

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต .  
ของไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัม

Releasing behavior of potassium dihydrogen phosphate from  
alginate-guar gum hydrogels



ชื่อผู้วิจัย

นายภัทรารุ มนต์วิเศษ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556

ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่หนังสือ 130303  
เลขทะเบียน 3  
รับ. เดือน. ปี. 3 มี.ค. 2557

RCH  
QD  
541  
ภ 354 ก

12598525

เอกสารที่ส่งมอบให้ส่งรับการใช้อ่านเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.....

ชื่อโครงการ การศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต...  
ของไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัม..

แหล่งเงิน .....เงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์.....

ประจำปีงบประมาณ.....2556.....จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน.....50,000.....บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย.....1.....ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2555 ถึง กันยายน 2556 /

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

.....ศศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ.....

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการปลดปล่อยสารละลายอโรฟอสเฟตในรูปของสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินตและกัวร์กัม โดยมีโซเดียมเตตระบอเรต เป็นตัวเชื่อมโยง โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมอัลจินตต่อกัวร์กัมเป็น 6:4 และ 4:6 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารละลายอโรฟอสเฟตเป็นธาตุอาหารของพืช ช่วยในการบำรุงดอกและผลให้เจริญเติบโต โดยเตรียมไฮโดรเจลที่บรรจุสารอโรฟอสเฟตดังกล่าว 2 แบบ คือ การเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารอโรฟอสเฟตในขั้นตอนเดียวและการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารอโรฟอสเฟตภายหลัง จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้มาศึกษาการดูดซับน้ำและการปลดปล่อยสารอโรฟอสเฟต แล้วทำการตรวจวัดปริมาณสารอโรฟอสเฟตโดยใช้ Vanado molybdophosphoric acid method และเครื่อง UV-Visible Spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

คำสำคัญ : ไฮโดรเจล, โซเดียมอัลจินต, กัวร์กัม, การปลดปล่อย, สารละลายอโรฟอสเฟต

**Research Title:** Releasing behavior of potassium dihydrogen phosphate from.....  
 .....alginate-guar gum hydrogels

**Researcher:** Asst.Prof.Dr.Pathavuth Monvisade.....

**Faculty:** Science.....**Department:** Chemistry.....

### ABSTRACT

This special project studied on the releasing behavior of orthophosphate ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) from alginate-guar gum hydrogels crosslinked by sodium tetraborate. The ratios of sodium tetraborate to guar gum were 6:4 and 4:6 by weight. Fertilizer hydrogel tablets were prepared by loading of orthophosphate loaded in two routes, i.e. hydrogel preparing in the present of orthophosphate and hydrogel preparing followed by the orthophosphate loaded. The fertilizer hydrogel tablets were measured the water absorption and orthophosphate releasing. Orthophosphate measurement was detected in quantity by using Vanado molybdophosphoric acid and UV-visible spectrophotometer with 420 nm wavelength.

The results of the swelling behavior of fertilizer hydrogel tablets including A4G6(1), A6G4(1), A4G6(2) and A6G4(2) were found that the swelling values were in the ranges of 8-10 times. The releasing behavior of fertilizer hydrogel tablets was showed that the two-step preparation (A4G6(2) and A6G4(2)) could release  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  up to 100% within 24 hrs while the one-step preparation (A4G6(1) and A6G4(1)) could release  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  only 70-80% at 24 hrs.

**Keywords :** hydrogel, sodium alginate, guar gum, releasing, orthophosphate solution

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง จากแหล่งทุนรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไฮโดรเจล.....	4
2.2 กระบวนการปลดปล่อยสาร (controlled release (CR)).....	11
2.3 กัมธรรมชาติ (Natural gums).....	13
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 สารเคมี.....	20
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ.....	20
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในงานวิจัย.....	21
3.3.1 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต.....	21
3.3.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมเตตระโบรมาตความเข้มข้น 3 % w/v.....	21
3.3.3 การเตรียมสารละลายวานิลาเนต โมลิบเดต รีเอเจนท์.....	22
3.4 การหาปริมาณฟอสเฟตในปุ๋ยเม็ดตัวอย่างทางการค้า.....	22
3.5 ขั้นตอนการบรรจุสารปลดปล่อยในไฮโดรเจล.....	23
3.5.1 วิธีที่ 1 แบ่งเป็นการเตรียมไฮโดรเจล และการดูดซับ	
สารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.5.2 วิธีที่ 2 การเตรียมเจล และการดูดซับสารละลาย โพลีเอทิลีนไดออกไซด์ไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบ 2 ขั้นตอน.....	24
3.6 การตรวจวัดขนาดอนุภาคเจลนีย.....	25
3.7 การหาความหนาแน่นของเจลนียอัดเม็ด.....	25
3.8 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของเจลนียในน้ำกลั่น.....	26
3.9 วิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต.....	26
3.9.1 การเตรียม Calibration Curve.....	26
3.9.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อย จากไฮโดรเจล.....	26
3.9.3 การคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในเจล.....	27
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>29</b>
4.1 การหาปริมาณนียเม็ดตัวอย่างทางการค้าและพฤติกรรมการปลดปล่อย.....	29
4.1.1 หาปริมาณฟอสเฟตในนียเม็ดเคลือบเรซิน (ตัวอย่างที่ 1).....	29
4.1.2 หาปริมาณฟอสเฟตในนียอัดเม็ดทรงกระบอก (ตัวอย่างที่ 2).....	31
4.2 การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของเจลนียอัดเม็ด.....	34
4.3 ศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพลีเอทิลีน ไดออกไซด์ไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัม.....	37
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>45</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	45
5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม.....	46
<b>บรรณานุกรม/เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>47</b>
<b>ประวัตินักวิจัย.....</b>	<b>50</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัดส่วนโดยประมาณของการใช้อัลจินต.....	16
4.1 ค่าการดูดกลืนของปุ๋ยเม็ดเคลือบเรซิน (ตัวอย่างที่ 1).....	30
4.2 แสดงค่าการดูดกลืนของปุ๋ยอัดเม็ดทรงกระบอก (ตัวอย่างที่ 2).....	32
4.3 ความหนา ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของเจลปุ๋ยอัดเม็ด.....	35
4.4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(1).....	37
4.5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(1).....	38
4.6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(2).....	38
4.7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(2).....	39

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ประเภทของไฮโดรเจลที่ใช้แบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้.....	5
2.2 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์.....	7
2.3 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล.....	10
2.4 อันตรกิริยาของโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล.....	10
2.5 แบบจำลองรูปแบบการปลดปล่อยสาร.....	12
2.6 โครงสร้างของอัลจินต.....	14
2.7 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate แบบ Egg-box model.....	14
2.8 ปฏิกริยาของกรดอัลจินตกับพรอพิลีนออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์ พรอพิลีนไกลคอลอัลจินต (PGA).....	15
2.9 แผนภาพการผลิตPGA.....	15
2.10 โครงสร้างของกัวร์กัม.....	16
3.1 เครื่องอัดเม็ด.....	21
3.2 กล้อง Digital microscope.....	21
3.3 ตู้อบ รุ่น OF-01E.....	21
3.4 วิธีการเตรียมเจล และดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบขั้นตอนเดียว .....	24
3.5 แผนภาพวิธีการเตรียมเจล และดูดซับสารละลายโพแทสเซียม- ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบ 2 ขั้นตอน.....	25
4.1 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณฟอสเฟตมาตรฐานของปุ๋ยเรซิน (ตัวอย่างที่ 1).....	30
4.2 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณฟอสเฟตมาตรฐานของปุ๋ยอัดเม็ดทรงกระบอก (ตัวอย่างที่ 2).....	32
4.3 ก อนุภาคเจลปุ๋ยสูตรต่างๆ.....	34
4.4 เจลปุ๋ยอัดเม็ด.....	35
4.5 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร A4G6 ในน้ำกลั่น.....	36
4.6 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร A6G4 ในน้ำกลั่น.....	36
4.7 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณฟอสเฟต มาตรฐานของเจลปุ๋ยอัดเม็ด สูตร A4G6(2).....	40

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมิลลิกรัมฟอสเฟตต่อ 1 กรัมเจลปุย สูตร A4G6(1) และ A6G4(1).....	42
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ%มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อ 1 กรัมเจลปุย สูตร A4G6(1) และ A6G4(1).....	42
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมิลลิกรัมฟอสเฟต ต่อ 1 กรัมเจลปุยสูตร A4G6(2) และ A6G4(2).....	43
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ % มิลลิกรัมฟอสเฟต ต่อ 1 กรัมเจลปุยสูตร A4G6(2) และ A6G4(2).....	43

## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปุ๋ยเป็นวัสดุที่จำเป็นอย่างมากในด้านเกษตรกรรม เนื่องจากเป็นแหล่งรวมธาตุอาหารของพืช เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิต เพื่อนำมาจำหน่ายในด้านเศรษฐกิจ ในปัจจุบันเกษตรกรประสบปัญหาจำนวนผลผลิตตกต่ำ ผลผลิตไม่ออกตรงตามฤดูกาล ค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาจำนวนมาก ดังนั้น เกษตรกรจึงนิยมหันมาพึ่งสารเคมีในการเพาะปลูกมากขึ้น เพราะช่วยให้เกษตรกรเก็บเกี่ยวผลผลิตจำนวนครั้งมากขึ้น ปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้นทันต่อความต้องการของผู้บริโภค ออกดอกผลตรงตามฤดูกาล และลดต้นทุนในการดูแลรักษาระหว่างการเพาะปลูก จะเห็นได้ว่าเกษตรกรไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบที่ตามมา อาทิเช่น สารเคมีตกค้างในพืชผล สภาพแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่เหมาะสมแก่การเพาะปลูก

มีงานวิจัยมากมายศึกษา เพื่อแก้ปัญหาของเกษตรกรในด้านต่างๆ เช่น การใช้ฮอร์โมนเร่งการเจริญเติบโต การใช้เรซินเคลือบ เพื่อควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร การปรับปรุงพันธุกรรมของพืช เป็นต้น จะเห็นได้ว่าในบางวิธีอาจใช้สารเคมีที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสภาวะค่า pH ในดิน ดังนั้นจึงได้มีการนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำได้ปริมาณมาก มีสมบัติ เป็น superabsorbent ที่ได้จากธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์ อีกทั้งยังมีสมบัติการบวมตัวในน้ำและสารละลายได้ดี โดยไฮโดรเจลจะสามารถเก็บกักสารไว้ภายในเพื่อทำการปลดปล่อย และยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ ขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของไฮโดรเจลนั้นๆ อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลที่ได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์นั้นมีการดูดซับที่ดีเยี่ยม แต่มอนอเมอร์ที่ตกค้างอยู่ในชิ้นงานนั้นเป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็ง การตกค้างของมอนอเมอร์จึงกลายเป็นปัญหาการนำไปใช้งานทำให้การเลือกใช้สารตั้งต้นที่ได้จากธรรมชาติเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะลดปัญหาดังกล่าวได้ มีรายงานการวิจัยที่ใช้สารตั้งต้นจากธรรมชาติ เช่น การเตรียมไฮโดรเจลจากเซลลูโลสและโซเดียมคาร์บอเนตซีเมติกเซลลูโลสโดยมีอีพิกโลโรไฮดรินเป็นสารเชื่อมโยง [1] ไฮโดรเจลที่เตรียมจากการเชื่อมโยงโซเดียมอัลจินเตตและโซเดียมคาร์บอเนตเซลลูโลสด้วยเมทิลบิสอะคลิลาไมด์ (MBA) [2] เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ในกลุ่มวิจัยได้มีการนำโซเดียมอัลจินเตและกัวร์กัม มาสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจล มีโซเดียมเทรสบอเรตเป็นตัวเชื่อมโยง โดยมีอัตราส่วนของอัลจินเต (Alg) และกัวร์กัม (GG) ที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับของไฮโดรเจลขึ้นกับอัตราส่วนขององค์ประกอบของไฮโดรเจล ชนิด และความเข้มข้นของสารละลายที่ถูกดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยข้างต้นในด้านการปลดปล่อยสารละลายอโรฟอสเฟต โดยเลือกสูตรเจล A4G6 และ A6G4 ใช้โซเดียมเทรสบอเรต 3 % w/v ซึ่งเป็นสูตรเจลที่มีความเหมาะสมเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับที่ดี และปัญหาในการละลายของเจลมีน้อย สารละลายอโรฟอสเฟตจัดว่าเป็นธาตุอาหารที่สำคัญที่ช่วยบำรุงดอกและผล โดยให้อยู่ในรูปสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดยนำไฮโดรเจลดังกล่าว มาดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และศึกษาพฤติกรรมปลดปล่อยสาร โดยตรวจสอบปริมาณสารละลายอโรฟอสเฟตด้วยวิธี Vanado molybdophosphoric acid method และเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาพฤติกรรมปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินเตและกัวร์กัม โดยมีโซเดียมเทรสบอเรตเป็นตัวเชื่อมโยง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยของไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินเตและกัวร์กัมที่มีโซเดียมเทรสบอเรตเป็นตัวเชื่อมโยง ได้แก่ อัตราส่วนของอัลจินเตและกัวร์กัม, วิธีการบรรจุสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในไฮโดรเจล

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินเตและกัวร์กัม โดยผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แล้วทำการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทรสบอเรต
2. เตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินเตและกัวร์กัม โดยทำการเชื่อมโยงด้วยโซเดียมเทรสบอเรต แล้วจึงนำมาดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
3. ตรวจสอบปริมาณสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต โดย Vanado-molybdophosphoric acid method และใช้เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายอซิฟอสเฟตของไฮโดรเจลที่เตรียมได้
2. ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุง เพื่อการใช้งานในด้านการเกษตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogel)

ไฮโดรเจล (Hydrogels) มีชื่อเรียกอื่น ๆ อีกหลายชื่อ เช่น Water gel, Water crystal, Gel crystal มีคุณสมบัติหรือความสามารถพิเศษในการดูดซับน้ำ โดยสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ถึงประมาณ 600 เท่าของน้ำหนักตัวเอง ซึ่งลักษณะของไฮโดรเจลส่วนใหญ่ก่อนจะดูดซับน้ำจะคล้ายผลึกควอร์ซึนเล็กๆ แต่เมื่อดูดซับน้ำแล้วจะบวมตัวและอ่อนนุ่มคล้ายกับเยลลี่

ไฮโดรเจลเป็นสารประเภทพอลิเมอร์ละลายน้ำได้ บางครั้งพบเป็นลักษณะเจลคอลลอยด์ (colloidal) ในน้ำ ตัวอย่างของสารองค์ประกอบในไฮโดรเจล เช่น poly(vinyl alcohol), sodium polyacrylate, acrylate polymer หรือ copolymer ซึ่งมีหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic) เช่น ไฮดรอกซิล (hydroxyl, OH) หรือ คาร์บอกซิล (carboxy, COOH) ในโครงสร้างอยู่เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเช่น นำ Poly(vinyl alcohol) มาละลายในน้ำให้มีความเข้มข้นและความหนืดสูงมากจนกระทั่งไม่สามารถไหลไปมาได้จากนั้นนำสารละลายที่ได้มาส่องด้วยลำแสงอิเล็กตรอนเพื่อกระตุ้นให้โมเลกุลของ poly(vinyl alcohol) เกิดการเชื่อมกัน (Crosslinked) ซึ่งเมื่อเกิดการเชื่อมกันของโมเลกุลจะทำให้ poly(vinyl alcohol) มีโครงสร้างเป็นช่องว่างที่สามารถดูดซับน้ำได้จำนวนมากกลายเป็นไฮโดรเจล

การนำไฮโดรเจลมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น

- ทางด้านการเกษตร ช่วยอุ้มน้ำทำให้ดินมีความชุ่มชื้น และยังช่วยดูดซับแร่ธาตุต่างๆในดิน
- ทางด้านการแพทย์
  - ใช้เป็นวัสดุปิดแผลเสริมให้บาดแผลหายได้ในระยะเวลาที่เร็วขึ้นเนื่องจากแผ่นไฮโดรเจลมีความสามารถรักษาความชุ่มชื้นให้กับบาดแผล
  - ใช้ในงานศัลยกรรมตกแต่ง
  - ใช้เป็นสารนำส่งยา (Drug delivery system) โดยดูดซับยาเก็บไว้และปลดปล่อยออกมาในปริมาณตามต้องการ
- ประยุกต์ใช้ในชีวิตรประจำวัน
  - ใช้ทำคอนแทคเลนส์ (Silicone Hydrogels) ซึ่งให้ความสบายแก่ดวงตา ลดการระคายเคือง
  - ใช้ทำแผ่นดูดซับในผ้าอ้อมสำเร็จรูปของเด็ก (แพมเพิร์ส)

##### 2.1.1 ประเภทของไฮโดรเจล

แบ่งได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ ดังนี้

### 2.1.1.1 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้

1. ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic monomer) และมอนอเมอร์ที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Polyfunctional comonomer) โครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแต่ละมอนอเมอร์

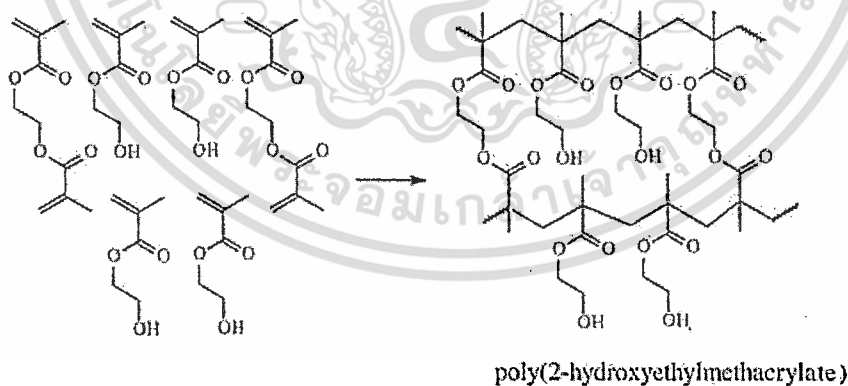
- ตัวอย่างของมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำที่นิยมใช้กัน เช่น เมทาคริลาไมด์ เมทาคริเลท เป็นต้น
- ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิล เมทาคริเลท ((2-hydroxyethyl) methacrylate (HEMA)) กับ เอทิลีนไกลคอล บิสเมทาคริเลท (Ethleneglycol bismethacrylate (EGDMA)) [3] ดังภาพที่ 2.1 ก. ซึ่งไฮโดรเจลที่ได้นำมาใช้เป็นคอนแทคเลนส์แบบนิ่ม

2. ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์ ไฮโดรเจลประเภทนี้เตรียมโดยการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำและมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำหรือโอลิโกเมอร์

- ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ เช่น การเชื่อมโยง  $\alpha, \omega$ -hydroxyl poly(ethylene glycol) ด้วย diisocyanate ดังภาพที่ 2.1 ข. ซึ่งเป็นตัวเชื่อมโยงแบบไตรออล และไฮโดรเจลที่ได้เป็นพอลิยูรีเทนที่ชอบน้ำ [4,5]

3. ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ไฮโดรเจลประเภทนี้เกิดจากการเชื่อมโยงทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ

- ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ เช่น การเชื่อมโยงโมเลกุลของโปรตีนด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ หรือกลูตาโรลดีไฮด์ ดังภาพที่ 2.1 ค. [6]



