

การพัฒนาไฮโดรเจลแป้งมันสำปะหลัง สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุ้มน้ำในการเกษตร

เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์^{1*}, จัสมิน สังเกตกิจ², จุฑานาถ เพ็งพินิจ²

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร

²สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author email: b.piangruetai@gmail.com

ได้รับบทความ: 18 สิงหาคม 2566

ได้รับบทความแก้ไข: 20 พฤศจิกายน 2566

ยอมรับตีพิมพ์: 23 พฤศจิกายน 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเตรียมไฮโดรเจลจากแป้งมันสำปะหลัง (CS) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) โดยใช้กรดซิตริก (CA) และกรดทาร์ทาริก (TA) เป็นสารเชื่อมขวาง สำหรับพัฒนาเป็นวัสดุอุ้มน้ำในดิน จากผลการทดสอบไฮโดรเจลที่เตรียมจาก CS25%wt และ CA2%wt มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุดที่ 74.66% ในระยะเวลา 72 ชั่วโมง ไฮโดรเจลที่มี CA เป็นสารเชื่อมขวางส่งผลให้มีค่าปริมาณน้ำคงอยู่มากกว่าการใช้ TA ผลการทดสอบการย่อยสลายในดินหลังจาก 28 วันพบว่าไฮโดรเจลมีการหายไปของน้ำหนักเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักเดิมถึงร้อยละ 60 ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายบางส่วนของแป้งมันสำปะหลัง การทดสอบการทนต่อการขาดน้ำของต้นถั่วเขียว เมื่อผ่านไป 14 วันพบว่าต้นถั่วเขียวที่ปลูกในดินผสมไฮโดรเจลสูตร CS30%wt ที่มี CA2%wt ยังสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุดเนื่องจากน้ำถูกกักเก็บไว้ในดินได้ ดังนั้นไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซึมน้ำทางการเกษตรได้

คำสำคัญ ไฮโดรเจล/ แป้งมันสำปะหลัง/กรดซิตริก/ กรดทาร์ทาริก/ วัสดุอุ้มน้ำ

Development of Cassava Starch Hydrogels for Water-Holding Materials in Agriculture Applications

Piangruetai Boonprasith^{1*}, Jasmin Sangketkit², Jutanat Pengpinij²

¹Medical science Program, Faculty of Science and Technology,
Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok

²Industrial Chemistry Program, Faculty of Science and Technology,
Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok

*Corresponding author email: b.piangruetai@gmail.com

Received: 18 August 2023

Revised: 20 November 2023

Accepted: 23 November 2023

Abstract

The objective of this research was to study the effect of hydrogel preparation from cassava starch (CS) and polyvinyl alcohol (PVA) by using citric acid (CA) and tartaric acid (TA) as crosslinking agents for developing adsorbent materials in soil. The results showed that the hydrogel prepared from CS25%wt mixed with CA2%wt had the highest percentage of water adsorption around 74.66% for 72 h. The hydrogels crosslinked with CA had higher water retention than those with TA. The biodegradability study showed that after 28 days of exposure, the hydrogels degraded to 60% of their own mass because some of the CS degraded from the hydrogel. After 14 days of dehydration, mung bean in soil that contained a mixture of hydrogel CS30%wt with CA2%wt had the greatest growth because water was collected in the soil. Therefore, the prepared hydrogels could be an alternative water adsorbent for agricultural applications.

Keywords: Hydrogel/ Cassava starch/ Citric acid/ Tartaric acid/
Water adsorbent

บทนำ

ปัญหาดินสำหรับการทำเกษตรกรรมที่มีความแห้งแล้งสูงและสภาพอากาศที่ทำให้มีฝนตกน้อยนั้น ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตของเกษตรกรเป็นอย่างมาก เนื่องจากความชื้นในดินมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งการควบคุมความชื้นของดินให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละชนิดควรอยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 ถ้าน้อยเกินไปจะเกิดสภาวะวิกฤติ สามารถทำให้พืชแห้งและเหี่ยวเฉา โดยทั่วไปมักมีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดความชื้นในดินเพื่อปรับเพิ่มหรือลดการให้น้ำกับพืชได้ แต่ในพื้นที่ที่น้ำแล้งมากถ้ามีวัสดุที่สามารถดูดซับความชื้นหรือโอบอุ้มน้ำไว้ในดินได้ยาวนานขึ้นจะทำให้สามารถลดความขาดแคลนน้ำของพืชผลการเกษตรลงได้ ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ สามารถดูดซับน้ำหรือสารละลายไว้ในโครงสร้างได้ในปริมาณมาก โดยไม่เกิดการละลาย สามารถใช้เป็นตัวช่วยในการอุ้มน้ำและแร่ธาตุต่างๆ ในดินเพื่อไม่ให้ถูกชะล้าง ด้านเกษตรกรรม [1] ช่วยลดปริมาณการสูญเสียพืชจากการขาดน้ำและเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชได้ [2-3]

ไฮโดรเจลสามารถผลิตได้จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ อาทิเช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol, PVA) [4] และผลิตได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติ ซึ่งมีข้อดีของพอลิเมอร์ธรรมชาตินั้นสามารถปลูกทดแทนได้ใหม่ ราคาถูก มีความปลอดภัย มีความเป็นขี้ (Hydrophilic) และย่อยสลายได้ทางชีวภาพ วัตถุดิบจากธรรมชาติที่ได้มีการนำมาผลิตไฮโดรเจลแล้วได้แก่ เซลลูโลส [5] ไคโตซาน [6] ยางธรรมชาติ [7] และพอลิแซคคาไรด์ อาทิเช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลี แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวโพด เป็นต้น [8-9]

