ผลของกลูตารัลดีไฮด์และแป้งมันสำปะหลังต่อสมบัติและการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

Effect of Glutaraldehyde and Cassava Starch on Properties and Phosphorus Releasing of Chitosan Hydrogel Fertilizers

รุ่งระวี ศิริบุญนาม[1*] และ สุปราณี แก้วภิรมย์[2]

Rungrawee Siribunnam[1*] and Supranee Kaewpirom[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์ปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลเพื่อควบคุมการปลดปล่อยฟอสฟอรัส โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง โดยศึกษาผลของกลูตารัลดีไฮด์ แป้งมันสำปะหลัง เวลา และค่าความเป็นกรด-เบส ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา และสมบัติการบวมตัวและการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ผลจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ ใช้ปริมาตรกลูตารัลดีไฮด์ (2.5 %w/v) 8 มิลลิลิตร ปริมาตรแป้งมันสำปะหลัง (1 %w/v) 50 มิลลิลิตร ที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 เป็นเวลา 16 วัน ปุ๋ยไฮโดรเจลที่มีแป้งมันสำปะหลังมาก มีผิวไม่ราบเรียบ มีรอยแตกทั่วไป ส่วนปุ๋ยไฮโดรเจลที่มีแป้งมันสำปะหลังน้อยกว่ามีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วไปในเม็ดปุ๋ย นอกจากนั้นผลการศึกษาสมบัติการบวมตัวของปุ๋ยไฮโดรเจลในน้ำปราศจากไอออน พบว่าปุ๋ยไฮโดรเจลที่เติมแป้งมันสำปะหลังน้อยกว่ามีร้อยละการบวมตัวมากกว่า อีกทั้งผลการศึกษาการปลดปล่อยฟอสฟอรัส พบว่าปุ๋ยที่ไม่เติมแป้งมันสำปะหลังสามารถชะลอการปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้ดีกว่า

คำสำคัญ: ไคโตซานไฮโดรเจล ปุ๋ยไฮโดรเจล ไฮโดรเจลแป้งมันสำปะหลัง

[1] สาขาวิชาเคมีศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[2] สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[*] Corresponding author e-mail: krurung2012@gmail.com

Received: 9 August 2019, Revised: 14 August 2019, Accepted: 25 December 2019

Abstract

This research studied the synthesis of chitosan hydrogel fertilizer to control phosphorus releasing by using glutaraldehyde as a crosslinking. The effect of glutaraldehyde, cassava starch, time, and pH toward morphology confirmation, swelling, and phosphorus releasing were studied. The results showed that the optimum conditions were glutaraldehyde (2.5 %w/v) 8 mL, cassava starch (1 %w/v) 50 mL, at pH 7 for 16 days. In addition, hydrogel fertilizer which had a lot of cassava starch showed uneven skin and general cracks. Conversely, hydrogel fertilizer with less cassava starch had widespread small porosity. Furthermore, the swelling in the deionized water showed that chitosan hydrogel fertilizer with less cassava starch had more swelling percentage. Moreover, phosphorus releasing of chitosan hydrogel fertilizer which did not add cassava starch released more phosphorus than their added.

Keywords: Chitosan hydrogel, Hydrogel fertilizer, Hydrogel from cassava starch

บทนำ

ปัจจุบันการทำเกษตรกรรมของประเทศไทยอาศัยการใช้ทรัพยากรดินเป็นพื้นฐานหลักในการเพาะปลูก แต่เนื่องจากสภาพดินในแต่ละพื้นที่มีความอุดมสมบูรณ์แตกต่างกัน (กรมพัฒนาที่ดิน, 2558) ดังนั้นเกษตรกรจึงทำการปรับปรุงคุณภาพดินให้มีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูกด้วยการใช้ปุ๋ยเคมี เนื่องจากปุ๋ยเคมีมีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรและเพิ่มพูนรายได้ของเกษตรกรให้สูงขึ้น ดังนั้นในแต่ละปีพบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าปุ๋ยเคมีจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยที่มีองค์ประกอบที่เป็นธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ไนโตรเจน (N), ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) ได้รับความนิยมอย่างมากเนื่องจากขั้นตอนการใช้ปุ๋ยไม่ยุ่งยาก สะดวกสบาย อย่างไรก็ตามปุ๋ยเคมีเหล่านี้เมื่อใส่ลงไปในดินพบว่าจะละลายได้อย่างรวดเร็วเมื่อโดนน้ำหรือความชื้น ส่งผลให้พืชสามารถดูดซึมธาตุไนโตรเจนและโพแทสเซียมไปใช้ประโยชน์ได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนฟอสฟอรัสจะดูดซึมไปใช้ได้เพียงไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เนื่องจากการดูดซึมแร่ธาตุในดินไปใช้ประโยชน์ของพืชจะอาศัยกระบวนการแพร่และกระบวนการแอคทีฟทรานสปอร์ต ซึ่งจะลำเลียงแร่ธาตุจากดินเข้าสู่รากอย่างช้าๆ ทำให้การดูดซึมแร่ธาตุของพืชใช้ระยะเวลานาน ดังนั้นจึงมีธาตุอาหารส่วนที่เหลือจากการดูดซึมสูญเสียไปด้วยการถูกชะล้างลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง นอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายของเกษตรกรแล้วธาตุอาหารเหล่านี้ยังเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาการเพิ่มขึ้นของธาตุอาหารในแม่น้ำ ลำคลอง ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) และน้ำใต้ดินปนเปื้อนไนเตรท (สุปราณี, 2562) ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสร้างความเสี่ยงต่อสุขภาพของประชาชน ดังนั้นการใช้ปุ๋ยที่พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้มากที่สุด สูญเสียน้อยที่สุด และมีความเหมาะสมกับการดูดซึมแร่ธาตุของรากพืชจากดิน จึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

