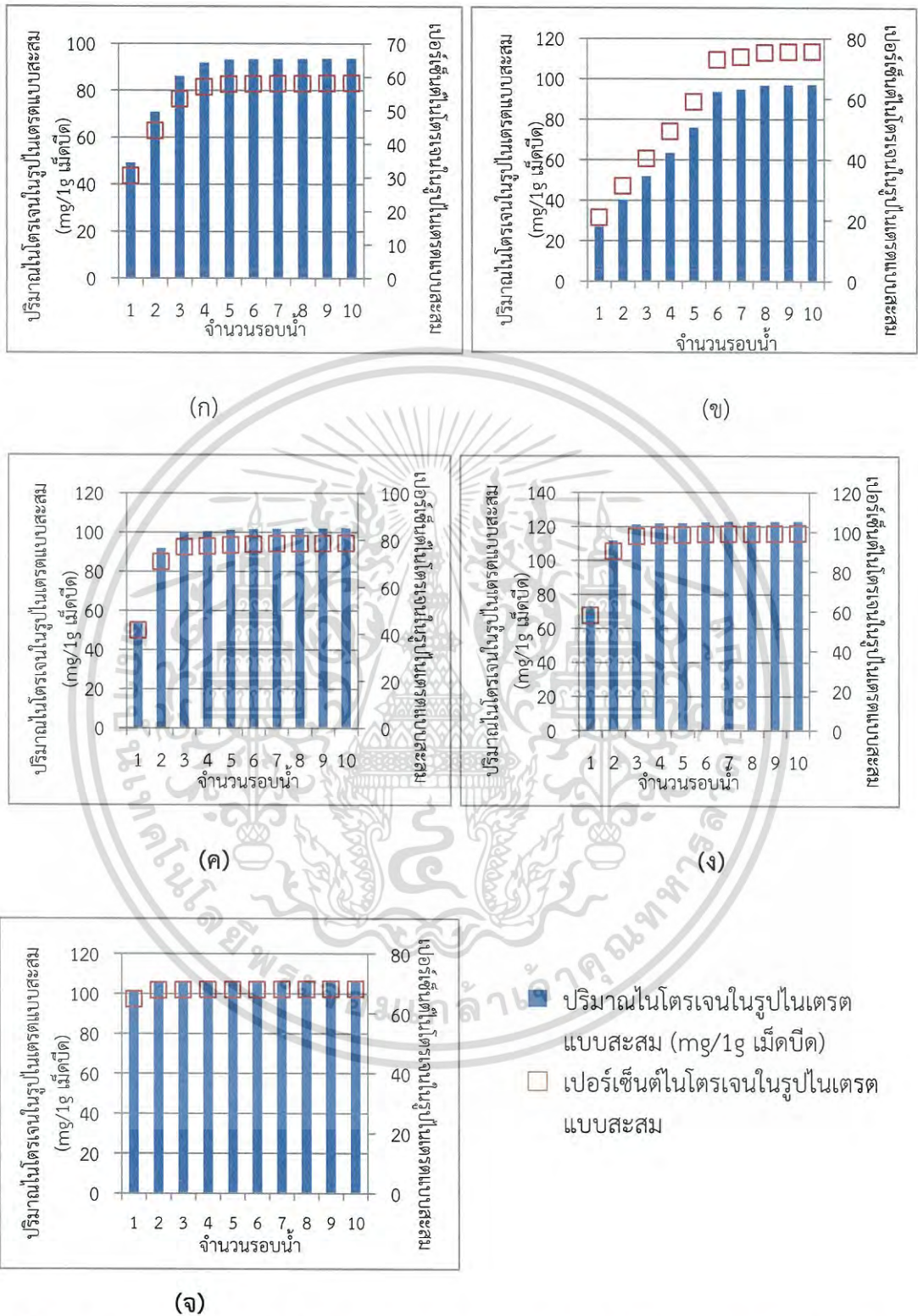
(จ)

■ ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสม (mg/1g เม็ดบัต)  
 □ เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสม

รูปที่ 4.6 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตสะสมของเม็ดบัตบรรจุธาตุอาหารที่เชื่อมโยง 2 ระบบของสูตร A Ca2/15 (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจินेट (ค) ปรับปรุงโดยแซฟเฟอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที (ง) ปรับปรุงโดยแซฟเฟอร์ริกซัลเฟต 1 นาที (จ)

เอกสารนี้ปรับปรุงโดยเคลือบแคโทซาน การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

