

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์  
เรื่อง

ผลของชนิดสารเชื่อมขาวงต่อสมบัตไฮโดรเจลที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแป้งมันสำปะหลัง  
กราฟด้วยพอลิอิโคครีลิก/ยางธรรมชาติ เพื่อเป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยยูเรียปลดปล่อยช้า

Effect of Crosslinker Types on the Properties of Biodegradable Hydrogels Derived  
from Cassava Starch Grafted with Poly(Acrylic Acid)/Natural Rubber as Coating  
Material for Slow-release Urea Fertilizer



คณะผู้วิจัย

สังกัด

รองศาสตราจารย์ ดร.สายยันต์ แสงสุวรรณ  
นางสาวพัชรีพร จึงศีลัญธรรม

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
ทุนการศึกษาวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ประจำปีงบประมาณ 2562  
ISBN (ถ้ามี) .....  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย ม.อ.บ. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## บทคัดย่อภาษาไทย

งานวิจัยนี้รายงานเกี่ยวกับปุ๋ยเรียบปลดปล่อยช้า เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยได้ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อใช้เคลือบเม็ดปุ๋ยเรียบและเพื่อทำการควบคุมและปลดปล่อยปุ๋ย ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายกึ่งแทรกสอดที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติจากแป้งมันสำปะหลังกราฟต์ด้วยอะคริลิกแอซิดและยางธรรมชาติผ่านปฏิกิริยาโคโพลิเมอร์ไรเซนซ์ โดยทำการศึกษาผลของการใช้สารเชื่อมขวางที่แตกกัน 3 ชนิด คือ เอ็น-เอ็น เมทาลีนบิสอะคริลามีด (MBA), เอทิลีนไกลคอลไดเมท้า酷列特 (EDMA) และ กลูต้าเลาแอลตีไซด์ (GA) และนำไฮโดรเจลที่ได้ไปพิสูจน์เอกสารด้วยเทคนิค FTIR XRD TGA และ SEM ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการบรวมตัว เช่น ชนิดของสารเชื่อมขวางและปริมาณที่เหมาะสม ผลการวิจัยพบว่า สารเชื่อมขวางที่ต่างชนิดกันนั้นส่งผลต่อค่าการบรวมตัวต่างกันอย่างชัดเจน ตัวอย่างที่มีค่าการดูดซับน้ำที่ดีที่สุด คือ CSB-M2, CSB-E2 และ CSB-G2 ที่ 450, 550, 5890% ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังได้ทำการศึกษาการกักเก็บน้ำในดิน การย่อยสลายทางชีวภาพ และนำไปทดสอบในพืชจริง พบว่า ไฮโดรเจลช่วยกักเก็บความชุ่มชื้นให้แก่ดินได้ สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ดีใน 120 วัน และมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการเคลือบปุ๋ยและควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยเรียบได้ยาวนานถึง 120 ชั่วโมง และไม่น้อยกว่า 30 วัน ในน้ำและในดิน ตามลำดับ ดังนั้นวัสดุไฮโดรเจลที่ย่อยสลายทางชีวภาพชนิดใหม่นี้ได้พิสูจน์ให้เห็นแล้วว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากในการเป็นวัสดุเคลือบและควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยและไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายในดินได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

## Abstract

In this work, slow-release fertilizers have been reported as environment-friendly and biodegradable. The synthesized biodegradable hydrogel was used as a coating material to control urea release from polymer-coated urea. Hydrogels are a type of three dimensional cross-linked polymeric networks with high retaining capacity of water. The preparation of biodegradable hydrogels from cassava starch grafting with acrylic acid via free-radical copolymerization, and polyvinyl alcohol (PVA)/natural rubber (NR) blend were used to improve the biodegradability and high mechanical properties. Herein, the preparation the hydrogels were used as three different types of crosslinking agent including N,N'-methylene-bis-acrylamide (MBA, Ethylene glycol dimethacrylate (EDMA), and Glutaraldehyde (GA). The obtained hydrogels were then characterized by using FTIR spectroscopy, X-ray diffraction, thermogravimetric analysis (TGA), and scanning electron microscope (SEM). The factors influencing the swelling ability such as type and content of crosslinkers were performed and optimized. The results showed that different crosslinkers resulted in the significant variation of water absorptivity of hydrogel. The optimized swelling ratio of CSB-M2, CSB-E2 and CSB-G2 was 450, 550, and 5890% in distilled water, respectively. Moreover, the water retention in soil, biodegradation test and plant growth were also carried out. The urea fertilizer coating with the hydrogels (UCSBw-X) showed the higher efficiency of the slow release than pure urea. The release amount of UCSBw-X without carriers in water was 50% at 40 h, and 40% at 15 days in soil. This novel biodegradable hydrogel has proven to be a very efficient device for material coating and controlled-release fertilizers. in addition, being nontoxic, biodegradable in the soil and environmentally friendly.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จสมบูรณ์ลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากผู้ช่วยวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา นางสาวพัชรีพร จึงศิลปธรรม นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยทำงานวิจัยอย่างขยันอดทนและมุ่งมานะตามแผนวิจัยที่วางไว้อย่างดี

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่/อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับความอนุเคราะห์/สนับสนุน อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีต่างๆ ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากร ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของไฮโดรเจล

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณแหล่งทุนสนับสนุนหลัก คือ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่อนุมัติให้ทุนการศึกษาวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่

ผู้วิจัย

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทด้วยอักษรไทย   | 1    |
| ABSTRACT   | 2    |
| กิตติกรรมประกาศ  | 3    |
| บทที่ 1 บทนำ   | 6    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ   | 6    |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ  | 8    |
| 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย  | 9    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง  | 10   |
| 2.1 ความหมายและประเภทของไฮโดรเจล   | 10   |
| 2.2 คุณสมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจล   | 12   |
| 2.3 การประยุกต์ใช้ในด้านการเกษตร   | 14   |
| 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วยกระบวนการพอลิเมอร์เชิงแบบฟรีเอดิคัล | 16   |
| 2.4 แป้ง   | 22   |
| 2.5 ยางธรรมชาติ  | 23   |
| บทที่ 3 การทดลอง   | 27   |
| 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ   | 27   |
| 3.2 สารเคมี  | 27   |
| 3.3 การแปรอัตราส่วนของส่วนประกอบสำหรับการเตรียมไฮโดรเจล                          | 28   |
| 3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจลสังเคราะห์   | 29   |
| 3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจล   | 31   |
| 3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค XRD                                  | 31   |
| 3.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ไฮโดรเจลด้วย SEM  | 31   |
| 3.7 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของไฮโดรเจลด้วย TGA                                | 32   |
| 3.8 การศึกษาพฤติกรรมในการบวมตัวของไฮโดรเจล                                       | 32   |
| 3.9 จนศาสตร์การดูดซับน้ำ   | 33   |
| 3.10 การทดสอบการกักเก็บน้ำ   | 34   |
| 3.11 การทดสอบความสามารถในการแตกสลายทางชีวภาพ                                     | 34   |
| 3.12 ศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยเรียในน้ำและดิน   | 35   |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.13 ศึกษาอิทธิพลปัจจัยเรียบที่เคลือบด้วยไฮดรเจลที่เตรียมได้ต่อการเจริญเติบโตต้นพริกกินดา | 5<br>36   |
| <b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์</b>   | <b>37</b> |
| 4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์เข้มข้นของไฮดรเจล  | 37        |
| 4.2 การพิสูจน์เอกสารลักษณ์และสัณฐานวิทยาของแผ่นไฮดรเจล                                    | 38        |
| 4.3 การพิสูจน์เอกสารลักษณ์ด้วยเทคนิค SEM  | 40        |
| 4.4 วิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างของไฮดรเจล ด้วยเทคนิค XRD                                  | 42        |
| 4.5 เส้นรีภาพทางความร้อนด้วย  | 43        |
| 4.6 การบวมตัวของไฮดรเจลในน้ำ  | 45        |
| 4.7 การย่อยสลายทางชีวภาพ  | 50        |
| 4.8 การลดปล่อยปุ๋ยในน้ำและในดิน   | 51        |
| 4.9 ศึกษาผลของปุ๋ยเคลือบ UCSBw-X ต่อการเจริญเติบโตต้นพริกกินดา                            | 56        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง</b>   | <b>58</b> |
| เอกสารอ้างอิง   | 59        |
| ภาคผนวก   | 65        |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยทั่วโลกมีการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมการเกษตรมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกอย่างต่อเนื่องและมีความต้องการอาหารเพิ่มขึ้นอย่างมากตามไปด้วย ดังนั้น เกษตรกรรมจึงเป็นแหล่งวัตถุดิบหลักที่สำคัญและจัดเป็นกระบวนการต้นน้ำในการนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมอาหารหลาย ๆ ด้าน ด้วยเหตุนี้ทำให้หลาย ๆ ประเทศได้เล็งเห็น ความสำคัญของภาคเกษตรกรรมมากขึ้น เพื่อนำไปสู่การพัฒนาประเทศทางด้านเศรษฐกิจ ซึ่งต้องเริ่มต้นที่การเพาะปลูกของระบบเกษตรกรรม<sup>1</sup> อย่างไรก็ตาม การเพาะปลูกที่จะให้ผลผลิตที่มาก เพียงพอและมีประสิทธิภาพนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การดูแลรักษาดินและพืชให้ได้รับแร่ธาตุอาหารอย่างสมบูรณ์ การกำจัดวัชพืชและแมลงศัตรู และการบำรุงรักษพันธุ์พืชของเกษตรกร เป็นต้น

ปุ๋ยเรีย เป็นปุ๋ยชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช เกษตรกรจึงนิยมใช้ปุ๋ยเรียกันอย่างกว้างขวางในภาคเกษตรกรรม เนื่องจากปุ๋ยเรียมีปริมาณในตระเจนสูงประมาณร้อยละ 46 (N : P : K = 46 : 0 : 0) ซึ่งเป็นปุ๋ยที่มีราคาต่อบาทยอยในตระเจน ถูกที่สุดที่มีขายในประเทศไทยและของโลก และยังเป็นปุ๋ยที่มีอัตราการใช้มากที่สุดอีกด้วย<sup>2</sup> แต่ในปัจจุบัน ถึงแม้ว่าปุ๋ยเรียมีประโยชน์ต่อการเพาะปลูกมากเพียงใด แต่การใส่ปุ๋ยเรียมีโดยทั่วไป มักมีประสิทธิภาพต่ำเนื่องจากมีการสูญเสียได้หลายทาง เช่น การซึมล้ำ และการสูญเสียทางอากาศ โดยทั่วไปแล้ว พืชจะนำปุ๋ยเรียมีไปใช้ได้ประมาณ 30-50% เท่านั้น<sup>3,4</sup> และปุ๋ยที่ถูกซึมล้ำ นำไปยังก่อให้เกิดมลภาวะต่อแหล่งน้ำและดินที่ใช้ปลูกพืชอีกด้วย ซึ่งจะทำให้ดินเค็มในที่สุด โดยการสูญเสียปุ๋ยเคมีสามารถเกิดได้หลายทาง เช่น สูญเสียธาตุอาหารโดยการซึมล้ำ ดินมีความชื้นในการแลกเปลี่ยนไออกอนประจุบวกต่ำ จะมีการสูญเสียธาตุอาหารเกิดขึ้นอย่างรุนแรงในฤดูฝน ธาตุในตระเจนจะสูญเสียในรูปในต่อมาก เมื่อฝนตกหนักและน้ำไหลบ่าบนผิวดินจะมีการสูญเสียปุ๋ยในต่ำที่ละลายน้ำ ในต่อมเหล่านี้จะถูกซึมล้ำลงในปะสนในแหล่งน้ำต่อไป

ดังนั้นเพื่อลดดันภาคการเกษตรของประเทศไทยให้มีความเข้มแข็งทัดเทียมกับนานาประเทศ นักวิจัยจึงได้พยายามพัฒนาปุ๋ยปลดปล่อยช้าให้มีประสิทธิภาพดีมากยิ่งขึ้น ซึ่งคาดหมายว่า จะส่งผลดีทั้งในด้านเศรษฐกิจที่จะช่วยลดปัญหาค่าใช้จ่ายของเกษตรกร ช่วยเพิ่มผลผลิตให้ได้ปริมาณที่เพียงพอ กับความต้องการของตลาดแต่คงใช้ปัจจัยนำเข้า (input) ที่ลดลงหรือเท่าเดิม และช่วยลดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของปุ๋ยปลดปล่อยช้าไม่ให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีการตกค้างของสารเคมีในดิน แต่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพพืชในการดูดซับแร่ธาตุอาหาร พร้อมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำของดินสำหรับพื้นที่ที่ต้องเผชิญกับปัญหาความแห้งแล้ง และที่สำคัญช่วยลดการสูญเสียแร่ธาตุในดินซึ่งเป็นปัญหาหลักในภาคการเกษตร

ในปัจจุบันวิธีการเคลือบปุ๋ยได้รับการพัฒนาคิดค้นเพื่อที่จะป้องกันการสลายของธาตุอาหาร และเพื่อให้พืชสามารถได้ใช้ธาตุอาหารอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด วัสดุไฮโดรเจล (Hydrogel) จัดเป็นพอลิเมอร์ทางเลือกหนึ่งที่นำเสนอและกำลังได้รับความนิยมอย่างมากในปัจจุบัน ในการใช้เป็นวัสดุพอลิเมอร์เคลือบปุ๋ยเพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยหรือปุ๋ยละลายช้า<sup>5</sup> เนื่องจากมีข้อดี คือ

มีลักษณะที่เป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ที่สามารถกักเก็บน้ำและแร่ธาตุอาหารได้ในปริมาณมาก สามารถปลดปล่อยปุ๋ยได้เป็นระยะๆ และเก็บปุ๋ยได้เป็นเวลานานสามารถเก็บความชุ่มชื้นในดินและสามารถควบคุมการพังทลายของดินได้ดี แต่ไฮโดรเจลก็มีข้อด้อย คือ ราคาแพงและบางชนิดที่มีขาย ในทางการค้ามีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ ทำให้มิตรกับสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ดังนั้นถ้าหากเราสามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจลขึ้นเองได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการลดต้นทุนในการผลิต ได้วัสดุเคลือบปุ๋ยที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงส่งผลดีต่อคุณภาพของดินสำหรับการเพาะปลูก ทั้งในระยะสั้นและยาว ทำให้ดินมีความสมบูรณ์จึงเอื้อต่อการเจริญเติบโตของพืช และให้ผลผลิตที่ดีได้มากขึ้น ฉะนั้นการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงได้รับความนิยมและได้รับการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน โดยพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล ได้แก่ แป้ง เชลลูโลสและยางธรรมชาติ เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าแป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลมากที่สุด เนื่องจากเป็นวัตถุดีที่มีราคาถูก สามารถหาได้ง่าย ภายในประเทศไทยและย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติด้วยกระบวนการเมtabolism ของแบคทีเรีย ยีสต์ และเห็ด<sup>4-6</sup> ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกเหนือนี้ยังนำไปขึ้นรูปได้ง่ายอีกด้วย อย่างไรก็ตามชิ้นงานที่เตรียมจากแป้ง ยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ต่ำ มีความerasible แตกต่าง ทำให้มีอายุการใช้งานสั้น เมื่อนำไปเคลือบปุ๋ย ดังนั้น เพื่อลดปัญหาด้านความerasible และการปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงเพื่อเพิ่มอายุการใช้งาน จึงต้องมีการเติมพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ลงไปด้วย เช่น ยางธรรมชาติ (Natural Rubber)<sup>7</sup> พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (poly (vinyl alcohol)<sup>8</sup> ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี และพอลิอะคริลิกแอcid (poly(acrylic acid) ที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำซึ่งจะช่วยในการดูดซับน้ำได้มาก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของไฮโดรเจลให้เหมาะสมสำหรับใช้ทางในด้านการเกษตร และจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ของกลุ่มวิจัยเรา คือ นางสาววารุณี ตานันต์ นศ. ระดับปริญญาเอก ได้ทำการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติของแป้งกราฟต์ด้วยพอลิอะคริลิกแอcid/ยางธรรมชาติที่ผสมด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อใช้เป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพและเป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยยเรียลละลายซ้ำ โดยศึกษาภาวะการสังเคราะห์ที่เหมาะสมและใช้สารเชื่อมขาวเป็น N,N'-Methylene-Bis-Acrylamide (MBA) เพียงชนิดเดียวและได้สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมแล้ว คือ AA = 6 mL, APS = 3 wt%, CSt = 7.5 g และ MBA = 1.0 wt% แต่อย่างไรก็ตาม พบว่ายังไม่ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของสารเชื่อมขาวชนิดอื่นๆ ว่าส่งผลต่อสมบัติและประสิทธิภาพของไฮโดรเจลชนิดนี้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายจาก ยางธรรมชาติ แป้ง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และพอลิอะคริลิกแอcid (Cassava starch-g-polyacrylic acid/ Natural rubber/ poly (vinyl alcohol) (CSt-g-PAA)/NR/PVA) ด้วยตัวเชื่อมขาวที่แตกต่างกันเพื่อใช้เป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยยเรียลละลายซ้ำ ศึกษาความสามารถสังเคราะห์ที่เหมาะสมและพัฒนาวัสดุควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาและพัฒนาวัสดุ ควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยที่มีราคากลาง มีความแข็งแรงเชิงกลที่ดี และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้จากแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นวัสดุที่มีมากที่สุดในประเทศไทย หาง่าย ราคาไม่แพง และ จากรายงานพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของไทยเป็นหลัก ศึกษาความสามารถของไฮโดรเจลต่อการดูดซับปุ๋ย การปลดปล่อยปุ๋ยและการเจริญเติบโตของพืชตัวอย่าง และศึกษาผลตัวเชื่อมขาวที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ N,N'-Methylene-Bis-Acrylamide (MBA ethylene glycol dimethacrylate (EGDAM) และ Glutaric dialdehyde (GA) การขึ้นรูปเคลือบเม็ดปุ๋ย การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของไฮโดรเจล การดูด

ชั้นน้ำ/สารละลายน้ำ เกลือ สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล พฤติกรรมในการปลดปล่อยในโครงงานของปุ๋ย การย่อยสลายทางชีวภาพ รวมไปถึงการศึกษาอิทธิพลขององค์ประกอบของไฮโดรเจลที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นพrikแಡงจินดาในดินในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานี เพื่อปรับปรุงไฮโดรเจลนี้ให้เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยละลายซ้าที่มีคุณภาพสูงแต่มีราคาถูก ในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยละลายซ้าให้มีประสิทธิภาพสูงมากยิ่งขึ้นต่อไป

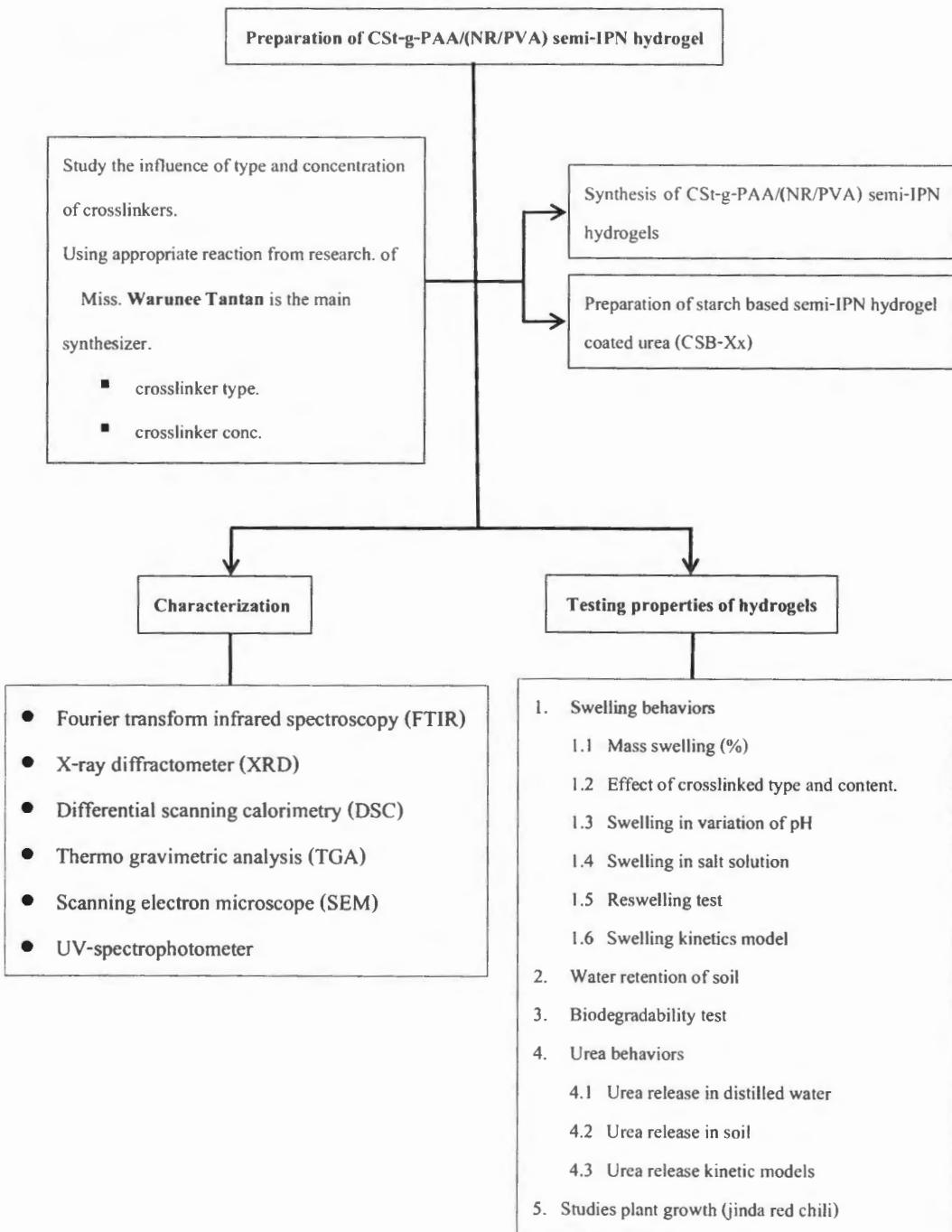
### 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังกราฟด้วยโพลีอะคริลิกแอซิด/ยางธรรมชาติ สำหรับเคลือบเม็ดปุ๋ยโดยเรียเพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารเชื่อมขาวที่ต่อคุณสมบัติต่างๆ/โครงสร้างของไฮโดรเจลที่เตรียมได้และคัดเลือกชนิดสารเชื่อมขาวที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมวัสดุไฮโดรเจลเป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยละลายซ้าที่ควบคุมการปลดปล่อยได้ดียิ่งขึ้น
3. เพื่อพิสูจน์เอกสารนี้ของไฮโดรเจลที่เตรียมได้และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของไฮโดรเจลกับชนิดของสารเชื่อมขาว
4. ศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำและกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ในสภาพต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุปลดปล่อยปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น
5. ศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยของไฮโดรเจลที่เตรียมได้
6. ศึกษาการย่อยสลายตัวทางชีวภาพของไฮโดรเจลที่เตรียมได้และจนผลศาสตร์การสลายตัว
7. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของปุ๋ยโดยเรียเคลือบด้วยไฮโดรเจลต่อการเจริญเติบโตของพืชตัวอย่าง

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจลย่อยสลายได้ทางชีวภาพของแป้งมันสำปะหลังกราฟด้วยโพลีอะคริลิกแอซิด/ยางธรรมชาติ ด้วยวิธีให้ความร้อน และสามารถปลดปล่อยปุ๋ยโดยเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. ทราบชนิดสารเชื่อมขาวที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมวัสดุไฮโดรเจลเป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยละลายซ้าที่ควบคุมการปลดปล่อยได้ดียิ่งขึ้น
3. ทราบคุณสมบัติต่างๆ/โครงสร้างของไฮโดรเจลเหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัสดุเคลือบปุ๋ยละลายซ้า
4. ทราบสมบัติของไฮโดรเจลทั้งด้านการบ่มตัวในน้ำ รวมถึงจนศาสตร์การดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลเพื่อใช้เป็นแนวทางการพัฒนาวัสดุปลดปล่อยปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพ
5. ได้ไฮโดรเจลที่สามารถย่อยสลายได้ลงตามธรรมชาติและวัสดุเคลือบปุ๋ยที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในระยะยาว และสามารถนำไปใช้งานกับแปลงเพาะปลูกในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้
6. สามารถพัฒนาปุ๋ยโดยเรียละลายซ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในทางการเกษตร ประหยัดเวลา แรงงานคน และค่าใช้จ่ายของเกษตรกร
7. เป็นแนวทางในการเพิ่มน้ำค่าของแป้งมันสำปะหลัง และยางพาราซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของไทย สำหรับใช้เป็นวัตถุดินในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล

## 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

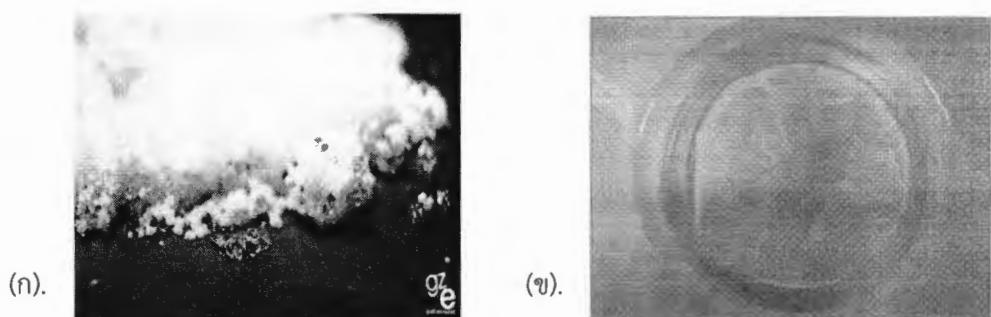


## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความหมายและประเภทของไฮโดรเจล (Hydrogel)

ไฮโดรเจล หมายถึง พอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ (จับกับน้ำได้ดี) และไม่ละลายในน้ำในสภาพที่เปียกสามารถดูดซับน้ำได้หลายร้อยเท่าตัวของน้ำหนักของไฮโดรเจลเมลักษณะคล้ายของแข็ง<sup>10</sup> ดังแสดงรูปที่ 2.1 ก และมีสถานะเป็นกึ่งของแข็งและกึ่งของเหลวดังรูปที่ 2.1 ข เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นตาข่าย (Network) ซึ่งเกิดจากการเชื่อมโยงกัน ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.2



