

การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน
ฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินेटและแซนแทน

RELEASING BEHAVIOR OF POTASSIUM DIHYDROGEN
PHOSPHATE FROM ALGINATE AND XANTHAN GUM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน
ฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและแซนแทน

RELEASING BEHAVIOR OF POTASSIUM DIHYDROGEN
PHOSPHATE FROM ALGINATE AND XANTHAN GUM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**RELEASING BEHEVIOR OF POTASSIUM DIHYDROGEN
PHOSPHATE FROM ALGINATE AND XANTHAN GUM**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน ฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและแซนแทน

Releasing Behavior of Potassium Dihydrogen Phosphate from Alginate and Xanthan Gum

ชื่อนักศึกษา นางสาวชญลักษณ์ อายนอก

นายปองพล อุดมชัยเดช

นายสิงห์ สันแสนดี

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและแซนแทน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวรัชฎักษณ์ อาษานอก นายปองพล อุดมชัยเดช นายสิงห์ สันแสนดี
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยสารอโรฟอสเฟตในรูปของสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ของเจลญี่ปุ่นัดเม็ดจากอัลจินตและแซนแทน โดยมีโซเดียมเททระบอเรต, แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมโยง โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอัลจินตต่อแซนแทน ความเข้มข้นของโซเดียมเททระบอเรต แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟต ทำการเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารอโรฟอสเฟต จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาอัดเม็ดเพื่อศึกษาการบวมตัว โดยนำเจลญี่ปุ่นัดเม็ดแช่ในน้ำกลั่น และวัดการปลดปล่อยสารอโรฟอสเฟตของเจลญี่ปุ่นัด โดยตรวจวัดปริมาณสารอโรฟอสเฟตด้วย Ascorbic acid method ใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

จากผลการบวมตัว พบว่าสูตร X5A5B0.6Ca0.05 ที่มีการเชื่อมโยง 2 กลไก มีค่าการบวมตัวสูงสุดที่ประมาณ 12 เท่า และคงตัวอยู่ได้นาน เนื่องจากการสร้างพันธะเชื่อมโยงของทั้งโซเดียมเททระบอเรต และแคลเซียมคลอไรด์ จากการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลญี่ปุ่นัดเม็ด พบว่าสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง และเชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตความเข้มข้น 0.6% w/v มีอัตราการปลดปล่อยใกล้เคียงกัน และปลดปล่อยสารออกมาได้หมด 100% เมื่อทำการเชื่อมโยง 2 กลไก ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน การปลดปล่อยมีอัตราการปลดปล่อยที่ช้าลง และปลดปล่อยออกมาได้ไม่หมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.05 M สามารถปลดปล่อยได้เพียง 80%

คำสำคัญ : ไฮโดรเจล, อัลจินต, แซนแทน, การปลดปล่อย, อโรฟอสเฟต

Title	Releasing Behavior of Potassium Dihydrogen Phosphate from Alginate and Xanthan Gum
Student	Miss Thunyaluk Asarnok Mr. Pongpon Udomchaidate Mr. Sing Sunsandee
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Industrial Chemistry
Academic Year	2013
Advisor	Asst.Prof.Dr.Pathavuth Monvisade

ABSTRACT

This special project studied on the releasing of orthophosphate solution (KH_2PO_4) from sodium alginate and xanthan hydrogels crosslinked by sodium tetraborate, calcium chloride and copper sulfate. The ratio of alginate to xanthan and the concentration of crosslinking agents, i.e. sodium tetraborate, calcium chloride and copper sulfate were varied. The fertilized gel tablets were prepared by loading of orthophosphate then compressed to pellet. The study on swelling behavior was achieved by adding the tablets into distilled water and measuring its water uptake. The fertilized hydrogel tablets were also measured for orthophosphate releasing. Orthophosphate measurement was detected in quantity by using Ascobic acid method and UV-Visible Spectrophotometer with 880 nm wavelength.

The results of the swelling behavior of hydrogel especially X5A5B0.6Ca0.05 were up to 12 folds and could maintain its water uptake for relatively long period due to the crosslink among the structure of starting polymers by sodium tetraborate and calcium chloride, respectively. The releasing behavior of KH_2PO_4 was found that the formula without crosslinked and the formula with sodium tetraborate 0.6% w/v gained releasing up to 100%. The formula with various concentrations of calcium chloride or copper sulfate showed the slow release behavior, especially when calcium chloride or copper sulfate 0.05 M were applied. However, the release of orthophosphate could reached only about 80%

Keywords : hydrogel, alginate, xanthan, releasing, orthophosphate

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการนี้ ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ภัทรารุช มนต์วิเศษ ที่ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาเป็นอย่างดีในการทำโครงการพิเศษนี้ตลอดมา

ขอขอบคุณ คณะกรรมการทุกท่าน ที่ช่วยในการตรวจสอบแก้ไขให้โครงการพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นายภูษิต จันทาวุฒิ ที่ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาเป็นอย่างดีในการทำโครงการพิเศษนี้ตลอดมา

ขอขอบคุณ พี่นักศึกษาปริญญาโทและเอก ทุกคนที่กรุณาให้แนะนำเป็นอย่างดี และเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำการทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา และขอบคุณกำลังใจจาก บิดา มารดา อาจารย์ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่ทำให้โครงการพิเศษนี้ สำเร็จลุล่วงได้ดีด้วยดี

นางสาวรัชฎ์ลักษณ์ อาษานอก

นายปองพล อุดมชัยเดช

นายสิงห์ สันแสนดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
คำย่อและสัญลักษณ์	XI

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)	4
2.1.1 ประเภทของไฮโดรเจล	6
2.1.1.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้	6
2.1.1.2 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์	7
2.1.1.3 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง	9
2.1.2 การแบ่งตามขนาดของรูพรุน	9
2.2 สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of hydrogels)	10
2.3 กัมจากธรรมชาติ	12
2.3.1 Seaweed extracts	12
2.3.2 Plant extracts	18
2.3.3 Plant seed gums	21
2.3.4 Plant exudate gums	23
2.3.5 Animal-derived	26
2.3.6 Microbial gums	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ปุ๋ย	30
2.4.1 ปุ๋ยอินทรีย์	30
2.4.2 ปุ๋ยเคมี	31
2.5 ระบบเชื่อมโยง	32
2.5.1 การเชื่อมโยงทางเคมี	32
2.5.2 การเชื่อมโยงด้วยประจุ	33
2.6 ปุ๋ยละลายช้า	36
2.6.1 ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (Slow-released fertilizers)	36
2.6.2 ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled released fertilizers)	36
2.7 ปุ๋ยไฮโดรเจล	36
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	44
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	44
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในงานวิจัย	45
3.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน โพลีแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เพื่อใช้เป็นสารมาตรฐานสำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer	45
3.3.2 การเตรียมสารละลาย โพลีแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.2 M	45
3.3.3 การเตรียมสารละลายแอสคอร์บิกรีเอเจนต์	45
3.3.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมเททระโบเรต	45
3.3.5 การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	46
3.3.6 การเตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต	46
3.4 ขั้นตอนการเตรียมเจลปุ๋ยอัดเม็ด	46
3.4.1 การเตรียมเจลปุ๋ยอัดเม็ดแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว	46
3.4.2 การเตรียมเจลปุ๋ยอัดเม็ดแบบเชื่อมโยง 2 กลไก	48

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.4.2.1 การเชื่อมโยงกลไกที่ 1	48
3.4.2.2 การเชื่อมโยงกลไกที่ 2	48
3.5 การตรวจวัดขนาดอนุภาคเจลปุย	52
3.6 การหาความหนาแน่นของเจลปุยอัดเม็ด	52
3.7 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของเจลในน้ำกลั่น	53
3.8 วิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต	53
3.8.1 การเตรียม Calibration Curve	53
3.8.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อย จากปุยอัดเม็ด	53
3.8.3 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในเจลจากการคำนวณ	54
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของเจลปุยอัดเม็ด	57
4.1.1 ขนาดอนุภาคของเจลปุยอัดเม็ด	57
4.1.2 ความหนาแน่นของเจลปุยอัดเม็ด	59
4.1.3 พฤติกรรมการบวมตัวของเจลปุยอัดเม็ด	59
4.2 การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน ฟอสเฟตของเจลปุยจากโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทน	64
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก	80
ภาคผนวก ก	81
ภาคผนวก ข	84
ภาคผนวก ค	91
ภาคผนวก ง	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างโครงสร้างของไฮโดรเจลและการนำมาประยุกต์ใช้งาน	5
2.2 ข้อดีและข้อเสียของปฏิกิริยาอินทรีย์-ปฏิกิริยาเคมี	32
3.1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างเซนแทนกับโซเดียมอัลจิเนตที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียว	50
3.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างเซนแทนกับโซเดียมอัลจิเนตที่มีการเชื่อมโยง 2 กลไก	51
4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเจลปฏิกิริยา	58



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์	6
2.2 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์	7
2.3 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ	7
2.4 ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม	7
2.5 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย	8
2.6 ไฮโดรเจลแบบกราฟต์บนพื้นผิว	8
2.7 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก	9
2.8 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล	10
2.9 อันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล	12
2.10 หน่วยซ้ำของคาร์ราจีแนน	13
2.11 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน	14
2.12 โครงสร้างของอะกาโรส	15
2.13 กลไกการเกิดเจลของอะกาโรส	15
2.14 โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) ชนิดต่างๆ	17
2.15 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจิเนต (Egg-box model)	18
2.16 Hypothetical structure of apple pectin showing I xylogalacturona, II region with rabinan side chain and III rhamnogalacturonan region making up the "hairy region"	20
2.17 ชนิดและสมบัติของเพคติน	20
2.18 กลไกการเกิดเจลของเพคตินชนิด LM	21
2.19 โครงสร้างโมเลกุลของ Locust bean gum	22
2.20 โครงสร้างโมเลกุลของกัวร์กัม	22
2.21 โครงสร้างโมเลกุลของกัมอะราบิก	23
2.22 Structure of gum karaya (<i>Sterculia urens</i>)	25
2.23 Partial structure of tragacanthic acid	26
2.24 การเปรียบเทียบโครงสร้างโมเลกุลของ chitin, chitosan และ cellulose	29
2.25 โครงสร้างโมเลกุลของ Xanthan gum	30
2.26 การแลกเปลี่ยนไอออนของพอลิเอมิกแอซิดกับโลหะไอออน	33
2.27 สูตร โครงสร้างคอปเปอร์ซัลเฟต	33
2.28 การเชื่อมโยงหมู่คาร์บอกซิเลตในโครงสร้างของแซนแทนกัมกับคอปเปอร์ซัลเฟต	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 แบบจำลองการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างระหว่างแซนแทนกัมและ Divalent cation	36
2.30 ลักษณะการปลดปล่อย	37
3.1 แผนภาพวิธีการเตรียมเจล และการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบเชื่อม โยงกลไกเดียว	47
3.2 แผนภาพวิธีการเตรียมเจล และการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบเชื่อม โยง 2 กลไก	49
4.1 ภาพของผงเจลปฏิกิริยาที่กระจายตัวบนแผ่นสไลด์ที่กำลังขยาย 200X	58
4.2 ตัวอย่างเจลปฏิกิริยาอัดเม็ด	59
4.3 กราฟการเปรียบเทียบพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลอัดเม็ดสูตรที่ไม่มีการเชื่อม โยง	59
4.4 กราฟการเปรียบเทียบพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลอัดเม็ดระหว่างสูตรที่ไม่มีการเชื่อม โยงกับสูตรที่มีการเชื่อม โยงแบบกลไกเดียว ด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรต	60
4.5 กราฟพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจล เชื่อม โยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตและสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	61
4.6 กราฟพฤติกรรมการบวมตัวไฮโดรเจล เชื่อม โยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตและสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน	62
4.7 กราฟพฤติกรรมการบวมตัวไฮโดรเจล ที่เชื่อม โยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรต สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน	62
4.8 การเชื่อม โยงเจลด้วยบอแรกซ์ และการเสียสภาพเจล	63
4.9 การเชื่อม โยงประจุแบบโควาเลนต์ระหว่างแซนแทนกัมกับแซนแทน และอัลจินตกับอัลจินต	64
4.10 กราฟกราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตปริมาณเทียบฟอสเฟต	65
4.11 พฤติกรรมปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลอัดเม็ดสูตรที่ไม่มีการเชื่อม โยง	66
4.12 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลอัดเม็ดระหว่างสูตรที่ไม่มีการเชื่อม โยงกับสูตรที่มีการเชื่อม โยงแบบกลไกเดียว ด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรต	67
4.13 กราฟพฤติกรรมปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเชื่อม โยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตและสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 กราฟพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เชื่อม โยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตและสารละลายคอปเปอร์- ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน	69
4.15 กราฟพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ของเจลนึ่ยัดเม็ดระหว่างสูตรเชื่อม โยง 2 กลไกด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์กับ เชื่อม โยง 2 กลไก ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต	70
4.16 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน- ฟอสเฟตกับพฤติกรรมการบวมตัวของเจลนึ่ยัดเม็ด	71
4.17 กราฟพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเมื่อ เปลี่ยนแปลงชนิดและความเข้มข้นของสารเชื่อม โยง	71

คำย่อและสัญลักษณ์

คำย่อ	ความหมาย
HEMA	2-hydroxyethyl methacrylate
WC	ปริมาณร้อยละของน้ำที่เป็นองค์ประกอบภายใน
EWC	ปริมาณร้อยละของน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ภายในไฮโดรเจลพองตัวเต็มที่แล้ว
SR	สัดส่วนของการบวมตัวของไฮโดรเจล
AHA	Alpha Hydroxyl Acid
PVA	Poly(vinyl alcohol)
Alg หรือ A	Alginate
Na-Alg	Sodium Alginate
X	Xanthan Gum
B	Sodium tetraborate
Ca	Calcium chloride dehydrate
Cu	Copper sulfate

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีพื้นที่เพาะปลูกเป็นจำนวนมาก ทำให้ประชาชนส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกร โดยเกษตรกรไทยนิยมปลูกข้าว พืชผัก และผลไม้ ซึ่งในปัจจุบันสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจากปัญหาโลกร้อน จึงส่งผลกระทบต่อพืชผลทางการเกษตร ทำให้พืชผลทางการเกษตรมีจำนวนผลผลิตต่ำประกอบกับผลผลิตไม่ออกตรงตามฤดูกาล ดังนั้นเกษตรกรจึงนิยมใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อเพิ่มผลผลิตให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค เพราะปุ๋ยเคมีสามารถเพิ่มจำนวนผลผลิตได้มาก เนื่องจากเป็นแหล่งรวมธาตุอาหารหลักที่จำเป็นของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียม นอกจากนี้ยังประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ปุ๋ยเคมีเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และผู้บริโภค จึงมีการส่งเสริมให้มีการใช้ปุ๋ยชีวภาพมากขึ้น เนื่องจากปุ๋ยชีวภาพได้จากวัสดุทางธรรมชาติ จึงไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม

การศึกษาโครงการพิเศษ เพื่อช่วยแก้ปัญหาการใช้ปุ๋ยเคมีของเกษตรกรจึงมีบทบาทขึ้น เช่น การศึกษาสมบัติของดินที่มีผลต่อการดูดซับฟอสฟอรัสในดินที่ใช้ปลูกไม้ผล[1] การศึกษาปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืชในระบบการผลิตสับปะรด[2] เป็นต้น เพื่อลดปริมาณสารเคมีที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อม จึงนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เพราะไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก มีสมบัติการบวมตัวในน้ำได้ดี สามารถกักเก็บสารไว้ภายในเพื่อทำการปลดปล่อย และยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ ในการใช้ไฮโดรเจลดังกล่าวจากสารตั้งต้นทางธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการพัฒนาขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจล โดยสารตั้งต้น คือ โซเดียมอัลจิเนตและแซนแทน โดยทั้งอัลจิเนต และแซนแทนมีหมู่คาร์บอกซิเลตซึ่งมีประจุเป็นลบ ทำให้สามารถจับสารละลายออร์โธสเฟตได้ดี และช่วยอุ้มน้ำได้ดี

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเตรียมเจลปุ๋ยจากสารตั้งต้นหลายชนิด ได้แก่ 1. จากอัลจิเนต และกัวร์กัม ที่มีการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทตระบอเรตจากการทดลอง พบว่าการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและกัวร์กัม[3] ก่อนข้างรวดเร็วโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงต้นของการปลดปล่อย จึงได้มีงานวิจัยต่อยอดโดยใช้สารเชื่อมโยง 2 ระบบ คือ โซเดียมเทตระบอเรต และแคลเซียมคลอไรด์[4] ซึ่งพบว่ามี การปลดปล่อยปุ๋ยช้าลง 2. จากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัมเป็นการศึกษาการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม[5] เพื่อเป็นการเปรียบเทียบการบรรจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 2 แบบ คือการเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว และการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในภายหลังการเตรียมไฮโดรเจล จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาศึกษาการปลดปล่อยสาร โดยพบว่างานวิจัยข้างต้นมีการปลดปล่อยสารที่เร็วในช่วงต้น

งานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาต่อเนื่องเพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารละลายออโรฟอสเฟต โดยศึกษาอัตราส่วนของสูตร โซเดียมอัลจินต และแซนแทน จากการเชื่อมโยง 2 แบบ คือแบบที่ 1 ใช้โซเดียมเททระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยงกลไกเดียว และแบบที่ 2 เป็นการเชื่อมโยง 2 กลไกโดยใช้โซเดียมเททระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยงกลไกที่ 1 โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นและใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมโยงในกลไกที่ 2 โดยคาดว่า สารตั้งต้นทั้งสองสามารถเกิดการเชื่อมโยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิเลตสามารถเชื่อมโยงแบบประจุได้ดี โดยทำการอัดเป็นเม็ด และศึกษาพฤติกรรมของการปลดปล่อยสาร ตรวจสอบปริมาณสารละลายออโรฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic acid method) ตรวจวัดด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมของการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและแซนแทน โดยมีการเชื่อมโยงด้วยระบบเชื่อมโยงต่างๆ และไม่เชื่อมโยง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและแซนแทน ได้แก่ อัตราส่วนของอัลจินตและแซนแทน, การเชื่อมโยง 2 แบบ คือ กลไกเดียว และ 2 กลไก และความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงชนิดต่างๆ

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. เตรียมไฮโดรเจลจากอัลจินตและแซนแทน โดยผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แล้วทำการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรต แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟต แล้วอัดเป็นเม็ด
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่
 - 2.1 อัตราส่วนของอัลจินตต่อแซนแทน
 - 2.2 ชนิดของสารเชื่อมโยงในขั้นตอนที่สอง ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟต

2.3 ความเข้มข้นของโซเดียมเททระบอเรต แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์-ซัลเฟต

3. ตรวจสอบปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยวิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic acid method) ด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบพฤติกรรมการปลดปล่อยของสารละลายอโรฟอสเฟตภายในไฮโดรเจลที่เตรียมได้
2. ผลของการวิจัยสามารถนำไปใช้พัฒนา และการปรับใช้กับงานในด้านการเกษตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels) [6]

ไฮโดรเจล (Hydrogels) เป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilics) ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนแรกเป็นส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับโมเลกุลของน้ำหรือเรียกว่า ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) เช่น หมู่ -OH, -COOH, -CONH₂ และ -SO₃H เป็นต้น และส่วนที่สองเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) เช่น หมู่ -CH₂ และ -CH₃ เป็นต้น ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรือเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ ในสายโซ่ ซึ่งประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมาก และโมเลกุลมีการพันกัน หรือ ขดตัวกันของสายโซ่ ทำให้ในโครงสร้างโดยรวมเกิดรูพรุนขนาดเล็กๆ ขึ้น ตัวอย่าง โครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลแสดงดังตารางที่ 2.1 สมบัติเด่นของไฮโดรเจล คือสามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network structure) ได้มากกว่า 20% พร้อมกับสามารถพองตัว หรือ ขยายตัวออกได้ และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป นอกจากนี้แล้วไฮโดรเจลยังไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทุกชนิดด้วย

การนำไฮโดรเจลมาใช้ประโยชน์

ทางการแพทย์

- ใช้เป็นวัสดุปิดแผลเสริมให้บาดแผลหายได้ในเวลาที่เร็วขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจลมีความสามารถในการรักษาความชุ่มชื้นให้กับบาดแผล

- ใช้ในงานศัลยกรรมตกแต่ง

- ใช้เป็นสารนำส่งยา (Drug delivery system) โดยดูดซับยา และปลดปล่อยออกมา

ทางการแพทย์

- ช่วยอุ้มน้ำทำให้ดินมีความชุ่มชื้น และยังช่วยดูดซับแร่ธาตุต่างๆ ในดิน

- สามารถนำมาใช้แทนดินในการเลี้ยงต้นไม้ประเภทไม้กระถาง และปลูกต่าง

การประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน

- ใช้ทำคอนแทคเลนส์ (Silicone hydrogels) ซึ่งให้ความสบายแก่ดวงตา และลดการระคายเคือง

- ใช้ทำแผ่นดูดซับในผ้าอ้อมสำเร็จรูปของเด็ก

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างโครงสร้างของไฮโดรเจล และการนำมาประยุกต์ใช้งาน [6]

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

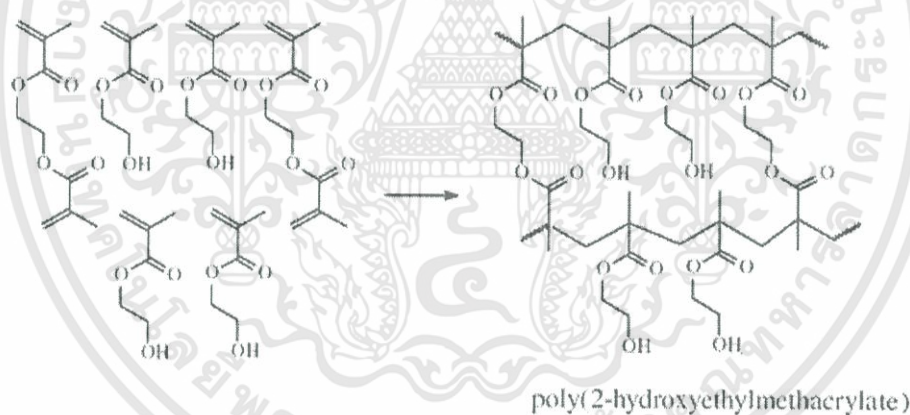
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ประเภทของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับกฎเกณฑ์ที่ใช้ดังนี้

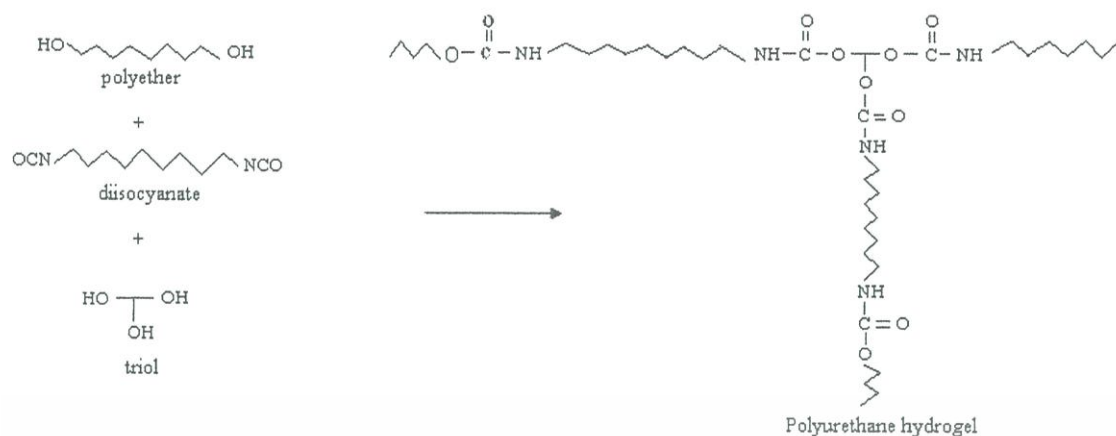
2.1.1.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้ [7]

1.) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic monomer) และมอนอเมอร์ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Polyfunctional-comonomer) โครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแต่ละมอนอเมอร์ ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำที่นิยมใช้กัน เช่น เมทาคริลิกแอซิด เมทาคริลลาไมด์ เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ((2-Hydroxyethyl)methacrylate (HEMA)) กับเอทิลีนไกลคอล-บิสเมทาคริเลต (Ethylene glycol-bismethacrylate (EGDMA)) [17] ดังรูปที่ 2.1 ไฮโดรเจลที่ได้นำมาใช้เป็นคอนแทคเลนส์แบบนิ่ม การพอลิเมอไรซ์ของไวนิลมอนอเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้ตัวริเริ่มแบบอนุมูลอิสระ เช่น เปอร์ออกไซด์ หรือสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น โดยที่ตัวริเริ่มจะแตกตัวให้อนุมูลอิสระ เมื่อมีการให้ความร้อน หรืออาจใช้ตัวริเริ่มแบบรีดอกซ์ เช่น Ammonium persulfate คู่กับ N,N-tetramethylethylenediamine (TEMED) [7] รวมถึงการใช้ระบบ Photo initiator ด้วย



รูปที่ 2.1 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์ [7]

2.) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์ ไฮโดรเจลประเภทนี้เตรียมโดยการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ หรือโอลิโกเมอร์ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยง α, ω -hydroxyl poly (ethylene glycol) ด้วย Diisocyanate ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงแบบ ไตรออด ไฮโดรเจลที่ได้จัดเป็นพอลิยูรีเทนที่ชอบน้ำ [8, 9]



รูปที่ 2.2 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์ [8, 9]

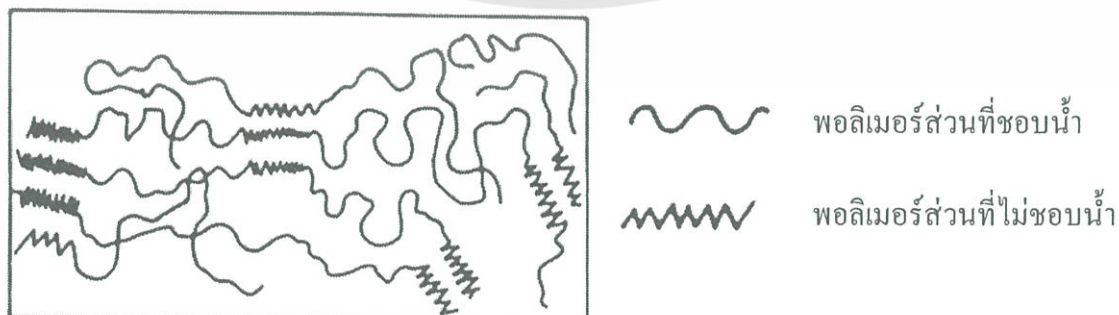
3.) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ไฮโดรเจลประเภทนี้เกิดจากการเชื่อมโยงทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยงโมเลกุลของโปรตีนด้วยฟอรัมัลดีไฮด์ หรือกลูตาโรลดีไฮด์ ดังรูปที่ 2.3 [10] นอกจากนี้ไอออนิกพอลิเมอร์ยังสามารถเชื่อมโยงได้ด้วยตัวเชื่อมโยงที่มีประจุเป็น 2+, 3+ เช่น การสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินตด้วยตัวเชื่อมโยงที่ให้ Ca^{2+} [7]



รูปที่ 2.3 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ [10]

2.1.1.2 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [6]

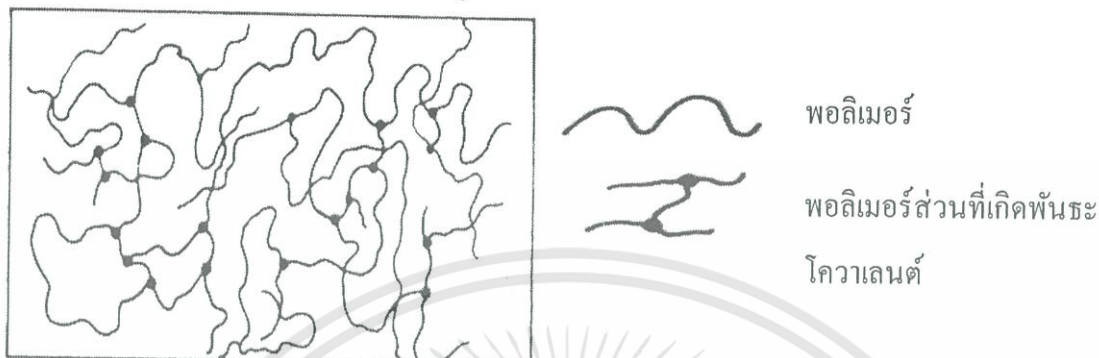
1.) ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast Film) มักนำไปใช้เพื่อเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network) เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (Crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วยจากนั้นเทลงไปในแม่พิมพ์ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.5



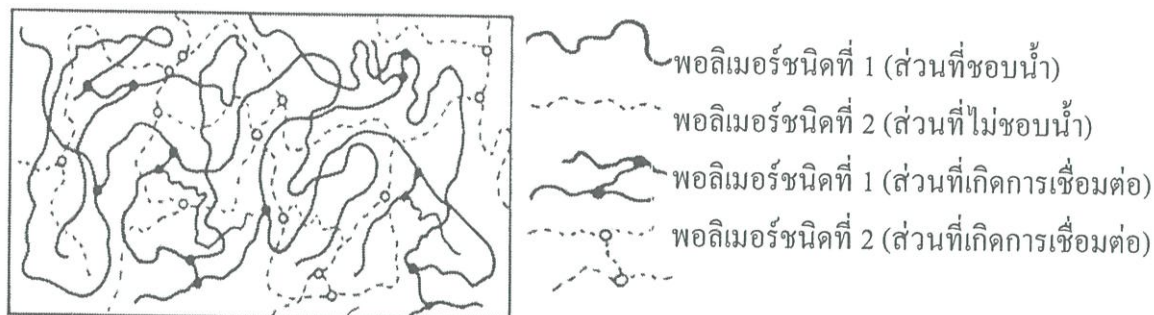
รูปที่ 2.5 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย [7]

3.) ไฮโดรเจลแบบกราฟต์บนพื้นผิว (Surface Grafted Polymer) ทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการเหมาะกับการประยุกต์ใช้งาน เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นโดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า หรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำเป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไฮโดรเจลแบบกราฟต์บนพื้นผิว [7]

4.) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตริงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating Polymer Network, IPN) เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้น หรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบกึ่งอินเตอร์เพเนตริงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (semi-IPN) คือไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่งเพื่อให้ตรงต่อการประยุกต์ใช้งานในแต่ละแบบ



รูปที่ 2.7 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก [7]

2.1.1.3 ประเภทของไฮโดรเจลที่แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง [11]

1) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical hydrogel) มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก โดยในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะมักมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลายตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะไม่เกิดกระบวนการย้อนกลับทางความร้อน คือ ไม่สามารถทำให้หลอมได้อีกหากให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัวสมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกได้อีกชื่อว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต เนื่องจากไฮโดรเจลชนิดนี้มีความคงทนไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัวทำละลาย ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูปตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซี-เอทิลเมทาคริเลต) ที่มีการเชื่อมโยงด้วยเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต [12] เป็นต้น

- ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical hydrogel) การเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากพันธะไฮโดรเจนแรงแวนเดอร์วาลส์แรงระหว่างประจุ ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดการผันกลับทางความร้อนได้จึงเรียกได้อีกชื่อว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถหลอมได้เมื่อให้ความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง ซึ่งการให้ความร้อนจะไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมี และทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่ายรวมทั้งการผสมสารอื่นลงในเจลด้วย เช่น สารต้านจุลินทรีย์ยา เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(อะคริลาไมด์-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน) (Poly(acrylamide-co-methacrylate-co-vinylamine)) [13] เป็นต้น

2.1.2 การแบ่งตามขนาดของรูพรุน [6]

การแบ่งตามขนาดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

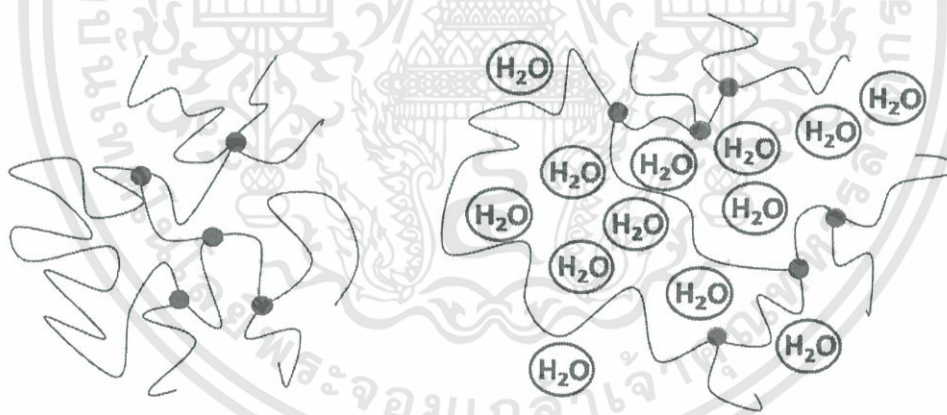
- ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายได้ โดยที่มอนอเมอร์สารเชื่อมโยง และพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ ทำให้ได้เจลที่มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous hydrogel) เช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA : H₂O เท่ากับ 2:1 [12] เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไฮโดรเจลที่มีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous hydrogel) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ ไฮโดรเจลชนิดนี้พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการพอลิเมอไรซ์ แต่จะตกตะกอนแยกออกมา ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่มีสีขาวขุ่น เรียกว่าเป็นไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel) เช่น พอลิ (2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA : H₂O เท่ากับ 1.25:1 [12] เป็นต้น

2.2 สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of hydrogels) [6]

สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล คือสามารถพองตัวแต่ไม่ละลายในน้ำ เนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำโมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่าง หรือรูพรุนภายใน โครงสร้างสามมิติของไฮโดรเจลนั้นได้ เนื่องจากแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) โมเลกุลน้ำบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัว หรือเกิดการพองตัวขึ้น ซึ่งเป็นการปรับโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เกิดสมดุลใหม่ ไฮโดรเจลเมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่แยกขาดออกจากกัน เนื่องจากภายในประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัด และยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยมีตัวเชื่อมต่อกัน (Crosslinker) เป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายพอลิเมอร์ การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัวแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล [6]

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจลมีดังนี้ คือ

แรงดันออสโมติก เนื่องจากปริมาณน้ำภายใน และภายนอกไฮโดรเจลไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่าง หรือรูพรุนของไฮโดรเจล ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมาก น้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากขึ้น

แรงกระทำระหว่าง โมเลกุลน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสมซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้ว จะทำให้เป็นการเหนี่ยวนำโมเลกุลน้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่าง หรือรูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มาก น้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มาก

ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าสายโซ่มีความยืดหยุ่นที่ดีจะเป็นการลดแรงต้าน (Resistance force) ของการแพร่ของโมเลกุลน้ำเข้าสู่สมดุคใหม่ ทำให้โมเลกุลน้ำแพร่ผ่านเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก

ความหนาแน่นของการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้ามีความหนาแน่นของการเชื่อมต่อมากจะเปรียบเสมือนกับเป็นการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายตัวของไฮโดรเจล ทำให้ความสามารถในการพองตัวลดลง

โมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในไฮโดรเจลมี 2 ลักษณะใหญ่ๆแสดงดังรูปที่ 2.9 ได้แก่ โมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์เรียกว่า “โมเลกุลน้ำอิสระ” (Free water) สามารถเคลื่อนที่ได้ อย่งอิสระ และระเหยได้ง่าย จึงมีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจลไม่มากนัก และโมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่ (Bound water) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยากกว่า และต้องใช้ความร้อนปริมาณหนึ่งในการระเหยโมเลกุลน้ำ ลักษณะนี้การออกปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในไฮโดรเจล (Water content, WC) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

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

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่แห้ง

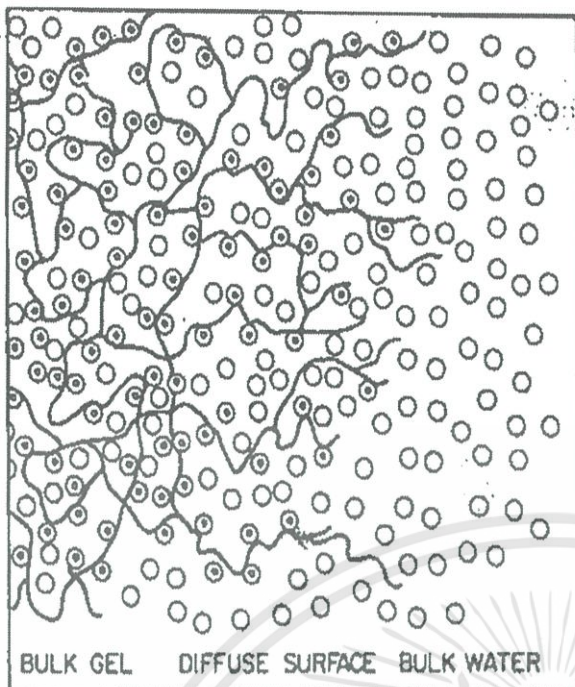
W_2 คือ น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ

ถ้าสำหรับปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮโดรเจลขณะที่ไฮโดรเจลพองตัวเต็มที่แล้ว เรียกว่า “ปริมาณน้ำสมดุค” (Equilibrium water content, EWC)

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

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

สมบัติที่สำคัญอีกประการของไฮโดรเจล คือการยอมให้มีการแพร่ผ่านของโมเลกุลต่างๆ เช่น น้ำโปรตีนยา หรือแม้แต่ก๊าซออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการแพทย์



- ~ คือสายโซ่พอลิเมอร์
- คือน้ำโมเลกุลอิสระ
- ⊙ คือโมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่พอลิเมอร์

รูปที่ 2.9 อันตรกิริยาของโมเลกุลน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล [6]

2.3 กัมจากธรรมชาติ [14]

กัม (Gum) จากธรรมชาติเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์ และอนุพันธ์ของพอลิแซคคาไรด์ส่วนใหญ่มีแหล่งที่มาจากพืช สามารถละลายได้ทั้งในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อน โดยสารที่ได้จะมีความหนืดสูง แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของกัมเพียงเล็กน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงมีการนำกัมจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด หรือสารข้นสารเพิ่มเสถียรภาพ และยังช่วยให้เกิดเป็นเจลอิมัลชันไฟเออร์ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นกาวได้

กัมธรรมชาติแบ่งออกเป็นกลุ่มตามแหล่งที่มา ได้แก่

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

2.3.1 Seaweed extracts

กลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเล ได้แก่ สาหร่ายสีแดง เช่น คาร์ราจีแนน (Carrageenan) อะการ์ (Agar) และเฟอเซลล์ลารัน (Furcellaran) สาหร่ายสีน้ำตาล ได้แก่ อัลจิเนต (Alginate) เป็นต้น

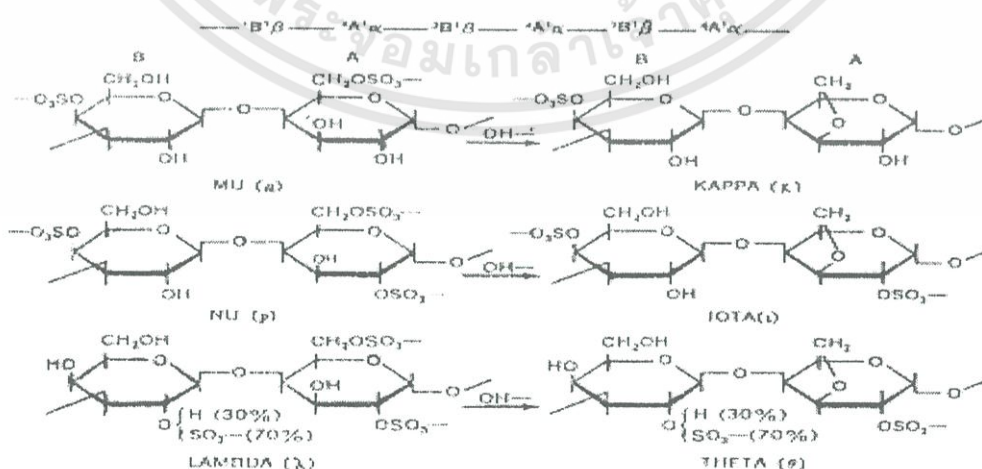
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คาร์ราจีแนน (Carrageenan) เป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ซึ่งชนิดที่ใช้ผลิตเป็นกรดทางการค้า ได้แก่ *Euchema cottonii* และ *E. spinosum* มีโครงสร้างหลักเป็น Galactose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glycosidic linkage และเป็น Sulphated polysaccharides ซึ่งคาร์ราจีแนนยังแบ่งเป็นกลุ่มย่อยอีกหลายชนิดตามจำนวน และตำแหน่งของกลุ่ม Ester sulphate และจำนวน 3,6 anhydro-D-galactose (3,6-AG) ได้แก่ Kappa, Iota และ Lambda ซึ่งคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิดนี้ ประกอบด้วยโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำกันหลายหน่วยดังรูปที่ 2.10 Unit-B แสดง 1,3-linked galactoside ในขณะที่ Unit A แสดง 1,4-linked galactoside

Kappa carrageenan ประกอบด้วย 1,3-linked galactoside มีกลุ่มซัลเฟต (Sulphate) ที่ตำแหน่งที่ 4 และ 1,4-linked 3,6-anhydro-D-galactose (3,6-AG) โดยมีสารตั้งต้นเป็น Mu-carrageenan ถ้ามีปริมาณ Anhydride จากการปิดวงเป็น 3,6-anhydride มากถึง 28-35% จะมีผลทำให้ไวต่อโปแตสเซียม และมีความสามารถในการเกิดเจล ถึงแม้จะมีการคัดแปรให้มี 3,6-AG สูงที่สุด แต่อาจมีความแตกต่างกันที่จำนวนของซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 4 ใน 1,3-linked galactoside และกลุ่มซัลเฟตที่ตำแหน่งที่ 2 หรือ 6 ใน 1,4-linked galactoside จะทำให้คาร์ราจีแนนชนิด Kappa มีคุณสมบัติแตกต่างกันไป

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

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

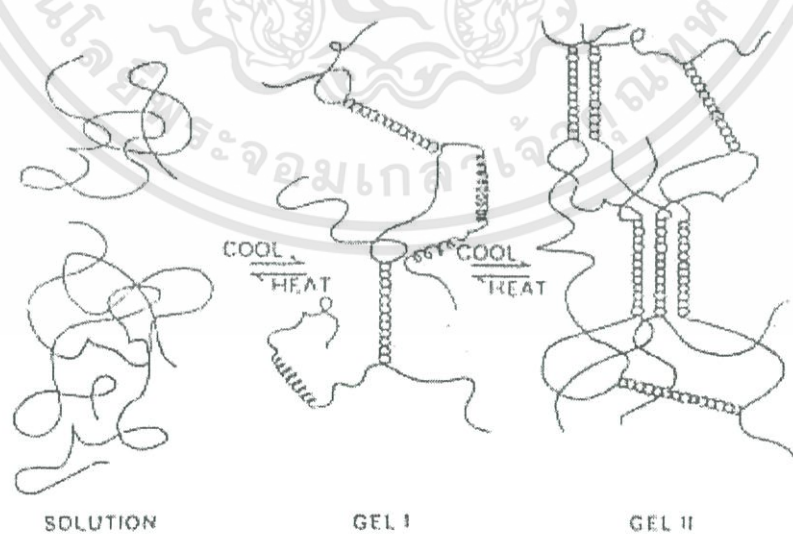


รูปที่ 2.10 หน่วยซ้ำของคาร์ราจีแนน [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายได้ในน้ำร้อน ถ้าเป็นเกลือโซเดียมของคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota จะสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ในขณะที่เกลือของไอออนชนิดอื่นๆ เช่น โพแทสเซียม หรือแคลเซียมไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Lambda จะละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ขึ้นกับชนิดของไอออน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์ราจีแนน และไอออนที่เกี่ยวข้อง ส่วนใหญ่คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota ต้องใช้อุณหภูมิในการละลายมากกว่า 70°C นอกจากนี้คาร์ราจีแนนทุกชนิดจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายใน Water miscible solvent เช่น Alcohol และ Propylene glycol

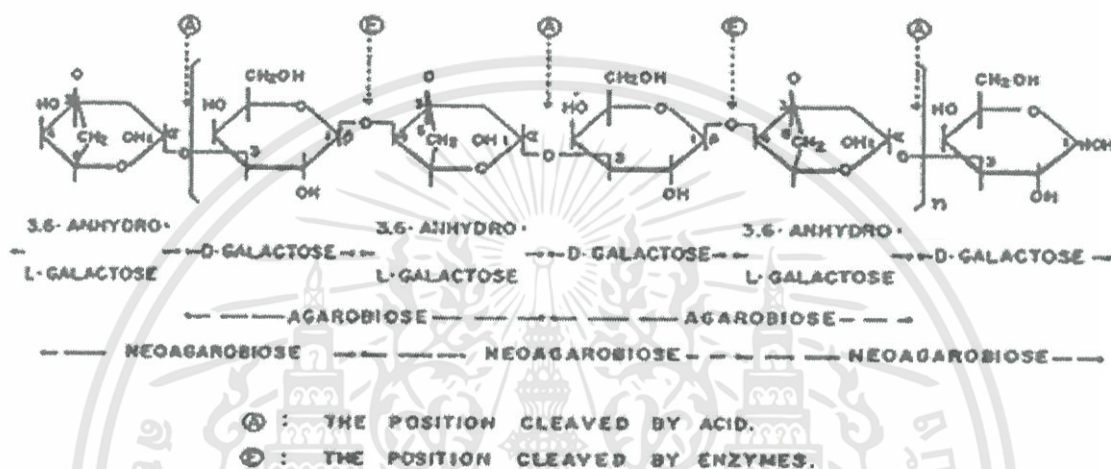
คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota มีความสามารถที่จะเกิดเจลได้ เมื่อสารละลายของคาร์ราจีแนนเย็นตัวลง ซึ่งเจลเหล่านี้จะเป็น Thermoreversible aqueous gel คือสามารถที่จะละลายเมื่อได้รับความร้อน และเกิดเจลอีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง ในปีค.ศ. 1969 Rees ได้กล่าวว่า เมื่อคาร์ราจีแนนละลายน้ำจะเกิดเจล เนื่องจากเกิดการสร้างเป็น Double helix ที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของอุณหภูมิเจล และการปั่นคววนจะสามารถทำให้ Helices คลายตัวเป็น Random coil เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดการสร้าง Polymer network 3 มิติ แต่ละสายของพอลิเมอร์จะรวมตัวกันเกิด Junction point (gel I) และเมื่อปล่อยให้เย็นลงอีก จะเกิดการเกาะกันของ Junction point (gel II) มากขึ้น ทำให้เกิดการแข็งตัวของเจลดังรูปที่ 2.11 การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น Kappa carrageenan เมื่อเติม K^+ จะเกิดอีลาสติกเจล (Elastic gel) ถ้าเติม Ca^{2+} จะเกิด Rigid gel ส่วน Iota carrageenan เมื่อเติม Ca^{2+} จะเกิดอีลาสติกเจล ถ้าผสมคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับ Iota เข้าด้วยกัน จะทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลได้มากขึ้น เจลที่ได้มีอีลาสติกเพิ่มขึ้น และเกิด Syneresis น้อยลง และนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น Dessert gels, Whipped topping และ Fluid milk products



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน [16]

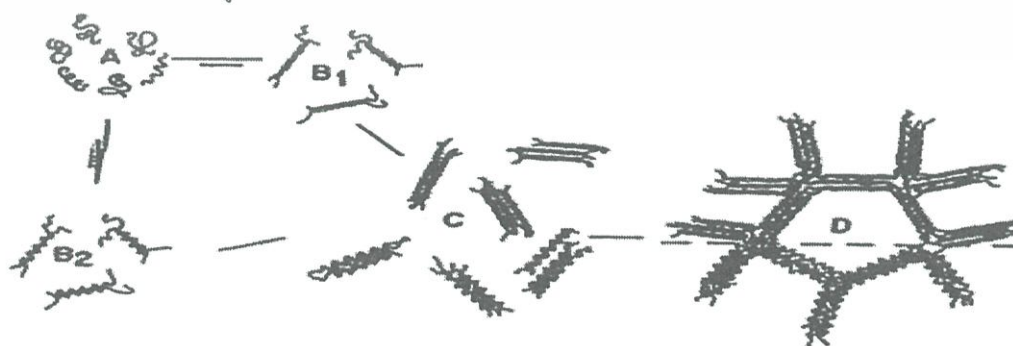
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-อะการ์ (Agar) เป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ *Gelidium cartilagineum*, *Gracilaria confervoides* และ *Pteroclaia capillacea* ซึ่งสองชนิดแรกใช้ผลิตอะการ์ทางการค้า ประเทศที่ผลิต ได้แก่ ญี่ปุ่น สเปน ชิลี และเกาหลี อะการ์ประกอบด้วยอะกาโรส (Agarose) และอะกาโรเพคติน (Agaropectin) ซึ่งอะกาโรสเป็นพอลิแซคคาไรด์ประกอบด้วย 1,4 linked 3,6-anhydro-L-galactose และ 1,3 linked b-D-galactose เรียงสลับกันไป (รูปที่ 2.12) ส่วนอะกาโรเพคตินเป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตที่มีโครงสร้างเหมือนอะกาโรสแต่ 3,6-anhydro-L-galactose บางโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยซัลเฟตประมาณ 5-8%



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของอะกาโรส [17]

อะการ์ไม่ละลายในน้ำเย็น แต่ละลายได้อย่างช้าๆ ในน้ำร้อน ซึ่งละลายได้ดีที่ความเข้มข้นไม่เกิน 4% ในน้ำเดือด ถ้าใช้ที่ความเข้มข้นสูงให้ Autoclave ที่ 120°C เพื่อช่วยในการละลายอะการ์ มีความสามารถในการดูดน้ำได้ดี ทำให้เกิดเจลได้ที่ความเข้มข้นต่ำเพียง 0.04% เกิดเจลได้ โดยไม่ต้องอาศัยสารอื่นๆ ช่วยในการเกิดเจล ซึ่งการเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า Physical gels โดยเมื่อโมเลกุลของอะกาโรสละลายอยู่ในน้ำจะมีลักษณะเป็น Random coil และเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิเกิดเจล จะเกิดการจับกันของสายพอลิเมอร์เป็นแบบ B1 (Antisymmetric double helices) หรือ B2 (Symmetric double helices) และจะได้โครงสร้างลักษณะเป็นแบบ C, D (ส่วนบน) หรือ C,D (ส่วนล่าง) ตามลำดับดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กลไกการเกิดเจลของอะกาโรส [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่จะเกิดรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าลดลงเร็วจะได้โครงสร้างเป็นแบบรูป B1 และ C, D (ส่วนบน) และเจลที่ได้สมบัติเป็น Thermoreversible gel โดยทั่วไปอุณหภูมิเกิดเจลประมาณ 35-40°C และมีจุดหลอมเหลวอยู่ในช่วง 85-90°C เจลที่ได้มีลักษณะเนื้อแข็งขุ่นสีเหลืองอ่อนเปราะแตกได้ง่าย (Brittle) เนื้อสัมผัสเป็นแบบ Juiciness และ Crunchy และเกิด syneresis การเติมน้ำตาล หรือเดกซ์ตริน หรือผสมกับ Locust bean gum จะทำให้เจลที่เกิดขึ้นมี Gel strength และความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ลดการเกิด Syneresis แต่ถ้าเติมแป้ง หรือ โซเดียมอัลจิเนตจะทำให้ผลตรงกันข้าม คือทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแรงลดลง เจลที่เกิดจากอะการ์จะทนความร้อน เพราะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจล และจุดหลอมเหลวของเจลมีช่วงห่างกันมาก

การใช้อะการ์ในอุตสาหกรรมต่างๆมีดังนี้

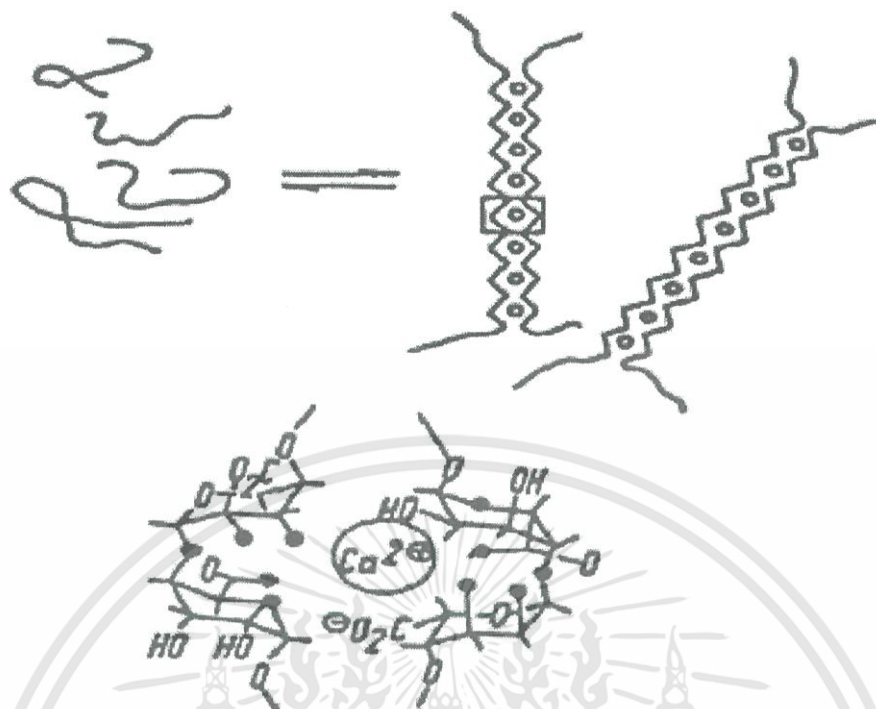
- Bakery Industry ใช้อะการ์เพื่อแก้ปัญหาการหลอมตัวของน้ำตาลที่เคลือบ (Icing) การเกาะติดของ Icing กับวัสดุหุ้มลดการแตกหัก และหลุดร่วงของ Icing
- Confectioneries เช่น ใช้ใน Jelly candies, Meringues และ Pudding
- Meat and fish product เช่น Canned tuna injelly หรือผสมใน Fish extract ผง เพื่อใช้เตรียม Flavor และผลิต Soup
- Vegetarian and health products ใช้เป็น Bulking agent แทนแป้ง
- ใช้ทางเภสัชศาสตร์จะใช้เป็น Slow release ingredient เพราะอะการ์ไม่สามารถย่อยในร่างกายมนุษย์ได้ เนื่องจากไม่มีเอนไซม์
- ใช้เป็น Tissue culture media ในการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ

- เพอเซลลาเรน (Furcellaran) เพอเซลลาเรนหรือที่เรียกกันว่า Danish agar เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟตชนิดหนึ่งที่ได้สกัดได้จากสาหร่ายสีแดง (Furcellaria fastigiata) ซึ่งพบมากในประเทศเดนมาร์ก โครงสร้างประกอบด้วย D-galactose-2-sulfate, D-galactose-4-sulfate ประมาณ 16-20% และ 3,6-anhydro-D-galactose-2-sulfate ประมาณ 30-33% ลักษณะโมเลกุลจะเป็นแบบมีกิ่งก้านแขนง (Branch) ที่ตำแหน่ง C3 และ C6 เพอเซลลาเรนมีโครงสร้างคล้ายคาร์ราจีแนนแต่แตกต่างกันที่ปริมาณซัลเฟต คือเพอเซลลาเรนมี 1 Sulfate group ต่อ 3-4 หน่วยซ้ำของกาแลกโตสส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Kappa มี 1 Sulfate group ต่อ 2 หน่วยซ้ำของกาแลกโตส

เพอเซลลาเรนสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้หลายประเภท ได้แก่

- นำมาเติมในนํ้านมสำหรับทำพุดดิ้งเพื่อทำให้เกิดเจลได้ดี
- สามารถใช้ทำแยมผิวส้ม (Marmalade) ได้ดีกว่าเพคติน เพราะเกิดเจลได้เร็วแม้จะมีปริมาณน้ำตาลต่ำกว่า 50-60% และยังใช้ปริมาณเพอเซลลาเรนเพียง 0.2-0.5% เพื่อให้เกิดเจล
- ใช้เติมในเบียร์ เพื่อตกตะกอนโปรตีนทำให้เบียร์ใสขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 กลไกการเกิดเจลของแคลเซียมอัลจิเนต (Egg-box model) [19]

อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปีค.ศ. 1920 โดยเติมในอาหารกระป๋องบางชนิด ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด, สารเพิ่มความคงตัว, ทำให้มีล้นคงตัว, สารทำให้เกิดเจล และสารยับยั้งการเกิด syneresis ตัวอย่างเช่น

- Propylene glycol alginate ใช้ในน้ำสลัด (Salad dressing) และเบียร์ เพราะมีความสามารถละลายได้ดีสูงที่ pH ต่ำ
- โซเดียมอัลจิเนตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายมะนาวที่แช่เย็น เพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่าง Freeze thaw
- ใช้เคลือบผิวชิ้นเนื้อปลา ก่อนนำไปแช่เยือกแข็ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Freeze burn กับชิ้นเนื้อปลา
- ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม, Frozen dessert, Sherbet, Processed cheese และใช้เป็น Alginate gel restructured products เช่น Onion rings และ Shrimp-like fish products

2.3.2 Plant extracts

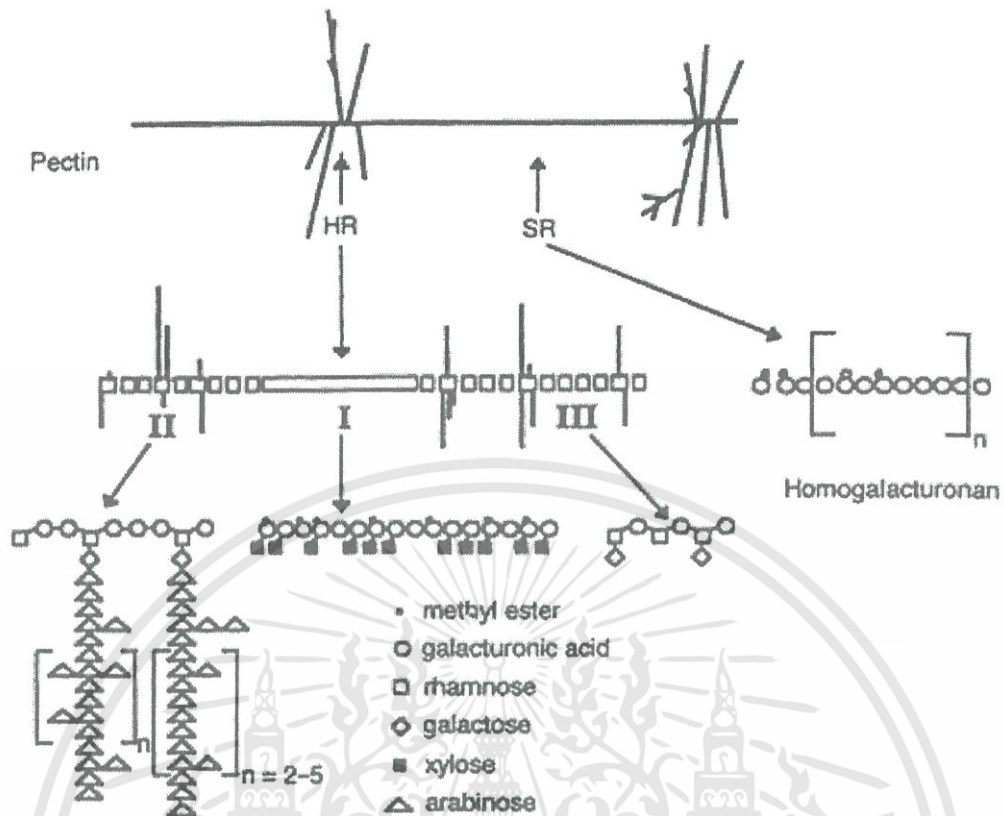
สารสกัดที่ได้จากพืช และเป็นไฮโดรคอลลอยด์ที่สำคัญ คือ เพคติน (Pectin) สกัดได้จากผลไม้ตระกูลส้ม และเพคตินยังพบเป็นส่วนประกอบในเนื้อผลไม้บางชนิด เช่น แอปเปิ้ล ฝรั่ง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

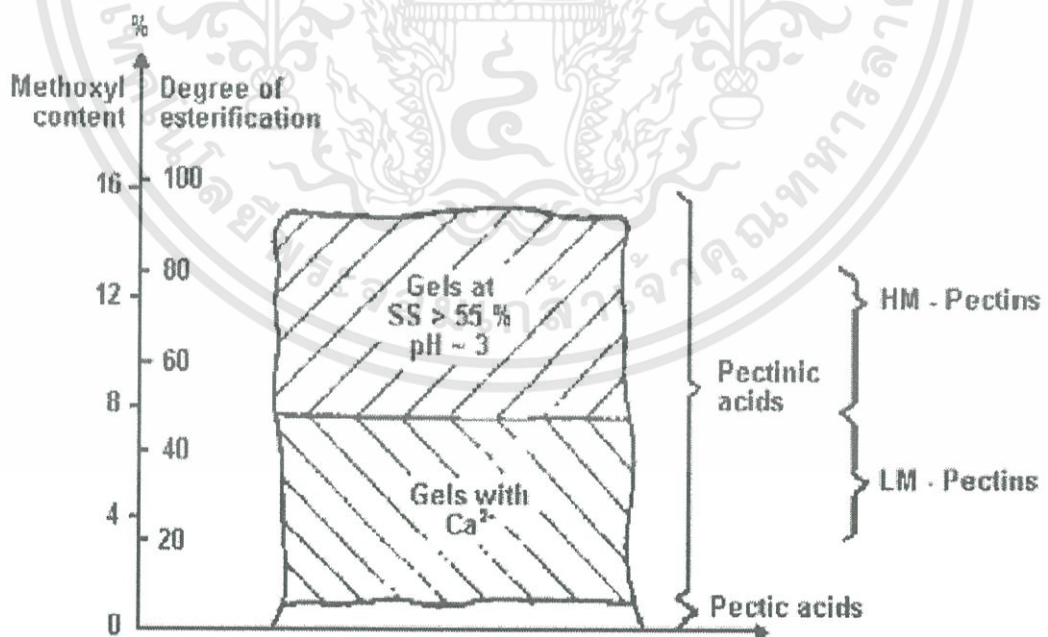
- เพคติน (Pectin) ได้จากการ breakdown ของ Protopectin ที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อพืชประกอบไปด้วย neutral sugars หลายชนิด เช่น แรมโนส (Rhamnose), กาแลคโตส (Galactose), อะราบิโนส (Arabinose) และน้ำตาลอื่นๆจำนวนเล็กน้อย เพคตินเป็น Heteropolysaccharide ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วยพอลิเมอร์ของ D-galacturonic acid (ประมาณ 65% โดยน้ำหนัก) เป็นสายหลัก หรือที่เรียกว่า smooth regions และมีกิ่งแขนง (Hair regions) อาจเป็นอะราบิโนส, กาแลคโตส, แรมโนส และบางส่วนของหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) ที่ D-galacturonic acid จะถูกเอสเทอร์ไฟด์ด้วยหมู่เมทิล (-CH₃) เป็นเมทิลเอสเทอร์ และมี Degree of methylation (DM) แตกต่างกันไป จึงทำให้เพคตินจากวัตถุดิบแต่ละแหล่งมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน และเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนมาก แสดงดังรูปที่ 2.16 DM คืออัตราส่วนของหมู่ Methylated galacturonic acid ต่อหมู่ Galacturonic acid ทั้งหมดที่มีอยู่ในโมเลกุลของเพคติน จึงทำให้แบ่งประเภทของเพคตินตามค่า DM ได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิด Low methoxyl (LM) ซึ่งมีค่า DM น้อยกว่า 50% และชนิด High methoxyl (HM) ซึ่งมีค่า DM มากกว่า 50% (รูปที่ 2.17) เพคตินที่สกัดได้จากธรรมชาติจะเป็นชนิด HM ที่มีค่า DM สูงถึง 75% เมื่อนำมาทำให้เกิดปฏิกิริยา De-esterification จะได้เพคตินชนิด LM เพคตินทั้งชนิด LM และ HM จะมีสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกัน เพคตินชนิด LM สามารถเกิดเจลโดยมีปริมาณของ Ca²⁺ และมีของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดตั้งแต่ 10-80% ที่ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 2.9-5.5 เจลที่ได้จะเป็นชนิด Thermoreversible ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลจะมีความอ่อนนุ่ม และยืดหยุ่นมากกว่าเจลที่ได้จากเพคตินชนิด HM หรืออะการ์ (รูปที่ 2.18) เพคตินชนิด HM ใช้กับอาหารที่มี pH 2.0-3.5 และต้องมีของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมากกว่า 55% ถึงจะเกิดเจลได้ เพคตินชนิดนี้ยังแบ่งย่อยออกเป็นอีก 3 ชนิดตาม Gelling time คือเกิดเจลได้ช้า (Slow set) ปานกลาง (Medium set) และรวดเร็ว (Rapid set) ซึ่งจะแตกต่างกันที่ค่า DM เช่น ชนิดเกิดเจลได้ช้าจะมีค่า DM ประมาณ 60% และชนิดเกิดเจลได้เร็วมีค่า DM ประมาณ 75% การนำเพคตินมาใช้ประโยชน์จึงขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ และชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร เพคตินนิยมใช้ในอาหารประเภท Jam, Jelly, Bakery filling, fruit topping, เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อคล้ายเยลลี่ เช่น

- การเติมเพคตินชนิด LM จำนวนเล็กน้อยลงในโยเกิร์ต จะช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อของโยเกิร์ตให้ดีขึ้น
- สำหรับน้ำผลไม้เข้มข้นจะเติมเพคตินชนิด HM เพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวให้กับอนุภาคของเนื้อผลไม้ ทำให้อนุภาคกระจายตัวแขวนลอยอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอน
- ในน้ำผลไม้ผงสำเร็จรูปจะมีการเติมเพคตินชนิด HM ลงไปเพื่อให้เกิดความรู้สึกเหมือนน้ำผลไม้ธรรมชาติขณะดื่ม
- ในผลิตภัณฑ์ bakery เช่น jam ที่นำมาเติมใน tart จะให้ลักษณะผิวเรียบเป็นเงาหลังจากอบแล้ว และทนต่อการอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

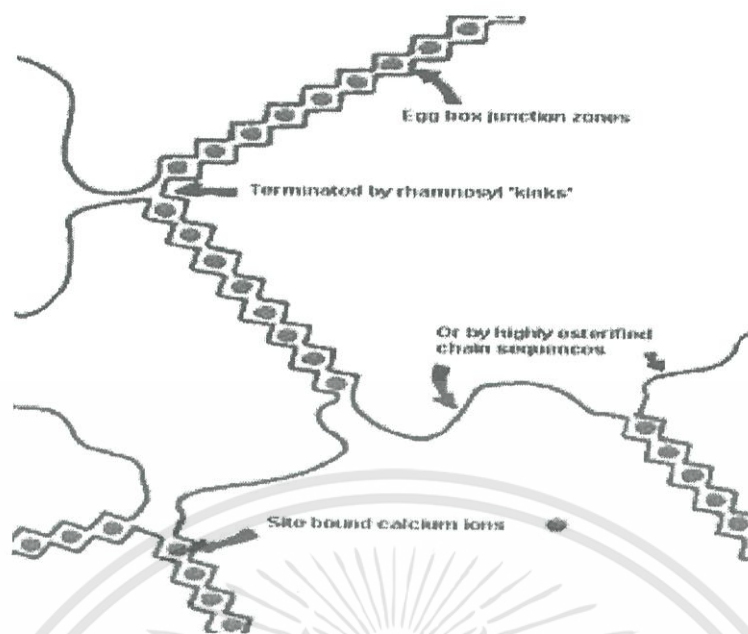


รูปที่ 2.16 Hypothetical structure of apple pectin showing I xylogalacturona, II region with arabinan side chain and III rhamnogalacturonan region making up the “hairy region” [14]



รูปที่ 2.17 ชนิดและสมบัติของเพคติน [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



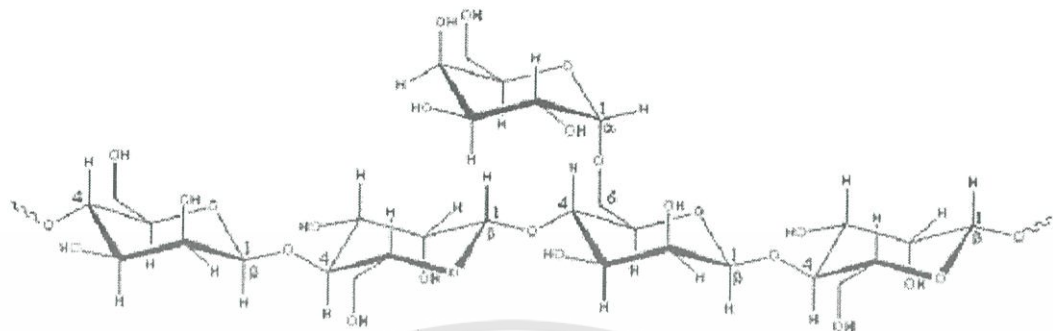
รูปที่ 2.18 กลไกการเกิดเจลของเพคตินชนิด LM [14]

2.3.3 Plant seed gums

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

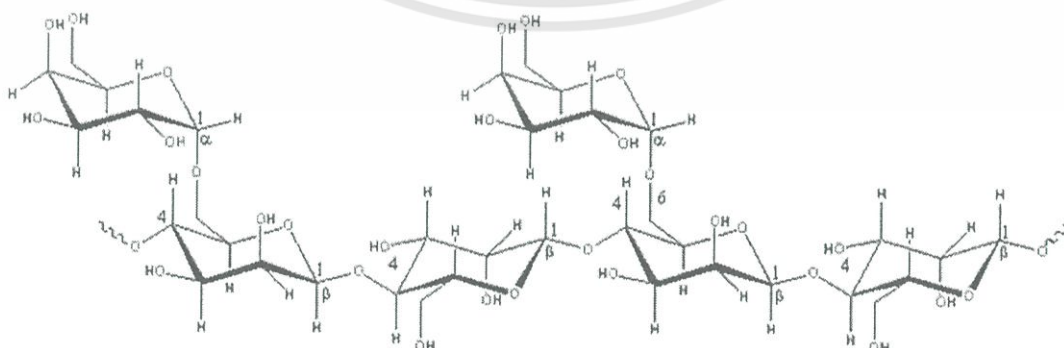
-Locust bean gum ได้จากเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) ของเมล็ดต้น Carob (*Ceratonia siliqua*) บางครั้งเรียกว่า Carob seed gum ต้น Carob เป็นพืชที่ปลูกในแถบเมดิเตอร์เรเนียน โมร็อกโก และโปรตุเกส Locust bean gum ไม่สามารถละลายในน้ำเย็นต้องใช้ความร้อนช่วยในการละลาย จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูงที่สุด เมื่อรับความร้อนสูงถึง 95°C หลังจากนั้นจึงทำให้เย็นลง ปัจจุบันได้มีการพัฒนา Locust bean gum ให้มีสมบัติของตัวได้ในน้ำเย็น และนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์นมโครงสร้างของ Locust bean gum เป็นพอลิเมอร์สายยาวของแมนโนสที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของกาแลคโตสต่อกันด้วยพันธะ 1,6 อัตราส่วนของแมนโนสต่อกาแลคโตสเป็น 4:1 ดังรูปที่ 2.19 โดยลักษณะโครงสร้างนี้จึงทำให้โมเลกุลมีส่วนที่เป็นสายหลักของแมนโนสที่เรียกว่า smooth สลับกับส่วนที่เป็นกิ่งแขนง Locust bean gum ไม่สามารถเกิดเจลได้ ต้องนำมาผสมกับ Xanthan gum จึงจะทำให้เกิดเจลได้ หรืออาจผสมรวมกับ Kappa carrageenan จะช่วยเพิ่ม Gel strength และลดการเกิด Syneresis หน้าที่หลักของ Locust bean gum คือเพิ่มความหนืดและความคงตัวให้กับอิมัลชัน และช่วยป้องกันการเกิด Syneresis ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ได้แก่ อาหารกระป๋องซอสขนมหวานเนยแข็ง ไอศกรีม และผลิตภัณฑ์เนื้อในเนยแข็ง Locust bean gum ช่วยเร่งให้เกิด Coagulation เร็วขึ้น และทำให้ได้เนื้อตะกอนของ Curd เพิ่มมากขึ้นประมาณ 10% ใน ไอศกรีม Locust bean gum จะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัว และช่วยอุ้มน้ำ ทำให้ไอศกรีม

มีลักษณะเนื้อเนียน นอกจากนี้ยังใช้เป็น Mould สำหรับผลิต Gum drops หรือ Jelly candies และใช้เป็น Body agent สำหรับเครื่องดื่มคนเป็นโรคเบาหวาน



รูปที่ 2.19 โครงสร้างโมเลกุลของ Locust bean gum [20]

-กัวร์กัม (Guar gum) ได้จากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดต้น Guar (*Cyamopsis tetragonolobus*) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดีย และปากีสถาน ปัจจุบันมีการปลูกในรัฐเท็กซัสสหรัฐอเมริกา โครงสร้างของกัวร์กัมเป็นพอลิเมอร์สายยาวของแมนโนสที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของกาแลคโตส โดยทุกๆ 2 โมเลกุลของแมนโนสต่อกับ 1 โมเลกุลของกาแลคโตสด้วยพันธะ 1,6 ทำให้อัตราส่วนของแมนโนสต่อกาแลคโตสเป็น 2:1 ซึ่งแสดงว่า กัวร์กัมมีกิ่งแขนงของกาแลคโตสมากกว่า Locust bean gum (รูปที่ 2.20) กัวร์กัมมีสมบัติเป็น non-gelling แต่กระจายตัวและอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด, เพิ่มความคงตัว และอุ้มน้ำ สามารถเกิดอันตรกิริยากับ Xanthan gum ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายกัวร์กัมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH เวลาความเข้มข้น และขนาดของอนุภาคกัวร์กัมเป็น Non-ionic และทนต่อ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-10 ทำให้สามารถเติมอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่า 5% จะมีผลต่อการอุ้มน้ำ และการเกิดเจลกัวร์กัมมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0 ผลิตภัณฑ์อาหารที่นำกัวร์กัมไปใช้ ได้แก่ ขนมหวาน, ซอส, ซุป, ไอศกรีม, น้ำสลัด, ซุปผง และใช้เป็นส่วนผสมของน้ำเกรวี่