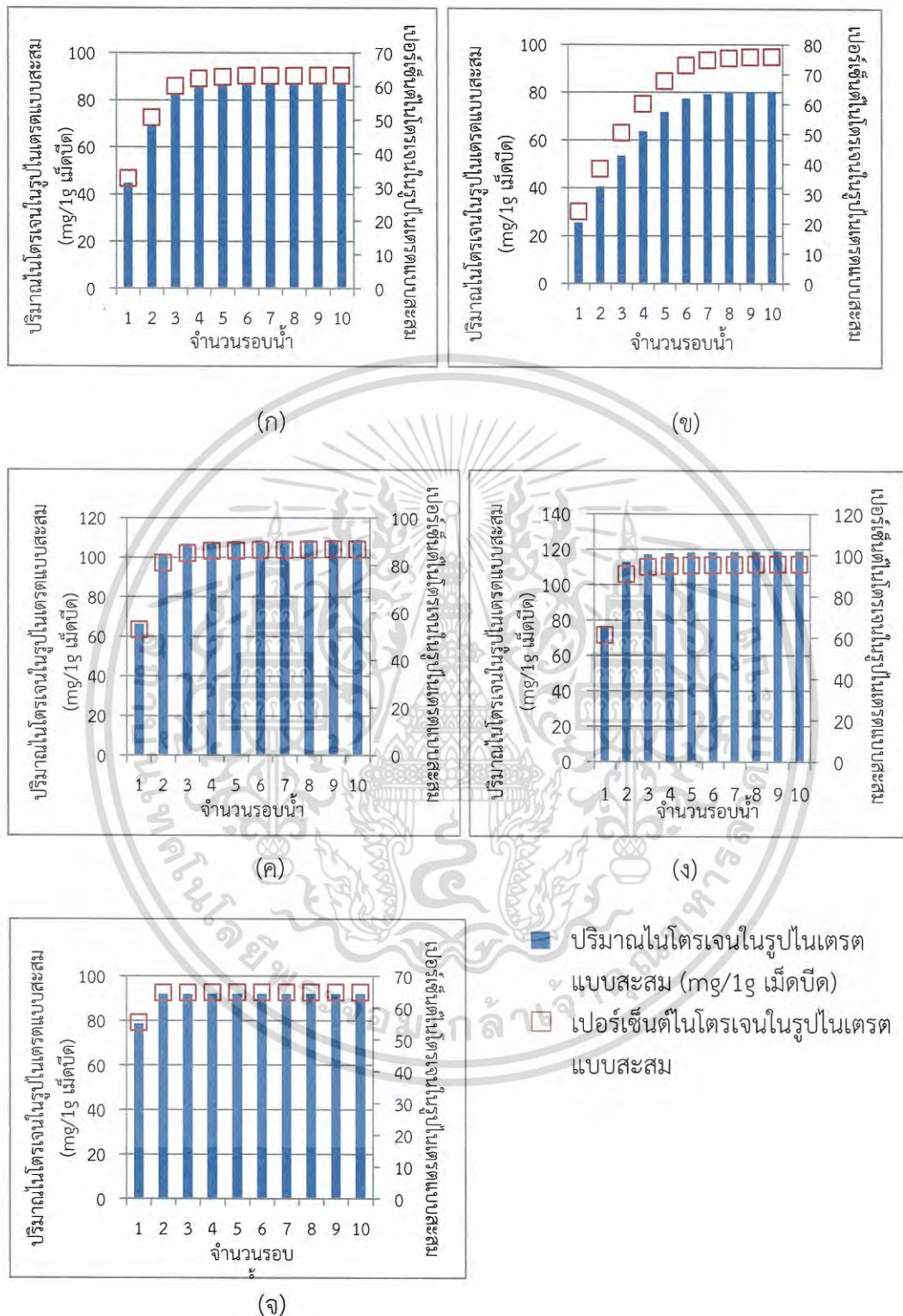
สูตร Aca4/5



รูปที่ 4.7 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตสะสมของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารที่เชื่อมโยงระบบของสูตร Aca4/5 (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจิเนต (ค) ปรับปรุงโดยแช่เฟอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที (ง) ปรับปรุงโดยแช่เฟอร์ริกซัลเฟต 1 นาที (จ) ปรับปรุงโดยเคลือบโคโคไตซาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารตัวอย่างไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร Aca4/15

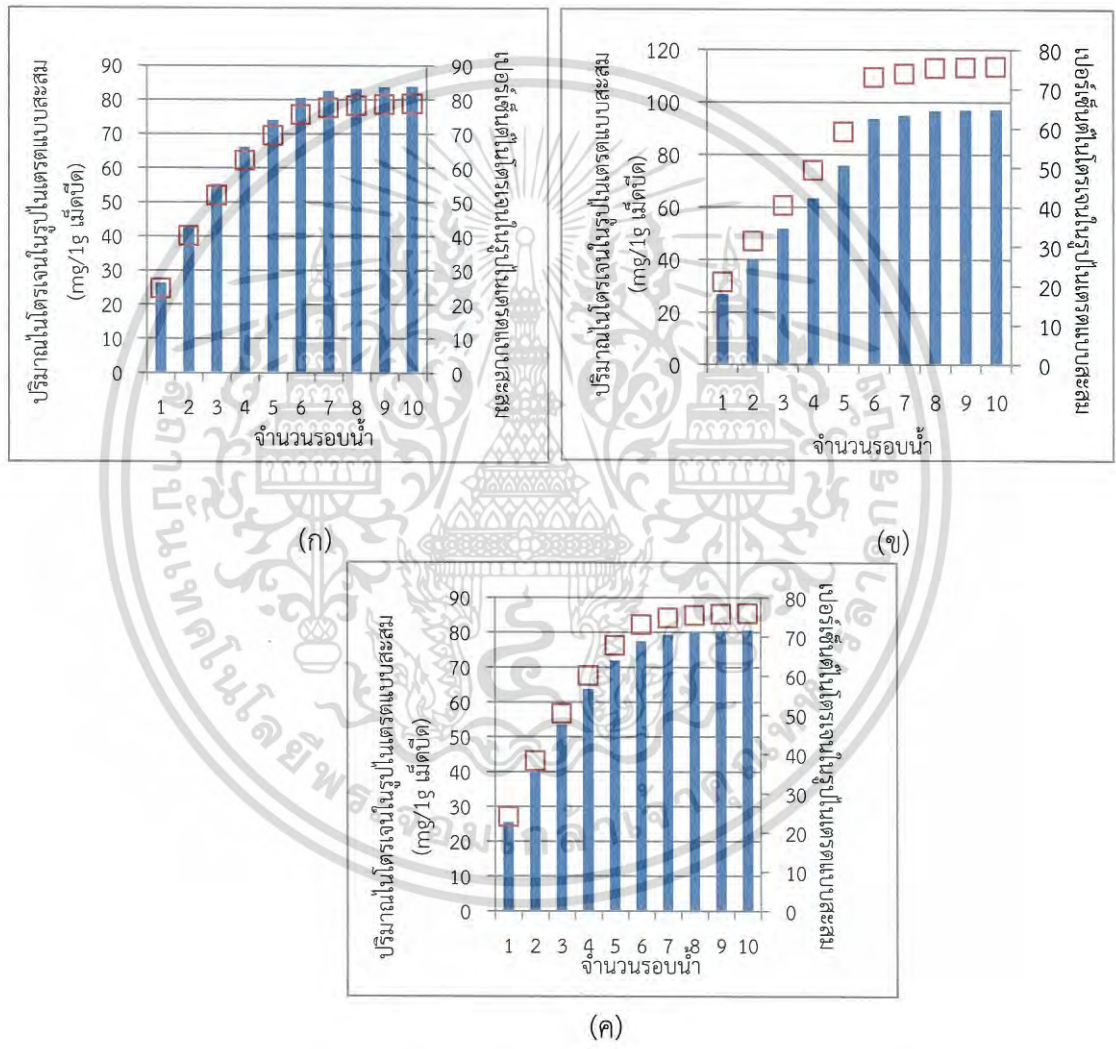


รูปที่ 4.8 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตสะสมของเม็ดบีดบรรจุ  
ธาตุอาหารที่เชื่อมโยง 2 ระบบของสูตร Aca4/15 (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจิ  
เนต (ค) ปรับปรุงโดยแช่เฟอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที (ง) ปรับปรุงโดยแช่เฟอร์ริกซัลเฟต 1 นาที (จ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 พบว่ากราฟของเมล็ดบีดที่ปรับปรุงของสูตร Aca4/5 และสูตร Aca4/15 มีปริมาณการปลดปล่อยไนโตรเจนในรูปไนเตรตและเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตให้ผลในทำนองเดียวกันกับสูตร Aca2/15 โดยสูตร Aca4/5 เมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยใช้อัลจินเตเคลือบหีบ มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 25 mg/1g เมล็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 8 ประมาณ 95 mg/1g เมล็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 75 %, เมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยแช่ในสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 55 mg/1g เมล็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 3 ประมาณ 100 mg/1g เมล็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 80 %, เมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยแช่ในสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต 1 นาที มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 70 mg/1g เมล็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 3 ประมาณ 120 mg/1g เมล็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 100 %, เมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยเคลือบด้วยโคโตซาน มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 100 mg/1g เมล็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 2 ประมาณ 105 mg/1g เมล็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 70% ส่วนสูตร Aca4/15 เมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยใช้อัลจินเตเคลือบหีบ มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 25 mg/1g เมล็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 8 ประมาณ 80 mg/1g เมล็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 75 %, เมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยแช่ในสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต 30 วินาที มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 65 mg/1g เมล็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 4 ประมาณ 110 mg/1g เมล็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 85 %, เมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยแช่ในสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต 1 นาที มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 75 mg/1g เมล็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 3 ประมาณ 115 mg/1g เมล็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 90 %, เมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยเคลือบด้วยโคโตซาน มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 80 mg/1g เมล็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 2 ประมาณ 90 mg/1g เมล็ดบีด ส่วน เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 65% ซึ่งสูตรที่ดีที่สุดคือเมล็ดบีดที่ปรับปรุงโดยเคลือบด้วยอัลจินเต 1 ชั้น