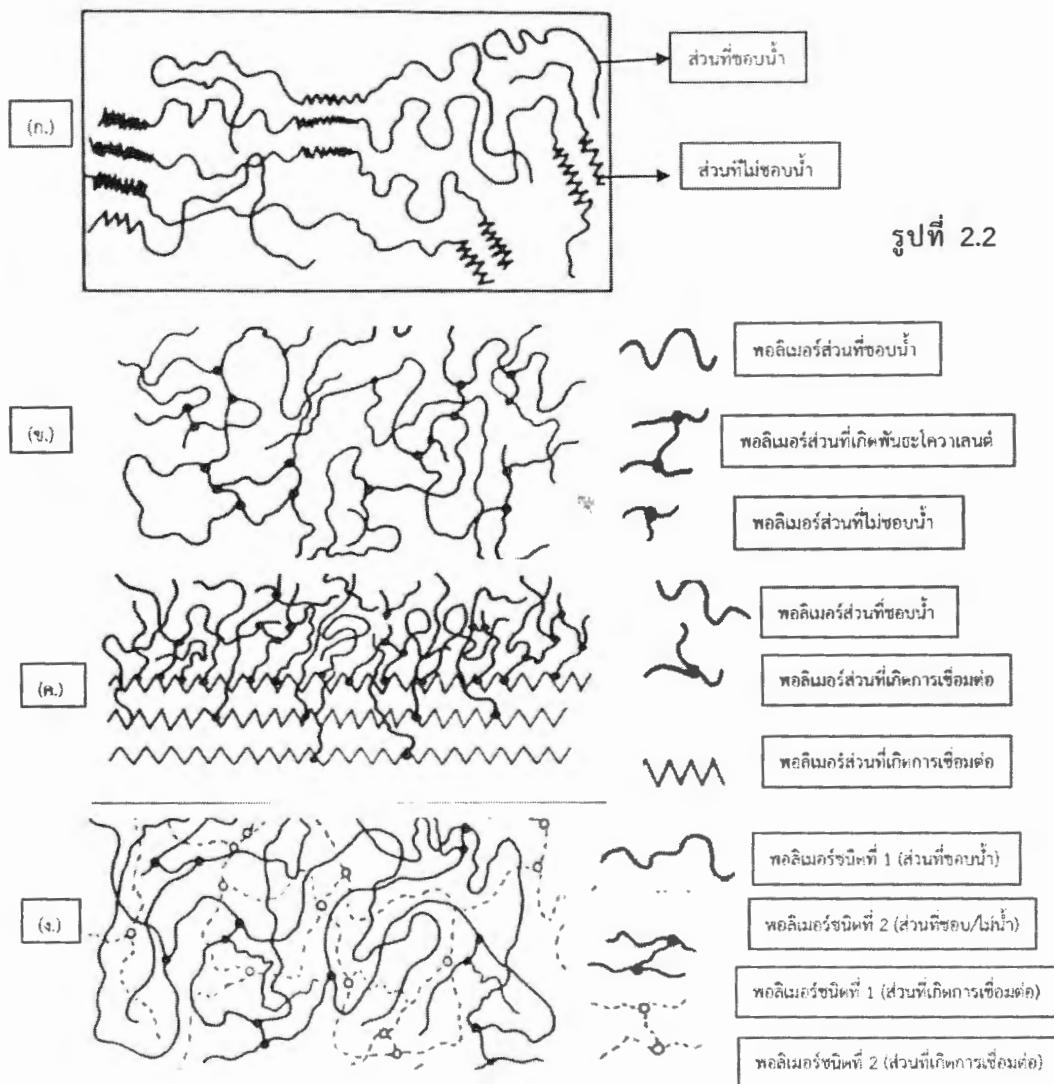
รูปที่ 2.1 ก. ไฮโดรเจลที่อยู่ในรูปของของแข็ง (Dry gel) และ ข. ลักษณะแผ่นไฮโดรเจลจาก Preliminary study using microwave irradiation (Wet gel sheet)<sup>10</sup>

ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิกที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำหรือส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) เช่น หมู่-OH, -COOH, -CONH<sub>2</sub>, -CONH- และ -SO<sub>3</sub>H เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) เช่น หมู่-CH<sub>2</sub>- และ -CH<sub>3</sub> เป็นต้น ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อ กันด้วยพันธะโคเวเลนซ์ พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆในสายโซ่ ประกอบกันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมากมายและโมเลกุลมีการพันตัวกันหรือขดตัวกันอยู่ ทำให้วายในโครงสร้างโดยรวมเกิดรูพรุนขนาดเล็กๆ มากมาย สมบัติเด่นของไฮโดรเจล คือสามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นร่างตาข่าย (ได้มากกว่า 20%) พร้อมกับสามารถพองตัวหรือขยายตัวออกได้ และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไปนอกจากนั้นยังไม่สามารถละลายในตัว

ทำละลายทุกชนิด<sup>11</sup> การจำแนกประเภทของไฮโดรเจลสามารถแบ่งได้ 4 ประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะของการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้<sup>12</sup>

ก) ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast Film)

ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์มนักนำไปใช้เพื่อเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยห้องส่วนที่ขอบน้ำและไม่ขอบน้ำ ส่วนที่ไม่ขอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่างๆ ได้ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.2g



โครงสร้างไฮโดรเจลประเภทต่างๆ ก. แบบแผ่นฟิล์ม ข. แบบโครงร่างตาข่าย ค. แบบกราฟท์บนพื้นผิว และ ง. โครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์แบบแทรกสอด<sup>13</sup>

### ข) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked Network)

เจลแบบโครงร่างตาข่ายเตรียมจากการพอลิเมอไรเซชันระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ ตัวเริ่มปฏิกิริยา (initiator) และตัวเชื่อมต่อสายโซ่ (crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วย จากนั้นเทลงไปในแม่พิมพ์โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ แสดงดังรูปที่ 2.2

### ค) ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface Grafted Polymer)

ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิวทำได้โดยการให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่สามารถละลายน้ำ เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการเพื่อเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานได้ เช่นปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น โดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าหรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้ถูกาย เป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำ โดยเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำ เป็นต้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูป 2.2c

### ง) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างพอลิเมอร์แบบแทรกสอด (IPN)

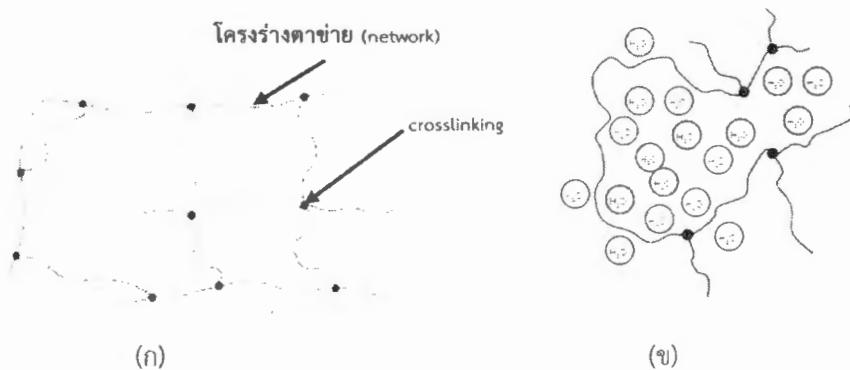
ไฮโดรเจลแบบ IPN เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิดแทรกสอดกันอยู่ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้น หรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.2g นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบบก็งโครงร่างพอลิเมอร์แบบแทรกสอด (semi-IPN) คือ ไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายสอดแทรกกันอยู่ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่งเพื่อให้ตรงต่อการประยุกต์ใช้งานในแต่ละแบบ

## 2.2 สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจล

สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจลที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ ได้แก่ การดูดซับน้ำ (Water adsorption) และการดูดซับโลหะหนัก (Heavy metal adsorption) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.2.1 การดูดน้ำของไฮโดรเจล

สมบัติการดูดน้ำของไฮโดรเจลจากการที่มีหมุนพังค์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาหรือสร้างพันธะทางเคมีกับโมเลกุลของน้ำได้ เช่น ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอคไซด์ (-COOH) และ เอโนเมด (-CONH<sub>2</sub> หรือ -CONH-) เป็นต้น เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีที่เป็นโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลทำให้ไฮโดรเจลสามารถยังคงรูปร่างอยู่ได้และไม่ละลายในน้ำ โดยปริมาณและลักษณะของโครงร่างตาข่าย โครงสร้างที่เป็นระเบียบและโครงสร้างที่เป็นผลึกจะเป็นสิ่งกำหนดลักษณะเฉพาะของเจลในสภาพที่บวมตัว นั่นคือ ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างตาข่ายหนาแน่นหรือมีโครงสร้างเป็นระเบียบจะมีความเป็นผลึกสูงสามารถดูดน้ำได้น้อย<sup>14</sup>



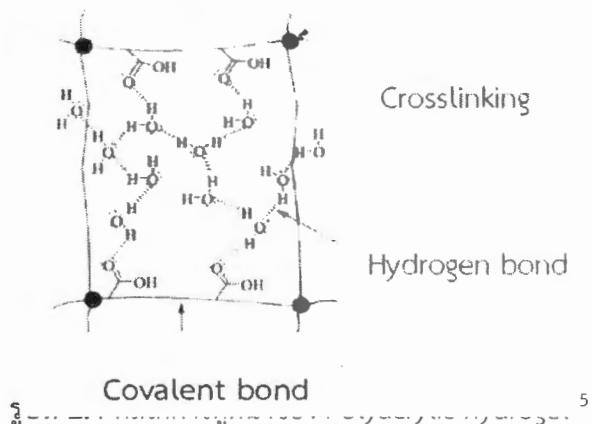
รูปที่ 2.3 (ก) ลักษณะโครงร่างตาข่าย<sup>10</sup> และ (ข) การดูดน้ำหรืออุ้มน้ำของไฮโดรเจล<sup>12</sup>

### กลไกการดูดน้ำของไฮโดรเจล

การดูดน้ำของไฮโดรเจลสามารถเกิดขึ้นโดยการเกิดปฏิกิริยา หรือ การเกิดพันธะทางเคมีระหว่างหมุ่ฟังก์ชันต่างๆ กับโมเลกุลของน้ำ ดังตัวอย่างต่อไปนี้ ซึ่งเป็นกลไกการดูดน้ำของ Polyacrylic hydrogel และ Polysodium acrylate hydrogel

#### ก.) กลไกการดูดน้ำของ Polyacrylic hydrogel

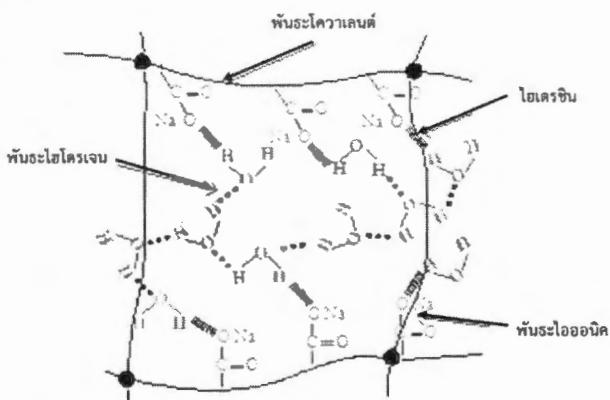
การดูดน้ำของไฮโดรเจลจะเกิดขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยา หรือมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับคุณลักษณะของอะตอมออกซิเจนของหมุ่ฟังก์ชันคาร์บอโค希ลิก (-COOH) จากนั้นโมเลกุลของน้ำจะดึงดูดน้ำโมเลกุลอื่น ๆ เข้ามาเก็บไว้ในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลโดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง (ดังรูปที่ 2.4)



#### ข.) กลไกการดูดน้ำของ Polysodium acrylate hydrogel

กลไกการดูดน้ำในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นกับหมุ่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดเป็นประจุลบได้เมื่อทำปฏิกิริยากับเบส เช่น -COOH โดยเบสที่นิยมใช้คือ NaOH และ KOH ซึ่งจะเรียกเบสนี้ว่า “สารเปลี่ยน

ประจุ” (Saponification agent) โดยเบสชนิดนี้จะเปลี่ยน  $-COOH$  เป็น  $-COO^-Na^+$  และ  $-COO^-K^+$  ตามลำดับ ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดน้ำได้อย่างมหาศาลหลังจากทำปฏิกิริยากับเบส เนื่องจากไฮโดรเจล จะมีหมู่ฟังก์ชันของ  $-COO^-Na^+$  ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างประจุภายในกับภายนอกของไฮโดรเจล เพื่อให้ความดันของโน้มถิกภายในและภายนอกของไฮโดรเจลเท่ากัน น้ำจะถูกดูดซึบเข้าไปภายในไฮโดรเจลเพื่อดูดประจุภายในและภายนอกของไฮโดรเจลให้เท่ากันโดยหมู่ฟังก์ชันของ  $-COO^-Na^+$  จะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำด้วยการเกิดพันธะไฮเดรชัน (Hydration) ระหว่างประจุลบของ  $-COO^-Na^+$  กับไฮโดรเจนอะตอมของโมเลกุln้ำ แล้วน้ำโมเลกุลถัดไปจะถูกดูดเข้ามาภายในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลโดยการเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) ระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง<sup>16</sup> แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กลไกการดูดน้ำของ Polysodium acrylate hydrogel.<sup>16</sup>

### 2.3 การประยุกต์ใช้ในด้านการเกษตร

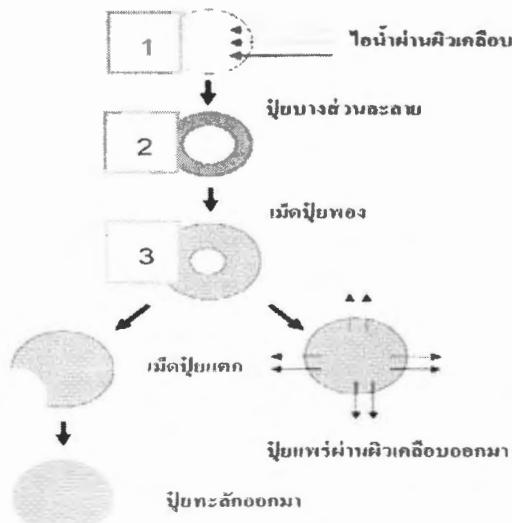
ปัจจุบันการเคลือบปุ๋ยได้ถูกพัฒนาคิดค้นเพื่อที่จะป้องกันการสลายของธาตุอาหารและเพื่อที่จะให้พืชได้ใช้อ讶มีประสิทธิภาพที่สุด วัสดุไฮโดรเจล (Hydrogel) จัดเป็นพอลิเมอร์ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจและได้รับความนิยมมากในปัจจุบัน ในการใช้เป็นวัสดุพอลิเมอร์เคลือบปุ๋ยเพื่อควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยหรือปุ๋ยละลายช้า เนื่องจากมีข้อดีคือ มีลักษณะที่เป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ที่สามารถเก็บน้ำและแร่ธาตุอาหารได้ในปริมาณมาก สามารถปลดปล่อยปุ๋ยได้เป็นระยะๆ เก็บปุ๋ยได้เป็นเวลานาน และสามารถเก็บความชุ่มชื้นในดินและควบคุมการพังทลายของดินได้ดี แต่ไฮโดรเจลมีข้อด้อย คือ ราคาแพง และบางชนิดที่มีข่ายในทางการค้ามีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพต่ำ ทำให้ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในระยะยาว ดังนั้นถ้าหากเราสามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจลขึ้นเองได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ก็จะเป็นอีกทางเลือกที่จะสามารถลดต้นทุนในการผลิต ได้วัสดุเคลือบปุ๋ยที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงส่งผลดีต่อคุณภาพของดินสำหรับการเพาะปลูกทั้งในระยะสั้นและยาว ดินมีความสมดุลจึงเอื้อต่อการเจริญเติบโตของพืช และให้ผลผลิตที่ดีมากขึ้น ฉะนั้นการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงได้รับความนิยมและได้รับการศึกษาวิจัยกันอย่างกว้างขวางในขณะนี้ โดยพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ถูกนำมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และยางธรรมชาติ เป็นต้น การศึกษาพบว่าแป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลมากที่สุด เนื่องจากเป็นวัตถุดีบีที่มีราคาถูก สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศและย่อยสลายได้ลงตามธรรมชาติด้วยกระบวนการเมtabolismของแบคทีเรีย ยีสต์ และเห็ด<sup>17</sup> ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

### 2.3.1 ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled Released Fertilizers, CRF)

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย คือ ปุ๋ยที่ผลิตขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ และทำให้พืชได้รับธาตุอาหารตรงตามต้องการโดยการควบคุมปริมาณการปลดปล่อยธาตุอาหารลงสู่ดิน ในทางวิชาการมีการใช้คำภาษาอังกฤษ 2 คำ ซึ่งมีความหมายต่างกัน คือ controlled released fertilizers (CRF) (ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย) และ slow- release fertilizers (SRF) (ปุ๋ยปลดปล่อยช้า) ซึ่งมีความหมายแตกต่างกัน ดังนี้

### 2.3.2 ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (SRF)

ปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาก้าวไปกว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป แต่ไม่สามารถควบคุมอัตราและช่วงเวลาในการปลดปล่อยอาหารได้มากนัก เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้นของดินและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน เป็นต้น ปุ๋ยประเภทนี้ ได้แก่ ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์ (urea – formaldehyde)<sup>18</sup> นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยเนื่ออปุ๋ยภายในจะเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำได้สูง (high solubility) แต่เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยไว้เพื่อควบคุม (control) การปลดปล่อย (release) จึงถูกเรียกว่า “ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (CRF)” ส่วนปุ๋ยปลดปล่อยช้า เช่น ยูเรียฟอร์มาลดีไฮด์เป็นปุ๋ยเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่ จากยูเรียที่มีสภาพละลายน้ำได้สูงแต่มีผ่านกระบวนการผลิตแล้ว เป็นปุ๋ยมีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ (low solubility) และปลดปล่อยในโตรเจนออกมาช้าตามสภาพการละลายน้ำได้ จึงเรียกว่า “ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (SRF)” เมื่อต้องการเรียกปุ๋ย 2 ชนิดนี้รวมกันเรียกว่า “SRF/CRFs” ส่วนปุ๋ยแอมโมเนียมหรือปุ๋ยยูเรีย ที่ผสมสารยับยั้ง (inhibitors) เพื่อทำให้ปุ๋ยเป็นประโยชน์ต่อพืชได้นานขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีประจำในการแลกเปลี่ยนแคลต์ไอนอนปานกลางถึงสูง จึงอาจจำแนกว่าเป็นปุ๋ยในโตรเจนออกฤทธ์ช้า(slow-acting nitrogen)



รูปที่ 2.6 การปลดปล่อยธาตุอาหารจากเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ 1) น้ำซึมเข้าไปในเม็ดปุ๋ย 2) น้ำละลายปุ๋ย 3) เกิดแรงดันภายในเม็ดปุ๋ยและเม็ดปุ๋ยพองตัว (เฉพาะสารเคลือบประเภทอลกิດ Alkyd coating) ในระยะสุดท้ายมีโอกาสเกิดได้สองทาง คือ ผิวเคลือบเม็ดปุ๋ยแตก ปุ๋ยจึงหลักออกมาระยิกว่า กลไกลมเหลว แต่ถ้าผิวเคลือบยังปกติ การปลดปล่อยเกิดจากการแพร่<sup>19</sup>

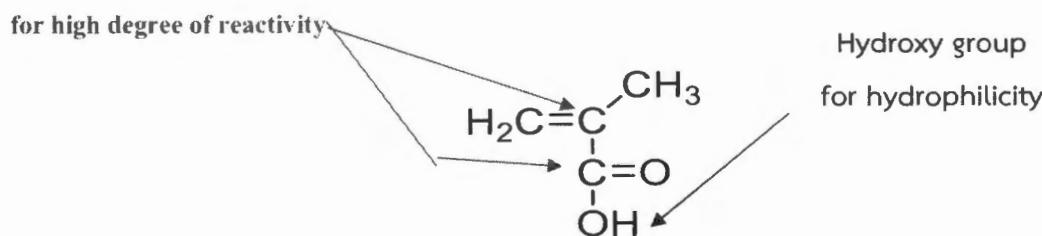
## 2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วยกระบวนการพอลิเมอร์เรขาขันแบบฟรีเระดิคัล

ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วยกระบวนการพอลิเมอร์เรขาขันเพื่อให้ได้พอลิเมอร์โครงร่างตาข่าย (Network) ปฏิกิริยาการสังเคราะห์จะมีองค์ประกอบหลายส่วน คือ มองอเมอร์ (Monomer) ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบแรดิคัล (Radical initiator) และสารเชื่อมขาว (Crosslinking)

### 2.4.1 มองอเมอร์

มองอเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลจะต้องมีหมู่พังก์ชันที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic group) ซึ่งไฮโดรเจลที่เตรียมจากมองอเมอร์เหล่านี้จะมีหมู่พังก์ชันสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยา หรือสร้างพันธะเคมีกับโมเลกุลของน้ำได้ ทำให้สามารถดูดน้ำเข้ามาเก็บไว้ในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลได้ สำหรับมองอเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติทางโครงสร้างที่สำคัญต่อการนำมาใช้ในเตรียมไฮโดรเจลอันได้แก่ ส่วนที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Acrylic function group) และส่วนที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilicity)<sup>12</sup> (ดังรูปที่ 2.7) ซึ่งสามารถอธิบายในแต่ละส่วนได้ดังนี้

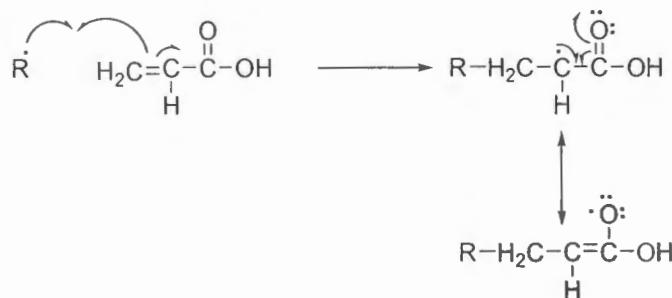
#### Acrylic functional group



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของมองอเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล<sup>12</sup>

#### ก) หมู่พังก์ชันของอะคริลิก (Acrylic functional group)

หมู่พังก์ชันของอะคริลิก (Acrylic functional group) คือมองอเมอร์ที่มีหมู่ไวนิลต่ออยู่กับคาร์บอนนิล ( $\text{CH}_2=\text{CHCOR}$ , เมื่อ R คือ  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{NH}-$ ,  $-\text{OH}$ ) จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากผลของเรโซแนนซ์ (Resonance stability effect) (ดังรูปที่ 2.8) เพราะว่าคาร์บอนนิลจะช่วยให้แรดิคัลที่เกิดขึ้นมีความเสถียร (stability) ดังนั้นมองอเมอร์ที่มีหมู่พังก์ชันของอะคริลิกจึงมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 2.8 การเกิดเรโซแนนซ์ของหมู่พังก์ชันอะคริลิกเมื่อเกิดปฏิกิริยาผ่านกลไกแบบฟรีเระดิคัล

### ข) Hydrophilicity

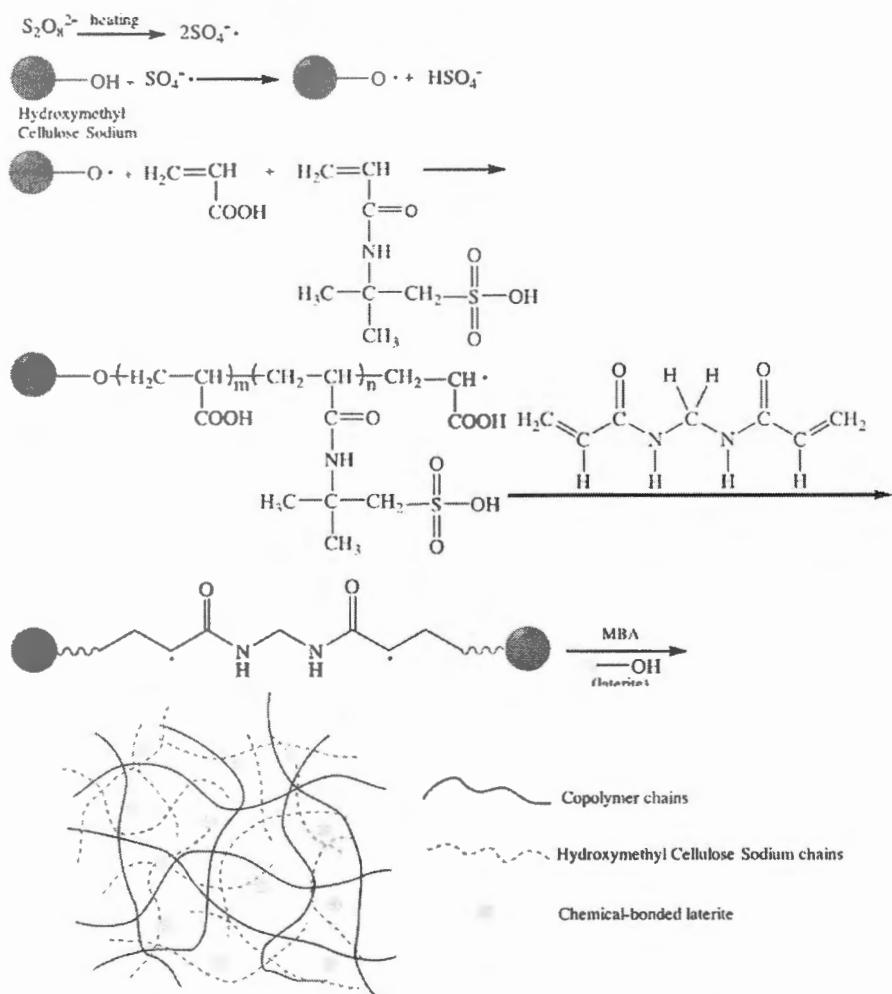
หมู่พังก์ชันที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilicity) จะทำหน้าที่ในการสร้างพันธะทางเคมีกับโมเลกุลของน้ำ แล้วไม่เลกุลของน้ำจะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำโมเลกุลตัวไปอีก ทำให้เกิดการดูดน้ำเข้ามาภายในโครงสร้างตัวข่ายของไฮโดรเจล โดยความสามารถในการดูดน้ำของหมู่พังก์ชันที่มีความชอบน้ำถ้าหากหมู่พังก์ชันที่มีความชอบน้ำสามารถเกิดพันธะทางเคมีกับโมเลกุลน้ำได้มากความสามารถในการดูดซับน้ำก็จะมากตามไปด้วย

#### 2.4.2 สารเชื่อมขวาง (Crosslinking agents)

โดยทั่วไปมอนอเมอร์ของสารเชื่อมขวางที่ใช้จะต้องมีจำนวนหมู่พังก์ชัน (Functionlity group) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาพลอยเมอร์ไฮโซนแบบพรีแอดิคัลได้อย่างน้อย 2 หมู่ ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาแล้วจะเกิดการเชื่อมกันระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์กิดเป็นโครงร่างตัวข่ายสามมิติ ซึ่งเครือข่ายสามมิติที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้วัสดุที่สังเคราะห์มีคุณสมบัติในการบวมตัวและมีความยืดหยุ่น การเชื่อมขวางนั้นมีทั้งแบบกายภาพและทางเคมี การเปลี่ยนแปลงปริมาณของสารเชื่อมขวางในการสังเคราะห์นั้นมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจล จากการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการบวมตัวและลักษณะของโครงสร้างของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากแป้งกึ่งโครงร่างตัวข่าย จากการวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการรายงานเกี่ยวกับการศึกษาผลของปริมาณของสารเชื่อมขวาง ซึ่งพบว่าสารเชื่อมขวางนั้นมีผลต่อคุณสมบัติการบวมตัวและลักษณะของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากแป้งกึ่งโครงร่างตัวข่าย ซึ่งการศึกษาการใช้สารเชื่อมขวางที่ต่างชนิดกันมีวิจัยจึงสนใจที่จะใช้สารเชื่อมขวางที่ต่างชนิดกันในการสังเคราะห์ของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากแป้งกึ่งโครงร่างตัวข่าย โดยทำการศึกษาทั้งหมด 3 ชนิด คือ N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) ethylene glycol dimethacrylate (EGDAM) และ glutaraldehyde (GA)