ปัจจุบันมีการพัฒนาปุ๋ยที่มีความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารหลักของพืชในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเคลือบด้วยกำมะถัน เคลือบด้วยสารพอลิเมอร์อินทรีย์ เคลือบด้วยเรซิน เคลือบด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (จารุวรรณ และคณะ, 2556; ชินาลัย และเบ็ญจพร, 2561; ธงชัย และคณะ, 2556; นิษฐา และสายันต์, 2560) และไฮโดรเจล โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจล (hydrogel) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชอบน้ำที่มีโครงร่างตาข่ายสามมิติที่สามารถดูดซับน้ำได้โดยไม่ละลายในน้ำ การเตรียมไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น ด้วยวิธีปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหรือการเชื่อมขวาง โดยใช้หมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของมอนอเมอร์ในการเชื่อมโยงสายโซ่ และใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (วารุณี และสายันต์, 2557) ปัจจุบันมีการนำเอาไคโตซานซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สกัดได้จากเปลือกกุ้ง กระดองปู และแกนหมึก มาสังเคราะห์เป็นแผ่นฟิล์มและไฮโดรเจล โดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวางเพื่อทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ในไคโตซานเกิดการเชื่อมขวางเป็นโครงร่างตาข่าย ซึ่งเรียกว่า “ไคโตซานไฮโดรเจล” ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี เมื่อทำการบรรจุแร่ธาตุที่จำเป็นหรือปุ๋ยสำหรับพืชไว้ในไคโตซานไฮโดรเจล จึงเรียกว่า “ปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล”เมื่อไฮโดรเจลดูดซับน้ำเข้าไปภายในจะเกิดการสะสมและบวมตัว และน้ำที่เข้าไปจะละลายแร่ธาตุออกมาอย่างช้า ๆ (ทองใส, 2552) การปลดปล่อยแร่ธาตุออกมาอย่างช้า ๆ ของปุ๋ยไฮโดรเจลทำให้พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ในปริมาณที่ต้องการ และธาตุอาหารที่เหลือก็ยังคงอยู่ในปุ๋ยไฮโดรเจล ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับดิน และถูกชะล้างไปน้อยที่สุดทำให้พืชใช้ประโยชน์จากปุ๋ยไฮโดรเจลได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากคุณสมบัติการดูดซับน้ำได้ดีของไฮโดรเจล จึงมีผู้ศึกษาปริมาณของกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวางในการเตรียมไคโตซานโดรเจลพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกลูตารัลดีไฮด์มากขึ้นจะ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับน้ำของไคโตซานลดลง (รัดเกล้า, 2539) และขณะเดียวกันก็พบว่า ไคโตซานไฮโดรเจลที่ไม่เติมกลูตารัลดีไฮด์จะมีร้อยละการบวมตัวมากกว่าไคโตซานไฮโดรเจลที่เติมกลูตารัลดีไฮด์ (Akakuru และ Isiuku, 2017) จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่า เพื่อให้สามารถสังเคราะห์ปุ๋ยที่ยังคงดูดซับน้ำได้ดี และยังคงบวมตัวได้มาก จึงควรมีการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของกลูตารัลดีไฮด์ที่ใช้เป็นสารเชื่อมขวาง รวมถึงการหาวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่มีความสามารถช่วยในการคงคุณสมบัติเหล่านี้

แป้งมันสำปะหลัง (cassava starch) เป็นแป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ลักษณะของแป้งมีสีขาว เนื้อเนียน ลื่นเป็นมัน ขึ้นรูปได้ง่าย และเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ การนำแป้งมันสำปะหลังมาพัฒนาสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการกักเก็บสารเพื่อควบคุมการปลดปล่อย สามารถทำได้โดยการเชื่อมขวางโมเลกุลของแป้งด้วยสารเชื่อมขวาง เพื่อทำให้แป้งเปลี่ยนโครงสร้างเป็นร่างแห ละลายน้ำได้น้อยลง ดูดซับน้ำได้ดีขึ้น สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารได้ยาวนานขึ้น (อภิสรา และอภินันท์, 2554) ดังนั้นหากนำมาแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับไคโตซานเพื่อผลิตปุ๋ยไฮโดรเจลควบคุมการปลดปล่อยจะทำให้ปุ๋ยไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการบวมตัวได้ดี ส่งผลให้แร่ธาตุที่อยู่ภายในปุ๋ยไฮโดรเจลถูกปลดปล่อยออกมาอย่างช้า ๆ ทำให้พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบที่มีราคาถูก สามารถหาได้ง่าย ซึ่งเมื่อนำมาใช้ผสมกับไคโตซานที่มีราคาแพงจะสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ รวมทั้งแป้งมันสำปะหลังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อเป็นการพัฒนาคุณสมบัติที่ดีของปุ๋ยที่ช่วยให้พืชได้รับธาตุอาหารอย่างเต็มประสิทธิภาพ ลดส่วนที่สูญเสียไปให้น้อยที่สุด และเป็นปุ๋ยที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะในดินและสิ่งแวดล้อม ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการเตรียมปุ๋ยฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของไฮโดรเจลควบคุมการปลดปล่อย โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่สำคัญ ได้แก่ ผลของกลูตารัลดีไฮด์และปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อการขึ้นรูปของปุ๋ยไฮโดรเจล สมบัติการบวมตัว ผลของเวลาและความเป็นกรด-เบสของสารละลายต่อการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ตลอดจนศึกษาสัณฐานวิทยาของปุ๋ยไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้แบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล การศึกษาการบวมตัวของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล ดังนี้

1. การหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล โดยศึกษาปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการขึ้นรูปของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล ได้แก่ ปริมาณสารเชื่อมขวาง (กลูตารัลดีไฮด์) และปริมาณแป้งมันสำปะหลัง

1.1 การหาปริมาณกลูตารัลดีไฮด์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

การหาปริมาณสารกลูตารัลดีไฮด์ที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล มีขั้นตอนดังนี้ เตรียมปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล 4 สูตร ได้แก่ CS-GA05 CS-GA10 CS-GA15 และ CS-GA20 โดยผสมสารละลายปุ๋ยฟอสเฟตความเข้มข้น 2.1 mol/dm^3 ปริมาตร 20 มิลลิลิตร กับสารละลายไคโตซานความเข้มข้น 2 %w/v ปริมาตร 200 มิลลิลิตร คนด้วยเครื่องคนแม่เหล็ก 10 นาที จากนั้นเติมสารเชื่อมขวาง (สารละลายกลูตารัลดีไฮด์ความเข้มข้น 2.5%w/v) ปริมาตรแตกต่างกัน 5 10 15 และ 20 มิลลิลิตร ลงในปุ๋ยแต่ละสูตรตามลำดับ เมื่อเติมสารเชื่อมขวางแล้วคนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้องใช้เวลาประมาณ 20 นาที จากนำสารละลายผสมที่ได้ของแต่ละสูตรไปหยดลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ต่อลิตร ปริมาตร 2 ลิตร ที่เตรียมไว้ในขวดพลาสติกขนาดใหญ่ที่มีเครื่องกวน เมื่อปุ๋ยไฮโดรเจลจับตัวเป็นก้อนกลมและจมลงที่ก้นภาชนะทั้งหมด นำปุ๋ยไฮโดรเจลที่ได้ไปล้างด้วยน้ำสะอาด 2-3 ครั้ง เพื่อกำจัดเบส จากนั้นนำไปผึ่งในภาชนะตะแกรงให้แห้งที่อุณหภูมิห้องประมาณ 12 ชั่วโมงแล้วเปลี่ยนใส่ถาดโลหะที่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเพื่อนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลา 48 ชั่วโมง จะได้ปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล CS-GA05 CS-GA10 CS-GA15 และ CS-GA20 ตามลำดับ และนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา พิสูจน์เอกลักษณ์ ทดสอบการบวมตัว และศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่อไป