จะเห็นว่าเม็ดบีดทั้ง 3 สูตรเมื่อปรับปรุงโดยใช้อัลจินเตเคลือบทับให้ผลการหน่วงการปลดปล่อยที่ดีที่สุด โดยเมื่อเปรียบเทียบการเชื่อมโยงเม็ดบีด 3 ชนิด คือ ACa2/15, ACa4/5 และ ACa4/15 ด้วยการเคลือบด้วยอัลจินเต ดังรูปที่ 4.9 พบว่าเม็ดบีดทั้ง 3 สูตร มีพฤติกรรมการปลดปล่อยธาตุอาหารใกล้เคียงกัน โดยมีอัตราการปลดปล่อยในการหยदन้ำรอบที่ 1 ประมาณ 25 mg/1g เม็ดบีด และเพิ่มขึ้นในน้ำรอบถัดไปแบบเชิงเส้น จนถึงในการหยदन้ำรอบที่ 6 และค่อย ๆ ปลดปล่อยธาตุอาหารช้าลงในการหยदन้ำรอบที่ 7 แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกักเก็บจากตารางที่ 4.2 พบว่าเม็ดบีดสูตร ACa2/15-ACa4/5 มีประสิทธิภาพการกักเก็บที่ต่ำกว่าสูตรอื่น ดังนั้นสูตร ACa4/5-ACa4/5 และ ACa4/15-ACa4/5 จึงเป็นสูตรที่เหมาะสมในการปลดปล่อยธาตุอาหาร



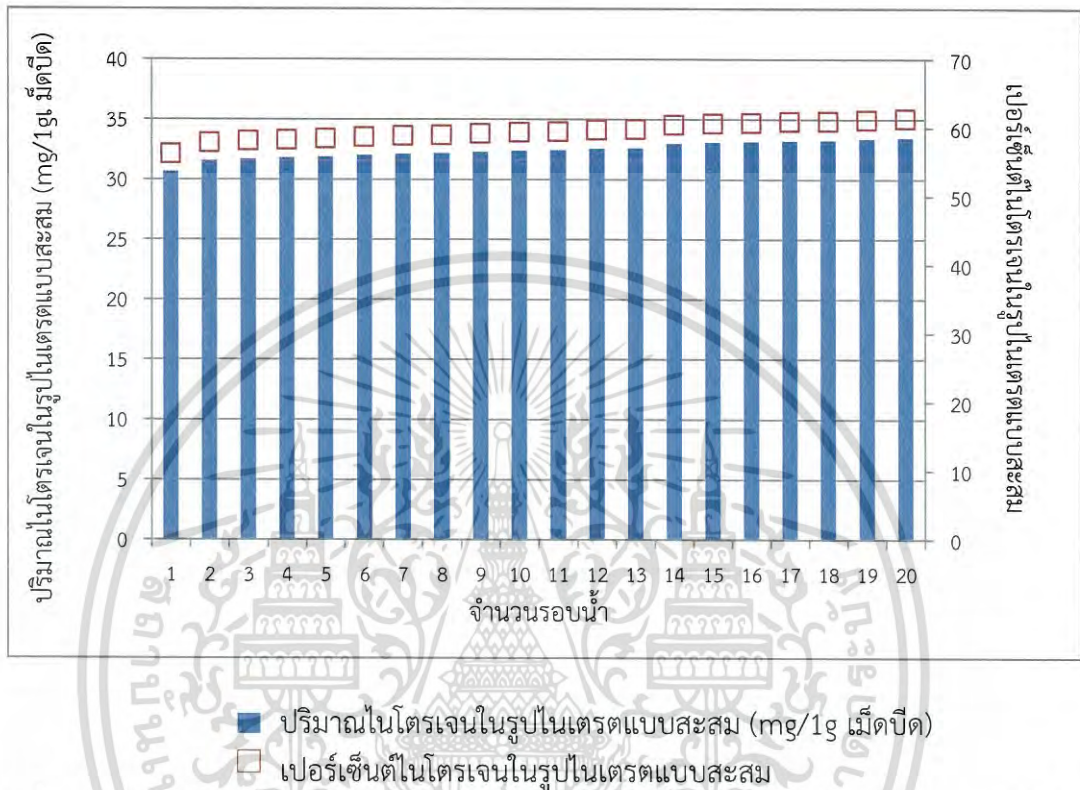
■ ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสม (mg/1g เม็ดบีด)  
 □ เปอร์เซนต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสม

รูปที่ 4.9 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตสะสมของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารที่เชื่อมโยงระบบของสูตรที่ปรับปรุงโดยเคลือบอัลจินเต (ก) สูตร ACa2/15, (ข) สูตร ACa4/5 และ (ค) สูตร ACa4/15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.5 ผลของการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยเกรตการค้ำชนิดละลายช้า

นำปุ๋ยเกรตการค้ำชนิดละลายช้ามาทำการทดสอบในวิธีเดียวกับเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารที่เตรียมในงานวิจัยนี้ ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแกน x คือจำนวนรอบน้ำกับแกน y คือปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรต(mg/ 1g เม็ดบีด) และ เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรต



รูปที่ 4.10 ปริมาณและเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตของปุ๋ยเกรตการค้ำชนิดละลายช้า

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่ากราฟของปุ๋ยเกรตการค้ำชนิดละลายช้า มีการปลดปล่อยไนโตรเจนในรูปไนเตรตออกมาสูงตั้งแต่ในน้ำรอบแรกและค่อย ๆ ปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ ในน้ำรอบต่อ ๆ ไป ซึ่งไม่แตกต่างจากการปลดปล่อยไนโตรเจนในรูปไนเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหารที่เตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้มากนัก โดยมีโมเดลแบบ Membrane diffusion โดยปุ๋ยละลายช้าเกรตการค้ำ มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตแบบสะสมในการหยดน้ำรอบที่ 1 ประมาณ 30 mg/1g เม็ดบีด และมีค่าเริ่มคงที่ในการหยดน้ำรอบที่ 2 ประมาณ 32 mg/1g เม็ดบีด ส่วนเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยธาตุไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปล่อยออกมาทั้งหมดประมาณ 60 % เนื่องจากสารยังคงออกมาไม่หมดจากการทดสอบในการหยดน้ำทั้ง 20 รอบ

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการปลดปล่อยโพแทสเซียมในเตรตของเม็ดบีดจากอัลจินต โดยมีปัจจัยศึกษาดังนี้

(1) เวลาและความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงแคลเซียมคลอไรด์ ได้แก่ การเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ นาน 15 นาที, การเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ นาน 5 นาที, การเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ นาน 15 นาที