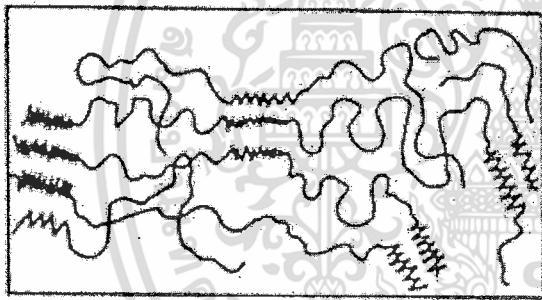
ภาพที่ 2.1 ก ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์ [3]



ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการเพื่อเหมาะกับการประยุกต์ใช้งานได้ เช่นปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าหรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำโดยเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำ เป็นต้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 2.2 ค

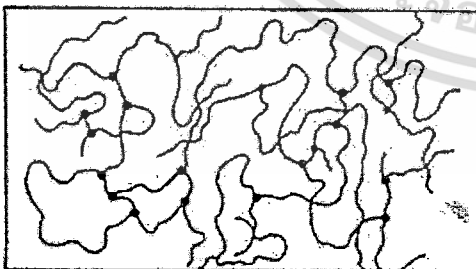
#### 4. ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating Polymer Network, IPN)

ไฮโดรเจลแบบ IPN เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกกันอยู่ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ส่งผลให้โครงร่างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้น หรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 2.2 ง นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบกึ่งอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (semi-IPN) คือไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่งเพื่อให้ตรงต่อการประยุกต์ใช้งานในแต่ละแบบ



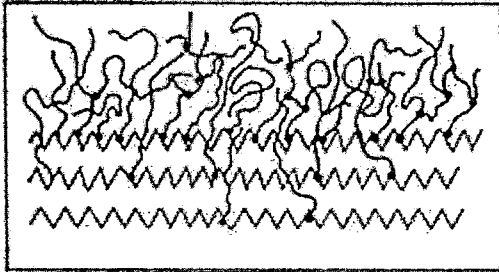
~~~~~ พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ  
 - - - - - พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ




ภาพที่ 2.2 ก ไฮโดรเจลแบบฟิล์ม (Cast film)



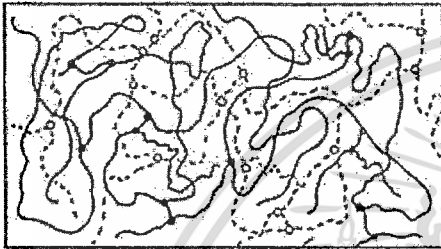
~~~~~ พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ  
 - - - - - พอลิเมอร์ส่วนที่เกิดพันธะโควาเลนต์  
 T พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ





ภาพที่ 2.2 ข ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network)



-  พอลิเมอร์ส่วนที่ชอบน้ำ
-  พอลิเมอร์ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ
-  พอลิเมอร์ส่วนที่มีการเชื่อมต่อ

ภาพที่ 2.2 ค ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer)



-  พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่ชอบน้ำ)
-  พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่ชอบหรือไม่ชอบน้ำ)
-  พอลิเมอร์ชนิดที่ 1 (ส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อ)
-  พอลิเมอร์ชนิดที่ 2 (ส่วนที่เกิดการเชื่อมต่อ)

ภาพที่ 2.2 ง ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตริงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก  
(Interpenetrating polymer network)

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของไฮโดรเจลประเภทต่างๆ แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [7]

### 2.1.2 การบวมตัวและปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล

สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจลคือ สามารถบวมตัวแต่ไม่ละลายในน้ำ เนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำโมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่านและแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้างสามมิติของไฮโดรเจลนั้นได้ เนื่องจากแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) โมเลกุลน้ำบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์แล้วผลักดันให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการขยายตัวหรือเกิดการบวมตัวขึ้น ซึ่งเป็นการปรับโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เกิดสมดุลใหม่ ไฮโดรเจลเมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่แยกขาดออกจากกัน เนื่องจากโครงสร้างภายในประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัดและยึดกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ โดยมีตัวเชื่อมตอสายโซ่ (crosslinker) เป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายพอลิเมอร์ไว้ การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจลแสดงดังภาพที่ 2.3

ปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล มีดังนี้

1. แรงดันออสโมติก เนื่องจากปริมาณน้ำภายในและภายนอกไฮโดรเจลมีไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจล ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมาก น้ำก็จะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมาก ขึ้น
2. แรงกระทำระหว่างโมเลกุลน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสมสามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วจะทำให้เป็นการเหนี่ยวนำโมเลกุลน้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก
3. ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มาก น้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มาก
4. ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าสายโซ่มีความยืดหยุ่นที่ดี จะเป็นการลดแรงต้าน (resistance force) ของการแพร่ของโมเลกุลน้ำ เพื่อเข้าสู่สมดุลใหม่ ทำให้โมเลกุลน้ำแพร่ผ่านเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก
5. ความหนาแน่นของการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้ามีความหนาแน่นของการเชื่อมต่อมากจะเปรียบเสมือนกับเป็นการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายตัวของไฮโดรเจลทำให้ความสามารถในการบวมตัวได้ลดลงโมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในไฮโดรเจลมี 2 ลักษณะใหญ่ๆ แสดงดังภาพที่ 2.4 ได้แก่ โมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ เรียกว่า “โมเลกุลน้ำอิสระ” (free water) สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ระบายได้ง่าย มีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจลไม่มากนัก และโมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่ (bound water) ซึ่งมีการเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยากกว่าและต้องใช้ความร้อนปริมาณหนึ่งในการระเหยโมเลกุลน้ำลักษณะนี้ออก ปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮโดรเจล (water content, WC) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1)

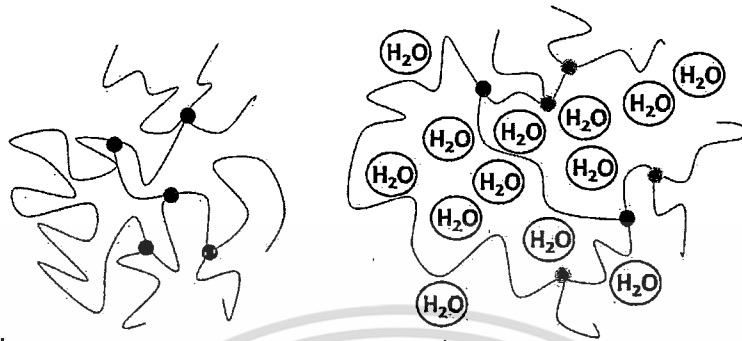
$$\% \text{ ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบ} = \frac{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักของพอลิเมอร์แห้ง}}{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ}} \quad (2.1)$$

สำหรับปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮโดรเจลขณะที่ไฮโดรเจลพองตัวเต็มที่แล้วเรียกว่า “ปริมาณน้ำสมดุล” (equilibrium water content, EWC)

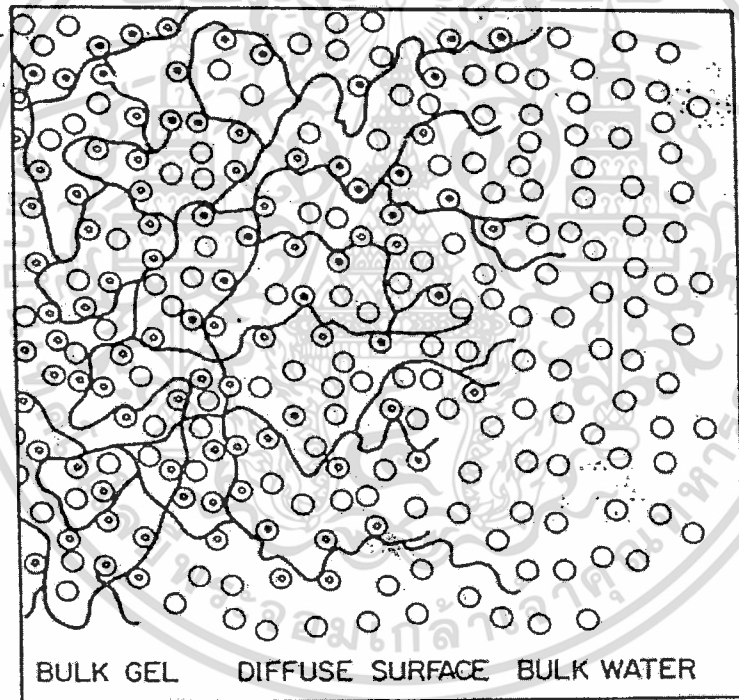
นอกจากการหาปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในไฮโดรเจลในตัวแปรของ WC ยังมีการศึกษาในตัวแปรสัดส่วนของการบวมตัว (swelling ratio, SR) ซึ่งเป็นการแสดงน้ำหนักของน้ำที่ดูดซับเข้าไปเทียบกับพอลิเมอร์ การคำนวณหา SR แสดงดังสมการ (2.2)




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{สัดส่วนการบวมตัว} = \frac{(\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักของพอลิเมอร์แห้ง})}{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์แห้ง}} \quad (2.2)$$



ภาพที่ 2.3 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล [7]



-  คือ สายโซ่พอลิเมอร์
-  คือ โมเลกุลอิสระ
-  คือ โมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่พอลิเมอร์

ภาพที่ 2.4 อันตรกิริยาของโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 กระบวนการปลดปล่อยสาร (controlled release (CR)) [8]

กระบวนการปลดปล่อยสาร (controlled release (CR)) คือ การออกแบบให้มีการปลดปล่อยสารในอัตราคงที่ และความเข้มข้นของสารไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อมีการดูดซับสาร รูปแบบการปลดปล่อยสารมีหลายรูปแบบ เช่น

### 2.2.1 การแพร่ผ่านเมมเบรน (Membrane controlled device)

สารจะถูกกักเก็บอยู่ภายในไฮโดรเจล ซึ่งผิวหน้าถูกเคลือบหรือห่อหุ้มด้วยพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์นี้เองจะทำหน้าที่ในการควบคุมการปลดปล่อยสารสู่ภายนอก แบ่งออกเป็น

1. Membrane diffusion : ใช้พอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่เกิดการพองตัวได้ ทำให้เกิดรูภายในโครงสร้างสารจึงแพร่ผ่านรูของพอลิเมอร์

2. Membrane dissolution : สารที่ต้องการปลดปล่อยจะถูกปลดปล่อยออกโดยการละลายออกมาอย่างช้าๆ ทำให้มีระยะเวลาในการปลดปล่อยยาวนานขึ้น ทำได้โดยการเคลือบอนุภาคสารที่ต้องการปลดปล่อยด้วยสารที่ละลายช้าให้ความหนาต่างๆ กัน เมื่อผิวหน้าที่เคลือบละลายหมดสารที่ต้องการปลดปล่อยก็就会被ปล่อยออกมา โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมอัตราเร็วในการละลายของสาร คือ

1. ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์
2. ความเร็วในการละลายของสารเคลือบ (พอลิเมอร์)

### 2.2.2 การแพร่ผ่านเมทริกซ์ (Matrix device)

สารที่ต้องการปลดปล่อยจะกระจายอยู่ในพอลิเมอร์ แบ่งเป็น

1. Matrix diffusion : สารที่ต้องการปลดปล่อยจะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอภายในส่วนกักเก็บของไฮโดรเจล (พอลิเมอร์) โดยปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยสาร คือ

1. รูพรุนและช่องภายในรูพรุนของพอลิเมอร์
2. พื้นที่ผิวของเมทริกซ์
3. ความเข้มข้นของสารที่ปลดปล่อย

2. Matrix dissolution : ผสมพอลิเมอร์ที่ละลายได้เข้ากับสารที่ต้องการปลดปล่อย เพื่อลดการละลายให้ช้าลง สารจะละลายออกมาช้าๆ พร้อมกับ การละลายของพอลิเมอร์โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยสาร คือ

1. อัตราการละลายของพอลิเมอร์
2. พื้นที่ผิวของเมทริกซ์
3. อัตราส่วนของพอลิเมอร์ต่อสารที่ต้องการปลดปล่อย
4. การพองตัวของพอลิเมอร์

### 2.2.3 การปลดปล่อยโดยอาศัยความดันออสโมซิส (Osmosis device)

การปลดปล่อยโดยใช้แรงดันออสโมซิสประกอบไปด้วย

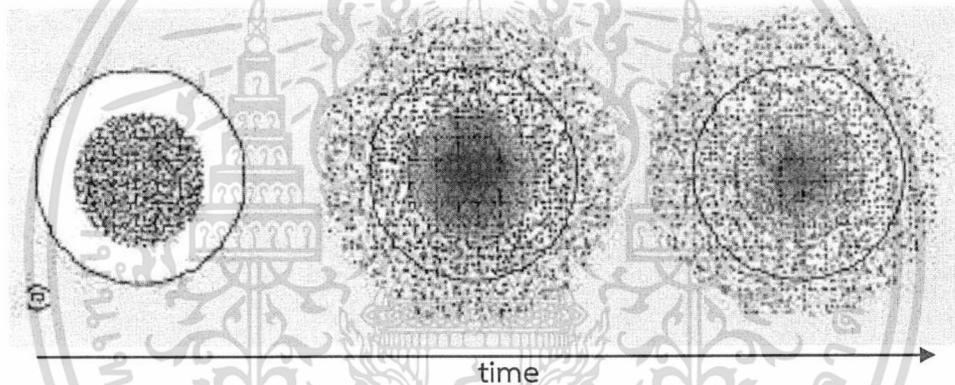
1. สารที่ดูดน้ำได้และทำให้เกิดแรงดัน osmotic
2. เยื่อเลือกผ่าน ยอมให้น้ำผ่านแต่ไม่ยอมให้สารละลายอื่นผ่าน แต่ได้ฟิล์มที่ไม่ละลายและไม่ยืดหยุ่น
3. ช่องที่เปิดให้สารเข้า-ออก (orifice pore)

#### 2.2.4 อัดสารที่ต้องการปลดปล่อยในลักษณะเม็ด (Compression coated tablet)

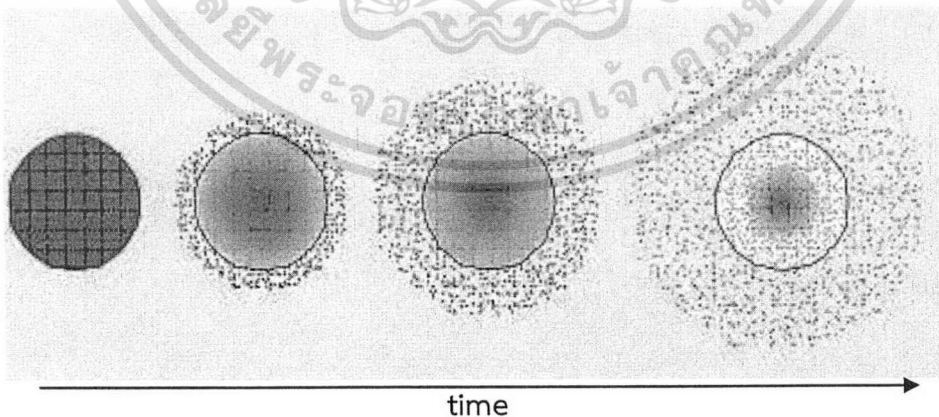
อัดเม็ดเป็นชั้น 2-3 ชั้น โดยให้สารที่ต้องการปลดปล่อยอยู่ตรงกลาง แล้วนำพอลิเมอร์มาประกบชั้นบนและชั้นล่าง โดยชั้นพอลิเมอร์ที่มาประกบจะเป็นตัวควบคุมการปลดปล่อย

#### 2.2.5 การแลกเปลี่ยนประจุโดยใช้เรซิน (Ion exchange resin)

ใช้กับสารที่ต้องการปลดปล่อยที่มีประจุ โดยใช้เรซินที่มีประจุตรงข้ามกับสารที่ต้องการปลดปล่อยและเมื่อสารที่ต้องการปลดปล่อยอยู่ในสภาวะที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ก็จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน จึงทำให้สารที่ต้องการปลดปล่อยถูกปลดปล่อยออกมา



ภาพที่ 2.5 ก แบบจำลองการปลดปล่อยแบบแพร่ผ่านเมมเบรน



ภาพที่ 2.5 ข แบบจำลองการปลดปล่อยแบบแพร่ผ่านเมทริกซ์

ภาพที่ 2.5 แบบจำลองรูปแบบการปลดปล่อยสาร [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 กัมธรรมชาติ (Natural gums)

กัม (Gum) จากแหล่งธรรมชาติเป็นสารประกอบประเภทพอลิแซ็กคาไรด์และอนุพันธ์ของพอลิแซ็กคาไรด์ส่วนใหญ่ได้จากพืช สามารถละลายได้ในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อนโดยสารละลายที่ได้จะมีความหนืดสูง แม้ว่าความเข้มข้นของกัมจะน้อยก็ตาม ดังนั้นจึงมีการนำกัมจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมประเภทอาหารโดยใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดหรือสารข้น สารช่วยให้เกิดเป็นเจล อิมัลซิไฟเออร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาผลิตเป็นกาวได้

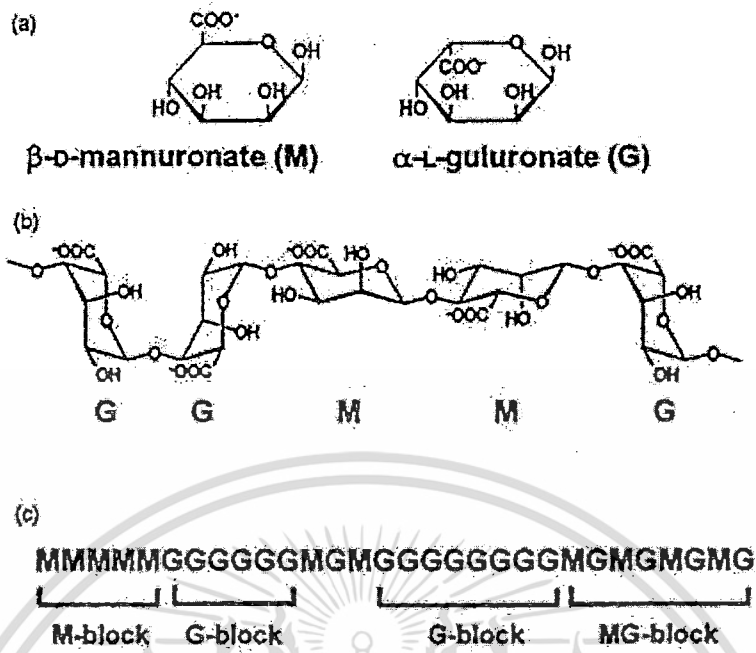
แหล่งที่มาของกัมจากธรรมชาติ

1. กัมจากสาหร่ายทะเล (Algae Source) เช่น อะการ์ (Agar), อัลจิเนต (Alginate)
2. กัมจากพืช ( Botanical Source ) เช่น ได้จากส่วนต่างๆของพืช
  - Plant Extrudates เช่น กัมอะราบิก (Gum Arabic)
  - เมล็ด (Seed Gums) เช่น กัวร์กัม (Guar gum)
  - เนื้อเยื่อไม้ (Plant Tissue) เช่น เพคติน (Pectin)
3. กัมจากสิ่งมีชีวิตชนิดขนาดเล็ก (Microbial Gums) เช่น แซนแทนกัม (Xanthan Gum)