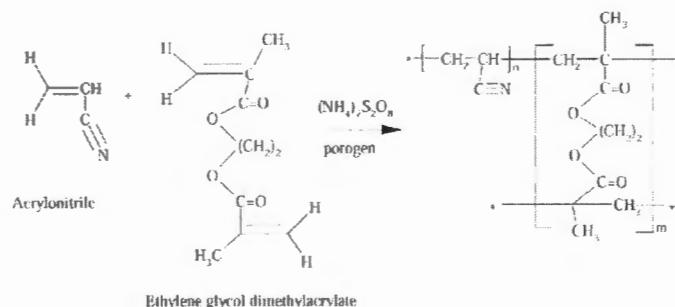
จากการวิจัยของ Cheng และคณะ<sup>20</sup> ได้ศึกษาปริมาณของสารเชื่อมขวาง N,N'-methylenebisacrylamide (MBA) ที่ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลตรวจสอบผลกระทบอย่างเป็นระบบของเนื้อหาของสารเชื่อมขวาง N, N'-methylenebisacrylamide (MBA) ที่มีต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจลไฮโดรเจลซีเมธิลเซลลูโลสโซเดียม (NaHMC-g-P (AA-co-AMPS) / ศีลามะลง) ซึ่งพบว่าปริมาณของสารเชื่อมขวางนั้นจะทำให้เกิดเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีไฮโดรเจลจากนั้นได้ทำการศึกษาคุณสมบัติในการกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลผลปรากฏว่า ไฮโดรเจลไฮโดรเจลซีเมธิลเซลลูโลสโซเดียม (NaHMC-g-P (AA-co-AMPS) / ศีลามะลง) นั้นมีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำกลไกการสังเคราะห์แสดงดับรูปที่ 2.9

Kanaan และคณะ<sup>21</sup> ได้พัฒนาของโคงอลิเมอร์ ประกอบด้วย 2-hydroxyethyl methacrylate (HEMA) และ by 1-butyl-3-vinylimidazolium chloride (BVIImCl) และมีการใช้สารเชื่อมขวางเชื่อมขวางกับ N, N'-methylenebisacrylamide (MBA) จากนั้นนำไฮโดรเจลที่สังเคราะห์นำไปประยุกต์ในด้านการแพทย์ในเรื่องของ การแยกสารชีวภาพ ระบบบำบัดน้ำเสีย อุปกรณ์ชีวการแพทย์ เช่นการส่งมอบสารชีวโมเลกุลที่มีประจำเฉพาะ



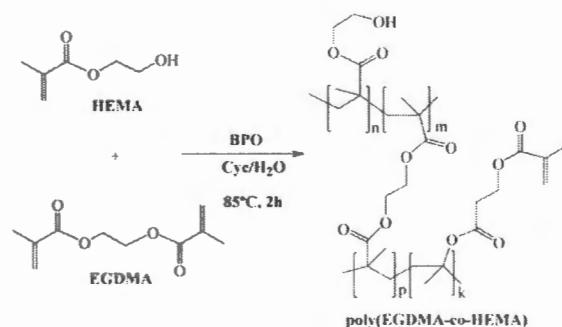
รูปที่ 2.9 กลไกปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลไนโตรเจลชีเมชลเซลลูโลสไซเดียม NaHMC-g-P (AA-co-AMPS) / ศิลาแลง<sup>20</sup>

สารเชื่อมขวางเอทิลีนไอกลคอลไดเมทาคริเลต (EGDAM) มีคุณสมบัติความยืดหยุ่นเนื่องจากประกอบด้วยโซเดียมสีเขียวเข้ม นอกจากนี้ลักษณะที่ขอบน้ำและความมีข้อของสารเชื่อมขวางชนิดนี้ยังช่วยให้วัสดุที่สังเคราะห์นั้นมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำมากขึ้น เหมาะที่จะนำไปเป็นวัสดุเป็นตัวดูดซับโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำ EGDMA เมื่อเชื่อมขวางกับโพลีเมอร์อะคริลิก อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่เกี่ยวกับการสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วย EGDMA เป็นตัวเชื่อมโยง Xu และคณะ<sup>22</sup> ได้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับจากพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ (AN) / เอทิลีนไอกลคอลไดเมทาคริเลต (EGDMA) เป็นสารเชื่อมขวางในปฏิกิริยา เกิดเป็นโครงร่างร่องตาก่ายผ่านการสังเคราะห์โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบแขวนลอย ได้ศึกษาปริมาณของอัตราส่วนการเชื่อมขวาง EGDMA ปริมาณ 100 ถึง 60% ผลปรากฏว่าการเชื่อมขวางมีผลต่ออัตราส่วนการบวมและการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวจำเพาะ ไฮโดรเจลสังเคราะห์นำมาทดสอบดูดซับฟีโนลและไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองลงเมียร์กระบวนการสังเคราะห์ตัวดูดซับแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการสังเคราะห์ตัวดูดซึบจากพอลิเมอร์ที่เตรียมไว้ (AN) / เอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต (EGDMA)<sup>22</sup>

Cesar และคณะ<sup>23</sup> ได้ศึกษาสารเชื่อมข่วงเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต EGDMA นำมาสังเคราะห์ 2-hydroxyethyl methacrylate ได้เป็นโคพอลิเมอร์ของ (EGDMA-co-HEMA) โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน โดยมีการใช้ปริมาณ EGDMA ที่แตกต่างกันและความเร็วในการกวนต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่าการใช้สารเชื่อมข่วงที่ต่างกันส่งผลค่อคุณสมบัติการบวมในน้ำ และพบว่าเกิดเรเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยา ซึ่งสังเคราะห์โดยโพลีเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระของไวนิลโโนมอร์แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การสังเคราะห์สำหรับโครงข่ายพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนซึ่งสังเคราะห์โดยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่เป็นอนุมูลอิสระ<sup>23</sup>

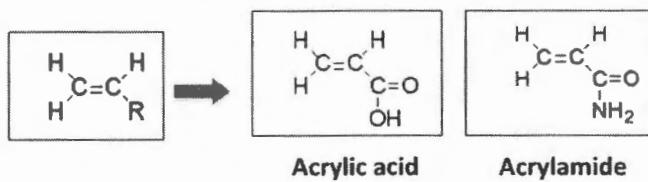
สารเชื่อมข่วงคือกลูตราล็อกอีด (GA) มีการใช้อย่างกว้างขวาง นิยมใช้เป็นสารเชื่อมข่วงการสังเคราะห์ไฮโดรเจลสำหรับการใช้งานทางชีวการแพทย์ GA เป็นของเหลวสีอ่อนที่อุณหภูมิห้อง หมู่ฟังชั่น คือ ไดอัลตีไซด์ที่ มีหมู่อัลตีไซด์รด ที่สามารถกิดปฏิกิริยาสูงเร็วและสามารถสร้างพันธะโค瓦เลนต์กับหมู่ฟังก์ชันได้ การใช้สารเชื่อมข่วง GA จะต้องทำปฏิกิริยานิสਪากรด เรียกว่า acetalization กรณีเป็นตัวเร่ง ในหมู่ไฮดรอกซิลและอัลตีไซดิก<sup>24</sup> อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่เกี่ยวกับการสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วย GA ที่ใช้เป็นสารเชื่อมข่วงนั้นมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ Sekhavat Pour Z และคณะ<sup>25</sup> ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจล nanoคอมโพสิต เตรียมจาก carboxymethyl starch-g-polyvinyl imidazole กับโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และส่วนผสม Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ในสารละลาย

การดูแลรักษาด้วยการสารเชื่อมขาว คือ กลูตาราลีดไฮด์ (GA) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาคุณสมบัติ การดูดซับของไฮโดรเจลสีเย็นและการกำจัดโลหะหนัก

#### 2.4.3 ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไซซันแบบฟรี-แรดิคัล (Free-radical polymerization)

ปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซั่นแบบฟรีแรดิคัล เป็นปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซั่นของมอนอเมอร์ที่เป็นสารประ กอบที่ไม่อิมตัว (Unsaturated compound) หรือไวนิลmonomer(Vinyl monomer) โดยปฏิกิริยาจะเริ่มต้นด้วยการสร้างตัวว่องไวต่อปฏิกิริยาที่เป็นแรดิคัล (Radical initiator) และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง ซึ่งจะมีการเพิ่มมอนอเมอร์ที่ละหน่วยเข้าที่ปลายสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีตัวว่องไวต่อปฏิกิริยา (Reactive chain end) ต่ออยู่ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Reactive site) จนกระทั่งถึงจุดยุติ และในการเริ่มต้นปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซั่นแบบฟรีแรดิคัลจะต้องมีตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ซึ่งตัวเริ่มปฏิกิริยาที่จะใช้จะเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาแบบแรดิคัล (Radical initiator) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ไวนิลนอนอเมอร์ (Vinyl monomer) ที่จะเกิดพอลิเมอร์เรซั่นผ่านกลไกปฏิกิริยาแบบนี้ จะต้องมีหมู่ R ที่มีคุณสมบัติเป็นหมู่ดึงอิเล็กตรอน (Electron withdrawing group) แสดงดังรูปที่ 2.12 เนื่องจากหมู่ดึงอิเล็กตรอนจะช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับตัวของไวต่อปฏิกิริยา แรดิคัลที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการเรโซแนนซ์ (Resonance effect) ซึ่งนอนอเมอร์ที่นิยมใช้ได้แก่ หมู่อะคริลิก (Acrylic functional group) คือ ไวนิล ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{R}$ ) จะต่อกับหมู่คาร์บอนิล ( $\text{C}=\text{O}$ ) เช่น อะคริลิก และอะคิลิชไมร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของไนลิมอนอเมอร์<sup>26</sup>

#### 2.4.4 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์เชิงแบบฟรี-เรดิคัล (Free-radical polymerization mechanism)

กลไกของปฏิกริยาพอลิเมอร์ไซซ์ชันแบบพรีแตรดิคัล มี 3 ขั้นตอน คือ ขั้นอินิบิเตชัน (Initiation) ขั้นโปรดูเกชัน (Propagation) และ ขั้นเทอร์มิเนชัน (Termination) ดังนี้

#### ก.) ขั้นอินนิทิเอชัน (Initiation)

ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือขั้นแรกเป็นการกำเนิดตัวว่องไวเรดิคัล 1. ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อน (Thermal) และการใช้แสง ( $h\nu$ )



ขันที่สองเป็นการเข้าทำปฏิกิริยาของตัวว่องไวแредิกคัล I. กับมอนอเมอร์ให้เกิดเป็นไมเลกุลที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาอยู่ที่ปลาย (Radical reactive center)



### ข.) ขั้นโปรดีไซน์ (Propagation)

เป็นขั้นตอนที่ไม่เลกุลตัวว่องไวต่อปฏิกิริยาที่เป็นแรดิคัลที่เกิดขึ้น  $I-CH_2C.XY$  เข้าทำปฏิกิริยา กับมอนอเมอร์อย่างต่อเนื่อง เกิดเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีตัวว่องไวแรดิคัลต่อปฏิกิริยาอยู่ที่ปลาย (Radical reactive chain end)



### ค.) ขั้นเทอร์มิเนชัน (Termination)

เป็นขั้นสิ้นสุดการเพิ่มขนาดของสายโซ่พอลิเมอร์ การเกิดเทอร์มิเนชันของการพอลิเมอเรชันแบบพรีแรดิคัลสามารถเกิดได้ 2 แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเกะกะ (Steric) หรือขนาดของหมู่แทนที่ X และ Y ดังนี้

#### 1.) เทอร์มิเนชันแบบรวมตัว (Coupling)

เกิดเมื่อแรดิคัลที่ปลายของ 2 สายโซ่ไม่เลกุลรวมตัวกัน ทำให้ 2 สายโซ่ไม่เลกุลที่กำลังเจริญเติบโตรวมเป็น 1 ไม่เลกุลที่มีน้ำหนักไม่เลกุลสูงขึ้น การรวมกันจะเป็นแบบ head-to-head



ดังนั้นการเกิดเทอร์มิเนชันแบบนี้จะเกิดได้ในกรณีที่หมู่แทนที่ X และ Y มีความเกะกะ (Steric) น้อย หรือเป็นหมู่ที่มีขนาดเล็ก

#### 2) เทอร์มิเนชันแบบแตกตัว (Disproportionation)

เกิดเมื่อมีการย้ายไฮโดรเจนอะตอมระหว่าง 2 สายโซ่ไม่เลกุลที่มีแรดิคัล ทำให้ได้พอลิเมอร์สองไม่เลกุลที่มีความยาวเท่าเดิม โดยปลายสายโซ่ที่ถูกย้ายไฮโดรเจนอะตอมออกไปจะมี พันธะคู่ติดอยู่ และอีกไม่เลกุลจะมีเฉพาะพันธะเดียวในโครงสร้าง

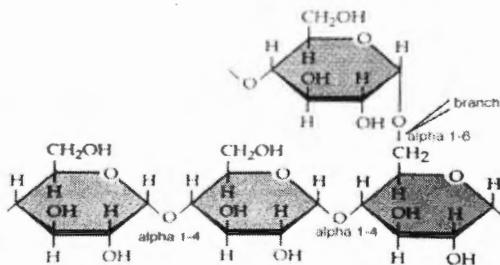


ดังนั้นการเกิดเทอร์มิเนชันแบบนี้จะเกิดในกรณีที่หมู่แทนที่ X และ Y ที่มีความเกะกะ (Steric) มาก หรือเป็นหมู่ขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถเกิดเทอร์มิเนชันแบบรวมตัวกันได้ โดยทั่วไปแล้วเทอร์มิเนชันจะเกิดขึ้นทั้ง 2 แบบ แต่โอกาสที่จะเกิดแบบใดมากกว่ากันนั้นขึ้นกับธรรมชาติของมอนอเมอร์ และ สภาวะของการเกิดพอลิเมอเรชัน

## 2.4 แป้ง (Starch)

แป้ง (starch or amylose) เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติประจำสารอาหารโดยได้เตรตชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสจำนวนมากที่ต่อ กันด้วยพันธะไกลโคไซดิก (glycosidic bonds) ซึ่งพอลิแซคคาไรด์นี้ ส่วนใหญ่ผลิตมาจากพืชสีเขียวที่ใช้กักเก็บพลังงาน และพบมากในพืชพวกมันฝรั่ง (potatoes), ข้าวสาลี (wheat), ข้าวโพด (maize corn), ข้าว (rice), และมันสำปะหลัง (cassava) แป้งบริสุทธิ์จะเป็นผงสีขาว ไม่มีรสและไม่มีกลิ่น ที่ไม่ละลายน้ำเย็นหรือแอลกอฮอล์<sup>16</sup>

โดยแป้งถือเป็นสารขนาดโมเลกุลใหญ่ มีสูตรทั่วไปคือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  (ดูรูปที่ 2.13) ซึ่งเชื่อมต่อ หน่วยกลูโคสเข้าด้วยกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -glycosidic linkage ที่ carbons บนตำแหน่งที่ 1 ของหน่วยกลูโคส กับ carbons บนตำแหน่งที่ 4 ของหน่วยกลูโคสที่อยู่ติดไป ด้านปลายของโมเลกุลแป้งจะมี anomeric carbon ( $C_1$ ) ซึ่งว่างอยู่ไม่ได้จับกับโมเลกุลอื่นๆ



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของแป้ง<sup>16</sup>

ดังนั้นแต่ละโมเลกุลของแป้งจะมีด้านปลายที่มีคุณสมบัติลดิวซ์ (reducing end) คือ แป้งหนึ่ง โมเลกุลจะมีต่าแห่งน้ำ reducing end 1 ต่าแห่งน้ำ โมเลกุลแป้งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลักๆ ตามขนาด โมเลกุลและลักษณะการจัดเรียงตัว คือ อะไมโลส (10-25%) ซึ่ง มีขนาดเล็กและมีกิ่งก้านสาขาเพียง เล็กน้อย และอะไมโลเพคติน (75-80%) ซึ่งมีขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านสาขามากมาย อะไมโลสและอะ ไมโลเพคตินมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน<sup>27</sup> ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติที่แตกต่างกันของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน<sup>27</sup>

| อะไมโลส   | อะไมโลเพคติน  |
|---|---|
| 1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสที่ต่อ กันเป็น เส้นตรงด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4 | 1. โมเลกุลกลูโคสที่ต่อ กันด้วยพันธะ $\alpha$ -1,4 และมี การแตกกิ่งด้วยพันธะ $\alpha$ -1,6 |
| 2. ละลายน้ำได้น้อยกว่า  | 2. ละลายน้ำได้ดีกว่า  |
| 3. เมื่อต้มในน้ำจะมีความข้นหนืดน้อย                                     | 3. ข้นหนืดมากและใส  |
| 4. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน                                       | 4. ให้สีม่วงแดงหรือสีน้ำตาลแดงกับสารละลาย ไอโอดีน   |
| 5. ต้มแล้วทิ้งไว้จะจับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็งได้                         | 5. ไม่จับตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง   |

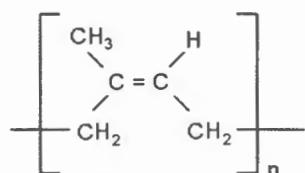
นอกจากนี้แป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณอะไมโลส อะไมโลเพคตินที่แตกต่างกัน สมบัติต่างๆ ก็แตกต่างกัน<sup>27</sup> ดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด<sup>16</sup>

| ชนิดแป้ง    | ความเป็นผลึก (%) | อุณหภูมิการเกิดเจลาตินайเซชัน (°C) | ปริมาณอะโนไมโลส (%) |
|-------------|------------------|------------------------------------|---------------------|
| โอ๊ต        | 33               | 60.7                               | 23                  |
| ข้าวสาลี    | 36               | 63.5                               | 23                  |
| ข้าวเหนียว  | 37               | 64.5                               | -                   |
| ข้าวฟ่าง    | 37               | 72.2                               | 25                  |
| ข้าวเจ้า    | 38               | 70.0                               | 17                  |
| ข้าวโพด     | 40               | 71.3                               | 27                  |
| Amylomaize  | 15 – 22          | 86.0                               | 55 – 75             |
| สาคู        | 26               | 70.5                               | 28                  |
| มันผึ้ง     | 28               | 67.3                               | 22                  |
| มันเทศ      | 38               | 70.0                               | 20                  |
| มันสำปะหลัง | 38               | 66.0                               | 18                  |

## 2.5 ยางธรรมชาติ (Natural rubber)

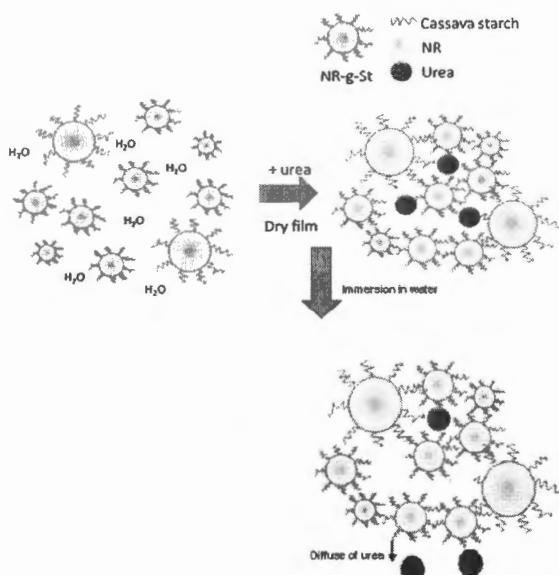
ยางธรรมชาติหรือยางพาราส่วนมากได้มาจากการต้นยางพาราสายพันธุ์ Hevea Brasiliensis โดยโครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ คือ cis-1,4-polyisoprene ประกอบด้วยหน่วยของไอโซพรีน ( $C_5H_8$ ) มาต่อกันเป็นสายยาว (แบบโซ่อิง) เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจะถูกทำให้ตัวทำละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซิน เอกซีน เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบสัมฐาน แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืดสามารถเกิดผลึกได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ยางจะมีความทนทานต่อแรงดึง ทนทานต่อการฉีกขาดและความต้านทานต่อการขัดถูสูงขึ้น ยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยสูง อยู่ในช่วง 200,000 ถึง 400,000 และมีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง จะต้องมีการบดยาง ก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการบดยางโดยทั่วไปจะใช้เครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง ลักษณะเด่นอีกอย่างของธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่นสูง<sup>28</sup>



รูปที่ 2.14 สูตรโครงสร้างยางธรรมชาติ<sup>28</sup>

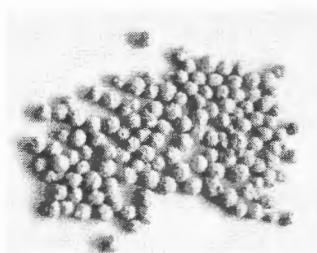
## บทหวานงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Riyajan และคณะ<sup>7</sup> ได้สังเคราะห์พอลิเมอร์สมรรถนะทางยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง (rubber-g-modified starch, NR-g-ST) สำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตรเพื่อเป็นวัสดุเคลือบควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยเรียบ กลไกในการเตรียมแคปซูลเคลือบปุ๋ยเรียบแสดงตั้งรูปที่ 2.15 ศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ยเรียบและการแตกสลายทางชีวภาพ พบร่วมกับพอลิเมอร์เคลือบปุ๋ยสามารถควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยได้ดีและสลายตัวได้ง่ายในดิน เน茫ะสมแก่การนำไปใช้งานด้านการเกษตร



รูปที่ 2.15 แคปซูลเคลือบปุ๋ยเรียบของพอลิเมอร์สมรรถนะทางยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง (rubber-g-modified starch, NR-g-ST).<sup>29</sup>

Suherman และคณะ<sup>30</sup> สังเคราะห์พอลิเมอร์สมของแป้งและพอลิอะคริลิกแอซิด (Starch/Acrylic Acid) สำหรับเคลือบปุ๋ยปลดปล่อยช้าเพื่อนำไปใช้งานในการเกษตร โดยทำการเคลือบเม็ดปุ๋ยโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดส์เบด (Fluid Bed Spraying) ลักษณะของเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบแสดงตั้งรูปที่ 2.16 พบร่วมกับพอลิเมอร์เคลือบปุ๋ยปลดปล่อยช้าที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพที่ดีในการควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย จึงมีความเน茫ะสมที่จะนำไปใช้งานในภาคเกษตรกรรม



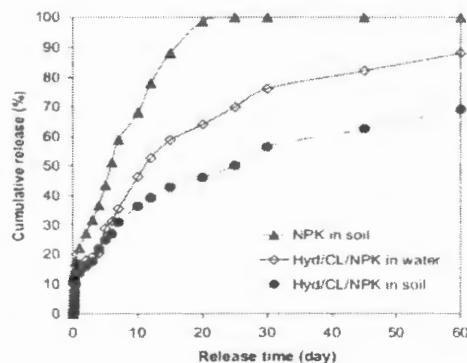
รูปที่ 2.16 เม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วย Starch/Acrylic Acid ด้วยเทคนิค Fluid Bed Spraying<sup>30</sup>

ชัยวุฒิ วัดจัง และคณะ<sup>31</sup> เตรียมไฮโดรเจลเชื่อมโยงแบบกึ่งโครงร่างดาข่ายของยางธรรมชาติ และแป้งมันสำปะหลัง (Semi-IPN NR/ST) เตรียมด้วยวิธีการเบลนเด้น้ำยาางและแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการเจล化ในส์ โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate) และ N, N'-Methylene-Bis-Acrylamide (MBA) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาและสารเชื่อมขาวงตามลำดับ ศึกษาผลของปริมาณ MBA ต่อผลการดูดซับน้ำของ และเสถียรภาพทางความร้อน Semi-IPN NR/ST จากการศึกษาพบว่าปริมาณของ MBA มีผลต่อสมบัติการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลโดยปริมาณของ MBA ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การดูดซึมลดลง นอกจากนี้ MBA ซึ่งเกิดการเชื่อมขาวงในโครงสร้างช่วยให้ไฮโดรเจลมีเสถียรภาพทางความร้อนดีขึ้น

สิรินันท์ วิริยะสุนทร และคณะ<sup>32</sup> เตรียมแป้งมันสำปะหลัง/พอลีไวนิลแอลกอฮอล์/มอนต์มอริลโอลในต้นโนคอมพอสิต สำหรับเคลือบปุ่ยที่ควบคุมการปลดปล่อย โดยขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการหล่อแบบ และศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูป ตรวจสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ การซึมผ่านของความชื้น การซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) การย่อยสลายทางชีวภาพ และการปลดปล่อยในต่อเจนของปุ่ย จากการศึกษาพบว่าปริมาณของพอลีไวนิลแอลกอฮอล์ในนาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น มีผลให้การดูดซึมน้ำ ความสามารถในการซึมผ่านของความชื้น และความสามารถในการซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออนมีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การเติมมอนต์มอริลโอลในต์มีผลทำให้การดูดซึมน้ำความสามารถในการซึมผ่านของความชื้น และความสามารถในการซึมผ่านของแอมโมเนียมไอออนมีค่าลดลง ซึ่งแปรผันตามปริมาณของมอนต์มอริลโอลในต์ที่เพิ่มขึ้น โดยภายหลังจากผ่านดินเป็นเวลา 50 วัน พบว่าร้อยละการหายไปของน้ำหนักและความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลีเมอร์นาโนคอมพอสิตเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาอัตราการปลดปล่อยในต่อเจนโดยการใส่ในน้ำที่ปราศจากไอออนตามระยะเวลาที่กำหนด พบว่าปุ่ยตัวอย่างที่เคลือบด้วยพอลีเมอร์นาโนคอมพอสิต มีอัตราการปลดปล่อยในต่อเจนต่ำกว่าปุ่ยที่ไม่ได้เคลือบ

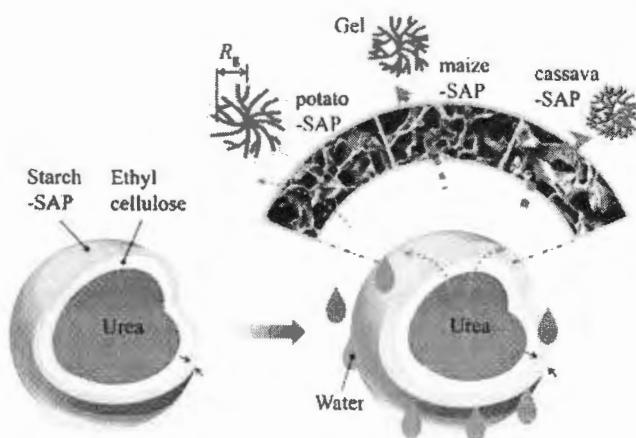
Xiao และคณะ<sup>33</sup> ศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับน้ำจากแป้งข้าวโพดเพื่อใช้ห่อหุ้มเม็ดปุ่ย โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันโดยพบว่าวัสดุดูดซับน้ำจากแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่า จะเป็นวัสดุห่อหุ้มที่ดีกว่าด้วยและวัสดุนี้ยังสามารถใช้เวลาในการปลดปล่อยปุ่ยได้นานถึง 45 วัน

Rashidzadeh และคณะ<sup>34</sup> ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลของโซเดียมอัลจิเนต-กราฟต์-พอลีอะคริลิกแอชิด-โค-พอลิอะคริลามิด (NaAlg-g-Poly (AA-co-AAm)) และไฮโดรเจลคลินอพติโลไลท์ (clinoptylолite, CL) คอมพอสิตของโซเดียมอัลจิเนต-กราฟต์-พอลีอะคริลิกแอชิด-โค-พอลิอะคริลามิด (NaAlg-g-Poly (AA-co-AAm)/CL) โดยอาศัยขั้นตอนการพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระ ศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยปุ่ยของไฮโดรเจลคอมพอสิตในน้ำและดิน โดยเปรียบเทียบระหว่างพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ่ยที่เคลือบด้วยไฮโดรเจลและไม่ได้เคลือบ ผลการศึกษาแสดงดังรูปที่ 2.17 พบว่าปุ่ยที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบมีอัตราในการปลดปล่อยเร็วกว่าปุ่ยที่ผ่านการเคลือบโดยใช้เวลาเพียงแค่ 20 วัน และพบว่าพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ่ยในน้ำเร็วกว่าการปลดปล่อยปุ่ยในดิน