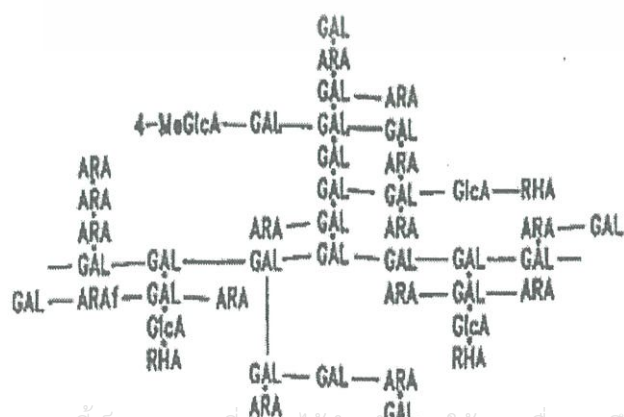
รูปที่ 2.20 โครงสร้างโมเลกุลของกัวร์กัม [20]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 Plant exudate gums

กลุ่มของกัมที่ได้จากยางต้นไม้มีลักษณะเป็น dried resins ซึ่งจะไหลออกมาเมื่อต้นไม้มีบาดแผล กัมในกลุ่มนี้ ได้แก่ Gum arabic, Gum ghatti, Gum karaya และ Gum tragacath

-กัมอะราบิก (Gum arabic) หรือ Gum acacia เป็นกัมที่ได้จากต้น Acacia Senegal และ Acacia seyal ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อน และมีไนโตรเจนจำนวนเล็กน้อย องค์ประกอบทางเคมีจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามแหล่งที่มา, ภูมิอากาศ, ฤดูกาล และอายุของต้น ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีพื้นฐานที่อยู่ในโมเลกุล ประกอบด้วยน้ำตาล และอนุพันธ์ของน้ำตาล คือ กาแลกโตส (44%), อะรา-ปิโนส (24%), Glucuronic acid (14.5%), แรมโนส (13%) และ 4-O-methylglucuronic acid (1.5%) กัมจาก Acacia seyal จะมีปริมาณแรมโนส และ Glucuronic acid ต่ำกว่า Acacia Senegal แต่มีปริมาณอะราปิโนส และ 4-O-methylglucuronic acid สูงกว่า กัมอะราบิกเป็น Heteropolysaccharide ที่มีโครงสร้างซับซ้อนมีกิ่งแขนงดังโครงสร้างในรูปที่ 2.21 นอกจากนี้โมเลกุลยังประกอบด้วย กรดอะมิโน ได้แก่ hydroxyproline และ serine กัมอะราบิกละลายได้ในน้ำ และให้สารละลายใสที่มีสีตั้งแต่เหลืองอ่อนจนถึงน้ำตาลส้ม แต่กัมที่ได้จาก Acacia Senegal มีโครงสร้างที่เป็นกิ่งแขนงมาก และโมเลกุลอัดกันแน่น จึงได้สารละลายที่ข้นหนืดที่ความเข้มข้นสูง สามารถละลายได้ที่ความเข้มข้นสูงถึง 55% และสารละลายที่ได้มีความหนืดต่ำ จึงทำให้กัมอะราบิกมีสมบัติที่แตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ชนิดอื่น ซึ่งสามารถละลายได้สูงสุดเพียง 5% เท่านั้น เนื่องจากสารละลายที่ได้มีความหนืดสูงกัมอะราบิกถูกนำมาใช้มากที่สุดในกลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากพืช เพราะละลายได้ดีในน้ำ และทนต่อ pH ส่วนใหญ่กัมอะราบิกจะนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภท Confectionery เช่น Marshmallows และ Toffees เพราะทำหน้าที่ขบยั้งการตกผลึกของน้ำตาล และช่วยให้เกิดอิมัลชันได้ดีในอุตสาหกรรมการผลิตสารที่ให้กลิ่นจะใช้ Gum arabic เป็น Fixative เพราะขณะทำการพ่นสารที่ให้กลิ่นลงบนผลิตภัณฑ์อาหาร กัมอะราบิกจะช่วยเคลือบผิวของผลิตภัณฑ์อาหารทำให้สารที่ให้กลิ่นติดอยู่บนผิวของอาหาร ช่วยป้องกันการเกิดออกซิเดชัน และการระเหยของสารที่ให้กลิ่นออกไปจากอาหาร และยังใช้เป็น Flavor encapsulating agent เพื่อนำไปใช้ในพวกผลิตภัณฑ์แบบผง เช่น กัมอะราบิกช่วยทำให้ฟองเบียร์คงตัวเป็นอิมัลชันไฟเออร์ และ Stabilizer ให้กับเครื่องดื่มที่อยู่ในรูปของอิมัลชันด้วย



GAL = Galactose ARA = Arabinose

GlcA = Glucuronic acid RHA = Rhamnose

4-MeGlcA = 4-O-methylglucuronic acid

รูปที่ 2.21 โครงสร้างโมเลกุลของกัมอะราบิก [14]

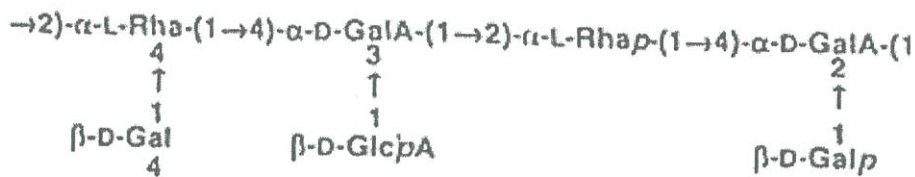
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Gum ghatti ได้จากพืชตระกูล Camgreleacee คือต้น *Anogeissus latifolia* พบมากในประเทศอินเดียบางครั้งเรียกว่า Indian gum หรือ Havda ลักษณะยางที่ได้มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม และเป็นพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อนในธรรมชาติจะอยู่ในรูปเกลือของ Ca, Mg, K และ Na แต่เมื่อนำมาไฮโดรไลซ์ พบว่าประกอบไปด้วยอะราบิโนส, กาแลกโตส, แมนโนส, ไซโลส และ Glucuronic acid ในสัดส่วนโดยโมลเป็น 10:6:2:1:2 และมี 6-deoxyhexose จำนวนเล็กน้อย Gum ghatti ไม่สามารถละลายในน้ำได้ แต่สามารถกระจายตัวได้ในน้ำ และให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่ไม่สามารถเกิดเป็นเจลได้ แต่ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 5% จะให้สารละลายที่มีความข้นหนืด มีความหนืดสูงสุดที่ pH 5-7 ที่ความเข้มข้นเดียวกัน ความหนืดจะอยู่ระหว่างความหนืดของ Gum Arabic และ Gum karaya นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีกว่ากัมอะราบิก แต่ยากต่อการใช้งานเพราะสารละลายของ Gum ghatti จะไวต่อค่ากระจายตัวที่ pH 4.8 และให้ความหนืดสูงสุดที่ pH 8 และถ้า pH สูงกว่านี้ จะให้ลักษณะที่เหนียว (stringy) Gum ghatti เป็นสารเพิ่มความคงตัวสาร เพิ่มความหนืด และช่วยอุ้มน้ำ จึงนิยมใช้ร่วมกับเลซิดินในการทำแพนเค้กที่มีเนยผสม และในการทำ Waffle syrup Gum ghatti จะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะใส นอกจากนี้ยังใช้ประโยชน์ในทางเภสัชศาสตร์ คือใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ให้กับวิตามินที่ละลายในน้ำมัน ใช้เป็นวัตถุคิบในการผลิตอะราบิโนสโดยการ Hydrolysis เป็น Binder ในอุตสาหกรรมกระดาษ และ Drilling mud conditioner ในการขุดเจาะบ่อน้ำมัน

- Gum karaya เป็นยางแห้งที่ได้จากต้น *Sterculia urens* ซึ่งปลูกมากบริเวณตอนเหนือ และตอนกลางของประเทศอินเดีย หรือจาก *S. setigera* ซึ่งพบแถวชูดาน และบางประเทศทางแอฟริกาเหนือ Gum karaya เป็น branched, partially acetylated polysaccharide มีน้ำหนักโมเลกุลสูงในโมเลกุลประกอบด้วย D-gulacturonic acid, D-galactose และ L-rhamnose ต่อกันเป็นสายหลักและมีกิ่งแขนงเป็น D-glucuronic acid มีหมู่ uronic acid ประมาณ 35-40% และมีหมู่ acetyl อยู่ประมาณ 10-14% (รูปที่ 2.22) ในทางการค้า Gum karaya ประกอบด้วย D-gulacturonic acid 30-43%, D-galactose 13-26% และ L-rhamnose 15-30% นอกจากนี้ยังพบไอออนของโลหะ Ca และ Mg เชื่อมต่อกับ Uronic acid Gum karaya เป็นกัมที่มีแรมโนสสูงกว่ากัมชนิดอื่นๆ ที่ได้จาก Plant exudate ละลายน้ำได้น้อย เนื่องจากหมู่ Acetyl ในโครงสร้างทำให้สารละลายน้ำไม่สมบูรณ์ แต่ให้สารละลายที่ใส โดยการคูดน้ำอย่างรวดเร็ว และให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีความหนืดที่ความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 0.02% ในน้ำเย็นและ 0.06% ในน้ำร้อน) เมื่อทำเป็นผงละเอียดจะเป็นตัวคูดน้ำ และอุ้มน้ำที่ดี และเมื่อกระจายตัวอยู่ในน้ำจะพองตัวได้ 60-100 เท่าของปริมาตรเดิม สารละลายที่มีความหนืดสูงความหนืดของสารละลายจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น เมื่อใช้ในปริมาณมากจึงมีสมบัติเป็น Strong adhesiveness ทำให้ได้สารละลายคอลลอยด์ที่มีความหนืดสูง ดังนั้นสมบัติของสารละลาย Gum karaya จึงขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคการกระจายตัวของอนุภาคในน้ำเย็นจะให้ความหนืดสูงกว่าในน้ำร้อน Gum karaya ทนต่อความเป็นกรดได้สูง เพราะในโมเลกุลมี Uronic acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สูง และยังทนต่อการ Hydrolysis ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Hydrochloric acid สูงถึง 10% ที่อุณหภูมิห้องนานอย่างน้อย 8 ชั่วโมง



รูปที่ 2.22 Structure of gum karaya (*Sterculia urens*) [21]

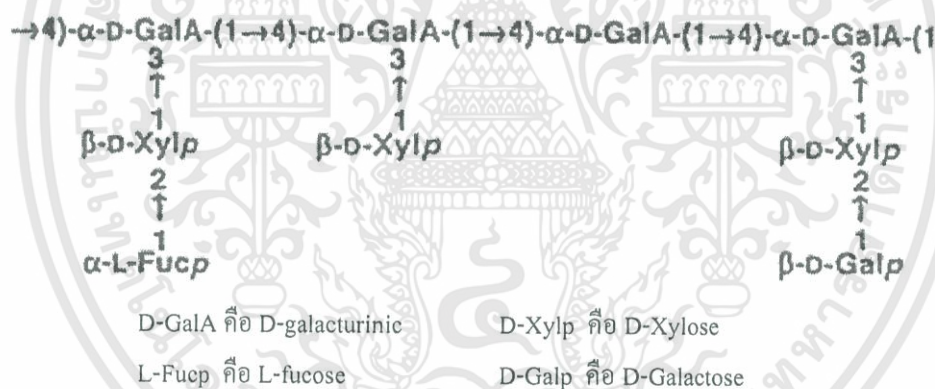
Gum karaya เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับ Whipping cream และ Meringues เนื่องจากมีสมบัติในการอุ้มน้ำที่ดี ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ในผลิตภัณฑ์น้ำสลัดต่างๆ เช่น Salad dressing และ French dressing นอกจากนี้ยังใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีม เช่น Sherbets หรือ Fruit ice จะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่เกินไป และป้องกันการสูญเสีย น้ำ เนื่องจากเกิด Syneresis ในผลิตภัณฑ์เนือบด เช่น Bologna จะใช้ Gum karaya เป็นตัวช่วยอุ้มน้ำทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเนื้อเนียน และยังใช้ในอุตสาหกรรมผลิต Cheese spread ด้วยเพื่อให้เนยแข็งที่ได้มี Spreadability ที่ดี นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น

- อุตสาหกรรมยา เช่น ใช้เป็น Adhesive สำหรับ Stoma seal หลังจากผ่าตัด หรือ เป็น Dental fixatives
- อุตสาหกรรมกระดาษ เช่น ใช้เป็น Binder เพื่อทำให้ช่วยในการ Binding ของเส้นใยใน lightweight paper
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น ใช้เป็น Thickener ในสีย้อมผ้าพิมพ์

-Gum tragacanth เป็นยางที่ได้จากคั้น *Astragalus microcephalus*, *Astragalus gummifer* และ *Astragalus kurdicus* พบมากบริเวณกึ่งทะเลทราย และบนภูเขาของประเทศอิหร่าน ซีเรีย และตุรกี ยางที่ได้เป็นของเหลวข้นเหนียว Gum tragacanth ประกอบด้วยมอนอแซคคาไรด์หลายๆชนิดผสมกัน ได้แก่ D-galacturonic acid, D-galactose, L-fucose, D-xylose, L-arabinose และ L-rhamnose ในโมเลกุลของ Gum tragacanth ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนแรกเรียกว่า Tragacanthic acid หรือ Bassorin มีอยู่ประมาณ 60-70% เป็นพอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ละลายในน้ำ แต่พองตัวกลายเป็นเจลอีกส่วนที่มีปริมาณน้อยเรียกว่า Tragacanthin เป็นสารประกอบพอลิแซคคาไรด์เชิงซ้อนเป็น ส่วนที่ละลายในน้ำกระจายตัวให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์ ส่วนของ Tragacanthic acid ซึ่งเป็นส่วนกรดที่ประกอบด้วย D-xylose, L-fucose, D-galacturinic acid, D-galactose และมี L-rhamnose จำนวนเล็กน้อย และส่วนนี้จะเกาะอยู่กับโลหะไอออน คือ Mg, Ca และ K สมบัติของ Gum tragacanth จะขึ้นกับส่วนนี้ เพราะเป็นองค์ประกอบหลักเป็นส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมีรูปร่างของโมเลกุลเป็นแท่ง (Rod like) บางส่วนของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งสายหลักจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วย D-galacturinic acid ต่อกันด้วยพันธะ (1,4) และมีกิ่งแขนงสั้นๆของ D-xylose ต่อกับสายหลักด้วยพันธะ (1,3) และอาจจะมี L-fucose และ D-galactose ต่อกับกิ่งแขนงอีกด้วย อีกส่วนที่มีปริมาณน้อยที่เรียกว่า Tragacanthin เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนของ Arabinogalactan ที่ในโมเลกุลมีกิ่งก้านมากรูปร่างของโมเลกุลเป็นทรงกลม (Spheroidal) ตรงกลางโมเลกุลจะประกอบไปด้วย D-galactose และมี L-arabinose เป็นกิ่งก้านแขนงที่ต่อจาก D-galactose สารละลาย Gum tragacanth มีความหนืดมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากพืชทั้งหมดมีลักษณะเนื้อคล้าย Soft gel Gum tragacanth ละลายได้ในน้ำเย็นมีความคงตัวต่อความร้อนและทนกรดได้เป็นอย่างดีจนถึง pH 2 นิยมใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับน้ำสลัดมายองเนส และซอส เพราะผลิตภัณฑ์อาหารเหล่านี้มีลักษณะเนื้อเป็นครีมจึงต้องการความคงตัวสูง ส่วนเครื่องเทศที่ใช้ปรุงรส เช่น มัสตาร์ดเหลว และซอสมะเขือเทศ จะใช้ Gum tragacanth เป็นสารเพิ่มความคงตัวและเพิ่มความหนืดส่วนผลิตภัณฑ์ผลไม้ที่ใช้เป็น Fillinging หรือ Topping จะเติม Gum tragacanth เพื่อให้มีลักษณะเนื้อข้นเป็นเจมัมเหมือนธรรมชาติ และขึ้นผลไม้กระจายตัวอยู่ได้โดยไม่แยกออกจากส่วนที่เป็นของเหลว นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไอศกรีม ทำให้ไอศกรีมมีลักษณะเนื้อเนียน และมีความคงตัวดี



รูปที่ 2.23 Partial structure of tragacanthic acid [21]

2.3.5 Animal-derived

- ไคติน (Chitin) เป็นพอลิเมอร์สายยาวที่ประกอบด้วย น้ำตาลหน่วยย่อย คือ N-acetyl-D-glucosamine มาเรียงต่อกันเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น เปลือกหอย ปู กุ้ง เปลือกของแมลง ผนังเซลล์ของสาหร่าย ยีสต์ และเห็ดรา ก็พบว่ามีไคตินเป็นองค์ประกอบด้วยเช่นกัน และมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับเซลลูโลสมากเพียงแต่แตกต่างกัน ในส่วนของหมู่ OH ที่ตำแหน่ง C2 ในโมเลกุลของไคตินจะเป็นหมู่ Acetylamino แทนดังรูป 2.24 ไคตินที่ได้จากแต่ละแหล่งมีโครงสร้าง และสมบัติแตกต่างกัน โดยแบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของพอลิเมอร์ได้เป็น 3 กลุ่มคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบบอัลฟามีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะสวนทางกันมีความแข็งแรงสูง ได้แก่ ไคตินจากเปลือกกุ้งและกระดองปู
- แบบเบตามีการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในทิศทางเดียวกันจึงจับกันได้ไม่ถ้อยแข็งแรงมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีมากกว่าแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากแกนปลาหมึก
- แบบแกมมาการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลในลักษณะที่ไม่แน่นอน (สวนทางกันสลับทิศทางเดียวกัน) มีความแข็งแรงรองจากแบบอัลฟา ได้แก่ ไคตินจากเห็ดราและพืชชั้นต่ำ

-ไคโตซาน (Chitosan) คืออนุพันธ์ของไคตินที่ตัดเอาหมู่ acetyl ของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine ออกเรียกว่า Deacetylation คือเปลี่ยนน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine เป็น glucosamine ที่ไม่เสถียร (Unstable) มีความเป็นขั้วสูง (Strong positive polarity) จึงทำให้ไคโตซานมีสมบัติพิเศษพร้อมจะทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว และยังมีคุณสมบัติละลายได้ในกรดอินทรีย์ที่มีความเข้มข้น 2-3% ปกติแล้วไคโตซานที่ได้จะมีส่วนผสมของน้ำตาล N-acetyl-D-glucosamine และ Glucosamine อยู่ในสายพอลิเมอร์เดียวกัน ซึ่งระดับการกำจัดหมู่ Acetyl (หรือ%การเกิด deacetylation) นี้มีผลต่อสมบัติและการทำงานของไคโตซาน นอกจากนี้ น้ำหนักโมเลกุลก็มีความหนืด เช่น ไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีสายยาว และสารละลายมีความหนืดมากกว่าไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เป็นต้น ดังนั้นการนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์จะต้องพิจารณาทั้ง % การเกิด Deacetylation และน้ำหนักโมเลกุล

การใช้ประโยชน์จากไคตินและไคโตซาน

ไคติน-ไคโตซาน สามารถทำหน้าที่เป็นตัวสร้างตะกอน และตัวตกตะกอน โดยตัวสร้างตะกอนจะกระตุ้นให้เศษของเสียที่แขวนลอยในน้ำเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้นๆ และเมื่อใหญ่มากพอก็จะตกเป็นตะกอนลงมา ส่วนตัวตกตะกอนจะทำงานคล้ายๆกัน คือจะไปจับกับสารแขวนลอยในน้ำแล้วตกตะกอนลงมา ไคโตซานจะทำหน้าที่ทั้งสองแบบได้ดี เนื่องจากมีหมู่อะมิโนที่สามารถแตกตัวให้ประจุบวกมาก จึงทำให้พวกประจุลบอย่างโปรตีน สีย้อมกรด ไซมันอิสรคอคอสเตอรอล (ในร่างกาย) เข้ามาเกาะกับประจุบวกของไคโตซาน ส่วนโลหะหนักซึ่งเป็นประจุบวกอยู่แล้วจะจับกับอิเล็กตรอนจากไนโตรเจนในหมู่อะมิโนของไคโตซาน ทำให้เกิดพันธะเคมีที่เรียกว่า “พันธะเชิงซ้อน” ขึ้นมา และจากการทดลองพบว่า หมู่อะมิโนในไคโตซานจะสามารถจับกับโลหะหนักในน้ำได้ดีกว่าหมู่อะซิทธิลของไคติน-ไคโตซาน จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆดังนี้

- อุตสาหกรรมอาหาร ไคโตซานมีสมบัติในการต่อต้านจุลินทรีย์ และเชื้อราบางชนิดโดยมีกลไก คือไคโตซานมีประจุบวก สามารถจับกับเซลล์เมมเบรนของจุลินทรีย์ที่มีประจุลบได้ ทำให้เกิดการจับกันของโปรตีน และสารอื่นของเซลล์ในหลายประเทศได้ขึ้นทะเบียนไคติน และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไคโตซานให้เป็นสารที่ใส่เติมในอาหารได้ โดยนำไปใช้เป็นสารกันบูด สารช่วยรักษากลิ่นรส และสารให้ความข้น ใช้เป็นสารเคลือบอาหารผักและผลไม้ เพื่อรักษาความสด หรือผลิตในรูปฟิล์มที่รับประทานได้ (Edible film) สำหรับบรรจุอาหาร

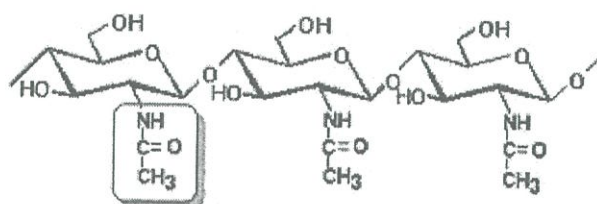
- อุตสาหกรรมกำจัดของเสีย โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารมีสารแขวนลอยสูง ไคโตซานมีประจุบวกสามารถจับกับ โปรตีน และไขมัน ได้ดี ซึ่งโปรตีนที่ได้สามารถนำมาแยกไปใช้เป็นอาหารสัตว์ต่อไป นอกจากนี้ไคโตซานยังสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนัก และจับสี (Dye) ช่วยในการบำบัดน้ำเสีย

- ด้านอาหารเสริม ไคโตซานช่วยลดคอเลสเตอรอล และไขมันในเส้นเลือด โดยไคโตซานไปจับกับคอเลสเตอรอลทำให้ร่างกายไม่สามารถดูดซึมไปใช้ หรือดูดซึมได้น้อยลง และคนไม่สามารถย่อยไคติน และไคโตซานได้ทั้งหมด จึงถูกขับออกมาพร้อมกับอุจจาระ โดยที่มีคอเลสเตอรอล และไขมันส่วนเกินตามออกมามาก แต่ไคโตซานสามารถจับวิตามินที่ละลายได้ดีในไขมัน (วิตามินเอ ดี อี เค) อาจทำให้ขาดวิตามินเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ทางการแพทย์มีรายงานการนำ N-acetyl-D-glucosamine ไปใช้รักษาไขข้ออักเสบ โดยอธิบายว่า ข้ออักเสบเกิดจากการสึกกร่อนของเนื้อเยื่ออ่อนที่เคลือบอยู่ระหว่างข้อกระดูกซึ่ง Glucosamine เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ Proteoglycan และ Matrix ของกระดูกอ่อน จึงช่วยทำให้เยื่อหุ้มกระดูกอ่อนหนาขึ้น

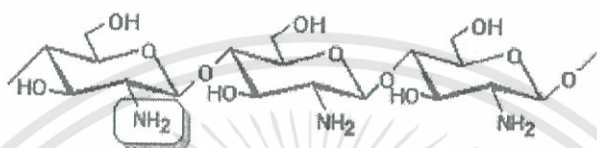
- อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์ ไคโตซานถูกนำไปใส่ในเครื่องสำอางสำหรับผิวหน้า และเส้นผม ไคโตซานมีประจุบวกทำให้สามารถเกาะกับประจุลบของผิวหน้า และเส้นผมได้เป็นอย่างดี จึงถูกนำไปใส่ในเครื่องสำอางที่มีส่วนผสมของกรดผลไม้ธรรมชาติที่เรียกว่า กรดแอลฟา-ไฮดรอกซี (Alpha hydroxyl acid; AHA) กรดพวกนี้จะกระตุ้นให้ผิวหน้าเก่าหลุดลอก เพื่อสร้างผิวใหม่ ทำให้ผิวดูอ่อนเยาว์ขึ้น ส่วนในการบำรุงเส้นผม ไคโตซานจะก่อตัวเป็นฟิล์มเคลือบเส้นผมไว้ ทำให้เส้นผมคงสภาพนุ่มสลวยไม่เสียหาย

- ใช้ในทางการแพทย์ ไคติน และไคโตซานได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในทางการแพทย์ และเภสัชภัณฑ์มีรายงานการวิจัยพบว่า ไคติน และไคโตซานมีคุณสมบัติสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Antimicrobial activity) เป็นสารแอนติออกซิแดนซ์ (Antioxidant activity) มีสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม (film forming agent) สามารถนำมาเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มที่มีลักษณะบางใส ช่วยในทางการแพทย์ เช่น นำมาปิดรักษาบาดแผลผ่าตัด แผล ไฟไหม้ และน้ำร้อนลวก ช่วยป้องกันการติดเชื้อของแผลกระตุ้นให้มีการผลิต และสร้างเซลล์ใหม่ ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษกว่าพลาสติกปิดแผลทั่วไป ใช้ผลิตหนังเทียม ผลิตยาลดไขมันในเลือด ใช้เคลือบยาเม็ดแคปซูล ใช้เป็นสารตัวกลางที่จะปลดปล่อยยาออกมาอย่างช้าๆ ควบคุมคอเรสเตอรอล ยับยั้งการเกิดมะเร็ง ต้านไวรัส ทำคอนแทกเลนส์ เป็นต้น

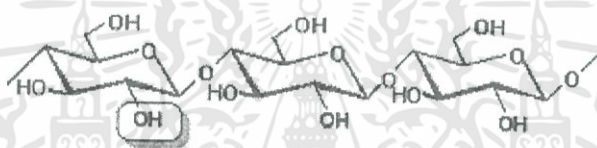
• อุตสาหกรรมการเกษตร เนื่องจากไคโตซานมีสมบัติเป็นสารก่อฟิล์ม และเจลใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นสามารถนำมาฉีดพ่นเคลือบผิว เพื่อรักษาอายุของผลผลิตทางการเกษตร และมีสมบัติยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรียบางชนิดที่ก่อโรคแก่พืชได้



Chitin



Chitosan



Cellulose

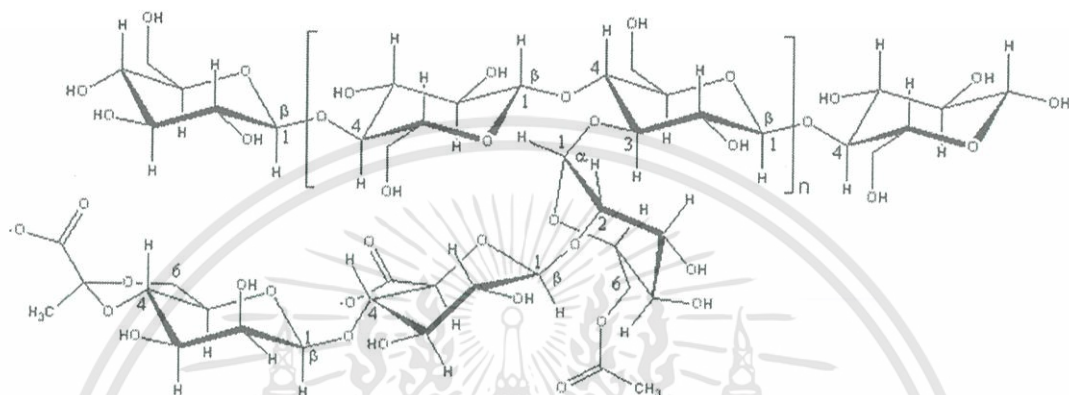
รูปที่ 2.24 การเปรียบเทียบ โครงสร้างโมเลกุลของ Chitin, Chitosan และ Cellulose [14]

2.3.6 Microbial gums

- Xanthan gum เป็นกัมที่ได้โดยการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรียชนิดหนึ่ง คือ *Xanthomonas campestris* หลังจากกระบวนการหมักแล้วจะนำมาตกตะกอนด้วย Isopropyl alcohol แยกเอา Xanthan gum ออกมาทำให้แห้งแล้วบดให้ละเอียด Xanthan gum หรือเรียกชื่อทางการค้าว่า “Keltol” มีโครงสร้างเป็น Heteropolysaccharide ที่ประกอบด้วยกลูโคส, แมนโนส และ Glucuronic acid ในอัตราส่วน 2.8:3:2 มีหมู่ Acetyl ประมาณ 4.7% และ Pyruvic acid ประมาณ 3% โดยกลูโคสต่อกับแมนโนสด้วยพันธะ β -1,4 และแมนโนสที่เป็นสายแขนงต่อกับสายหลักด้วยพันธะ 1,2 หรือ 1,3 ส่วน glucuronic acid ต่อกับพันธะ β -1,2 (รูปที่ 2.25) Xanthan gum ไม่มีสมบัติเป็น Gelling agent แต่สามารถเกิด Elastic thermoreversible gel ได้เมื่อรวมกับ Locust bean gum และเมื่อรวมกับกัวร์กัมจะให้สารละลายที่มีความหนืดสูง Xanthan gum ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน สารละลายที่ได้มีความหนืดสูงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์มีความคงตัวสูงต่อความร้อนและ pH ความหนืดของสารละลาย Xanthan gum จะคงที่ ถึงแม้อุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงในช่วง 0-100°C หรือ pH จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 1-13 ก็ตาม นอกจากนั้นสารละลาย Xanthan gum ยังมีสมบัติเป็น Pseudoplastic ซึ่งมีความสำคัญต่อกลิ่น ลักษณะปรากฏ และความรู้สึกเมื่ออาหารอยู่ในปาก (mouthfeel) Xanthan gum ใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว และทำให้อนุภาคแขวนลอยได้ดี เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอศกรีม ถ้านำ Xanthan gum มาผสมกับ Locust bean gum จะนิยมนำมาใช้กับอาหารประเภทขนมหวาน, ซอสมะเขือเทศสำหรับพิซซ่า, ไล้ขนมอบ, และไล้พาย เป็นต้น นอกจากนี้ยังผสมกับทั้ง Locust-bean gum และ Guar gum ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความข้นหนืด และสมบัติเฉพาะตามความต้องการสำหรับอาหารชนิดหนึ่งๆ เช่น ในผลิตภัณฑ์อาหารประเภท Frozen desserts, Pasteurized, Pasteurized process cheese spread, Cottage cheese, Salad dressing , Sour cream และ Fruitsyrups เป็นต้น



รูปที่ 2.25 โครงสร้างโมเลกุลของ Xanthan gum [22]

2.4 ปู่ย [23]

“ปู่ย” ตามพระราชบัญญัติปู่ย พ.ศ. 2518 ได้บัญญัติไว้ดังนี้ “ปู่ย หมายถึง สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ไม่ว่าจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือทำขึ้นก็ตาม ใช้เป็นธาตุอาหารพืชได้ไม่ว่าโดยวิธีใด หรือทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในดิน เพื่อบำรุงความเค็มโตแก่พืช”

จากความหมายของปู่ยตามพระราชบัญญัติปู่ย พ.ศ. 2518 ดังกล่าวจึงสรุปได้ว่า ปู่ย คือ วัตถุใดก็ตามที่นำมาใช้ในการเพาะปลูกแล้วทำให้พืชเจริญเติบโต เพิ่มผลผลิต ไม่เป็นพิษต่อพืชและเกิดผลเสียต่อดิน ซึ่งส่วนใหญ่หลักที่สำคัญของปู่ยก็คือ ธาตุอาหารพืช ซึ่งหมายถึง ธาตุอาหารหลักคือ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม

ปู่ยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ [24]

2.4.1 ปู่ยอินทรีย์

ปู่ยอินทรีย์ คือสารประกอบที่ได้จากสิ่งที่มีชีวิต ได้แก่ พืช สัตว์ และจุลินทรีย์ ผ่านกระบวนการผลิตทางธรรมชาติ ปู่ยอินทรีย์ส่วนใหญ่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน ทำให้ดินโปร่ง ร่วนซุย ระบายน้ำ และถ่ายเทอากาศได้ดี เมื่อใช้ปู่ยชนิดนี้รากของพืช สามารถชอนไชไปหาธาตุอาหารได้ง่ายขึ้น ปู่ยอินทรีย์มีปริมาณธาตุอาหารอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับปู่ยเคมีและธาตุอาหารพืชส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ เช่น ไนโตรเจนอยู่ในสารประกอบประเภทโปรตีน เมื่อใส่ลงไปในดินพืชจะไม่สามารถนำไปประโยชน์ได้ทันทีที่ต้องผ่านกระบวนการ

ย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน แล้วปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาในรูปสารประกอบอินทรีย์ พืชจึงสามารถใช้ประโยชน์ได้ปุ๋ยอินทรีย์มี 3 ประเภท คือ

1 **ปุ๋ยคอก** เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้มาจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์เลี้ยง เช่น โคน กระบือ สุกร เป็ด ไก่ และห่าน ฯลฯ โดยอาจจะใช้ในรูปแบบปุ๋ยคอกแบบสด แบบแห้ง หรือนำไปหมักให้เกิดการย่อยสลายก่อนแล้วจึงสามารถนำไปใช้งาน ซึ่งขึ้นกับชนิดของดินและพืชที่ปลูกในการใช้งานปุ๋ยคอก โดยเฉพาะการใช้แบบสด อาจทำให้เกิดความร้อนและมีการดึงธาตุอาหารบางตัวไปใช้ในการย่อยสลายมูลสัตว์ ซึ่งอาจจะทำให้พืชเหี่ยวตายได้ นอกจากนั้นปุ๋ยคอกยังทำให้ดินโปร่ง และร่วนซุย

2 **ปุ๋ยหมัก** เป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งซึ่งได้จากการนำส่วนต่างๆ ของพืช วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น หล้าแห้ง ใบไม้ ฟางข้าว ชังข้าวโพดกากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล และแกลบจากโรงสีข้าว ขึ้นอยู่กับโรงงานแปรรูปไม้ เป็นต้น มาหมักในรูปของการกองซ้อนกันบนพื้นดิน หรืออยู่ในหลุม เพื่อให้ผ่านกระบวนการย่อยสลายให้เน่าเปื่อยด้วยจุลินทรีย์ ทำให้ได้สารอินทรีย์วัตถุที่มีความคงทน ไม่มีกลิ่นมีสีน้ำตาลปนดำ

3 **ปุ๋ยพืชสด** เป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการปลูกพืชบำรุงดิน ได้แก่ พืชตระกูลถั่วต่างๆ แล้วทำการไถกลบในช่วงที่พืชกำลังออกดอกพืช ตระกูลถั่วที่ควรใช้เป็นปุ๋ยพืชสดควรเป็นพืชที่มีอายุสั้น มีระบบรากลึก ทนแล้งทนโรค และแมลงได้ดี เป็นพืชที่ปลูกง่าย และมีเมล็ดมาก ตัวอย่างพืชเหล่านี้ก็ได้แก่ ถั่วพุ่ม ถั่วเขียว ถั่วลาย ปอเทือง ถั่วขอ ถั่วเปบ และโสน เป็นต้น

2.4.2 ปุ๋ยเคมี

ปุ๋ยเคมี คือสารประกอบอินทรีย์ที่ให้ธาตุอาหารพืชเป็นสารประกอบที่ผ่านกระบวนการผลิตทางเคมี เมื่อเติมในดินที่มีความชื้นที่เหมาะสม ปุ๋ยเคมีจะละลายทำให้พืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้อย่างรวดเร็วแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1 **ปุ๋ยเดี่ยว หรือแม่ปุ๋ย** ได้แก่ ปุ๋ยพวกแอมโมเนียมซัลเฟต โพแทสเซียมคลอไรด์ ฯลฯ ซึ่งเป็นสารประกอบทางเคมีที่มีธาตุอาหาร คือ N หรือ P หรือ K เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยหนึ่งหรือสองธาตุแล้วแต่ชนิดของสารประกอบที่เป็นแม่ปุ๋ยนั้นๆ มีปริมาณของธาตุอาหารของปุ๋ยที่คงที่ เช่น ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต มีไนโตรเจน 20% ส่วนโพแทสเซียมไนเตรด มีไนโตรเจน 13% และโพแทสเซียม 46% อยู่ร่วมกันทั้งสองธาตุ