### 2.3.1 อัลจิเนต (Alginate)

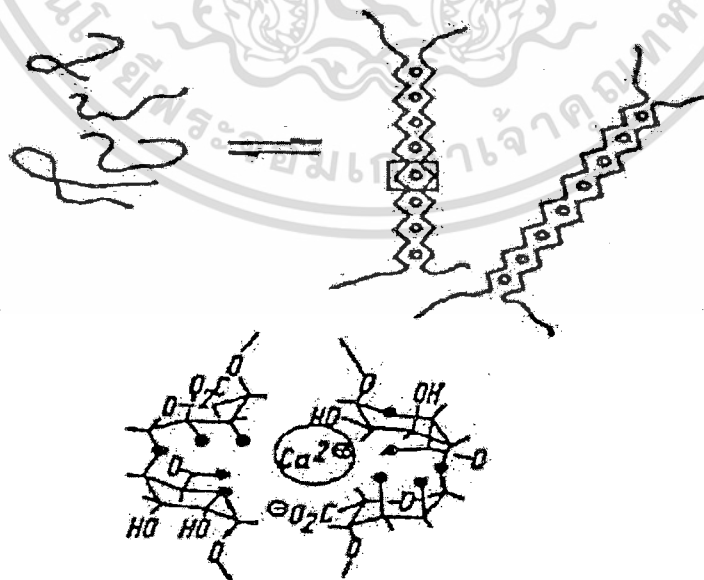
กัมที่ได้จากผนังเซลล์ของสาหร่ายสีน้ำตาลเรียกว่า Alginate อัลจิเนตอยู่ในรูปของเกลือโซเดียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมของกรดอัลจินิก อัลจิเนตหรืออัลจินเป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) ในการผลิตอัลจิเนตเป็นอุตสาหกรรมสาหร่ายทะเลที่ใช้ ได้แก่ *Macrocystis pyrifera* มีอัลจินประมาณ 14-19 %, *Laminaria cloustoni* และ *Laminaria digitata* มีอัลจินประมาณ 15-40 % ปริมาณที่พบจะขึ้นกับชนิดของสาหร่าย ฤดูกาล และแหล่งที่สาหร่ายเจริญเติบโต สาหร่ายเหล่านี้พบได้ทั้ๆ ไปในโลก ประเทศที่ผลิตอัลจิเนต มาก คือ อเมริกา อังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน นอร์เวย์ แคนาดา และญี่ปุ่น

อัลจิเนตเป็น unbranched binary copolymer ของ 1,4-b-D-manuronic acid (M) และ L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วย homopolymeric regions ของ G และ M ที่เรียกว่า G- และ M-blocks ตามลำดับและยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks ดังภาพที่ 2.9 สัดส่วนของ copolymer และโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าพอลิเมอร์มี G ในปริมาณที่สูงจะมีสมบัติเป็นเจลที่แข็ง แต่ถ้าพอลิเมอร์มี M ปริมาณสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเจลที่อ่อนนุ่มและมีสภาวะในการเกิดเจลที่กว้างกว่า



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) [10]

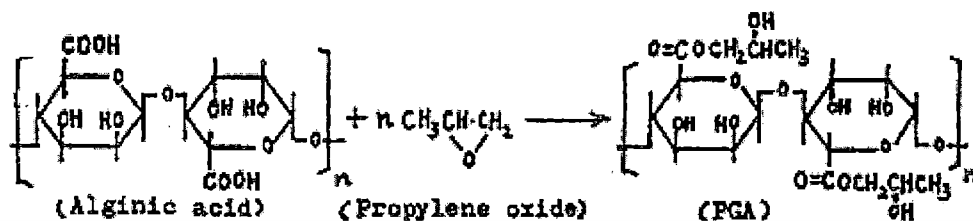
อัลจิเนตบางชนิดมีคุณสมบัติเป็นเจลและเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับ  $Ca^{2+}$  โครงสร้างของเจลมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (egg box) โดยมี  $Ca^{2+}$  เกาะอยู่กับสายพอลิเมอร์ดังภาพที่ 2.10 สมบัติที่ดีของอัลจิเนตคือ ทำให้เกิด Irreversible gel เกิดเป็นเจลในน้ำเย็นเมื่อมี  $Ca^{2+}$  รวมอยู่ด้วย ซึ่งสมบัติในการเกิดเจลที่อุณหภูมิต่ำนี้ทำให้อัลจิเนตแตกต่างจากไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้จากสาหร่ายสีแดง



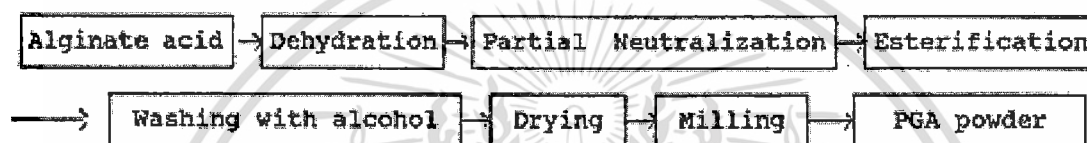
ภาพที่ 2.7 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model) [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัลจินตที่ผลิตจำหน่ายเป็นการค้ามีหลายอนุพันธ์จึงมีสมบัติการละลายในน้ำที่ต่างกักัน เช่น อนุพันธ์ ของเกลือ  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  และยังผลิตในรูปของ propylene glycol alginate ซึ่งได้จากปฏิกิริยาของ alginic acid กับ propylene oxide ภายใต้ความดัน



ภาพที่ 2.8 ปฏิกิริยาของกรดอัลจินตกับพรอพิลีนออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์พรอพิลีนไกลคอลอัลจินต (PGA) [12]



ภาพที่ 2.9 แผนภาพการผลิตผง PGA [12]

อนุพันธ์ของเกลือ  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  เหล่านี้ละลายได้ทั้งในน้ำร้อนและน้ำเย็น ความหนืดของสารละลายอัลจินตที่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้น น้ำหนักโมเลกุล และประจุบวกของโลหะที่มีอยู่ในโครงสร้าง รวมถึงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วย เช่น ความหนืดของสารละลายอัลจินตจะคงที่เมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 5 แต่ความหนืดของสารละลายอัลจินตจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างน้อยกว่า 4.5 และถ้าสารละลายมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 จะเริ่มมีผลึกของกรดอัลจินิกเกิดขึ้น

ปัจจุบันอัลจินตถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ใช้ประโยชน์ในการทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความข้นหนืด สารเพิ่มความคงตัว ทำให้อิมัลชันคงตัวสารทำให้เกิดเจล นอกจากนี้ยังใช้อัลจินตในอุตสาหกรรมอื่นๆ อีกด้วย

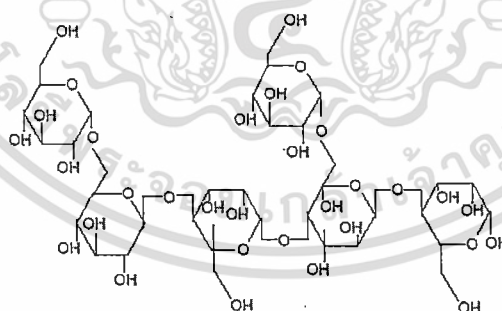
- อัลจินตจะทำหน้าที่ช่วยให้อิมัลชันคงตัวในการทำน้ำสลัด
- โซเดียมอัลจินตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายที่แช่เย็นเพื่อให้เกิดความคงตัวระหว่างการละลาย (freeze - thawint)
- อัลจินตยังใช้เคลือบผิวชั้นเนื้อปลาเพื่อนำไปแช่เยือกแข็งเพื่อป้องกันไม่ให้ปลาเกิดการไหม้ (freezer burn)
- อัลจินตยังใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม น้ำสลัด และใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับโพน เป็นต้น
- ใช้เป็นสารชั้นในการผลิตเครื่องสำอาง

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนโดยประมาณของการใช้อัลจิเนต [13]

| อุตสาหกรรม             | ปริมาณของความต้องการอัลจิเนต (%) |
|------------------------|----------------------------------|
| อุตสาหกรรมสิ่งทอ       | 50                               |
| อุตสาหกรรมอาหาร        | 30                               |
| อุตสาหกรรมเคลือบกระดาษ | 6                                |
| Welding rods           | 5                                |
| อุตสาหกรรมยา           | 5                                |
| อุตสาหกรรมอื่นๆ        | 4                                |

### 2.3.2 กัวร์กัม (Guar gum)

กัวร์กัม (Guar gum) เป็นสารประกอบกาแลคโตแมนแนน (Galactomannan) ได้จากเมล็ดของต้นกัว (Cyamopsis tetragonoloba) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและปากีสถาน ปัจจุบันมีปลูกในรัฐเท็กซัส สหรัฐอเมริกา โครงสร้างของกัวร์กัมเป็นพอลิเมอร์สายยาวของแมนโนส (mannose) ที่ต่อกันด้วยพันธะ 1,4 และมีกิ่งแขนงของกาแลคโทส (galactose) โดยทุก ๆ 2 โมเลกุลของแมนโนส (mannose) ต่อกับ 1 โมเลกุลของกาแลคโทส (galactose) ด้วยพันธะ 1,6 ทำให้อัตราส่วนของแมนโนส (mannose) ต่อ กาแลคโทส (galactose) เป็น 2:1 ซึ่งแสดงว่ากัวร์กัมมีกิ่งแขนงของกาแลคโทส (galactose) แสดงดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างของกัวร์กัม [10]

กัวร์กัม มีสมบัติเป็น non-gelling แต่กระจายตัวและอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด, เพิ่มความคงตัวและอุ้มน้ำ ซึ่งความหนืดจะเพิ่มมากยิ่งขึ้นเมื่อผ่านการให้ความร้อน ในน้ำเย็นกัวร์กัมสามารถเพิ่มความหนืดได้ถึง 3,500 cp (ความเข้มข้น 1%) โดยไม่ต้องใช้ความร้อน สามารถเกิดอันตรกิริยากับ Xanthan gum ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความหนืดของสารละลายกัวร์กัมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH เวลา ความเข้มข้น และขนาดของอนุภาค กัวร์กัมเป็น non-ionic และทนต่อ pH ช่วงกว้างตั้งแต่ 4-10 ทำให้สามารถเติมอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่า 5 % จะมีผลต่อการอุ้มน้ำและเกิดเจล กัวร์กัมมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0

ปัจจุบันสามารถนำกัวร์กัมมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้

- ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายประเภท เช่น ไอศกรีม น้ำผลไม้และเครื่องดื่มโดยทำหน้าที่เป็นสารให้ความคงตัว ส่วนในซอสและน้ำสลัดโดยทำหน้าที่เป็นสารให้ความหนืด และขนมปังตลอดจนผลิตภัณฑ์อาหารแช่เยือกแข็ง โดยทำหน้าที่ช่วยรักษาความชื้นในผลิตภัณฑ์
- อุตสาหกรรมสิ่งทอ เช่น thickener และ sizing agent

#### 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. Barbucci และคณะ (2008) [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมในการไหลและการบวมตัวของไฮโดรเจลที่เตรียมจากการเชื่อมโยงกัวร์กัมด้วย PEGDGE (Polyethylene glycol diglycidyl ether) ในสารละลายต่าง ในการศึกษาพฤติกรรมในการไหลนั้นพบว่า เมื่อเพิ่ม shear rate ทำให้ความหนืดของไฮโดรเจลลดลง ส่วนการบวมตัวในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ที่ค่า pH 2, 4, 5, 9 และ 11 พบว่า หลังจากผ่านไป 4 วัน ไฮโดรเจลสามารถบวมตัวได้ดีที่สุดเมื่อมีค่า pH เท่ากับ 4

N. Rasool และคณะ (2010) [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์และตรวจวิเคราะห์ไฮโดรเจลที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH, ionic strength และอุณหภูมิ ซึ่งไฮโดรเจลนี้เตรียมได้จากการเชื่อมโยง Kappa carrageenan กับกรดอะคริลิก ด้วยไวโนล-ไตรเอทอกซีไซเลน (vinyltriethoxysilane : VTESI) โดยมีโปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวริเริ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วล้างชิ้นงานด้วยน้ำกลั่นและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสภายใต้สูญญากาศ จากนั้นนำไปทดสอบการบวมตัวที่สภาวะต่างๆ โดยใช้เจลแห้งหนัก 50 กรัม แช่ลงในสารละลาย 100 มิลลิลิตร พบว่า เมื่อค่า pH และอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เจลมีแนวโน้มที่จะบวมตัวได้มากขึ้น แต่หากความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงและ ionic strength มีค่าเพิ่มขึ้น เจลมีแนวโน้มที่จะบวมตัวน้อยลง

F. Khoylou และ F. Naimian (2008) [18] ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นจาก Tragacanth (ยางเหนียวที่ได้จากไม้พุ่มจำพวก Astragalus) กับพอลิเอทิลีนออกไซด์ (PEO) และทำการเชื่อมโยงโดยอาศัยการฉายรังสีแกมมาที่อุณหภูมิห้อง วิธีการทำใช้ Tragacanth ที่ความเข้มข้น 0%, 1%, 3%, 5% ผสมกับ PEO 5% เตรียมโดยละลายในน้ำให้อยู่ในรูปของสารละลาย และทำการผสมในอัตราส่วน 1:1 หลังจากนั้นทำการฉายรังสีแกมมา Co-60 โดยให้ความเข้มแสง 5-20 kGy เมื่อได้ไฮโดรเจลที่ทำการเชื่อมโยงแล้ว ทำการศึกษาผลขององค์ประกอบของไฮโดรเจลต่อ

พฤติกรรมการบวมตัว พบว่าไฮโดรเจลจะจับตัวกันได้ดีเมื่อใส่ Tragacanth ความเข้มข้น 1% แต่เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นเป็น 3%, 5% จะทำให้การเกิดเป็นเจลน้อยลง ส่วนพฤติกรรมการบวมตัว Tragacanth ความเข้มข้น 5% จะมีเปอร์เซ็นต์การบวมตัวเพิ่มขึ้นถึง 14,000 %

I. Gliko-kabir และคณะ (1999) [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ทางความร้อนของกัวร์กัมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์เข้มข้น 25 % โดยน้ำหนัก โดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ที่อุณหภูมิ 50-500 องศาเซลเซียส และ Thermogravimetric analysis (TGA) ที่อุณหภูมิ 70-600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนพบว่า เมื่อปริมาณของกลูตารอลดีไฮด์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้อุณหภูมิการสลายตัวเพิ่มสูงขึ้นและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้น

H. Nie และคณะ (2004) [20] ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยในการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและพฤติกรรมการย่อยสลายของไฮโดรเจลในดิน ซึ่งเตรียมไฮโดรเจลโดยการเชื่อมโยงโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) ด้วย อะลูมิเนียมคลอไรด์ ( $AlCl_3$ ) พร้อมใส่สารฆ่าเชื้อและสารอาหารไว้ภายในด้วย จากนั้นทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินเป็นเวลา 3 เดือน จากการทดลองพบว่า ปริมาณของสารฆ่าเชื้อ สารอาหารและประเภทของดินที่ต่างกันมีผลต่อการย่อยสลายของไฮโดรเจล ซึ่งไฮโดรเจลจะย่อยสลายได้ดีในดินทราย นอกจากนี้อัตราส่วนของ  $AlCl_3$  ต่อ Na-CMC ก็มีผลต่อการย่อยสลายในดินด้วยโดยพบว่าที่อัตราส่วน  $AlCl_3$  ต่อ Na-CMC เท่ากับ 0.13 สามารถย่อยได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิห้อง

M. George และ T.E. Abraham (2007) [21] เป็นการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและกัวร์กัมที่มีความว่องไวต่อค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงโดยมีการเชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์ ถูกสังเคราะห์เพื่อควบคุมการขนส่งยาโปรตีน (BSA) ภายในลำไส้ การทดลองได้มีการนำกัวร์กัมเข้ามาผสมกับอัลจิเนตและใช้กลูตารอลดีไฮด์ความเข้มข้น 0.25, 0.3, 0.4 และ 0.5% โดยน้ำหนัก และไฮโดรเจลที่ได้ถูกนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยหยดสารละลายผสมของอัลจิเนตและกัวร์กัมลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 M นำไปทดสอบการบวมตัวในสารละลายที่มีค่า pH 1.2 และ 7.4 การบวมตัวของไฮโดรเจลขึ้นกับความเข้มข้นของกลูตารอลดีไฮด์ที่ใช้เชื่อมโยง อัตราส่วนระหว่างอัลจิเนตต่อกัวร์กัมและค่า pH จากการศึกษพบว่าที่ pH 1.2 และ 7.4 ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์เข้มข้น 0.3% มีการบวมตัวที่ดีที่สุด

A. Pourjavadi และคณะ (2006) [2] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมไฮโดรเจลที่เป็นตัวดูดซับยั้งยวดโดยใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิแซคคาไรด์ทั้งหมด ซึ่งพอลิแซคคาไรด์ที่ใช้คือโซเดียมอัลจิเนต (Na-Alg) และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) โดยใช้เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (MBA) เป็นสารเชื่อมโยงและใช้แอมโมเนียมซัลเฟต (APS) เป็นตัวริเริ่ม แล้วทำการตรวจวิเคราะห์ลักษณะด้วย FT-IR และ SEM จากการทดลองพบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และมีอัตราส่วน Na-Alg : Na-CMC เท่ากับ 0.54 สามารถดูดซับน้ำได้ดีที่สุด และเมื่อเพิ่มปริมาณของ MBA

และ APS จะทำให้การดูดซับน้ำลดลง ส่วนการดูดซับสารละลายเกลือพบว่า ความสามารถในการบวมตัวในสารละลายเกลือเป็นดังนี้  $Na^+ > Ca^{2+} > Al^{3+}$

C. Chang และคณะ (2010) [1] ได้ทำการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ร่วมกับเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์/ยูเรีย ใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ CMC : เซลลูโลส ที่แตกต่างกันเป็น 5:5, 6:4, 7:3, 8:2 และ 9:1 โดยใช้อีพิคลอโรไฮดริน (ECH) เป็นตัวเชื่อมโยงจะได้ไฮโดรเจลดังนี้ GEL55, GEL64, GEL73, GEL82 และ GEL91 ตามลำดับ แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของเจลในน้ำกลั่น โดยการบวมตัวในน้ำกลั่นพบว่า GEL91 สามารถบวมตัวได้มากที่สุดโดยน้ำสามารถเข้าไปได้มากถึง 91 % และการบวมตัวของเจลจะลดลงเมื่อปริมาณ CMC ลดลง เนื่องจากอิทธิพลของหมู่ Hydrophilic Carboxyl ที่ลดลงนั่นเอง นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการปลดปล่อย BSA (Bovine serum albumin) ในเนื้อเยื่อพบว่า GEL91 จะปลดปล่อยสาร BSA ออกมาได้เร็ว และมากที่สุดถึง 70 % ในขณะที่ GEL55 และ GEL73 เปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยจะมีค่าต่ำกว่า GEL91 ที่ช่วงเวลาเดียวกัน และเมื่อเวลาผ่านไป 60 ชั่วโมง GEL91, GEL73 และ GEL55 จะสามารถปลดปล่อยสาร BSA ออกมาได้ถึง 96.5 % , 88.3 % และ 41.5 % ตามลำดับ

P. Huynh และคณะ (2009) [22] ได้ทำการศึกษาการควบคุมการปลดปล่อยอินซูลินของ Pentablock copolymer hydrogel ซึ่งเตรียมมาจาก PAE-PCL-PEG-PCL-PAE โดยโคพอลิเมอร์ที่ได้นี้เป็นของเหลว หลังจากนั้นได้มีการผสมอินซูลินลงไปโคพอลิเมอร์ของเหลวเกิดเป็นสารประกอบของ Insulin-PAE ทำการฉีดโคพอลิเมอร์เหลวผสมเข้าใต้ผิวหนังมนุษย์โดยให้ความเข้มข้นของอินซูลินและโคพอลิเมอร์เหลวผสมที่ฉีดเข้าไปมีความแตกต่างกัน เมื่อโคพอลิเมอร์เหลวผสมนี้หากอยู่ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนมาอยู่ในรูปของเจล แล้วทำการตรวจวัดการปลดปล่อยอินซูลินโดยใช้ HPLC ร่วมกับการใช้ UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 214 นาโนเมตร พบว่าตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการปลดปล่อยอินซูลินขึ้นอยู่กับปริมาณของอินซูลินที่ใส่เข้าไป และความเข้มข้นของโคพอลิเมอร์ในไฮโดรเจล