รูปที่ 2.17 ผลการศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยปุ๋ยของไฮโดรเจล NaAlg-g-Poly (AA-co-AAm)/CL<sup>34</sup>

Qiao และคณะ<sup>35</sup> ศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับยิ่งยาวจากแป้งสามชนิด (แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่ง) เพื่อใช้ห่อหุ้มเม็ดปุ๋ยแบบหุ้มสองชั้น โดยชั้นที่หนึ่งคือ เอทิลเซลลูโลส และชั้นที่สองคือ แป้ง จากการทดลองพบว่าวัสดุดูดซับยิ่งยาวที่สังเคราะห์ได้นั้นมีความเป็นรูพรุนสูง ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็ก มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มาก ไม่ละลายน้ำโดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่เตรียมจากแป้งมันฝรั่ง เป็นวัสดุที่ดูดซับน้ำได้มากที่สุด และมีประสิทธิภาพในการปลดปล่อยปุ๋ยโดยใช้เวลาในการปลดปล่อยปุ๋ยได้นานถึง 90 ชั่วโมง



รูปที่ 2.18 กระบวนการสังเคราะห์ starch-based superabsorbent polymer (SAP)<sup>35</sup>

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

#### ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

| อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์การทดลอง          | รุ่น             | บริษัทผู้ผลิต     |
|--|------------------|-------------------|
| Scanning Electron Microscopy (SEM)             | JAM 5410 LV      | JEOL              |
| Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) | FTIR 2000        | PERKIN ELMER      |
| Differential Scanning Calorimeter (DSC)        | 823 <sup>e</sup> | METTLER           |
| Thermal Gravimetric Analysis (TGA)             | TG 8120          | RIGAGU            |
| x-ray Diffractometer (XRD)                     | X' pert - MDP    | PEILIPS           |
| Universal Testing                              | LR SERIES        | Lloyds            |
| เครื่องซั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง                    | HR-200           | A&D COMPANY       |
| ตู้อบสูญญากาศ (Iso temp Vacuum Oven)           | Model 282 A      | FISHER SCIENTIFIC |
| เทอร์มомิเตอร์ (Thermometer)                   | -                | -                 |
| เครื่อง Magnetic stirrer                       | -                | -                 |
| นาฬิกาจับเวลา                                  | -                | -                 |

#### 3.2 สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมแผ่นไอโครเจล และการวิเคราะห์การดูดซึบไอออนโลหะ แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างแผ่นไฮโดรเจล และการวิเคราะห์การทดสอบการปลดปล่อยปุ๋ย

| ลำดับ | ชื่อสารเคมี                         | ความบริสุทธิ์             | บริษัทผู้ผลิต                          |
|-------|-------------------------------------|---------------------------|--|
| 1     | Cassava starch                      | 100%                      | อาร์ แอนด์ บี ฟูด ชัพ<br>พลา yap จำกัด |
| 2     | Acrylic acid (AA)                   | 99.5%                     | ACROS -ORGANICS                        |
| 4     | Polyvinyl alcohol (PVA)             | 88%                       | ACROS -ORGANICS                        |
|       | Natural rubber (NR-latex)           | 60% dry<br>rubber content | Thai Rubber Latex<br>Corporation       |
| 5     | Ammonium persulfate (APS)           | 99.8%                     | Sigma-Aldrich                          |
| 6     | N,N'-Methylene-Bis-Acrylamide (MBA) | 96%                       | ACROS                                  |
| 7     | Ethylene glycol dimethacrylate      | 99%                       | ACROS                                  |
| 8     | Glutaric dialdehyde (GA)            | 25%                       | ACROS                                  |

### 3.3 การแปรอัตราส่วนของส่วนประกอบสำหรับการเตรียมไฮโดรเจล CSt-g-PAA(NR/PVA)

ในการแปรอัตราส่วนของส่วนประกอบ (feed composition) ใน การเตรียมไฮโดรเจล CSt-g-PAA/(NR/PVA) ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการใช้สารเชื่อมขวางที่ต่างชนิดกัน 3 ชนิด และทำการแปรผันสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล CSt-g-PAA/(NR/PVA) ที่มีผลต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล ในงานวิจัยนี้ได้นำสภาพะที่เหมาะสมจากการวิจัยในกลุ่มของวิจัยของเรา นำมาศึกษาต่อ โดยปริมาณสารที่ต้องใช้ในการทำปฏิกริยาดังแสดงในตารางที่ 3.3

#### ส่วนที่ 1 การแปรปริมาณตัวเชื่อมขวาง

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียมตัวอย่างไฮโดรเจล

| Code sample | CSt<br>(g) | NR<br>(g) | PVA<br>(g) | AA<br>(g) | APS<br>( $\mu$ L) | Crosslinker<br>type | Crosslinker<br>wt% | Emulvin<br>(phr) |
|-------------|------------|-----------|------------|-----------|-------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| CSB-Mx      | 7.50       | 5.00      | 5.00       | 5.00      | 150.00            | MBA                 | 1-5                | 0.125            |
| CSB-Ex      | 7.50       | 5.00      | 5.00       | 5.00      | 150.00            | EGMA                | 1-5                | 0.125            |
| CSB-Gx      | 7.50       | 5.00      | 5.00       | 5.00      | 150.00            | GA                  | 1-5                | 0.125            |

หมายเหตุ x = wt% of crosslinker

### 3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจลสังเคราะห์

ในการเตรียมไฮโดรเจล ได้มีการแปรผันปริมาณของตัวเชื่อมขวางและประเภท และควบคุม อัตราส่วนของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้แก่ Cassava starch, Acrylic acid, Polyvinyl alcohol และ Natural rubber

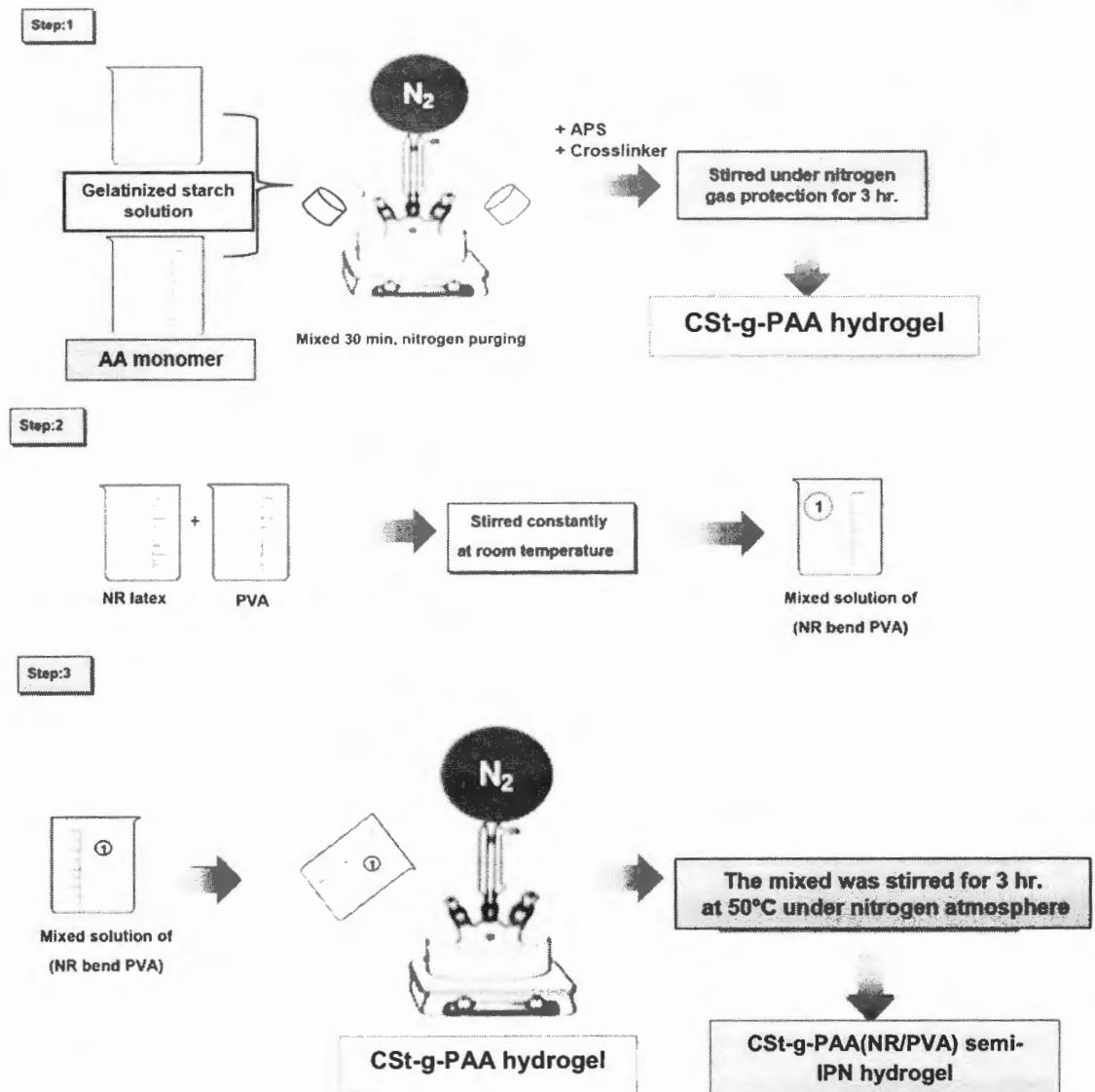
#### ส่วนที่ 1 ควบคุมปริมาณตัวเชื่อมขวาง

- ขั้นตอนการเตรียม Cassava starch graft with polyacrylic acid (CSt-g-PAA)
 

ชั้งแบ่งมันสำปะหลัง (CSt) 7.50 กรัม ละลายด้วยน้ำ DI 40.0 ml และเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 40% โดยน้ำหนัก กรณั้นให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 40° จนเกิดเป็นเจลอาติโนซ์ (เปลี่ยนจากสีขาวขุ่นเป็นสีใสและมีความหนืดสูง) เติม acrylic acid 5.0 ml ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 25% โดยน้ำหนัก และกวนภายใต้บรรยากาศในโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมamoineiyamเพอร์ซัลฟेट (APS) ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสารเชื่อมขวางลงในสารละลายผสมแล้วทำการพอลิเมอร์ไซซ์นเป็น CSt-g-PAA
- ขั้นตอนการเตรียม natural rubber /poly vinyl alcohol blends (NR/PVA blends)
 

นำน้ำยาางขันที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 60% (DRC 60) มาปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เติมอิมวัลวิน (Emulvin WA) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวเพื่อป้องกันการจับตัวของน้ำยาางธรรมชาติ และผสมกับสารละลายพอลีไวนิลเอลกอขอร์เข้มข้น 2.5% โดยน้ำหนัก กรณั้นอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้เป็นสารละลายผสมระหว่างยางธรรมชาติกับพอลีไวนิลเอลกอขอร์ (NR/PVA blends)
- ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจลของ (CSt-g-AA)/(NR/PVA)
 

เตรียมไฮโดรเจล (St-g-PAA)/(NR/PVA) ภายใต้สภาวะเดียวกันโดยศึกษาผลของการเชื่อมขวางที่แตกต่างกัน 3 ชนิด และปริมาณของสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมทั้ง 3 ชนิด อัตราส่วนที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล อัตราส่วนโดยน้ำหนักสำหรับการสังเคราะห์ไฮโดรเจลแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยเทาระยะผสมของ NR/PVA ลงในสารละลายของ St-g-PAA ทำการไล่ฟองอากาศและออกซิเจนออกด้วยแก๊สในโตรเจน 30 นาที จากนั้นเติมamoineiyamเพอร์ซัลฟेट (APS) แล้วทำการพอลิเมอร์ไซซ์นต่อเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 50 °C ภายใต้บรรยากาศในโตรเจน เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเพลลิตภัณฑ์ลงในเพลทแก้ว และนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 9 ชั่วโมง และนำไปแช่น้ำอีก 12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารที่ยังคงเหลือให้ละลายออกไปกับน้ำ แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้แผ่นพิล์มไฮโดรเจล ขั้นตอนในการเตรียมไฮโดรเจล (CSt-g-AA)/(NR/PVA) แสดงดังรูปที่ 3.1

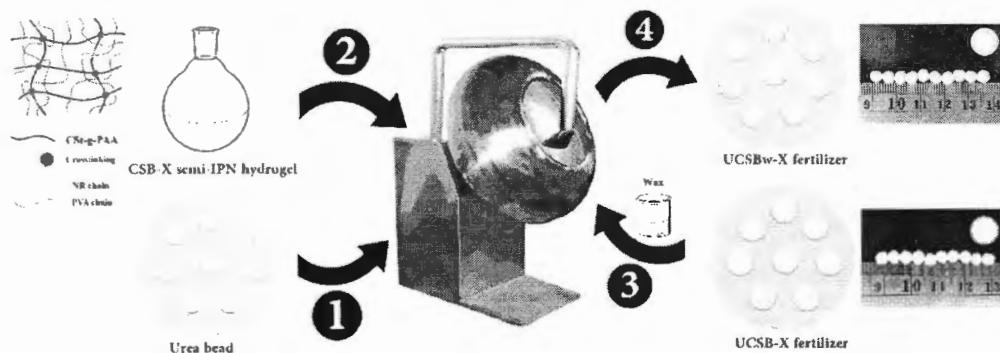


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการเตรียมไฮโดรเจลย่อยสลายได้ทางชีวภาพของ (CSt-g-PAA)/(NR/PVA)

## ส่วนที่ 2 การเคลือบเม็ดปุ๋ยเรีย

กระบวนการเคลือบเม็ดปุ๋ยเรียด้วยไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ เตรียมในระดับห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเม็ดปุ๋ยเรีย 45 กรัม (เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-5 มิลิเมตร) จากนั้นนำเม็ดปุ๋ยไปใส่ในเครื่อง rotating drum ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $70 \pm 2^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 10 นาที นำไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ (CSB-X) 15 กรัม ฉีดผ่านกระบอกฉีดยาลงไปยังบริเวณผิวของเม็ดปุ๋ยเรียเป็นเวลา 5 นาที จะสังเกตได้ว่าจะมีไฮโดรเจลนั้นเกาะติดบริเวณผิวของเม็ดปุ๋ยเรีย หลังจากนั้นในขั้นตอนที่ 3 นำปุ๋ยที่เคลือบด้วยไฮโดรเจล (UCSB-X) มาเคลือบด้วยสารละลายแวกซ์ด้วยอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิห้องเพื่อจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความคงรูป ตัวอย่างที่เคลือบนั้นจะมีทั้งหมด 3 ตัวอย่าง

ได้แก่ UCSBw-M2 UCSBw-E2 และ UCSBw-G2 ซึ่งทั้งสามตัวอย่างนี้จะใช้สารเชื่อมขาวในการสังเคราะห์ที่ต่างกัน คือ MBA, EGDMA และ GA ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการเคลือบเม็ดปุ๋ยเรียด้วยไฮโดรเจลที่สังเคราะห์

### 3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรเจล CSt-g-PAA/(NR/PVA)

#### 3.5.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ไฮโดรเจลด้วยเทคนิค FTIR

เทคนิค FTIR ใช้พิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อยืนยันองค์ประกอบหรือโมเลกุลของสารภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งทำการวัดด้วยเครื่อง Pekin-Elmer Attenuated total reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (ATR-FTIR) สเปกตรัมได้จากการวัดจำนวน 16 สแกน ต่อตัวอย่าง โดยช่วงการสแกน = 4000 to 650  $\text{cm}^{-1}$  ที่ resolution of 4  $\text{cm}^{-1}$

#### 3.5.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค XRD

ลักษณะโครงสร้างความเป็นผลึกหรืออสัณฐานนั้น ถูกวัดโดยเครื่อง X-ray Diffractrometer (XRD) ยี่ห้อ PHILIP รุ่น X'pert-MDP โดยตัดตัวอย่างแผ่นไฮโดรเจลฟิล์ม ขนาด  $2 \times 2 \text{ cm}$  แล้วนำมาวางในแท่นวางสารตัวอย่าง ทำการวัดตัวอย่างแผ่นฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิห้องช่วงการวัด  $2\theta = 5\text{--}55^\circ$

### 3.6 การพิสูจน์เอกลักษณ์ไฮโดรเจลด้วย SEM

เทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคหรือลักษณะสัณฐานวิทยาโดยจะให้ข้อมูลลักษณะทางกายภาพ คือ ลักษณะพื้นผิว (surface) โครงร่างตาข่าย (network) และความเป็นรูพรุนของไฮโดรเจล ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลได้จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง scanning electron microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV

### 3.7 การศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของไฮโดรเจลด้วย TGA

ศึกษาพฤติกรรมความเสถียรทางความร้อนของไฮโดรเจลคอมโพสิตด้วยเครื่อง Thermal Gravimetric Analyser (TGA) ยี่ห้อ RIGAGU รุ่น TG 8120 Thermoplus โดยตัดตัวอย่างไฮโดรเจลให้หนักประมาณ 4-6 mg และบรรจุใน aluminum crucible ที่ไม่มีฝ้าปิด แล้วค่อยๆ วางในเครื่องซึ่งความร้อนที่มีความไวสูง (thermobalance) และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25 °C ถึง 650 °C ด้วยอัตรา 10 °C/min ภายใต้บรรยากาศ N<sub>2</sub> ที่อัตราการไหล 40 mL/min

### 3.8 การศึกษาพฤติกรรมในการบวมตัวของไฮโดรเจล

#### 3.8.1 ทดสอบจุดปริมาตรน้ำสมดุล (Equilibrium water content, %WC) และการบวมตัว (% Mass swelling)

นำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลตัดแผ่นทดสอบขนาด 30x30 mm. จำนวน 3 ชิ้น แล้วซึมน้ำหนักแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลทั้ง 3 ให้ได้ น้ำหนักที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด และบันทึกผลน้ำหนักเริ่มต้น แล้วแซ่ตัวอย่างแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำ DI ปริมาตร 25 ml ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 นาทีจนกระหึ่งจุดสมดุล เอาแผ่นไฮโดรเจลออกจากน้ำด้วยกระดาษกรองเพื่อกำจัดน้ำที่ผิวของแผ่นไฮโดรเจล และนำไปซึมน้ำหนักจากนั้นซึมน้ำหนักเพื่อดูน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป %water content และ % mass swelling คำนวณได้จากสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ<sup>16</sup>

$$\%WC = \left[ \frac{(W_s - W_d)}{W_s} \right] \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ  $W_s$  คือ น้ำหนักแผ่นทดสอบหลังแซ่น้ำที่เวลาต่างกัน  
 $W_d$  คือ น้ำหนักแผ่นทดสอบก่อนแซ่น้ำ

$$\text{Mass swelling}(\%) = \left[ \frac{(m_t - m_0)}{m_0} \right] \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ  $m_0$  คือ น้ำหนักของไฮโดรเจลแห้ง  
 $m_t$  คือ น้ำหนักของไฮโดรเจลที่บวมน้ำ

#### 3.8.2 ศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำที่ pH ต่างๆ

ศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ โดยซึมน้ำหนักแผ่นไฮโดรเจลแห้งจากนั้นแซ่ตัวอย่างแผ่นฟิล์มในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 ซึมน้ำหนักพอลิเมอร์ไฮโดรเจลหลังจากจุ่มในน้ำ DI เมื่อเวลาครับ 4, 6, 8, ..., 40 นาที โดยกระดาษกรองซับน้ำส่วนเกินออกไปก่อนซึมน้ำหนักแล้วคำนวณ %water content และ % mass swelling ดังสมการที่ 1 และ 2

#### 3.8.3 ศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำในสารละลายเกลือที่ต่างชนิดกัน

ศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำในสารละลายเกลือที่ต่างชนิดกัน โดยจะซึมน้ำหนักแผ่นไฮโดรเจลจากนั้นแซ่ตัวอย่างแผ่นฟิล์มที่สารละลายเกลือต่างชนิดกันได้แก่ NaCl MgCl<sub>2</sub> และ FeCl<sub>3</sub> ที่ความเข้มข้น 0.9% w/v ซึมน้ำหนักพอลิเมอร์ไฮโดรเจลหลังจากจุ่มในสารละลายเกลือที่ต่างชนิดกันเมื่อเวลาครับ 4, 6, 8, ..., 40 นาที โดยกระดาษกรองซับน้ำส่วนเกินออกไปก่อนซึมน้ำหนักแล้วคำนวณ %water content และ % mass swelling ดังสมการที่ 2

### 3.9 จนศาสตร์การดูดซับน้ำ

การศึกษาอัตราเร็วปฏิกิริยาการดูดซับของไฮโดรเจลในน้ำ โดยใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order<sup>36</sup> โดยสมการของ Pseudo-first order แสดงดังสมการที่ 3 และ 4

$$R_t = (1 - e^{-k_1 t}), \text{ pseudo-first-order} \quad (3)$$

$$R_t = \frac{k_2 R_C^2}{1 + k_2 R_C^2 t}, \text{ pseudo-second-order} \quad (4)$$

เมื่อ  $R_t$  คือ ค่าการดูดซับน้ำที่เวลาต่าง (%)

$R_C$  คือ ค่าการดูดซับน้ำที่สมดุล (%)

$k_1$  และ  $k_2$  คือ ค่าคงที่ของอันดับ 1 และ 2 ตามลำดับ

$t$  คือ เวลา

การศึกษาจลศาสตร์ในการปลดปล่อยปุ๋ยในน้ำและดิน โดยใช้แบบจำลองของ Korsmeyer-Peppas kinetic แสดงดังสมการที่ 5

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_{kp} t^n \quad (5)$$

เมื่อ  $M_t/M_\infty$  คือ อัตราการปลดปล่อยที่เวลา  $t$

$k_{kp}$  คือ ค่าคงที่อัตรา

$n$  คือ เลขบ่งชี้การปลดปล่อยแสดงถึงกลไกการปลดปล่อย

ถ้า  $0.45 < n > 0.89$  แสดงเป็นกลไกการปลดปล่อยแบบ non Fickian ถ้า  $n = 0.89$ , เป็นกลไกการปลดปล่อยแบบ Super II transport.<sup>37</sup>

แบบจำลอง first-order แสดงดังสมการที่ 6

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - e^{k_1 t} \quad (6)$$

เมื่อ  $k_1$  คือ ค่าคงที่อัตรา

แบบจำลอง Zero order แสดงดังสมการที่ 7

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_0 t \quad (7)$$

เมื่อ  $k_0$  คือ ค่าคงที่อัตรา

แบบจำลอง Higuchi แสดงดังสมการที่ 8

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_H t^{1/2} \quad (8)$$

เมื่อ  $k_H$  คือ ค่าคงที่อัตรา

แบบจำลอง Parabolic diffusion แสดงดังสมการที่ 9

$$\frac{M_t}{M_\infty} = k_d t^{1/2} \quad (9)$$

เมื่อ  $k_d$  คือ ค่าคงที่อัตรา

$b$  คือ ค่าคงที่

แบบจำลอง Simple Elovich แสดงดังสมการที่ 10

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \beta + k \ln(t) \quad (10)$$

เมื่อ  $k_d$  คือ ค่าคงที่อัตรา

$\beta$  คือ ค่าคงที่การปลดปล่อย

### 3.10 การทดสอบการกักเก็บน้ำ

ศึกษาการกักเก็บน้ำของไฮโดรเจโลโดยทำการในถ้วยพลาสติก โดยเริ่มจากการตัดตัวอย่างแห้งน้ำหนัก 0.50 1.00 และ 1.50 กรัม ผสมลงในดินร่วนปนทรายน้ำหนัก 200 กรัม จากนั้นทำการเติมน้ำ DI ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทำการศึกษาเทียบกับตัวควบคุม คือ ตัวอย่างที่ไม่ใส่ตัวอย่างลงไป ถ้วยพลาสติกที่ใช้ทดลองจะถูกเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง ในระหว่างการทดลองทั้งหมด 30 วันจะมีการซั่งน้ำหนักในจำนวนวันต่างๆ จากนั้นทำการคำนวนเปอร์เซนต์การกักเก็บน้ำจากสมการที่ 11<sup>38</sup>

$$W_r = \frac{W_t - W}{W_0 - W} \times 100\% \quad (11)$$

เมื่อ  $W_0$  น้ำหนักก่อนเติมน้ำคือ  $W_0$

น้ำหนักที่มีการเติมน้ำลงไป  $W$

น้ำหนักที่วันต่อๆ แทนด้วย  $W_t$

### 3.11 การทดสอบความสามารถในการแตกสลายทางชีวภาพ

ศึกษาความสามารถในการแตกสลายทางชีวภาพโดยวิธีการซั่งน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ตัดแผ่นไฮโดรเจลขนาด  $20 \times 20$  มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้นต่อหนึ่งช่วงระยะเวลาทดสอบ ซึ่งน้ำหนักที่แน่นอนจากนั้นนำแผ่นทดสอบผึ่งลงในให้ลึกจากผิวดิน 7 ซ์ม โดยใช้ดินร่วนปนทราย ในเขตอำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดสอบความสามารถในการแตก

ถลายเป็นระยะเวลากทุกๆ 15 วัน เมื่อครบกำหนดเวลานำแผ่นทดสอบมาซึ่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ความสามารถในการแตกถลายทางชีวภาพ คำนวณได้จากสมการที่ 12<sup>39</sup>

$$\text{ร้อยละน้ำหนักที่หายไป} = \frac{(W_0 - W_t)}{W_0} \times 100 \quad (12)$$

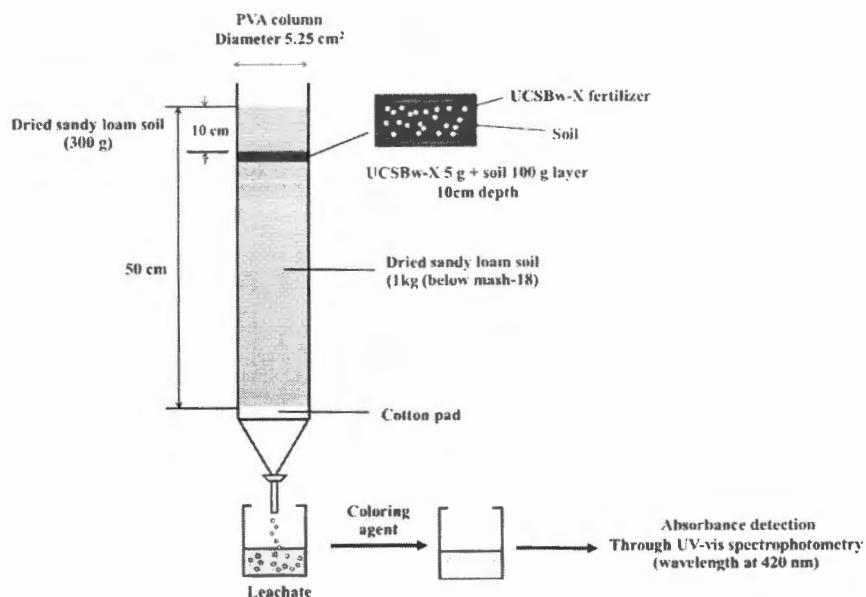
เมื่อ  $W_0$  คือ น้ำหนักแผ่นทดสอบเริ่มต้น

$W_t$  คือ น้ำหนักแผ่นทดสอบเมื่อระยะเวลาผ่านไป

### 3.12 ศึกษาการปลดปล่อยปูยูเรียในน้ำและดิน

การศึกษาการปลดปล่อยปูยูเรียในน้ำ นำตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการเคลือบ 0.25 กรัม นำมาแช่ในน้ำ DI ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ในขวดใส่ที่เป็นระบบปิดขนาด 150 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย 2.0 มิลลิลิตร ที่เวลาต่างๆ (1, 3, 6, 12, 24, 36,..., 94 ชั่วโมง) แล้วนำสารละลายตัวอย่างมาฟอร์มสีด้วยสารสี 2.0 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไวัดหาปริมาณของยูเรียโดยการใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิล ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร และทำซ้ำ 3 ชั้ง<sup>40</sup>