2 **ปุ๋ยผสม** ได้แก่ ปุ๋ยที่มีการนำเอาแม่ปุ๋ยหลายๆ ชนิดมาผสมรวมกัน เพื่อให้ปุ๋ยที่ผสมได้มีปริมาณ และสัดส่วนของธาตุอาหาร N, P และ K ตามที่ต้องการ เพื่อให้ได้ปุ๋ยที่มีสูตร หรือเกรดปุ๋ยเหมาะสมกับพืช และดินที่แตกต่างกัน ปุ๋ยชนิดนี้จะมีขายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป เพราะนิยมใช้กันมาก ปัจจุบันเทคโนโลยีในการทำปุ๋ยผสมสามารถผลิตปุ๋ยผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอมีการบั่นเป็นเม็ดขนาดสม่ำเสมอสะดวกในการใส่ลงไปในไร่ นา ปุ๋ยพวกนี้เก็บไว้นานๆจะไม่จับกันเป็นก้อนแข็ง จึงสะดวกในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของปุ๋ยอินทรีย์-ปุ๋ยเคมี [24]

ข้อดีของปุ๋ยอินทรีย์	ข้อเสียของปุ๋ยอินทรีย์
ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดินให้ดีขึ้น	ปริมาณธาตุอาหารต่ำ
อยู่ในดินได้นาน (ค่อยๆปลดปล่อยธาตุอาหาร)	ใช้เวลานานกว่าจะเป็นประโยชน์
ใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมีได้ ทำให้เป็นประโยชน์ยิ่งขึ้น	ราคาแพงต่อหน่วยธาตุอาหารพืช
เป็นแหล่งอาหารของสิ่งมีชีวิตในดิน	หายาก
มีจุลธาตุ	

ข้อดีของปุ๋ยเคมี	ข้อเสียของปุ๋ยเคมี
มีปริมาณธาตุอาหารสูงมาก	ปุ๋ยพวกแอมโมเนียมทำให้ดินเป็นกรด
ราคาถูก	ไม่มีคุณสมบัติปรับปรุงดิน
หาง่าย, ใช้ง่าย	มีความเค็ม
ให้ผลเร็ว	

การนำปุ๋ยเคมีไปใช้ในภาคการเกษตรนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือสมบัติการละลายของปุ๋ย แต่ปุ๋ยเคมีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีสมบัติละลายง่าย พืชไม่สามารถดูดซับธาตุอาหารไปใช้ประโยชน์ได้ทันที จึงมีวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ย 3 วิธี คือ แบ่งใส่หลายครั้งในช่วงเวลาที่เหมาะสม ใช้สารยับยั้งการปลดปล่อยปุ๋ย และ ใช้ปุ๋ยละลายช้า ในงานวิจัยนี้ศึกษาเรื่องการใช้ปุ๋ยละลายช้า ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 2.5

2.5 ระบบเชื่อมโยง

2.5.1 การเชื่อมโยงทางเคมี [27]

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่า พอลิไวนิลอัลกอฮอล์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ จึงมีการปรับปรุงพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ให้อยู่ในสภาพที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารที่ก่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยง เช่น ฟอรั่มลดีไฮด์ และกลูตารอลดีไฮด์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามการใช้งานกลูตารอลดีไฮด์ควรคำนึงถึงอันตรายต่อมนุษย์ด้วย เนื่องจากกลูตารอลดีไฮด์สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้โดยทางการหายใจ การรับประทาน และการสัมผัสทางผิวหนัง การสัมผัสสารนี้ทางผิวหนังบ่อยครั้งจะเป็นสาเหตุให้เกิด Allergic eczema และมีผลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

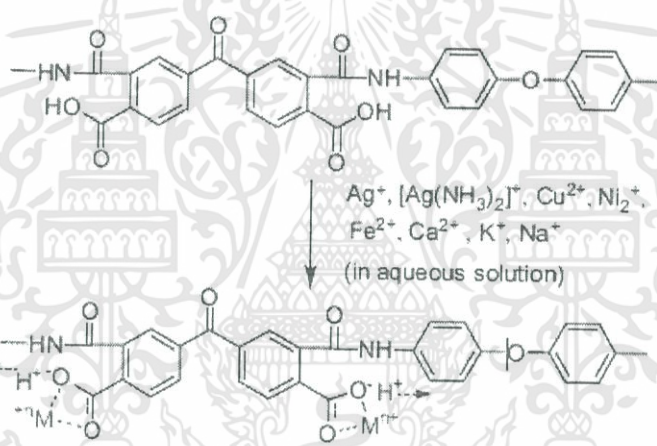
ระบบประสาทความเข้มข้นต่ำสุดที่มนุษย์สามารถรับกลิ่น ได้คือ 0.04 ppm ที่ความเข้มข้น 0.3 ppm หรือ 1.05 mg/m³ จะทำให้เกิดระคายเคืองต่อผิวหนัง และเยื่อหุ้ม [28]

2.5.2 การเชื่อมโยงด้วยประจุ

พอลิแซคคาไรด์ในกลุ่มกัมธรรมชาติหลายชนิดมีหมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) ซึ่งสามารถเชื่อมโยงด้วยประจุได้ โดยการใช้สารเชื่อมโยงแบบโมโนวาเลนต์ เช่น Ag^+ โดยมีการเกิดโคออร์ดิเนชันร่วม [29], ไดวาเลนต์ เช่น Cu^{2+} [30], Ca^{2+} [31] หรือแบบไตรวาเลนต์ เช่น Al^{3+} [32], Fe^{3+} [33] ด้วยพันธะไอออนิก เป็นต้น

1. การเชื่อมโยงประจุแบบโมโนวาเลนต์

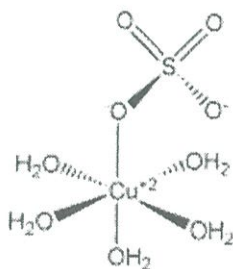
การเชื่อมโยงแบบ โมโนวาเลนต์เป็นสารก่อกัณฑ์เชื่อมโยง โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ดังรูปที่ 2.26 [28]



รูปที่ 2.26 การแลกเปลี่ยนไอออนของพอลิเอมิกแอซิดกับโลหะไอออน [28]

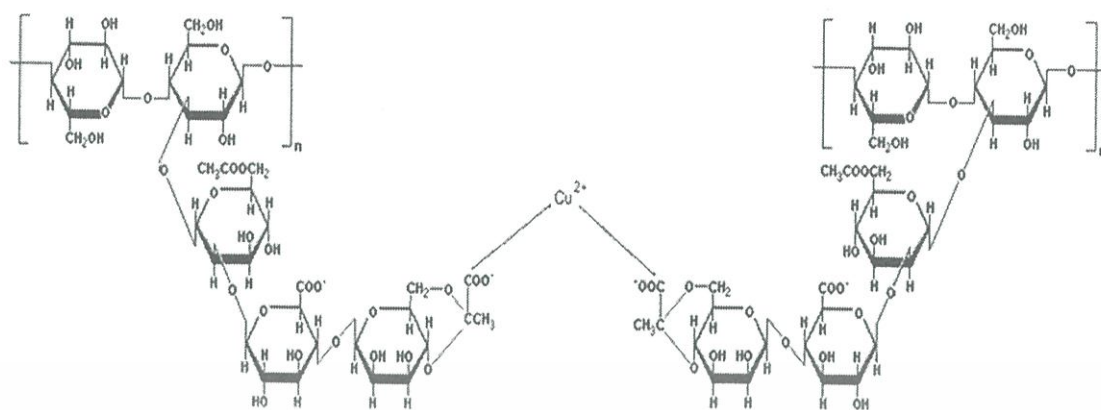
2. การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์

สามารถใช้คอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต (Copper sulfate pentahydrate, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (รูปที่ 2.27) เป็นสารก่อกัณฑ์เชื่อมโยงได้ โดยเกิดการเชื่อมโยงขึ้นระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) ในโครงสร้างของแซนแทนกัมกับ Cu^{2+} [30] ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 สูตร โครงสร้างคอปเปอร์ซัลเฟต [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 การเชื่อมโยงหมู่คาร์บอกซิเลตในโครงสร้างของแซนแทนกัมกับคอปเปอร์ซัลเฟต [30]

คอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารประกอบทองแดง มีสีฟ้า ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโรค และเชื้อราในแหล่งน้ำโดยไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ หากร่างกายไม่ได้รับทองแดงในปริมาณมากเกินไป ปริมาณต่ำสุดเมื่อได้รับทางปากที่ทำให้ถึงตายได้ คือ 5-15 กรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว [35] จากการศึกษา และวิจัยพบว่า ไอออนของทองแดงที่ปลดปล่อยออกมาในน้ำนั้นจะไปรบกวนระบบชีววิทยาของแบคทีเรีย โดยการไปทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ และมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ [36]

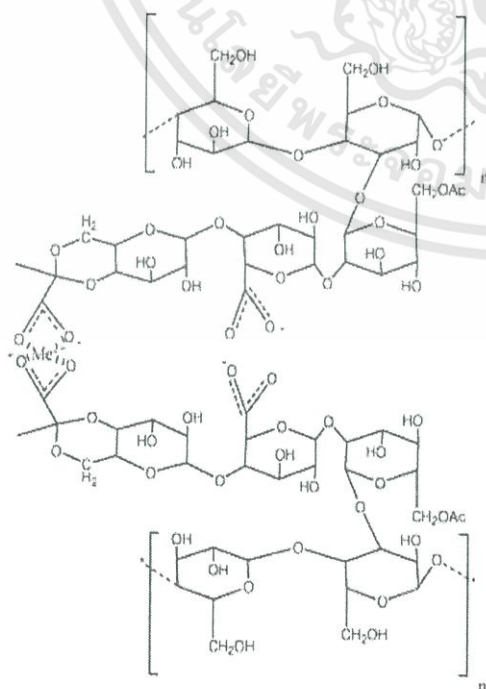
ปิยาภา เจริญพานิช และคณะ [38] ใช้คอปเปอร์ซัลเฟต และกลูตารอลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยงในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากแซนแทนกัม และพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ โดยมีการเชื่อมโยงสองแบบ คือการเชื่อมโยงระบบเคียวด้วยกลูตารอลดีไฮด์ หรือคอปเปอร์ซัลเฟต และการเชื่อมโยงสองระบบด้วยกลูตารอลดีไฮด์ และคอปเปอร์ซัลเฟต แล้วนำไปศึกษาสมบัติเชิงกลปริมาณของแข็งที่เหลือ และทดสอบการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจล ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเติมสารเชื่อมโยงร่วมกลูตารอลดีไฮด์ และคอปเปอร์ซัลเฟต ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดลดลง นอกจากนี้ฟิล์มที่มีอัตราส่วนพอลิไวนิลอัลกอฮอล์ต่อแซนแทนกัม 20 ต่อ 80 และมีการเติมสารเชื่อมโยงร่วมกลูตารอลดีไฮด์ 4 ส่วนในร้อยส่วน เมื่อเทียบกับเนื้อของพอลิเมอร์และคอปเปอร์ซัลเฟต 0.2 มิลลิโมลต่อกรัมพอลิเมอร์ มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ และการบวมตัวสูงที่สุดที่ 80% และ 88 เท่าตามลำดับ

นอกจากนี้การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์ยังสามารถใช้แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2) เป็นสารเชื่อมโยงได้เช่นกัน

แคลเซียมคลอไรด์ เป็นสารประกอบไอออนิกของแคลเซียม (โลหะหมู่อัลคาไลเอิร์ธกับคลอไรด์) เป็นสารละลายที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่เป็นพิษ จึงเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แหล่งค้นพบส่วนมากจะอยู่ในน้ำทะเล น้ำใต้ดิน และน้ำพุที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยบริเวณใต้ดินของอเมริกาเหนือพบแคลเซียมคลอไรด์ที่มีคุณภาพสูงมาก คุณสมบัติของแคลเซียมคลอไรด์สามารถละลายน้ำได้ และเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน นอกจากนี้แคลเซียมคลอไรด์ยังสามารถดูดความชื้นจากสิ่งแวดล้อมได้ ด้านการระเหย และปล่อยความร้อนจากปฏิกิริยา

การใช้งานแคลเซียมคลอไรด์ในงานต่างๆมีดังนี้

- ใช้เป็นสารเชื่อมโยง เพื่อควบคุมการปลดปล่อยสารละลาย
- สารพื้นฐานสร้างเสถียรภาพในการก่อสร้างถนน
- ใช้เป็น Freeze-proofing sand สำหรับถนนที่หิมะเกาะ
- ช่วยกำจัดน้ำเสีย กำจัดหมู่ฟอสเฟต และฟลูออไรด์
- Grouting agent สำหรับเหมืองแร่ และบ่อน้ำมัน
- สารเติมแต่งจากธรรมชาติสำหรับเตาเผาปูนซีเมนต์
- ใช้แทนเกลือในอาหารสัตว์ หรือใช้เป็นอาหารเสริมในสัตว์ ครัวขนาดเกลือ
- ใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์
- ใช้เป็นสารทำความเย็น
- ใช้เป็นสารควบคุมกลิ่น
- เป็นตัวปรับค่ากรดด่างของดิน
- สารป้องกันการแข็งตัวสำหรับนันทนาการต่างๆ เช่น ลานสเก็ต เป็นต้น



D. Bergmann และคณะ [37] ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างแซนแทนกัม และ Divalent cation เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} โดยจะเกิดขึ้นที่หมู่คาร์บอกซิลเลตของไพรูเวต (Pyruvate unit) ดังรูปที่ 2.29

รูปที่ 2.29 แบบจำลองการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างแซนแทนกัมและ Divalent cation [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์

สามารถใช้โลหะไอออนต่างๆ เช่น Fe^{3+} , Al^{3+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} และ Cu^{2+} เป็นสารก่อก้อนเชื่อมโยงได้

2.6 ปุ๋ยละลายช้า [39]

ปุ๋ยละลายช้า คือปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาให้พืชอย่างช้าๆ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.6.1 ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (Slow-released fertilizers)

ปุ๋ยปลดปล่อยช้า หมายถึง ปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป แต่ไม่สามารถควบคุมอัตรา และช่วงเวลาในการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ อัตราการปลดปล่อยจะขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้น และกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน เป็นต้น แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) สารประกอบอินทรีย์ที่มีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างยูเรียกับอัลดีไฮด์ เช่น ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งจะสลายตัวได้ด้วยจุลินทรีย์ และแบบที่สองคือ สารประกอบอินทรีย์ที่สลายได้ด้วยปฏิกิริยาเคมี เช่น ไอโซบิวทิลไดอิลีน ไดอูเรีย (Isobutylidenediurea, IBDU) เป็นต้น

2) สารประกอบอนินทรีย์ที่มีสภาพละลายน้ำต่ำ (Inorganic-low-solubility compounds) เช่น แมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) เป็นต้น

2.6.2 ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled released fertilizers)

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย หมายถึง ปุ๋ยที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ โดยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายใน ซึ่งส่งผลต่ออัตรา และช่วงเวลาในการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมา เช่น ปุ๋ยเคลือบ (Coated fertilizers) และปุ๋ยไฮโดรเจล เป็นต้น

2.7 ปุ๋ยไฮโดรเจล

เนื่องจากไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้ดี สามารถให้ความชุ่มชื้นทำให้พืชอยู่รอดได้ แม้จะไม่ได้รับน้ำเป็นเวลานานๆ และยังสามารถดูดซับแร่ธาตุต่างๆ แล้วค่อยๆ ปลดปล่อยออกมาช้าๆ ทำให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ ทำให้มีการนำมาใช้ในการปลูกต้นไม้ได้ โดยไม่ต้องใช้ดิน และโดยไม่ต้องกังวลว่า ต้นไม้จะเหี่ยวแห้งตาย เพราะขาดน้ำและธาตุอาหาร

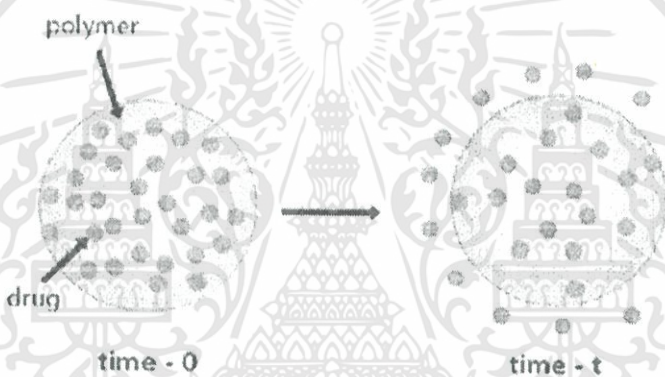
ในปัจจุบันนิยมใช้ไฮโดรเจล เพื่อการปลดปล่อยปุ๋ย โดยการสร้างไฮโดรเจลแล้วนำไปดูดซับปุ๋ย จากนั้นนำไปอบให้แห้ง เมื่อต้องการใช้ให้ใส่ไปในดิน โดยที่ไฮโดรเจลเมื่อได้รับความชื้น หรือน้ำ จะมีการบวมตัว และละลาย แล้วมีการปลดปล่อยปุ๋ยออกมาอย่างช้าๆ ซึ่ง

ไฮโดรเจลที่ใช้นี้สร้างมาจาก 2 กลุ่ม คือ 1.กลุ่มพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิอะคริลาไมด์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น 2.กลุ่มพอลิแซคคาไรด์ เช่น ไคโตซาน โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส โซเดียมอัลจิเนต และกัวร์กัม เป็นต้น โดยสามารถควบคุมอัตรา และปริมาณการปลดปล่อยได้

โดยไฮโดรเจลมีกระบวนการควบคุมการปลดปล่อย โดยมียูรูปแบบการปลดปล่อยสารหลายรูปแบบ [40] ดังนี้

- การแพร่ผ่านเมมเบรน (Membrane controlled device) สารจะถูกกักเก็บอยู่ภายในไฮโดรเจล ซึ่งผิวหนังถูกเคลือบ หรือห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ พอลิเมอร์จะทำหน้าที่ในการควบคุมการปลดปล่อยสารสู่ภายนอกแบ่งออกเป็น

Membrane diffusion ใช้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่เกิดการพองตัวได้ ทำให้เกิดรูภายใน โครงสร้างสารจึงแพร่ผ่านรูของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.30 ลักษณะการปลดปล่อย [41]

Membrane dissolution สารที่ต้องการปลดปล่อยจะถูกปลดปล่อยออกโดยการละลายออกมาอย่างช้าๆ ทำให้มีระยะเวลาในการปลดปล่อยยาวนานขึ้น ทำได้โดยการเคลือบอนุภาคสารที่ต้องการปลดปล่อยด้วยสารที่ละลายช้าให้มีความหนาต่างกัน เมื่อผิวหนังที่เคลือบละลายหมด สารที่ต้องการปลดปล่อยจะถูกปล่อยออกมา โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอัตราเร็วในการละลายของสาร คือความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ และความเร็วในการละลายของสารเคลือบ (พอลิเมอร์)

- การแพร่ผ่านเมทริกซ์ (Matrix device) สารที่ต้องการปลดปล่อยจะกระจายอยู่ในพอลิเมอร์แบ่งเป็น

- Matrix diffusion สารที่ต้องการปลดปล่อยจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในส่วนกักเก็บของไฮโดรเจล (พอลิเมอร์) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยสารคือรูพรุน และช่องภายในรูพรุนของพอลิเมอร์ พื้นที่ผิวของเมทริกซ์จะมีความเข้มข้นของสารที่ปลดปล่อย
- Matrix dissolution ผสมพอลิเมอร์ที่ละลายได้เข้ากับสารที่ต้องการปลดปล่อย เพื่อลดการละลายให้ช้าลงสารจะละลายออกมาช้าๆ พร้อมๆ กับการละลายของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยสาร คืออัตราการละลายของพอลิเมอร์ พื้นที่ผิวของเมทริกซ์อัตราส่วนของพอลิเมอร์ต่อสารที่ต้องการปลดปล่อยการพองตัวของพอลิเมอร์

- การปลดปล่อยโดยอาศัยความดันออสโมซิส (Osmosis device) ประกอบไปด้วยสารที่ดูดน้ำได้ และทำให้เกิดแรงดันออสโมซิส เยื่อเลือกผ่านยอมให้น้ำผ่าน แต่ไม่ยอมให้สารละลายอื่นผ่าน แต่ได้ฟิล์มที่ไม่ละลาย และไม่ยืดหยุ่น

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

- การแลกเปลี่ยนประจุโดยใช้เรซิน (Ion exchange resin) ใช้กับสารที่ต้องการปลดปล่อยที่มีประจุโดยใช้เรซินที่มีประจุตรงข้ามกับสารที่ต้องการปลดปล่อย และเมื่อสารที่ต้องการปลดปล่อยอยู่ในสถานะที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ก็จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน จึงทำให้สารที่ต้องการปลดปล่อยถูกปลดปล่อยออกมา

ในงานวิจัยนี้เลือกการควบคุมปล่อยแบบปล่อยไฮโดรเจล เพื่อทำการปลดปล่อยได้ช้าลง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชามาต มินสาคร (2555) [3] ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซคคาไรด์ ได้แก่ โซเดียมอัลจินेट (Na-Alg) โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) และกัวร์กัม (GG) ด้วยการเชื่อมโยงสองแบบ คือการเชื่อมโยงแบบขั้นตอนเดียวด้วยโซเดียมเททระบอเรต และการเชื่อมโยงแบบสองขั้นตอนด้วยโซเดียมเททระบอเรต และแคลเซียมคลอไรด์ นอกจากนี้ยังได้แบ่งการเตรียมไฮโดรเจลเป็นสองระบบ คือระบบสององค์ประกอบของ Na-Alg/GG และ Na-CMC/GG อีกระบบเป็นระบบสามองค์ประกอบของ Na-Alg/Na-CMC/GG ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ Na-Alg:GG, Na-CMC:GG และ Na-Alg:Na-CMC:GG ตั้งแต่ 0-100% รวมถึงความเข้มข้นที่แตกต่างกันของโซเดียมเททระบอเรต ซึ่งใช้เป็นสารเชื่อมโยง 4 ค่า คือ 0%, 0.2%, 0.6% และ 1.0% โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจลที่ได้นำไปทดสอบสมบัติการบวมตัวในสถานะต่างๆ คือ ในน้ำกลั่น ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 2, 5, 7.4, 8 และ 12 ในสารละลาย NaCl และ CaCl₂ ที่ความเข้มข้นต่างๆ และอุณหภูมิต่างกัน จากผลงานวิจัยพบว่า ไฮโดรเจลระบบสามองค์ประกอบสูตร A3C1G6-10 มีค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23°C สูงที่สุดที่ 50 เท่า และไฮโดรเจลสามองค์ประกอบที่เชื่อมโยงสองกลไกสูตร A1C3G6-10Ca สามารถคงสภาพเจลได้นานที่สุดที่เวลา 180 นาที การบวมตัวของไฮโดรเจลในสารละลายเกลือพบว่า ค่าการบวมตัวในน้ำกลั่น > NaCl > CaCl₂ และเจลดงสภาพได้นานที่สุดเมื่อบวมตัวในสารละลาย CaCl₂ นอกจากนี้การบวมตัวมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย NaCl เพิ่มขึ้น การบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่ 37°C พบว่า เจลบวมตัวได้น้อยกว่าที่ 23°C และเกิดการเสถียรภาพเร็วขึ้น เมื่อทดสอบการบวมตัวในสภาวะกรด-เบส พบว่าค่าการบวมตัวที่ pH เริ่มต้น $4 < 7 \cong 10$ และที่ pH เริ่มต้น 4 เจลเกิดการเสถียรภาพได้เร็ว

เพชรรัตน์ พลับเจริญสุข และคณะ (2554) [4] ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซ็กคาไรด์ ได้แก่ กัวร์กัม (GG) และคาร์ราจีแนน (CA) โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนตั้งแต่ 0:10 ถึง 10:0 โดยน้ำหนัก และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรตที่ 0.6% และ 1.0% โดยน้ำหนัก นำไฮโดรเจลที่เตรียมได้ไปทดสอบการบวมตัวในสภาวะน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 20 และ 37°C ในสารละลายเกลือ NaCl ที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 M ในสารละลายเกลือ CaCl_2 เข้มข้น 0.1 M และที่สภาวะกรด-ด่าง จากผลการทดลอง พบว่าเจลเมื่อบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 20°C ให้ค่าการบวมตัวสูงที่สุด จากนั้นทำการบวมตัวในสารละลายเกลือที่ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 M พบว่ามีการบวมตัวลดลงกว่าในน้ำกลั่น และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นถึง 0.25 และ 0.5 M เจลมีเสถียรภาพการบวมตัวที่ยาวนานมากขึ้น สูตร C4G6 (คาร์ราจีแนน 60% โดยน้ำหนัก และกัวร์กัม 40% โดยน้ำหนัก) และ C5G5 (คาร์ราจีแนน 50% โดยน้ำหนัก และกัวร์กัม 50% โดยน้ำหนัก) ที่ปริมาณสารเชื่อมโยง 0.6% และ 1.0% โดยน้ำหนัก พบว่ามีการบวมตัวสูงสุดเมื่อ 24 ชั่วโมงผ่านไป เมื่อเปลี่ยนเป็นสารละลายเกลือ CaCl_2 ความเข้มข้น 0.1 M พบว่าการบวมตัวน้อยที่สุด เพราะมีปริมาณตัวเชื่อมโยงมากที่สุด จากนั้นทำการบวมตัวในสารละลาย pH ต่างกันที่ 5.5 และ 8.5 พบว่าไม่มีผลต่อการบวมตัวของเจล

จิตรานุช จิรปฐมกุล และคณะ (2554) [5] ได้ศึกษาการปลดปล่อยสารออกซิฟอสเฟตในรูปของสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนต (A) และกัวร์กัม (G) โดยใช้โซเดียมเททระบอเรตเป็นตัวเชื่อมโยง และใช้อัตราส่วนโซเดียมอัลจิเนตต่อกัวร์กัมเป็น 6:4 และ 4:6 โดยน้ำหนัก โดยเตรียมไฮโดรเจลที่บรรจุสารออกซิฟอสเฟตดังกล่าว 2 แบบ คือการเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารออกซิฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว (1) และการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารออกซิฟอสเฟตแบบสองขั้นตอน (2) จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาศึกษาการดูดซับน้ำ และการปลดปล่อยสารออกซิฟอสเฟต แล้วทำการตรวจวัดปริมาณสารออกซิฟอสเฟตโดยใช้ Vanado molybdophosphoric acid method ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ผลการทดสอบพฤติกรรมบวมตัวของเจลปฏิกิริยาทั้ง 4 สูตร ได้แก่ A4G6(1), A6G4 (1), A4G6(2) และ A6G4(2) พบว่าค่าการบวมตัวอยู่ในช่วงประมาณ 8-10 เท่า และพฤติกรรมปลดปล่อยสารของเจลปฏิกิริยาพบว่าการบวมตัวของเจลปฏิกิริยาที่เตรียมแบบสองขั้นตอนสูตร A4G6(2) และ A6G4(2) สามารถปลดปล่อยสารออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกือบ 100% ภายในเวลาไม่ถึง 24 ชั่วโมง ขณะที่เจลปฏิกิริยาที่เตรียมแบบขั้นตอนเดียวสูตร A4G6(1) และ A6G4(1) สามารถปลดปล่อยสารออกมาได้ประมาณ 70-80% ที่เวลา 24 ชั่วโมง

จิราพร ลาภบริสุทธิ และคณะ (2555) [42] การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลาย โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม อัตราส่วนคาร์ราจีแนนต่อกัวร์กัมเป็น 2:8, 4:6, 6:4 และ 8:2 โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงด้วยโซเดียม-เทตระบอเรต ความเข้มข้น 0.6 และ 1.0% w/w โดยเตรียมไฮโดรเจลที่เตรียมพร้อมบรรจุสารอโร-ฟอสเฟต 2 แบบ คือ การเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารอโรฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว และการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารอโรฟอสเฟตภายหลัง จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาอัดเม็ด ทำการศึกษาการดูดซับน้ำ พบว่าไฮโดรเจลทุกสูตรมีค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ในช่วงประมาณ 15-35 เท่า และการปลดปล่อยสารอโรฟอสเฟต โดยตรวจวัดปริมาณสารอโรฟอสเฟต ด้วยเทคนิค Vanado molybdo phosphoric acid แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร พบว่าสารถูกปลดปล่อยออกอย่างรวดเร็ว ในช่วงเริ่มต้นจนถึงเวลา 300 นาที โดยเจลปฏิกิริยาที่บรรจุสารแบบ 2 ขั้นตอนมีความสามารถในการปลดปล่อยสารภายในเวลา 48 ชั่วโมง ได้ถึง 90-95% โดยมีค่าสูงกว่าเจลปฏิกิริยาที่บรรจุสารแบบขั้นตอนเดียวที่ปลดปล่อยสารได้ประมาณ 80% และเจลปฏิกิริยาที่เชื่อมโยงด้วยสารละลาย โซเดียมเทตระบอเรตที่มีความเข้มข้น 0.6% w/w สามารถปลดปล่อยได้สูงสุดถึง 100% ซึ่งมากกว่า เจลปฏิกิริยาที่เชื่อมโยงด้วยสารละลาย โซเดียมเทตระบอเรตที่มีความเข้มข้น 1.0% w/w ที่มีค่าการปลดปล่อยสูงสุด 80%

เฉลิมขวัญ เวชสกุล และคณะ (2555) [43] ศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลาย โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม อัตราส่วนโซเดียมอัลจิเนตต่อกัวร์กัมเป็น 4:6 และ 6:4 โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทตระบอเรต ความเข้มข้น 0.6% w/w และแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.05, 0.10 และ 0.25 M โดยนำ เจลปฏิกิริยาที่ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว และการปลดปล่อยสารละลาย KH_2PO_4 โดยตรวจวัด ด้วยเทคนิค Vanado molybdo phosphoric acid แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร พบว่า เมื่อมีการเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ความสามารถในการปลดปล่อยจะเร็วในช่วงแรก และเมื่อเวลาผ่านไป ประมาณ 100 นาที การปลดปล่อยจะเริ่มช้าลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ ความสามารถในการปลดปล่อยจะน้อยลงตามลำดับ โดยกรณีของสูตร A4G6-Ca25 และ A6G4-Ca25 มีความสามารถในการปลดปล่อยสารละลาย KH_2PO_4 น้อยที่สุด เนื่องจากพบตะกอน สีขาวของ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaHPO_4 และ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ เป็นสาเหตุให้ฟอสเฟตที่เหลืออยู่ในรูปสารละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลดปล่อยออกมาได้น้อยกว่าความเป็นจริง ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการปลดปล่อย คือ เมื่อค่าความเข้มข้นของ CaCl_2 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการปลดปล่อยลดลงและสูตรที่มีปริมาณอัลจินตมาก จะมีความสามารถในการปลดปล่อยได้สูงกว่าสูตรที่มีปริมาณอัลจินตน้อย

Z. Yian และ W. Aiqin (2552) [44] ศึกษาไฮโดรเจลจากไคโตซานกราฟต์พอลิอะคริลิกแอซิด และเร็คโทไรต์ เพื่อใช้ควบคุมการปลดปล่อยแอมโมเนียมซัลเฟต โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนปริมาณของไคโตซานกราฟต์พอลิอะคริลิกแอซิด และเร็คโทไรต์ พบว่าอัตราส่วนปริมาณที่ดูดซับแอมโมเนียมซัลเฟตได้มากที่สุด คือไคโตซานกราฟต์พอลิอะคริลิกแอซิด และเร็คโทไรต์ (10%wt)ซึ่งค่าการดูดซับจะเริ่มที่นาที่ที่ 3 และคงที่ในนาที่ที่ 5 และเมื่อนำไคโตซานกราฟต์พอลิอะคริลิกแอซิดและเร็คโทไรต์ไฮโดรเจลแช่ลงในสารละลายแคทไอออนคือ โซเดียม-คลอไรด์, แคลเซียมคลอไรด์ และ อลูมิเนียมไตรคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ 0.01, 0.02 และ 0.05 M โดยตรวจวัดด้วยเทคนิค Vanado molybdo phosphoric acid แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคทไอออนเพิ่มขึ้น ความสามารถในการปลดปล่อยจะเร็วในช่วงแรก และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 100 นาที การปลดปล่อยจะเริ่มช้าลง อัตราการปลดปล่อยมีค่าลดน้อยลง ทำให้ไฮโดรเจลมีการปลดปล่อยปุ๋ยได้ช้า

H. Bing และคณะ (2556) [45] ศึกษาไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ โซเดียม-อัลจินต เพื่อใช้ควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยฟอสเฟต โดยใช้ลูมิเนียมไตรคลอไรด์เป็นสารเชื่อมโยงมีการศึกษาการบวมตัว และปริมาณน้ำคงเหลือ พบว่า สูตรที่มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สูง จะทำให้มีการบวมตัวมากและปริมาณน้ำคงเหลือมาก เพราะ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหมู่ที่มีขั้วสูง ทำให้ดูดน้ำได้ดี การดูดซับปุ๋ยจะดูดซับปุ๋ยอย่างรวดเร็วที่ลูมิเนียมไตรคลอไรด์ 1% และจะคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 3 ชั่วโมง เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงการดูดซับปุ๋ยจะมีค่าลดลงเนื่องจากปุ๋ยได้กระจายตัวเข้าไปในเม็ดเจลเกิดการเชื่อมโยงกับสารเชื่อมโยง ทำให้ปุ๋ยเข้าไปในเจลได้บางส่วน และเมื่อทำการตรวจวัด Ammonium molybdate spectrophotometric method เพื่อตรวจสอบการปลดปล่อยปุ๋ยพบว่า สูตรที่มีปริมาณ โซเดียมอัลจินตสูงจะมีการดูดซับปุ๋ยได้ปริมาณมาก จึงทำให้มีการปลดปล่อยปุ๋ยในปริมาณมากที่สุด

T. Jamnongkan และ S. Keawpirom (2010) [46] ได้ศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยของปุ๋ยชนิดควบคุมการปลดปล่อยที่อยู่ในรูปของพอลิเมอร์ไฮโดรเจล ซึ่งปุ๋ยชนิดนี้เตรียมได้จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ไคโตซาน และสารผสมของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับไคโตซาน โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมโยง ปุ๋ยที่ได้สามารถบวมตัวในน้ำได้ถึงร้อยละ 70-300 นอกจากนี้พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปุ๋ยชนิดนี้สามารถเพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำของดินได้ เมื่อเวลาผ่านไป 30 วัน ดินที่มีปุ๋ย PVA-, PVA/CS- และ CS-hydrogel มีน้ำกักเก็บอยู่ร้อยละ 25, 10 และ 4 ตามลำดับ เนื่องจาก ผลของ โครงสร้างปุ๋ย PVA มีลักษณะเป็นรูพรุนมาก และเนื้อหยาบ ทำให้สามารถกักเก็บน้ำได้มากที่สุด ในขณะที่ดินที่ไม่มีปุ๋ยชนิดนี้จะมีน้ำเหลืออยู่น้อยมาก พฤติกรรมการปลดปล่อยของปุ๋ยชนิดนี้ในน้ำ กับในดินจะแตกต่างกันพบว่า ปุ๋ยที่เตรียมจาก PVA-hydrogel จะมีปริมาณการปลดปล่อยสะสมมาก ที่สุดในน้ำ ในขณะที่ปุ๋ยที่เตรียมจาก CS-hydrogel จะมีปริมาณการปลดปล่อยสะสมได้มากที่สุด ใน ดิน

I. Liakosa และคณะ (2556) [47] เตรียมฟิล์มจากโซเดียมอัลจิเนต ไฮโดรเจลจากอัลจิเนตที่ เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ 10% โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ และบรจุยา จากนั้น ศึกษาการปลดปล่อยยาโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 288 และ 351 นาโนเมตร พบว่าเม็ดไฮโดรเจลที่ มีการเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์ใช้เวลา 4 ชั่วโมงในการปลดปล่อยยาออกมทั้งหมด ซึ่งช้ากว่า ฟิล์มโซเดียมอัลจิเนตที่ใช้เวลาในการปลดปล่อยยาเพียง 12 นาที จึงสรุปได้ว่าเม็ดไฮโดรเจลที่มีการ เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์สามารถควบคุมการปลดปล่อยตัวยาได้ดีกว่าฟิล์มที่ไม่มีการ เชื่อมโยง