(2) ระบบการเชื่อมโยง ได้แก่ ระบบการเชื่อมโยงแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์, ระบบการเชื่อมโยงแบบสองขั้นตอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์และเพอร์ริกซัลเฟต, ระบบการเชื่อมโยงแบบสองขั้นตอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์และโคโตซาน, ระบบการเชื่อมโยงแบบสองขั้นตอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์และอัลจินต ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

#### การศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมในเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

ผลจากการศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมในเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร พบว่าเม็ดบีดสูตรเชื่อมโยงหนึ่งระบบมีประสิทธิภาพการกักเก็บสูง โดยทั้งสามสูตรไม่มีความแตกต่างกัน แต่เมื่อนำเม็ดบีดแต่ละสูตรมาปรับปรุงซึ่งเป็นการเชื่อมโยงสองระบบ พบว่าเม็ดบีดชุดสูตร  $ACa_2/15-X$  มีประสิทธิภาพการกักเก็บที่ต่ำกว่าเม็ดบีดชุดสูตร  $ACa_4/5-X$  และสูตร  $ACa_4/15-X$  อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก เม็ดบีดชุดสูตร  $ACa_2/15-X$  มีการใช้ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ต่ำกว่าอีกสองสูตร จึงเกิดการเชื่อมโยงไม่มากพอ ทำให้โพแทสเซียมในเตรตมีการแพร่ออกกระหว่างการเตรียมเม็ดบีดได้มากกว่า

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักเก็บโพแทสเซียมในเตรตของเม็ดบีดที่มีระบบการเชื่อมโยงต่างกันพบว่า เม็ดบีดชุดสูตร  $ACaX-Fe_{0.5}$  มีประสิทธิภาพการกักเก็บมากกว่าเม็ดบีดชุดสูตร  $ACaX-Fe_1$  และ  $ACaX-ACa_4/5$  เล็กน้อย ในขณะที่เม็ดบีดชุดสูตร  $ACaX-C$  มีประสิทธิภาพการกักเก็บที่ต่ำที่สุด เนื่องจากการสูญหายของธาตุอาหารในระหว่างขั้นตอนการเตรียม

#### การศึกษาพฤติกรรมปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมในเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร

ผลจากการศึกษาพฤติกรรมปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมในเตรตของเม็ดบีดบรรจุธาตุอาหาร พบว่าเม็ดบีดสูตรเชื่อมโยงหนึ่งระบบทั้งสามสูตรมีการหน่วงการปลดปล่อยในช่วงต้นเท่านั้น เนื่องจากเป็นการปลดปล่อยแบบ Matrix diffusion ซึ่งสูตร  $ACa_4/5$  หน่วงการปลดปล่อยได้ดีกว่าสูตร  $ACa_2/15$  และสูตร  $ACa_4/15$  จึงมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเม็ดบีดเพิ่มด้วยระบบเชื่อมโยงสองระบบ พบว่าสูตร  $ACa_2/15-ACa_4/5$ ,  $ACa_4/5-ACa_4/5$  และ  $ACa_4/15-ACa_4/5$  ซึ่งเป็นการเคลือบด้วยอัลจินตให้ผลการหน่วงการปลดปล่อยได้ดีที่สุด เนื่องจากการปลดปล่อยแบบ Membrane diffusion น้ำจึงต้องใช้เวลาในการแพร่เข้าไปพาสารออกมา ซึ่งใช้เวลานานกว่าการปลดปล่อยแบบ Matrix diffusion โดยมีพฤติกรรมปลดปล่อยแบบเชิงเส้นในช่วงรอบน้ำที่ 1-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้ผู้ใดเห็นว่าเป็นลิขสิทธิ์ของตนเองในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลประสิทธิภาพการกักเก็บธาตุอาหารของสูตร A Ca<sub>2</sub>/15-A Ca<sub>4</sub>/5 มีค่าต่ำกว่าอีก 2 สูตร ดังนั้นเม็ดปัดสูตร A Ca<sub>4</sub>/5-A Ca<sub>4</sub>/5 และ A Ca<sub>4</sub>/15-A Ca<sub>4</sub>/5 จึงเป็นสูตรที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นเม็ดปัดควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1.ปรับเปลี่ยนขั้นตอน/วิธีการในการทดสอบการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไนเตรตของเม็ดปัดบรรจุธาตุอาหาร เช่น อัตราเร็วและปริมาณของน้ำที่หยดลงบนเม็ดปัดในแต่ละรอบ
- 2.ปรับเปลี่ยนชนิดของสารเชื่อมโยง เพื่อให้เม็ดปัดมีประสิทธิภาพดีขึ้น
- 3.ปรับเปลี่ยนชนิดของสารที่นำมาใช้ในการปลดปล่อย เพื่อใช้ในงานเฉพาะด้าน
- 4.นำเม็ดปัดไปทดสอบในงานสภาพจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นำรู้เรื่องปุ๋ย. 2013. ปุ๋ยละลายช้าคือ. [Online]. Available : <http://www.gofertilizerplus.com>.
- [2] เฉลิมขวัญ เวชสกล, เบญจรัตน์ วุฒิจิตรมงคล และผัสพร ช่วยศรี. 2555. “การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตัทวรั้งกัมเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] A.K. Nayak, D. Pal and K. Santra. 2015. “Swelling and drug release behavior of metformin HCL-loaded tamarind seed polysaccharide-alginate beads” *International journal of Biological Macromolecules* 82, 1023-1027.
- [4] วารุณี ตานันต์ และ สายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. “พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 16(2). 63-8.
- [5] S.J. Huang and P.G. Edelman. 1989. “Biodegradable polymers.” In *Polymers-Biomaterials and Medical application*; Kroshwitz, I.J., ED.; Wiley & Sons: New York, 1989.
- [6] Jansen, J.A., V.Recum and A.F. 2004. “Textured and porous materials.” *Biomaterials Science*, 2<sup>nd</sup> ed., Ratner, B.D., Hoffman, A.S., Schoen, F.J., and Lemons, J.E., Eds. Elsevier/Academic Press, New York, p.218, chap. 2.15.
- [7] R. M. Ottenbrite and J. Liao. 1996. “Polymer Material Encyclopedia (J.C. Salamone, ed.)” CRC Press, Boca Raton, p.190.
- [8] Williams, D.F. 1981. “Enzymatic Hydrolysis of Polylactic Acid,” *Eng. In Med.*, 10:5-7.
- [9] S. Balamurugan, S. Mendez, S.S. Balamurugan, M.J. O'Brie and G.P. López. 2003. “Thermal response of poly(N-isopropylacrylamide) brushes probed by surface plasmon resonance.” *Langmuir*. 19. 2545-2549.
- [10] R. Toomey, A. Vidyasagar and J. Majewski. 2008. “Temperature induced volume-phase transitions in surface-tethered poly(N-isopropylacrylamide) networks.” *Macromolecules*. 41. 919-924.
- [11] S. Saengsuwan and W. Champatem. 2011. “Synthesis and characterization hydrogels based on acrylamide/2-acrylamidoglycolic acid/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid and application in the adsorption of Cu (II) ions.” *International Conference on Science and Technology for Sustainable*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Development of the Grcatcr Mckong Sub-region (STGMS), Luang Prabang, Lao PDR.
- [12] W. Tanant. 2013. "Preparation of interpenetrating networks hydrogel film by onepot polymerization under microwave irradiation." Program & Highlight Book of Pure and Applied Chemistry International Conference 2013 (PACCON 2013). 23-25 January. The Tide Resort Bangsaen, Chonburi, Thailand.
- [13] S.K. Bajpai and S. Sharma. 2004. "Investigation of swelling/degradation behaviour of alginate beads crosslinked with  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Ba}^{2+}$  ions." *Reactive and Functional polymers*. 59. 129–140.
- [14] D. Magnin, J. Lefebvre, E. Chornet and S. Dumitriu. 2004. "Physicochemical and structural characterization of a polyionic matrix of interest in biotechnology, in the pharmaceutical and biomedical fields." *Carbohydrate Polymers*. 55. 437-453.
- [15] S. Argin, P. Kofinas and Y. Martin Lo. 2014. "The cell release kinetics and the swelling behavior of physically crosslinked xanthanechitosan hydrogels in simulated gastrointestinal conditions." *Food Hydrocolloids*. 40. 138-144.
- [16] C. Xiao and Y. Gao. 2008. "Preparation and properties of physically crosslinked sodium carboxymethyl-cellulose/poly(vinyl alcohol) complex hydrogels." *Journal of Applied Polymer Science*. 107(3). 1568–1572.
- [17] J. Suresh, S.N. Bhunia, D. Jain, S. Mishra and P.K. Sahu. 2013. "A Review of Hydrogel As A Drug Carrier." *Asian Journal of Pharmaceutical Education and Research*. 2(2). 1-18.
- [18] L. Zhihui, W. Wenhui, W. Jianquan and J. Xin. 2007. "Swelling behaviors, tensile properties and thermodynamic interactions in APS/HEMA copolymeric hydrogels." *Frontiers of Materials Science in China*. 1(4). 427-431.
- [19] H.A. Essawy and H.S. Ibrahim. 2004. "Synthesis and characterization of poly(vinylpyrrolidone-co-methyl-acrylate) hydrogel for removal and recovery of heavymetal ions from wastewater." *Reactive and Functional polymer*. 61. 421-432.
- [20] A. B. Lugao and S. M. Malmonge. 2001. "Use of radiation in the production of hydrogels." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 185(1–4). 37–42.
- [21] M. R. Saboktakin, A. Maharramov and M.A. Ramazanov. 2009. "pH-sensitive starch hydrogels via free radical graft copolymerization, synthesis and properties." *Carbohydrate Polymers*. 77. 634–638.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [22] จุฬารัตน์ นามเพ็ง. 2553. “การเตรียมพอลิเมอร์โครงร่างแหแบบกิ่งสอดไขว้ของไคโตซานตัดแปลง และยางธรรมชาติ.” วารสารวิทยาศาสตร์ มช. 38(4). 572-581.
- [23] K.L. Shantha and D.R.K. Harding. 2000. “Preparation and in-vitro evaluation of poly[Nvinyl-2-pyrrolidone-polyethylene glycol diacrylate]-chitosan interpoly meric pHresponsive hydrogels for oral drug delivery.” International Journal of Pharmaceutics. 207. 65–70.
- [24] M. Zhai, F. Yoshii, T. Kume and K. Hashim. 2002. “Syntheses of PVA/starch grafted hydrogels by irradiation.” Carbohydrate Polymers. 50(3). 295–303.
- [25] W. Duan, C. Chen, L. Jiang and G.H. Li. 2008. “Preparation and characterization of the graft copolymer of chitosan with poly[rosin-(2-acryloyloxy)ethylester].” Carbohydrate Polymers. 73(4). 582–586.
- [26] กุลเกียรติ โกยอนุกรรมกุล และกิตติชิน ปลั่งพงษ์พันธ์. 2553. “การเตรียมไฮโดรเจลโดยกระบวนการฉายรังสีแกมมาจากพอลิเมอร์ผสม; พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ - พอลิไวนิลไพโรลิโดน และเมทิลไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส - พอลิไวนิลไพโรลิโดน.” ปรินญาณิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [27] L.G. Sheng, S. Lin-Gibson, S. Bencherif, J.A. Cooper, S.J. Wetzel, J.M. Antonucci, B.M. Vogel, F. Horkay and N.R. Washburn. 2004. “Synthesis and Characterization of PEG Dimethacrylates and Their Hydrogels.” Biomacromolecules. 5(4). 1280–1287.
- [28] ดุษฎี อุตภาพ. 2555. Carbohydrate Technology. [online]. Available : <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter4.html>.
- [29] Thomus, W.R. 1992. “Carrageenan.” in Thickening and Gelling Agents for Foods, Edited by Imeson, A., London, Blackie Academic & Professional, pp. 25-39.
- [30] Rees and 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, pp. 104-148.
- [31] M. Lahaye and C. Rochas. 1991, “Chemical structure and physico-chemical properties of agar.” Hyhrobiologia, 126, pp. 137-148.
- [32] Medin, A., 1995. “Studies of structure and properties of agarose.” Ph.D. Thesis., Acta Universitatis Upsaliensis, 126.
- [33] G.O. Phillips and P.A. Williams. 2000. “Handbook of hydrocolloids.” New York, CRC press, pp. 87-213.
- [34] J.P. Vincken, H.A. Schols, R.J.F.J. Oomen, G. Beldman, R.G.F. Visser and A.G.J. Voragen, 2010. “Pectin—the hairy thing.” in Advances in Pectin and Pectinase Research: The 2nd International Symposium on Pectins and Pectinases, Rotterdam, Netherlands. pp. 47–59.

- [35] เคมีภัณฑ์. 2015. Locust Bean Gum. [Online]. Available : <https://www.chemipan.com/home/index.php>.
- [36] A.M. Stephen and S.C. Churm. 1995. "Gum and Mucilages." in Food polysaccharides and their applications, Edied by Stephen, A.M., New York, Marcel Dekker Inc., pp. 377-425.
- [37] ประหยัด ทิราวงศ์. 2546. การใช้แคลเซียมคลอไรด์ในการปรับปรุงความนุ่มของเนื้อโค. [Online]. Available : <http://www.siamchemi.com>.
- [38] ไพลิน นิมิตรพรชัย, ศศิวรรณ วิมลมนัส และอังศนา ประจักษ์แสงสิริ.2557. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของเม็ดไฮโดรเจลระหว่างไคโตซานและแตนแทนกัม." โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] จิตรานุช จิรปฐมกุล, จูติมา ชัยสิทธิ์ และภัทรานิษฐ์ ขวลิตเอื้ออังกุล.2554. "การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัม." โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [40] เกตุแก้ว กามุณี. 2554. "เอนแคปซูลเลชันของเพนติเมทาลินด้วยบีดอัลจินตคอมโพสิต." วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [41] พีรพงศ์ หาญพิชาญชัย.2002. "การควบคุมการปลดปล่อยของเม็ดปุ๋ยโดยการเคลือบไคโตซาน." วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมเคมี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิด

ตาราง ก1 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร Aca2/15

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1592	0.6050	0.1160	1.3726
2	0.1616	0.5980	0.1120	1.4428
3	0.1603	0.5717	0.0979	1.6380
4	0.1810	0.6534	0.1461	1.2388
5	0.1734	0.6200	0.1248	1.3892
6	0.1822	0.6100	0.1189	1.5326
7	0.1585	0.5516	0.0879	1.8032
8	0.1586	0.5484	0.0864	1.8361
9	0.1696	0.5984	0.1122	1.5112
10	0.1750	0.5550	0.0895	1.9545
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.5719

ตาราง ก2 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร Aca4/5

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1988	0.588	0.1066	1.8642
2	0.1914	0.657	0.1485	1.2886
3	0.1978	0.622	0.1258	1.5724
4	0.1975	0.637	0.1351	1.4616
5	0.2240	0.597	0.1112	2.0141
6	0.1930	0.590	0.1076	1.7942
7	0.1826	0.615	0.1218	1.4988
8	0.1910	0.603	0.1151	1.6599
9	0.2127	0.592	0.1084	1.9614
10	0.1788	0.592	0.1084	1.6488
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.6764

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก3 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปัดสูตร Aca4/15

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1935	0.600	0.1131	1.7104
2	0.2377	0.637	0.1352	1.7583
3	0.2219	0.655	0.1472	1.5077
4	0.2159	0.707	0.1849	1.1679
5	0.2024	0.625	0.1279	1.5829
6	0.2286	0.643	0.1394	1.6395
7	0.2191	0.652	0.1449	1.5121
8	0.2479	0.607	0.1169	2.1205
9	0.2519	0.585	0.1049	2.4024
10	0.2191	0.675	0.1611	1.3602
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.6762

ตาราง ก4 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปัดสูตร Aca2/15-Aca4/5

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1901	0.665	0.1540	1.2344
2	0.1909	0.612	0.1215	1.5712
3	0.1852	0.660	0.1506	1.2297
4	0.1840	0.697	0.1771	1.0390
5	0.1902	0.627	0.1291	1.4733
6	0.1984	0.642	0.1384	1.4335
7	0.1949	0.612	0.1199	1.6255
8	0.1803	0.638	0.1362	1.3238
9	0.1718	0.627	0.1289	1.3328
10	0.2079	0.632	0.1320	1.5750
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.3838

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก5 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร ACa4/5-ACa4/5

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.2088	0.674	0.1601	1.3042
2	0.1948	0.655	0.1472	1.3234
3	0.2189	0.702	0.1809	1.2101
4	0.1977	0.572	0.0980	2.0173
5	0.2115	0.642	0.1384	1.5282
6	0.2357	0.608	0.1179	1.9992
7	0.2093	0.653	0.1461	1.4326
8	0.2041	0.685	0.1683	1.2127
9	0.2006	0.653	0.1461	1.3730
10	0.1937	0.658	0.1494	1.2965
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.4697

ตาราง ก6 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร ACa4/15-ACa4/5

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.2500	0.688	0.1708	1.4637
2	0.2412	0.657	0.1483	1.6264
3	0.2388	0.605	0.1160	2.0586
4	0.2440	0.638	0.1362	1.7915
5	0.2654	0.723	0.1982	1.3391
6	0.2318	0.648	0.1427	1.6244
7	0.2557	0.680	0.1647	1.5525
8	0.2484	0.638	0.1362	1.8238
9	0.2197	0.610	0.1189	1.8478
10	0.2401	0.625	0.1279	1.8773
เฉลี่ย	0.2435	0.6512	0.1460	1.7005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก7 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร A<sub>Ca2/15</sub>-Fe<sub>0.5</sub>

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1680	0.662	0.1510	1.1126
2	0.1640	0.647	0.1420	1.1550
3	0.1750	0.650	0.1420	1.2324
4	0.1741	0.680	0.1630	1.0681
5	0.1830	0.667	0.1550	1.1806
6	0.1825	0.675	0.1630	1.1196
7	0.1675	0.652	0.1470	1.1395
8	0.1570	0.647	0.1420	1.1056
9	0.1699	0.613	0.1220	1.3926
10	0.1752	0.653	0.1470	1.1918
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.1698

ตาราง ก8 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร A<sub>Ca4/5</sub>-Fe<sub>0.5</sub>

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1926	0.702	0.1810	1.0641
2	0.1991	0.657	0.1510	1.3185
3	0.2095	0.662	0.1510	1.3874
4	0.1854	0.668	0.1550	1.1961
5	0.2235	0.705	0.1840	1.2147
6	0.1948	0.683	0.1680	1.1595
7	0.2067	0.697	0.1800	1.1483
8	0.2086	0.672	0.1600	1.1308
9	0.2140	0.685	0.1680	1.2738
10	0.1861	0.683	0.1680	1.1077
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.0937

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก9 ค่าความหนาแน่นของเม็ดบีดสูตร ACa4/15-Fe0.5

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.2395	0.680	0.1630	1.4693
2	0.2218	0.675	0.1630	1.3607
3	0.2436	0.710	0.1890	1.2889
4	0.2102	0.672	0.1600	1.3138
5	0.2307	0.740	0.2140	1.0780
6	0.2206	0.642	0.1383	1.5951
7	0.2054	0.687	0.1720	1.1942
8	0.2075	0.660	0.1510	1.3742
9	0.1925	0.670	0.1600	1.2031
10	0.2458	0.705	0.1840	1.3359
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.3213

ตาราง ก10 ค่าความหนาแน่นของเม็ดบีดสูตร ACa2/15-Fe1

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1681	0.663	0.1529	1.0994
2	0.1570	0.628	0.1299	1.2086
3	0.1595	0.620	0.1248	1.2780
4	0.1952	0.637	0.1352	1.4438
5	0.1648	0.637	0.1352	1.2189
6	0.1833	0.678	0.1632	1.1232
7	0.1693	0.642	0.1386	1.2215
8	0.1728	0.635	0.1341	1.2886
9	0.1607	0.602	0.1141	1.4084
10	0.1801	0.610	0.1189	1.5147
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.2805

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก11 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปัดสูตร Aca4/5-Fe1

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.2222	0.677	0.1623	1.3691
2	0.1886	0.688	0.1708	1.1042
3	0.1906	0.678	0.1635	1.1657
4	0.1932	0.675	0.1611	1.1993
5	0.1959	0.685	0.1683	1.1640
6	0.1956	0.657	0.1483	1.3189
7	0.1822	0.673	0.1599	1.1395
8	0.1803	0.653	0.1461	1.2341
9	0.1654	0.623	0.1268	1.3044
10	0.2128	0.633	0.1331	1.5988
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.2598

ตาราง ก12 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปัดสูตร Aca4/15-Fe1

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1956	0.690	0.1721	1.1365
2	0.1974	0.710	0.1875	1.0528
3	0.1656	0.635	0.1341	1.0705
4	0.1930	0.665	0.1547	1.2476
5	0.2082	0.615	0.1758	1.1843
6	0.2125	0.673	0.1592	1.3348
7	0.2180	0.707	0.1848	1.1796
8	0.1997	0.678	0.1635	1.2214
9	0.1986	0.685	0.1683	1.1800
10	0.2102	0.687	0.1696	1.2394
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.1847