การศึกษาการปลดปล่อยปูยในดินจะทำการศึกษาจำลองให้คล้ายกับธรรมชาติ โดยทำการทดลองจะใช้ห่อ PVA ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางยาว 5.25 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นคอลัมน์ในการศึกษาการปลดปล่อยปูยูเรีย ขั้นตอนแรกจะเป็นการนำดินร่วนปันธาน้ำหนัก 1.0 กิโลกรัม ทำการซึ่งตัวอย่างเม็ดปูยที่ผ่านกระบวนการเคลือบ 5.0 กรัม ผสมกับดินร่วนปันธาน้ำหนัก 100 กรัม ใส่เป็นชั้นที่ 2 จากนั้นนำดินน้ำหนัก 300 กรัมเพิ่มเติมเป็นชั้นที่ 3 เติมน้ำ DI 150 มิลลิลิตร ทำการเปิดห่อเพื่อเก็บตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร หลังจากการเก็บตัวอย่างเติมน้ำ DI เพิ่มลงไปในห่อ 10 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปิเปตตัวอย่าง 2.0 มิลลิลิตร นำไปฟอร์มสีและทำการหาปริมาณของยูเรียโดยการใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เซ่นเดียวกันกับการทดสอบในน้ำ และทำซ้ำ 3 ชั้ง



รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยเรียในดิน

### 3.13 ศึกษาอิทธิพลปุ๋ยเรียที่เคลือบด้วยไฮโดรเจลที่เตรียมได้ต่อการเจริญเติบโตต้นพริกจินดา

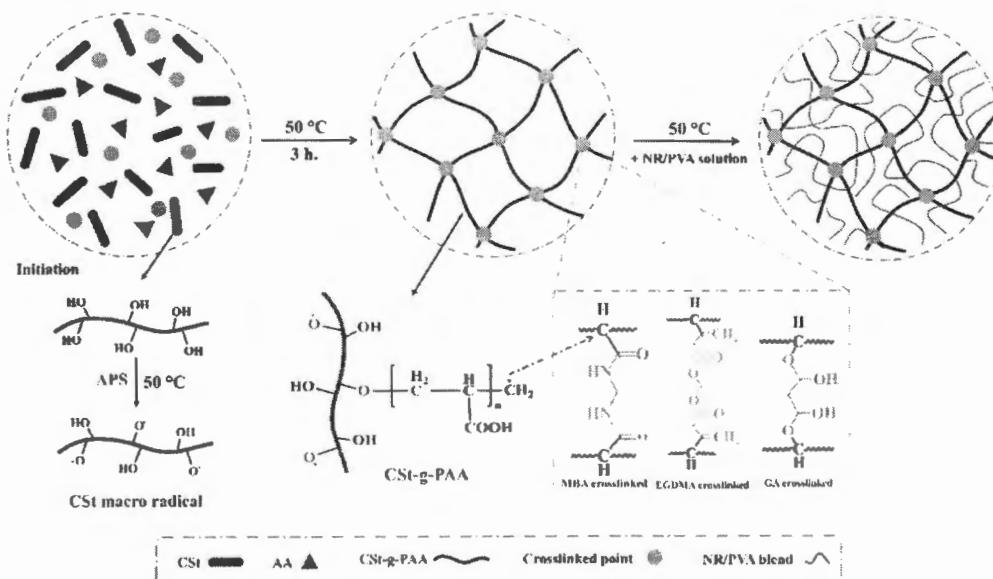
ในการศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยเรียละลายชาที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของต้นพริกจินดา ดำเนินการศึกษาในกระถางเพื่อให้สามารถควบคุมตัวแปรในการทดลองได้ง่าย ทำการทดลองโดยการนำต้นพริกจินดาลงมีอายุ 25 วัน (โดยระยะนี้ไม่มีการใส่ปุ๋ยเคมีเพียงใช้แต่ปุ๋ยมูลสัตว์ในการรองข้างล่างล้วนได้น่าเชื่อถือ) ที่มีลำต้นและความสูงที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ทำการย้ายลงกระถางจนต้นพริกนั้นเกิดความแข็งแรง โดยจะมีเป็นแปลงควบคุม 3 กระถาง แปลงใส่ปุ๋ยเม็ดหยี่เรีย 3 กระถาง และแปลงใส่ปุ๋ยละลายชา 3 ตัวอย่าง (UCSBw-M2 UCSBw-E2 UCSBw-G2) ทั้งหมด 9 กระถาง ทำการวัดความสูงของลำต้น ขนาดของใบ เพื่อกับข้อมูลของการเริ่มนักทดลอง จากนั้นทำการซึ่งปุ๋ยเรียปริมาณ 1.50 กรัม และปุ๋ยเรียที่เคลือบด้วยไฮโดรเจลปริมาณ 3.50 กรัม ใส่ลงไปปริมาณห่างจากลำต้นของพืช 5.0 เซนติเมตร (ทำทั้งหมด 3 ขั้น) จากนั้นทุก 15 วัน จะทำการเก็บข้อมูลของการเจริญเติบโตของต้นพริก โดยจะทำการวัดความสูงของลำต้น ขนาดของใบ เก็บผลผลิตที่ออกในแต่ละช่วงอุปโภคแห้งซึ่งน้ำหนัก (ระยะในการทดลองทั้งหมด 45 วัน)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์

#### 4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์เรซั่นของไฮโดรเจล CSt-g-PAA/(NR/PVA)

รูปที่ 4.1 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์เรซั่นที่เป็นไปได้ของไฮโดรเจล CSt-g-PAA/(NR/PVA) ซึ่งในขั้นแรกโพแทสเซียมทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาผลิตแอดดิคัลภายในตัวร้อน แล้วแอดดิคัลที่เกิดขึ้นจะไปเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแป้งที่ตรงตำแหน่งไฮดรอกซิลของโพลีอะคริลิกแอซิดกับแป้ง จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับสารเชื่อมขาว และมีการเติมสารผสมระหว่างโพลีไวนิลแอลกอฮอล์และยางธรรมชาติ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจลกึ่งโครงร่างตาข่ายสามมิติในที่สุด<sup>9</sup>



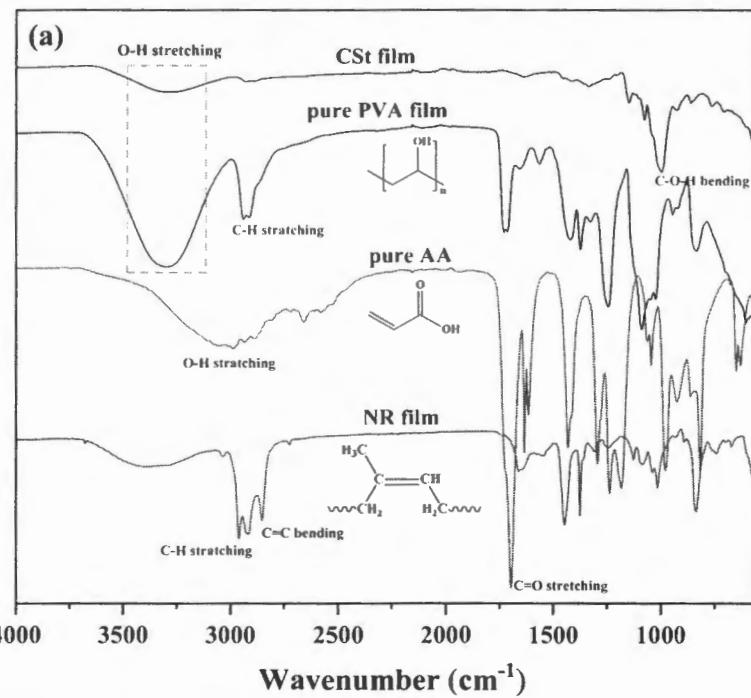
รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์ของไฮโดรเจลกึ่งโครงร่างตาข่าย CSt-g-PAA(NR/PVA) ที่ใช้สารสารเชื่อมขาวต่างชนิดกัน

## 4.2 การพิสูจน์เอกสารลักษณ์และสัมฐานวิทยาของแผ่นไฮโดรเจล

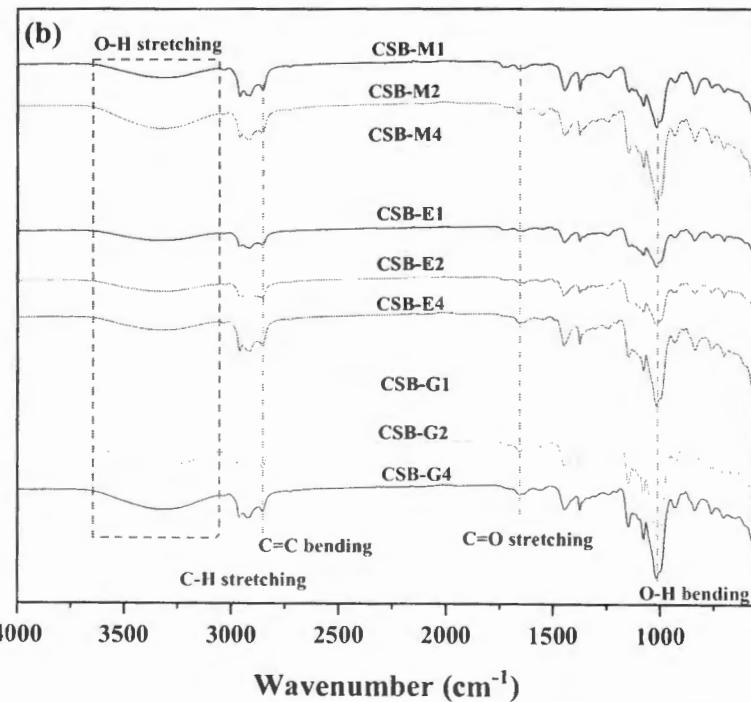
### 4.2.1 การพิสูจน์เอกสารลักษณ์ด้วยเทคนิค ATR-FTIR

รูปที่ 4.2(a) แสดง FTIR สเปกตรารของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ คือ แป้งมันสำปะหลัง (CSt) พอลิอะคริลิกแอcid (AA) ยางธรรมชาติ (NR) และ พอลีไวนิลแอลกอฮอร์ (PVA) และรูปที่ 4.2 แสดง FTIR สเปกตรารของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ที่ใช้สารเชื่อมขวางต่างชนิดและปริมาณที่ต่างกัน

จากรูปที่ 4.2 จะพบว่าสเปกตรารการดูดกลืนแสงของตัวอย่างไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ พบรีกที่ตำแหน่งเลขคณิตเท่ากับ  $3300\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชัน -OH (Stretching) ของโมเลกุล CSt และ PVA พีกที่ตำแหน่ง  $1150\text{ cm}^{-1}$  และ  $1020\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชัน C-O (Stretching) และ C-O-H (Bending) ของ โมเลกุลของ CSt<sup>41,42</sup> ตามลำดับ และพบรีกที่ตำแหน่ง  $2962, 2855, 1667$  และ  $1560\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชัน C-H (symmetric asymmetric) C=C (Stretching) C-C (Stretching) C=C (Bending) ตามลำดับ พีกที่เกิดขึ้นเหล่านี้ช่วยยืนยันได้ว่ามีการแทรกสอดของสายโซ่ NR เข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจล<sup>7</sup> พีกที่ตำแหน่ง  $1140\text{ cm}^{-1}$  เป็นการสั่นของ O-H (Bending) และพีกที่ตำแหน่งช่วง  $1750 - 1650\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของหมู่ฟังก์ชัน CH (Stretching) ส่วนพีกที่  $1365\text{ cm}^{-1}$  เป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของที่หมู่ฟังก์ชัน C=O (Stretching) จากหมู่คาร์บօกซิเลตจากการกราฟต์พอลิอะคริลิกแอcid เมื่อพิจารณาลักษณะของสเปกตรารของไฮโดรเจลที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับสเปกตรารของ pure AA และ pure CSt, NR และ PVA พบว่าได้สเปกตรารของไฮโดรเจลที่คล้ายคลึงกันและมีตำแหน่งของพีกมีการเคลื่อนที่ไม่ยังเลขพีกที่ตำแหน่งสูงขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่าประสบความสำเร็จในการเตรียมไฮโดรเจลตามต้องการ



รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตร้าของ pure materials (CSt, AA, NR และ PVA)



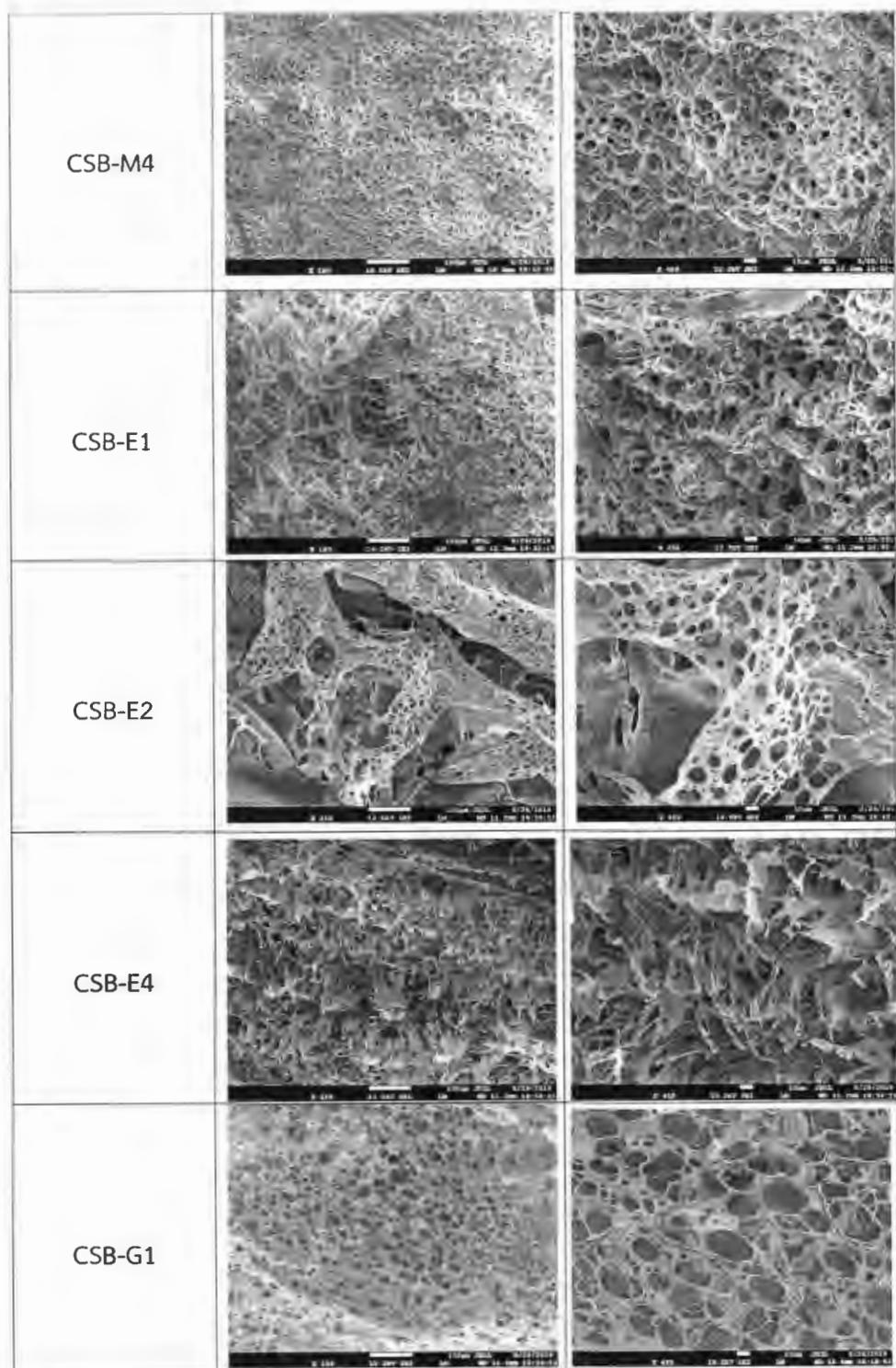
รูปที่ 4.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ที่ใช้สารเชื่อมขาวที่ชนิดและปริมาณที่ต่างกัน (CSB-M<sub>x</sub>, CSM-E<sub>x</sub> และ CSB-G<sub>x</sub>)

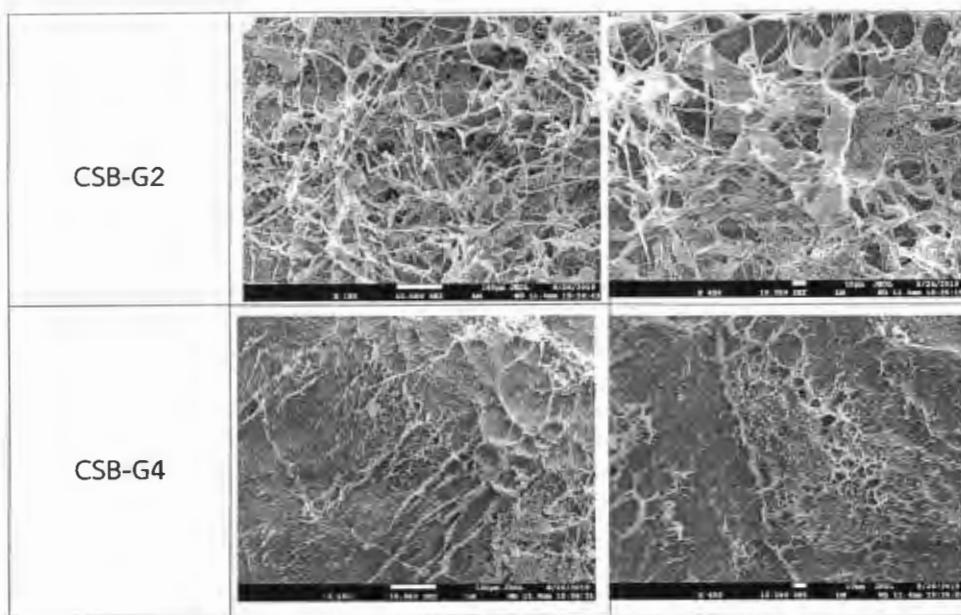
### 4.3 การพิสูจน์เอกสารชั้นตัวอย่าง SEM

จากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคพื้นผิวของตัวอย่างไฮโดรเจลที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscopy; SEM) เพื่อดูลักษณะทางกายภาพพื้นผิวของไฮโดรเจล ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1 ที่กำลังขยาย 150 และ 450 เท่า จากภาพจะเห็นว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเป็นโครงร่างสามมิติ และมีรูพรุนขนาดแตกต่างกัน และมีปริมาณของรูพรุนที่แตกต่างกันไปตามปริมาณของสารเชื่อมขาวและชนิดของสารเชื่อมขาวที่แตกต่างกัน ซึ่งรูพรุนเหล่านี้เป็นรูพรุนที่น้ำจะแทรกซึมเข้าไปในสัดไฮโดรเจลได้ และจากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างพื้นผิว พบว่าตัวอย่างในชุด CSB-Mx series มีรูพรุนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ และรูพรุนมีขนาดเล็กลงเมื่อสารเชื่อมขาว MBA มาขึ้น ในไฮโดรเจลชุด CSB-Ex series จะพบว่าขนาดรูพรุนนั้นจะมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนที่ได้จากตัวอย่างในชุด CSB-Mx series ลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นมีความสม่ำเสมอเช่นกัน และพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขาว EDMA มาขึ้นจะสังเกตว่าได้ลักษณะของรูพรุนนั้นเรียงชิดแน่นกันและมีขนาดรูพรุนมากเล็กลง และในตัวอย่างของ CSB-Gx series นั้นพบว่าขนาดของรูพรุนนั้นมีขนาดใหญ่มากกว่าสองตัวอย่างแรก และลักษณะพื้นที่ผิวของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ด้วยการใช้สารเชื่อมขาว GA และลงลักษณะข้อนหับเป็นขั้นลักษณะรูพรุนที่มีขนาดใหญ่นั้นจะช่วยทำให้โมเลกุลของน้ำนั้นแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างได้่ายช่วยทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำนั้นเพิ่มขึ้น<sup>43</sup> เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขาวที่มากขึ้นจะพบว่าขนาดรูพรุนนั้นมีขนาดเล็กลง จากตัวอย่างที่ใช้สารเชื่อมขาว GA มีค่าการบวมตัวที่มากที่สุดซึ่งสัมพันธ์กับลักษณะรูพรุนและขนาดรูพรุนที่ได้จากเทคนิค SEM

ตารางที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

| ตัวอย่าง | กำลังขยาย 150 | กำลังขยาย 450 |
|----------|---------------|---------------|
| CSB-M1   |               |               |
| CSB-M2   |               |               |

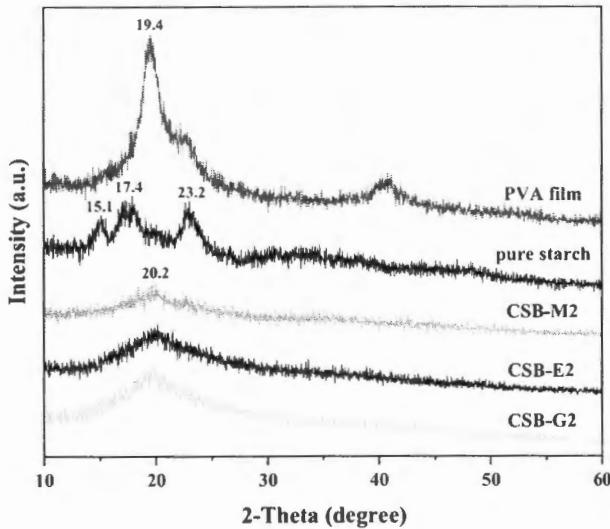




#### 4.4 วิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างของไฮโดรเจล ด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (microstructure) ของตัวอย่างไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งได้ XRD patterns ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขาวงต่างชนิดกันเทียบกับพอลิเมอร์ตั้งตนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์เรซิชั่น จาก XRD patterns ของแป้งมันสำปะหลัง (Cst) พบ 3 พีคสำคัญที่  $2\theta = 15.1^\circ$ ,  $17.4^\circ$  และ  $23.2^\circ$ <sup>44</sup> ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างจุลภาคของแป้งมันสำปะหลังเป็นแบบ semi-crystalline structure และในตัวอย่างของ polyvinyl alcohol (PVA) แสดงพีคที่สำคัญที่  $2\theta = 19.4^\circ$ <sup>45</sup> ซึ่งแสดงว่า PVA นั้นมีโครงสร้างเป็นแบบ semi-crystalline structure เช่นกัน ในขณะที่ XRD patterns ของตัวอย่างไฮโดรเจลที่มีการใช้สารเชื่อมขาวงที่ต่างชนิดกัน ได้แก่ CSB-M2 CSB-E2 และ CSB-G2 พบว่าแสดงลักษณะพีคที่คล้ายคลึงกันโดยปรากฏพีคที่  $2\theta$  ประมาณ  $20.0^\circ$  และมีลักษณะพีคเป็นแบบอ้วนกว้าง (broad peak) ไม่มีพีคแหลม (no sharp peak) ซึ่งลักษณะของ XRD patterns ดังกล่าวสามารถบ่งบอกได้ว่าความเป็น amorphous structure ของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้โดยใช้สารเชื่อมขาวงต่างชนิดกัน นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขาวงเป็น GA มีโครงสร้างเป็น amorphous structure หากที่สุดในกลุ่มตัวอย่างทั้งสามแบบ (CSB-G2) โดยไฮโดรเจลที่ตีเหมาสำหรับการดูดซับน้ำได้ปริมาณเยอะนั่นจะต้องมีโครงสร้างจุลภาคที่มีความไม่เป็นระเบียบสูงหรือมี

ความเป็น amorphous สูง ทั้งนี้เพื่อให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำที่สูงนั้นเอง ซึ่งเราสามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติเป็น amorphous ที่สูงได้

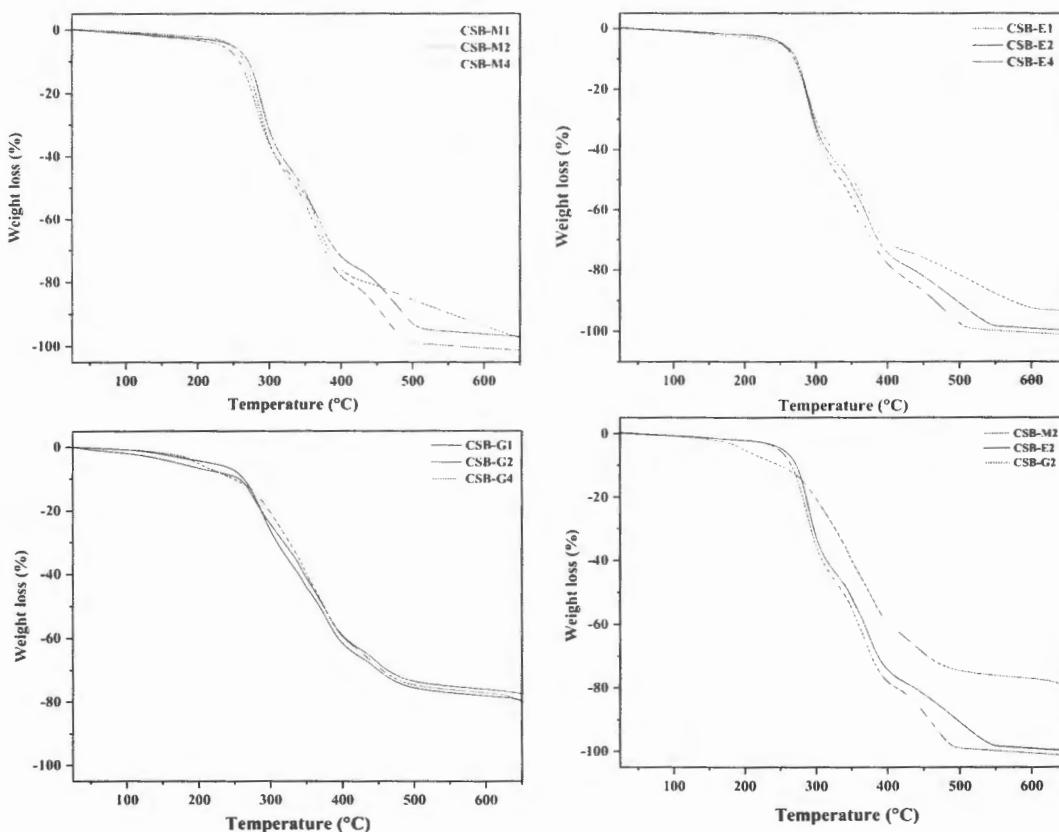


รูปที่ 4.3 XRD patterns ของ PVA, CSt และไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขวางต่างชนิดกัน