พรพิสุทธิ กองธรรม (2554) [48] ศึกษาการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดินที่ปลูก หน่อไม้ฝรั่ง โดยปุ๋ยเคมีฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปละลายน้ำได้ เมื่อใส่ลงในดินจะมีเพียงประมาณ 15-20% ของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่สามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ดังนั้นดินที่ใช้ในการเพาะปลูกมีผลต่อ การดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัส ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 6 ชุดดิน นำมาวิเคราะห์สมบัติของดิน และการทดสอบความสามารถในการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัส โดยศึกษาลักษณะการดูดซับ ฟอสฟอรัส ด้วยเทคนิค Phosphorus sorption isotherm โดยชั่งดิน 2 กรัม เติมสารละลาย 0.01 M CaCl_2 ที่ประกอบด้วย KH_2PO_4 เข้มข้น 0, 25, 50, 100, 200 และ 400 mg P kg^{-1} ลงในดินตัวอย่าง แล้ว นำไปเขย่า 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สารละลายดินเข้าสู่สมดุล จากนั้นนำสารละลายดินเข้า เครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) แล้วนำสารละลายด้านบนไปวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธี Ascorbic acid method พบว่าความสามารถในการดูดซับฟอสฟอรัสของทุกชุดดินมีความแตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากดินแต่ละตัวอย่างมีสมบัติดินที่แตกต่างกัน โดยชุดดินทับทิมสามารถดูดซับ ฟอสฟอรัสได้มากที่สุดเท่ากับ 1,629.4 mg P/kg soil ในขณะที่ชุดดินหินซ้อนสามารถดูดซับ ฟอสฟอรัสได้น้อยที่สุดเท่ากับ 222.3 mg P/kg soil เมื่อพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่ดูดซับได้มี ความสำคัญต่อประจุลบของฟอสเฟตจะถูกดูดซับยึดกับประจุบวกบริเวณผิวของแร่ดินเหนียว (Clay mineral) ด้วยแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้า (Electrostatic bonding) ทำให้การแลกเปลี่ยนประจุมีค่า สูง สามารถดูดประจุบวก เช่น Mg^{2+} และ Ca^{2+} ไปได้มาก โดยเกิดการเชื่อมโยง และอินทรีย์วัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเพิ่มและลดการดูดซับได้ กรณีเพิ่มการดูดซับอินทรีย์วัตถุจะเกิดการย่อยสลาย และปลดปล่อยกรดอินทรีย์ออกมาละลายประจุบวก Fe^{3+} , Al^{3+} และ Ca^{2+} ที่ตรึงฟอสฟอรัสละลายออกมาทำให้เกิดตกตะกอนของฟอสฟอรัสที่ถูกดูดซับบนผิวคอลลอยด์ดิน ซึ่งแมกนีเซียม และแคลเซียมเกิดการเชื่อมโยงมีแนวโน้มเชิงบวกกับการดูดซับฟอสฟอรัส ส่วนการปลดปล่อยฟอสฟอรัสนั้นพบว่า ชุดดินนครปฐมสามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้น้อยที่สุดเท่ากับ 217.6 mg/L ในขณะที่ชุดดินหินซ้อนสามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้มากที่สุดเท่ากับ 709 mg/L



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แซนแทนกัม (Xanthan Gum : X) เกรดอาหาร บริษัท รวมเคมี จำกัด
2. โซเดียมอัลจิเนต (Sodium alginate :A) เกรดการค้า บริษัท รวมเคมี จำกัด
3. โซเดียมเตตระโบเรต (Sodium tetraborate : $\text{Na}[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})]\cdot 8\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท RFCL จำกัด
4. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassiumdihydrogenphosphate : KH_2PO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Apex Chemicals จำกัด
5. แอสคอร์บิก (Ascorbic acid : $\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_6$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Apex Chemicals จำกัด
6. แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium molybdate : $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Mallinckrodt จำกัด
7. แอนติโมนีโพแทสเซียมทาร์เตรต (Antimony potassium tartrate: $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท อิตัลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด
8. สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. Sulfuric acid: H_2SO_4) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo Erba Reagents Group
9. แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต (Calcium chloride dehydrate: $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Merck จำกัด
10. คอปเปอร์ซัลเฟตเพนทาไฮเดรต (Copper sulphatepentahydrate: $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท อิตัลมาร์ จำกัด

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน รุ่น C-MAG HS 7 บริษัท IKA จำกัด
2. แท่งแม่เหล็กคนสาร
3. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. เครื่องแก้ว
5. ตะแกรงลวดขนาด 400 เมช
6. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer รุ่น Model Genesys los UV-Vis บริษัท เบทไทย

กรุงเทพฯอุปกรณ์เคมีภัณฑ์ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องอัดเม็ด แรงดัน 5 ตัน จากบริษัท Sang Thai Intertrade จำกัด
8. กล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2 บริษัท ANMO Electromic Corporation จำกัด
9. ตู้อบลมร้อน รุ่น OF-01E บริษัท เบคไทย กรุงเทพมหานครอุปกรณ์เคมีภัณฑ์ จำกัด
10. ไมโครมิเตอร์ และเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
11. โกร่งบดสาร

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเพื่อใช้เป็นสารมาตรฐานสำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

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

3.3.2 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตความเข้มข้น 0.2 M

1. ชั่งสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ปริมาณ 27.2180 กรัม
2. ละลายสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตด้วยน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรตามที่กำหนด

3.3.3 การเตรียมสารละลายแอสคอร์บิกเอเจนต์

1. ละลายกรดแอสคอร์บิก 1.76 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 20 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร
3. ละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต 1.3715 กรัม ในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร
4. เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอลจากสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) ปริมาตร 70 มิลลิลิตรในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร
5. นำสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต 15 มิลลิลิตร สารละลายแอนติโมนีโพแทสเซียมทาเทรต 5 มิลลิลิตร สารละลายกรดแอสคอร์บิก 30 มิลลิลิตร และสารละลายกรดซัลฟิวริก 5 นอร์มอล 50 มิลลิลิตร ผสมในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร

3.3.4 การเตรียมสารละลายโซเดียมเททระบอเรต

1. ชั่งสารโซเดียมเททระบอเรต จำนวน 0.75 และ 1.25 กรัมตามลำดับ
2. ละลายโซเดียมเททระบอเรตในน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร
3. จะได้สารละลายโซเดียมเททระบอเรตความเข้มข้น 0.6% w/w และ 1.0% w/w ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

1. ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ 0.2940 และ 0.7350 กรัม
2. ละลายในน้ำกลั่นใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตร
3. จะได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.02 และ 0.05 โมลาร์ ตามลำดับ

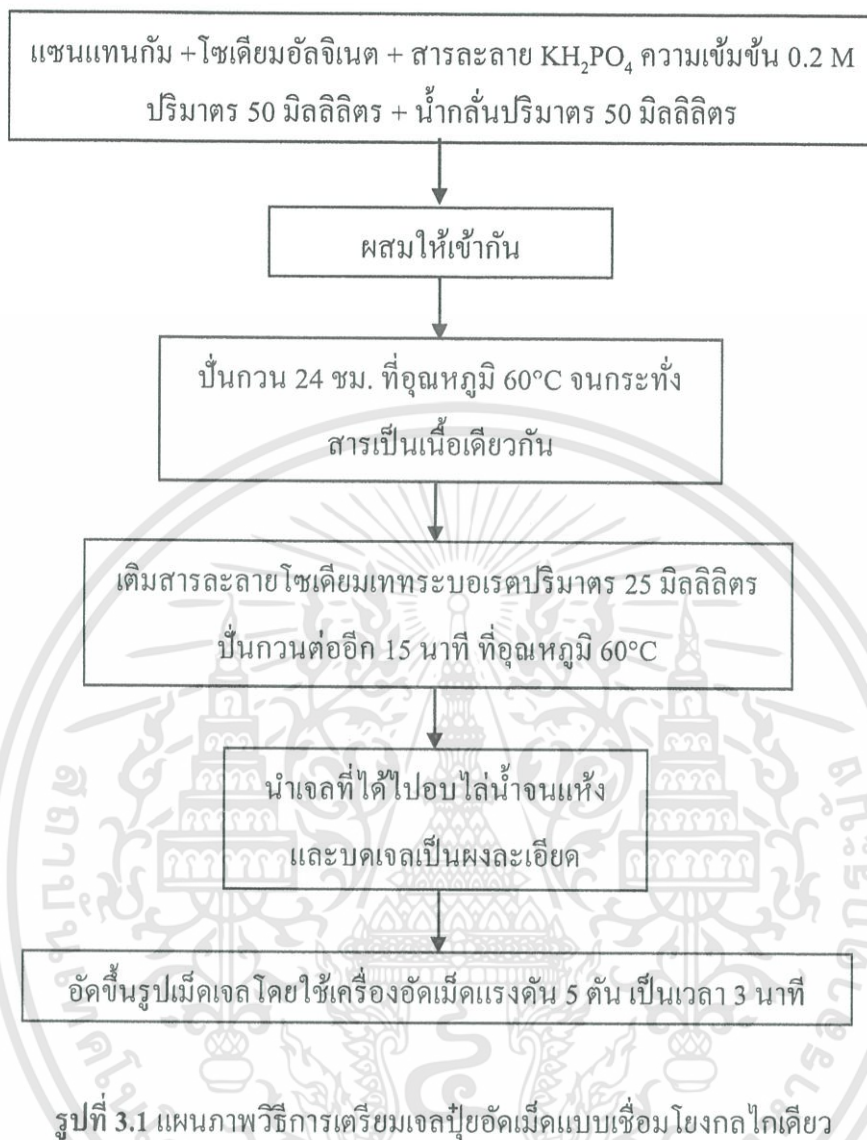
3.3.6 การเตรียมสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

1. ชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต 0.2497 และ 0.4994 กรัม
2. ละลายในน้ำกลั่นใส่ลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตร
3. จะได้สารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตเข้มข้น 0.02 และ 0.05 โมลาร์ ตามลำดับ

3.4 ขั้นตอนการเตรียมเจลปฏิกิริยา

3.4.1 การเตรียมเจลปฏิกิริยาแบบเชื่อมโยงกลไกเดียว

1. ชั่งเซนแทนและโซเดียมอัลจินเตตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 (น้ำหนักรวม 2.5 กรัม)
2. ผสมเซนแทนและโซเดียมอัลจินเตเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ด้วยอัตราส่วนของผสม: ปริมาตรสารละลายเท่ากับ 2.5:100 (ปริมาณสารละลายประกอบด้วย สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาณ 50 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร) พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60°C
4. เติมสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตความเข้มข้น 1.0% w/w ปริมาตร 25 มิลลิลิตร
5. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบดเจลเป็นผงละเอียดโดยใช้โกร่งบดสาร
6. อัดขึ้นรูปเม็ดเจลโดยชั่งเจล 0.15 กรัม ใส่เครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน เป็นเวลา 3 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

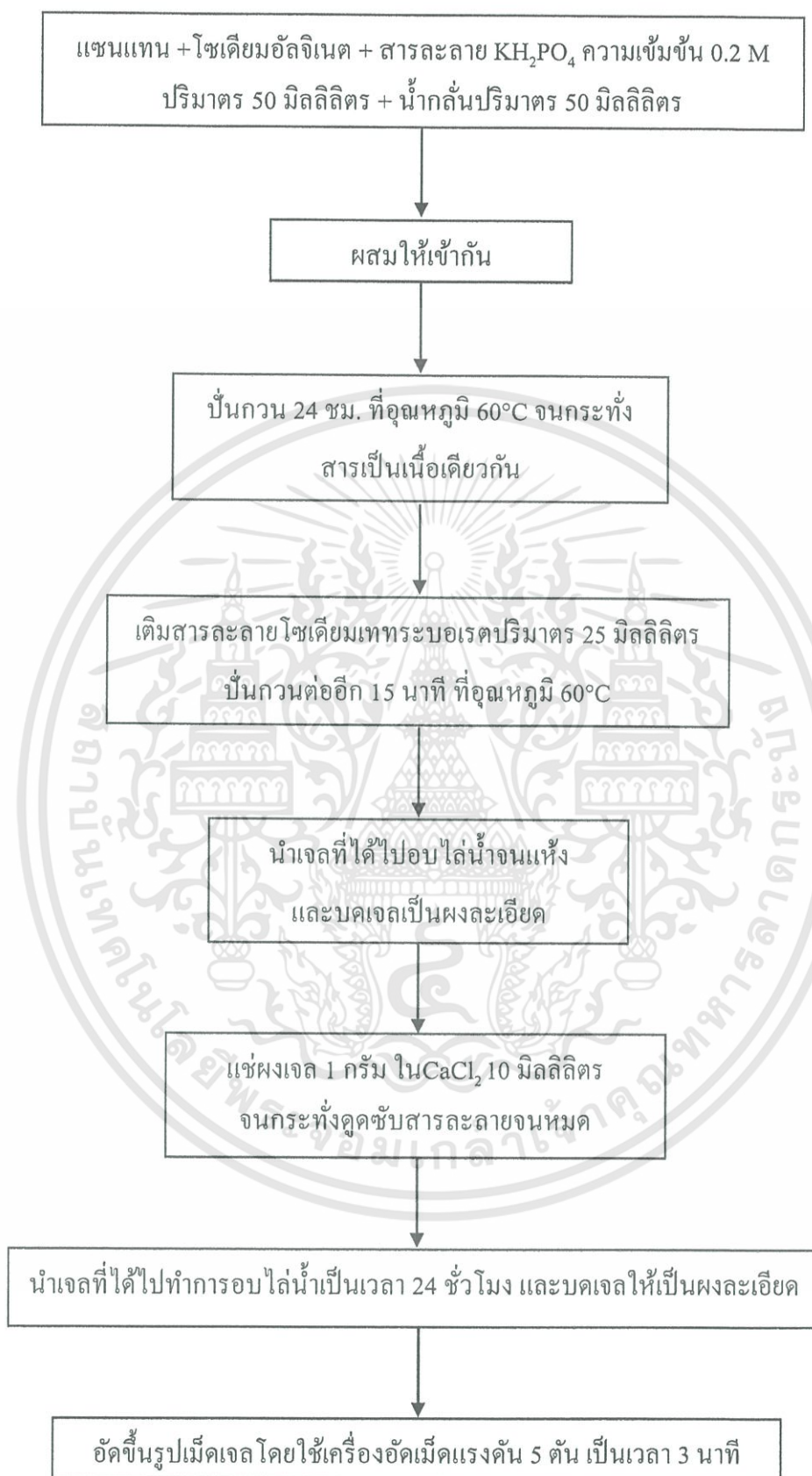
3.4.2 การเตรียมเจลปฏิกิริยาเชื่อมโยง 2 กลไก

3.4.2.1 การเชื่อมโยงกลไกที่ 1

1. ชั่งแขนแทนและ โซเดียมอัลจินเตตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 (น้ำหนักรวม 2.5 กรัม)
2. ผสมแขนแทนและ โซเดียมอัลจินเตเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตด้วยอัตราส่วนของผสม: ปริมาณสารละลายเท่ากับ 2.5:100 (ปริมาณสารละลายประกอบด้วย สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.2 M ปริมาณ 50 มิลลิลิตร และน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร) พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C
4. เติมสารละลายโซเดียมเทรโบเรตความเข้มข้น 0.6% w/w ปริมาณ 25 มิลลิลิตร
5. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที อบไล่น้ำที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบดเจลเป็นผงละเอียดโดยใช้โกร่งบดสาร

3.4.2.2 การเชื่อมโยงกลไกที่ 2

1. นำเจลที่บดแล้ว 1 กรัม จากตอนที่ 3.4.2.1 ใส่บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.02 M ปริมาณ 10 มิลลิลิตร
3. ตั้งทิ้งไว้ จนไฮโดรเจลดูดสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ทั้งหมด
4. นำไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงแล้ว เข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. นำไฮโดรเจลที่อบไล่น้ำแล้ว มาบดให้ละเอียดโดยใช้โกร่งบดสารพร้อมอัดขึ้นรูปเม็ดเจลโดยใช้เครื่องแรงดัน 5 ตัน เป็นเวลา 3 นาที



รูปที่ 3.2 แผนภาพวิธีการเตรียมเจลปูอัดเม็ดแบบเชื่อมโยง 2 กลไก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของเจลปฏิกิริยาอิมัลชันที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียว

สูตร ที่	สูตร	องค์ประกอบ (% โดยน้ำหนัก)		องค์ประกอบ (กรัม)		ความเข้มข้นของ สารละลาย โซเดียมเททระ บอเรต (% โดยน้ำหนัก)
		แซน แทน	โซเดียมอัลจิ เนต	แซน แทน	โซเดียมอัลจิ เนต	
1	X0A10	0	100	0	2.50	0
2	X1A9	10	90	0.25	2.25	
3	X2A8	20	80	0.50	2.00	
4	X3A7	30	70	0.75	1.75	
5	X4A6	40	60	1.00	1.50	
6	X5A5	50	50	1.25	1.25	
7	X0A10B0.6	0	100	0	2.50	0.6
8	X1A9B0.6	10	90	0.25	2.25	
9	X2A8B0.6	20	80	0.50	2.00	
10	X3A7B0.6	30	70	0.75	1.75	
11	X4A6B0.6	40	60	1.00	1.50	
12	X5A5B0.6	50	50	1.25	1.25	
13	X0A10B1.0	0	100	0	2.50	1.0
14	X1A9B1.0	10	90	0.25	2.25	
15	X2A8B1.0	20	80	0.50	2.00	
16	X3A7B1.0	30	70	0.75	1.75	
17	X4A6B1.0	40	60	1.00	1.50	
18	X5A5B1.0	50	50	1.25	1.25	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของเจลปฏิกิริยาอิมัลชันที่มีการเชื่อมโยง 2 กลไก

สูตรที่	สูตร	แขนแทน (กรัม)	โซเดียม-อัลจิเนต (กรัม)	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเททระโบเรต (%โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (M)	ความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต (M)
13	X1A9B0.6Ca02	0.25	2.25	0.6	0.02	-
14	X3A7B0.6Ca02	0.75	1.75			
15	X5A5B0.6Ca02	1.25	1.25			
16	X1A9B0.6Ca05	0.25	2.25	0.6	0.05	-
17	X3A7B0.6Ca05	0.75	1.75			
18	X5A5B0.6Ca05	1.25	1.25			
19	X1A9B0.6Cu02	0.25	2.25	0.6	-	0.02
20	X3A7B0.6Cu02	0.75	1.75			
21	X5A5B0.6Cu02	1.25	1.25			
22	X1A9B0.6Cu05	0.25	2.25	0.6	-	0.05
23	X3A7B0.6Cu05	0.75	1.75			
24	X5A5B0.6Cu05	1.25	1.25			
25	X1A9B1.0Ca02	0.25	2.25	1.0	0.02	-
26	X3A7B1.0Ca02	0.75	1.75			
27	X5A5B1.0Ca02	1.25	1.25			
28	X1A9B1.0Ca05	0.25	2.25	1.0	0.05	-
29	X3A7B1.0Ca05	0.75	1.75			
30	X5A5B1.0Ca05	1.25	1.25			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

สูตร ที่	สูตร	แซน แทน (กรัม)	โซเดียม- อัลจิเนต (กรัม)	ความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียม เททระโบเรต (%โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นของ สารละลาย แคลเซียมคลอไรด์ (M)	ความเข้มข้นของ สารละลาย คอปเปอร์ซัลเฟต (M)
31	X1A9B1.0Cu02	0.25	2.25			
32	X3A7B1.0Cu02	0.75	1.75	1.0	-	0.02
33	X5A5B1.0Cu02	1.25	1.25			
34	X1A9B1.0Cu05	0.25	2.25			
35	X3A7B1.0Cu05	0.75	1.75	1.0	-	0.05
36	X5A5B1.0Cu05	1.25	1.25			

3.5 การตรวจวัดขนาดอนุภาคเจลปุย

1. นำเจลปุยอบแห้งมาบดเป็นผงให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร
2. เตรียมเจลปุยบดละเอียดใส่แผ่น Glass slide แล้วปิดทับด้วย Cover slit
3. นำเจลปุยบดละเอียดที่เตรียมไว้ไปตรวจวัดขนาดอนุภาคโดยใช้กล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2 กำลังขยาย 200x โดยส้อมวัดขนาดอนุภาค 50 จุด พร้อมหาค่าเฉลี่ย

3.6 การหาความหนาแน่นของเจลปุยอัดเม็ด

1. ชั่งน้ำหนักเจลปุยที่บดแล้วความละเอียดให้มีทศนิยม 4 ตำแหน่ง ประมาณ 0.15 กรัม
2. นำผงเจลปุยบดละเอียดที่ชั่งมาใส่แม่พิมพ์
3. อัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน เป็นเวลา 3 นาที
4. วัดค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และชั่งน้ำหนักเจลปุยอัดเม็ด โดยทำทั้งหมด 3 ซ้ำ
5. คำนวณหาค่าความหนาแน่นโดยใช้สูตร

$$\text{ความหนาแน่นเจลปุยอัดเม็ด} = \frac{\text{น้ำหนักเจลปุยอัดเม็ด}}{\pi r^2 \times \text{ความหนาของเจลปุยอัดเม็ด}}$$

3.7 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของเจลในน้ำกลั่น

1. ชั่งน้ำหนักเจลป้อนบดให้มีความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ประมาณ 0.1500 กรัม
2. อัดขึ้นรูปเม็ดเจล โดยใช้เครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน
3. ชั่งน้ำหนักตะแกรงลวดเปล่า
4. ห่อเจลป้อนอัดเม็ดด้วยตะแกรงลวดขนาด 400 เมช พร้อมชั่งน้ำหนัก
5. แช่ตะแกรงลวดที่มีเจลป้อนอัดเม็ดอยู่ในลงในน้ำกลั่น
6. ชั่งน้ำหนักที่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90 นาทีแรก และทุกๆ 1 ชม. ถัดไปโดยแต่ละสูตรทำทั้งหมด 3 ซ้ำ
7. คำนวณหาการบวมตัว ตามสมการดังต่อไปนี้

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

3.8 วิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต

3.8.1 การเตรียม Calibration Curve

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เตรียมไว้ (หัวข้อ 3.3.1) ปริมาตร 40 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เตรียมได้ ปริมาตร 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เติม Ascorbic acid reagent ปริมาตร 10 มิลลิลิตรลงในแต่ละขวด ผสมให้เข้ากัน และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร ค่า Standard phosphate reagent ที่เป็น 0 เป็น Reagent blank
4. นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตและปริมาณของฟอสเฟตไปสร้างกราฟ โดยแกน X คือ ปริมาณฟอสเฟต และแกน Y เป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

3.8.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อยจากปุ๋ยอัดเม็ด

1. นำเจลป้อนอัดเม็คน้ำหนักประมาณ 0.1500 กรัม แช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร
2. เก็บน้ำตัวอย่างในช่วงเวลา 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 240, 300, 360 1,440 และ 2,880 นาทีตามลำดับ
3. ปิเปตน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองปริมาตร 1 มิลลิลิตร โดยใช้ไมโครปิเปต ที่เวลาต่างๆ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร
4. ปิเปตน้ำตัวอย่างจากข้อ 3 ในปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เติม Ascorbic acid reagent 10 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเท่ากับ 880 นาโนเมตร

6. นำค่าการดูดกลืนแสงของเจลปุยอัดเม็ดมาเทียบกับกราฟมาตรฐานจากหัวข้อ

3.8.1 (โดยสารละลาย KH_2PO_4 1.00 mL มี $= 10 \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$)

จากกราฟได้ปริมาณสารละลาย KH_2PO_4 มาตรฐาน เท่ากับ X มิลลิลิตร คิดเป็นปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เท่ากับ $10X \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$

∴ น้ำตัวอย่าง ปริมาตร 1 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัส เท่ากับ $10X \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$ แซ่เจลปุยอัดเม็ด ในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตรมีปริมาณฟอสฟอรัส เท่ากับ $30 \times (10X) = Y \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$ ต่อเจลปุยอัดเม็ด 0.1500 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน 1.0000 กรัมเจล (gel + KH_2PO_4)

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

เจลปุยอัดเม็ด 1.0000 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตเท่ากับ $\frac{Y}{0.1500} \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$

∴ ใน 1.000 กรัม เจลปุยอัดเม็ดมีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต

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

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

3.8.3 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในเจลจากการคำนวณ

ทำการชั่งผงเจลปุยบดละเอียด 2.5000 กรัม แซ่ลงในสารละลาย KH_2PO_4 0.2 M จำนวน 50 มล.

คำนวณหาปริมาณ KH_2PO_4 ในสารละลาย KH_2PO_4 0.2 M ปริมาตร 50 มล.

สารละลาย KH_2PO_4 1000 มล. มี KH_2PO_4 27.2167 กรัม

สารละลาย KH_2PO_4 50 มล. มี KH_2PO_4 $(27.2167 \times 50)/1000 = 1.3608$ กรัม

∴ ในสารละลาย KH_2PO_4 50 มล. ที่ดูดซับเข้าในเจลปุยอัดเม็ดมีปริมาณ KH_2PO_4 เท่ากับ 1.3608 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน KH_2PO_4 1.3608 กรัม

ใน KH_2PO_4 136.0838 กรัม มี P 31 กรัม

ใน KH_2PO_4 1.3608 กรัม มี P $(31 \times 1.3608)/136.0838 = 0.31$ กรัม

∴ ใน KH_2PO_4 1.3608 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.31 กรัม

∴ เจลปุยอัดเม็ด มีน้ำหนักรวม = $2.5000 + 1.3608 = 3.8608$ กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน 1 กรัมเจล (gel + KH₂PO₄)

gel + KH₂PO₄ 3.8608 กรัม มี P 0.31 กรัม

gel + KH₂PO₄ 1.0000 กรัม มี P $(0.31 \times 1.0000) / 3.8608 = 0.08029$ กรัม หรือ 80.29 มิลลิกรัม

∴ ใน 1 กรัมเจล (gel + KH₂PO₄) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 80.29 มิลลิกรัม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลนี่ยัดเม็ดจากโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทน ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้มีการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ชีวภาพ [3, 5, 42, 43] โดยโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทน โดยมีโซเดียมเทตระบอเรต แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวเชื่อมโยง จากงานวิจัยก่อนหน้านี้เรื่องการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัม [4] ที่อัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัมเป็น 4:6 และ 6:4 โดยน้ำหนัก โดยใช้โซเดียมเทตระบอเรตความเข้มข้น 0.6% w/v และแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.05, 0.10 และ 0.25 M เป็นสารเชื่อมโยง ทำให้ทราบว่า การเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์มีผลต่ออัตราการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในเจลนี่ยัดเม็ด โดยเมื่อใช้แคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นสูง จะส่งผลให้เกิดสารประกอบของแคลเซียมและฟอสเฟตในรูปที่ตกตะกอน งานวิจัยนี้จึงศึกษาการเชื่อมโยงของแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่ำลง (0.02 และ 0.05 M) นอกจากนี้ยังศึกษาการใช้สารเชื่อมโยงคอปเปอร์ซัลเฟตด้วย

โครงการพิเศษนี้จึงศึกษาแนวโน้มน้ำอัตราการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในเจลนี่ยัดเม็ด โดยมีปัจจัยศึกษาที่อัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตกับแซนแทน และสารเชื่อมโยงที่ศึกษาผลของการเชื่อมโยงต่อการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโดยมีการเชื่อมโยง 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการเชื่อมโยงกลไกเดียว โดยใช้โซเดียมเทตระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยง และ แบบที่ 2 เป็นการเชื่อมโยงสองกลไก โดยใช้โซเดียมเทตระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยงกลไกที่ 1 และใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมโยงในกลไกที่ 2 หลังจากนั้นทำการอัดเป็นเม็ดและศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายอโรโซฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic acid method) ตรวจสอบด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร และศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของเจลนี่ยัดเม็ดทั้งแบบที่ไม่มีสารเชื่อมโยงและมีสารเชื่อมโยง

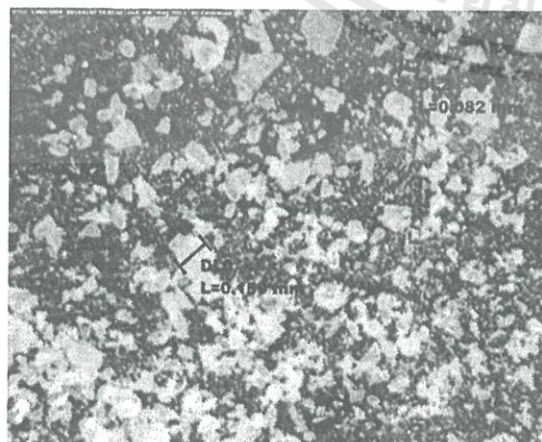
คำอธิบายสัญลักษณ์ของสูตรเจลปฏุย

- X1A9 คือไฮโดรเจลอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate (A) : Xanthan Gum (X) เท่ากับ 1:9
- X1A9B0.6 คือไฮโดรเจลอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate (A) : Xanthan Gum (X) เท่ากับ 1:9 และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรต 0.6% w/v
- X1A9B1.0 คือไฮโดรเจลอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate (A) : Xanthan Gum (X) เท่ากับ 1:9 และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรต 1.0% w/v
- X1A9B0.6Ca02 คือไฮโดรเจลอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate (A) : Xanthan Gum (X) เท่ากับ 1:9 และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรต 0.6% w/v กับ แคลเซียมคลอไรด์ 0.02 M
- X1A9B0.6Ca05 คือไฮโดรเจลอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate (A) : Xanthan Gum (X) เท่ากับ 1:9 และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรต 0.6% w/v กับ แคลเซียมคลอไรด์ 0.05 M
- X1A9B0.6Cu02 คือไฮโดรเจลอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate (A) : Xanthan Gum (X) เท่ากับ 1:9 และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรต 0.6% w/v กับ คอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 M
- X1A9B0.6Cu05 คือไฮโดรเจลอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate (A) : Xanthan Gum (X) เท่ากับ 1:9 และเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรต 0.6% w/v กับ คอปเปอร์ซัลเฟต 0.05 M

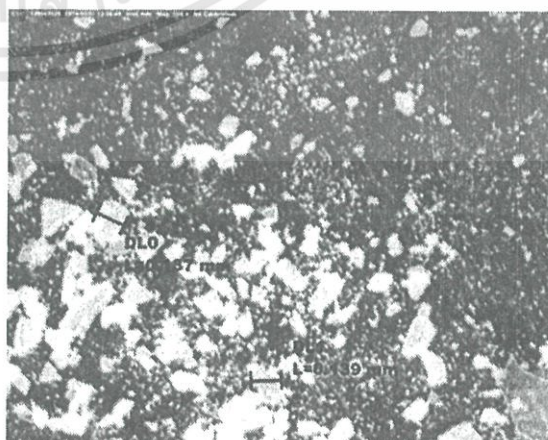
4.1 การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของเจลปฏุยอัดเม็ด

4.1.1 ขนาดอนุภาคของเจลปฏุยอัดเม็ด

ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเจลปฏุย นำไฮโดรเจลอบแห้งมาคเป็นผงด้วยโกรบคสาร แล้วนำไปวัดขนาดอนุภาคด้วยกล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2 กำลังขยาย 200X ภาพถ่ายอนุภาคผงเจลปฏุยแสดงดังรูปที่ 4.1 (จุดสีขาวคืออนุภาคของเจลปฏุย)

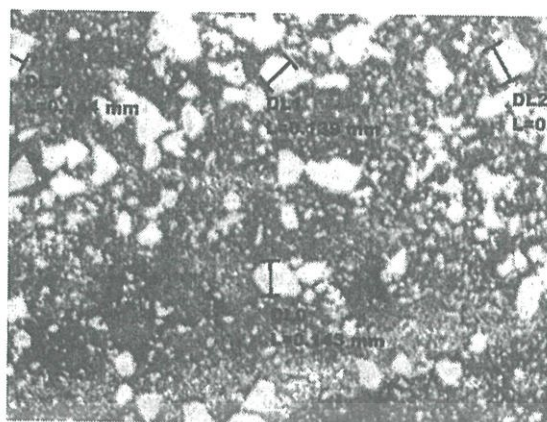


X1A9

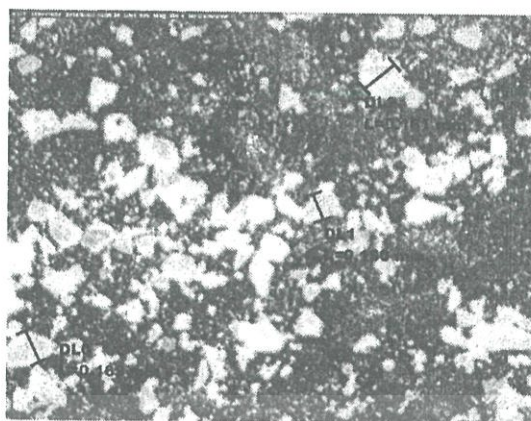


X1A9B0.6

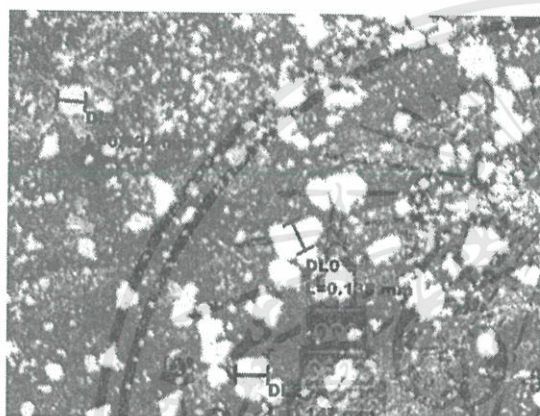
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



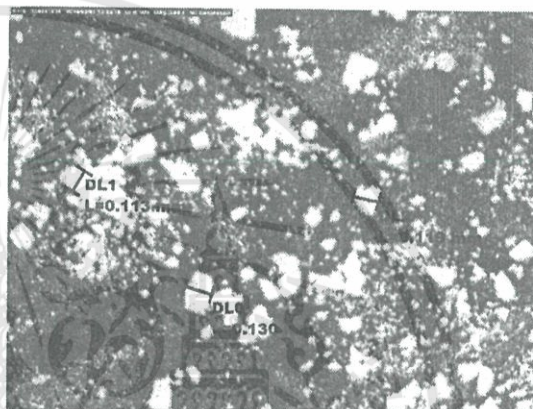
X1A9B0.6Ca02



X1A9B0.6Ca05



X1A9B0.6Cu02



X1A9B0.6Cu05

รูปที่ 4.1 ภาพของผงเจลปฏึกที่กระจายตัวบนแผ่นสไลด์ที่กำลังขยาย 200X

จากการตรวจวัดขนาดอนุภาคของผงเจลแห้งทั้ง 6 สูตร คือสูตร X1A9, X1A9B0.6, X1A9B0.6Ca0.02, X1A9B0.6Ca0.05, X1A9B0.6Cu0.02 และ X1A9B0.6Cu0.05 พบว่าในหกสูตร มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 78-147 μm ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.1 ส่วนการตรวจวัดขนาดอนุภาคของผงเจลแห้งทุกสูตร แสดงผลการวัดใน ภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.1 ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเจลปฏึก

สูตร	X1A9	X1A9 B0.6	X1A9B0.6 Ca0.02	X1A9B0.6 Ca0.05	X1A9B0.6 Cu0.02	X1A9B0.6 Cu0.05
ขนาดอนุภาค เฉลี่ย (μm)	111.74	106.62	103.56	103.92	105.28	103.34
ค่าต่ำสุด	82.00	83.00	78.00	81.00	80.00	78.00
ค่าสูงสุด	159.00	144.00	148.00	134.00	147.00	130.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

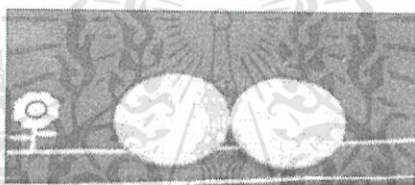
4.1.2 ความหนาแน่นของเจลปฏี้อัดเม็ด

นำไฮโดรเจลแบบผงมาอัดเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตันเป็นเวลา 3 นาที ได้เจลปฏี้อัดเม็ดแสดงดังรูปที่ 4.2 จากนั้นนำเจลปฏี้อัดเม็ดมาหาความหนาแน่น โดยวัดความหนา, เส้นผ่านศูนย์กลางและน้ำหนัก ทำการคำนวณหาความหนาแน่น โดยคำนวณจากสูตร

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

หมายเหตุ : r คือ รัศมีของเจลปฏี้อัดเม็ด

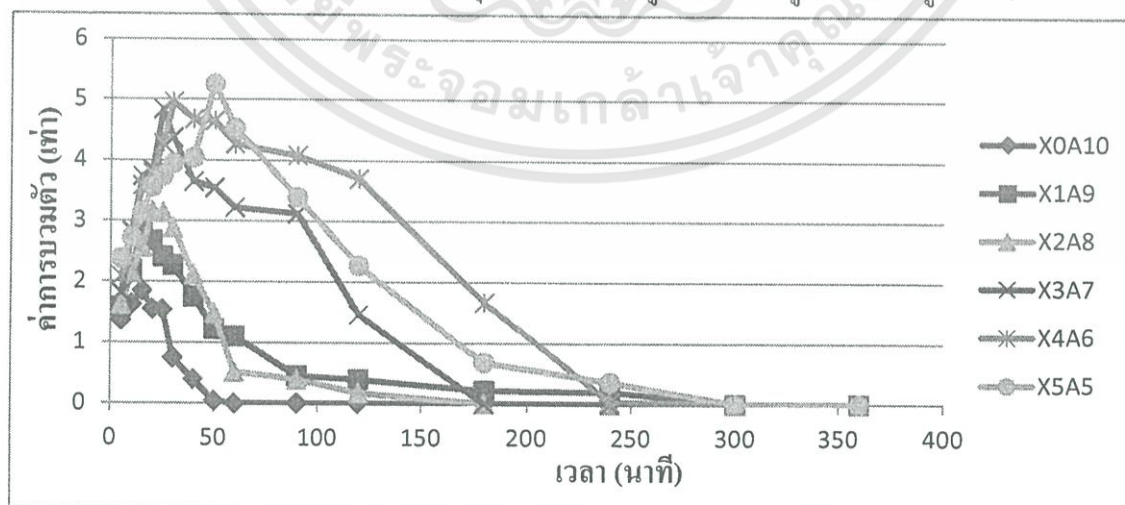
ผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ข โดยเจลปฏี้อัดเม็ดทุกสูตรมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.4650 – 1.7140 g/cm³