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก13 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร ACa2/15-C

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.0727	0.627	0.1300	0.5592
2	0.0602	0.607	0.1170	0.5145
3	0.0897	0.623	0.1260	0.7119
4	0.0898	0.588	0.1050	0.8522
5	0.1233	0.607	0.1170	1.0538
6	0.0876	0.583	0.1050	0.8343
7	0.0676	0.573	0.1010	0.6693
8	0.0901	0.557	0.0920	0.9793
9	0.0976	0.605	0.1170	0.8342
10	0.1023	0.565	0.0960	1.0656
ความหนาแน่นเฉลี่ย				0.8074

ตาราง ก14 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร ACa4/5-C

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1324	0.630	0.1300	1.0185
2	0.1480	0.643	0.1380	1.0725
3	0.1254	0.603	0.1170	1.0718
4	0.1400	0.637	0.1340	1.0448
5	0.1484	0.667	0.1550	0.9574
6	0.1284	0.593	0.1090	1.1780
7	0.1196	0.640	0.1380	0.8667
8	0.1267	0.615	0.1220	1.0385
9	0.1437	0.622	0.1260	1.1405
10	0.1367	0.652	0.1470	0.9300
เฉลี่ย	0.1349	0.6302	0.1316	1.0319

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก15 ค่าความหนาแน่นของเม็ดปิดสูตร Aca4/15-C

เม็ด ที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ปริมาตร (cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.1542	0.635	0.1340	1.1507
2	0.1477	0.618	0.1260	1.1722
3	0.1637	0.625	0.1300	1.2592
4	0.1465	0.623	0.1260	1.1627
5	0.1661	0.653	0.1470	1.1300
6	0.1499	0.640	0.1380	1.0862
7	0.1602	0.673	0.1590	1.0075
8	0.1642	0.608	0.1170	1.4034
9	0.1550	0.607	0.1170	1.3248
10	0.1610	0.667	0.1550	1.0387
ความหนาแน่นเฉลี่ย				1.1735

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีด

ตาราง ข1 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร A Ca2/15

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูป ไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ ปลดปล่อย
1	2.17	10.86	65.35	38
2	4.77	17.18	104.01	61
3	6.31	19.74	119.30	70
4	7.28	20.22	122.15	72
5	8.96	20.39	123.12	72
6	10.88	20.49	123.70	73
7	11.30	20.51	123.82	73
8	12.14	20.55	124.07	73
9	12.82	20.58	124.27	73
10	14.56	20.67	124.79	73

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร A Ca2/15 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

ตาราง ข2 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร A Ca4/5

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	1.87	9.34	49.23	31
2	4.33	13.44	70.84	44
3	8.97	16.34	86.15	53
4	13.30	17.42	91.85	57
5	14.88	17.69	93.24	58
6	15.15	17.71	93.38	58
7	15.37	17.73	93.44	58
8	15.63	17.74	93.51	58
9	15.84	17.75	93.56	58
10	16.24	17.77	93.67	58

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร A Ca4/5 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข3 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดปัสตุร ACa4/15

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดปัสตุร)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดปัสตุร)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	1.73	8.65	44.71	33
2	3.65	13.46	69.56	51
3	5.13	15.92	82.29	60
4	6.32	16.52	85.36	62
5	7.09	16.65	86.03	63
6	9.10	16.75	86.54	63
7	9.10	16.75	86.54	63
8	9.10	16.75	86.54	63
9	9.45	16.76	86.64	63
10	9.45	16.76	86.64	63

หมายเหตุ : เม็ดปัสตุร ACa4/15 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

ตาราง ข4 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดปัสตุร ACa2/15-ACa4/5

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดปัสตุร)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดปัสตุร)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	0.99	4.95	26.27	25
2	2.84	8.04	42.70	40
3	5.19	10.39	55.23	52
4	9.29	12.44	66.13	62
5	15.23	13.92	74.02	70
6	20.06	15.13	80.46	76
7	21.67	15.53	82.59	78
8	22.44	15.66	83.27	78
9	22.89	15.74	83.67	79
10	23.29	15.77	83.86	79

หมายเหตุ : เม็ดปัสตุร ACa2/15-ACa4/5 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข5 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร ACa4/5-ACa4/5

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจนในรูป ไนเตรตที่ ปลดปล่อย
1	1.14	5.72	26.90	21
2	2.83	8.53	40.26	31
3	5.28	10.98	51.89	40
4	10.16	13.42	63.44	49
5	12.26	16.05	75.93	59
6	16.03	19.82	93.70	73
7	16.28	20.07	94.92	74
8	16.79	20.45	96.73	75
9	17.04	20.51	97.02	76
10	17.25	20.54	97.15	76

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร ACa4/5-ACa4/5 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

ตาราง ข6 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร ACa4/15-ACa4/5

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจนในรูป ไนเตรตที่ ปลดปล่อย
1	1.30	6.50	25.50	24
2	3.61	10.35	40.64	38
3	6.87	13.62	53.49	50
4	12.05	16.21	63.74	60
5	16.15	18.26	71.88	68
6	18.96	19.66	77.49	73
7	20.39	20.14	79.35	75
8	21.06	20.31	80.02	75
9	21.74	20.41	80.42	76
10	22.27	20.44	80.56	76

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร ACa4/15-ACa4/5 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข7 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร A<sub>Ca2/15</sub>-Fe<sub>0.5</sub>

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	2.21	11.04	61.66	44
2	4.99	18.00	100.58	71
3	6.69	20.83	116.30	83
4	7.06	21.20	118.31	84
5	7.88	21.32	118.98	85
6	9.27	21.44	119.64	85
7	10.23	21.49	119.91	85
8	10.24	21.49	119.91	85
9	10.48	21.50	119.98	85
10	10.72	21.51	120.05	85

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร A<sub>Ca2/15</sub>-Fe<sub>0.5</sub> ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

ตาราง ข8 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร A<sub>Ca4/5</sub>-Fe<sub>0.5</sub>

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	2.26	11.31	53.93	42
2	5.42	19.21	91.84	71
3	7.17	20.86	99.99	77
4	7.69	20.96	100.49	77
5	9.06	21.08	101.04	78
6	11.21	21.19	101.54	78
7	12.10	21.23	101.75	78
8	12.30	21.24	101.80	78
9	12.70	21.26	101.89	79
10	13.35	21.29	102.05	79

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร A<sub>Ca4/5</sub>-Fe<sub>0.5</sub> ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข9 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร A Ca4/15-Fe0.5

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจนในรูป ไนเตรตที่ ปลดปล่อย
1	3.01	15.06	66.36	53
2	6.19	23.01	101.80	81
3	7.27	24.09	106.84	85
4	8.51	24.36	107.98	86
5	9.21	24.40	108.17	86
6	10.54	24.47	108.49	86
7	11.24	24.50	108.65	86
8	11.89	24.53	108.79	87
9	12.24	24.55	108.87	87
10	12.67	24.57	108.98	87

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร A Ca4/15-Fe0.5 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