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

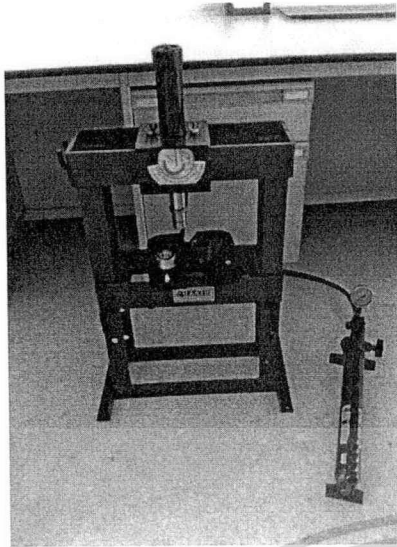
##### 3.1 สารเคมี

1. กัวร์กัม (Guar Gum : GG) เกรดการค้า
2. โซเดียมอัลจีเนต (Sodium alginate : Na-Alg) เกรดการค้า
3. โซเดียมเตตระบอเรต (Sodium tetraborate :  $\text{Na}[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})].8\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์
4. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassiumdihydrogenphosphate :  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์
5. แอมโมเนียมโมลิบเดต (Ammonium molybdate:  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}.4\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์
6. แอมโมเนียมเมตาแวนาเดต (Ammonium metavanadate:  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}.4\text{H}_2\text{O}$ ) เกรดวิเคราะห์
7. สารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc. Hydrochloric: HCl) เกรดวิเคราะห์
8. ปุ๋ยตัวอย่างอัดเม็ด
9. ปุ๋ยตัวอย่างเคลือบเรซินชนิดละลายช้า

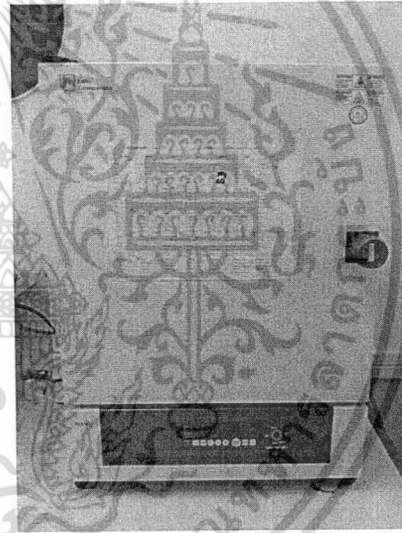
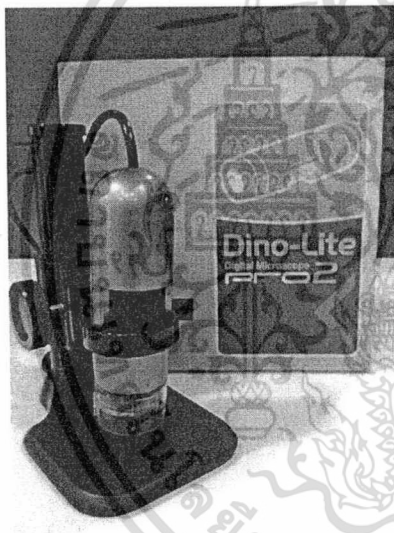
##### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน รุ่น IKA C-MAG HS 7
2. แท่งแม่เหล็กคนสาร
3. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. เครื่องแก้ว
5. ตะแกรงลวดขนาด 400 เมช
6. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร
7. เครื่องกรองแบบสุญญากาศ
8. เครื่องอัดเม็ด แรงดัน 5 ตัน จากบริษัท Sang Thai Intertrade co., LTD
9. กล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2
10. ตู้อบ รุ่น OF-01E
11. ไมโครมิเตอร์
12. เวอร์เนียคาลิปเปอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 เครื่องอัดเม็ด



ภาพที่ 3.2 กล้อง Digital microscope

ภาพที่ 3.3 ตู้อบ ร้อน OF-01E

### 3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายในงานวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

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

#### 3.3.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมเทรโบเรตความเข้มข้น 3 % w/v

1. ชั่งสารโซเดียมเทรโบเรต จำนวน 0.3 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ละลายโซเดียมเทรโบเรตในน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร

### 3.3.3 การเตรียมสารละลายวานาเดท โมลิบเดท รีเอเจนท์

1. ละลายแอมโมเนียมโมลิบเดท 25 กรัม ในน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร
2. ละลายแอมโมเนียมเมตาวานาเดท 1.25 กรัม ในน้ำกลั่นอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสปริมาตร 300 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Conc.HCl) ปริมาตร 330 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำละลายของแอมโมเนียมโมลิบเดทที่เตรียมไว้ใส่ลงรวมกับสารละลายแอมโมเนียมเมตาวานาเดทแล้วถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 มิลลิลิตร

### 3.4 การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตในปุ๋ยเม็ดตัวอย่างทางการค้า

ตัวอย่างปุ๋ยที่นำมาหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต มีด้วยกัน 2 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ 1 มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลมละลายช้าเคลือบผิวด้วยเรซิน ส่วนตัวอย่างที่ 2 มีลักษณะเป็นปุ๋ยอัดเม็ดทรงกระบอก

ขั้นตอนการหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตในปุ๋ยเม็ดตัวอย่าง

1. ชั่งตัวอย่างปุ๋ยเม็ดเรซิน (ตัวอย่างที่ 1) หนักประมาณ 1.000 กรัม
2. แช่ปุ๋ยตัวอย่างลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร
3. ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที
4. หยุดให้ความร้อน แต่ยังคงทำการปั่นกวนต่อไป
5. ปิเปตสารละลายที่ได้มา 1 มิลลิลิตร ที่เวลา 30 นาที และทุกๆ 1 ชั่วโมง ทำการกรองแบบลดความดัน
6. ทำการตรวจหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตโดยนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร แล้วเทียบกราฟมาตรฐานเพื่อหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่มีอยู่ในปุ๋ยตัวอย่าง
7. ทำการตรวจวัดจนปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ได้มีค่าคงที่
8. สำหรับตัวอย่างที่ 2 ทำเช่นเดียวกับตัวอย่างที่ 1 แต่เพิ่มขั้นตอนการกรองแยกตะกอนออกจากสารละลายก่อนทำการปิเปตสารละลายมาตรวจวัด
9. คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตในปุ๋ยเม็ดเรซินหนัก 1.0000 กรัม โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้
  - 9.1 นำค่าการดูดกลืนแสงของปุ๋ยเม็ดเรซิน 1.0000 กรัม มาเทียบหาปริมาณฟอสฟอรัสจากกราฟมาตรฐานได้ค่า  $A \times 10^{-3}$  มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อ 1 กรัมปุ๋ย
  - 9.2 คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต จาก

$$\text{มิลลิกรัมของ } \text{KH}_2\text{PO}_4 = \frac{136.0838 \times (A \times 10^{-3})}{31} = B$$

31

9.3 ได้ B มิลลิกรัมของ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$

9.4 เจล 1 กรัม สามารถดูดสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ได้ B มิลลิกรัมจากข้อมูลงานวิจัยในกลุ่มวิจัยพบว่าเจลสามารถดูดสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ได้ 20 เท่า จึงนำมาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณความเข้มข้นของ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$

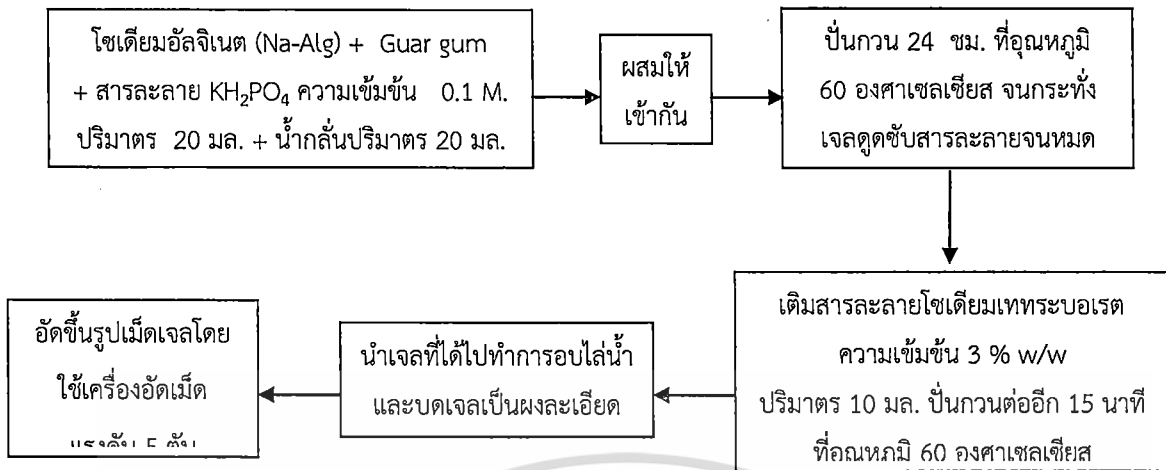
9.5 จากการคำนวณ (ในหัวข้อ 4.1) พบว่าความเข้มข้นของปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เมื่อเทียบเป็นปริมาณความเข้มข้นของ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  สำหรับปุ๋ยตัวอย่างที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.045 M และปุ๋ยตัวอย่างที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.2 M จึงได้ทำการเลือกค่าความเข้มข้นของ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ที่ 0.1 M ซึ่งมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงระหว่างปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด

### 3.5 ขั้นตอนการบรรจุสารปลดปล่อยในไฮโดรเจล

#### 3.5.1 วิธีที่ 1 การเตรียมเจล และการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจน

ฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว

1. ชั่งโซเดียมอัลจิเนต และกัวร์ กัม จำนวน 0.6 กรัม และ 0.4 กรัมตามลำดับ สำหรับเจลสูตร A6G4 และจำนวน 0.4 กรัม และ 0.6 กรัมในเจลสูตร A4G6
2. ผสมโซเดียมอัลจิเนตและกัวร์กัมเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น 0.1 M ด้วยอัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตร ของผสม : สารละลาย เท่ากับ 1:40 (สารละลายประกอบด้วย สารละลายไดไฮโดรเจนฟอสเฟตปริมาตร 20 มิลลิลิตร และน้ำกลั่น ปริมาตร 20 มิลลิลิตร) พร้อมปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเจลเกิดการดูดซับสารละลายจนหมด
4. เติมสารละลายโซเดียมเทรโบเรตความเข้มข้น 3 % w/v ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
5. ปั่นกวนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
6. อป้ไล่น้ำ และบดเจลเป็นผงละเอียด พร้อมทำการอัดขึ้นรูปเม็ดเจลโดยใช้เครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน



ภาพที่ 3.4 วิธีการเตรียมเจล และดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต แบบขั้นตอนเดียว

### 3.5.2 วิธีที่ 2 การเตรียมไฮโดรเจล และการดูดซับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบ 2 ขั้นตอน

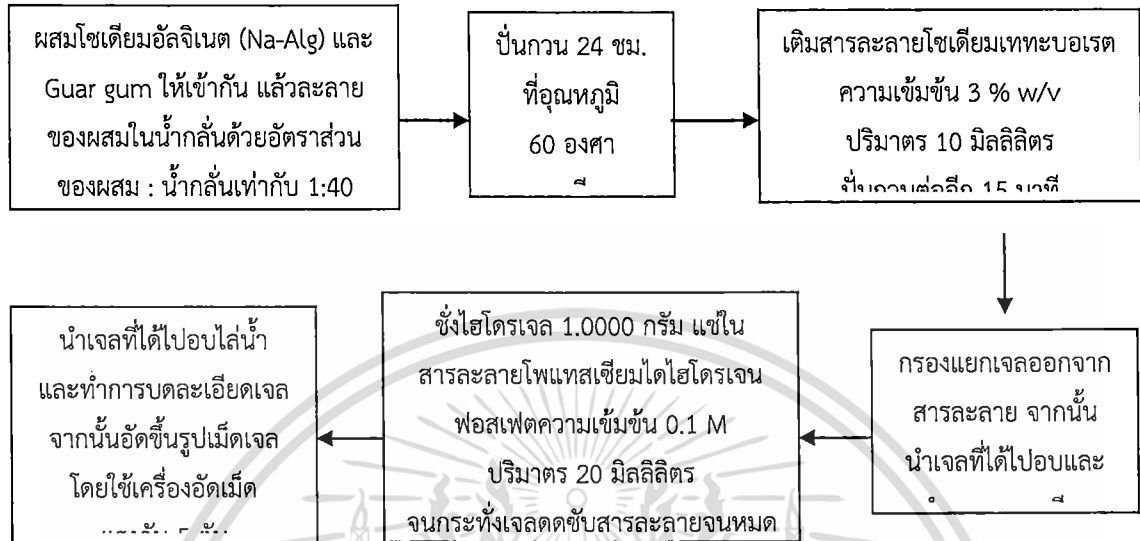
#### 1. ขั้นตอนการเตรียมเจล

1. ชั่งโซเดียมอัลจิเนต และกัวร์กัม จำนวน 0.6 กรัม และ 0.4 กรัม ตามลำดับ
2. ผสมโซเดียมอัลจิเนต และกัวร์กัมเข้าด้วยกัน
3. ละลายของผสมในน้ำกลั่น ด้วยอัตราส่วนของน้ำหนักต่อปริมาตรของผสม : น้ำกลั่นเท่ากับ 1:40 พร้อมปั่นก้อนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
4. เติมสารละลายโซเดียมเทตระโบเรตความเข้มข้น 3 % w/v ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
5. ปั่นก้อนต่ออีก 15 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
6. ทำการกรองแยกเจลออกจากสารละลาย
7. นำเจลที่ได้ไปทำการอบไล่ น้ำ และบดเจลเป็นผงละเอียด
8. ทำซ้ำโดยการปรับปริมาณโซเดียมอัลจิเนต และกัวร์กัมเป็น 0.4 และ 0.6 กรัม ตามลำดับ โดยเจลที่ใช้เป็น A6G4 และ A4G6 ( A= อัลจิเนต, G= กัวร์กัม , ตัวเลขแสดงปริมาณที่ใช้ )

#### 2. ขั้นตอนการดูดซับสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

1. ชั่งเจลที่ทำการบดละเอียดมาประมาณ 1.0000 กรัม
2. แช่เจลลงในสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ความเข้มข้น

- 0.1 M ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จนกระทั่งเจลเกิดการดูดซับสารละลายจนหมด
3. นำเจลที่ได้ไปทำการอบไล่น้ำ และบดให้ละเอียด พร้อมอัดขึ้นรูปเม็ดเจลโดยใช้เครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน



ภาพที่ 3.5 แผนภาพวิธีการเตรียมเจล และดูดซับสารละลายโพแทสเซียม-ไดไฮโดรเจนฟอสเฟตแบบ 2 ขั้นตอน

### 3.6 การตรวจวัดขนาดอนุภาคเจลปุ๋ย

1. นำเจลปุ๋ยอบแห้งมาบดเป็นผงด้วยโกร่งบดสาร
2. เตรียมเจลปุ๋ยบดละเอียดใส่แผ่น glass slide ปิดทับด้วย cover slit
3. นำเจลปุ๋ยบดละเอียดที่เตรียมไว้ไปตรวจวัดขนาดอนุภาคโดยใช้กล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2 กำลังขยาย 230X โดยสุ่มวัดขนาดอนุภาค 50 จุด พร้อมหาค่าเฉลี่ย

### 3.7 การหาความหนาแน่นของเจลปุ๋ยอัดเม็ด

1. ชั่งน้ำหนักเจลปุ๋ยอัดเม็ดความละเอียดให้มีทศนิยม 4 ตำแหน่ง ประมาณ 0.1500 กรัม
2. นำผงเจลปุ๋ยบดละเอียดที่ชั่งมาใส่แม่พิมพ์
3. ทำการอัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน
4. วัดค่าความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และชั่งน้ำหนักเจลปุ๋ยอัดเม็ด
5. ทำการคำนวณหาความหนาแน่นโดยใช้สูตร

$$\text{ความหนาแน่นเจลปุ๋ยอัดเม็ด} = \frac{\text{น้ำหนักเจลปุ๋ยอัดเม็ด}}{\frac{1}{3} \times (\text{รัศมีของเจลปุ๋ยอัดเม็ด})^2 \times \text{ความหนาของเจลปุ๋ยอัดเม็ด}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของเจลในน้ำกลั่น

การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของเจลในน้ำกลั่น

1. ชั่งน้ำหนักเจลปุ๋ยบดให้มีความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง  
ประมาณ 0.1500 กรัม
2. ทำการอัดขึ้นรูปเม็ดเจลโดยใช้เครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน
3. ชั่งน้ำหนักตะแกรงลวดเปล่า
4. ห่อเจลปุ๋ยอัดเม็ดด้วยตะแกรงลวดขนาด 400 เมช พร้อมชั่งน้ำหนัก
5. แข่ตะแกรงลวดที่มีเจลปุ๋ยอัดเม็ดอยู่ในลงในน้ำกลั่น
6. ชั่งน้ำหนักที่ 30 นาทีแรก และทุกๆ 1ชม. ถัดไป
7. คำนวณหาการบวมตัว ตามสมการต่อไปนี้

$$\text{การบวมตัว} = \frac{\text{น้ำหนักของเจลที่บวมตัว} - \text{น้ำหนักของเจลแห้ง}}{\text{น้ำหนักของเจลแห้ง}}$$

### 3.9 วิธีการตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต

#### 3.9.1 การเตรียม Calibration Curve

1. ปิเปตสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่เตรียมไว้ (ข้อ 3.3.1) ตั้งแต่ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ลงในแต่ละขวดทำการผสมให้เข้ากันและ ทำการปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร แล้วตั้งทิ้งไว้ 10 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร ค่า standard phosphate reagent ที่เป็น 0 เป็น reagent blank
3. นำค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณของฟอสเฟต ไปทำการเขียนกราฟ โดยแกน X คือ ปริมาณฟอสเฟต และแกน Y เป็นค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

#### 3.9.2 การตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่ถูกปลดปล่อยจากไฮโดรเจล

1. นำเจลปุ๋ยอัดเม็ต้น้ำหนักประมาณ 0.1500 กรัม แข่ในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่เวลาต่างๆกัน
2. ทำการเก็บน้ำตัวอย่างในช่วงเวลา 30 นาทีแรก และทุกๆ 1ชม. นำไปกรองด้วยชุดกรองแบบลดความดัน

3. ปิเปิดน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรอง ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่เวลาต่างๆ ใส่ในขวดวัด ปริมาตร ขนาด 100 มิลลิลิตร
4. เติม Vanadate-Molybdate reagent 10 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตรทำการปรับ ปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เป็น 100 มิลลิลิตร นำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

### 3.9.3 การคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในเจล

#### 1. การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในเจลจากการทดลอง

1. แช่เจลปุ๋ยอัดเม็ดน้ำหนักประมาณ 0.1500 กรัมในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำตัวอย่าง ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง
3. นำค่าการดูดกลืนแสงของเจลปุ๋ยอัดเม็ดมาเทียบกับกราฟมาตรฐาน

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

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

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

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

แช่เจลในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตรมีปริมาณฟอสฟอรัส เท่ากับ  $30 \times (50X)$

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

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน 1.0000 กรัมเจล (gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )

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

เจลปุ๋ยอัดเม็ด 1.0000 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต  $= \frac{Y}{0.1500} \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$

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

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

#### 2. การหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตที่อยู่ในเจลจากการคำนวณ

ทำการชั่งผงเจลปุ๋ยบดละเอียด 1.0000 กรัม แช่ลงในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.1 M

จำนวน 20 มล.