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างเจลปฏี้อัดเม็ด

4.1.3 พฤติกรรมการบวมตัวของเจลปฏี้อัดเม็ด

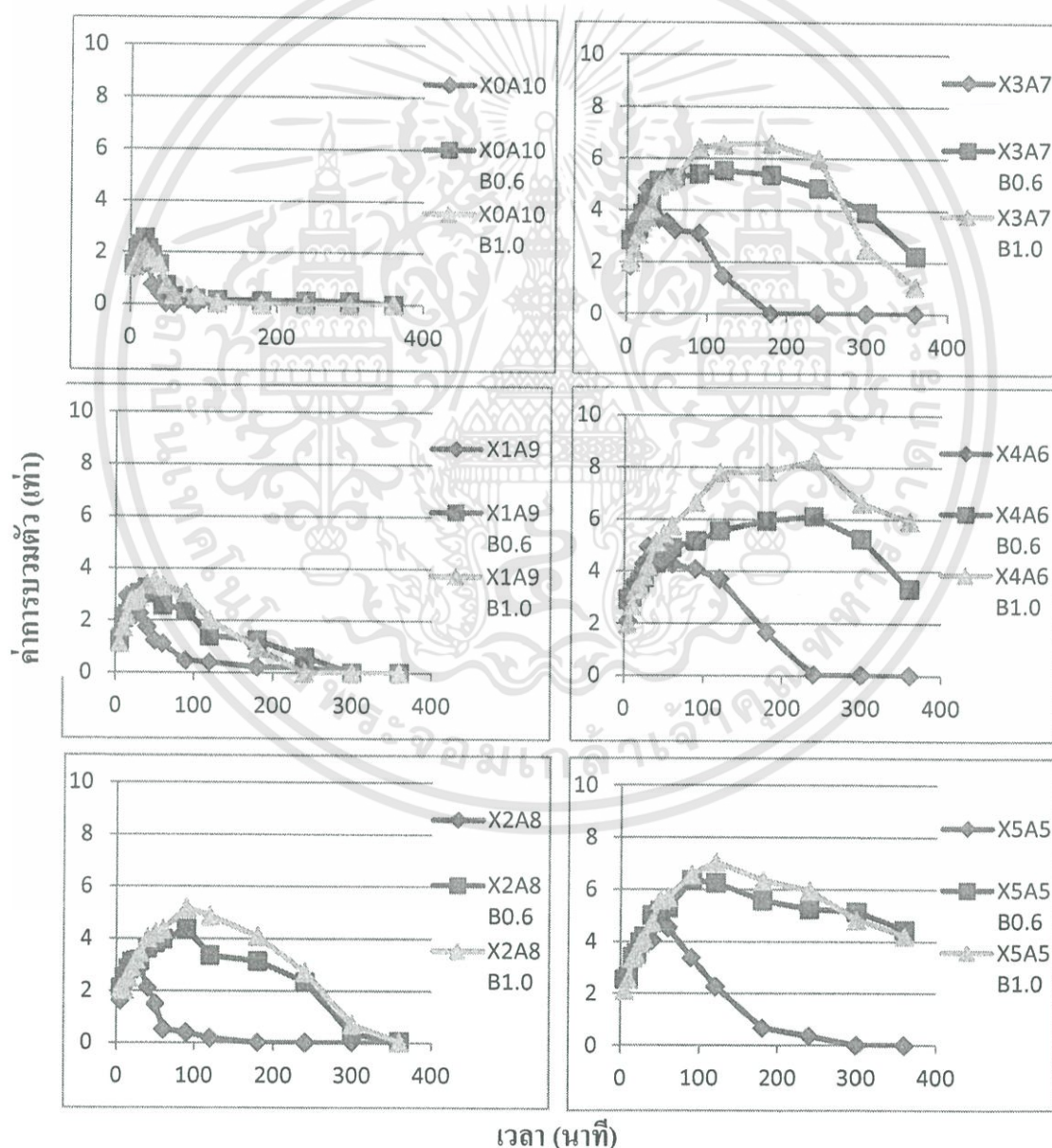
พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของเจลปฏี้อัดเม็ดจาก โซเดียมอัลจินเตกับแซนแทนในอัตราส่วนต่างๆ โดยมีการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเททระบอเรต แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟต จากการศึกษาการบวมตัวของเจลปฏี้อัดเม็ดแต่ละสูตรแสดงดังรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.3 กราฟการเปรียบเทียบพฤติกรรมการบวมตัวของเจลปฏี้อัดเม็ดสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

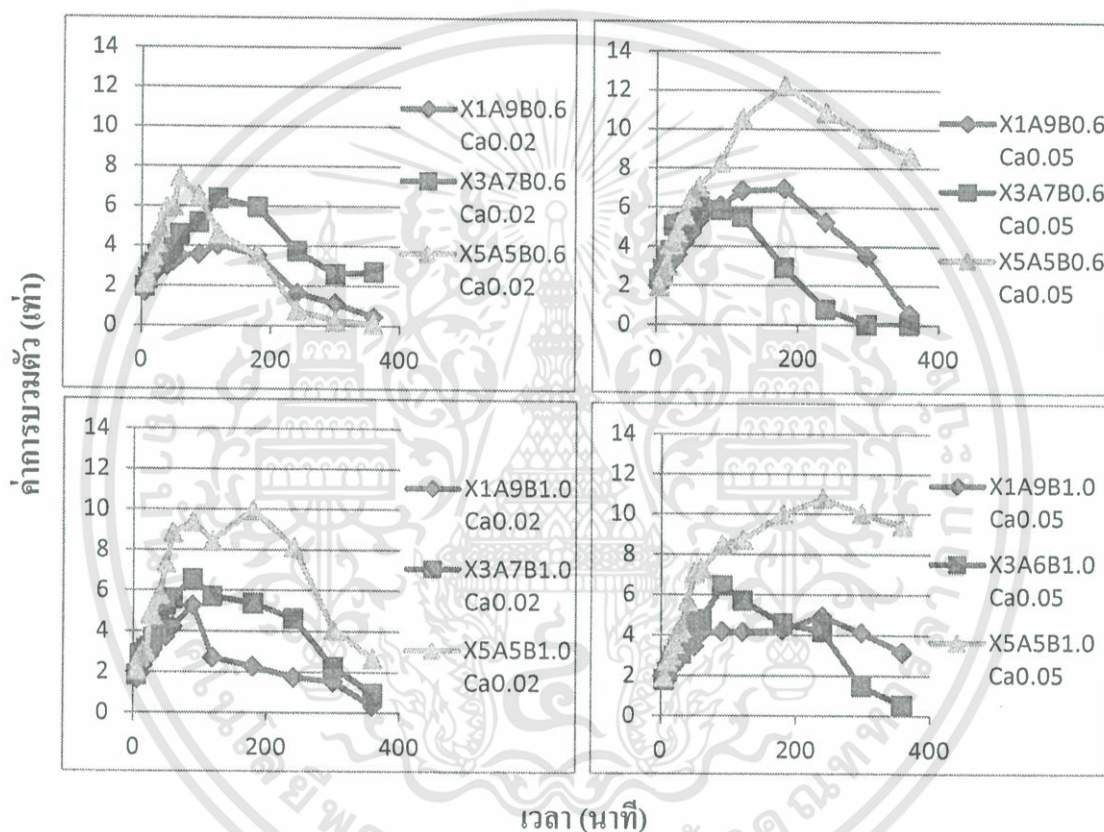
จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบผลต่อการบวมตัวของเจลปียัดเม็ดในอัตราส่วนที่ต่างกันของโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทนในสูตร X0A10, X1A9, X2A8, X3A7, X4A6 และ X5A5 ที่ไม่มีการเชื่อมโยง พบว่าจากสูตร X0A10 ถึงสูตร X5A5 มีแนวโน้มการบวมตัวเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนปริมาณของแซนแทน โดยดูจากจุดสูงสุดของเส้นกราฟแต่ละสูตรและเมื่อเปรียบเทียบผลต่อการละลายของเจลปียัดเม็ดในอัตราส่วนที่ต่างกัน พบว่าสูตร X0A10 มีการละลายที่รวดเร็วที่สุด ซึ่งละลายหมดภายในเวลา 60 นาที แสดงให้เห็นว่า โซเดียมอัลจิเนตมีความสามารถในการละลายที่รวดเร็วกว่าแซนแทน โดยแซนแทนสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างในปริมาณที่มากกว่าก่อนที่จะเกิดการละลาย



รูปที่ 4.4 กราฟการเปรียบเทียบพฤติกรรมกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลอัดเม็ดระหว่างสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยงกับสูตรที่มีการเชื่อมโยงแบบกลไกเดียว ด้วยสารละลายโซเดียมเททระโบเรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจลอัดเม็ดระหว่างสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยงกับสูตรที่มีการเชื่อมโยงแบบกอลลูโคเดียว ด้วยสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/v และ ความเข้มข้น 1.0% w/v พบว่า เมื่อเพิ่มสารเชื่อมโยงในเจลปฏิกิริยาอัดเม็ด ทำให้ค่าการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น อัตราการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากภายในโครงสร้างไฮโดรเจลมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น เมื่อน้ำเข้าไปแทรกในโครงสร้างไฮโดรเจลพันธะเชื่อมโยง จะทำหน้าที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของโมเลกุลไม่ให้หลุดออกจากกัน ส่งผลให้การละลายของไฮโดรเจลช้าลง และอุ้มน้ำได้ในปริมาณมากขึ้น โดยผลของความแตกต่างจะเห็นได้อย่างชัดเจนในสูตรที่มีปริมาณแซนแทนมากขึ้น

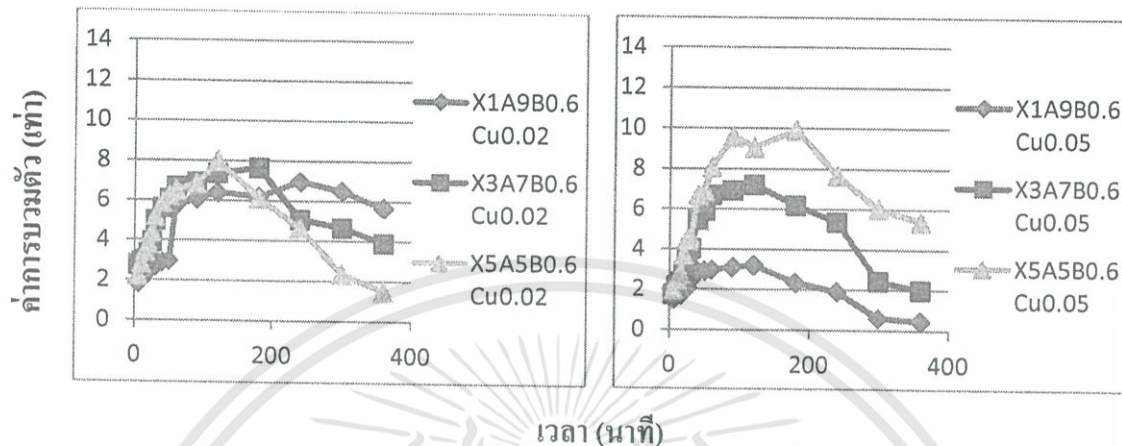


รูปที่ 4.5 กราฟพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจล เชื่อมโยงแบบ 2 กอลลูโคเดียว ด้วยสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตและสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

จากรูปที่ 4.5 เป็นการเปรียบเทียบไฮโดรเจลอัตราส่วนต่างๆ ของโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทน คือ X1A9, X3A7 และ X5A5 เชื่อมโยงแบบ 2 กอลลูโคเดียว ด้วยสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตความเข้มข้น 0.6% w/v และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.02 และ 0.05 โมลาร์ พบว่าสูตรที่มีปริมาณแซนแทนมาก (X5A5) มีอัตราการบวมตัวสูงสุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตเป็น 1.0% w/v พบว่าอัตราการบวมตัวของไฮโดรเจลแต่ละอัตราส่วนมีค่าการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น และคงตัวอยู่ได้นานขึ้น เนื่องจากภายในโครงสร้างไฮโดรเจลมีความหนาแน่น

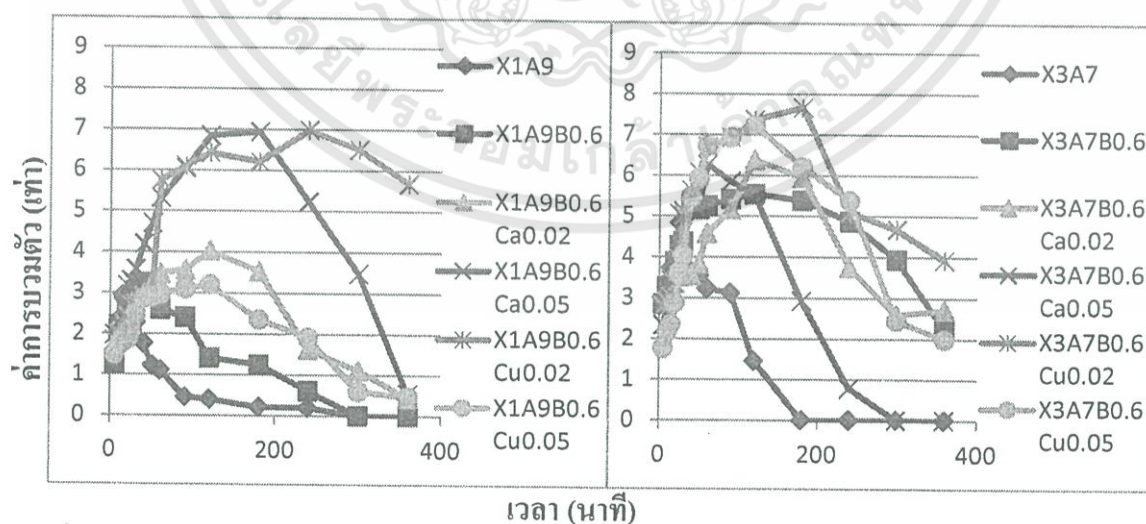
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการเชื่อมโยงมากขึ้น น้ำเข้าไปแทรกในโครงสร้างไฮโดรเจล และคงอยู่ได้นาน เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่มากขึ้นสามารถต้านทานการละลายได้ดีขึ้น นอกจากนี้ เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยงแคลเซียมคลอไรด์ ให้ผลการบวมตัวในทำนองเดียวกัน คือ ค่าการบวมตัวสูงสุดสูงขึ้น และคงตัวได้นานขึ้น



รูปที่ 4.6 กราฟพฤติกรรม การบวมตัวไฮโดรเจล เชื่อมโยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเททระโบเรต และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน

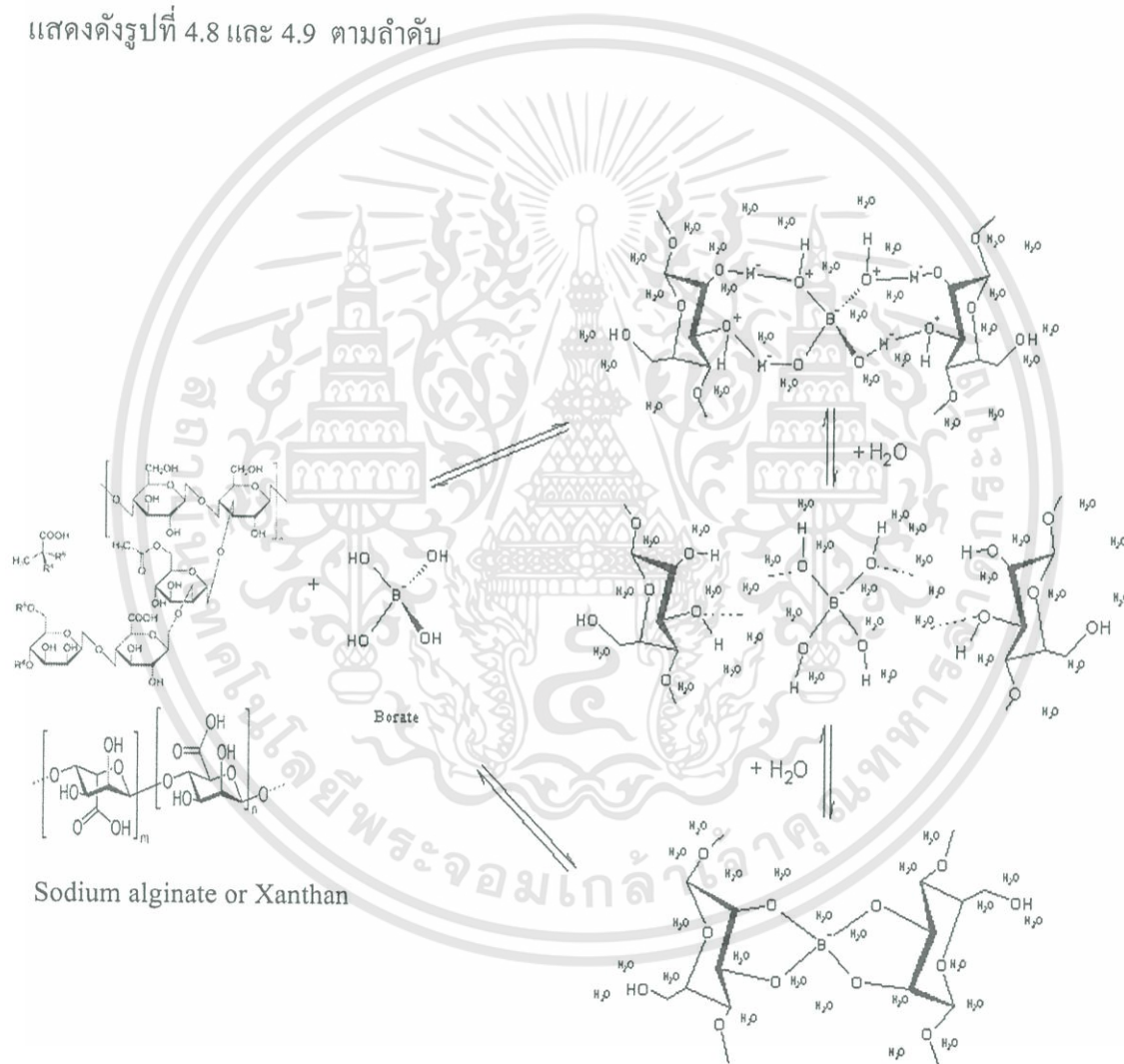
จากรูปที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบไฮโดรเจลอัตราส่วนต่างๆ ของโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทน คือ X1A9, X3A7 และ X5A5 เชื่อมโยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเททระโบเรต ความเข้มข้น 0.6% w/v และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 และ 0.05 โมลาร์พบว่า สูตร X5A5 มีค่าการบวมตัวสูง และคงที่ได้นาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตร X5A5B0.6Cu0.05 มีค่าการบวมตัวสูงสุดที่ประมาณ 10 เท่า และคงตัวอยู่ได้นาน ทั้งนี้เหตุผลเนื่องจากการสร้างพันธะเชื่อมโยงของทั้งโซเดียมเททระโบเรต และคอปเปอร์ซัลเฟต



รูปที่ 4.7 กราฟพฤติกรรม การบวมตัวไฮโดรเจล ที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระโบเรต สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน

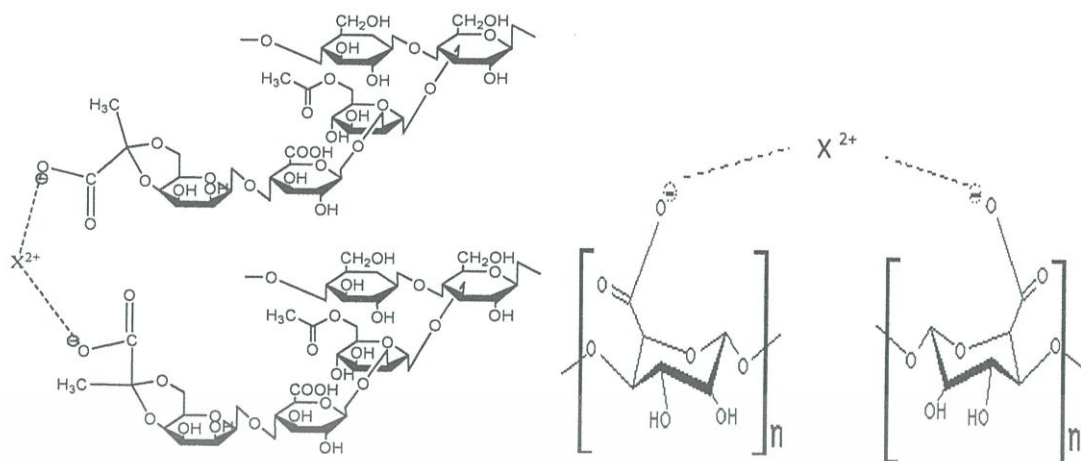
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบเจลบูยอัดเม็ดของโซเดียมอัลจินเตและแซนแทนที่อัตราส่วน X1A9 และ X3A7 พบว่าเจลบูยอัดเม็ดที่ไม่มีการเชื่อมโยงมีค่าการบวมตัวต่ำ และเมื่อทำการเชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเทตระโบเรตความเข้มข้น 0.6% w/v การบวมตัวมีค่าสูงขึ้น และเมื่อทำการเชื่อมโยง 2 กลไก ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน พบว่าเจลบูยอัดเม็ดมีค่าการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น ในสูตร X3A7B0.6Cu0.02 มีค่าสูงสุด ที่ประมาณ 8 เท่า และคงตัวอยู่ได้นาน ทั้งนี้เหตุผลเนื่องจากการสร้างพันธะเชื่อมโยงของทั้งโซเดียมเทตระโบเรต และคอปเปอร์ซัลเฟต หรือ แคลเซียมคลอไรด์ โดยรูปแบบการเชื่อมโยงแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 การเชื่อมโยงเจลด้วยบอแรกซ์ และการเสถียรภาพเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์ระหว่างแซนแทนกับแซนแทน และอัลจินตกับอัลจินต

4.2 พฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลปูยอัดเม็ด

นำเจลปูยอัดเม็ดแต่ละสูตรมาแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วจึงเก็บน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 1 มิลลิลิตรที่เวลาต่างๆ กัน นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เทคนิควิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic acid method) ผลการทดลองแสดงใน ภาคผนวก ง

การคำนวณปริมาณมิลลิกรัมของฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในเจลปูยอัดเม็ด

ทำการชั่งผงเจลปูยบดละเอียด 2.5000 กรัม แฉ่งลงในสารละลาย KH_2PO_4 0.2M จำนวน 50 มล.

คำนวณหาปริมาณ KH_2PO_4 ในสารละลาย KH_2PO_4 0.2 M ปริมาตร 50 มล.

สารละลาย KH_2PO_4 1000 มล. มี KH_2PO_4 27.2167 กรัม

สารละลาย KH_2PO_4 50 มล. มี KH_2PO_4 $(27.2167 \times 50)/1000 = 1.3608$ กรัม

∴ ในสารละลาย KH_2PO_4 50 มล. ที่ดูดซับเข้าในเจลปูยอัดเม็ดมีปริมาณ KH_2PO_4 เท่ากับ 1.3608 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน KH_2PO_4 1.3608 กรัม

ใน KH_2PO_4 136.0838 กรัม มี P 31 กรัม

ใน KH_2PO_4 1.3608 กรัม มี P $(31 \times 1.3608)/136.0838 = 0.31$ กรัม

∴ ใน KH_2PO_4 1.3608 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.31 กรัม

∴ เจลปูยอัดเม็ด มีน้ำหนักรวม = $2.5000 + 1.3608 = 3.8608$ กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$\text{gel} + \text{KH}_2\text{PO}_4$ 3.8608 กรัม มี P 0.31 กรัม

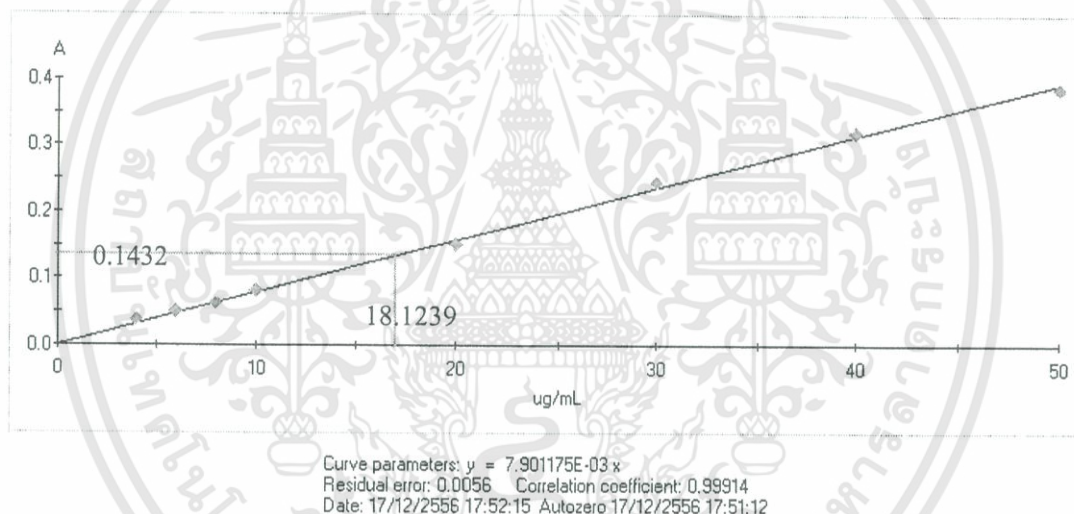
$\text{gel} + \text{KH}_2\text{PO}_4$ 1.0000 กรัม มี P $(0.31 \times 1.0000) / 3.8608 = 0.08029$ กรัม

หรือ 80.29 มิลลิกรัม

∴ ใน 1 กรัมเจล ($\text{gel} + \text{KH}_2\text{PO}_4$) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 80.29 มิลลิกรัม

ตัวอย่างแสดงการคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดในสารตัวอย่าง 50 มล. (มล.-P)

ตัวอย่างเช่น นำน้ำตัวอย่างของเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร X1A9 ที่เวลา 30 นาที ซึ่งเจลปุ๋ยอัดเม็ดมีน้ำหนักเฉลี่ย 0.1516 กรัม มาวัดค่าดูดกลืนแสงโดยใช้เทคนิควิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic acid method) นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาปริมาณฟอสฟอรัสจากกราฟมาตรฐาน



รูปที่ 4.10 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเปรียบเทียบปริมาณฟอสเฟต

จากรูปที่ 4.10 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต = 50 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต ($\mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$) โดยเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร X1A9 มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.1432 เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานจะมีปริมาณฟอสเฟตเท่ากับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 181.239 $\mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$ หรือ 0.1812 mg $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

จากการทดลองได้นำเจลญี่ปุ่นอัดเม็ด หนัก 0.1516 กรัม แช่ในน้ำกลั่น จำนวน 30 มล. แต่เก็บน้ำตัวอย่างมาตรวจวัด 1 มล. ดังนั้นจะมีปริมาณฟอสเฟตที่ปลดปล่อยจากเจลญี่ปุ่นอัดเม็ดที่เวลา 30 นาที เท่ากับ $0.1812 \times 30 = 5.4372$ มก. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ ต่อเจลญี่ปุ่นอัดเม็ด 0.1516 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัส/เจลญี่ปุ่นอัดเม็ด (มล.-P/ 1 กรัม)

gel + KH_2PO_4 0.1516 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 5.4372 มก. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

gel + KH_2PO_4 1.0000 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส $(5.4372 \times 1.0000) / 0.1516 = 35.87$ มก. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

∴ ใน 1.0000 กรัมเจลญี่ปุ่นอัดเม็ด (gel + KH_2PO_4) มีปริมาณฟอสเฟต 35.87 มก. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

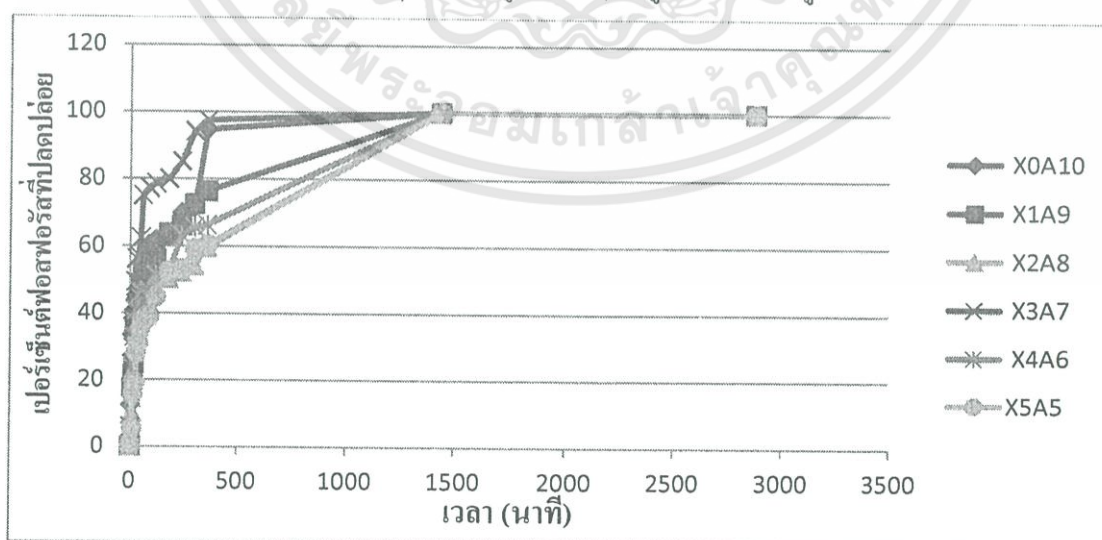
หมายเหตุ สำหรับค่าอื่นๆ ทำการคำนวณในลักษณะเดียวกัน และค่าทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลญี่ปุ่นอัดเม็ด

จากข้อมูลเบื้องต้น ใน 1.0000 กรัมเจล (gel + KH_2PO_4) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 35.87 มิลลิกรัม ณ เวลา 30 นาที คิดเป็นปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัส เท่ากับ $35.87 \times 100 / 80.29 = 44.67\%$

หมายเหตุ สำหรับค่าอื่นๆ ทำการคำนวณในลักษณะเดียวกัน และค่าทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง

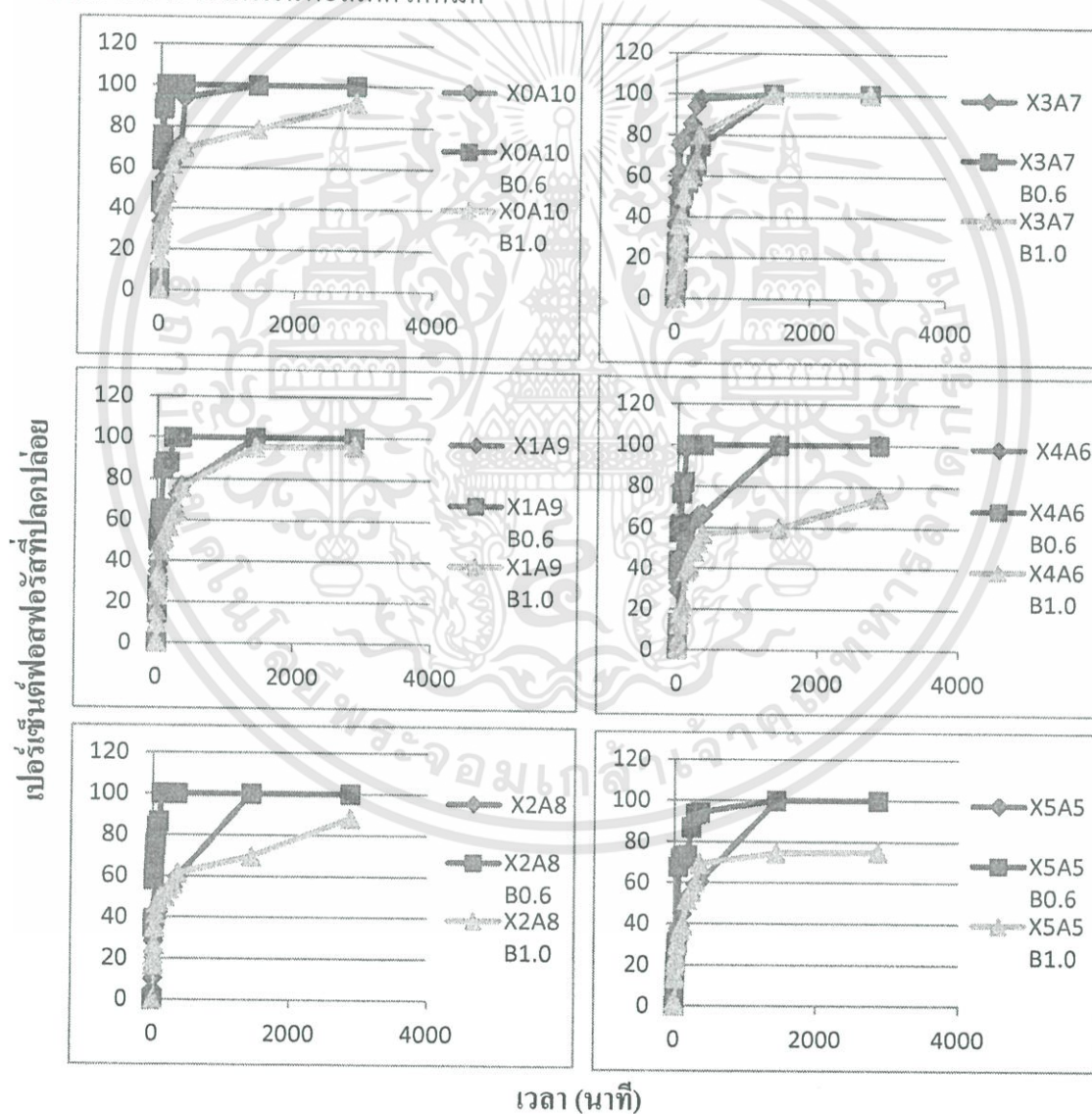
นำค่าจากตารางภาคผนวก ง มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับเปอร์เซ็นต์ปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของเจลญี่ปุ่นอัดเม็ดสูตรต่างๆ ดังรูปที่ 4.11 ถึง รูปที่ 4.15



รูปที่ 4.11 พฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลญี่ปุ่นอัดเม็ดสูตรที่ไม่มีสารเชื่อมโย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

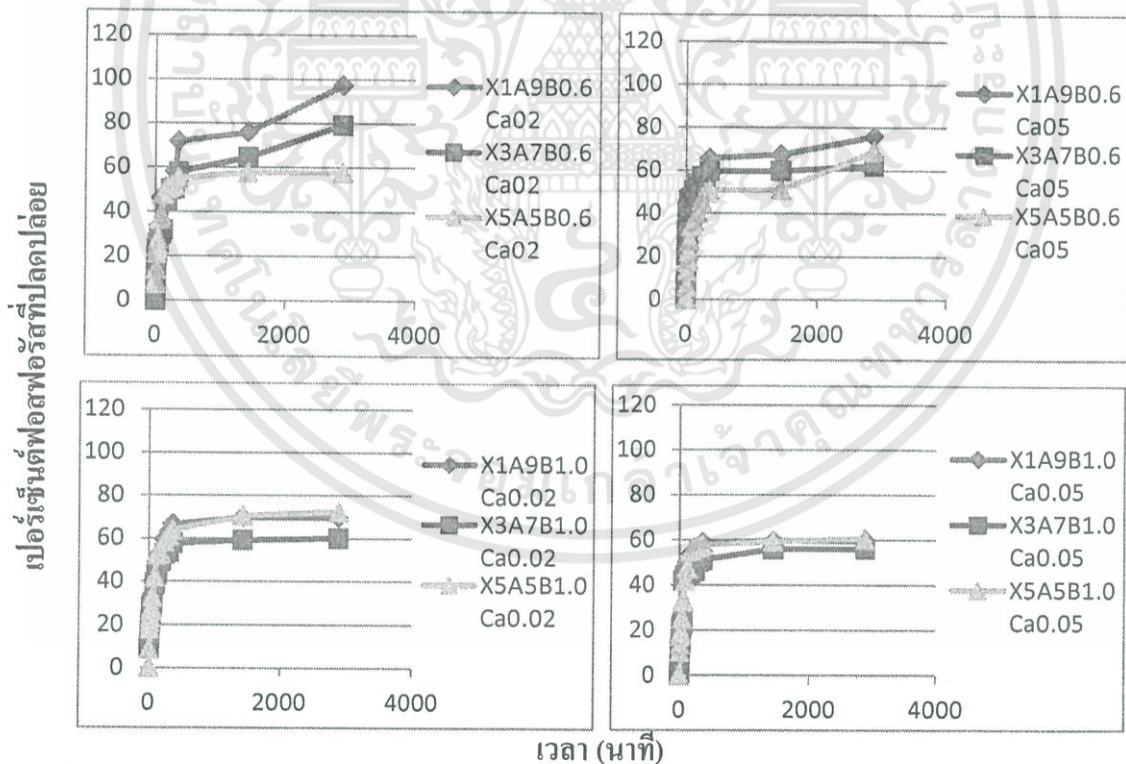
จากรูปที่ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลนุ้ยอัดเม็ดสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยงในอัตราส่วนที่ต่างกันของโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทนกัมในสูตร X0A10, X1A9, X2A8, X3A7, X4A6 และ X5A5 พบว่าเจลนุ้ยอัดเม็ดทั้ง 6 สูตรที่ไม่เชื่อมโยงมีแนวโน้มที่สามารถปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตได้ใกล้เคียงกัน โดยจะเห็นได้ว่า เจลนุ้ยอัดเม็ดมีการปลดปล่อยอย่างรวดเร็วในช่วงแรกตั้งแต่เวลา 5 นาที ถึง 60 นาที เนื่องจากเจลนุ้ยอัดเม็ดอยู่ในสภาพที่แห้ง เมื่อแช่ในน้ำทำให้น้ำแทรกเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างอย่างรวดเร็วในช่วงแรก โครงสร้างจึงมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้สารละลายที่อยู่ภายในถูกปลดปล่อยออกมาอย่างรวดเร็ว และจะปลดปล่อยช้าลงในช่วงหลัง จนครบ 24 ชั่วโมง (1,440 นาที) เจลนุ้ยอัดเม็ดทั้งหกสูตรซึ่งสามารถปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตได้หมด