1.2 การหาปริมาณแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

การหาปริมาณสารละลายแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล โดยผู้วิจัยกำหนดปริมาณสารเชื่อมขวางที่เหมาะที่ได้จากผลการศึกษาในข้อ 1.1 และทำการ

เตรียมปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล 4 สูตร ที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลัง (ความเข้มข้น 1 %w/v) แตกต่างกัน 0 50 100 และ 150 มิลลิลิตร จะได้ปุ๋ยที่มีสูตรแตกต่างกัน ได้แก่ CS/ST-0 CS/ST-25 CS-S50 CS/ST-50 และ CS/ST-75 ดังตารางที่ 1 และนำตัวอย่างที่ได้ไปทำการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา พิสูจน์เอกลักษณ์ ทดสอบการบวมตัว และศึกษาความสามารถในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสต่อไป

2. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลโดยนำตัวอย่างปุ๋ยไฮโดรเจลแต่ละสูตร ติดบนหมุดโลหะด้วยเทปกาวสองหน้า และเคลือบด้วยฟิล์มทองคำในสุญญากาศ ถ่ายภาพลักษณะทางสัณฐานของผิวหน้าและผิวหน้าที่แตกหักของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscopy; SEM) ของบริษัท LEO รุ่น 1450 VP

ตารางที่ 1 อัตราส่วนองค์ประกอบของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

สูตรปุ๋ย	สารละลายไคโตซาน 2 %w/v (mL)	สารละลายแป้งมันสำปะหลัง 1 %w/v (mL)	สารละลายปุ๋ย $(NH_4)_2HPO_4$ 2.1 mol/dm^3 (mL)	สารเชื่อมขวาง (mL)
CS/ST-0	200	0	20	8
CS/ST-25	200	50	20	8
CS/ST-50	200	100	20	8
CS/ST-75	200	150	20	8

3. การศึกษาการบวมตัวของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

ตัวอย่างปุ๋ยที่สังเคราะห์ได้ในข้อ 1.2 จะนำมาศึกษาการบวมตัวซึ่งเป็นสมบัติหนึ่งที่สำคัญที่ใช้ในการศึกษาถึงการเกิดโครงร่างตาข่ายของปุ๋ย ดังนั้นการบวมตัวของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลที่เตรียมได้ สามารถใช้เปรียบเทียบได้ว่าไคโตซานและแป้งมันสำปะหลังในไฮโดรเจลเกิดโครงร่างตาข่ายขึ้นมากหรือน้อยเพียงใด ทำการทดสอบการบวมตัวโดยนำเม็ดปุ๋ยไฮโดรเจลที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักแห้ง (W_d) จากนั้นนำเม็ดปุ๋ยไฮโดรเจล ที่ชั่งน้ำหนักแห้งแล้วไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักเปียกของเม็ดปุ๋ยไฮโดรเจล (W_w) ทุก ๆ 10 นาที โดยใช้ผ้าบางที่เปียกน้ำหมาดซับน้ำที่เกาะอยู่บนผิวของเม็ดปุ๋ยไฮโดรเจล คำนวณหาร้อยละของการบวมตัว (swelling ratio ; %SR) ดังสมการ

$$\%SR = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

4. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

ตัวอย่างปุ๋ยที่สังเคราะห์ได้ในข้อ 1.2 จะนำมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปลดปล่อยฟอสฟอรัส โดยศึกษาปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการปลดปล่อยได้แก่ ผลของความเป็นกรด-เบส (pH)

ของสารละลาย และเวลาที่ใช้การปลดปล่อย โดยการนำตัวอย่างปุ๋ยไฮโดรเจลที่แห้ง หนัก 1.00 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมสารละลายที่มีความเป็นกรด-เบส แตกต่างกันได้แก่ 3 7 และ 9 ปริมาตร 75.00 มิลลิลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นทุก ๆ 24 ชั่วโมง เก็บสารละลายปริมาตร 30 มิลลิลิตร เป็นเวลา 20 วัน โดยหลังจากเก็บสารละลายแต่ละครั้งต้องเติมสารละลายแต่ละความเป็นกรด-เบส เข้าไปแทนปริมาตร 30 มิลลิลิตร นำสารละลายที่เก็บได้ในแต่ละวันไปตรวจหาปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorus) ตามวิธีมาตรฐาน (AOAC, 2000) และตรวจวัดด้วยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ทำการเตรียมตัวอย่างโดยปิเปตต์สารละลายที่เก็บจากการปลดปล่อยของปุ๋ยไฮโดรเจล มา 5 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลายโมลิบโดวานาเดต 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 20 นาที จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร เทียบกับสารละลายมาตรฐาน โดยให้แสงผ่าน blank หรือ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วปรับเป็น 0 เมื่อแสงไม่ผ่าน โดยอ่านเป็นค่าเปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสง (Abs) อ่านค่าของสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต 0 1 2 3...6 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการวาดกราฟโดยให้แกนตั้งเป็นค่าดูดกลืนแสง (Abs) และแกนนอนเป็นค่าของความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) แล้วนำค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างมาอ่านค่าของความเข้มข้นจากกราฟ

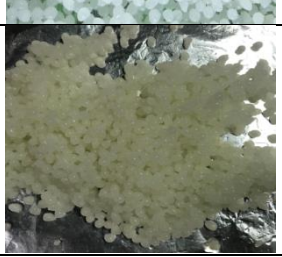
ผลการวิจัย

1. ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

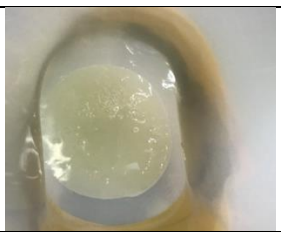
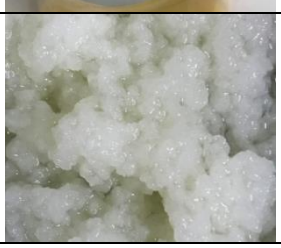
1.1 ผลของปริมาณสารเชื่อมขวางต่อการขึ้นรูปของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

จากการทดลองเปลี่ยนปริมาณสารเชื่อมขวางแล้วขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล ปรากฏผล ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลของปริมาณสารเชื่อมขวางต่อการขึ้นรูปของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

สูตรปุ๋ย	อัตราส่วนปริมาตร (มิลลิลิตร) CS : P : GA	ภาพแสดงลักษณะของเม็ดปุ๋ย	ผลการขึ้นรูป
CS-GA05	200 : 20 : 5		ขึ้นรูปได้ เม็ดปุ๋ยนิ่ม ลักษณะค่อนข้างกลม
CS-GA10	200 : 20 : 10		ขึ้นรูปได้ เม็ดปุ๋ยแข็ง ลักษณะค่อนข้างกลม