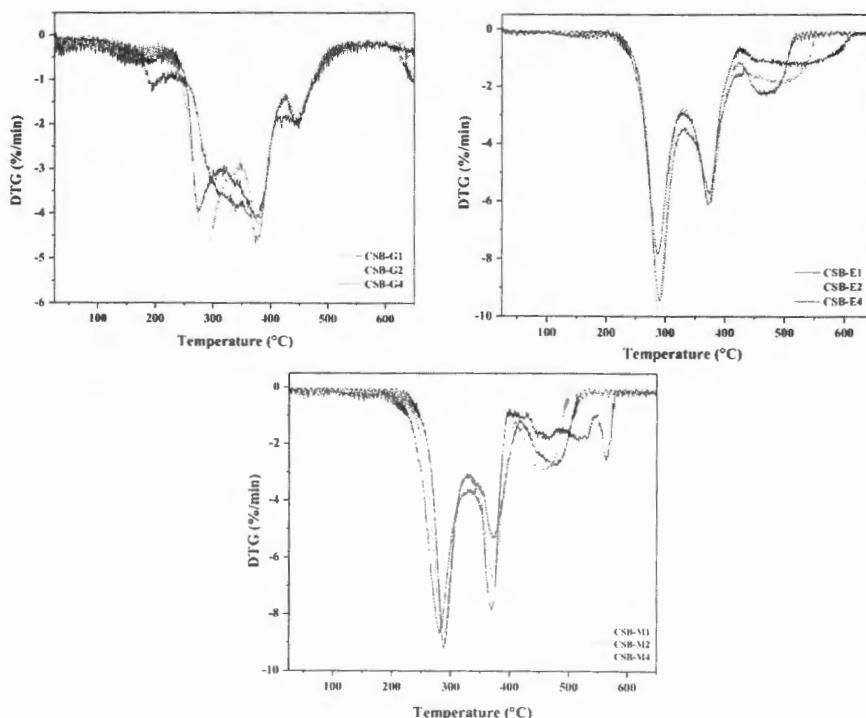
#### 4.5 เสถียรภาพทางความร้อนด้วย

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนของพอลิเมอร์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าตัวอย่างไฮโดรเจลทั้งกรณีที่แปรสารเชื่อมขวาง และแปรผันปริมาณสารเชื่อมขวางทั้ง 3 ชนิด มีพฤติกรรมทางความร้อนที่คล้ายคลึงกัน โดยพบลักษณะของ TGA เทอร์โมแกรมมีการสลายตัวที่ 100, 250-400 และ 400-600 °C ซึ่งในช่วงแรกจะเป็นสูญเสียน้ำหนักเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการระเหยไปของความชื้นในตัวอย่าง และในช่วงที่สอง จะเป็นการสลายตัวของไฮโดรเจล (decomposition) ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 250-400 °C ซึ่งเป็นพฤติกรรมการสลายตัวของสายไฮด์รอกตัวอยู่ในโครงสร้างของไฮโดรเจล ได้แก่สายโซ่ของ PVA, NR และ สลายตัวของโครงสร้างพอลิแซ็คไครด์และการสลายตัวช่วงสามเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 °C โดยเป็นการสลายตัวของโครงสร้างเอสเทอร์ของพอลิօ哭ซิลิคแอซิด

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าในช่วงของการสลายตัวช่วงที่สองของไฮโดรเจลจะมีความเสถียรต่ำหลังจากการแปรปริมาณสารเชื่อมขวางพบว่า เมื่อปริมาณสารเชื่อมขวางมากขึ้นตัวอย่างไฮโดรเจลจะมีความเสถียรทางความร้อนเพิ่มมากขึ้น<sup>46,47</sup> และเมื่อเปรียบเทียบสารเชื่อมขวางปริมาณที่ 2 %w/w ที่ต่างชนิดกันพบว่าตัวอย่างที่มีการใช้สารเชื่อมขวาง GA คือ CSB-G2 นั้นจะมีเสถียรภาพทางความร้อนที่มากกว่าตัวอย่างอื่น อาจจะเนื่องมาจากการเชื่อมขวาง GA สามารถเกิดการเชื่อมขวางกับสายโซ่ของ PVA ได้มากขึ้นและทำเป็นโครงร่างรากตากายของ PVA แข็งแรงมากขึ้นจึงส่งผลให้โครงร่างของไฮโดรเจลโดยรวมแข็งแรงขึ้น เสถียรภาพทางความร้อนของไฮโดรเจลจึงดีขึ้น<sup>48,49</sup>



รูปที่ 4.4 TGA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขวางที่ต่างชนิดกัน



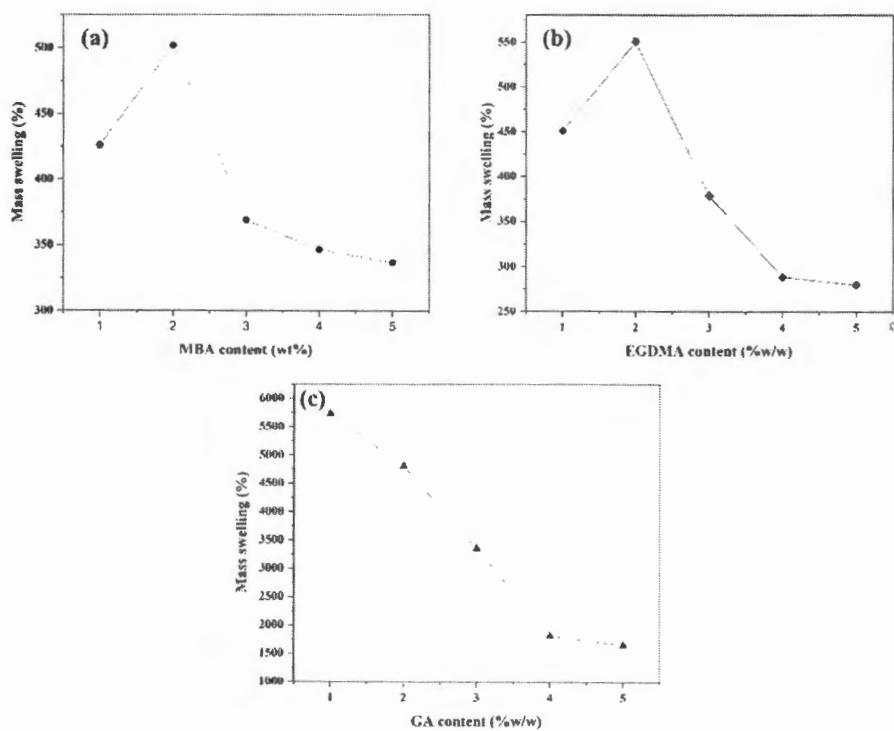
รูปที่ 4.5 DTG เทอร์โมแกรมของตัวอย่างไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขวางที่ต่างชนิดกัน

## 4.6 การบวมตัวของไฮโดรเจลในน้ำ

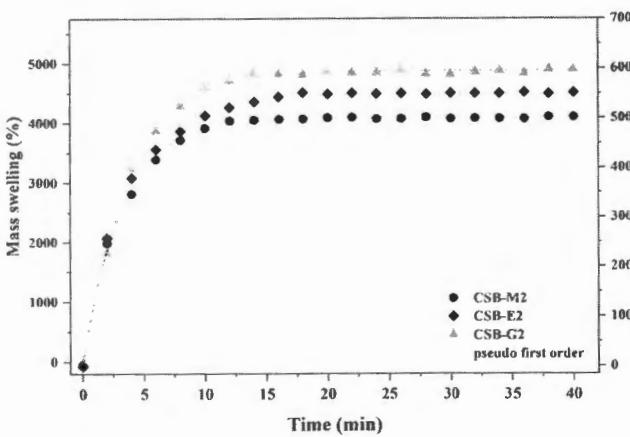
### 4.6.1 การบวมตัวของแผ่นไฮโดรเจลฟิล์ม (% Mass swelling)

รูปที่ 4.6 แสดงผลของปริมาณและชนิดของสารเชื่อมขวางต่อการบวมตัวในน้ำ โดยแบ่งปริมาณของสารเชื่อมขวางที่ 1-5 wt% และประเภทสารเชื่อมขวางที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล 3 ชนิด ได้แก่ MBA EGDMA และ GA จากศึกษาการใช้สารเชื่อมขวางทั้ง 3 ชนิด พบว่าผลการศึกษานั้น มีลักษณะที่คล้ายกัน คือ เมื่อใช้สารเชื่อมขวางปริมาณน้อย เช่นที่ 1 wt% ของ MBA และ EGDA การบวมตัวจะน้อย เนื่องจากยังเกิดการเชื่อมขวางได้ไม่มากนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเชื่อมขวางเป็น 2wt% พบว่าให้การบวมตัวสูงสุด เนื่องจากเกิดโครงสร้างตาข่ายที่เหมาะสมต่อการขยายตัว แต่เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางมากกว่า 2% ส่งผลให้คุณสมบัติในการบวมตัวของไฮโดรเจลนั้นลดลง เนื่องมาจากปริมาณของสารเชื่อมขวางที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงที่หนาแน่นมากขึ้นในโครงสร้างตาข่ายของไฮโดรเจล ทำให้ขนาดรูพรุนนั้นเล็กลงซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM การเชื่อมโยงที่หนาแน่นมากเกินไป จะทำให้โครงสร้างตาข่ายสามมิตินั้นเล็กลง ส่งผลต่อการดูดซับน้ำนั้นลดลง<sup>20</sup>

และเมื่อทำการเปรียบเทียบตัวอย่างไฮโดรเจลที่ใช้ปริมาณสารเชื่อมขวางที่ 2 wt% เท่ากันแต่ต่างชนิดกัน พบว่าตัวอย่างที่มีการใช้สารเชื่อมขวาง GA คือ CSB-G2 มีค่าการบวมตัวที่สูง 5500 %w/w เนื่องมาจากการเชื่อมขวางด้วย GA ลักษณะรูพรุนที่มีขนาดใหญ่นั้นจะช่วยทำให้โมเลกุลของน้ำนั้นแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างได้จ่ายช่วยทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำนั้นเพิ่มขึ้น<sup>43</sup> เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางที่มากขึ้นจะพบร่วยว่าขนาดรูพรุนนั้นมีขนาดเล็กลง เนื่องจากการเชื่อมขวางที่มากขึ้นทำให้ไม่สามารถแทรกตัวเข้าในรูพรุนได้ จึงทำให้ค่าการบวมตัวนั้นลดลง



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %mass swelling กับปริมาณของสารเชื่อมขวาง (a) CSB-Mx series (b) CSB-Ex series และ (c) CSB-Gx series



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %mass swelling กับ เวลา (นาที) ของไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขวางต่างกันที่ปริมาณ 2wt% และเส้นกราฟที่หมายความการจอกนพศาสตร์

รูปที่ 4.7 แสดงการศึกษาจอกนพศาสตร์ในการดูดซึบน้ำ ซึ่งจะนำตัวอย่างที่ใช้สารเชื่อมขวางที่ 2 wt% มาเป็นตัวแทนของไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขวางต่างกัน จากการทดสอบพบว่า ไฮโดรเจลทั้ง 3 ตัวอย่างมีพฤติกรรมการดูดซึบเป็นไปตามสมการ pseudo-1<sup>st</sup> Order โดยมีค่า  $R^2$  มากกว่าสมการ pseudo-2<sup>nd</sup> Order และ ค่า  $R^2$  ของ pseudo-1<sup>st</sup> Order มีค่าเข้าใกล้ 1 ค่อนข้างมาก ( $R^2 > 0.988$ ) และ แสดงดังตารางที่ 4.2

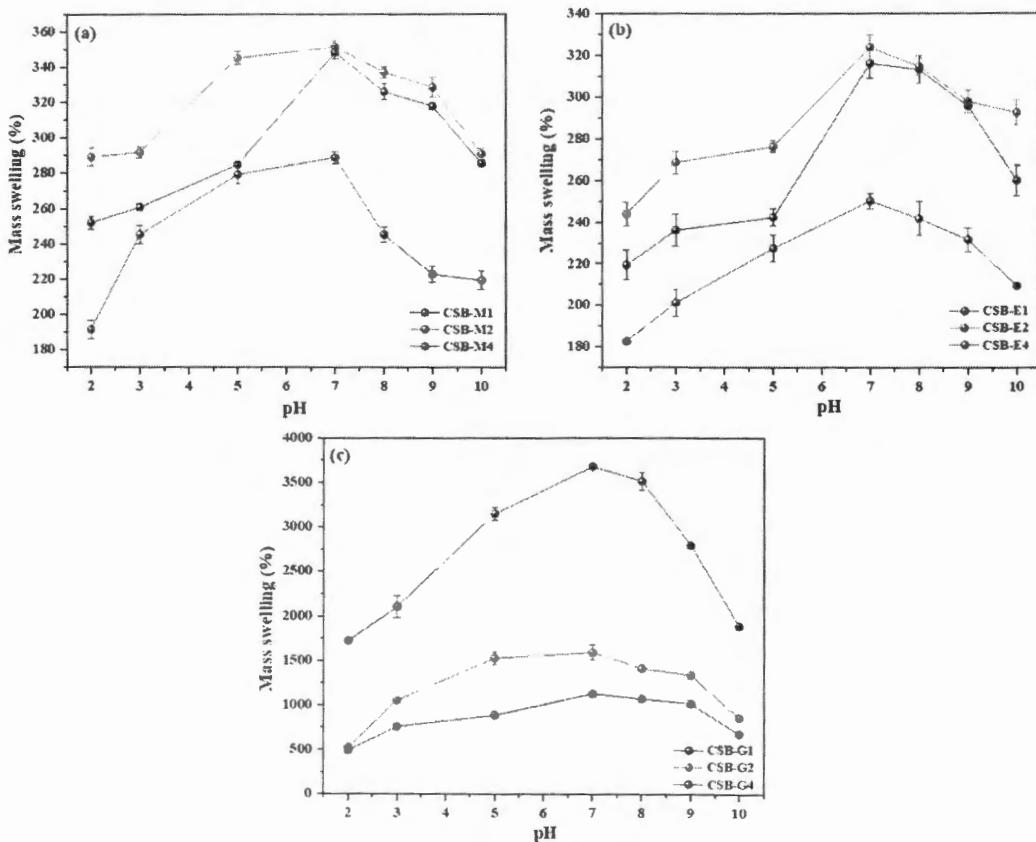
ตารางที่ 4.2 สรุปค่าการดูดซึบที่สมดุลและค่าคงที่อัตรา ( $k$ ) ของ pseudo-1<sup>st</sup> Order และ pseudo-2<sup>nd</sup> Order models ของตัวอย่างไฮโดรเจล CSB-M2, CSB-E2 และ CSB-G2

|        | Model                        | การดูดซึบที่สมดุล (%) | ค่าคงที่                    | $R^2$  |
|--------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------|
| CSB-M2 | pseudo-1 <sup>st</sup> Order | 500.35                | $k_1 = 0.3214$              | 0.9987 |
|        | pseudo-2 <sup>nd</sup> Order | 541.54                | $k_2 = 0.001$               | 0.9882 |
| CSB-E2 | pseudo-1 <sup>st</sup> Order | 547.68                | $k_1 = 8.32 \times 10^{-4}$ | 0.9987 |
|        | pseudo-2 <sup>nd</sup> Order | 543.52                | $k_2 = 0.2983$              | 0.9927 |
| CSB-G2 | pseudo-1 <sup>st</sup> Order | 4877.80               | $k_1 = 0.2149$              | 0.9882 |
|        | pseudo-2 <sup>nd</sup> Order | 5564.70               | $k_2 = 5.25 \times 10^{-5}$ | 0.9531 |

#### 4.6.2 การดูดซึบน้ำที่ pH ต่างๆ

ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการดูดซึบน้ำภายใต้สภาพ pH ต่างๆโดยเลือกใช้ตัวอย่างไฮโดรเจล CSB-Mx CSB-Ex และ CSB-Gx เป็นตัวแทนทดสอบ เริ่มโดยแซ่ตัวอย่างแผ่นไฮโดรเจลพิล์มในสารละลายน้ำฟเฟอร์ pH 3.0, 5.0, 7.0 และ 9.0 ที่อุณหภูมิห้องจนเข้าสู่สมดุล แล้วนำเอาแผ่นไฮโดรเจล ออกมาซับด้วยกระดาษกรองเพื่อกำจัดน้ำที่ผิวน้ำของแผ่นไฮโดรเจล แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้ว

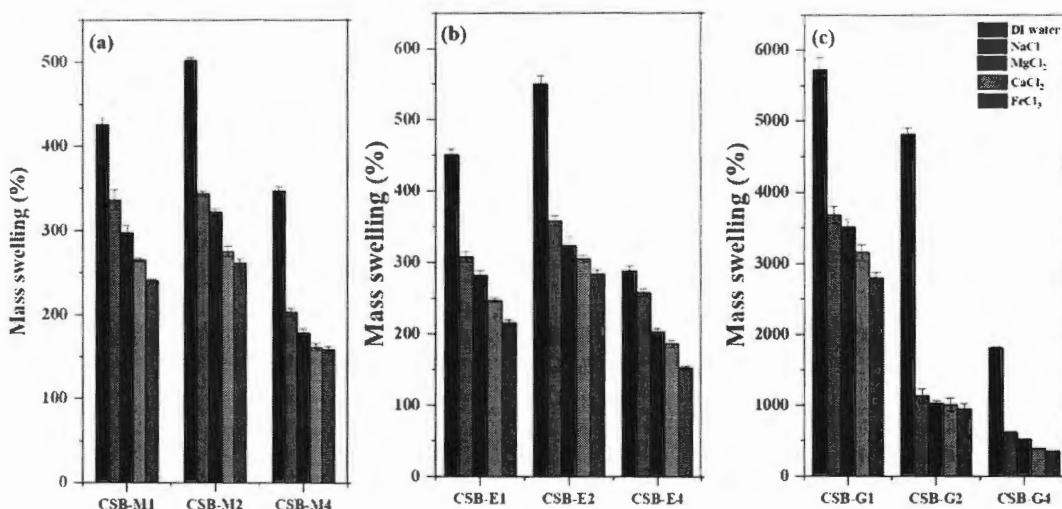
คำนวณ %Mass swelling ซึ่งได้ผลแสดงดังในรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า pH ของสารละลายบัฟเฟอร์มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของดูดซับน้ำของไฮโดรเจล โดย %mass swelling ของตัวอย่างไฮโดรเจล จะมีค่าน้อย เมื่อยู่ในสารละลายที่มี pH ต่ำ และมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า pH ของสารละลายเพิ่มขึ้น เนื่องจากการ neutralization ไอออน  $H^+$  จะมีปริมาณลดลงเนื่องจากเกิด deprotonation ของหมู่ carboxylic ใน acrylic acid สายโซ่จะมีความเป็นไอออนลดลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงประจุนี้จะไปลดการผลักกันของประจุที่เหมือนกัน ดังนั้นจึงป้องกันการยึดตัวของสายโซ่และเป็นผลทำให้การดูดซับน้ำได้ลดลง<sup>50</sup> โดยพบว่าการดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นที่ pH 7 อาจเนื่องมาจากการสมดุลของไฮอนทำให้สายโซ่ถูกผลักให้อยู่ห่างกัน ในทางตรงกันข้าม เมื่อ pH ของสารละลายบัฟเฟอร์ลดลง หมู่ carboxylic ของ acrylic acid จะไปเพิ่มปริมาณโปรตอน เนื่องจากผลของการเกิดโปรตอน (protonation) และแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force) ของประจุเพิ่มขึ้นจึงไปผลักกันออกทำให้สายโซ่เกิดการยึดกันมากขึ้นและส่งผลให้สามารถบดบวนตัวได้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น สารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 7 จึงเกิดการดูดซับน้ำได้สูงที่สุด และรองลงมา ได้แก่ที่ pH 5 และ pH 8 ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %mass swelling กับ pH ของไฮโดรเจลชนิด (a) CSB-Mx (b) CSB-Ex และ (c) CSB-Gx

#### 4.6.3 การดูดซับน้ำในสารละลายนะทริอุต่างชนิดกัน

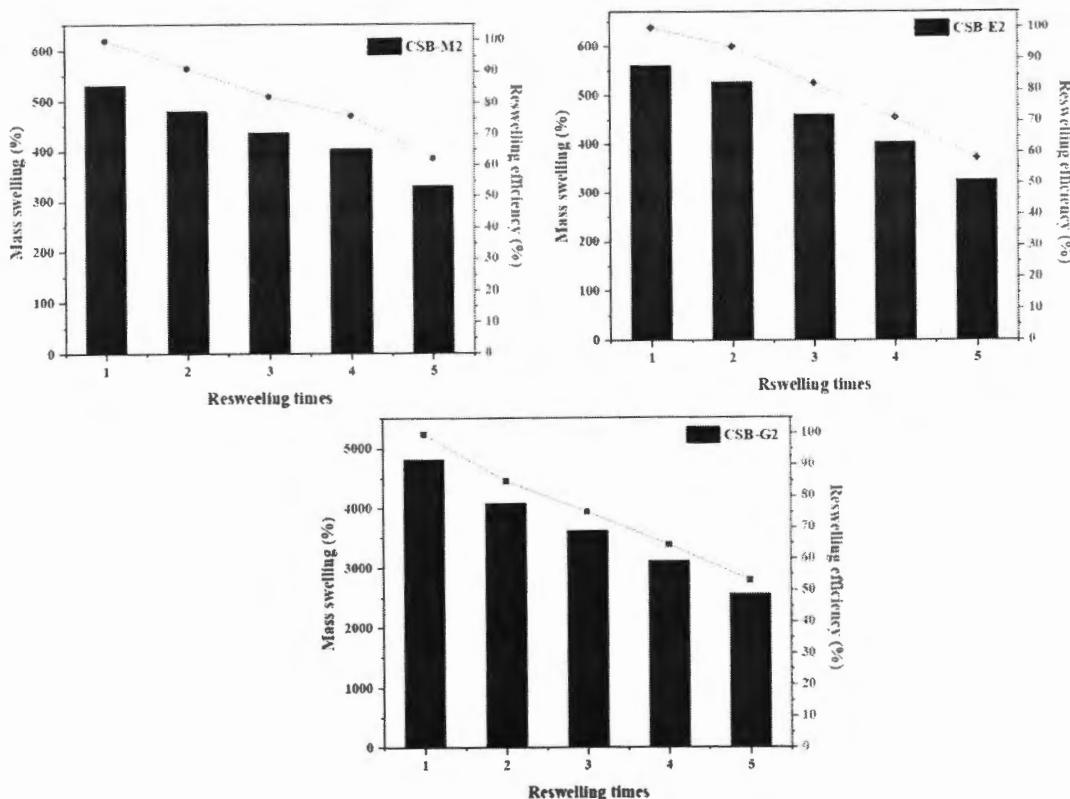
ได้ศึกษาผลการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลในสารละลายนะทริอุต่างๆ โดยเลือกโดยใช้ตัวอย่างไฮโดรเจล CSB-Mx CSB-Ex และ CSB-Gx เป็นตัวทดสอบ โดยแซ่ตัวอย่างแผ่นไฮโดรเจลพิล์มในสารละลายนะทริอุต 0.9 wt% ของ  $\text{NaCl}$   $\text{MgCl}_2$   $\text{CaCl}_2$  และ  $\text{FeCl}_3$  ที่อุณหภูมิห้อง จนเข้าสู่สมดุลแล้วนำเอามาแผ่นไฮโดรเจล ออกมาซับด้วยกระดาษกรองเพื่อกำจัดน้ำที่ผิวน้ำของแผ่นไฮโดรเจล แล้วนำไปซั่งน้ำหนักและคำนวณ %Mass swelling ซึ่งได้ผลตั้งรูปที่ 4.9 จากรูปพบว่าค่าการดูดซับน้ำจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารละลายนะทริอุต ที่ขึ้นกับรัศมีและประจุของไอออนที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อประจุของไอออนของสารละลายนะทริอุตเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการบวมตัวนั้นลดลงตามลำดับต่อไปนี้  $\text{NaCl} > \text{MgCl}_2 > \text{CaCl}_2 > \text{FeCl}_3$  โดยไอออนในสารละลายนะทริอุตจะเข้าไปเกิด coordination กับหมุ่ฟังก์ชันภายในสายโซ่โมเลกุล เช่น หมุ่ carboxylic และ hydroxyl<sup>51-50</sup>.