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลนุ้ยอัดเม็ดระหว่างสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยงกับสูตรที่มีการเชื่อมโยงแบบกลไกเดียวด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

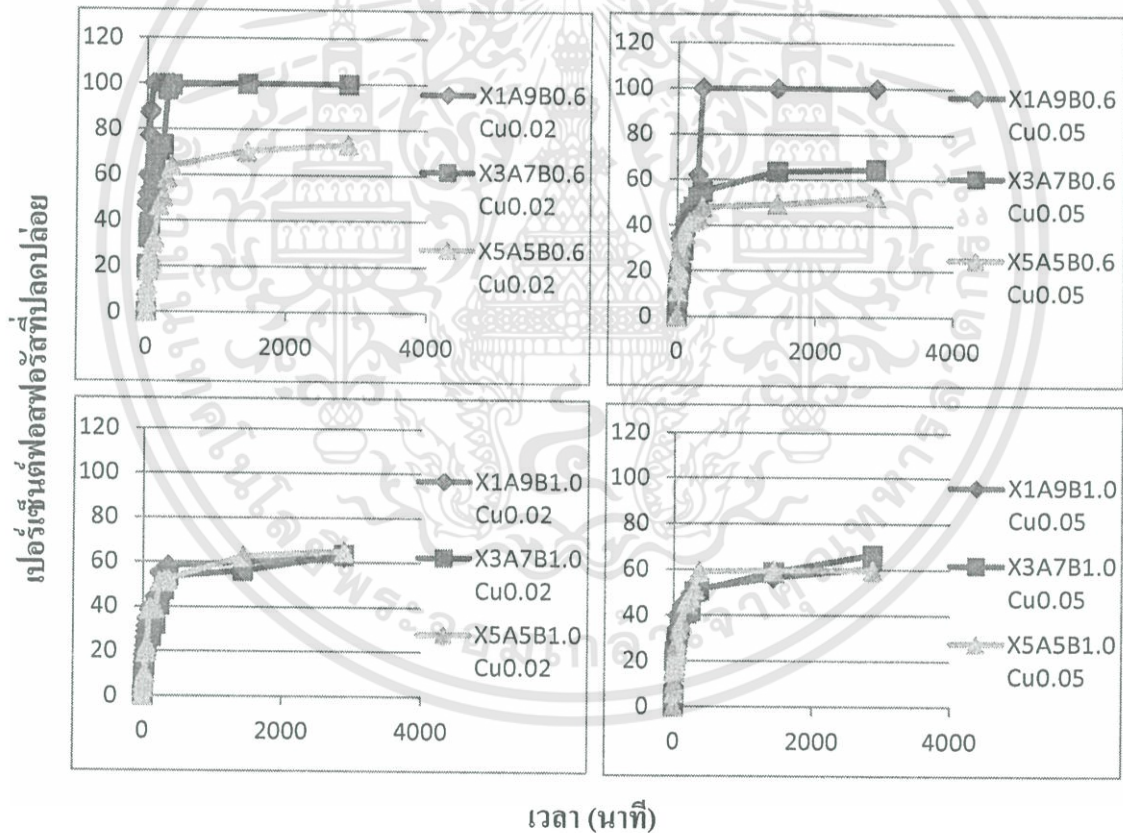
จากรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลนุ้ยอัดเม็ดระหว่างสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยงกับสูตรที่มีการเชื่อมโยงแบบกลไกเดียวด้วยสารละลายโซเดียมเทรโบเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/v และความเข้มข้น 1.0% w/v พบว่าสูตรที่มีการเชื่อมโยงกลไกเดียวด้วยสารละลายโซเดียมเทรโบเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/v สามารถปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตได้ 100% โดยมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับเจลนุ้ยอัดเม็ดที่ยังไม่มีการเชื่อมโยง เมื่อเปรียบเทียบปัจจัยความหนาแน่นของการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทรโบเรตในปริมาณที่ต่างกัน พบว่าเจลนุ้ยอัดเม็ดที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเทรโบเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/v มีความสามารถในการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตได้ดีกว่าเจลนุ้ยอัดเม็ดที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเทรโบเรตที่ความเข้มข้น 1.0% w/v โดยยังมีค่าการปลดปล่อยได้สูงสุด 100% ภายในเวลา 120 นาที ในขณะที่เจลนุ้ยอัดเม็ดที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเทรโบเรตที่ความเข้มข้น 1.0% w/v มีค่าการปลดปล่อยสูงสุดที่ 72 ชั่วโมงประมาณ 75-90% เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเชื่อมโยงที่มากขึ้นจะทำให้ไฮโดรเจลมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงที่มากกว่า สารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจึงถูกกักไว้อยู่ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลหลังจากการเชื่อมโยงที่มากกว่า ทำให้ค่าการปลดปล่อยที่ควรจะได้มีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.13 กราฟพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เชื่อมโยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเทรโบเรตและสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

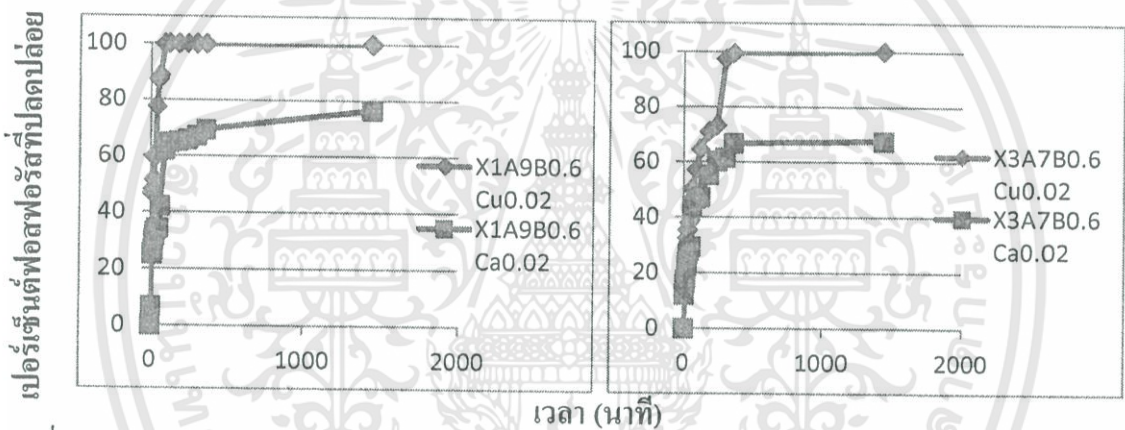
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 เป็นการเปรียบเทียบไฮโดรเจลอัตราส่วนต่างๆ ของโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทน คือ X1A9, X3A7 และ X5A5 เชื่อมโยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเทรโบอโรเตความเข้มข้น 0.6% w/v และสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 0.02 และ 0.05 โมลาร์ พบว่า X1A9 มีพฤติกรรมการปลดปล่อยได้ดี เมื่อเทียบกับไฮโดรเจลอัตราส่วนต่างๆ เนื่องจากโซเดียมอัลจิเนตละลายน้ำได้ดีกว่าแซนแทน มีผลทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณแซนแทนในเจลญี่ปุ่นัดเม็ด การปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจะลดลงโดยที่ความเข้มข้นโซเดียมเทรโบอโรเตความเข้มข้น 0.6% w/v จะเห็นพฤติกรรมชัดเจน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเทรโบอโรเตเป็น 1.0% w/v อัตราส่วนระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทนไม่มีผลต่อการปลดปล่อย ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเทรโบอโรเตทำให้ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลมีการเชื่อมโยงมากขึ้น ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น น้ำแทรกเข้าไปในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ลดน้อยลง การปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจึงลดน้อยลง



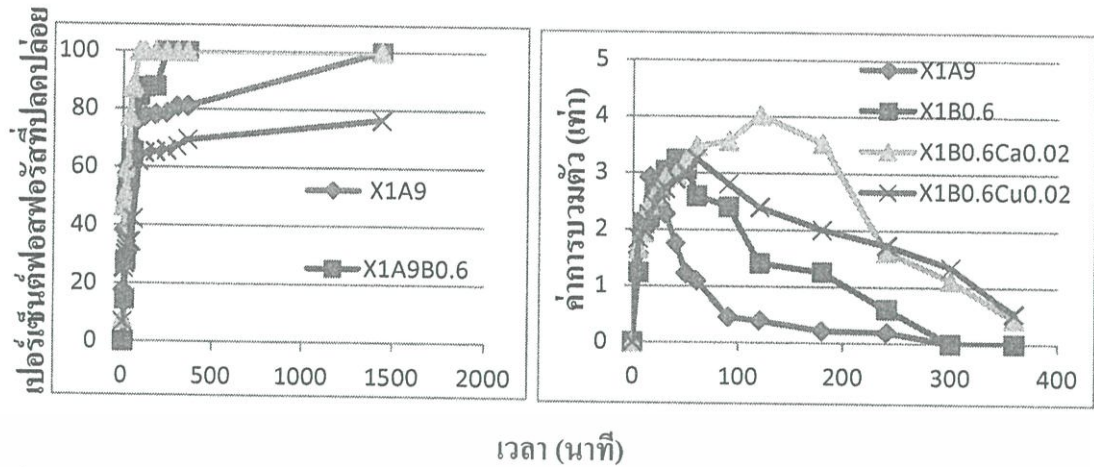
รูปที่ 4.14 กราฟพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เชื่อมโยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเทรโบอโรเตและสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน

จากรูปที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบไฮโดรเจลอัตราส่วนต่างๆของโซเดียมอัลจิเนตและ แชนแทน คือ X1A9 , X3A7 และ X5A5 เชื่อมโยงแบบ 2 กลไก ด้วยสารละลายโซเดียมเทรสบอเรตความเข้มข้น 0.6% w/v และสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0.02 และ 0.05 โมลาร์ พบว่า X1A9 และ X3A7 ในบางสูตรมีพฤติกรรมการปลดปล่อยได้ 100% และการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเทรสบอเรตเป็น 1.0% w/v โดยอัตราส่วนระหว่างโซเดียมอัลจิเนตและแชนแทนไม่มีผลต่อพฤติกรรมการปลดปล่อย ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเทรสบอเรต ทำให้ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลมีการเชื่อมโยงมากขึ้น ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น น้ำแทรกเข้าไปในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ลดน้อยลง การปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจึงลดน้อยลง และออกมาได้ไม่หมด



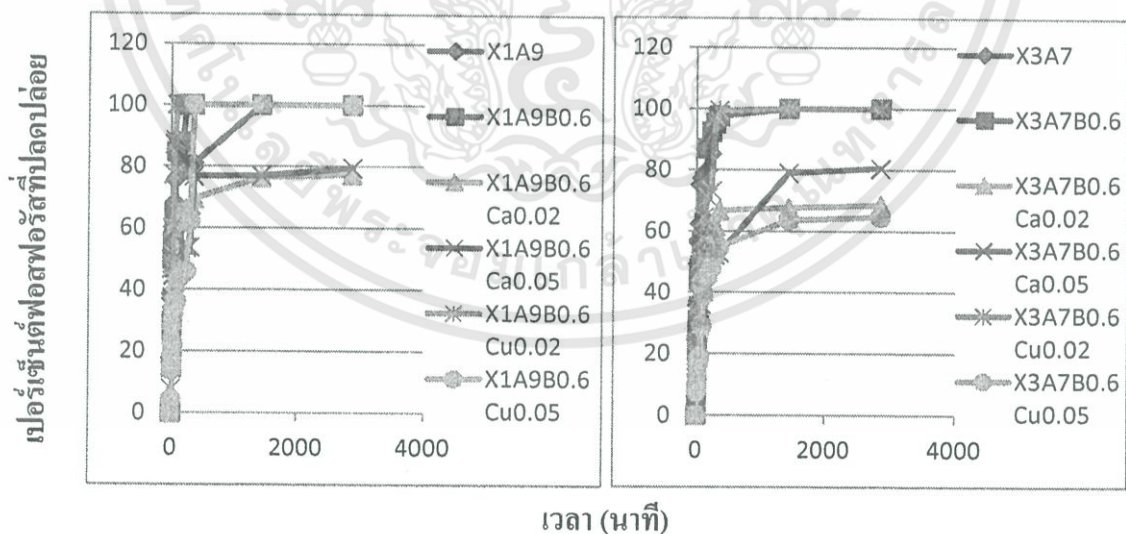
รูปที่ 4.15 กราฟพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลนียูอัดเม็ดระหว่างสูตรเชื่อมโยง 2 กลไกด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์กับเชื่อมโยง 2 กลไก ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต

จากรูปที่ 4.15 เป็นการเปรียบเทียบเจลนียูอัดเม็ดสูตรเชื่อมโยง 2 กลไกด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตกับเจลนียูอัดเม็ดเชื่อมโยง 2 กลไกด้วยแคลเซียมคลอไรด์โดยศึกษาอัตราส่วน X1A9 และ X3A7 พบว่าเจลนียูอัดเม็ดสูตรเชื่อมโยง 2 กลไก ด้วยสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟตมีพฤติกรรมการปลดปล่อยได้ดี เมื่อเทียบกับเจลนียูอัดเม็ดสูตรเชื่อมโยง 2 กลไกด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เนื่องจาก คอปเปอร์เป็นธาตุที่มีขนาดใหญ่กว่าแคลเซียม เมื่อทำการเชื่อมโยงกับเจลนียูอัดเม็ดจึงทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ภายในโครงสร้างของเจลนียูอัดเม็ด น้ำแทรกผ่านเข้าไปในโครงสร้างของเจลนียูอัดเม็ดได้ปริมาณมาก ทำให้เจลนียูมีการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตออกมาได้หมด 100%



รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตกับพฤติกรรมการบวมตัวของเจลนียูแอคเม็ค

จากรูปที่ 4.16 เป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตกับพฤติกรรมการบวมตัวของเจลนียูแอคเม็คสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง เชื่อมโยง 1 กลไก และ เชื่อมโยง 2 กลไก พบว่าเจลนียูแอคเม็คแต่ละสูตรมีพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตกับพฤติกรรมการบวมตัวสอดคล้องกันคือ ช่วง 5 นาทีแรกจนถึง 60 นาที เจลนียูแอคเม็คมีอัตราการปลดปล่อยสารอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการบวมตัว ที่ช่วง 5 นาทีแรกจนถึง 60 นาที จะมีอัตราการบวมตัวอย่างรวดเร็วจากนั้นอัตราการบวมตัวจึงลดช้าลง



รูปที่ 4.17 กราฟพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเมื่อเปลี่ยนแปลงชนิดและความเข้มข้นของสารเชื่อมโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 เป็นการเปรียบเทียบเจลปฏิกิริยาอิมัลชันคอลลอยด์ต่างๆ ของโซเดียมอัลจิเนตและ แชนแทน คือ X1A9 และ X3A7 พบว่าไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยงและทำการเชื่อมโยงด้วย สารละลายโซเดียมเทตระบอเรตความเข้มข้น 0.6% w/v การปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียม- ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตมีอัตราการปลดปล่อยใกล้เคียงกันและปลดปล่อยออกมาได้หมด เมื่อทำการ เชื่อมโยง 2 กลไก ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์หรือคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน การปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตมีอัตราการปลดปล่อยที่ช้าลง และ ปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตออกมาได้ไม่หมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ ใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 0.05 M ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ สารเชื่อมโยง ทำให้ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น น้ำ เข้าไปแทรกในไฮโดรเจลได้ลดน้อยลง การปลดปล่อยจึงลดช้าลง

จากผลการทดลองข้างต้น เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการปลดปล่อยสาร โพแทสเซียม- ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจากเจลปฏิกิริยาอิมัลชันสูตรต่างๆ พบว่า ปริมาณสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตที่ เหมาะสมปริมาณความเข้มข้นไม่ควรเกิน 0.6% w/v ส่วนการเชื่อมโยงแคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.05 M มีค่าสูงเกินไป ทำให้การปลดปล่อยทำได้ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้สารเชื่อมโยงโซเดียมเทตระบอเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/v เพียงอย่างเดียว หรือการใช้การเชื่อมโยง 2 กลไก โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.02 M พบว่า พฤติกรรมการปลดปล่อยสารแคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟต ไม่ได้ แตกต่างจากการไม่เติมสารเชื่อมโยงมากนัก

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการปลดปล่อยสารละลายออกซิฟอสเฟตของเจลปฏีอัดเม็ดจากโซเดียมอัลจิเนตและแซนแทน โดยมีการเชื่อมโยง 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ใช้โซเดียม-เททระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยงกลไกเดียว และ แบบที่ 2 เป็นการเชื่อมโยง 2 กลไก โดยใช้โซเดียม-เททระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยงกลไกที่ 1 และใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือคอปเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเชื่อมโยงในกลไกที่ 2 โดยมีปัจจัยศึกษา คือ การปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของโซเดียมอัลจิเนตต่อแซนแทน และปริมาณสารเชื่อมโยง ได้แก่ โซเดียมเททระบอเรต แคลเซียมคลอไรด์ และคอปเปอร์ซัลเฟต หลังจากนั้นทำการอัดเป็นเม็ดเพื่อศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว และศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ตรวจสอบปริมาณสารละลายออกซิฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic acid method) ตรวจวัดด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible Spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร

จากการศึกษาการบวมตัว โดยนำเจลปฏีอัดเม็ดแช่ในน้ำกลั่น พบว่าสูตรที่มีปริมาณแซนแทนมาก (สูตร X5A5) มีอัตราการบวมตัวสูงสุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมเททระบอเรตเป็น 0.6% w/v และ 1.0% w/v ตามลำดับ พบว่าอัตราการบวมตัวของเจลปฏีอัดเม็ดแต่ละอัตราส่วนมีค่าการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น และคงตัวอยู่ได้นานขึ้น เนื่องจากภายในโครงสร้างไฮโดรเจลมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น น้ำเข้าไปแทรกในโครงสร้างไฮโดรเจล และคงอยู่ได้นาน เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงที่มากขึ้น สามารถต้านทานการละลายได้ดีขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตร X5A5B0.6Ca0.05 ที่มีการเชื่อมโยง 2 กลไก มีค่าการบวมตัวสูงสุดที่ประมาณ 12 เท่า และคงตัวอยู่ได้นาน ทั้งนี้เหตุผลเนื่องจากการสร้างพันธะเชื่อมโยงของทั้งโซเดียมเททระบอเรต และแคลเซียมคลอไรด์ มีผลต่อการยึดเกาะพันธะระหว่างไฮโดรเจลภายในเจลปฏีอัดเม็ด ทำให้ค่าการบวมตัวสูงสุดสูงขึ้น และคงตัวได้นานขึ้น

จากการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของเจลปฏีอัดเม็ดทุกสูตร พบว่าไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยง และทำการเชื่อมโยงด้วยสารละลายโซเดียมเททระบอเรตความเข้มข้น 0.6% w/v การปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตมีอัตราการปลดปล่อยใกล้เคียงกัน และปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตออกมาได้หมด 100% เมื่อทำการเชื่อมโยง 2 กลไก ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ หรือคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างกัน การปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตมีอัตราการปลดปล่อยที่ช้าลง และสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตออกมาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่หมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือ คอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.05 M ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมโยง ทำให้ภายใน โครงสร้างของ ไฮโดรเจลมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากขึ้น น้ำเข้าไปแทรกในไฮโดรเจลได้ช้าลง การปลดปล่อยจึงช้าลง

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของการปลดปล่อยสาร โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตรต่างๆ พบว่าปริมาณสารละลายโซเดียมเทตระบอเรตที่เหมาะสม ปริมาณความเข้มข้นไม่ควรเกิน 0.6% w/v ส่วนเชื่อมโยงของแคลเซียมคลอไรด์ หรือคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.05 M มีค่าสูงเกินไป ทำให้การปลดปล่อยทำได้ไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้สารเชื่อมโยงโซเดียมเทตระบอเรตที่ความเข้มข้น 0.6% w/v เพียงอย่างเดียว หรือการใช้การเชื่อมโยง 2 กลไก โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ หรือคอปเปอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.02 M พบว่า พฤติกรรมการปลดปล่อยสารแคลเซียมคลอไรด์ หรือคอปเปอร์ซัลเฟต ไม่ได้แตกต่างจากการไม่เติมสารเชื่อมโยงมากนัก

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. ทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของ โซเดียมเทตระบอเรตในช่วงที่น้อยกว่า 0.6% w/v และ ความเข้มข้นของ แคลเซียม และคอปเปอร์ซัลเฟตในช่วง 0.02-0.05 M
2. ใช้สภาวะอัดเม็ดที่ความดันสูงกว่า 5 ตัน
3. ควรศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยสาร KH_2PO_4 ของเจลปุ๋ยอัดเม็ด เช่น สภาวะกรด-เบส และที่อุณหภูมิสูงขึ้น เป็นต้น
4. ปรับเปลี่ยนชนิดของสารละลายที่นำมาใช้ในการปลดปล่อย เช่น ปุ๋ยชนิดอื่นๆ
5. ทดสอบกับสภาพใช้งานที่เป็นจริง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ณิชชา มงคลตระกูล และวรรณมา สุมิรัง. (2551).“การศึกษาสมบัติของดินที่มีผลต่อการดูดซับฟอสฟอรัสในดินที่ใช้ปลูกไม้ผล.” วิทยาศาสตร์บัณฑิต (การจัดการทรัพยากรดินและสิ่งแวดล้อม). สาขาวิชา การจัดการทรัพยากรดินและสิ่งแวดล้อม. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] ปรียาภรณ์ ชุกกลิ่น และวิศรุต วงศ์วิจิต. (2554).“การศึกษาปริมาณการสะสมธาตุอาหารพืชในระบบการผลิตสัปะรด.” วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ปฐพีวิทยา). สาขาวิชา เทคโนโลยีการผลิตพืช. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [3] ชามาศ มินสาคร. (2555).“การเตรียมและตรวจวิเคราะห์ไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม/โซเดียมอัลจิเนตกัม.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชา เทคโนโลยีพอลิเมอร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [4] เพชรรัตน์ พลับเจริญสุข, มณีรัตน์ วงศ์ศิริไพศาล และสุวดี พันธุ์ควนิชย์. (2554).“การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนน/กัวร์กัม.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต. สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] จิตรานุช จิรปฐมกุล, จูติมา ชัยสิทธิ์ และภัทรานิษฐ์ ขวลิตเอื้ออังกูร. (2554).“การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและกัวร์กัม.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต. สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] B.D. Ratner. (1981).“Biomedical Application of Hydrogel.” Review and Critical Appraisal. In D.F. Williams. Biocompatibility of Clinical Implant Material. vol II Boca Raton: CRC Press, Inc., 145-152.
- [7] E.H. Schacht. (2004).“Polymer chemistry and hydrogel system.” Journal of Physics: Conference. 3, 22-28.
- [8] Patent No.: US 6,930,196 B2. Aug, 2005.
- [9] P. Petrini, S. Fare, A. Piva, M. and C. Tanzi. (2003).“Design, Synthesis and Properties of Polyurethane Hydrogels for Tissue Engineering.” Materials in Medicine. 14, 683-686.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] K. Cordula and J. Kast. (2010).“**Optimization of Formaldehyde Cross-Linking for Protein Interaction Analysis of Non-Tagged Integrin 1.**” Journal of Biomedicine and Biotechnology. Article ID 927585, 13.
- [11] J-M. Guent. (1992).“**Introduction In Thermoreversible Gelation of Polymers and Biopolymer.**” London : Academic Press, 1-4.
- [12] R. Pereira, A. Carvalho, D.C. Vaz, M.H. Gil, A. Mendes and P. Bartolo. (2013). “**Development of novel alginate based hydrogel films for wound healing applications.**” International Journal of Biological Macromolecules. 52, 221-230.
- [13] M.V. Seflon and Y. Yamamoto. (1996).“**Hofmann degradation of acrylamind copolymer : Sythesis of amine function thermoplastic hydrogel.**” Journal of Applied Polymer Science. 61, 351-358.
- [14] ภัทราวุธ มนต์วิเศษ. (2553).“**เอกสารการสอนวิชา ไบโอฟอลิเมอร์.**” สาขาวิชาเคมี. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] W.R. Thoms. (1992).“**Carrageenan.**” in Thickening and Gelling Agents for Food, Edited by Imeson, A., London, Blackie Academic & Professional, 25-39.
- [16] R.A. Rees. (1969).“**Structure Conformation and Mechanism.**” in the Formation of Polysaccharide Gels and Networks, edited by M.L. Wolfrom, R.S. Tipson, and D. Horton. New York. Academic Press, 104-148.
- [17] M. Lahaya and C. Rochas. (1991).“**Chemical structure and physic-chemical propertie of agar.**” Hydrobiologia. 126, 137-148.
- [18] A. Medin. (1995).“**Studies of structure and properties of agarose.**” Ph.D. Thesis, Acta Universitatis Upsaliensis, 126.
- [19] G.O. Phillips and P.A. Williams. (2000).“**Handbook of hydrocolloids.**” New York. CRCpress, 87-213.
- [20] C. Martin. (2012).“**Water Structure and Science.**” [Online]. Available: <http://www.lsbu.ac.uk/water/hyloc.html>.
- [21] A.M. Stephen and S.C. Churm. (1995). “**Gum and Mucilages.**” in Food polysaccharides and their applications, Edited by A.M. Stephen. New York. Marcel Dekker Inc.,377-425.
- [22] ดุษฎี อุตภาพ. (2554).“**Carbohydrate Technology.**” [Online]. Available: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/subject.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] ทศนีย์ อัดตะนันท์. (2555).“ปุ๋ยและสารประกอบที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช.” มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [Online].
Available: <http://www.ssnm.info/known/ferti>.
- [24] ณรงค์ สารีสุต. (2555).“การผลิตยาออกฤทธิ์เนิ่นและการนำส่งยาแบบต่างๆ.” คณะเภสัชกรรม, มหาวิทยาลัยมหิดล.[Online].
Available: <http://www.jspphama.com/Phama-knowledge/3-Oral-Contralled-Release.html>.
- [25] M. Prabakaran. (2011).“**International Journal of Biological Macromolecules.**” Department of Chemistry. Faculty of Engineering and Technology. SRM University. Kattankulathur 603, India. 203, 117-124.
- [26] L. S. Young. (1996).“**DC Chemical Company.**” [online].
Available: <http://www.dcchem.co.kr/PVA>.
- [27] มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. (2547).“เคมีพอลิเมอร์.” โครงการตำราสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [28] Q. Shengli, W. Zhanpeng, W. Dezhen, Y. Wantai and J. Riguang. (2009).“**The chemistry involved in the loading of silver(I) into poly(amic acid) via ion exchange: A metal-ion-induced crosslinking behavior.**” Polymer. 50, 845-854.
- [29] J. H. Kim, B. R. Min, K. B. Lee, J. Won and Y. S. Kang. (2002).“**Coordination structure of various ligands in crosslinked PVA to silver ion for facilitated olefin transport.**” Chemical Communications. Issue 22, 2732-2733.
- [31] M. George and T.E. Abraham. (2007).“**pH sensitive alginate-guar gum hydrogel for the controlled delivery of protein drugs.**” International Journal of Pharmaceutics. 335, 123-129.
- [32] M. Sabyasachi, R. Somdipta, M. Ranjit, R. Somasree and S. Biswanath. (2011). “**Al³⁺ ion crosslinked and acetalated gellan hydrogel network beads for prolonged release of glipizide.**” Carbohydrate Polymer. 85, 164-172.
- [33] T. Reddy and S. Tammishetti. (2002).“**Gastric resistant microbeads of metal ion crosslinked carboxymethyl guar gum for oral drug delivery.**” Journal of Microencapsulation. 19, 311-318.
- [34] Wikipedia. (2013).“**Silver nitrate.**” [online]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Silver_nitrate.

- [35] Pesticide Action Network North America. (2013).“**Copper sulfate (pentahydrate).**” [online]
Available: http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC33541.
- [36] S. T. Omeje. (2004).“**Food and Nutritional Toxicology.**” CRC Press, 12-14.
- [37] D. Bergmann, G. Furth and C. Mayer. (2008).“**Binding of bivalent cations by xanthan in aqueous solution.**” International Journal of Biological Macromolecules. 43, 245-251.
- [38] ปิยาภา เจริญพานิช, วชิราภรณ์ สวัสดิรักษา และวัชร ศรีทวีสินทรัพย์. (2554).“**การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับแซนแทนกัม.**” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต. สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [39] สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดินกรมพัฒนาที่ดินกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (2555).“**ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ย.**” [Online].
Available: http://oss101.ldd.go.th/web_soils_for_youth/s_fertilizer.htm.
- [40] จิราพร มงคลปิยวัฒน์. (2556). “**กลไกการปลดปล่อยตัวยาและปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยยาของ Hydrophilic Matrix.**” R&D Newsletter ปีที่ 20 ฉบับที่ 1, วารสารเพื่อการวิจัยและพัฒนา องค์การเภสัชกรรม. 22-25.
- [41] K. Mitchell, J.L. Ford, D.J. Armstrong, P.N.C. Elliott, C. Rostron and J.E. Hogan. (1993).“**The influence of concentration on the release of drugs from gels and matrices containing Methocel®.**” International Journal of Pharmaceutics. 100, 155-163.
- [42] จิราพร ลากบริสุทธิ์, ชวัลรัตน์ วัฒนวิบูลย์ และฐิตาทร บุญวัฒน์. (2555).“**การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากคาร์ราจีแนนและกัวร์กัม.**” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [43] เฉลิมขวัญ เวชสกุล, เบญจรัตน์ วุฒิจิตรมงคล และผัสพร ช่วยศรี. (2555).“**การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินเนตและกัวร์กัมเชื่อมโยงด้วยแคลเซียมคลอไรด์.**” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต. สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม. คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [44] Z. Yian and W. Ai Qin. (2009). **“Preparation of PVA hydrogel beads and adsorption mechanism for advanced phosphate removal.”** Chemical Engineering Journal 235. 2014, 207–214.
- [45] H. Bing, Z. Yi and Y. Lin. (2013). **“Adsorption removal of ammonium and phosphate from water by fertilizer controlled release agent prepared from wheat straw.”** . Chemical Engineering Journal 171. 2011, 1209– 1217.
- [46] T. Jarnongkan and S. Keawpirom. (2010). **“Binding of bivalent cations by xanthan in aqueous solution.”** International Journal of Biological Macromolecules. 43, 245-251.
- [47] I. Liakosa, L. Rizzello, I. S. Bayera, P. P. Pompaa, R. Cingolanib and A. Athanassioua. (2013). **“Controlled-Release Fertilizer Based on Chitosan Hydrogel : Phosphorus Release Kinetics.”**. Sci. J. UBU, Vol. 1, No. 1 (January-June, 2010) 43-50.
- [48] พรพิศุทธิ์ กองธรรม. (2554). **“การศึกษาการดูดซับและปลดปล่อยฟอสฟอรัสในดินที่ปลูกหน่อไม้ฝรั่ง.”** วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ปฐพีวิทยา), สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตพืช, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก ขนาดอนุภาค (μm) ของเจลปฏีสูตอร์ต่างๆที่ไม่มีการเชื่อมโยง

สูตร	X0A10	X1A9	X2A8	X3A7	X4A6	X5A5
เฉลี่ย	109.88	111.74	112.16	110.00	107.10	109.84
ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	17.82	15.53	21.83	17.38	16.67	19.12
ค่าต่ำสุด	81.00	82.00	79.00	82.00	80.00	69.00
ค่าสูงสุด	163.00	159.00	167.00	162.00	157.00	160.00

สูตร	X0A10B0.6	X1A9B0.6	X2A8B0.6	X3A7B0.6	X4A6B0.6	X5A5B0.6
เฉลี่ย	107.50	106.62	103.44	104.44	105.42	102.86
ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	12.51	13.77	13.82	13.01	13.84	12.59
ค่าต่ำสุด	74.00	83.00	78.00	79.00	80.00	80.00
ค่าสูงสุด	128.00	144.00	139.00	133.00	138.00	132.00

สูตร	X0A10B1.0	X1A9B1.0	X2A8B1.0	X3A7B1.0	X4A6B1.0	X5A5B1.0
เฉลี่ย	102.50	105.20	103.46	101.76	103.40	103.86
ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	9.82	13.61	10.66	13.62	12.37	12.45
ค่าต่ำสุด	81.00	83.00	80.00	80.00	80.00	80.00
ค่าสูงสุด	128.00	134.00	128.00	127.00	133.00	128.00

สูตร	X1A9B0.6	X3A7B0.6	X5A5B0.6	X1A9B0.6	X3A7B0.6	X5A5B0.6
	Ca0.02	Ca0.02	Ca0.02	Ca0.05	Ca0.05	Ca0.05
เฉลี่ย	103.56	103.78	99.64	103.92	103.80	102.88
ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	10.76	10.49	12.37	11.90	10.72	11.59
ค่าต่ำสุด	78.00	85.00	81.00	81.00	83.00	81.00
ค่าสูงสุด	148.00	130.00	136.00	134.00	129.00	132.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก (ต่อ)

สูตร	X1A9B0.6 Cu0.02	X3A7B0.6 Cu0.02	X5A5B0.6 Cu0.02	X1A9B0.6 Cu0.05	X3A7B0.6 Cu0.05	X5A5B0.6 Cu0.05
เฉลี่ย	105.28	100.88	101.16	103.34	102.80	102.30
ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	18.23	16.03	16.87	13.22	10.72	12.46
ค่าต่ำสุด	80.00	79.00	80.00	78.00	83.00	81.00
ค่าสูงสุด	147.00	131.00	121.00	130.00	125.00	121.00

สูตร	X1A9B1.0 Ca0.02	X3A7B1.0 Ca0.02	X5A5B1.0 Ca0.02	X1A9B1.0 Ca0.05	X3A7B1.0 Ca0.05	X5A5B1.0 Ca0.05
เฉลี่ย	100.58	104.38	103.80	101.54	101.74	102.10
ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	9.74	7.82	9.75	9.20	9.31	12.83
ค่าต่ำสุด	81.00	89.00	81.00	81.00	86.00	77.00
ค่าสูงสุด	118.00	121.00	123.00	121.00	119.00	124.00

สูตร	X1A9B1.0 Cu0.02	X3A7B1.0 Cu0.02	X5A5B1.0 Cu0.02	X1A9B1.0 Cu0.05	X3A7B1.0 Cu0.05	X5A5B1.0 Cu0.05
เฉลี่ย	102.20	101.02	104.02	100.34	103.70	103.32
ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	6.86	9.55	14.99	10.13	10.40	9.18
ค่าต่ำสุด	88.00	86.00	77.00	82.00	81.00	86.00
ค่าสูงสุด	119.00	121.00	132.00	128.00	123.00	119.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข ความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของเจลปียัดเม็ดสูตรต่างๆ

สูตร	เม็ดที่	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	ปริมาตร (mm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
X0A10	1	0.7284	0.1524	13	96.7211	1.5757
	2	0.7343	0.1504	13	97.4979	1.5426
	3	0.7445	0.1520	13	98.8590	1.5375
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X1A9	1	0.7230	0.1542	13	96.0041	1.6062
	2	0.7570	0.1535	13	100.5188	1.5271
	3	0.7625	0.1534	13	101.2491	1.5151
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X2A8	1	0.7585	0.1531	13	100.7180	1.5201
	2	0.7540	0.1553	13	100.1204	1.5511
	3	0.7378	0.1528	13	97.9627	1.5598
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7	1	0.8100	0.1594	13	107.5564	1.4820
	2	0.8050	0.1539	13	106.8925	1.4398
	3	0.7715	0.1538	13	102.4442	1.5013
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X4A6	1	0.7790	0.1544	13	103.4401	1.4927
	2	0.7370	0.1558	13	97.8631	1.5920
	3	0.7395	0.1521	13	98.1950	1.5490
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5	1	0.7643	0.1500	13	101.4815	1.4781
	2	0.7905	0.1541	13	104.9671	1.4681
	3	0.7765	0.1519	13	103.1081	1.4732
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X0A10B0.6	1	0.7203	0.1526	13	95.6456	1.5955
	2	0.7118	0.1532	13	94.5102	1.6210
	3	0.7063	0.1503	13	93.7799	1.6027
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข (ต่อ)