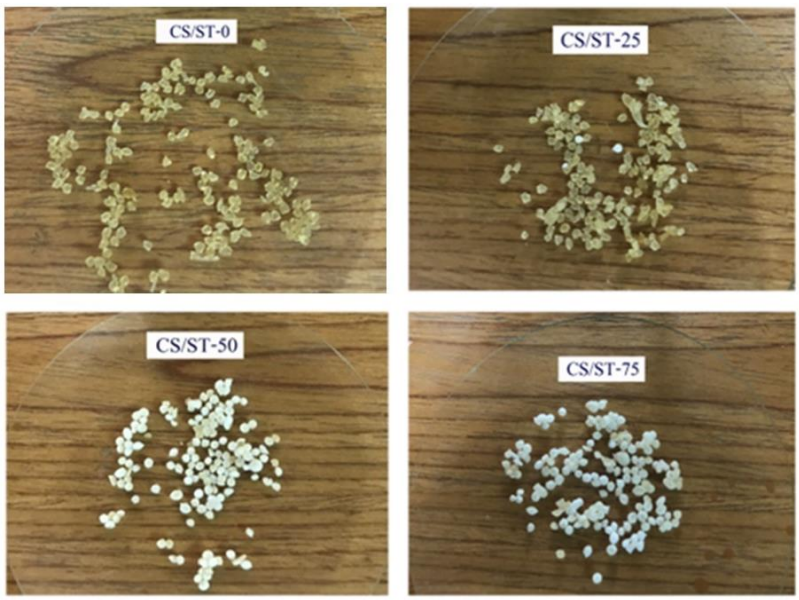
ตารางที่ 2 (ต่อ)

สูตรปุ๋ย	อัตราส่วนปริมาตร (มิลลิลิตร) CS : P : GA	ภาพแสดงลักษณะของเม็ดปุ๋ย	ผลการขึ้นรูป
CS-GA15	200 : 20 : 15		ขึ้นรูปไม่ได้ สารละลายจับตัวกัน มีลักษณะเหนียวหนืด
CS-GA20	200 : 20 : 20		ขึ้นรูปไม่ได้ สารละลายจับเป็นก้อน ไม่สามารถหยดได้

ผลจากตารางที่ 2 พบว่า ปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลสูตร CS-GA05 สารมารถขึ้นรูปได้ ลักษณะค่อนข้างกลม เม็ดปุ๋ยนิ่มและ CS-GA10 สามารถขึ้นรูปได้ ลักษณะค่อนข้างกลม แต่เม็ดปุ๋ยแข็ง ส่วน CS-GA15 และ CS-GA20 ไม่สามารถขึ้นรูปได้ สารละลายจับตัวกัน มีลักษณะเหนียวหนืดและ ไม่สามารถหยดได้ แสดงว่าปริมาณสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล อยู่ระหว่าง 5-10 มิลลิลิตร อย่างไรก็ตามเนื่องจากเมื่อใช้ปริมาณสารเชื่อมขวางที่ 10 มิลลิลิตร ถึงแม้ว่าจะสามารถขึ้นรูปปุ๋ยได้แต่เม็ดปุ๋ยจะมีลักษณะแข็งเกินไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกกำหนดปริมาณสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมที่ 8 มิลลิลิตร เพื่อนำไปใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์อื่น ๆ

1.2 ผลของปริมาณสารละลายแป้งมันสำปะหลังต่อการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

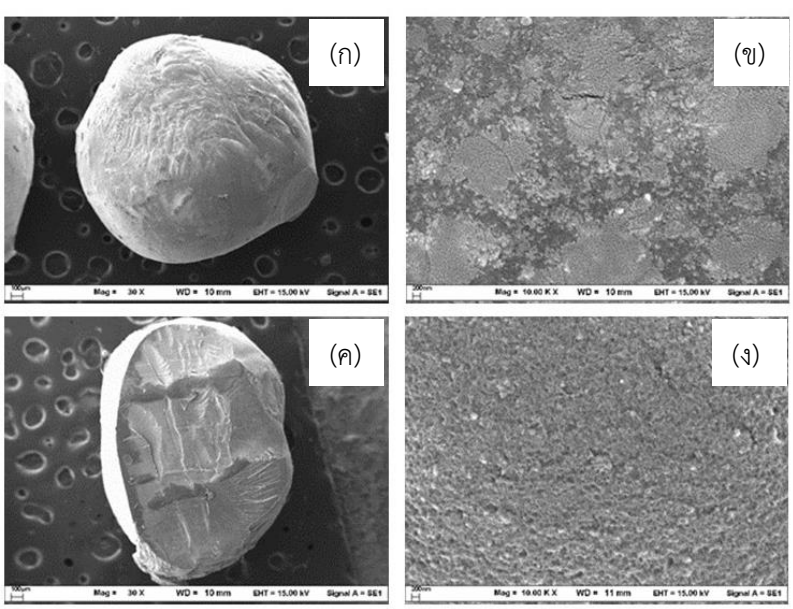
จากการทดลองเปลี่ยนปริมาณสารละลายแป้งมันสำปะหลังแล้วขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล ปรากฏผลดังแสดงในภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่าลักษณะของเม็ดปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลที่สังเคราะห์จากสภาวะที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังแตกต่างกัน พบว่าเม็ดปุ๋ยทุกสูตรสามารถขึ้นรูปได้ มีรูปร่างเม็ดค่อนข้างกลม CS/ST-0 มีขนาดเม็ดใกล้เคียงกับ CS/ST-25 แต่มีขนาดเล็กกว่า CS/ST-50 และ CS/ST-50 ส่วนสีของเม็ดปุ๋ย พบว่า CS/ST-0 มีสีน้ำตาลโปร่งใสกว่า CS/ST-25 ส่วน CS/ST-50 และ CS/ST-50 มีสีขาวทึบ เพื่อให้สามารถตัดสินใจได้ว่าปริมาณแป้งที่เหมาะสม ผู้วิจัยนำปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ที่สังเคราะห์ได้ไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ตามหัวข้อที่ 4 ต่อไป



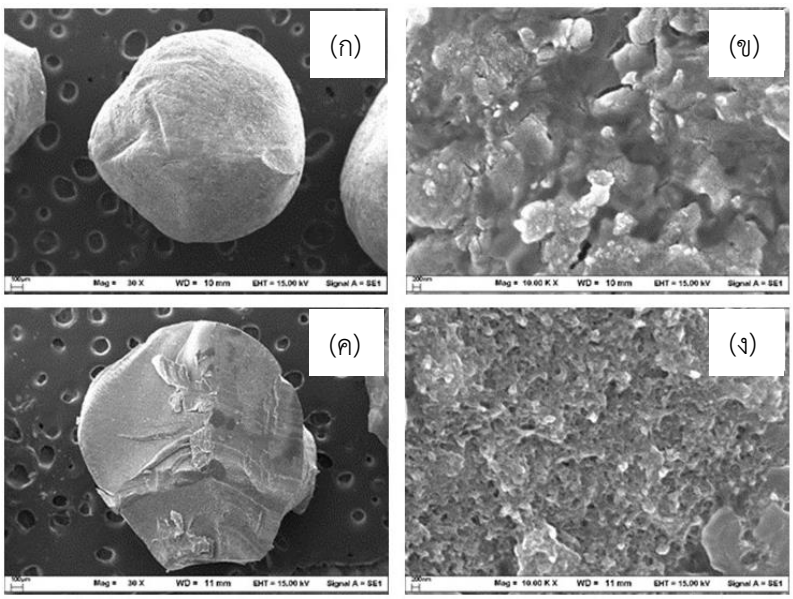
ภาพที่ 1 ผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อการขึ้นรูปของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

2. ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

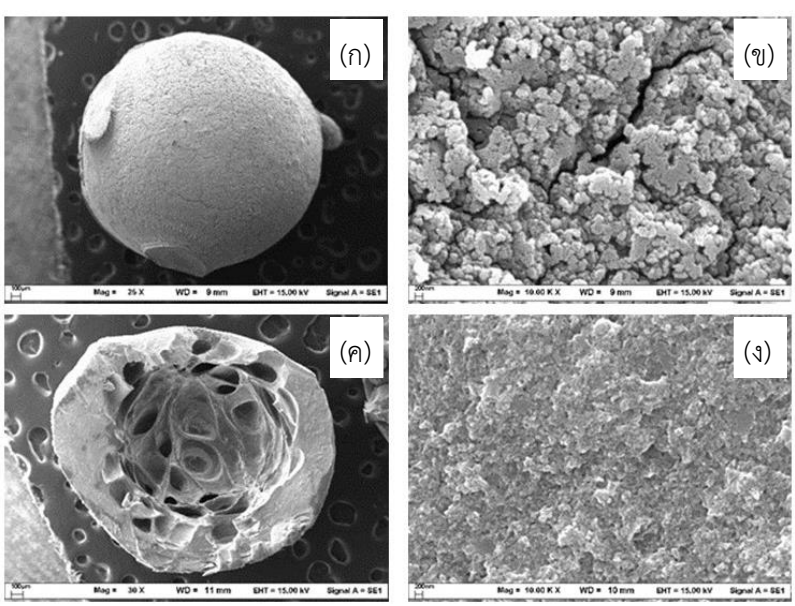
จากการถ่ายภาพเพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ได้ผลดังภาพที่ 2-5



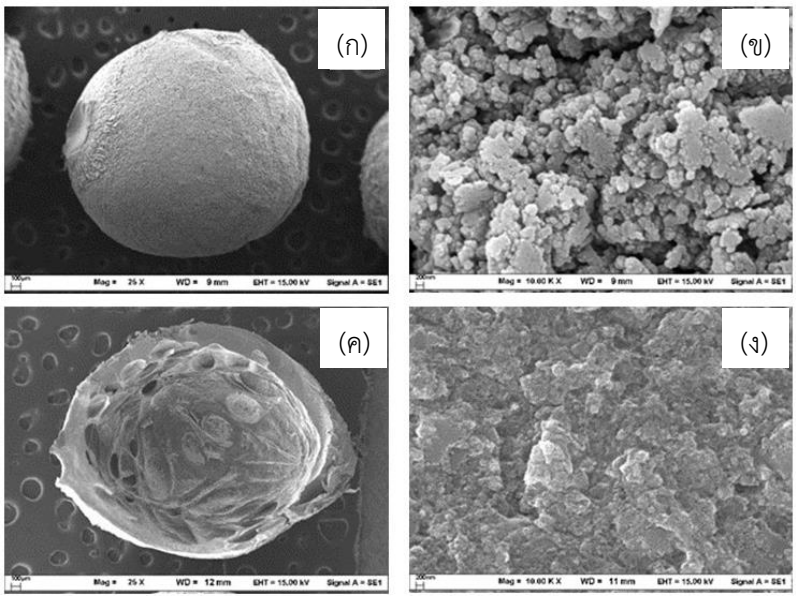
ภาพที่ 2 ภาพถ่ายผิวหน้ากำลังขยาย 30 เท่า (ก) และ 10,000 เท่า (ข) ของ CS/ST-0 และ ภาพถ่ายตัดขวางกำลังขยาย 30 เท่า (ค) และ 10,000 เท่า (ง) ของ CS/ST-0



ภาพที่ 3 ภาพถ่ายผิวหน้ากำลังขยาย 30 เท่า (ก) และ 10,000 เท่า (ข) ของ CS/ST-25 และ ภาพถ่ายตัดขวางกำลังขยาย 30 เท่า (ค) และ 10,000 เท่า (ง) ของ CS/ST-25



ภาพที่ 4 ภาพถ่ายผิวหน้ากำลังขยาย 30 เท่า (ก) และ 10,000 เท่า (ข) ของ CS/ST-50 และ ภาพถ่ายตัดขวางกำลังขยาย 25 เท่า (ค) และ 10,000 เท่า (ง) ของ CS/ST-50

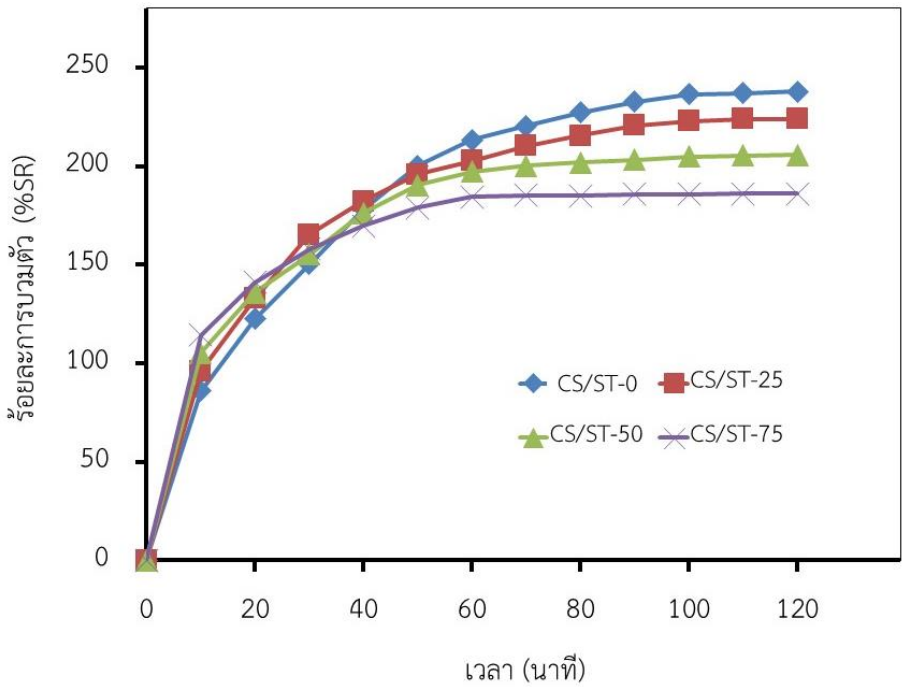


ภาพที่ 5 ภาพถ่ายผิวหน้ากำลังขยาย 30 เท่า (ก) และ 10,000 เท่า (ข) ของ CS/ST-75 และ ภาพถ่ายตัดขวางกำลังขยาย 25 เท่า (ค) และ 10,000 เท่า (ง) ของ CS/ST-75