คำนวณหาปริมาณ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล.

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1000 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  13.6085 กรัม

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $\frac{13.6085 \times 20}{1000} = 0.27217$  กรัม

1000

∴ ในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล. ที่ดูดซับเข้าในเจลปุยอัดเม็ด มีปริมาณ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  เท่ากับ 0.27217 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.27217 กรัม

|                             |               |      |   |
|-----------------------------|---------------|------|---|
| ใน $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 136.0838 กรัม | มี P | 31  |
| ใน $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 0.27217 กรัม  | มี P | $31 \times 0.27217 = 0.0620$ กรัม                             |
|                             |               |      | <hr style="width: 50%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/> |
|                             |               |      | 136.0838  |

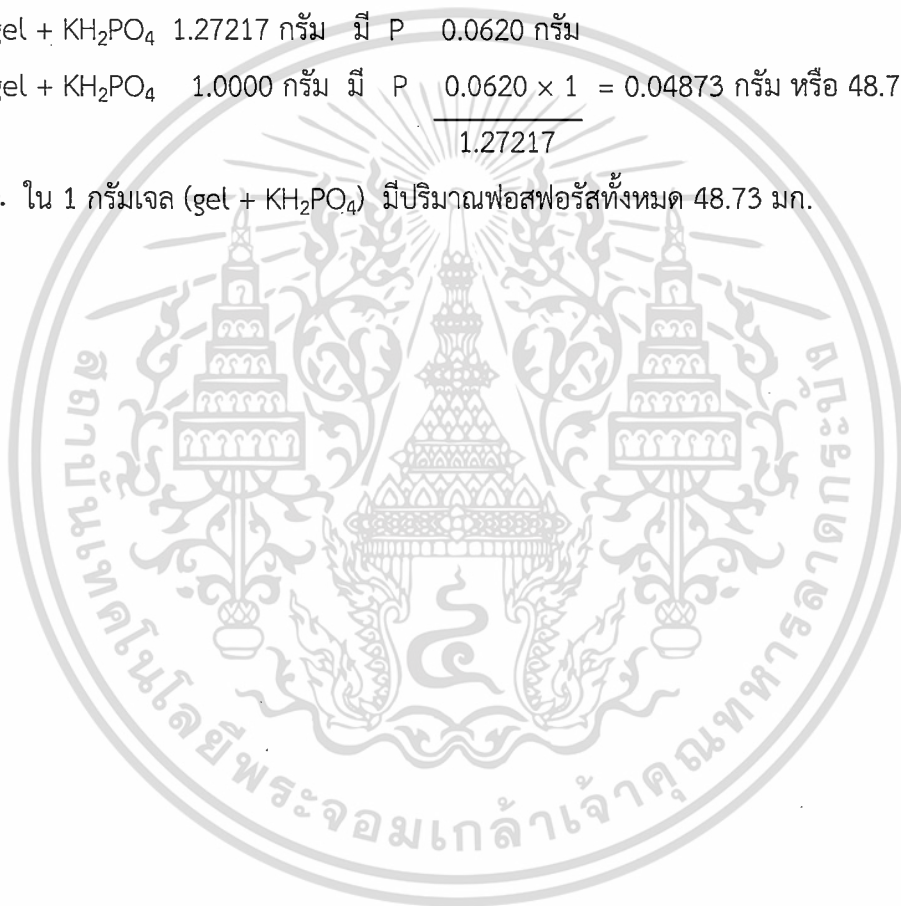
∴ ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.27217 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.0620 กรัม

∴ เจลปุยอัดเม็ด มีน้ำหนักรวม = 1.0000 + 0.27217 = 1.27217 กรัม

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

|                                |              |      |   |
|--------------------------------|--------------|------|---|
| gel + $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 1.27217 กรัม | มี P | 0.0620 กรัม   |
| gel + $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 1.0000 กรัม  | มี P | $0.0620 \times 1 = 0.04873$ กรัม หรือ 48.73 มก.               |
|                                |              |      | <hr style="width: 50%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/> |
|                                |              |      | 1.27217   |

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



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ของไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัม เนื่องจากปัจจุบันเกษตรกรมีการใช้ปุ๋ยเคมีเพิ่มมากขึ้นโดยโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเป็นแร่ธาตุสำคัญที่ช่วยในการเจริญเติบโตของพืช และนอกจากนี้ยังได้มีการนำเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามาช่วยทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานปุ๋ยให้ดียิ่งขึ้น โดยเทคนิคหนึ่งคือการใช้ไฮโดรเจลซึ่งมีสมบัติเป็น superabsorbent บวมน้ำและละลายน้ำได้ดีมาเป็นตัวควบคุมการปลดปล่อย แต่ไฮโดรเจลที่ใช้ส่วนมากมีแหล่งที่มาของสารตั้งต้นจากปิโตรเลียม เมื่อนำมาสังเคราะห์และผ่านขั้นตอนการเชื่อมโยงเป็นเจลแล้วไม่สามารถย่อยสลายได้ และสารตั้งต้นที่ทำให้ปฏิกิริยาไม่หมดอาจก่อให้เกิดการตกค้างของสารเคมีระหว่างการใช้งาน ไฮโดรเจลจากธรรมชาติจึงเป็นทางเลือกที่ถูกนำมาพิจารณา โดยโครงการพิเศษนี้เลือกใช้เป็นอัลจินต และกัวร์กัมโดยมีโซเดียมเทตระบอเรตเป็นตัวเชื่อมโยง โดยใช้อัตราส่วนโซเดียมอัลจินตต่อกัวร์กัมเป็น 6:4 และ 4:6 โดยน้ำหนัก ซึ่งสูตรเจลดังกล่าวได้มาจากงานวิจัยของกลุ่มวิจัยโดยพบว่าเจลดังกล่าวมีอัตราการบวมตัวที่ดี โดยทำการบรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 2 แบบ คือ การเตรียมไฮโดรเจลพร้อมบรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตในขั้นตอนเดียว และการเตรียมไฮโดรเจลแล้วบรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตภายหลัง จากนั้นนำไฮโดรเจลที่เตรียมได้ มาศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตเบื้องต้นโดยทำการอัดเม็ดแล้วแช่ลงในน้ำกลั่นที่เวลาต่างๆ กัน แล้วทำการตรวจวัดปริมาณสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตโดยใช้ Vanadomolybdophosphoric acid method และตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร และทำการศึกษาเปรียบเทียบพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลทั้งแบบที่บรรจุและไม่บรรจุสารโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต

#### 4.1 การหาปริมาณปุ๋ยเม็ดตัวอย่างทางการค้าและพฤติกรรมการปลดปล่อย

หาปริมาณปุ๋ยตัวอย่าง 2 ชนิด คือ ปุ๋ยเม็ดเคลือบเรซิน (ตัวอย่างที่ 1) และ ปุ๋ยอัดเม็ดทรงกระบอก (ตัวอย่างที่ 2)

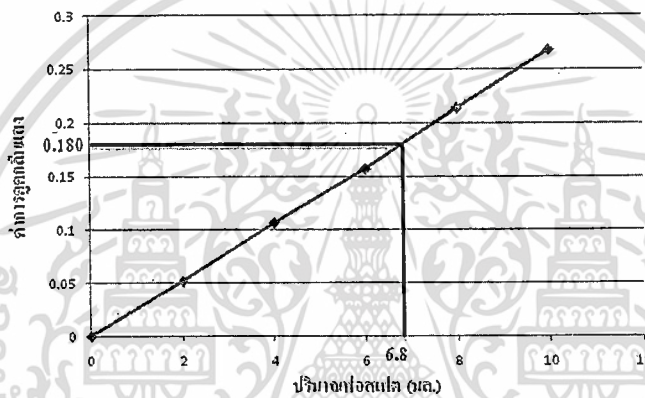
##### 4.1.1 หาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตในปุ๋ยเม็ดเคลือบเรซิน (ตัวอย่างที่ 1)

ชั่งน้ำหนักปุ๋ยเม็ดเคลือบเรซิน (ตัวอย่างที่ 1) 1.2424 กรัม โดยทำการแช่ปุ๋ยตัวอย่างในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนและให้ความร้อน และเปิดออกมาที่เวลา 30 นาที และทุกๆ 1 ชั่วโมง เพื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร โดยค่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าการดูดกลืนของปุ๋ยเม็ดเคลือบเรซิน (ตัวอย่างที่ 1)

| เวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-------------|------------------|
| 30          | 0.142            |
| 60          | 0.149            |
| 120         | 0.180            |
| 180         | 0.176            |

นำค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่เวลา 120 นาที มาหาปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน เพื่อหาปริมาณฟอสเฟตที่มีในปุ๋ยตัวอย่างที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4.1



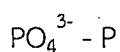
ภาพที่ 4.1 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณฟอสเฟตมาตรฐานของปุ๋ยเรซิน (ตัวอย่างที่ 1)

จากกราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 1.00 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต = 50 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต ( $\mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$ ) โดยปุ๋ยตัวอย่างที่ 1 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 0.180 เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานจะมีปริมาณฟอสเฟตเท่ากับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 6.8 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นปริมาณของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตเท่ากับ

$$6.8 \text{ มล.} \times 50 = 340 \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P} \text{ หรือ } 0.34 \text{ มก. PO}_4^{3-} - \text{P}$$

เนื่องจากปริมาณปุ๋ย 1.2424 กรัม แขน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 1 มิลลิลิตร มาตรวจวัดปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต ดังนั้น

ตัวอย่างน้ำดังกล่าว 1 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เท่ากับ 0.34 มก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างน้ำ 100 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต  $0.34 \times 100$  เท่ากับ 34 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  ดังนั้น ปุ๋ย 1.2424 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เท่ากับ 34 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$   
คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสต่อ 1 กรัมปุ๋ยตัวอย่างที่ 1

ปุ๋ยตัวอย่างที่ 1 หนัก 1.2424 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 34 mg  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

ปุ๋ยตัวอย่างที่ 1 หนัก 1.0000 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส

$$\text{เท่ากับ } \frac{34 \times 1}{1.2424} = 27.4 \text{ มก. } \text{PO}_4^{3-} - \text{P}$$

∴ ในปุ๋ยตัวอย่างที่ 1 มีปริมาณฟอสฟอรัส 27.4 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  ต่อ 1 กรัมปุ๋ย

คำนวณหาปริมาณของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่มีปริมาณฟอสฟอรัส 27.4 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

ถ้าต้องการปริมาณ P 31 กรัม ต้องใช้  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  136.0838 กรัม

ถ้าต้องการปริมาณ P 27.4 มก. ต้องใช้  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $136.0838 \times 27.4 = 120.28$  มก.

31

∴ คิดเป็นปริมาณของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ประมาณ 120 มก.

จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมได้สามารถดูดสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ปริมาณ 20 เท่าได้หมด ดังนั้นถ้าใช้ไฮโดรเจล 1 กรัม จะใช้สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ปริมาณ 20 มิลลิลิตร โดยจะต้องมีปริมาณโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 120 มิลลิกรัม คิดเป็นความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ตามการคำนวณด้านล่าง

คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  120 mg

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1000 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $\frac{120 \times 1000}{20} = 6000$  มก. หรือ 6 ก.

∴ ใน 1000 มิลลิลิตร มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $\frac{6 \text{ กรัม}}{136.0838} = 0.05$  โมลาร์

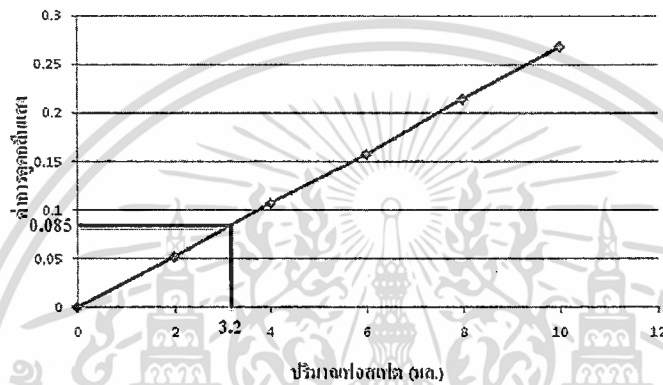
4.1.2. หาปริมาณฟอสเฟตในปุ๋ยอัดเม็ดทรงกระบอก (ตัวอย่างที่ 2) หนัก 1.3867 กรัม

โดยทำการแช่ปุ๋ยตัวอย่างในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร พร้อมปั่นกวนและให้ความร้อน จากนั้นทำการแช่ปุ๋ยตัวอย่างและปิเปตออกมาที่เวลา 30 นาที และทุกๆ 1 ชั่วโมง เพื่อทำการตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.2 ค่าการดูดกลืนของปุ๋ยอัดเม็ดทรงกระบอก (ตัวอย่างที่ 2)

| เวลา (นาที) | ค่าการดูดกลืนแสง |
|-------------|------------------|
| 30          | 0.085            |
| 60          | 0.067            |
| 120         | 0.071            |

นำค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 30 นาที มาเทียบกับกราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต เพื่อหาปริมาณฟอสเฟตที่มีในปุ๋ยตัวอย่างที่ 2



ภาพที่ 4.2 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณฟอสเฟตมาตรฐานของปุ๋ยอัดเม็ดทรงกระบอก (ตัวอย่างที่ 2)

จากกราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต = 50 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต ( $\mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$ ) โดยปุ๋ยตัวอย่างที่ 2 มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดเท่ากับ 0.085 เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานจะมีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตเท่ากับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 3.2 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นปริมาณของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตเท่ากับ

$$3.2 \text{ มล.} \times 50 = 160 \text{ } \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P} \text{ หรือ } 0.16 \text{ มก. PO}_4^{3-} - \text{P}$$

เนื่องจากปริมาณปุ๋ย 1.3867 กรัม แขน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร โดยเก็บตัวอย่างน้ำ 1 มิลลิลิตร มาตรวจวัดปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต ดังนั้น

ตัวอย่างน้ำดังกล่าว 1 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เท่ากับ 0.16 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

ตัวอย่างน้ำ 100 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เท่ากับ  $0.16 \times 100 \times 10 = 160 \text{ มก. PO}_4^{3-} - \text{P}$  ดังนั้น ปุ๋ย 1.3867 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต เท่ากับ 160 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาปริมาณฟอสเฟตต่อ 1 กรัมปุ๋ยตัวอย่างที่ 2

ปุ๋ยตัวอย่างที่ 2 หนัก 1.3867 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 160 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

ปุ๋ยตัวอย่างที่ 2 หนัก 1.0000 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส  $160 \times \frac{1}{1.3867} = 115.4$  มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

∴ ในปุ๋ยตัวอย่างที่ 2 มีปริมาณฟอสฟอรัส 115.4 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  ต่อ 1 กรัมปุ๋ย

คำนวณหาปริมาณของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตที่มีปริมาณฟอสฟอรัส 115.4 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

ถ้าต้องการปริมาณ P เท่ากับ 31 กรัม ใช้  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  136.0838 กรัม

ถ้าต้องการปริมาณ P เท่ากับ 115.4 มก. ใช้  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $136.0838 \times \frac{115.4}{31} = 506.6$  มก.

∴ คิดเป็นปริมาณของโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ประมาณ 500 มก.

จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมได้สามารถดูดสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ปริมาณ 20 เท่าได้หมด ดังนั้นถ้าใช้ไฮโดรเจล 1 กรัม จะใช้สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ปริมาณ 20 มิลลิลิตร โดยจะต้องมีปริมาณโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 500 มิลลิกรัม คิดเป็นความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ตามการคำนวณด้านล่าง

คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  500 มก.

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1000 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $\frac{500 \times 1000}{20} = 25000$  มก. หรือ 25 ก.

∴ ใน 1000 มิลลิลิตร มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $\frac{25}{136.0838}$  กรัม = 0.18 โมลาร์ หรือประมาณ 0.20 โมลาร์

ดังนั้นถ้าต้องการบรรจุสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ในไฮโดรเจล 1 กรัม ให้มีปริมาณของ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ในช่วงของปุ๋ยตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด จะต้องใช้สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ในช่วงความเข้มข้น 0.05 – 0.20 M ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  เท่ากับ 0.10 M ซึ่งคำนวณหาปริมาณของ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ในปริมาตร 20 มิลลิลิตร ได้ดังนี้

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1000 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  13.6084 ก.