สูตร	เม็ดที่	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	ปริมาตร (mm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
X1A9B0.6	1	0.7735	0.1579	13	102.7098	1.5373
	2	0.7275	0.1534	13	96.6016	1.5880
	3	0.7115	0.1509	13	94.4770	1.5972
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X2A8B0.6	1	0.6980	0.1501	13	92.6844	1.6195
	2	0.7475	0.1558	13	99.2573	1.5697
	3	0.7278	0.1506	13	96.6348	1.5584
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B0.6	1	0.6833	0.1542	13	90.7258	1.6996
	2	0.7049	0.1527	13	93.5940	1.6315
	3	0.7425	0.1510	13	98.5934	1.5315
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X4A6B0.6	1	0.7465	0.1508	13	99.1245	1.5213
	2	0.7470	0.1516	13	99.1909	1.5284
	3	0.7540	0.1523	13	100.1204	1.5212
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B0.6	1	0.7198	0.1519	13	95.5725	1.5894
	2	0.8605	0.1597	13	114.2621	1.3977
	3	0.7683	0.1509	13	102.0126	1.4792
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X1A9B0.6 Ca0.02	1	0.7365	0.1546	13	97.7967	1.5808
	2	0.6908	0.1514	13	91.7217	1.6506
	3	0.6708	0.1426	13	89.0660	1.6011
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B0.6 Ca0.02	1	0.7384	0.1530	13	98.0490	1.5604
	2	0.7345	0.1526	13	97.5311	1.5646
	3	0.7033	0.1519	13	93.3816	1.6267
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B0.6 Ca0.02	1	0.7783	0.1539	13	103.3405	1.4893
	2	0.7454	0.1522	13	98.9785	1.5377
	3	0.7368	0.1490	13	97.8299	1.5231
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตร	เม็ดที่	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	ปริมาตร (mm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
X1A9B0.6 Ca0.05	1	0.7750	0.1539	13	102.9089	1.4955
	2	0.7431	0.1521	13	98.6731	1.5415
	3	0.7790	0.1569	13	103.4401	1.5168
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B0.6 Ca0.05	1	0.7325	0.1544	13	97.2655	1.5874
	2	0.7450	0.1533	13	98.9254	1.5497
	3	0.7520	0.1526	13	99.8549	1.5282
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B0.6 Ca0.05	1	0.7712	0.1564	13	102.4043	1.5273
	2	0.7342	0.1537	13	97.4846	1.5767
	3	0.7218	0.1512	13	95.8381	1.5777
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X1A9B0.6 Cu0.02	1	0.7231	0.1508	13	96.0174	1.5705
	2	0.7153	0.1521	13	94.9750	1.6015
	3	0.6788	0.1520	13	90.1283	1.6865
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B0.6 Cu0.02	1	0.7385	0.1542	13	98.0623	1.5725
	2	0.7516	0.1507	13	99.8017	1.5100
	3	0.7205	0.1527	13	95.6721	1.5961
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B0.6 Cu0.02	1	0.7643	0.1501	13	101.4881	1.4790
	2	0.7690	0.1516	13	102.1122	1.4846
	3	0.7590	0.1500	13	100.7844	1.4883
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X1A9B0.6 Cu0.05	1	0.6700	0.1537	13	88.9664	1.7276
	2	0.7135	0.1544	13	94.7426	1.6297
	3	0.7098	0.1553	13	94.2447	1.6478
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B0.6 Cu0.05	1	0.7275	0.1516	13	96.6016	1.5693
	2	0.7325	0.1528	13	97.2655	1.5710
	3	0.7260	0.1503	13	96.4024	1.5591
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข (ต่อ)

สูตร	เม็ดที่	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	ปริมาตร (mm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
X5A5B0.6 Cu0.05	1	0.6115	0.1596	13	81.1985	1.9656
	2	0.6345	0.1572	13	84.2525	1.8658
	3	0.6760	0.1458	13	89.7631	1.6243
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X0A10B1.0	1	0.6778	0.1535	13	89.9955	1.7056
	2	0.5875	0.1528	13	78.0050	1.9588
	3	0.6980	0.1522	13	92.6844	1.6421
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X1A9B1.0	1	0.7510	0.1561	13	99.7221	1.5654
	2	0.7225	0.1546	13	95.9377	1.6115
	3	0.6973	0.1525	13	92.5848	1.6471
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X2A8B1.0	1	0.7415	0.1558	13	98.4606	1.5824
	2	0.7364	0.1536	13	97.7861	1.5708
	3	0.7203	0.1515	13	95.6389	1.5841
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B1.0	1	0.7565	0.1550	13	100.4524	1.5430
	2	0.7845	0.1542	13	104.1638	1.4804
	3	0.7608	0.1535	13	101.0167	1.5196
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X4A6B1.0	1	0.7622	0.1552	13	101.2146	1.5334
	2	0.7122	0.1504	13	94.5740	1.5903
	3	0.7540	0.1547	13	100.1204	1.5451
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B1.0	1	0.7419	0.1531	13	98.5071	1.5542
	2	0.7378	0.1554	13	97.9627	1.5863
	3	0.7260	0.1510	13	96.4024	1.5664
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X1A9B1.0 Ca0.02	1	0.7267	0.1538	13	96.4887	1.5940
	2	0.7088	0.1526	13	94.1119	1.6215
	3	0.7160	0.1517	13	95.0746	1.5956
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข (ต่อ)

สูตร	เม็ดที่	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	ปริมาตร (mm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
X3A7B1.0 Ca0.02	1	0.7195	0.1534	13	95.5393	1.6056
	2	0.7105	0.1521	13	94.3443	1.6122
	3	0.7000	0.1508	13	92.9500	1.6224
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B1.0 Ca0.02	1	0.7598	0.1533	13	100.8839	1.5196
	2	0.7478	0.1508	13	99.2905	1.5188
	3	0.7765	0.1535	13	103.1081	1.4887
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X1A9B1.0 Ca0.05	1	0.7385	0.1502	13	98.0623	1.5317
	2	0.7525	0.1538	13	99.9213	1.5392
	3	0.7415	0.1510	13	98.4606	1.5336
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B1.0 Ca0.05	1	0.7002	0.1515	13	92.9699	1.6296
	2	0.6993	0.1544	13	92.8504	1.6629
	3	0.6828	0.1550	13	90.6594	1.7097
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B1.0 Ca0.05	1	0.7903	0.1558	13	104.9339	1.4847
	2	0.8405	0.1565	13	111.6064	1.4022
	3	0.8030	0.1583	13	106.6269	1.4846
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X1A9B1.0 Cu0.02	1	0.6915	0.1566	13	91.8213	1.7055
	2	0.6708	0.1532	13	89.0660	1.7201
	3	0.6650	0.1544	13	88.3025	1.7485
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B1.0 Cu0.02	1	0.7212	0.1554	13	95.7584	1.6228
	2	0.7110	0.1570	13	94.4040	1.6631
	3	0.6900	0.1507	13	91.6221	1.6448
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B1.0 Cu0.02	1	0.7090	0.1553	13	94.1384	1.6497
	2	0.6973	0.1541	13	92.5848	1.6644
	3	0.7198	0.1561	13	95.5725	1.6333
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข (ต่อ)

สูตร	เม็ดที่	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	ปริมาตร (mm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
X1A9B1.0 Cu0.05	1	0.7125	0.1563	13	94.6098	1.6520
	2	0.6730	0.1526	13	89.3648	1.7076
	3	0.6955	0.1545	13	92.3525	1.6729
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X3A7B1.0 Cu0.05	1	0.7018	0.1594	13	93.1824	1.7106
	2	0.6885	0.1569	13	91.4163	1.7163
	3	0.6613	0.1506	13	87.8046	1.7152
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					
X5A5B1.0 Cu0.05	1	0.7120	0.1550	13	94.5368	1.6396
	2	0.7085	0.1502	13	94.0787	1.5965
	3	0.7248	0.1572	13	96.2364	1.6335
	ความหนาแน่นเฉลี่ย					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓ ค่าการบวมตัว (เท่า) ของไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

เวลา (นาที)	X0A10				X1A9			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.541	1.212	1.354	1.369	1.562	1.591	1.579	1.577
10	1.586	1.670	1.636	1.630	2.442	1.958	2.169	2.190
15	1.668	2.040	1.844	1.850	2.905	2.937	2.928	2.924
20	1.340	1.715	1.591	1.548	3.184	2.225	2.617	2.675
25	1.236	1.744	1.626	1.535	2.636	2.155	2.436	2.409
30	0.620	0.890	0.739	0.750	2.981	1.902	1.935	2.273
40	0.448	0.088	0.634	0.390	2.056	1.518	1.689	1.754
50	0.035	0.058	0.022	0.038	1.573	0.619	1.479	1.224
60	0.000	0.000	0.000	0.000	1.690	0.337	1.280	1.102
90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.270	0.400	0.690	0.454
120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.476	0.319	0.390	0.395
180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.567	0.011	0.064	0.214
240	0.000	0.000	0.000	0.000	0.185	0.208	0.194	0.196
300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
360	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

เวลา (นาที)	X2A8				X3A7			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.655	1.594	1.640	1.630	1.896	1.755	1.793	1.815
10	1.962	2.302	2.167	2.144	3.361	2.479	2.643	2.827
15	2.511	2.666	2.489	2.555	3.866	3.586	3.736	3.729
20	3.469	2.843	3.178	3.163	3.484	4.001	4.025	3.836
25	3.687	2.806	2.921	3.138	4.283	5.125	5.097	4.835
30	3.596	2.301	2.752	2.883	4.652	4.121	4.322	4.365
40	2.192	2.054	2.094	2.113	3.309	3.949	3.678	3.646
50	1.303	1.511	1.625	1.480	3.884	3.263	3.489	3.546
60	0.404	0.503	0.632	0.513	3.311	3.076	3.268	3.218
90	0.000	0.552	0.621	0.391	2.242	3.666	3.457	3.122
120	0.370	0.049	0.094	0.171	0.000	2.111	2.269	1.460
180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
240	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
360	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก (ต่อ)

เวลา (นาที)	X4A6				X5A5			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	2.117	2.044	2.095	2.085	2.015	2.655	2.458	2.376
10	2.534	3.097	2.786	2.806	2.554	2.834	2.777	2.722
15	3.229	3.970	3.532	3.577	2.854	3.419	3.147	3.140
20	3.734	4.139	3.458	3.777	3.415	3.664	3.578	3.552
25	3.948	4.830	4.017	4.265	3.244	4.201	3.755	3.733
30	4.759	5.240	4.869	4.956	3.655	4.187	3.977	3.940
40	5.246	4.751	4.012	4.670	3.665	4.267	4.189	4.040
50	4.206	4.957	4.786	4.650	4.477	5.896	5.390	5.255
60	4.159	4.270	4.357	4.262	2.993	5.698	4.895	4.529
90	4.518	3.955	3.747	4.074	1.468	4.908	3.790	3.389
120	4.137	3.812	3.146	3.698	0.598	3.741	2.455	2.265
180	0.954	2.080	1.954	1.663	0.012	0.380	1.634	0.676
240	0.094	0.000	0.000	0.031	0.000	0.130	0.942	0.357
300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
360	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

เวลา (นาที)	X1A9B0.6				X3A7B0.6			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.640	1.899	0.176	1.238	3.346	2.398	2.786	2.843
10	2.194	2.035	2.086	2.105	3.692	2.985	3.105	3.261
15	2.417	2.055	2.164	2.212	3.730	2.939	3.176	3.282
20	2.797	2.432	2.673	2.634	3.820	3.889	3.897	3.869
25	2.696	2.720	2.952	2.789	4.318	3.886	4.568	4.258
30	2.985	3.046	3.057	3.029	4.216	4.373	4.489	4.359
40	3.329	3.178	3.197	3.235	5.175	5.121	5.169	5.155
50	3.826	2.600	2.766	3.064	5.457	4.987	5.036	5.160
60	2.521	2.905	2.355	2.594	6.116	4.650	4.987	5.251
90	2.457	2.591	2.158	2.402	5.674	5.235	5.326	5.412
120	1.023	1.675	1.533	1.410	5.246	5.620	5.745	5.537
180	0.741	1.784	1.244	1.256	5.168	5.694	5.279	5.380
240	0.469	0.593	0.753	0.605	4.745	4.993	4.856	4.864
300	0.000	0.000	0.000	0.000	4.056	3.508	4.235	3.933
360	0.000	0.000	0.000	0.000	2.577	1.585	2.537	2.233

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค (ต่อ)

เวลา (นาที)	X5A5B0.6				X1A9B0.6Ca0.02			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	2.697	2.454	2.517	2.556	1.684	1.601	1.690	1.658
10	2.724	2.613	2.606	2.648	2.002	1.869	1.954	1.942
15	3.708	2.990	3.538	3.412	2.527	2.306	2.466	2.433
20	3.432	3.374	3.859	3.555	2.751	2.490	2.535	2.592
25	3.822	4.093	4.014	3.976	2.836	2.639	2.745	2.740
30	4.206	4.170	4.191	4.189	3.003	2.770	2.944	2.906
40	4.496	5.365	5.200	5.020	3.109	2.837	2.957	2.967
50	5.168	5.227	5.198	5.197	3.477	2.966	3.225	3.222
60	5.145	5.495	5.267	5.302	3.686	3.256	3.457	3.466
90	6.312	6.453	6.327	6.364	3.349	3.793	3.545	3.562
120	6.143	6.247	6.348	6.246	3.916	4.055	4.079	4.017
180	5.883	5.396	5.455	5.578	3.719	2.967	3.900	3.529
240	5.256	5.359	5.126	5.247	1.891	1.218	1.756	1.622
300	5.183	5.037	5.246	5.155	1.314	0.673	1.355	1.114
360	4.552	4.368	4.429	4.450	1.275	0.046	0.013	0.445

เวลา (นาที)	X3A7B0.6Ca0.02				X5A5B0.6Ca0.02			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	2.071	1.781	1.976	1.943	2.199	2.065	2.168	2.144
10	2.375	2.085	2.566	2.342	2.466	2.613	2.357	2.478
15	3.075	2.777	2.976	2.943	3.058	3.125	3.168	3.117
20	3.137	3.038	3.108	3.094	3.384	3.663	3.457	3.501
25	3.447	3.304	3.798	3.516	3.966	4.283	4.179	4.143
30	3.745	2.958	3.900	3.534	4.326	5.381	5.054	4.920
40	3.495	3.390	3.756	3.547	5.028	7.638	5.046	5.904
50	4.148	3.280	4.104	3.844	5.195	7.350	5.355	5.967
60	4.567	4.914	4.247	4.576	6.594	8.632	6.991	7.406
90	5.135	5.170	5.190	5.165	6.672	6.246	6.568	6.495
120	6.257	6.468	6.390	6.371	3.071	5.966	4.790	4.609
180	5.478	6.328	6.015	5.940	2.296	5.336	2.891	3.508
240	3.778	3.976	3.467	3.740	0.382	1.900	0.006	0.762
300	2.699	2.151	2.901	2.583	0.671	0.036	0.000	0.236
360	3.899	2.049	2.179	2.709	0.247	0.000	0.000	0.082

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก (ต่อ)

เวลา (นาที)	X1A9B0.6Ca0.05				X3A7B0.6Ca0.05			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.857	1.974	2.065	1.965	2.416	2.177	2.356	2.316
10	2.167	2.252	2.213	2.211	3.055	2.521	2.845	2.807
15	2.412	2.915	2.566	2.631	3.687	3.067	3.457	3.403
20	3.018	3.292	3.179	3.163	3.982	3.512	3.788	3.761
25	3.190	3.388	3.280	3.286	4.960	5.108	5.055	5.041
30	3.608	3.531	3.568	3.569	5.669	4.836	4.798	5.101
40	4.095	4.323	4.136	4.185	5.779	4.906	4.901	5.195
50	5.086	4.395	4.568	4.683	4.755	6.010	5.005	5.257
60	6.319	4.694	4.900	5.304	6.370	7.715	4.677	6.254
90	8.182	4.710	5.246	6.046	5.371	7.899	4.257	5.842
120	9.367	5.357	5.790	6.838	4.345	8.214	3.965	5.508
180	9.119	5.730	5.943	6.931	1.710	6.084	0.944	2.912
240	6.413	4.458	4.801	5.224	0.026	2.171	0.158	0.785
300	5.231	2.925	2.269	3.475	0.000	0.000	0.000	0.000
360	1.053	0.510	0.047	0.537	0.000	0.000	0.000	0.000

เวลา (นาที)	X5A5B0.6Ca0.05				X1A9B0.6Cu0.02			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	2.027	1.846	1.985	1.953	1.796	1.890	1.802	1.829
10	2.498	2.689	2.326	2.504	2.030	1.981	1.956	1.989
15	3.125	2.833	3.022	2.993	2.352	2.152	2.257	2.253
20	4.216	4.022	4.133	4.070	2.429	2.516	2.326	2.424
25	4.001	4.113	4.096	4.123	3.097	2.910	2.923	2.681
30	4.497	4.947	4.756	4.733	2.408	2.850	2.785	2.719
40	5.999	5.937	4.957	5.631	2.505	2.866	2.786	2.884
50	6.907	6.175	6.562	6.548	2.706	3.052	2.895	2.977
60	6.886	7.227	7.066	7.059	5.889	5.561	5.764	5.738
90	8.265	8.253	8.226	8.248	6.078	6.121	6.052	6.084
120	10.408	10.705	10.527	10.547	6.463	6.235	6.547	6.415
180	11.137	13.241	12.235	12.204	6.326	6.026	6.252	6.201
240	9.984	12.334	10.262	10.860	7.107	6.856	6.962	6.975
300	7.766	11.710	9.202	9.559	6.421	6.562	6.532	6.505
360	6.720	10.973	8.217	8.637	5.735	5.632	5.652	5.673

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก (ต่อ)

เวลา (นาที)	X3A7B0.6Cu0.02				X5A5B0.6Cu0.02			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	2.429	3.056	2.862	2.782	2.032	2.432	2.232	2.232
10	2.698	3.106	2.906	2.903	2.662	3.019	2.887	2.856
15	2.709	3.224	3.062	2.998	3.213	3.655	3.487	3.452
20	3.215	3.507	3.306	3.342	3.630	3.963	3.855	3.816
25	3.990	3.899	3.901	3.930	4.574	4.271	4.365	4.403
30	5.463	4.526	5.023	5.004	4.911	5.687	5.054	5.217
40	5.911	5.422	5.535	5.623	6.038	5.777	5.885	5.900
50	6.358	5.803	6.053	6.071	6.358	6.165	6.255	6.259
60	6.956	6.275	6.865	6.698	6.408	6.635	6.548	6.530
90	7.123	6.637	6.999	6.920	6.466	7.214	6.888	6.856
120	7.423	7.114	7.562	7.366	7.732	7.820	8.421	7.991
180	7.613	7.668	7.688	7.656	6.056	6.247	6.127	6.143
240	5.052	5.184	5.023	5.086	4.760	4.610	4.556	4.642
300	4.513	4.866	4.627	4.669	2.468	2.187	2.370	2.341
360	4.012	3.983	3.820	3.921	1.504	1.490	1.506	1.500

เวลา (นาที)	X1A9B0.6Cu0.05				X3A7B0.6Cu0.05			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.185	1.734	1.585	1.501	1.618	1.863	1.788	1.756
10	1.369	1.973	1.766	1.702	2.218	2.092	2.148	2.153
15	1.606	2.014	1.874	1.831	2.445	2.202	2.366	2.337
20	1.663	1.965	1.956	1.861	3.081	2.641	2.875	2.865
25	2.149	2.088	2.056	2.098	3.676	3.506	3.599	3.594
30	2.237	2.709	2.487	2.478	3.999	4.068	4.026	4.031
40	2.780	2.941	2.874	2.865	5.548	6.309	5.862	5.458
50	3.131	2.724	3.052	2.906	5.092	5.850	5.433	5.907
60	3.013	2.717	2.987	2.969	6.424	6.951	6.765	6.713
90	3.330	2.940	3.026	3.099	6.994	6.874	6.897	6.921
120	3.851	2.678	3.056	3.195	7.231	7.207	7.213	7.217
180	3.098	1.883	2.056	2.346	5.570	6.982	6.024	6.192
240	1.698	2.144	1.885	1.909	4.409	6.125	5.579	5.371
300	0.866	0.385	0.555	0.602	1.816	3.070	2.431	2.439
360	0.813	0.148	0.432	0.464	1.511	2.469	1.987	1.989

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก (ต่อ)

เวลา (นาที)	X5A5B0.6Cu0.05				X1A9B1.0			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.665	2.152	2.100	1.972	1.534	0.895	0.944	1.124
10	2.460	2.540	2.475	2.492	1.763	1.621	1.849	1.744
15	2.651	2.888	2.734	2.758	2.258	2.092	2.180	2.177
20	3.720	3.692	3.701	3.704	2.826	2.563	2.867	2.752
25	4.763	4.067	4.569	4.466	2.877	2.500	3.033	2.803
30	4.905	4.170	4.690	4.589	2.956	2.619	3.156	2.911
40	6.618	6.780	6.687	6.695	3.832	3.205	3.095	3.378
50	6.700	7.069	6.980	6.916	3.396	4.451	2.854	3.567
60	7.681	8.656	7.933	8.090	3.422	3.268	3.258	3.316
90	8.084	11.254	9.454	9.597	3.064	2.882	3.257	3.068
120	7.685	10.816	8.679	9.060	1.669	2.570	1.854	2.031
180	8.999	11.241	9.514	9.918	0.958	0.971	0.895	0.941
240	7.944	7.373	7.645	7.654	0.000	0.000	0.000	0.000
300	5.556	6.498	5.967	6.007	0.000	0.000	0.000	0.000
360	4.368	6.121	5.734	5.408	0.000	0.000	0.000	0.000

เวลา (นาที)	X3A7B1.0				X5A5B1.0			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	2.186	1.786	1.945	1.972	2.172	2.053	2.094	2.106
10	2.468	2.454	2.413	2.445	2.719	2.525	2.426	2.557
15	2.761	3.506	2.859	3.042	3.354	3.385	3.358	3.366
20	3.276	3.911	3.380	3.522	3.581	3.429	3.498	3.503
25	3.538	3.888	3.679	3.702	4.031	3.842	3.964	3.946
30	4.161	4.005	4.097	4.087	4.135	4.086	4.180	4.134
40	5.181	4.626	5.023	4.944	4.739	4.707	4.724	4.723
50	5.601	4.839	4.942	5.127	5.862	5.432	5.537	5.610
60	5.555	4.818	5.356	5.243	5.849	5.447	5.787	5.694
90	6.263	6.572	6.455	6.430	6.917	6.333	6.457	6.569
120	6.499	6.630	6.491	6.540	7.694	6.547	6.897	7.046
180	6.438	6.760	6.532	6.577	7.477	5.540	6.024	6.347
240	6.121	5.580	6.246	5.982	6.934	5.129	5.789	5.951
300	3.385	1.575	2.578	2.513	6.265	3.003	5.246	4.838
360	1.361	0.732	1.074	1.056	5.715	3.366	3.566	4.216

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก (ต่อ)

เวลา (นาที)	X1A9B1.0Ca0.02				X3A7B1.0Ca0.02			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.593	1.712	1.683	1.662	1.767	1.961	1.843	1.857
10	2.038	1.824	1.934	1.932	2.988	2.756	2.845	2.863
15	2.438	2.216	2.334	2.329	2.630	2.742	2.843	2.738
20	3.254	2.635	2.948	2.946	3.126	3.045	3.134	3.102
25	3.397	2.898	3.034	3.110	3.266	3.160	3.185	3.204
30	3.304	2.806	3.193	3.101	3.714	3.526	3.693	3.645
40	4.110	3.251	3.734	3.698	4.629	4.660	4.643	4.644
50	4.143	3.157	3.822	3.707	5.218	5.283	5.352	5.284
60	4.311	4.015	4.285	4.204	5.834	5.118	5.864	5.606
90	4.696	5.285	5.843	5.275	7.115	5.651	6.894	6.553
120	3.686	1.900	2.533	2.707	5.961	5.168	6.034	5.721
180	2.943	1.279	2.593	2.272	5.512	5.623	5.000	5.378
240	2.200	1.269	1.753	1.741	5.089	4.115	4.700	4.635
300	1.984	1.049	1.532	1.522	2.437	2.022	2.246	2.235
360	0.465	0.221	0.321	0.336	0.603	1.251	1.032	0.962

เวลา (นาที)	X5A5B1.0Ca0.02				X1A9B1.0Ca0.05			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	2.021	2.224	2.124	2.123	1.938	1.597	1.732	1.756
10	3.155	2.241	2.843	2.746	2.217	1.595	1.832	1.881
15	3.290	2.643	3.039	2.991	2.415	2.388	2.402	2.402
20	3.116	2.736	3.109	2.987	2.766	2.173	2.532	2.491
25	5.073	4.608	4.823	4.835	2.833	2.635	2.734	2.734
30	5.355	4.083	4.998	4.812	3.093	2.779	2.943	2.938
40	6.761	5.429	5.343	5.844	4.048	3.111	3.432	3.530
50	8.093	6.590	7.352	7.345	3.622	3.112	3.532	3.422
60	9.403	8.300	8.843	8.849	4.330	3.953	4.021	4.101
90	9.965	8.961	9.232	9.386	4.235	4.169	4.092	4.165
120	8.423	8.521	8.321	8.422	4.318	3.984	4.124	4.142
180	10.577	9.978	9.345	9.967	4.132	4.243	4.324	4.233
240	8.744	7.618	8.039	8.134	4.434	5.428	4.945	4.935
300	4.268	3.973	4.021	4.087	4.107	4.171	4.032	4.104
360	2.067	3.584	2.384	2.678	2.667	3.835	2.953	3.152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก (ต่อ)

เวลา (นาที)	X3A6B1.0Ca0.05				X5B1.0Ca0.05			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.782	1.803	1.739	1.775	2.003	1.873	1.943	1.940
10	2.166	2.177	2.193	2.179	2.710	2.666	2.721	2.699
15	2.957	2.414	2.743	2.705	2.941	3.052	3.032	3.008
20	3.426	2.565	2.835	2.942	3.263	3.967	3.532	3.588
25	3.296	3.132	3.123	3.184	4.091	4.222	4.123	4.145
30	3.725	2.545	2.943	3.071	4.447	4.360	4.231	4.346
40	4.166	3.284	3.852	3.767	5.510	5.897	5.663	5.690
50	5.057	4.375	4.784	4.739	6.687	7.601	7.032	7.107
60	4.554	4.399	5.324	4.759	6.856	7.880	7.124	7.287
90	7.110	5.775	6.452	6.446	7.469	9.706	8.233	8.469
120	6.728	4.498	5.865	5.697	7.566	9.936	8.643	8.715
180	4.997	4.041	4.654	4.564	9.637	10.972	9.324	9.978
240	4.182	4.124	4.212	4.173	10.400	11.878	10.033	10.770
300	1.824	1.046	1.543	1.471	9.302	10.893	9.834	10.010
360	0.930	0.201	0.542	0.558	8.992	9.789	9.423	9.401

เวลา (นาที)	X1A9B1.0Cu0.02				X3A7B1.0Cu0.02			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	2.206	1.492	1.724	1.807	2.209	2.110	2.104	2.141
10	2.172	2.073	1.823	2.023	2.765	2.493	2.394	2.551
15	2.457	2.314	2.134	2.302	2.871	2.772	2.812	2.819
20	2.817	2.324	2.567	2.570	3.884	3.261	3.156	3.434
25	2.993	2.550	2.673	2.739	4.095	3.434	3.636	3.885
30	3.709	2.388	2.702	2.933	4.443	3.574	3.213	3.581
40	3.804	2.601	2.913	3.106	4.535	4.094	4.064	4.231
50	4.692	3.905	3.813	4.137	7.240	7.120	6.913	6.459
60	5.638	4.417	4.314	4.790	6.334	6.739	5.353	5.734
90	7.874	4.169	4.123	5.389	6.270	6.193	5.146	6.502
120	8.464	3.874	3.747	5.362	6.192	5.656	4.925	5.999
180	9.159	1.565	2.031	4.252	4.830	4.496	4.216	4.514
240	9.637	0.349	1.522	3.836	2.811	3.203	3.104	3.040
300	9.055	0.087	0.213	3.118	0.942	1.775	1.567	1.428
360	8.037	0.037	0.013	2.696	0.804	0.465	0.245	0.505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค (ต่อ)

เวลา (นาที)	X5A5B1.0Cu0.02				X1A9B1.0Cu0.05			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.465	1.747	1.624	1.612	1.553	1.381	1.437	1.457
10	1.954	1.907	1.965	1.942	1.894	1.796	1.895	1.862
15	2.224	2.258	2.267	2.250	2.207	1.839	1.924	1.990
20	2.751	2.685	2.791	2.742	2.144	1.896	2.156	2.065
25	3.043	2.678	2.811	2.844	2.436	2.201	2.352	2.330
30	2.639	2.856	2.912	2.803	2.036	2.111	2.094	2.081
40	2.090	2.328	2.353	2.257	0.997	1.771	1.636	1.468
50	1.942	1.717	1.509	1.722	0.665	1.746	1.579	1.330
60	1.207	1.422	1.198	1.275	0.447	1.545	1.425	1.139
90	0.674	0.513	0.502	0.563	0.192	1.330	1.205	0.909
120	0.622	0.489	0.413	0.281	0.153	1.216	1.176	0.848
180	0.198	0.233	0.179	0.138	0.064	0.918	0.735	0.572
240	0.002	0.003	0.008	0.211	0.007	0.291	0.273	0.191
300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.229	0.217	0.149
360	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.140	0.116	0.085

เวลา (นาที)	X3A7B1.0Cu0.05				X5A5B1.0Cu0.05			
	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย	ตัวอย่างที่			เฉลี่ย
	1	2	3		1	2	3	
5	1.742	2.265	1.937	1.981	1.527	1.537	1.526	1.530
10	2.622	2.672	2.683	2.659	2.430	2.283	2.313	2.342
15	3.216	2.817	2.834	2.956	2.468	2.364	2.353	2.395
20	3.408	2.983	3.218	3.203	2.775	3.156	2.854	2.928
25	3.819	3.285	3.846	3.650	2.160	2.314	2.156	2.210
30	4.113	3.595	4.218	3.975	2.125	2.166	2.115	2.135
40	5.342	4.281	5.290	4.971	1.877	2.141	1.786	1.935
50	4.754	3.651	4.632	4.346	1.549	1.678	1.537	1.588
60	4.324	2.540	4.217	3.694	0.325	0.703	0.718	0.582
90	3.742	2.340	3.635	3.239	0.168	0.483	0.424	0.359
120	2.593	1.086	2.642	2.107	0.135	0.354	0.332	0.274
180	0.186	0.745	0.522	0.485	0.078	0.132	0.214	0.141
240	0.154	0.216	0.204	0.191	0.053	0.085	0.074	0.071
300	0.172	0.007	0.164	0.114	0.013	0.021	0.023	0.019
360	0.005	0.000	0.007	0.004	0.002	0.003	0.004	0.003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลบูยอัดเม็ดสูตรต่างๆ

เวลา (นาที)	X0A10	X1A9	X2A8	X3A7	X4A6	X5A5
5	1.37	1.58	1.63	1.81	2.09	2.38
10	1.63	2.19	2.14	2.83	2.81	2.72
15	1.85	2.92	2.56	3.73	3.58	3.14
20	1.55	2.68	3.16	3.84	3.78	3.55
25	1.54	2.41	3.14	4.83	4.26	3.73
30	0.75	2.27	2.88	4.36	4.96	3.94
40	0.39	1.75	2.11	3.65	4.67	4.04
50	0.04	1.22	1.48	3.55	4.65	5.25
60	0.00	1.10	0.51	3.22	4.26	4.53
90	0.00	0.45	0.39	3.12	4.07	3.39
120	0.00	0.39	0.17	1.46	3.70	2.26
180	0.00	0.21	0.00	0.00	1.66	0.68
240	0.00	0.20	0.00	0.00	0.03	0.36
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
360	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

เวลา (นาที)	X1A9B0.6	X3A7B0.6	X5A5B0.6	X1A9B0.6 Ca0.02	X3A7B0.6 Ca0.02	X5A5B0.6 Ca0.02
5	1.24	2.84	2.56	1.66	1.94	2.14
10	2.10	3.26	2.65	1.94	2.34	2.48
15	2.21	3.28	3.41	2.43	2.94	3.12
20	2.63	3.87	3.55	2.59	3.09	3.50
25	2.79	4.26	3.98	2.74	3.52	4.14
30	3.03	4.36	4.19	2.91	3.53	4.92
40	3.23	5.16	5.02	2.97	3.55	5.90
50	3.06	5.16	5.20	3.22	3.84	5.97
60	2.59	5.25	5.30	3.47	4.58	7.41
90	2.40	5.41	6.36	3.56	5.16	6.50
120	1.41	5.54	6.25	4.02	6.37	4.61
180	1.26	5.38	5.58	3.53	5.94	3.51
240	0.61	4.86	5.25	1.62	3.74	0.76
300	0.00	3.93	5.16	1.11	2.58	0.24
360	0.00	2.23	4.45	0.44	2.71	0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖ (ต่อ)

เวลา (นาที)	X1A9B0.6	X3A7B0.6	X5A5B0.6	X1A9B0.6	X3A7B0.6	X5A5B0.6
	Ca0.05	Ca0.05	Ca0.05	Cu0.02	Cu0.02	Cu0.02
5	1.97	2.32	1.95	1.83	2.78	2.23
10	2.21	2.81	2.50	1.99	2.90	2.86
15	2.63	3.40	2.99	2.25	3.00	3.45
20	3.16	3.76	4.07	2.42	3.34	3.82
25	3.29	5.04	4.12	2.68	3.93	4.40
30	3.57	5.10	4.73	2.72	5.00	5.22
40	4.18	5.20	5.63	2.88	5.62	5.90
50	4.68	5.26	6.55	2.98	6.07	6.26
60	5.30	6.25	7.06	5.74	6.70	6.53
90	6.05	5.84	8.25	6.08	6.92	6.86
120	6.84	5.51	10.55	6.42	7.37	7.99
180	6.93	2.91	12.20	6.20	7.66	6.14
240	5.22	0.78	10.86	6.98	5.09	4.64
300	3.47	0.00	9.56	6.51	4.67	2.34
360	0.54	0.00	8.64	5.67	3.92	1.50

เวลา (นาที)	X1A9B0.6	X3A7B0.6	X5A5B0.6	X1A9B1.0	X3A7B1.0	X5A5B1.0
	Cu0.05	Cu0.05	Cu0.05			
5	1.50	1.76	1.97	1.12	1.97	2.11
10	1.70	2.15	2.49	1.74	2.45	2.56
15	1.83	2.34	2.76	2.18	3.04	3.37
20	1.86	2.87	3.70	2.75	3.52	3.50
25	2.10	3.59	4.47	2.80	3.70	3.95
30	2.48	4.03	4.59	2.91	4.09	4.13
40	2.87	5.46	6.70	3.38	4.94	4.72
50	2.91	5.91	6.92	3.57	5.13	5.61
60	2.97	6.71	8.09	3.32	5.24	5.69
90	3.10	6.92	9.60	3.07	6.43	6.57
120	3.20	7.22	9.06	2.03	6.54	7.05
180	2.35	6.19	9.92	0.94	6.58	6.35
240	1.91	5.37	7.65	0.00	5.98	5.95
300	0.60	2.44	6.01	0.00	2.51	4.84
360	0.46	1.99	5.41	0.00	1.06	4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓ (ต่อ)

เวลา (นาที)	X1A9B1.0	X3A7B1.0	X5A5B1.0	X1A9B1.0	X3A6B1.0	X5A5B1.0
	Ca0.02	Ca0.02	Ca0.02	Ca0.05	Ca0.05	Ca0.05
5	1.66	1.86	2.12	1.76	1.77	1.94
10	1.93	2.86	2.75	1.88	2.18	2.70
15	2.33	2.74	2.99	2.40	2.70	3.01
20	2.95	3.10	2.99	2.49	2.94	3.59
25	3.11	3.20	4.83	2.73	3.18	4.15
30	3.10	3.64	4.81	2.94	3.07	4.35
40	3.70	4.64	5.84	3.53	3.77	5.69
50	3.71	5.28	7.34	3.42	4.74	7.11
60	4.20	5.61	8.85	4.10	4.76	7.29
90	5.27	6.55	9.39	4.17	6.45	8.47
120	2.71	5.72	8.42	4.14	5.70	8.72
180	2.27	5.38	9.97	4.23	4.56	9.98
240	1.74	4.63	8.13	4.94	4.17	10.77
300	1.52	2.24	4.09	4.10	1.47	10.01
360	0.34	0.96	2.68	3.15	0.56	9.40

เวลา (นาที)	X1A9B1.0	X3A7B1.0	X5A5B1.0	X1A9B1.0	X3A7B1.0	X5A5B1.0
	Cu0.02	Cu0.02	Cu0.02	Cu0.05	Cu0.05	Cu0.05
5	1.81	2.14	1.61	1.46	1.98	1.53
10	2.02	2.55	1.94	1.86	2.66	2.34
15	2.30	2.82	2.25	1.99	2.96	2.40
20	2.57	3.43	2.74	2.07	3.20	2.93
25	2.74	3.88	2.84	2.33	3.65	2.21
30	2.93	3.58	2.80	2.08	3.98	2.14
40	3.11	4.23	2.26	1.47	4.97	1.93
50	4.14	6.46	1.72	1.33	4.35	1.59
60	4.79	5.73	1.28	1.14	3.69	0.58
90	5.39	6.50	0.56	0.91	3.24	0.36
120	5.36	6.00	0.28	0.85	2.11	0.27
180	4.25	4.51	0.14	0.57	0.48	0.14
240	3.84	3.04	0.21	0.19	0.19	0.07
300	3.12	1.43	0.00	0.15	0.11	0.02
360	2.70	0.50	0.00	0.09	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้