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า ปุ๋ยไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนระหว่างไคโตซานกับแป้งมันสำปะหลังต่างกัน มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาจากพื้นผิวภายนอกจะเห็นว่าปุ๋ยสูตร CS/ST-0 และ CS/ST-25 มีลักษณะพื้นผิวภายนอกคล้ายคลึงกัน โดยมีลักษณะไม่ราบเรียบ มีรอยย่น เมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าพื้นผิวขรุขระ และมีรอยแยกเล็ก ๆ ในบางบริเวณ ดังภาพที่ 2 (ก) (ข) และ ภาพที่ 3 (ก) (ข) ตามลำดับ ส่วนลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ ปุ๋ยสูตร CS/ST-50 และ CS/ST-75 มีลักษณะพื้นผิวภายนอกคล้ายคลึงกัน โดยมีพื้นผิวขรุขระมีรอยแยกอยู่ทั่วทั้งพื้นผิวและเมื่อพิจารณาภาพถ่ายกำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า พื้นผิวขรุขระมาก มีรอยแยกขนาดใหญ่อยู่ทุกบริเวณ ดังภาพที่ 4 (ก), (ข) และภาพที่ 5 (ก) (ข) ตามลำดับ ซึ่งปุ๋ยทั้งสองสูตรมีลักษณะพื้นผิวแตกต่างจากปุ๋ยสูตร CS/ST-0 และ CS/ST-25 เมื่อพิจารณาภาพถ่ายตัดขวาง พบว่า ปุ๋ยสูตร CS/ST-0 และ CS/ST-25 มีความคล้ายคลึงกัน โดยมีความขรุขระและมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายทั่วไปในเนื้อของเม็ดปุ๋ย ดังภาพที่ 2 (ค) (ง) และภาพที่ 3 (ค) (ง) ตามลำดับ ส่วนภาพถ่ายตัดขวางของปุ๋ยสูตร CS/ST-50 และ CS/ST-75 มีความคล้ายคลึงกัน โดยด้านในมีลักษณะเป็นโพรงขนาดใหญ่ เนื้อของเม็ดปุ๋ยแน่น และขรุขระมีรูพรุนเล็กน้อยดังภาพที่ 4 (ค) (ง) และภาพที่ 5 (ค) (ง) ตามลำดับ

3. ผลการศึกษาการบวมตัวของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

ผลจากการนำปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังแตกต่างกัน (CS/ST-0 CS/ST-25 CS/ST-50 และ CS/ST-75) มาศึกษาร้อยละการบวมตัว พบว่าได้ผลดังภาพที่ 6

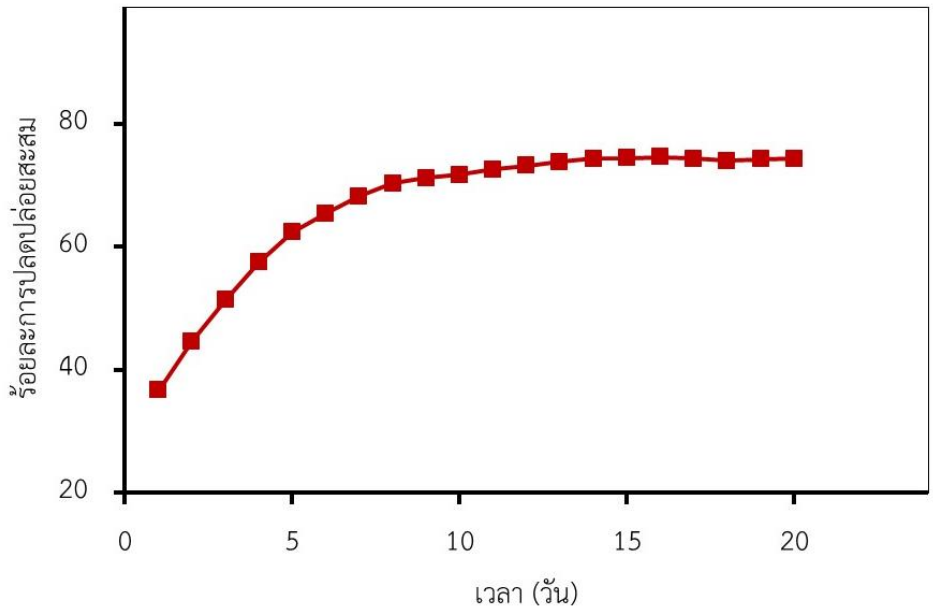


ภาพที่ 6 ร้อยละการบวมตัวของปุ๋ยไฮโดรเจลที่มีปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่างกันในน้ำปราศจากไอออน

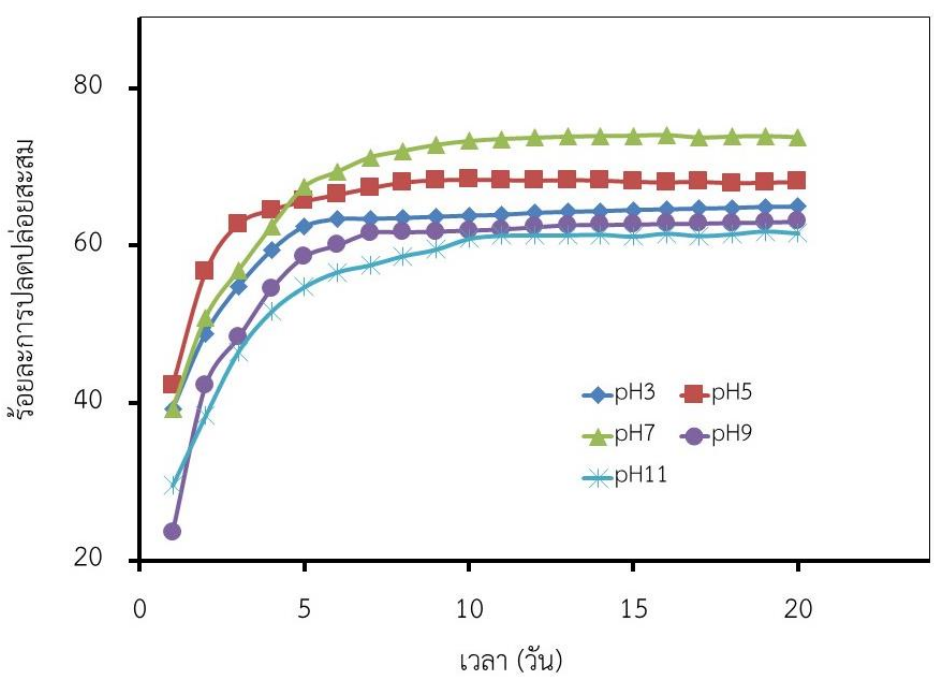
จากภาพที่ 6 กราฟแสดงร้อยละการบวมตัวในน้ำปราศจากไอออนในเวลา 120 นาที ของปุ๋ยไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ พบว่า ปุ๋ยทุกสูตรมีร้อยละการบวมตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-60 นาที และช้าลงในช่วงหลังจากนาทีที่ 60 ปุ๋ยแต่ละสูตรมีร้อยละการบวมตัวจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุดเรียงตามลำดับ ดังนี้ CS/ST-0 CS/ST-25 CS/ST-50 และ CS/ST-75 โดยมีร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 237.83 223.87 205.63 และ 185.95 ตามลำดับ ดังนั้นสูตรปุ๋ยที่ให้ร้อยละการบวมตัวสูงสุดคือ CS/ST-25 และมีค่าใกล้เคียงกับตัวควบคุม CS/ST-0

4. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล

จากการนำตัวอย่างปุ๋ยที่สังเคราะห์ได้ในข้อ 1.2 สูตร CS/ST-25 ซึ่งเป็นสูตรที่มีสมบัติด้านการบวมตัวและการขึ้นรูปที่ดี มาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปลดปล่อยฟอสฟอรัส ได้แก่ ผลของเวลาที่ใช้การปลดปล่อย และผลของความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ได้ผลดังภาพที่ 7 และภาพที่ 8



ภาพที่ 7 ผลของเวลาต่อร้อยละการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสะสมของปุ๋ยไฮโดรเจลสูตร CS/ST-25



ภาพที่ 8 ผลของ pH ต่อร้อยละการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสะสมของปุ๋ยไฮโดรเจลสูตร CS/ST-25

จากภาพที่ 7 จะเห็นได้ว่าร้อยละการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสะสมของปุ๋ยไฮโดรเจลสูตร CS/ST-25 จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่ 6 (39.25-69.38%) และหลังจากนั้นระหว่างวันที่ 7-16 (71.21-74.04%) ปุ๋ยไฮโดรเจลยังคงสามารถปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้อย่างต่อเนื่อง

แต่มีอัตราการปลดปล่อยช้าลงกว่าช่วง 6 วันแรก และหลังจากวันที่ 16 ร้อยละการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสะสมคงที่ และจากภาพที่ 8 ผลการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบส ต่อร้อยละการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสะสมของปุ๋ยไฮโดรเจล เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสะสมของปุ๋ยไฮโดรเจลในวันที่ 20 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบส เพิ่มขึ้นจาก 3 (64.96%) 5 (68.10%) และ 7 (73.76%) และมีค่าลดลงเมื่อค่าความเป็นกรด-เบส เพิ่มเป็น 9 (63.08) และ 11 (61.56%)

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของกลูตารัลดีไฮด์และแป้งมันสำปะหลังต่อการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล พบว่าปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลจะสามารถขึ้นรูปได้และมีลักษณะเป็นเม็ดกลมเมื่อใช้กลูตารัลดีไฮด์ความเข้มข้น 2.5 %w/v ที่ปริมาตร 5 mL และ 10 mL เท่านั้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาตรของ กลูตารัลดีไฮด์เป็น 15 มิลลิลิตร และ 20 มิลลิลิตร พบว่าไม่สามารถขึ้นรูปได้ เนื่องจากสารผสมปุ๋ยมีลักษณะเหนียวและแข็งตัวในที่สุดจึงทำให้ไม่สามารถหยดสารผสมปุ๋ยดังกล่าวลงในสารละลาย NaOH เพื่อขึ้นรูปได้ ทั้งนี้เนื่องจากกลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง เมื่อมีปริมาณมากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางกับโครงสร้างของไคโตซานได้อย่างรวดเร็วจึงทำให้สารผสมปุ๋ยแข็งตัว และไม่สามารถขึ้นรูปได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ อัจจิมา (2560) ที่ทำการสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อมที่เชื่อมขวางด้วยกลูตารัลดีไฮด์ และเมื่อพิจารณาจากการศึกษาผลของปริมาณแป้งมันสำปะหลังต่อการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล พบว่า ปุ๋ยทุกสูตรสามารถขึ้นรูปได้ และมีรูปร่างเม็ดค่อนข้างกลม อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากความสามารถในการบวมตัวพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังจะทำให้ค่าร้อยละการบวมตัวของเม็ดปุ๋ยมีค่าลดลง โดยมีค่าร้อยละการบวมตัวเท่ากับ 223.87 205.63 และ 185.95 เมื่อเพิ่มปริมาตรแป้ง 50 100 และ 150 มิลลิลิตร ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ จึงสามารถนำมาใช้ในกระบวนการกักเก็บสารเพื่อควบคุมการปลดปล่อยแร่ธาตุได้คล้ายกับไคโตซาน (อภิสรา และอภินันท์, 2554) ดังนั้น เมื่อมีปริมาณแป้งมันสำปะหลังมากเกินไปจะทำให้ปุ๋ยดูดซึมน้ำได้ยาก ส่งผลให้ค่าร้อยละการบวมตัวมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งมันสำปะหลังจะทำให้พื้นผิวของเม็ดปุ๋ยมีลักษณะขรุขระ และมีรอยแยกขนาดใหญ่อยู่ทุกบริเวณ เนื่องจากสายพอลิเมอร์ของแป้งมันสำปะหลังสามารถเกิดการเชื่อมขวางเป็นโครงร่างตาข่ายได้ เมื่อเกิดโครงร่างตาข่ายมาก จึงเกิดการอัดแน่นและมีรูพรุนน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Phromsopha และ Baimark (2014) ซึ่งได้ทำการเตรียมอนุภาคบรรจุยาควบคุมการปลดปล่อยจากเจลาติน และแป้งผสมเจลาตินโดยใช้ กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่า สายพอลิเมอร์ในแป้งสามารถเกิดการเชื่อมได้กับกลูตารัลดีไฮด์ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเลือกสภาวะที่เหมาะสมของกลูตารัลดีไฮด์ และแป้งมันสำปะหลังต่อการขึ้นรูปปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลที่ปริมาตร 8 มิลลิลิตร และ 50 มิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งก็คือปุ๋ยสูตร CS/ST-25

จากการนำปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจล CS/ST-25 ซึ่งเป็นปุ๋ยที่มีสมบัติของการบวมน้ำและการขึ้นรูปที่ดีมาศึกษาการปลดปล่อยฟอสฟอรัสพบว่า ปุ๋ยมีแนวโน้มปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้ดีในช่วง 6 วันแรก (39.25%-69.38%) และปลดปล่อยได้ช้าลงระหว่างวันที่ 7-16 (71.21%-74.04%) และเริ่มคงที่หลังวันที่ 16 ทั้งนี้เนื่องจากใน 6 วันแรกปริมาณของฟอสฟอรัสในเม็ดปุ๋ยยังมีความเข้มข้นสูง