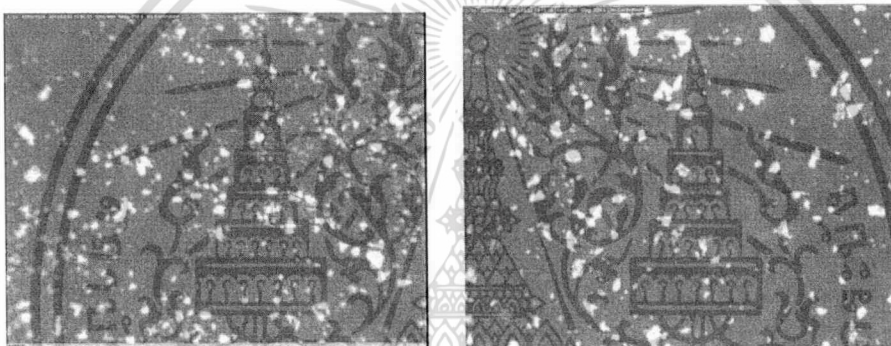
สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $\frac{13.6084 \times 20}{1000}$   
= 0.2722 กรัม

โดยสามารถคำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสได้ดังนี้

|                          |               |    |   |                    |
|--------------------------|---------------|----|---|--------------------|
| $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 136.0838 กรัม | มี | P | 31 กรัม            |
| $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 0.2722 กรัม   | มี | P | $31 \times 0.2722$ |
|                          |               |    |   | <hr/>              |
|                          |               |    |   | 136.0838           |
|                          |               |    | = | 0.0620 กรัม        |

#### 4.2 การเตรียมและพฤติกรรมการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ด

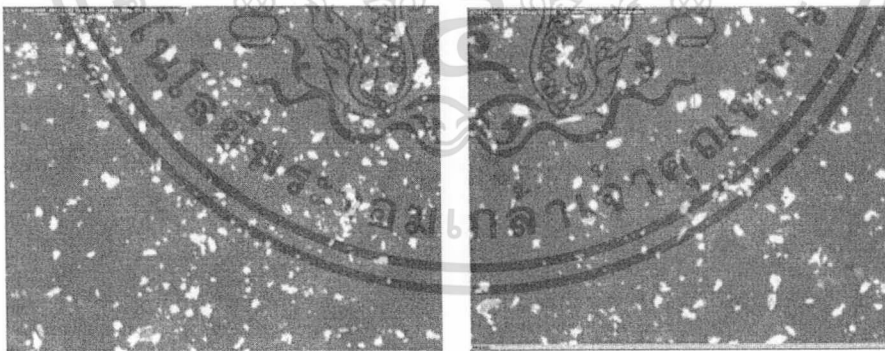
นำไฮโดรเจลอบแห้งมาบดเป็นผงด้วยโกร่งบดสาร แล้วนำไปวัดขนาดอนุภาคด้วยกล้อง Digital microscope รุ่น Dino-Lite pro 2 กำลังขยาย 230X ภาพถ่ายอนุภาคเจลปุ๋ย แสดงดังภาพที่ 4.3



A4G6(1)

A4G6(2)

ภาพที่ 4.3 ก อนุภาคเจลปุ๋ย กำลังขยาย 230X สูตร A4G6(1) และ A4G6(2)



A6G4(1)

A6G4(2)

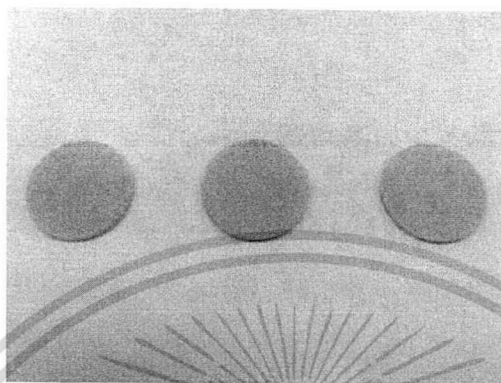
ภาพที่ 4.3 ข อนุภาคเจลปุ๋ย กำลังขยาย 230X สูตร A6G4(1) และ A6G4(2)

ภาพที่ 4,3 อนุภาคเจลปุ๋ยสูตรต่างๆ

จากการตรวจวัดขนาดอนุภาคของเจลปุ๋ยทั้ง 4 สูตรคือ A4G6(1), A4G6(2), A6G4(1) และ A6G4 มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 60 - 75 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไฮโดรเจลแบบผงมาอัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ดแรงดัน 5 ตัน ได้เจลปุยอัดเม็ดแสดงดังภาพที่ 4.4 จากนั้นนำเจลปุยอัดเม็ดมาหาค่าความหนาแน่น โดยวัดค่าความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนัก ทำการคำนวณหาความหนาแน่น ผลแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.12 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร เจลปุยอัดเม็ดที่ได้นำมาศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลของแต่ละสูตร



ภาพที่ 4.4 เจลปุยอัดเม็ด

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลาง และน้ำหนักของเจลปุยอัดเม็ด

| เม็ดที่           | ความหนาแน่น<br>(มิลลิเมตร) | น้ำหนัก<br>(กรัม) | เส้นผ่าน<br>ศูนย์กลาง<br>(เซนติเมตร) | ปริมาตร<br>(ลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) | ความหนาแน่น<br>(กรัม/ลูกบาศก์<br>เซนติเมตร) |
|-------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|
| 1                 | 0.893                      | 0.1537            | 1.212                                | 0.120                              | 1.27  |
| 2                 | 0.918                      | 0.1537            | 1.310                                | 0.124                              | 1.24  |
| 3                 | 0.854                      | 0.1495            | 1.310                                | 0.115                              | 1.30  |
| ความหนาแน่นเฉลี่ย |                            |                   |                                      |                                    | 1.27  |

#### การกำหนดตัวแปร

A4G6 คือ ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate(A) : Guar Gum(G) เท่ากับ 4:6

A6G4 คือ ไฮโดรเจลที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alginate(A) : Guar Gum(G) เท่ากับ 6:4

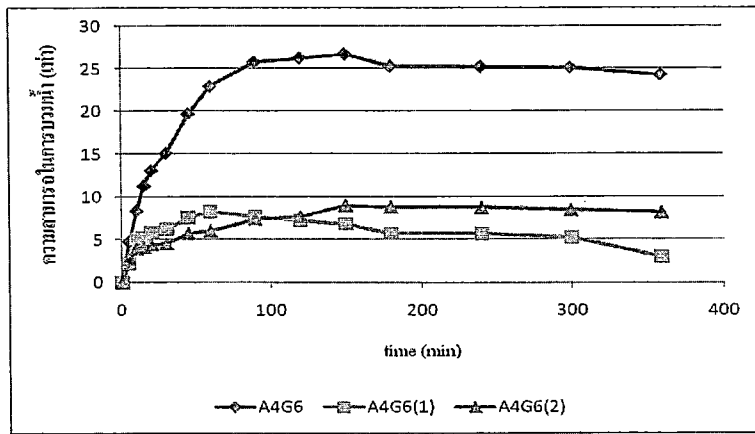
A4G6(1) คือ ไฮโดรเจลสูตร A4G6 ที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว

A4G6(2) คือ ไฮโดรเจลสูตร A4G6 ที่บรรจุสารแบบสองชั้นตอน

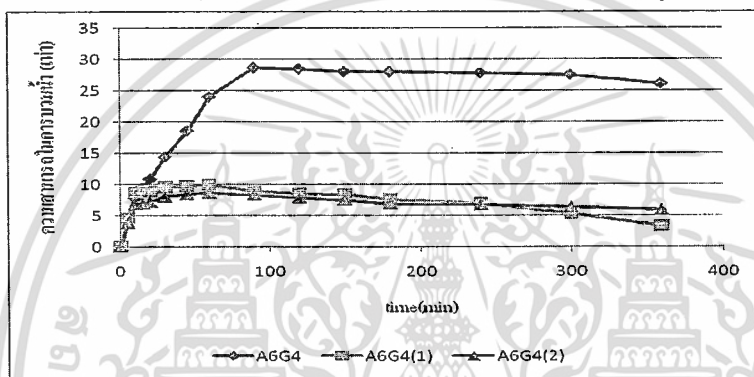
A6G4(1) คือ ไฮโดรเจลสูตร A6G4 ที่บรรจุสารแบบชั้นตอนเดียว

A6G4(2) คือ ไฮโดรเจลสูตร A6G4 ที่บรรจุสารแบบสองชั้นตอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.5 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร A4G6 ในน้ำกลั่น



ภาพที่ 4.6 พฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลแบบเม็ดสูตร A6G4 ในน้ำกลั่น

จากกราฟภาพที่ 4.5 พบว่าไฮโดรเจลเม็ดสูตร A4G6 มีอัตราการบวมตัวอย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นจนถึงที่เวลา 90 นาที และเพิ่มขึ้นต่อเนื่องอย่างช้าจนมีค่าการบวมตัวสูงสุดที่เวลา 150 นาที โดยมีค่าการบวมตัวมากที่สุดถึง 27 เท่า หลังจากนั้นไฮโดรเจลเม็ดจะค่อยๆ มีน้ำหนักลดลงเนื่องจากการละลายอย่างช้าๆของไฮโดรเจลเม็ด เมื่อนำเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตรA4G6(1) และสูตร A4G6(2) มาทดสอบการบวมตัว พบว่าความสามารถในการบวมตัวลดลงโดยเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(1) มีการบวมตัวสูงสุดที่เวลา 60 นาที เท่ากับ 8 เท่า และเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(2) มีการบวมตัวสูงสุดที่เวลา 150 นาที เท่ากับ 9 เท่า จะเห็นได้ว่าการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เตรียมแบบชั้นตอนเดียว และแบบสองชั้นตอน มีความสามารถในการบวมตัวในน้ำกลั่นใกล้เคียงกัน

จากกราฟภาพที่ 4.6 พบว่าไฮโดรเจลเม็ดสูตร A6G4 มีอัตราการบวมตัวอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงที่เวลา 90 นาที โดยมีการบวมตัวสูงสุด 29 เท่า หลังจากนั้นไฮโดรเจลจะค่อยๆ ละลายทำให้น้ำหนักของไฮโดรเจลลดลง เมื่อนำเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(1) และ A6G4(2) มาทดสอบการ

บวมตัว พบว่าความสามารถในการบวมตัวลดลง โดยเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(1) มีการบวมตัวสูงสุดที่เวลา 60 นาที เท่ากับ 10 เท่า และเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(2) มีการบวมตัวสูงสุดที่เวลา 60 นาที เท่ากับ 9 เท่า จะเห็นได้ว่าการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เตรียมแบบขั้นตอนเดียว และแบบสองขั้นตอน มีความสามารถในการบวมตัวในน้ำกลั่นใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับไฮโดรเจลสูตร A4G6

จากผลทดสอบการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ดทั้ง 2 สูตร และการบรรจุสารทั้ง 2 แบบ มีความสามารถในการบวมตัวที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการบวมตัวอยู่ในช่วงประมาณ 8 – 10 เท่า

#### 4.3 ศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและกัวร์กัม

นำเจลปุ๋ยอัดเม็ดแต่ละสูตรมาแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร แล้วเก็บน้ำตัวอย่างที่เวลาต่างๆ กันปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เทคนิค Vanado molybdophosphoric acid ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 – 4.7

ตารางที่ 4.4 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(1)

| เวลา (นาที) | น้ำหนักเจลปุ๋ยอัดเม็ด(กรัม) | ค่าการดูดกลืนแสง (%) | ปริมาณฟอสฟอรัสในสารตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P) | ปริมาณฟอสฟอรัส/เจลปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม) | ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ด (%) |
|-------------|-----------------------------|----------------------|---|--|--|
| 30          | 0.1557                      | 0.033                | 1.9001                                    | 12.2036                                      | 25.04  |
| 60          | 0.1547                      | 0.030                | 1.7501                                    | 11.3129                                      | 23.22  |
| 120         | 0.1548                      | 0.055                | 3.0000                                    | 19.3800                                      | 39.77  |
| 180         | 0.1555                      | 0.080                | 4.3394                                    | 27.9061                                      | 57.27  |
| 240         | 0.1576                      | 0.091                | 4.9001                                    | 31.0930                                      | 63.80  |
| 300         | 0.1561                      | 0.101                | 5.4000                                    | 34.5932                                      | 70.99  |
| 360         | 0.1581                      | 0.101                | 5.4000                                    | 34.1556                                      | 70.09  |
| 720         | 0.1593                      | 0.106                | 5.6501                                    | 36.1601                                      | 74.71  |
| 1440        | 0.1574                      | 0.104                | 5.5500                                    | 35.2605                                      | 72.36  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุยอัดเม็ดสูตร A6G4(1)

| เวลา<br>(นาทีก) | น้ำหนักเจลปุย<br>อัดเม็ด(กรัม) | ค่าการ<br>ดูดกลืน<br>แสง (%) | ปริมาณฟอสฟอรัส ใน<br>สารตัวอย่าง 1 มล. (มล.-<br>P) | ปริมาณฟอสฟอรัส/<br>เจลปุยอัดเม็ด (มล.-<br>P/1 กรัม) | ปริมาณฟอสฟอรัสที่<br>ปลดปล่อยจากเจลปุย<br>อัดเม็ด (%) |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------|--|---|---|
| 30              | 0.1537                         | 0.035                        | 1.9995   | 13.0091   | 26.70   |
| 60              | 0.1538                         | 0.056                        | 3.0536   | 19.8544   | 40.74   |
| 120             | 0.1525                         | 0.075                        | 4.0715   | 26.6984   | 54.79   |
| 180             | 0.1517                         | 0.087                        | 4.7000   | 30.9822   | 63.58   |
| 240             | 0.1521                         | 0.095                        | 5.1000   | 33.5306   | 68.81   |
| 300             | 0.1525                         | 0.113                        | 6.0000   | 39.3443   | 80.74   |
| 360             | 0.1538                         | 0.118                        | 6.2586   | 40.6931   | 83.51   |
| 720             | 0.1538                         | 0.118                        | 6.2586   | 40.6931   | 83.51   |
| 1440            | 0.1539                         | 0.117                        | 6.2069   | 40.3307   | 82.76   |

ตารางที่ 4.6 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุยอัดเม็ดสูตร A4G6(2)

| เวลา<br>(นาทีก) | น้ำหนักเจล<br>ปุยอัดเม็ด<br>(กรัม) | ค่าการ<br>ดูดกลืน<br>แสง (%) | ปริมาณฟอสฟอรัสใน<br>สารตัวอย่าง 1 มล.<br>(มล.-P) | ปริมาณฟอสฟอรัส/<br>เจลปุยอัดเม็ด (มล.-<br>P/1 กรัม) | ปริมาณฟอสฟอรัสที่<br>ปลดปล่อยจากเจลปุย<br>อัดเม็ด (%) |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------|--|---|---|
| 30              | 0.1490                             | 0.096                        | 5.1500   | 34.5640   | 70.9300   |
| 60              | 0.1502                             | 0.105                        | 5.600  | 37.2836   | 76.51   |
| 120             | 0.1474                             | 0.113                        | 6.000  | 40.7056   | 83.53   |
| 180             | 0.1500                             | 0.125                        | 6.6261   | 44.1740   | 90.65   |
| 240             | 0.1521                             | 0.127                        | 6.7242   | 44.2091   | 90.72   |
| 300             | 0.1460                             | 0.128                        | 6.7758   | 46.4100   | 95.24   |
| 360             | 0.1487                             | 0.127                        | 6.7242   | 45.2200   | 92.80   |
| 720             | 0.1531                             | 0.138                        | 7.2932   | 47.6368   | 97.76   |
| 1440            | 0.1516                             | 0.134                        | 7.0862   | 46.7427   | 95.92   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุยอัดเม็ดสูตร A6G4(2)

| เวลา<br>(นาทีก) | น้ำหนักเจลปุย<br>อัดเม็ด(กรัม) | ค่าการ<br>ดูดกลืน<br>แสง (%) | ปริมาณฟอสฟอรัสใน<br>สารตัวอย่าง 1มล. (มล.-<br>P) | ปริมาณฟอสฟอรัส/<br>เจลปุยอัดเม็ด (มล.-<br>P/1 กรัม) | ปริมาณฟอสฟอรัสที่<br>ปลดปล่อยจากเจลปุย<br>อัดเม็ด (%) |
|-----------------|--------------------------------|------------------------------|--|---|---|
| 30              | 0.1528                         | 0.074                        | 4.0179   | 26.2952   | 53.96   |
| 60              | 0.1534                         | 0.076                        | 4.1250   | 26.8905   | 55.18   |
| 120             | 0.1534                         | 0.099                        | 5.3000   | 34.5502   | 70.90   |
| 180             | 0.1528                         | 0.120                        | 6.3621   | 41.6368   | 85.44   |
| 240             | 0.1500                         | 0.118                        | 6.2586   | 41.7240   | 85.62   |
| 300             | 0.1523                         | 0.130                        | 6.8793   | 45.1694   | 92.69   |
| 360             | 0.1529                         | 0.128                        | 6.7758   | 44.3152   | 90.94   |
| 720             | 0.1529                         | 0.130                        | 6.8790   | 44.9902   | 92.33   |
| 1440            | 0.1514                         | 0.135                        | 7.1379   | 47.1460   | 96.75   |

การคำนวณปริมาณมิลลิกรัมของฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในปุยเจลอัดเม็ด

ทำการชั่งผงเจลปุยบดละเอียดน้ำหนักประมาณ 1.0000 กรัม แคล่งในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.1 M จำนวน 20 มล.

คำนวณหาปริมาณ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล.

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1000 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  13.6085 กรัม

สารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล. มี  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $\frac{13.6085 \times 20}{1000} = 0.2722$  กรัม

∴ ในสารละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  20 มล. ที่ดูดซับเข้าเจลปุยอัดเม็ด มีปริมาณ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.2722 กรัม

คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.2722 กรัม

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

ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.2722 กรัม มี P  $31 \times 0.2722 = 0.0620$  กรัม

136.0838

∴ ใน  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  0.2722 กรัม มีปริมาณฟอสฟอรัส 0.0620 กรัม

∴ เจลปุยอัดเม็ด มีน้ำหนักรวม = 1.0000 + 0.27217 = 1.27217 กรัม

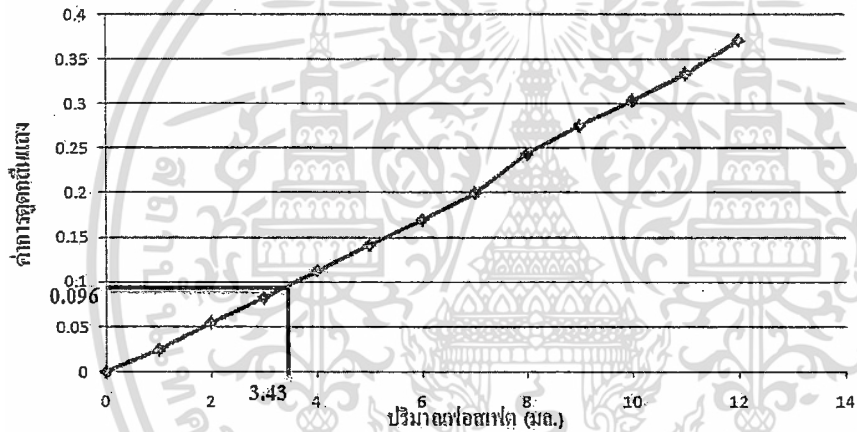
คำนวณหาปริมาณฟอสฟอรัสใน 1.0000 กรัมเจล (gel + KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)

$$\begin{array}{l} \text{gel + KH}_2\text{PO}_4 \text{ 1.2722 กรัม มี P 0.0620 กรัม} \\ \text{gel + KH}_2\text{PO}_4 \text{ 1.0000 กรัม มี P } \frac{0.0620 \times 1}{1.2722} = 0.0487 \text{ กรัม หรือ 48.7 มก.} \end{array}$$

∴ ใน 1 กรัมเจล (gel + KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 48.7 มก.