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของ %mass swelling ในสารละลายนะทริอุต่างๆ ของไฮโดรเจลชนิด  
a) CSB-Mx (b) CSB-Ex และ (c) CSB-Gx

#### 4.6.4 การนำกลับมาใช้ซ้ำ

รูปที่ 4.10 แสดงการศึกษาการนำไฮโดรเจลมากลับมาใช้ในการดูดซับน้ำซ้ำหลายครั้ง เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ว่ามีความคงทนต่อการใช้ซ้ำได้มากน้อยอย่างไร โดยเลือกใช้ตัวอย่างไฮโดรเจล CSB-M2 CSB-E2 และ CSB-G2 ซึ่งเป็นตัวแทนในการศึกษาของสารเชื่อมขวางที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลที่ 3 ตัวอย่างนั้นลดลงแต่มีแนวโน้มในการดูดซับน้ำได้ลดลงเมื่อนำกลับมาใช้ซ้ำมากขึ้น โดยพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำของตัวอย่าง CSB-M2 CSB-E2 และ CSB-G2 ในรอบที่ 5 อยู่ที่ 62.21% 58.13% และ 53.12% ของค่าเริ่มต้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์นั้นมีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้<sup>20</sup> ในขณะเดียวกัน ก็ยังแสดงให้เห็นได้ว่าไฮโดรเจลนั้นมีความสามารถสำหรับการนำกลับมาใช้ซ้ำได้หลายรอบและช่วยยืดระยะเวลาการใช้งานอีกด้วย<sup>52</sup>



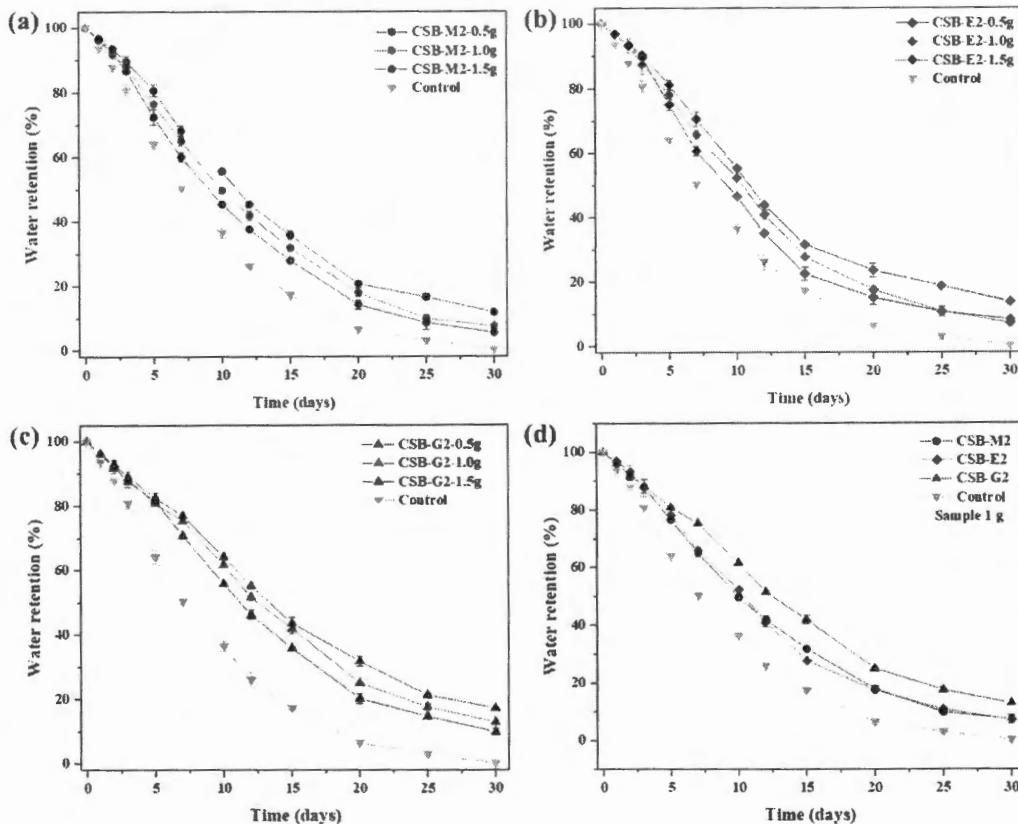
รูปที่ 4.10 การศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำของไฮโดรเจลทั้งสามชนิด

#### 4.7 สมบัติในการกักเก็บน้ำในดิน

โดยทั่วไปพฤติกรรมการกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างนั้นจะมีความสัมพันธ์กับค่ากระบวนการตัวของไฮโดรเจล รูปที่ 4.11a-c แสดงพฤติกรรมการกักเก็บน้ำในดินของไฮโดรเจลชนิดต่าง ๆ จากการศึกษาพบว่าพฤติกรรมการกักเก็บน้ำในดินของไฮโดรเจล CSB-X ทั้งสามแบบนี้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับดินที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจล (control) คือมีกราฟการสูญเสียน้ำหนักคล้ายๆ กัน แต่จะสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าดินที่ไม่ได้เติมไฮโดรเจล โดยเมื่อเพิ่มปริมาณไฮโดรเจลจาก 0.5 กรัม ไปเป็น 1.0 และ 1.5 กรัม พบว่าการสูญเสียน้ำหนักลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ เมื่อปริมาณของไฮโดรเจลมากขึ้นจะส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมากขึ้นนั่นเอง และในรูปที่ 4.11d แสดงประสิทธิภาพการกักเก็บน้ำเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรเจลต่างชนิดกัน โดยกำหนดให้มีปริมาณคงที่เท่ากับ 1.0 กรัม พบว่าตัวอย่างดินที่เติมไฮโดรเจลชนิด CSB-G2 แสดงเปอร์เซ็นต์ในการกักเก็บน้ำในดินดีสูงกว่า CSB-E2 และ CSB-M2 ในทุกช่วงเวลาของการวัด

ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำในดินของทั้งไฮโดรเจลทั้ง 3 ตัวอย่าง มีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างดินที่ไม่มีการเติมไฮโดรเจลลงไว้ โดยแสดงค่าการกักเก็บน้ำลดลงอย่างมากกว่า 50% ภายในระยะเวลา 7 วัน จากการทดสอบการกักเก็บน้ำทั้งหมดเป็นเวลา 30 วัน และเปอร์เซ็นต์ในการกักเก็บน้ำในวันที่ 7 และ 20 ของไฮโดรเจล CSB-G2 อยู่ที่ 75.2% และ 24.0% ในไฮโดรเจล CSB-E2 อยู่ที่ 65.7% และ 17.5% ตัวอย่าง CSB-M2 อยู่ที่ 65.0% และ 17.2% จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่า

การเติมไฮโดรเจลไปในดินจะช่วยในการกักเก็บน้ำในดินให้พืชนั้นได้ใช้ประโยชน์จากน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังช่วยในเรื่องการปรับปรุงหน้าดินให้มีความชุ่มชื้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พืชลำเลียงสารอาหารได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีความเพียงพอและยั่งยืน จากการศึกษาข้างต้นแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์นั้นมีประสิทธิภาพที่จะสามารถนำประยุกต์ใช้งานในด้านการเกษตรได้



รูปที่ 4.11 การกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลทั้งสามชนิดในช่วงเวลา 30 วัน

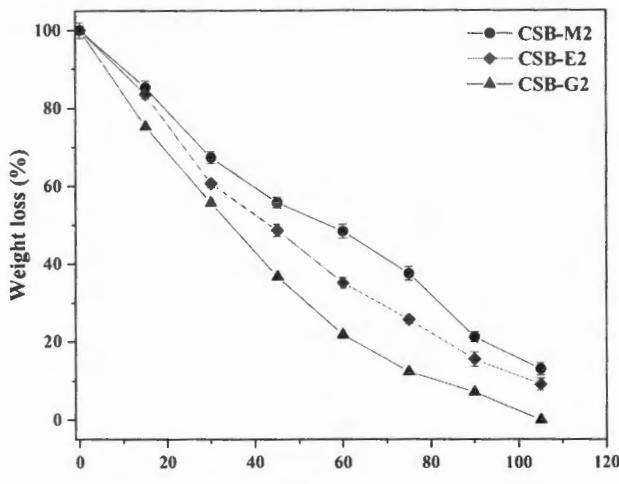
#### 4.8 การย่อยสลายทางชีวภาพ

ในภาคการเกษตรไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากโพลิเมอร์สังเคราะห์นั้นไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากไม่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติและอาจนำไปสู่การก่อให้เกิดมลพิษแก่บดินได้<sup>39</sup> จากปัญหาที่เกิดขึ้น จึงนำมาสู่งานวิจัยของกลุ่มวิจัยของเรา โดยได้พัฒนาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ CSt-g-PAA/(NR/PVA) โดยมีการเพิ่มโพลิเมอร์ธรรมชาติ คือ แป้งมันสำปะหลังและยางธรรมชาติ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพและความยืดหยุ่น ตามลำดับ ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของไฮโดรเจลนั้น อาจจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ pH ความชื้น หรือ สารอาหารที่อยู่ในดินและอาจร่วมถึงคุณสมบัติของไฮโดรเจล<sup>44</sup>

จากการศึกษาอัตราการย่อยสลายของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในดินนั้น ได้ทำการทดสอบเป็นเวลา 120 วัน และได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 จากรูปจะพบว่าไฮโดรเจลทั้งสามชนิดเกิดการย่อยสลายในดินได้เป็นอย่างดีและแสดงพฤติกรรมการย่อยสลายที่คล้ายคลึงกัน โดยในช่วงแรก (0-45

วัน) อัตราการย่อยสลายของไฮโดรเจลจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและอัตราการย่อยสลายจะลดลงเล็กน้อย ในช่วงที่สอง (45-120 วัน) ตัวอย่างที่มีอัตราการย่อยสลายได้ดีที่สุดในช่วงแรกที่ 45 วัน คือ CSB-G2 อัตราการย่อยสลายนั้นมากกว่าตัวอย่าง CSB-M2 และ CSB-E2 โดยอัตราการย่อยสลายของหั้ง 3 ตัวอย่าง นั้นจะสอดคล้องกับค่าการบวมตัวไฮโดรเจลในแต่ละตัวอย่าง ซึ่งในตัวอย่าง CSB-G2 แสดง การบวมตัวที่สูงที่สุด ดังนั้นจะมีความชื้นมากที่สุดในตัวอย่างจึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ในดินได้ดี

โดยกลไกของการย่อยสลายไฮโดรเจลในการศึกษานี้ คาดว่าในระยะแรกจะเป็นการย่อยสลายของสารประกอบอินทรีย์ภายในโครงสร้างร่างกายตัวอย่างไฮโดรเจล เช่น แป้งมันสำปะหลัง พอลิอะคริลิกแอกซิดและพอลิไวนิลแอลกอฮอร์ และในช่วง 60 วันสุดท้าย จะเป็นการย่อยสลายของยางธรรมชาติในโครงสร้างซึ่งแสดงอัตราการย่อยสลายที่ช้าลงเนื่องจากยางธรรมชาตินั้น มีน้ำหนักไม่คงที่สูงทำให้ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนาน<sup>53</sup> การย่อยสลายที่เกิดขึ้นในตัวอย่างนั้น จะเริ่มขึ้นเมื่อตัวอย่างนั้นได้รับความชื้น ทำให้จุลินทรีย์ในดินนั้นเกิดการเจริญเติบโตได้ดี แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดีที่สุดคือ CSB-G2 เกิดย่อยสลายในดินได้ดีที่สุด<sup>54</sup>



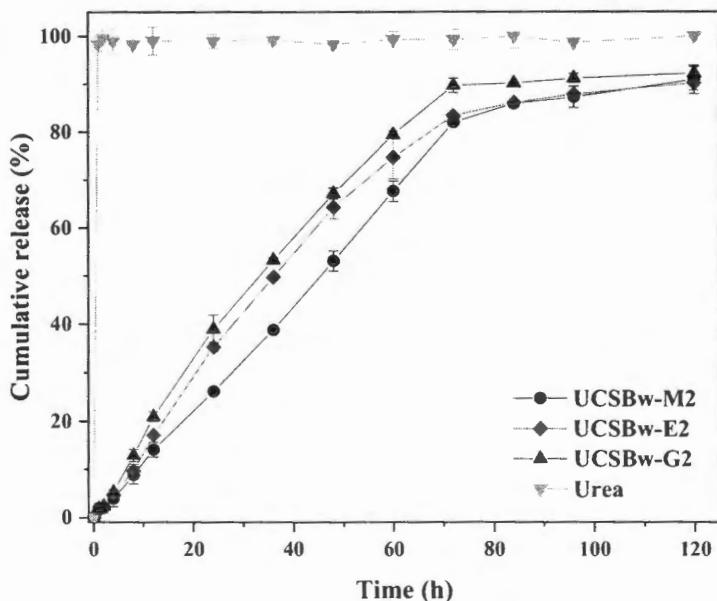
รูปที่ 4.12 การย่อยสลายทางชีวภาพของไฮโดรเจลที่ย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ

#### 4.8 การปลดปล่อยปุ๋ยในน้ำและในดิน

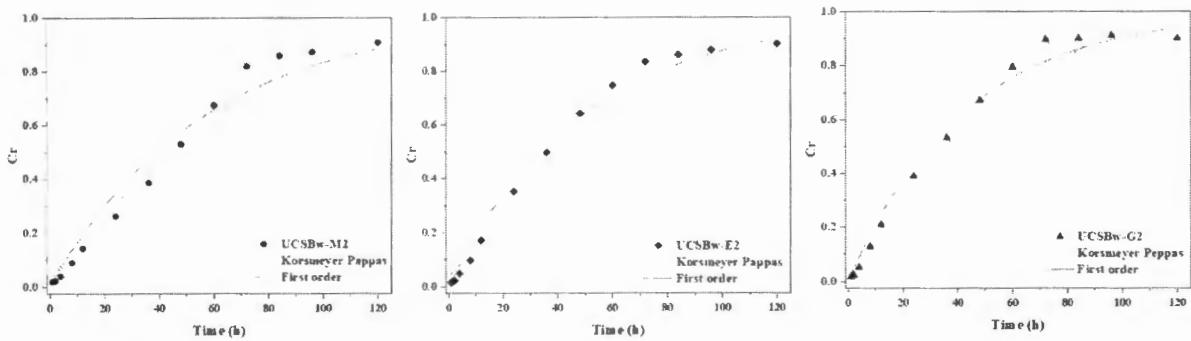
ทำการศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยในน้ำและในดินโดยเลือกใช้ตัวอย่างที่มีคุณสมบัติการในดูดซับน้ำที่ดีที่สุดในแต่ละสารเชื่อมระหว่าง MBA, EGMA และ GA มาทำการเคลือบเม็ดปุ๋ยโดยเริ่ม ซึ่งจะได้ตัวอย่างปุ๋ยเคลือบตัวอย่างเป็น UCSBw-M2 UCSBw-E2 และ UCSBw-G2 ตามลำดับ จากนั้นนำเม็ดปุ๋ยเคลือบนั้นไปศึกษาการปลดปล่อยในน้ำและในดิน โดยการปลดปล่อยปุ๋ยในน้ำทำการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 120 ชั่วโมง และศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยในดินเป็นเวลา 30 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าเม็ดปุ๋ยโดยเริ่มที่ไม่ได้เคลือบด้วยวัสดุไฮโดรเจล แสดงการปลดปล่อยปุ๋ยโดยเริ่มออกมากสูงทันทีถึง 98% ภายในระยะเวลา 1 ชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างปุ๋ยโดยเริ่มที่เคลือบด้วยไฮโดรเจลทั้ง 3 ตัวอย่าง UCSBw-M2 UCSBw-E2 และ UCSBw-G2 พบว่าอัตราการปลดปล่อยปุ๋ยโดยเริ่มในน้ำนั้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่เวลา 8 ชั่วโมง หั้ง 3 ตัวอย่างมีอัตราการปลดปล่อยเพียง 8.8%, 9.5% และ 12.9% ตามลำดับ และอัตราการปลดปล่อยมี

แนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นตรงเมื่อเวลามากขึ้น โดยเมื่อเวลา 36 ชั่วโมง อัตราการปลดปล่อยเท่ากับ 38.7% 49.7% และ 53.2% ตามลำดับ และหลังจาก 72 ชั่วโมง อัตราเร็วของการปลดปล่อยปุ๋ยจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งม้อตราชการปลดปล่อยยูเรีย เท่ากับ 81.9% 83.3% และ 89.6% ตามลำดับ และที่เวลา 120 ชั่วโมงพบว่าอัตราการปลดปล่อยปุ๋ยเท่ากับ 86.9% 87.3% และ 91.6% ตามลำดับ

จากการศึกษาพบว่าสมบัตในการดูดซับน้ำและโครงสร้างของไฮโดรเจลที่นำมาเคลือบเม็ดปุ๋ยยูเรียนนี้ผลต่อการปลดปล่อย โดยในช่วงแรกของการปลดปล่อย ไฮโดรเจลที่เคลือบบนเม็ดปุ๋ยยูเรีย จะดูดซับน้ำเกิดการบวมตัวและละลายยูเรียออกมานำรูปrunของไฮโดรเจล ดังนั้นการบวมตัวของไฮโดรเจลที่สูงจะสอดคล้องกับอัตราการปลดปล่อยที่เร็วในช่วงแรก สังเกตได้จากการที่มีความชันสูง และนอกจากนี้การใช้สารเชื่อมขาวงที่ต่างกันในการสังเคราะห์จะทำให้โครงสร้างนั้นต่างกัน โดยจากการศึกษานี้พบว่า ตัวอย่างที่ใช้สารเชื่อมขาวง GA นั้นแสดงอัตราการการปลดปล่อยยูเรียที่เร็วขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อาจเนื่องมาจากตัวอย่าง UCSBw-G2 ม้อตราชการบวมตัวที่สูงที่สุด<sup>55,43</sup> เมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวอย่าง UCSBw-M2 และ UCSBw-E2 ที่ใช้สารเชื่อมขาวง MBA และ EGDMA จากข้อมูลที่ศึกษา พบว่าการใช้สารเชื่อมขาวงที่ต่างชนิดกันมีผลต่อลักษณะรูปrunในโครงสร้างไฮโดรเจลส่งผลทำให้ค่าการบวมตัวนั้นลดลง และจากการศึกษาจนพลาสตอร์ในปลดปล่อยยูเรียในน้ำโดยใช้แบบจำลองหั้งหมด 6 แบบจำลอง พบรากุสารตัวอย่าง UCSBw-M2 UCSBw-E2 และ UCSBw-G2 เป็นไปตามแบบจำลองอันดับ 1 สามารถอธิบายกลไกการปลดปล่อยยูเรียในน้ำนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้น โดยมีค่า ( $R^2 = 0.96, 0.98$  และ  $0.99$ ) แสดงดังรูปที่ 15 และตารางที่ 4.<sup>56</sup>



รูปที่ 4.13 การศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในน้ำของเม็ดปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยที่เคลือบวัสดุไฮโดรเจล



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการปลดปล่อยยารีในน้ำกับเวลา (ชั่วโมง)

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรทางจนผลศาสตร์ 6 แบบจำลองในการปลดปล่อยปัจจัยเรียในน้ำและในดิน

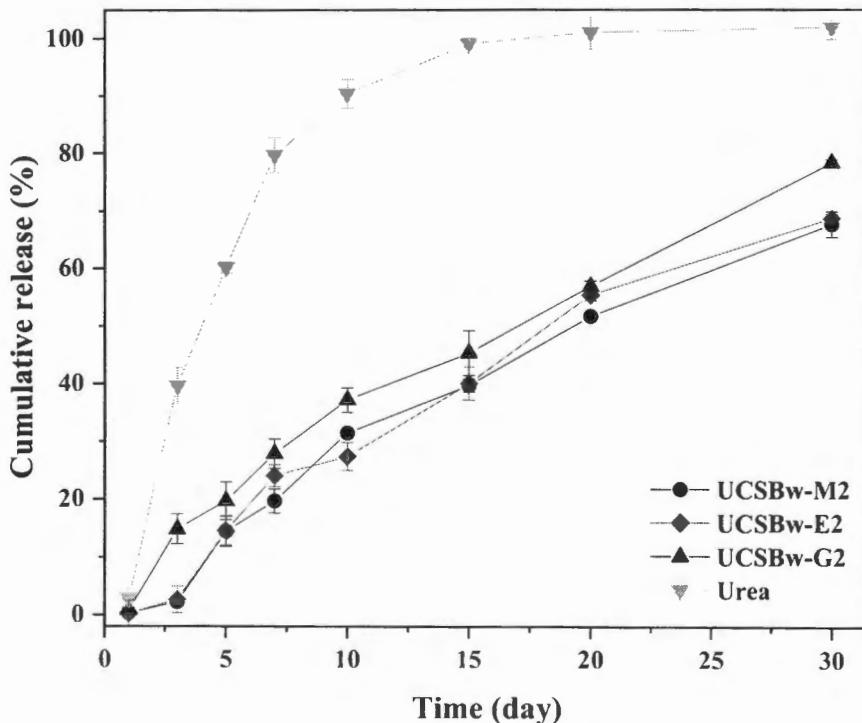
| ตัวอย่างปัจจัย | Model               | parameters | ในน้ำ  | ในดิน  |
|----------------|---------------------|------------|--------|--------|
| UCSBw-M2       | Korsmeyer-Peppas    | $R^2$      | 0.9668 | 0.9717 |
|                |                     | n          | 0.7509 | 0.8722 |
|                |                     | $k_p$      | 0.0284 | 0.0362 |
|                | First order         | $R^2$      | 0.9725 | 0.9773 |
|                |                     | $k_1$      | 0.0179 | 0.0350 |
|                | Zero order          | $R^2$      | 0.9368 | 0.9650 |
|                |                     | $k_0$      | 0.0094 | 0.0245 |
|                | Higuchi kinetic     | $R^2$      | 0.9131 | 0.8402 |
|                |                     | $k_H$      | 0.0824 | 0.1036 |
|                | Parabolic diffusion | $R^2$      | 0.9052 | 0.8136 |
|                |                     | b          | 0.0000 | 0.0000 |
|                |                     | $k_p$      | 0.0824 | 0.1036 |
|                | Simple Elovich      | $R^2$      | 0.7535 | 0.7893 |
|                |                     | $k_H$      | 0.1575 | 0.1562 |
| UCSBw-E2       | Korsmeyer-Peppas    | $R^2$      | 0.9587 | 0.9691 |
|                |                     | n          | 0.6478 | 0.8722 |
|                |                     | $k_p$      | 0.0466 | 0.0371 |
|                | First order         | $R^2$      | 0.9899 | 0.9736 |
|                |                     | $k_1$      | 0.0209 | 0.0362 |
|                | Zero order          | $R^2$      | 0.8793 | 0.9628 |
|                |                     | $k_0$      | 0.0098 | 0.0251 |

|          |                     |       |        |        |
|----------|---------------------|-------|--------|--------|
| UCSBw-G2 | Higuchi kinetic     | $R^2$ | 0.9364 | 0.8384 |
|          |                     | $k_H$ | 0.0871 | 0.1031 |
|          | Parabolic diffusion | $R^2$ | 0.9306 | 0.8115 |
|          |                     | b     | 0.0000 | 0.0000 |
|          |                     | $k_p$ | 0.0871 | 0.1062 |
|          | Simple Elovich      | $R^2$ | 0.8167 | 0.7856 |
|          |                     | $k_H$ | 0.1681 | 0.1606 |
|          | Korsmeyer-Peppas    | $R^2$ | 0.9495 | 0.9887 |
|          |                     | n     | 0.6100 | 0.7509 |
|          |                     | $k_p$ | 0.0575 | 0.0987 |
|          | First order         | $R^2$ | 0.9882 | 0.9867 |
|          |                     | $k_1$ | 0.0235 | 0.4482 |
|          | Zero order          | $R^2$ | 0.8427 | 0.9383 |
|          |                     | $k_0$ | 0.0102 | 0.2854 |
|          | Higuchi kinetic     | $R^2$ | 0.9378 | 0.9098 |
|          |                     | $k_H$ | 0.0914 | 0.1232 |
|          | Parabolic diffusion | $R^2$ | 0.9322 | 0.9481 |
|          |                     | b     | 0.0000 | 0.0000 |
|          |                     | $k_p$ | 0.0914 | 0.1232 |
|          | Simple Elovich      | $R^2$ | 0.8361 | 0.8676 |
|          |                     | $k_H$ | 0.1768 | 0.1837 |

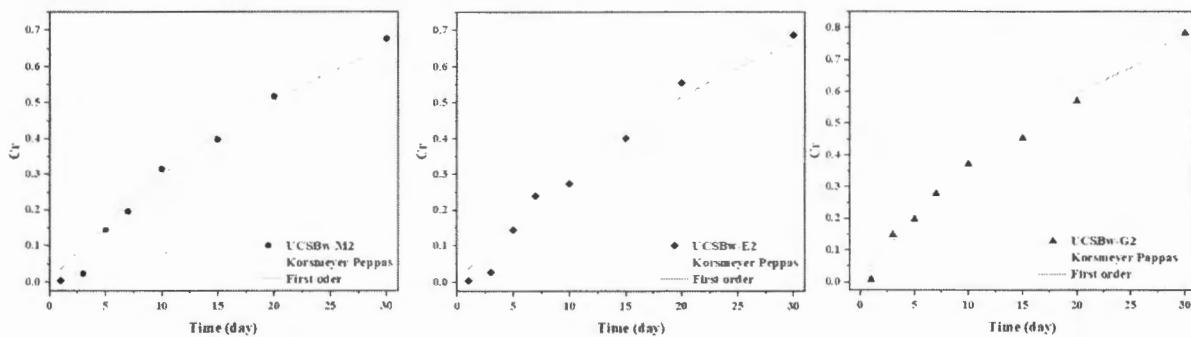
รูปที่ 4.15 แสดงอัตราการปลดปล่อยยูเรียในดินของตัวอย่างปุ๋ยยูเรียที่เคลือบด้วยวัสดุไออกซิเจล UCSB -M2 UCSB-E2 และ UCSB-G2 เทียบกับการปลดปล่อยจากเม็ดปุ๋ยยูเรียที่ไม่ได้เคลือบจากการทดลองพบว่า อัตราการปลดปล่อยในดินนั้นต่ำกว่าการปลดปล่อยในน้ำอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องมาจากในดินจะมีความชื้นหรืออุ่นน้อยกว่าที่อยู่ในน้ำโดยตรง ดังนั้นการปลดปล่อยในดินจะช่วยลดการการแลกเปลี่ยนระหว่างน้ำและปุ๋ย จึงทำให้อัตราการปลดปล่อยในดินนั้นลดลงอย่างมาก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อัตราการปลดปล่อยของเม็ดปุ๋ยยูเรียในดินนั้นสูงถึง 90% ภายในเวลาเพียงแค่ 10 วัน ในทางตรงกันข้าม ในตัวอย่าง UCSB -M2 UCSB-E2 และ UCSB-G2 แสดงอัตราการปลดปล่อยที่ต่ำกว่า โดยพบว่าอัตราการปลดปล่อยวันที่ 3 เท่ากับ 2.2%, 2.6% และ 14.8% ตามลำดับ และอัตราการปลดปล่อยยูเรียเพิ่มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น โดยที่วันที่ 10 อัตราการปลดปล่อยยูเรีย เท่ากับ 31.3%, 27.3% และ 37.1% และที่ 30 วัน เท่ากับ 67.6%, 68.6 และ 78.3% ตามลำดับ จากผลการศึกษาในรูปที่ 4.16 พบว่าตัวอย่าง UCSB-G2 แสดงอัตราการปลดปล่อยที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับตัวอย่าง UCSB -M2 และ UCSB-E2 ผลการปลดปล่อยปุ๋ยนี้พบว่าสอดคล้องกับการ

เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไฮโดรเจลที่มีผลต่อคุณสมบัติการอุ้มน้ำ ซึ่งมีความสำคัญต่อการปรับปรุงคุณสมบัติการปลดปล่อยสารอาหารให้ปลดปล่อยช้า

จากการศึกษาผู้วิจัยขอเสนอถลิกการปลดปล่อยที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของ UCSBw-X ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก น้ำจะถูกซึมเข้าไปในชั้นแรก จากนั้นชั้นซึมผ่านจะเข้าไปยังชั้นที่ 2 ซึ่งเป็นชั้นของไฮโดรเจล จากนั้นไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวขึ้น และซึมผ่านเข้าไปสู่เม็ดปุ๋ย ทำให้เม็ดปุ๋ยยูเรียเกิดการละลายกับน้ำที่เข้าไป และชั้นที่ 3 สารอาหารจะถูกปลดปล่อยลงสู่ดินผ่านรูพรุนของไฮโดรเจลและชั้นแรก<sup>35</sup> ใน การเคลือบตัวอย่างตัวแปรเป็นชั้นที่ 3 นั้น แวร์ที่เคลือบนั้นจะช่วยลดการปลดปล่อยยูเรียให้ช้าลง ช่วยให้มีดปุ่ยที่ผ่านการเคลือบนั้นคงรูปและสามารถนำไปใช้ในการเกษตรได้จริง และ จากการศึกษาจนผลศาสตร์ของปลดปล่อยยูเรียในดิน โดยใช้แบบจำลองทั้งหมด 6 แบบจำลอง พบร่วมกันตัวอย่าง UCSBw-M2 UCSBw-E2 และ UCSBw-G2 เป็นไปตามแบบจำลอง Kormeryers-Peppas โดยมีค่า  $R^2 = 0.97$  0.96 และ 0.98 ค่า  $n$  เท่ากับ 0.87 0.87 และ 0.75 ตามลำดับ โดยค่า  $n$  ค่าที่อธิบายกลไกการแพร่ของยูเรียในดิน จากผลการทดลองพบว่า เป็นไปตามกลไกการแพร่แบบ non-Fickian<sup>55</sup> (ค่า  $n$  อยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 1.0) แสดงตัวอย่างที่ 4.16 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.15 การศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในดิน



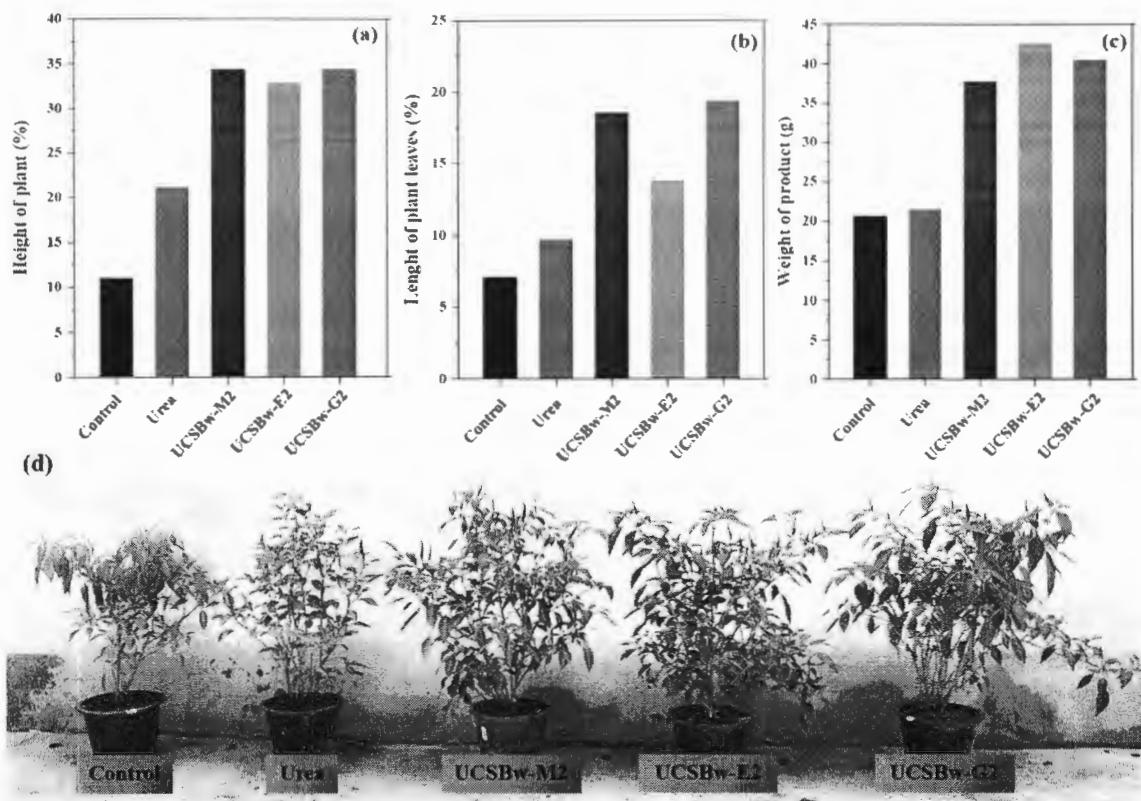
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการปลดปล่อยยูเรียในดินกับเวลา (ชั่วโมง)