จึงสามารถปลดปล่อยได้เร็ว แต่เมื่อผ่านวันที่ 6 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสก็ลดลงเช่นกันส่งผลให้ร้อยละการปลดปล่อยมีค่าเพิ่มเล็กน้อย และคงที่ในที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ ทองใส (2552) และจากการศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบส ต่อร้อยละการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสะสมของปุ๋ยไฮโดรเจล พบว่าค่าร้อยละการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของปุ๋ยไฮโดรเจลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรด-เบส ของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 3 (64.96%) 5 (68.10%) และ 7 (73.76%) ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะกรดจะมีปริมาณไอออนที่อยู่ในสารละลายค่อนข้างสูงจึงทำให้ฟอสฟอรัสถูกปลดปล่อยออกมาได้น้อยลง แต่เมื่อค่าความเป็นกรด-เบส เพิ่มเป็น 9 (63.08) และ 11 (61.56%) พบว่าฟอสฟอรัสปลดปล่อยได้น้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะเบสโครงสร้างของไคโตซานที่อยู่ในเม็ดปุ๋ยจะยึดกันได้แน่นขึ้นจึงส่งผลให้ฟอสฟอรัสที่อยู่ภายในเม็ดปุ๋ยออกมาได้ยาก ดังนั้นสภาวะที่ปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้ดีที่สุดคือค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 7 จากผลการวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าการสังเคราะห์ปุ๋ยไฮโดรเจลควบคุมการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจากไคโตซานและแป้งมันสำปะหลังโดยใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารเชื่อมขวางสูตรต่างๆ ทำให้ได้ปุ๋ยไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการบวมน้ำที่ดี และชะลอการปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้จริง

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของกลูตารัลดีไฮด์และแป้งมันสำปะหลังต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา การบวมตัว และการปลดปล่อยฟอสฟอรัสของปุ๋ยไฮโดรเจลควบคุมการปลดปล่อย พบว่าได้สูตรปุ๋ยที่ดีที่สุดคือ CS/ST-25 ซึ่งมีสัดส่วนของ ไคโตซาน (2 %w/v) : สารละลายแป้งมันสำปะหลัง (1 %w/v) : สารละลายปุ๋ย ($(NH_4)_2HPO_4$, 2.1 mol/dm^3) : กลูตารัลดีไฮด์ (2.5 %w/v) เท่ากับ 200 มิลลิลิตร : 50 มิลลิลิตร : 20 มิลลิลิตร : 8 มิลลิลิตร เมื่อนำทดสอบสมบัติการบวมตัวพบว่าให้ค่าร้อยละการบวมตัวสูงที่สุด (223.87%) และใกล้เคียงกับปุ๋ยสูตรควบคุม CS/ST-0 (237.83%) นอกจากนี้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของปุ๋ยไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีลักษณะไม่ราบเรียบ มีรอยย่น จากภาพถ่ายตัดขวางพบว่ามีความขรุขระ และมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายทำให้สามารถดูดซึมน้ำได้ดี เมื่อนำไปศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปลดปล่อยฟอสฟอรัสพบว่าสามารถปลดปล่อยได้ดีที่สุดในสภาวะที่สารละลายเป็นกลาง (ร้อยละการปลดปล่อยเท่ากับ 74.04) และสามารถปลดปล่อยได้ต่อเนื่องถึง 16 วัน ดังนั้นปุ๋ยไคโตซานไฮโดรเจลควบคุมการปลดปล่อยฟอสฟอรัส จากการวิจัยนี้จึงเป็นปุ๋ยไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติที่ดี และสามารถชะลอการปลดปล่อยฟอสฟอรัสได้จริง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น คำแนะนำเพิ่มเติม จนงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาที่ดิน. (2558). *สถานภาพทรัพยากรดินและที่ดินของประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาที่ดิน.

จารุวรรณ วรรณประเสริฐ, ศุภชัย อำคา และธงชัย มาลา. (2556). ผลของปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าและปุ๋ยเคลือบสารยับยั้งกระบวนการไนตริฟิเคชันต่อการเจริญเติบโตของพริกหวานและไนโตรเจนอนินทรีย์ในชุดดินกำแพงแสน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 2(2), 46-63.

ชินาลัย พริ้งเพราะ และเบ็ญจพร กุลนิตย์. (2561). ผลของการเคลือบปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตและผลิตผลของธัญพืช. *วารสารเกษตรพระวรุณ*, 15(1), 1-16.

ทองใส จำนงการ. (2552). *Micro-reservoir: A novel gel-based controlled release of fertilizer*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี.

ธงชัย มาลา อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ ศุภชัย อำคา สิรินภา ช่วงโอภาส ดุสิต จิตตนูนท์ และไชยา บุญเลิศ. (2556). ผลของปุ๋ยไนโตรเจนละลายช้าที่มีต่อสมบัติบางประการของดิน และการเจริญเติบโตของกล้ามะเขือเทศ. *แก่นเกษตร,* 41(2), 121-134.

นิษฐา คูหะธรรมคุณ และสายันต์ แสงสุวรรณ. (2560). ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยยูเรียเพื่อประยุกต์ใช้ในทางเกษตรกรรม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 19(3), 32-44.

รัดเกล้า ภูติวรนาถ. (2539). *การเกิดโครงร่างตาข่ายของแผ่นฟิล์มไคโตแซนโดยการใช้กลูตารัลดีไฮด์เป็นสารช่วยในการเกิดโครงร่างตาข่าย*.วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วารุณี ตานันต์ และสายันต์ แสงสุวรรณ. (2557). พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี,* 16(2), 63-81.

สุปราณี แก้วภิรมย์. (2562). *ปุ๋ยเคมีชนิดควบคุมการปลดปล่อยได้.* ค้นเมื่อ 15 มกราคม 2562, จาก: https://www.thailandtechshow.com/view_techno.php?id=152.

อภิสรา ศรีสายหยุด และอภินันท์ สุทธิธารธวัช. (2554). การเตรียมผงแป้งที่ถูกเชื่อมขวางโมเลกุลผ่านการอบแห้งแบบพ่นฝอย. ใน *การประชุมวิชาการนานาชาติ "วิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21* (หน้า 1-5). สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อัจจิมา สุทธิชูจิต. (2560). *ผลของกลูตารัลดีไฮด์ต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งท้าวยายม่อม.* วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.

Akakuru, O.U. and Isiuku, B.O. (2017). Chitosan hydrogels and their glutaraldehyde-crosslinked counterparts as potential drug release and tissue engineering systems-synthesis, characterization, swelling kinetics and mechanism. *Journal of Physical Chemistry and Biophysics,* 7(3), 1-7.

Phromsopha, T. and Baimark, Y. (2014). Preparation of starch/gelatin blend microparticles by a water-in-oil emulsion method for controlled release drug delivery. doi.org/10.1155/2014/829490. *International Journal of Biomaterials* 2014, Article ID 829490, 1-6.