ตัวอย่างแสดงการคำนวณปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดในสารตัวอย่าง 1 มล. (มล.-P)

ตัวอย่างเช่น นำน้ำตัวอย่างของเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(2) ที่เวลา 30 นาที ซึ่งเจลปุ๋ยอัดเม็ดมีน้ำหนัก 0.1490 กรัม มาวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เทคนิค Vanado molybdophosphoric acid นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาหาปริมาณฟอสฟอรัสจากกราฟมาตรฐาน



ภาพที่ 4.7 กราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และปริมาณฟอสเฟตมาตรฐานของเจลปุ๋ยอัดเม็ด สูตร A4G6(2)

จากกราฟมาตรฐานสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 1 มิลลิลิตร มีปริมาณฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟต = 50 ไมโครกรัมฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต ( $\mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P}$ ) โดยเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(2) มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.096 เมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานจะมีปริมาณฟอสเฟตเท่ากับสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 3.43 มิลลิลิตร หรือคิดเป็นปริมาณของฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตเท่ากับ

$$3.43 \text{ มล.} \times 50 = 171.5 \mu\text{g PO}_4^{3-} - \text{P} \text{ หรือ } 0.1715 \text{ มก. PO}_4^{3-} - \text{P}$$

จากการทดลองได้นำเจลปุ๋ยอัดเม็ดหนัก 0.1490 กรัม แช่ในน้ำกลั่น จำนวน 30 มล. แต่เก็บน้ำตัวอย่างมาตรวจวัด 1 มล. ดังนั้นจะมีปริมาณฟอสเฟตที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เวลา 30 นาที เท่ากับ  $0.1715 \times 30 = 5.15$  มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  ต่อเจลปุ๋ยอัดเม็ด 0.1490 กรัม

คำนวณหา ปริมาณฟอสฟอรัส/เจลปุ๋ยอัดเม็ด (มล.-P/1 กรัม)

|                                |             |                |  |
|--------------------------------|-------------|----------------|--|
| gel + $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 0.1490 กรัม | มีปริมาณฟอสเฟต | 5.15 มก. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$                       |
| gel + $\text{KH}_2\text{PO}_4$ | 1.0000 กรัม | มีปริมาณฟอสเฟต | $5.15 \times 1 = 34.6$ มก. $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$     |
|                                |             |                | <hr style="width: 100%; border: 0.5px solid black;"/> 0.1490 |

∴ ใน 1.0000 กรัมเจลปุ๋ยอัดเม็ด (gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) มีปริมาณฟอสเฟต 34.56 มก.  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$

หมายเหตุ สำหรับค่าอื่นๆ ทำการคำนวณในลักษณะเดียวกัน และค่าทั้งหมดแสดง

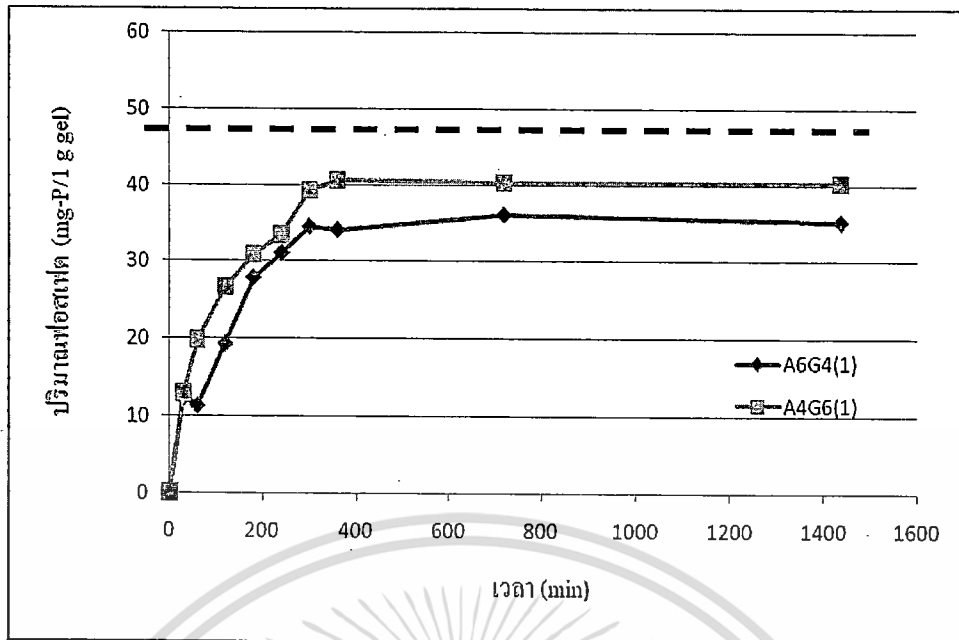
ดังตารางที่ 4.4 – 4.7

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยจากเจลปุ๋ยอัดเม็ด

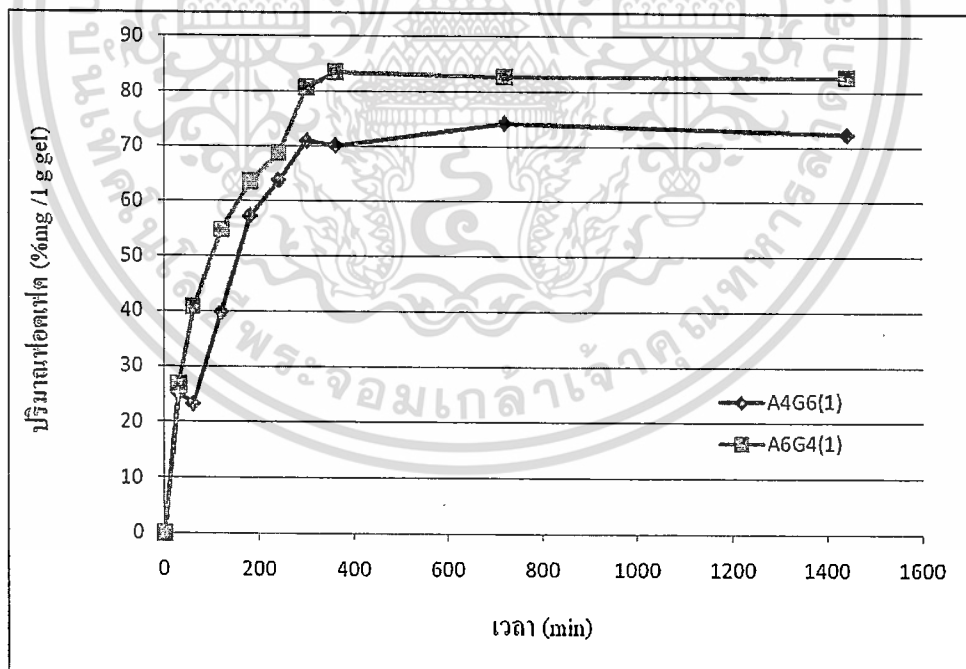
จากข้อมูลเบื้องต้น ใน 1 กรัมเจล (gel +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) มีปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด 48.7 มก. เวลา 30 นาที คิดเป็นปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัส เท่ากับ  $\frac{34.56 \times 100}{48.7} = 70.9 \%$

หมายเหตุ สำหรับค่าอื่นๆทำการคำนวณในลักษณะเดียวกัน และค่าทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4.4 – 4.7

นำค่าจากตารางที่ 4.4 – 4.7 มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับปริมาณฟอสฟอรัสต่อเจลปุ๋ย (มก./1 กรัม) ของเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตรต่างๆ ทั้งแบบการเตรียมชั้นตอนเดียว และการเตรียมสองชั้นตอน แสดงดังรูป ที่ 4.8 – 4.11

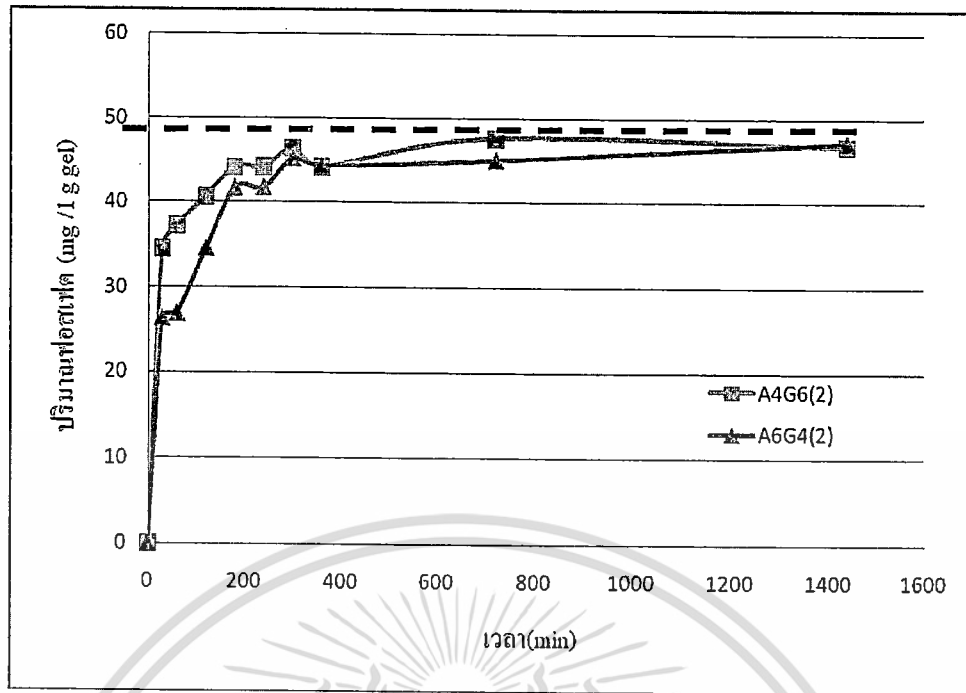


ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมิลลิกรัมฟอสเฟตต่อ 1 กรัมเจลปุยสูตร A4G6(1) และ A6G4(1) เส้นประคือ ค่าการปลดปล่อยสูงสุดตามการคำนวณเท่ากับ 48.7 มก-P/1 กรัมเจลปุย

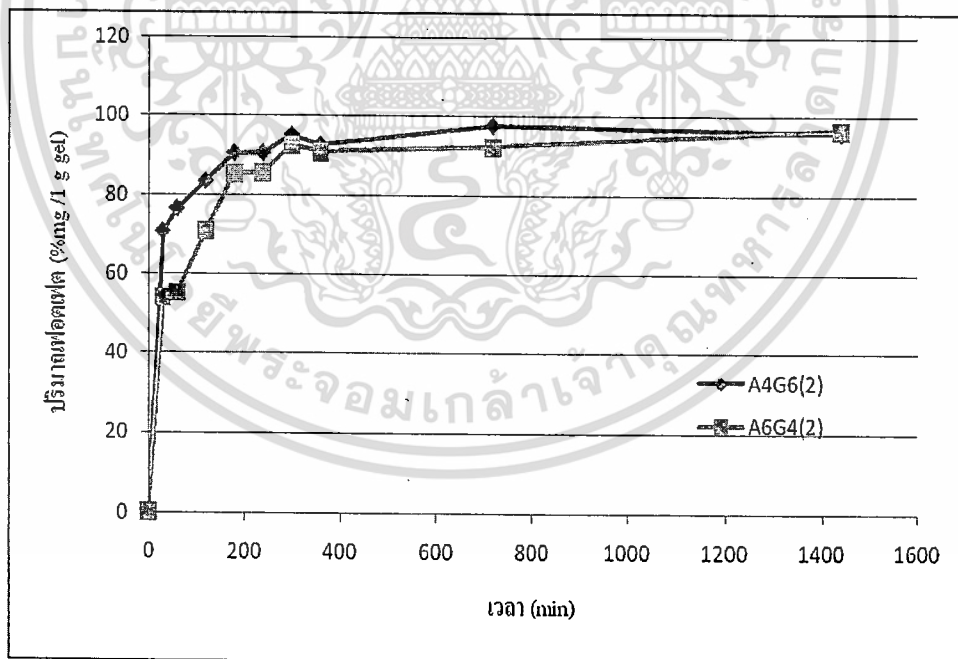


ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ%มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อ 1 กรัมเจลปุยสูตร A4G6(1) และ A6G4(1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมิลลิกรัมฟอสเฟตต่อ 1 กรัมเจลปุยสูตร A4G6(2) และ A6G4(2) เส้นประคือ ค่าการปลดปล่อยสูงสุดตามการคำนวณเท่ากับ 48.7 มก-P/1 กรัมเจลปุย



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ % มิลลิกรัมฟอสเฟตต่อ 1 กรัมเจลปุยสูตร A4G6(2) และ A6G4(2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟภาพที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าปุ๋ยเจลอัดเม็ดที่บรรจุสารแบบขั้นตอนเดียวทั้งสองสูตร เจลปุ๋ยสูตร A6G4(1) มีความสามารถในการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตได้ดีกว่าเจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(1) เนื่องจากสูตรเจลปุ๋ยที่มีปริมาณอัลจินต (A) มากกว่า เจลปุ๋ยสูตร A6G4(1) สามารถบวมตัวในน้ำได้มากกว่า โดยที่เวลา 720 นาที ปุ๋ยเจลอัดเม็ดสูตร A4G6(1) ปลดปล่อยสารได้เท่ากับ 74.21% และ สูตร A6G4(1) ปลดปล่อยสารได้เท่ากับ 82.76% จะเห็นได้ว่าปุ๋ยเจลอัดเม็ดที่เตรียมจากวิธีแบบขั้นตอนเดียวปลดปล่อยสารอย่างรวดเร็วในช่วงแรก แล้วค่อยๆ ซ้ำลงและมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าการปลดปล่อยสูงสุดที่ 100% อย่างไรก็ตามที่เวลาการปลดปล่อยสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (1440 นาที) ยังมีปริมาณการปลดปล่อยสารเพียง 70 - 80 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องมาจากสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตบางส่วนอาจถูกกักไว้ภายในโครงสร้างของเจลเนื่องจากการเชื่อมโยงของเจลเกิดขึ้นหลังจากบรรจุสารแล้ว มีผลทำให้สารถูกปลดปล่อยจากตัวเจลได้ไม่หมดในช่วงเวลาดังกล่าว

จากกราฟภาพที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าปุ๋ยเจลอัดเม็ดที่บรรจุสารแบบสองขั้นตอนทั้งสองสูตร A4G6(2) และ A6G4(2) มีความสามารถในการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตใกล้เคียงกัน โดยปุ๋ยเจลอัดเม็ดสูตร A4G6(2) สามารถปลดปล่อยสารได้เท่ากับ 97.76% ที่เวลา 720 นาที และปุ๋ยเจลอัดเม็ดสูตร A6G4(2) ปลดปล่อยสารได้เท่ากับ 96.75% ที่เวลา 1440 นาที

จะเห็นได้ว่าปุ๋ยเจลอัดเม็ดที่เตรียมแบบสองขั้นตอน สามารถปลดปล่อยสารอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าการปลดปล่อยสูงสุดที่ 100% ด้วยระยะเวลาที่เร็วกว่าปุ๋ยเจลอัดเม็ดที่บรรจุสารแบบขั้นตอนเดียว เนื่องจากตัวเจลเกิดการเชื่อมโยงก่อนที่จะบรรจุสาร ซึ่งการกระจายตัวของสารในเจลปุ๋ยอัดเม็ดที่บรรจุสารแบบสองขั้นตอน ปุ๋ยจะไม่สามารถเข้าไปอยู่ หรือเข้าไปได้เพียงเล็กน้อยในบริเวณที่มีการเชื่อมโยงหนาแน่น ดังนั้นสารจึงไม่ได้ถูกกักเก็บไว้ในส่วนที่มีการเชื่อมโยงหนาแน่นเหมือนการเตรียมเจลปุ๋ยอัดเม็ดแบบขั้นตอนเดียว มีผลทำให้สารถูกปลดปล่อยออกมาได้หมดในระยะเวลาที่เร็วกว่า

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตของไฮโดรเจลจากอัลจินต และกัวร์กัม โดยนำเจลปุ๋ยอัดเม็ดมาศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว และการปลดปล่อยสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ทำการตรวจวัด โดยใช้เทคนิค Vanado molybdo phosphoric acid แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร สามารถนำผลการศึกษามาสรุปได้ดังนี้ จากพฤติกรรมการบวมตัวของไฮโดรเจลทั้งสองสูตรคือ A4G6 และ A6G4 ในน้ำกลั่น พบว่าไฮโดรเจลอัดเม็ดทั้งสองสูตร มีอัตราการบวมตัวตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นจนถึงเวลาที่ 90 นาที มีอัตราที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และหลังจากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องแต่เป็นไปอย่างช้าๆ จนกระทั่งเข้าสู่ค่าการบวมตัวสูงสุด ซึ่งเจลสูตร A4G6 มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 26.27 เท่า และ A6G4 มีค่าการบวมตัวสูงสุดที่ 28.66 เท่า หลังจากนั้นเจลอัดเม็ดทั้งสองสูตรจะเกิดการละลายออกอย่างช้าๆ และเริ่มเห็นได้ชัดเจนที่เวลา 150 นาทีเป็นต้นไป เมื่อนำไฮโดรเจลมาบรรจุสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต พบว่ามีพฤติกรรมการบวมตัวเช่นเดียวกับไฮโดรเจลอัดเม็ด แต่ความสามารถในการบวมตัวลดลง จากผลการทดลองการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ดแต่ละสูตร พบว่า

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(1) มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 8.29 เท่า ที่เวลา 60 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(2) มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 9.00 เท่า ที่เวลา 150 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(1) มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 9.96 เท่า ที่เวลา 60 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(2) มีค่าการบวมตัวสูงสุดเท่ากับ 8.63 เท่า ที่เวลา 60 นาที

เห็นได้ว่าจากผลการทดสอบการบวมตัวของเจลปุ๋ยอัดเม็ด ทั้ง 4 สูตร มีค่าการบวมตัวอยู่ในช่วงประมาณ 8 –10 เท่า

จากผลการทดลองพฤติกรรมการปลดปล่อยสารของเจล มีค่าความสามารถในการปลดปล่อยดังนี้

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(1) มีความสามารถในการปลดปล่อยได้เท่ากับ 74.21 % ที่เวลา 720 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(1) มีความสามารถในการปลดปล่อยได้เท่ากับ 82.76 % ที่เวลา 720 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A4G6(2) มีความสามารถในการปลดปล่อยได้เท่ากับ 97.76 % ที่เวลา 720 นาที

เจลปุ๋ยอัดเม็ดสูตร A6G4(2) มีความสามารถในการปลดปล่อยได้เท่ากับ 96.75 % ที่เวลา 1140 นาที

โดยพฤติกรรมการปลดปล่อยของเจลปุ๋ยอัดเม็ดแต่ละสูตร พบว่าในช่วงเริ่มต้นจนถึงเวลา 300 นาที มีความสามารถในการปลดปล่อยสารด้วยอัตราที่รวดเร็ว แต่ในช่วงที่เจลปุ๋ยอัดเม็ดมี

แนวโน้มเข้าสู่ค่าการปลดปล่อยสูงสุดจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไป โดยพบว่าเจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เตรียมแบบสองชั้นตอนสามารถปลดปล่อยสารออกมาได้เกือบ 100 % ภายในช่วงเวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง ขณะที่เจลปุ๋ยอัดเม็ดที่เตรียมแบบชั้นตอนเดียวสามารถปลดปล่อยสารออกมาได้ประมาณ 70 - 80 % ที่เวลา 24 ชั่วโมง

## 5.2 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยสารของไฮโดรเจล เช่นสภาวะกรด-เบส อุณหภูมิ สภาวะสารละลายต่างๆ
2. พัฒนาสูตรเจลให้มีความหลากหลายเหมาะสมกับสภาพการใช้งาน โดยปรับเปลี่ยนชนิดของสารตั้งต้น และกระบวนการเตรียมไฮโดรเจล
3. ปรับเปลี่ยนชนิดของสารที่นำมาใช้ในการปลดปล่อย เพื่อการใช้งานเฉพาะด้าน เช่น ปุ๋ย ชนิดอื่นๆ ยากำจัดศัตรูพืช
4. ทดสอบกับสภาพใช้งานที่เป็นจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. C. Chang, B. Duan, J. Cai and L. Zhang (2010). "Superabsorbent Hydrogels based on Cellulose for Smart Swelling and Controllable Delivery". *European Polymer Journal*, 46, 92-100.
2. A. Pourjavadi, Sh. Barzegar and G.R. Mahdavinia (2006). "MBA-Crosslinked Na-Alg/CMC as a Smart Full-Polysaccharide Superabsorbent Hydrogels". *Carbohydrate Polymers*, 66, 386-395.
3. WJ. Benjamin and QA. Cappelli (2002). "Oxygen Permeability (Dk) of Thirty-seven Rigid Contact Lens Materials". *Optometry & Vision Science* , 79(2), 103-111.
4. Patent No.: US 6,930,196 B2, Aug (2005).
5. 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.
6. K. Cordula and J. Kast (2010). "Optimization of Formaldehyde Cross-Linking for Protein Interaction Analysis of Non-Tagged Integrin  $\beta 1$ ". *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, Article ID 927585, 13 pages.
7. 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.
8. ณรงค์ สาริสุต (2533). "การผลิตยาออกฤทธิ์เน้นและการนำส่งยาแบบต่างๆ". คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.  
เข้าถึงได้จาก : <http://www.jsppharma.com/Phama-knowledge/3-Oral-Contralled-Release.html>
9. Ch.R. Naveen (2554). "Biodegradable Polymer in Contralled Drug Delivery"  
เข้าถึงได้จาก : <http://www.phamainfo.net/raghanaveen/biodegradable-polymers-contralled-drug-delivery>
10. ดุษฎี อุตภาพ (2554). "Carbohydrate Technology" [ออนไลน์].  
เข้าถึงได้จาก : [http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter4\\_3.html](http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter4_3.html)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Låås, T. Doctoral thesis. Acta Universitatis Upsaliensis 1975.
12. Zhanjiang Fisheries College (2554). “Properties, Manufacture and Application of Seaweed Polysaccharides Agar, Carrageenan and Algin”  
เข้าถึงได้จาก : <http://www.fao.org/docrep/field/003/AB730E/AB730E03.html>
13. J. Dennis (2554). “Production, Properties and Uses of Alginates”  
เข้าถึงได้จาก : <http://www.fao.org/docrep/X5822E/x5822e04.html>
14. Arabic Translation Services (2554). “Mauritania”  
เข้าถึงได้จาก : <http://arabictranslationservices.org/arabic-translation/arabic-speaking-countries/mauritania>
15. Taxusbaccata (2554). “On the Multiple and Varied Sources of Resin, from the Hot Humid Amazon Forest, the Arid Sahel to the Sunny Australia”  
เข้าถึงได้จาก : <http://taxusbaccata.hubpages.com/hub/On-the-Multiple-and-Varied-Sources-of-Resin>
16. R. Barbucci, D. Pasqui, R. Favaloro and G. Panariello (2008) . “A Thixotropic Hydrogel from Chemically Cross-Linked Guar Gum: Synthesis, Characterization and Rheological Behavior”. Carbohydrate Research, 343, 3058-3065.
17. N. Rasool, T. Yasin, J. Y.Y Heng and Z. Akhter (2010). “Synthesis, Characterization of Novel pH, Ionic Strength and Temperature Sensitive Hydrogel for Insulin Delivery”. Polymer, 51 687-1693.
18. F. Khoylou and F. Naimian (2008). “Reaction Synthesis of Superabsorbent Polyethylene Oxide/Tragacanth Hydrogel”. Radiation Physics and Chemistry, 78, 195-198.
19. I. Gliko-kabir, A. Penhasi and A. Rubinstein (1999). “Characterization of Crosslinked Guar by Thermal Analysis”. Carbohydrate Research, 316, 6-13.
20. H. Nie, M. Liu, F. Zhan and M. Gue (2004). “Factors on the Preparation of Carboxymethylcellulose Hydrogel and its Degradation Behavior in Soil”. Carbohydrate Polymers, 58, 185-189.