#### 4.9 ศึกษาผลของปุ๋ยเคลือบ UCSBw-X ต่อการเจริญเติบโตต้นพืช

การศึกษาผลของ UCSBw-X ต่อการเจริญเติบโตของต้นพakisinidaแสดงดังรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่า เมื่อใช้ตัวอย่าง UCSBw-X กับการปลูกต้นพakisinida นั้นมีอิทธิพลต่อการเจริญของต้นพakisinida มีนัยสำคัญ โดยได้ทำการทดลองปลูกต้นพakisinida เป็นเวลา 45 วัน และใส่ปริมาณปุ๋ยเท่ากันครั้งเดียว จากการทดลอง พบว่าในตัวอย่างที่มีการปรับปรุงด้วยการใช้ปุ๋ย UCSBw-X นั้นจะทำให้ต้นพืชมีการเจริญเติบโตที่สูงกว่าการใช้มีเดคปุ๋ยยูเรียที่ไม่เคลือบ และพakisinida ที่ใช้ปุ๋ยตัวอย่าง UCSBw-X พบว่าต้นพืชนั้นมีใบที่สีเขียวและลำต้นนั้นมีความแข็งแรงมากกว่า ดังจะสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 4.18d

จากการวิจัย พบว่าการใช้ปุ๋ย UCSw-M2 UCSw-E2 และ UCSBw-G2 พบว่ามีอัตราการเจริญเติบโตของต้นพืช (ความสูง) เท่ากับ 34.4%, 32.9% และ 34.4% ตามลำดับ (เมื่อเทียบกับความสูงเริ่มต้น) และขณะที่ต้นพืชที่ไม่มีเดคปุ๋ยยูเรียที่ไม่เคลือบจะมีอัตราการเจริญเติบโตอยู่ที่ 21.1% เท่านั้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาขนาดของใบพakisinida พบว่า พakisinida ที่ใช้ปุ๋ยเคลือบ UCSw-M2 UCSw-E2 และ UCSBw-G2 ความยาวของใบจะเพิ่มขึ้น 18.6%, 13.8% และ 19.4% ตามลำดับ ในขณะต้นพakisinida ที่ใช้เม็ดปุ๋ยยูเรียไม่เคลือบจะมีความยาวของใบเพิ่มขึ้นเพียง 9.7% เท่านั้น และผลผลิตรวม (พakisinida) ที่เก็บเกี่ยวได้จากการใช้ปุ๋ย UCSw-M2 UCSBw-E2 และ UCSBw-G2 เท่ากับ 37.8, 42.56 และ 40.5 กรัม ตามลำดับ เมื่อเทียบกับต้นพakisinida ที่ใช้ปุ๋ยยูเรียไม่เคลือบให้ผลผลิตอยู่ที่ 20.75 กรัม เท่านั้น

จากการศึกษา แสดงให้เห็นว่าปุ๋ยที่ผ่านกระบวนการเคลือบ (UCSw-M2 UCSBw-E2 และ UCSBw-G2) นั้นมีประสิทธิภาพในการควบคุมและปลดปล่อยสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชและยังช่วยในการกักเก็บสารอาหาร ทำให้พืชสามารถได้รับสารอาหารที่เพียงพอตลอดระยะเวลาเจริญเติบโต และพบว่าปุ๋ยยูเรียที่ถูกเคลือบด้วยไฮโดรเจลทั้ง 3 สูตร นั้นมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงการใช้ในโตรเจน ลดการใช้ในโตรเจน กว่าปุ๋ยยูเรียที่ไม่มีการเคลือบ จากการศึกษาจึงสรุปได้ว่าเม็ดปุ๋ยที่ผ่านกระบวนการเคลือบด้วยไฮโดรเจลนั้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปลดปล่อยของปุ๋ยยูเรีย และทำให้ต้นพืชมีความเจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตที่สูงกว่าพakisinida ที่ใช้ปุ๋ยยูเรียในปริมาณที่เท่ากัน ดังนั้นจึงคาดว่า ปุ๋ยเคลือบด้วยวัสดุไฮโดรเจลจากวัสดุที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ สามารถนำประยุกต์ใช้งานทางด้านการเกษตรได้จริง มีราคาถูกและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 4.17 การเจริญเติบโตของต้นพริก (a) ความสูงที่เพิ่มขึ้น (b) ความยาวของใบพริก (c) ปริมาณน้ำหนักของพริกที่เก็บได้ และ (d) ภาพตัวอย่างของต้นพริกที่ทำการทดลองเทียบกับตัวเปรียบเทียบ และพริกที่ไม่ปุ๋ยเรียกไม่เคลือบ

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

**จากผลการศึกษาวิจัยในโครงการวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่า**

1. สามารถสังเคราะห์ไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายแบบแทรกสอด Cassava starch graft Acrylic acid Natural rubber blend Polyvinyl alcohol (CSt-g-PAA)/(NR/PVA) โดยผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซ่นน์ได้สำเร็จ
1. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ใช้สารเชื่อมขวางที่ต่างชนิดกัน โดยสารเชื่อมขวาง MBA 2 %w/w EGDMA 2%w/w และ GA 1%w/w
2. ตัวอย่างที่ได้จากการสังเคราะห์ให้ค่าไฮโดรเจลที่ MBA 2 %w/w EGDMA 2%w/w และ GA 1%w/w มี %Mass swelling สูงถึง 501 550 และ 4950% ตามลำดับ
3. จากการศึกษาสัณฐานวิทยา พบว่าตัวอย่างมีรูพรุนที่เชื่อมกันมากภายในพื้นที่ผิวของตัวอย่าง ซึ่งทำให้เป็นโพรงสำหรับโมเลกุลของน้ำได้ถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจล
4. จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค XRD พบว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้มีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน
5. จากการศึกษาสมบัติทางความร้อน พบว่าตัวอย่างที่สังเคราะห์นั้นมีความเสถียรทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง 290 และ 510° C
6. จากการศึกษาภัยเก็บน้ำในดินพบว่าดินที่มีการเติมไฮโดรเจลนั้นมีประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำมากกว่าดินที่ไม่ได้เติมไฮโดรเจล
7. จากการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของไฮโดรเจลพบว่าสามารถย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ใช้เวลาเพียง 120 วัน
8. การศึกษาการเจริญเติบโตของต้นพริกพบว่าเม็ดปุ๋ยที่ผ่านกระบวนการเคลือบด้วยไฮโดรเจลนั้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปลดปล่อยของปุ๋ยยูเรีย ทำให้พืชที่ใช้เวลาในการเจริญเติบโตนาน นั้นได้รับสารอาหารที่เพียงพอตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโต

### ข้อเสนอแนะ

1. ควรประเมินประสิทธิภาพของการเคลือบในผลิตภัณฑ์สุดท้าย เพราะยุเรียละลายได้เร็วและไฮโดรเจลมีการดูดน้ำได้เร็ว
2. ควรทำการประเมินว่าเวกเซอร์หรือไฮโดรเจลช่วยให้เกิดการปล่อยช้ามากกว่ากัน
3. ควรขยายสเกลเพื่อผลิตในเชิงพาณิชย์
4. ควรทำการวิเคราะห์กับปุ๋ยชนิดอื่น ๆ ว่ายังคงได้ผลเหมือนเดิมหรือไม่

## เอกสารอ้างอิง

1. Ma Z, Li Q, Yue Q, Gao B, Xu X, Zhong Q. Synthesis and characterization of a novel super-absorbent based on wheat straw. *Bioresour Technol.* 2011;102(3):2853-2858. doi:10.1016/j.biortech.2010.10.072
2. Iftime MM, Ailiesei GL, Ungureanu E, Marin L. Designing chitosan based eco-friendly multifunctional soil conditioner systems with urea controlled release and water retention. *Carbohydr Polym.* 2019;223(July):115040. doi:10.1016/j.carbpol.2019.115040
3. Dave AM, Mehta MH, Aminabhavi TM, Kulkarni AR, Soppimath KS. A review on controlled release of nitrogen fertilizers through polymeric membrane devices. *Polym Plast Technol Eng.* 1999;38(4):675-711. doi:10.1080/03602559909351607
4. Gao H, He J, Yang R, Yang L. Characteristic rheological features of high concentration PVA solutions in water with different degrees of polymerization. *J Appl Polym Sci.* 2010;116(5):NA-NA. doi:10.1002/app.31900
5. Impact of hydrogel polymer in agricultural sector. *Adv Agric Environ Sci Open Access.* 2018;1(2):59-64. doi:10.30881/aaeoa.00011
6. Zou W, Yu L, Liu X, et al. Effects of amylose/amyllopectin ratio on starch-based superabsorbent polymers. *Carbohydr Polym.* 2012;87(2):1583-1588. doi:10.1016/j.carbpol.2011.09.060
7. Riyajan SA, Sasithornsonti Y, Phinyocheep P. Green natural rubber-g-modified starch for controlling urea release. *Carbohydr Polym.* 2012;89(1):251-258. doi:10.1016/j.carbpol.2012.03.004
8. Liu J, Li Q, Su Y, Yue Q, Gao B, Wang R. Synthesis of wheat straw cellulose-g-poly (potassium acrylat[1] S. A. Riyajan, Y. Sasithornsonti, and P. Phinyocheep, "Green natural rubber-g-modified starch for controlling urea release," *Carbohydr. Polym.*, vol. 89, no. 1, pp. 251–258, Jun. 2012, doi: 10. Carbohydr Polym. 2013;94(1):539-546. doi:10.1016/j.carbpol.2013.01.089
9. Tanan W, Panichpakdee J, Saengsuwan S. Novel biodegradable hydrogel based on natural polymers: Synthesis, characterization, swelling/reswelling and biodegradability. *Eur Polym J.* 2019;112:678-687.

- doi:10.1016/j.eurpolymj.2018.10.033
10. Hydrogel - Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogel>. Accessed May 16, 2020.
  11. Ottenbrite RM, Huang SJ, Park K, eds. *Hydrogels and Biodegradable Polymers for Bioapplications*. Vol 627. Washington, DC: American Chemical Society; 1996. doi:10.1021/bk-1996-0627
  12. Nalampang K, Suebsanit N, Witthayaprapakorn C, Molloy R. *Design and Preparation of AMPS-Based Hydrogels for Biomedical Use as Wound Dressings*. Vol 34.; 2007. [www.science.cmu.ac.th/journal-science/josci.html](http://www.science.cmu.ac.th/journal-science/josci.html). Accessed May 16, 2020.
  13. Peppas NA, Bures P, Leobandung W, Ichikawa H. Hydrogels in pharmaceutical formulations. *Eur J Pharm Biopharm*. 2000;50(1):27-46. doi:10.1016/S0939-6411(00)00090-4
  14. 2676112 @ www.ryt9.com. <https://www.ryt9.com/s/prg/2676112>.
  15. Okay O, Sariisik SB. Swelling behavior of poly(acrylamide-co-sodium acrylate) hydrogels in aqueous salt solutions: theory versus experiments. *Eur Polym J*. 2000;36(2):393-399. doi:10.1016/S0014-3057(99)00058-0
  16. Starch - Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Starch>. Accessed May 16, 2020.
  17. Nguyen DM, Do TVV, Grillet AC, Ha Thuc H, Ha Thuc CN. Biodegradability of polymer film based on low density polyethylene and cassava starch. *Int Biodeterior Biodegrad*. 2016;115:257-265. doi:10.1016/j.ibiod.2016.09.004
  18. Subbarao G V., Sahrawat KL, Nakahara K, et al. Biological nitrification inhibition-a novel strategy to regulate nitrification in agricultural systems. In: *Advances in Agronomy*. Vol 114. Academic Press; 2012:249-302. doi:10.1016/B978-0-12-394275-3.00001-8
  19. Azeem B, Kushaari K, Man ZB, Basit A, Thanh TH. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *J Control Release*. 2014;181(1):11-21. doi:10.1016/j.jconrel.2014.02.020
  20. Cheng S, Liu X, Zhen J, Lei Z. Preparation of superabsorbent resin with fast water absorption rate based on hydroxymethyl cellulose sodium and its application. *Carbohydr Polym*. 2019;225(May):115214.

- doi:10.1016/j.carbpol.2019.115214
21. Kanaan AF, Barsan MM, Brett CMA, et al. Sustainable Electro-Responsive Semi-Interpenetrating Starch/Ionic Liquid Copolymer Networks for the Controlled Sorption/Release of Biomolecules. *ACS Sustain Chem Eng.* 2019;7(12):10516-10532. doi:10.1021/acssuschemeng.9b01071
  22. Xu Z, Yang L, Wang Q. Different alkyl dimethacrylate mediated stearyl methacrylate monoliths for improving separation efficiency of typical alkylbenzenes and proteins. *J Chromatogr A.* 2009;1216(15):3098-3106. doi:10.1016/j.chroma.2009.01.089
  23. Gomez CG, Pastrana G, Serrano D, Zuzeck E, Villar MA, Strumia MC. Macroporous poly(EGDMA-co-HEMA) networks: Morphological characterization from their behaviour in the swelling process. *Polymer (Guildf).* 2012;53(14):2949-2955. doi:10.1016/j.polymer.2012.04.040
  24. Sekhavat Pour Z, Ghaemy M. Removal of dyes and heavy metal ions from water by magnetic hydrogel beads based on poly(vinyl alcohol)/carboxymethyl starch-g-poly(vinyl imidazole). *RSC Adv.* 2015;5(79):64106-64118. doi:10.1039/c5ra08025h
  25. Junlapong K, Maijan P, Chaibundit C, Chantarak S. Effective adsorption of methylene blue by biodegradable superabsorbent cassava starch-based hydrogel. *Int J Biol Macromol.* 2020;158:258-264. doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.04.247
  26. Khanlari S, Dubé MA. Effect of pH on Poly(acrylic acid) Solution Polymerization. *J Macromol Sci Part A Pure Appl Chem.* 2015;52(8):587-592. doi:10.1080/10601325.2015.1050628
  27. Carbohydrate Technology.  
<https://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/chapter2.html>. Accessed May 20, 2020.
  28. science-new - ยางธรรมชาติ (Natural Rubber).  
[http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=141&Itemid=0](http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/index.php?option=com_content&task=view&id=141&Itemid=0). Accessed May 20, 2020.
  29. Riyajan SA, Sasithornsonti Y, Phinyocheep P. Green natural rubber-g-modified

- starch for controlling urea release. *Carbohydr Polym.* 2012;89(1):251-258. doi:10.1016/j.carbpol.2012.03.004
30. Ijen S, Salman. Producing Slow Release Urea by Coating with Starch / Acrylic Acid in Fluid Bed Spraying Suherman and Didi Dwi Anggoro. 2011.
  31. Vudjung C, Chaisuwan U, Pangan U, et al. Effect of natural rubber contents on biodegradation and water absorption of Interpenetrating polymer network (IPN) hydrogel from natural rubber and cassava starch. In: *Energy Procedia*. Vol 56. Elsevier Ltd; 2014:255-263. doi:10.1016/j.egypro.2014.07.156
  32. Wang L, Wang A. Adsorption characteristics of Congo Red onto the chitosan/montmorillonite nanocomposite. *J Hazard Mater.* 2007;147(3):979-985. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.01.145
  33. Xiao X, Yu L, Xie F, et al. One-step method to prepare starch-based superabsorbent polymer for slow release of fertilizer. *Chem Eng J.* 2017;309:607-616. doi:10.1016/j.cej.2016.10.101
  34. Rashidzadeh A, Olad A, Reyhanitabar A. Hydrogel/clinoptilolite nanocomposite-coated fertilizer: swelling, water-retention and slow-release fertilizer properties. *Polym Bull.* 2015;72(10):2667-2684. doi:10.1007/s00289-015-1428-y
  35. Qiao D, Liu H, Yu L, et al. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. *Carbohydr Polym.* 2016;147:146-154. doi:10.1016/j.carbpol.2016.04.010
  36. Zhao C, Zhang M, Liu Z, Guo Y, Zhang Q. Salt-Tolerant Superabsorbent Polymer with High Capacity of Water-Nutrient Retention Derived from Sulfamic Acid-Modified Starch. *ACS Omega.* 2019;4(3):5923-5930. doi:10.1021/acsomega.9b00486
  37. Wei H, Wang H, Chu H, Li J. Preparation and characterization of slow-release and water-retention fertilizer based on starch and halloysite. *Int J Biol Macromol.* 2019;133:1210-1218. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.04.183
  38. Xie L, Liu M, Ni B, Wang Y. Utilization of wheat straw for the preparation of coated controlled-release fertilizer with the function of water retention. *J Agric Food Chem.* 2012;60(28):6921-6928. doi:10.1021/jf3001235
  39. Stahl JD, Cameron MD, Haselbach J, Aust SD. Biodegradation of superabsorbent polymers in soil. *Environ Sci Pollut Res.* 2000;7(2):83-88.

- doi:10.1065/espr199912.014
40. Bortolin A, Aouada FA, Mattoso LHC, Ribeiro C. Nanocomposite PAAm/methyl cellulose/montmorillonite hydrogel: Evidence of synergistic effects for the slow release of fertilizers. *J Agric Food Chem.* 2013;61(31):7431-7439.  
doi:10.1021/jf401273n
  41. Parvathy PC, Jyothi AN. Water sorption kinetics of superabsorbent hydrogels of saponified cassava starch- *graft* -poly(acrylamide). *Starch - Stärke.* 2012;64(10):803-812. doi:10.1002/star.201200001
  42. Riyajan SA, Sukhlaaied W, Keawmang W. Preparation and properties of a hydrogel of maleated poly(vinyl alcohol) (PVAM) grafted with cassava starch. *Carbohydr Polym.* 2015;122:301-307. doi:10.1016/j.carbpol.2014.12.012
  43. Chang C, Duan B, Cai J, Zhang L. Superabsorbent hydrogels based on cellulose for smart swelling and controllable delivery. *Eur Polym J.* 2010;46(1):92-100.  
doi:10.1016/j.eurpolymj.2009.04.033
  44. Castro-Aguirre E, Auras R, Selke S, Rubino M, Marsh T. Insights on the aerobic biodegradation of polymers by analysis of evolved carbon dioxide in simulated composting conditions. *Polym Degrad Stab.* 2017;137:251-271.  
doi:10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.017
  45. Chen Y, Huang S, Tang Z, Chen X, Zhang Z. Structural changes of cassava starch granules hydrolyzed by a mixture of  $\alpha$ -amylase and glucoamylase. *Carbohydr Polym.* 2011;85(1):272-275. doi:10.1016/j.carbpol.2011.01.047
  46. Lu S, Duan M, Lin S. Synthesis of superabsorbent starch-*graft*-poly(potassium acrylate-co-acrylamide) and its properties. *J Appl Polym Sci.* 2003;88(6):1536-1542. doi:10.1002/app.12025
  47. Teli MD, Waghmare NG. Synthesis of superabsorbents from Amaranthus starch. *Carbohydr Polym.* 2010;81(3):695-699. doi:10.1016/j.carbpol.2010.03.037
  48. Kaity S, Isaac J, Ghosh A. Interpenetrating polymer network of locust bean gum-poly (vinyl alcohol) for controlled release drug delivery. *Carbohydr Polym.* 2013;94(1):456-467. doi:10.1016/j.carbpol.2013.01.070
  49. Mansur HS, Sadahira CM, Souza AN, Mansur AAP. FTIR spectroscopy characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel with different hydrolysis degree and chemically crosslinked with glutaraldehyde. *Mater Sci Eng C.*

- 2008;28(4):539-548. doi:10.1016/j.msec.2007.10.088
50. Zhu B, Ma D, Wang J, Zhang S. Structure and properties of semi-interpenetrating network hydrogel based on starch. *Carbohydr Polym.* 2015;133:448-455. doi:10.1016/j.carbpol.2015.07.037
  51. Wen P, Wu Z, He Y, et al. Microwave-Assisted Synthesis of a Semi-interpenetrating Polymer Network Slow-Release Nitrogen Fertilizer with Water Absorbency from Cotton Stalks. *ACS Sustain Chem Eng.* 2016;4(12):6572-6579. doi:10.1021/acssuschemeng.6b01466
  52. Wang Z, Ning A, Xie P, et al. Synthesis and swelling behaviors of carboxymethyl cellulose-based superabsorbent resin hybridized with graphene oxide. *Carbohydr Polym.* 2017;157:48-56. doi:10.1016/j.carbpol.2016.09.070
  53. Sukhlaaied W, Riyajan SA. A novel pH and temperature-sensitive maleate poly(vinyl alcohol)-graft-isopropylacrylamide/natural rubber blend: preparation and properties. *Polym Bull.* 2017;74(3):803-821. doi:10.1007/s00289-016-1746-8
  54. Ni B, Liu M, Lü S, Xie L, Wang Y. Multifunctional slow-release organic-inorganic compound fertilizer. *J Agric Food Chem.* 2010;58(23):12373-12378. doi:10.1021/jf1029306
  55. Salimi M, Motamedi E, Motesharezeh B, Hosseini HM, Alikhani HA. Starch-g-poly(acrylic acid-co-acrylamide) composites reinforced with natural char nanoparticles toward environmentally benign slow-release urea fertilizers. *J Environ Chem Eng.* 2020;8(3):103765. doi:10.1016/j.jece.2020.103765
  56. Shi P, Abbah SA, Saran K, et al. Silk fibroin-based complex particles with bioactive encrustation for bone morphogenetic protein 2 delivery. *Biomacromolecules.* 2013;14(12):4465-4474. doi:10.1021/bm401381s

### ภาคผนวก

#### ประวัติของหัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นายสายันต์ แสงสุวรรณ  
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Sayant Saengsuwan
2. หมายเลขบัตรประจำตัวประชาชน 3-4805-00529-389
3. ตำแหน่งปัจจุบัน : รองศาสตราจารย์ ระดับ 9
4. หน่วยงานที่อยู่ที่ติดต่อได้พร้อมโทรศัพท์ โทรสารและ e-mail  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ. วารินช์ราก จ. อุบลราชธานี  
34190 โทรศัพท์ (045) 433110-2 ต่อ 4537 โทรสาร (045) 433113  
E-mail: sayant.s@ubu.ac.th, sayants181@gmail.com

#### 5. ประวัติการศึกษา

| ปีที่จบ<br>การศึกษา | ระดับ<br>ปริญญา (ตรี<br>โท และ เอก) | อักษรย่อปริญญาและ<br>ชื่อเดิม                         | สาขาวิชา           | วิชาเอก | ชื่อสถาบัน<br>การศึกษา | ประเทศ |
|---------------------|-------------------------------------|---|--------------------|---------|------------------------|--------|
| 2546                | เอก                                 | ปรด.<br>ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต                             | เคมีเชิง<br>พลิกส์ | -       | มหาวิทยาลัย<br>มหิดล   | ไทย    |
| 2540                | ตรี                                 | วท.บ.<br>วิทยาศาสตร์ บัณฑิต<br>(เกียรตินิยม อันดับ 2) | เคมี               | -       | มหาวิทยาลัย<br>ขอนแก่น | ไทย    |

#### 6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (ซึ่งอาจแตกต่างจากภาระการศึกษาปกติได้)

ทางด้าน Physical properties of macromolecules และ Polymer composites and blends และนอกจากนี้ผู้วิจัยยังมีความชำนาญทางด้านการศึกษาสมบัติทางกายภาพต่างๆของ Polymeric materials เช่น

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารโดยใช้เครื่อง differential scanning calorimeter (DSC) และเครื่อง thermal gravimetric analysis (TGA)

การศึกษาสมบัติการจัดเรียงตัวของโมเลกุลโดยใช้เทคนิค X-ray Scattering และ FTIR

การทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์คอมโพสิตโดยใช้เครื่อง tensile tester

การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสมโดยใช้เครื่อง rheometer

การศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ผสมโดยใช้ SEM, Optical microscope

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศไทย โดยระบุสถานภาพ  
ในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ  
ข้อเสนอการวิจัย

- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2562

เรื่อง การเตรียมและพิสูจน์เอกสารชั้นฟิล์มไฮโดรเจลย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งเตรียมจากแป้ง 4 ชนิด และพอลิอะครีลิกแอดชิคสำหรับประยุกต์ใช้ดูดซับสีย้อมจากรถราลลายน้ำ โครงย่อยในโครงการบูรณาการองค์ความรู้พื้นฐานและเทคโนโลยีฐาน เป้าหมายที่ 3

สถานภาพในการทำวิจัย : หัวหน้าโครงการวิจัย (2562) ความคืบหน้าร้อยละ 10

- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2561

เรื่อง 2561A11702059 : การเตรียมและพิสูจน์เอกสารชั้นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดและพอลิอะครีลิกสำหรับประยุกต์ใช้ดูดซับไออกอนตะกั่วจากรถราลลาย

สถานภาพในการทำวิจัย : หัวหน้าโครงการวิจัย (2561) ความคืบหน้าร้อยละ 90

- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2560

เรื่อง 2560A11702020 : การพัฒนาและพิสูจน์เอกสารชั้นฟิล์มของฟิล์มไฮโดรเจลชนิด poly(HEMA-AM)/PVA โดยใช้โคโลไซด์เป็นตัวช่วย

สถานภาพในการทำวิจัย : หัวหน้าโครงการวิจัย (2560) ความคืบหน้าร้อยละ 95

- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2559

เรื่อง 2559A11702102 : การศึกษาสภาพที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลแบบ one-pot โดยใช้คลีน์ไมโครเวฟช่วยเพื่อพัฒนาการดูดซับไออกอนโลหะให้ดีขึ้น

สถานภาพในการทำวิจัย : หัวหน้าโครงการวิจัย (2559) ความคืบหน้าร้อยละ 100

- สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) พ.ศ. 2557-2558

เรื่อง การพัฒนาการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดโครงร่างตาข่ายแบบแทรกสอดด้วยการใช้คลีน์ไมโครเวฟช่วยเพื่อการประยุกต์ใช้ในการดูดซับไออกอนโลหะหนัก

สถานภาพในการทำวิจัย : หัวหน้าโครงการวิจัย (2554-2555) ความคืบหน้าร้อยละ 50

### ประวัตินักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ชื่อ - นามสกุล นางสาวพัชรีพร จึงศิลปัญธรรม

ชื่อ - นามสกุล Miss. Patchareepon Jungsinyatam

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1350400098739

หน่วยงาน คณะวิทยาศาสตร์ สาขา เคมี สถาบัน มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี เบอร์โทรศัพท์ 0851864928 อีเมล patchareepon55@gmail.com

### ประวัติการศึกษา

| ระดับปริญญา      | สาขาวิชา | ปีที่สำเร็จ | สถาบันที่สำเร็จการศึกษา |
|------------------|----------|-------------|-------------------------|
| วิทยาศาสตรบัณฑิต | เคมี     | พ.ศ. 2561   | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  |