ตาราง ข10 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร A Ca2/15-Fe1

รอบ น้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจนในรูป ไนเตรตที่ ปลดปล่อย
1	2.90	14.48	82.15	67
2	4.83	19.32	109.38	89
3	5.87	19.85	112.31	91
4	5.87	19.85	112.32	91
5	6.27	19.87	112.43	92
6	6.27	19.87	112.43	92
7	6.51	19.88	112.49	92
8	6.75	19.90	112.56	92
9	6.91	19.90	112.61	92
10	7.14	19.91	112.67	92

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร A Ca2/15-Fe1 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข11 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร A Ca4/5-Fe1

รอบน้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	2.77	13.83	71.81	58
2	5.84	21.51	111.85	90
3	9.44	23.31	121.17	98
4	10.62	23.43	121.81	98
5	11.58	23.48	122.06	99
6	13.49	23.58	122.55	99
7	14.22	23.61	122.74	99
8	14.36	23.62	122.78	99
9	14.66	23.63	122.85	99
10	15.20	23.66	123.00	99

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร A Ca4/5-Fe1 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

ตาราง ข12 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร A Ca4/15-Fe1

รอบน้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	3.03	15.17	76.24	61
2	5.96	22.49	112.86	91
3	7.69	23.36	117.15	94
4	9.08	23.50	117.85	95
5	10.53	23.57	118.22	95
6	11.14	23.60	118.37	95
7	11.95	23.64	118.58	95
8	12.88	23.69	118.82	96
9	12.97	23.69	118.85	96
10	13.29	23.71	118.92	96

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร A Ca4/15-Fe1 ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข13 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร Aca2/15-C

รอบน้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	1.62	8.10	102.12	60
2	1.93	8.77	110.15	65
3	2.19	8.79	110.44	65
4	2.97	8.84	111.12	66
5	3.03	8.84	111.16	66
6	3.03	8.84	111.16	66
7	3.22	8.85	111.27	66
8	3.46	8.87	111.43	66
9	3.47	8.87	111.44	66
10	3.63	8.87	111.55	66

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร Aca2/15-C ใช้กราฟมาตรฐาน (ข) ดังรูปที่ 4.3

ตาราง ข14 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร Aca4/5-C

รอบน้ำ	ปริมาณ ไนโตรเจนในรูป ไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจนในรูปไน เตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	2.85	14.27	100.71	65
2	3.22	14.88	105.27	68
3	3.73	14.91	105.51	68
4	3.93	14.92	105.59	68
5	4.16	14.94	105.67	68
6	4.16	14.94	105.67	68
7	4.45	14.95	105.78	68
8	4.60	14.96	105.83	68
9	4.62	14.96	105.83	68
10	4.81	14.97	105.90	68

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร Aca4/5-C ใช้กราฟมาตรฐาน (ข) ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข15 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากเม็ดบีดสูตร Aca4/15-C

รอบน้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	2.45	12.24	78.60	55
2	4.59	14.39	91.96	65
3	4.59	14.39	91.96	65
4	4.76	14.40	92.01	65
5	4.76	14.40	92.01	65
6	4.76	14.40	92.01	65
7	4.76	14.40	92.01	65
8	4.76	14.40	92.01	65
9	4.76	14.40	92.01	65
10	4.76	14.40	92.01	65

หมายเหตุ : เม็ดบีดสูตร Aca4/15-C ใช้กราฟมาตรฐาน (ข) ดังรูปที่ 4.3

ตาราง ข16 ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากปุ๋ยเกรตการค้าชนิดละลายช้า

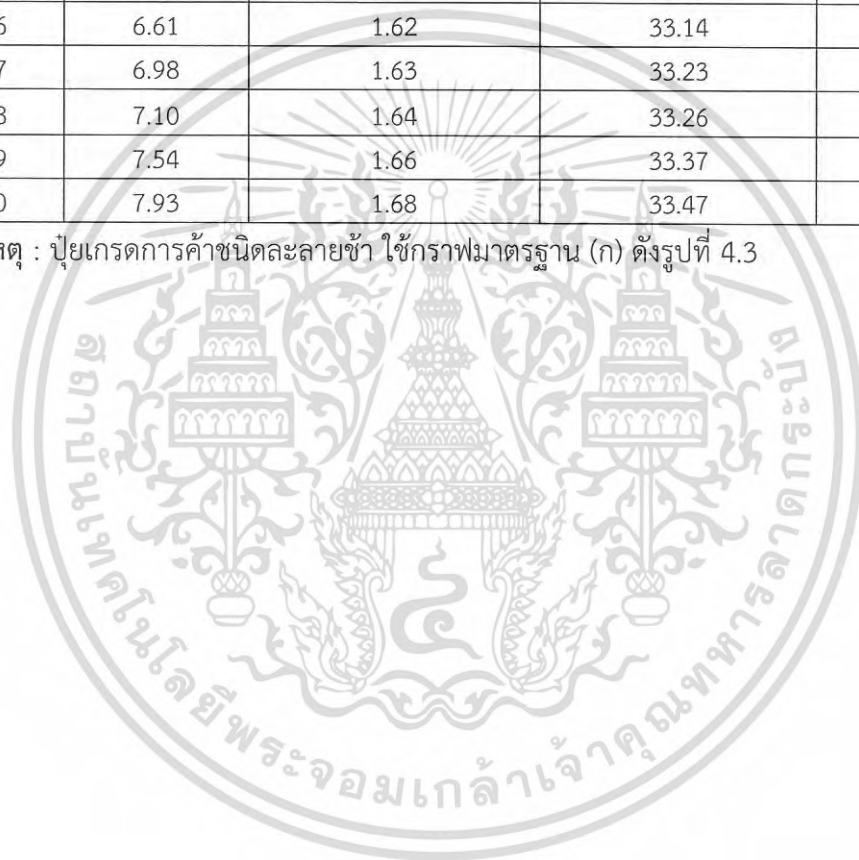
รอบน้ำ	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน ในรูปไนเตรต ที่ปลดปล่อย
1	0.31	1.12	30.65	56
2	0.51	1.30	31.57	58
3	0.84	1.33	31.70	58
4	1.23	1.35	31.79	58
5	1.59	1.36	31.88	58
6	2.11	1.39	32.01	59
7	2.56	1.41	32.13	59
8	2.76	1.42	32.18	59
9	3.24	1.45	32.29	59
10	3.66	1.47	32.40	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข16(ต่อ) ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยที่ปลดปล่อยจากปุ๋ยละลายช้าเกรดการค้า

รอบน้ำ	ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรต (mg/L)	ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1 เม็ดบีด)	ปริมาณไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย (mg/1g เม็ดบีด)	เปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนในรูปไนเตรตที่ปลดปล่อย
11	3.87	1.48	32.45	59
12	4.37	1.50	32.58	60
13	4.53	1.51	32.62	60
14	6.02	1.59	32.99	60
15	6.41	1.61	33.09	61
16	6.61	1.62	33.14	61
17	6.98	1.63	33.23	61
18	7.10	1.64	33.26	61
19	7.54	1.66	33.37	61
20	7.93	1.68	33.47	61

หมายเหตุ : ปุ๋ยเกรดการค้าชนิดละลายช้า ใช้กราฟมาตรฐาน (ก) ดังรูปที่ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้