21. 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.
22. P. Huynh, G. J. Im, S. Y. Chae, K. C. Lee and D. S. Lee (2009). "Controlled release of insulin from pH/temperature-sensitive injectable pentablock copolymer hydrogel". *Journal of Controlled Release*, 137, 20-24.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล .....ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ.....

ตำแหน่งปัจจุบัน.....ผู้ช่วยศาสตราจารย์.....

### ประวัติการศึกษา

| ชื่อย่อปริญญา | สาขา                              | สถาบันที่จบ  | ปีที่จบ   |
|---------------|-----------------------------------|--|-----------|
| วท.บ.         | เคมีอุตสาหกรรม                    | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า<br>คุณทหารลาดกระบัง | 2534-2538 |
| M.Sc.         | Polymer Science and<br>Technology | The University of Manchester                       | 2539-2540 |
| Ph.D.         | Polymer Chemistry                 | The University of Manchester                       | 2540-2543 |

### สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

1. วัสดุประกอบร่วมระหว่างเซรามิกซ์และพอลิเมอร์
2. วัสดุประกอบระดับนาโนระหว่างเซรามิกซ์และพอลิเมอร์
3. กาวสำหรับติดไม้
4. การสังเคราะห์สาร cyclic oligomers ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบปิดวง และการสังเคราะห์พอลิเมอร์ พอลิเมอร์ร่วม ด้วยเทคนิคพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง
5. การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของ polypseudorotaxanes
6. การสังเคราะห์ soluble combinatorial libraries of crown ether-ester analogues
7. การเตรียมพอลิเอสเทอร์เรซิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

1. การนำพอลิเอทิลีนเทรฟทาเลตกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการดีพอลิเมอร์ไรซ์แบบปิดวงแหวน และการพอลิเมอร์ไรซ์แบบเปิดวงแหวน ทุนศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ รหัสโครงการ MT-S-43-POL-22-179-G ปี 2543
2. การรีไซเคิลโพลีเอสเตอร์โดยการดีพอลิเมอร์ไรซ์แบบปิดวงแหวนและการพอลิเมอร์ไรซ์แบบเปิดวงแหวน ทุนงบประมาณประจำปี 2544
3. การสังเคราะห์วัสดุประกอบไฮดรอกซีแอปาทิตกับพอลิเอสเตอร์สำหรับการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้สถาบันประจำปี 2545
4. การเตรียมซีเมนต์เคลือบซีเมนต์กับพอลิเมทิลเมทาคริเลต ทุนวิจัยคณะวิทยาศาสตร์ จากเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2549
5. การพัฒนาการติดไม้ปราศจากฟอร์มัลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปรับปรุงด้วยน้ำมันทั้ง ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้การเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว-อุตสาหกรรม (MAG Window I) วรวิทย์ ชุ่มชื่น สัญญาเลขที่ MRG-WI515S129 ปี 2551
6. ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (คปก 11) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) พิษญา ตรีเนตร ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ 1 มิถุนายน ปี 2552 ถึง 31 พฤษภาคม 2557 สัญญาเลขที่ PHD/0264/2551
7. การพัฒนาการติดไม้ชนิดปราศจากฟอร์มัลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และน้ำมันทั้ง ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2553 ประเภทงานวิจัยเชิงบูรณาการและพาณิชย์ คณะวิทยาศาสตร์ สจล
8. การติดไม้ไร้สารฟอร์มัลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับน้ำมันชักแห้งธรรมชาติสำหรับงานแผ่นพาร์ทิเคิล ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้การเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว-อุตสาหกรรม (MAG Window I) ภคพล ลัคนาพรวิสิฐ สัญญาเลขที่ MRG-WI535S901 ปี 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9.ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (คปก 12) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) อภิขญา เจียนประเสริฐ ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต สาขานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี 1 ธันวาคม ปี 2553 ถึง 30 พฤศจิกายน 2556 สัญญาเลขที่ PHD/0075/2552

10.สมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำของกาวอะครีเลตพอลิยูรีเทนด้วยน้ำมันลินสีด ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554 ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สจล

11. การเตรียมและสมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กัวร์กัม/โซเดียมอัลจินेट ทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2555 ประเภททุนส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ สจล

12. การปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของแผ่นพาร์ทิเคิลที่ใช้กาวไรสารฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยน้ำยางพารา โครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (Medium-size Project on Rubber; MPR) สกว-อุตสาหกรรม สัญญาเลขที่ RDG5550060 ปี 1 สิงหาคม 2555 ถึง 31 กรกฎาคม 2556

13.ทุนโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (คปก 13) สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) สานิตย์ สิริปานิชชาติ ปรัชญาดุษฐ์บัณฑิต สาขาเคมีประยุกต์ 1 มิถุนายน ปี 2555 ถึง 31 พฤษภาคม 2558 สัญญาเลขที่ PHD/53K0235/2553

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Monvisade P., Hodge P., Ruddick C.L. Synthesis of soluble combinatorial libraries of crown ether-ester analogues via the cyclodepolymerisation of linear polyester. Chem.Commun. 1999; 1987-1988. (Impact factor 2005 = 3.902)

2. Hodge P., Monvisade P., Owen G.J., Heatley F., Pang Y. <sup>1</sup>H-NMR spectroscopic studies of the structures of a series of pseudopolyrotaxanes formed by "threading". New J.Chem. 2000; 24: 703-709. (Impact factor 2005 = 2.44)

3. Hodge P., Monvisade P., Morris G.A., Preece I. A novel nuclear magnetic resonance spectroscopy method for screening small soluble compound libraries. *Chem.Commun.* 2001; 239-240. (Impact factor 2005 = 3.902)
4. Siriphannon P., Monvisade P., Jinawath S, Hemachandra K. Preparation and characterization of hydroxyapatite/poly(ethylene glutarate) biomaterials. *J.Biomed.Mater.Res.Part A*; 2007; 81A(2): 381-391.(Impact factor 2005 = 2.743, 2006 = 2.467)
5. Monvisade P., Loungvanidprapa P., Synthesis of Poly(ethylene adipate) and Poly(ethylene adipate-co-terephthalate) via Ring-opening Polymerization. *Eur.Polym.J.*; 2007; 43: 3408-3414. (Impact factor 2005 = 1.765, 2006 = 2.113)
6. Monvisade P., Siriphannon P., Jermungnern R., Rattanabodee S., Preparation of hydroxyapatite/poly(methyl methacrylate) and calcium silicate/poly(methyl methacrylate) interpenetrating hybrid composites. *J.Mater.Sci.Mater.Med.*; 2007; 18: 1955-1959. (Impact factor 2005 = 1.248, 2006 = 1.562)
7. Monvisade P., Loungvanidprapa P., Synthesis of Poly(ethylene terephthalate-co-isophthalate) via Ring-opening Polymerization of Their Cyclic Oligomers. *J.Polym.Res.*; 2008; 15, 381-387. (Impact factor 2006 = 0.616)
8. Siriphannon P., Monvisade P., Preparation and Characterization of Hydroxyapatite/Poly(ethylene adipate) Hybrid Composites. *J.Biomater.Sci-Polym.E.*; 2008;19(7), 925-936. (Impact factor 2006 = 1.607)
9. Monvisade P., and Siriphannon P., Chitosan Intercalated Montmorillonite: Preparation, Characterization and Basic Dye Adsorption. *Appl.Clay.Sci.*; 2009; 42, 427-431. (Impact factor 2006 = 1.652)
10. Siriphannon P., Monvisade P., Poly(ethylene terephthalate)/hydroxyapatite biomaterials: Preparation, characterization and in.

vitro bioactivity. *J.Biomed.Mater.Res.Part A*; 2009; 88A (2) 464-469.(Impact factor 2005 = 2.743, 2006 = 2.467)

11. Monvisade P., Siriphannon P. and Tapcharoen W., Effect of Ring-opening Polymerization Condition on Characteristic and Mechanical Properties of Hydroxyapatite/Poly(ethylene glutarate) Biomaterials. *J.Biomed.Mater.Res.Part A*; 2009; 90A (3) 656-663. (impact factor 2006 = 2.497)

12. Sirapanichart S., Khouchaf L., Siriphannon P., Monvisade P., Louarn G. and Elouadi B. Chemical and Dielectric Study of PMMA/Montmorillonite Nano-Composite Films. *FERROELECTRIC*; 2010; 402 47-54. (impact factor 2009 = 0.447)

13. Sanit Sirapanichart, Pathavuth Monvisade, Punnama Siriphannon, and Jiti Nukeaw, Poly(methyl methacrylate-co-butyl acrylate)/Organophosphate-modified Montmorillonite Composites. *Iranian Polymer Journal* 2011; 20(10) 803-811. (impact factor 2010 = 1.189)

14. Pannasri P., Siriphannon P., Monvisade P. and Nookaew J., Hydrothermal growth of ZnO nanostructures from nano-ZnO seeded in P(MMA-co-BA) matrix. *J.Polym.Res.*; 2011 ; 18(6) 2245-2254. (impact factor 2010 = 1.186)

15. Suebpong Suebwongnat, Apichaya Jianprasert, Punnama Siriphannon and Pathavuth Monvisade, Calcium silicate/Poly(ethylene terephthalate) Biomaterials via Ring-opening Polymerization. *J.Polym.Res.*; 2012 ; 19(10) 9985 DOI 10.1007/s10965-012-9985-3. (impact factor 2011 = 1.733)

16. Siriphannon P. and Monvisade P., In situ ring-opening polymerization of hydroxyapatite/poly(ethylene adipate)-co-(ethylene terephthalate) biomimetic composites. *Bulletin of Materials Science*; 2013; 36(1), February, 121-128. (impact factor 2012 = 0.88)

17. Chutima Kaemkit, Pathavuth Monvisade, Punnama Siriphannon and Jiti Nukeaw, Water-Soluble Chitosan Intercalated Montmorillonite Nanocomposites for Removal of Basic Blue 66 and Basic Yellow 1 from Aqueous Solution. J. APPL. POLYM. SCI. 2013; 128(1) 879-887. (impact factor 2011 = 1.3)
18. Monvisade P., Mongkolaussavarat T., Chalermksuksri T. and Chanthad C., Recycle of poly(ethylene terephthalate) by cyclo-depolymerisation and ring-opening polymerization. KU Science Journal, 2545 (2002), 20 (1-3), 21-29. (in Thai)
19. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ, กมลวรรณ รัตนภักดิ์, พนอ วรณวงค์ และ ศิริยา เจียมสกุล การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลตกับพอลิเอทิลีนกลูตาเรตด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเปิดวง วารสารวิทยาศาสตร์มข. ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 2546(2003) หน้า 46-53.
20. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ สุภาณี ชนะวงค์ การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างไฮดรอกซีแอปาทาइटกับพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 12 ฉบับที่ 2 2547(2004) หน้า 36-45.
21. ภคพล ลัคนาพรวิสิฐ, ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ วรธรรม อุ่นจิตติชัย การติดไม้ไร้สารฟอร์มัลดีไฮด์จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับน้ำมันชักแห้งธรรมชาติสำหรับงานแผ่นพาร์ทิเคิล วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 3 (ฉบับพิเศษที่ 2) มีนาคม 2554 หน้า 23-31.

#### การเสนอผลงานวิชาการ

1. Hodge P., Monvisade P., Ruddick C.L. Synthesis of soluble libraries of macrocycles which potentially have recognition properties. in Innovation and perspectives in solid-phase synthesis and combinatorial libraries; Ed. Epton R. Mayflower worldwide limited, Kingswinford, UK, 2001; .181-184.
2. Monvisade P., Choeykomhaeng M. The formation of the inclusion complex of  $\beta$ -cyclodextrin with PMMA. PPC8, Bangkok, Thailand. 24-27 November 2003. 91.

3. Monvisade P., Siriphannon P., Chanawong S. Synthesis of hydroxyapatite/poly (ethylene adipate) composites by in situ ring-opening polymerization. PPC8, Bangkok, Thailand. 24-27 November 2003. 115-116.
4. Monvisade P., Siriphannon P., Chitosan intercalated montmorillonite adsorbent for dye containing wastewater treatment. The Sixth Princess Chulabhorn International Science Congress, The interface of chemistry and biology in the "Omics" era: Environment & Health, and Drug Discovery, Shangri-La Hotel, Bangkok, Thailand. 25-29 November 2007.
5. Siriphannon P., Monvisade P., Hybrid ceramic-polymer biomaterials. The French-Thai Workshop on "Advanced Materials and Technology", (Krabi, Thailand), March 23-27, 2008.
6. Siriphannon P., Monvisade P., Biomimetic ceramic-polymer composites for medical applications. AUN/SEED Net 1st Regional Workshop on Natural Resources and Materials for Sustainable Development of ASEAN, (Phnom Penh, Kingdom of Cambodia), August 18-19, 2008.
7. Monvisade P., Siriphannon P., Adsorption of dye onto chitosan intercalated montmorillonite. The IUMRS International Conference in Asia 2008, (Nagoya, Japan), December 9-13, 2008.
8. Chumchuen W., Monvisade P., Siriphannon P., and Oonjittichai W., Tung oil modified poly(vinyl alcohol) as formaldehyde-free wood adhesives. The 6th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (6th ISAMAP), Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University, November 21-23, 2009.
9. Monvisade P. and Intharavichain T., Synthesis of poly(diethylene adipate), poly(diethylene terephthalate) and their copolymer via ring-opening polymerization. 7th International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific (7th ISAMAP), Japan

Advanced Institute of Science and Technology (JAIST), Ishikawa High-Tech Exchange Center, Ishikawa, Japan, Sep. 30-Oct. 1, 2010.

10. Lakkanapornwisit P., Monvisade P. and Oonjittichai W., Effect of silica on mechanical properties of particle board using formaldehyde free adhesive. Proceeding of The 8th International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific Rim (8th ISAMAP) and The 2nd International Workshop on Nanogrid Materials (IWNM), Hotel Novotel Ambassador Busan, Haeundae, Busan, Korea, Nov. 2-5, 2011, p 36-41.

11. Suebpong Suebwongnat, Punnama Siriphannon and Pathavuth Monvisade, Mechanical properties and bioactivity of calcium silicate/poly(ethylene terephthalate-co-carprolactone) composites. 15th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2012), Novotel Wollongong Northbeach Hotel, Wollongong, Australia, Sep. 23-26, 2012.

12. อมรรัตน์ สวัสดิมงคล ภัทธารุช มนต์วิเศษ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน และ ชลลดา ฤตวิรุพท์ การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิเมอร์ร่วมพอลิเมทิลเมทาคริเลตพอลิอะคริลิกแอซิดกับไคโตซาน-มอนต์มอริลโลไนต์ด้วยวิธีพอลิเมอไรซ์ขณะขึ้นรูป การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 ณ โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่ 29-30 ตุลาคม 2550(2007) NP05\_1

13. ณัชชา ปานกุล, ภัทธารุช มนต์วิเศษ, และปุณณมา ศิริพันธ์โนน, การปรับปรุงสมบัติเชิงกลและการต้านทานน้ำของกาวอะคริเลตพอลิยูรีเทนด้วยน้ำมันลินสีด, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่34 (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ), 31ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551(2008) E\_E0037 page 213.

14. สานิตย์ สิริระปานชาติ, สุรลักษณ์ มรรคศศิธร, สุวิชา บัวเขียว, ปุณณมา ศิริพันธ์โนน, และภัทธารุช มนต์วิเศษ, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนพอลิเมทิลเมทาคริเลต/มอนต์มอริลโลไนต์, การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่34 (ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กรุงเทพฯ), 31ตุลาคม – 2 พฤศจิกายน 2551(2008) E\_E0104 page 230.

15. Shamas Minsakorn and Pathavuth Monvisade, Preparation and swelling behavior of sodium carboxymethylcellulose/guar gum hydrogels, 2<sup>nd</sup> Polymer Conference of Thailand, Convention Center, Chulabhorn Research Institute, Bangkok, October 20-21 2011 page 120-123.

16. Suebpong Suebwongnat, Punnama Siriphannon, **Pathavuth Monvisade**, Preparation of Calcium Silicate/Poly(ethylene terephthalate-co-caprolactone) Composites for Medical Applications, Proceeding of Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012), Chiang Mai, Thailand, 11<sup>th</sup>-13<sup>th</sup> January 2012 page 65.
17. Sirinan Lawchoochaisakul, **Pathavuth Monvisade**, Punnama Siriphannon and Jiti Nukeaw, Adsorption of Basic Yellow 1 (BY1) by Cationic Starch Intercalated Montmorillonite Nanocomposite, The 9<sup>th</sup> KU-KPS Conference, December 6-7 2012 page 114.
18. Sirinan Lawchoochaisakul, **Pathavuth Monvisade**, Punnama Siriphannon and Jiti Nukeaw, The Adsorption of Acid Red 91 of Nanocomposite Material between Montmorillonite and Cationic Starch, การประชุมวิชาการระดับชาติเพื่อการพัฒนาด้านวิจัยอย่างยั่งยืน, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 25-26 ธันวาคม 2555, SRD-94 หน้า 70.

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

ภัทราวุธ มนต์วิเศษ และ ภคพล ลักณาพรวิสิฐ (ผู้ประดิษฐ์) กาวติดไม้ชนิดไม่มีสารฟอร์มาลดีไฮด์ จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับน้ำมันชักแห้งเสริมแรงด้วยซิลิกาสำหรับงานพาร์ทิเคิลบอร์ด คำขอ เลขที่ 1101002357 ยื่นคำขอเมื่อวันที่ 29 กันยายน 2554