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava starch, CS) เป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยโครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินเป็นโครงสร้างหลัก มีความแข็งแรงของโครงสร้างสูงเนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสมาก และสามารถดูดซับน้ำได้เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างโมเลกุล [10] สามารถผลิตได้มากในประเทศไทย มีราคาถูก และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลจากแป้งยังมีข้อด้อยคือมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้ำที่ต่ำและต้องการกระบวนการทางเคมีที่สามารถทำให้ไฮโดรเจลสามารถที่จะรักษาน้ำไว้ในโครงสร้างของไฮโดรเจลได้มากขึ้น แต่ก็ยังไม่สามารถทำให้อายุการใช้งานของไฮโดรเจลยาวนานขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดผสม PVA ที่เป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) ที่มีความสามารถละลายน้ำได้ ผสมเข้ากันได้กับแป้งมันสำปะหลัง และย่อยสลายในดินได้ช้ากว่าแป้งมันสำปะหลัง [11]

กระบวนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ การเติมสารเชื่อมขวางทางเคมี (Crosslinking agent) ซึ่งเป็นสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันตั้งแต่ 2 หมู่เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางภายในสายพอลิเมอร์หลัก อาจเกิดผ่านปฏิกิริยาแบบควบแน่น (Condensation

reaction) และแบบเติม (Addition reaction) ทำให้ได้ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างแบบร่างแหสามารถกักเก็บน้ำและคงรูปไว้ได้ การเชื่อมขวางโดยการใช้สารเชื่อมขวางมีการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย เช่นในงานวิจัยของ Chang [5] ที่สังเคราะห์ไฮโดรเจลเซลลูโลสโดยใช้เอพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin, EP) เป็นสารเชื่อมขวางทำให้ได้ไฮโดรเจลที่มีการบวมตัวสูงเมื่ออยู่ในสารละลายไฮโปโทนิก ซึ่งการใช้สารเคมีเชื่อมขวางบางชนิดนั้นเป็นสารที่มีพิษ ส่งผลต่อการนำไฮโดรเจลไปใช้งานด้านเกษตรกรรมที่อาจเจือปนลงสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณที่เกินกำหนด ด้วยเหตุดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาหาสารเคมีที่เป็นพิษน้อยลง ราคาถูกและสามารถปรับปรุงสมบัติไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการในการใช้งานในการเกษตรได้ โดยสารเชื่อมขวางที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ กรดซิตริก (Citric acid, CA) และกรดทาร์ทาริก (Tartaric acid, TA) ซึ่งเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยาและอาหาร แต่มีราคาถูกและมีโครงสร้างของหมู่คาร์บอกซิลที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับโมเลกุลของแป้งได้ โดย CA และ TA จะเกิดการเชื่อมขวางกับโมเลกุลของ CS ผ่านปฏิกิริยาควบนั่นเอสเทอร์ิฟิเคชัน (Esterification) [12]

ในงานวิจัยนี้จะทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับอุ้มน้ำเพื่อคงความชื้นในดินจากแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริกเป็นสารเชื่อมขวาง และทำการศึกษสมบัติการดูดซึมน้ำ ปริมาณน้ำคงอยู่ สมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพในดิน เสถียรภาพทางความร้อน และศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลต่อการปลูกพืช โดยพืชที่ทดลองปลูกคือต้นถั่วเขียวที่ต้องมีการใช้น้ำปริมาณมากเพื่อการเจริญเติบโต [13]

วัสดุและวิธีการ

1. สารเคมีและอุปกรณ์

แป้งมันสำปะหลัง ยี่ห้อปลาไทย 5 ดาว กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก เกรดวิเคราะห์ จากบริษัท QReC พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เกรดปฏิบัติการ จากบริษัท chem-supply โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate, KPS) เกรดปฏิบัติการ จากบริษัท Ajax Finechem เมล็ดถั่วเขียว ทรายไร้พิษภัย และดินปลูกต้นไม้ ยี่ห้อดินสีดำ เครื่องแก้วและอุปกรณ์เคมี แม่พิมพ์ซิลิโคน เครื่องให้ความร้อนและปั่นกวนยี่ห้อ IKA

2. วิธีการสังเคราะห์และขึ้นรูปไฮโดรเจล

เตรียมส่วนผสมไฮโดรเจล ตามอัตราส่วนในตารางที่ 1 เริ่มจากการนำ PVA ผสมกับน้ำกลั่นและให้ความร้อน ช่วงอุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส จนกระทั่ง PVA ละลายหมดจนได้สารละลายใส นำสารละลายใสเติมลงใน CS และให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 70-80 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีขาวเป็นหนืดใส จากนั้น

เติมสารเชื่อมขวาง CA หรือTA และ KPS ตามลำดับ ทำการปั่นกวนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันใช้เวลา 10 นาที จากนั้นเทสารละลายชนิดขณะร้อนใส่ในแม่พิมพ์ยางแล้วตั้งทิ้งไว้ 5 วัน จากนั้นเก็บใส่ถุงกันความชื้น

3. การศึกษาคุณสมบัติของไฮโดรเจล

3.1 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจล ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โหมด ATR ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One ที่ความยาวคลื่น $400 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$

3.2 ศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจล โดยเตรียมชิ้นตัวอย่างไฮโดรเจลขนาด $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ เซนติเมตร ชั่งน้ำหนัก จากนั้นแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 40 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง ($30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) นำไฮโดรเจลขึ้นมาชั่งน้ำหนักทุก 1, 3, 6, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ 1 โดยที่ W_1 คือน้ำหนักไฮโดรเจลก่อนแช่น้ำ และ W_2 คือน้ำหนักไฮโดรเจลหลังแช่น้ำที่เวลาต่าง ๆ

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad \text{สมการที่ 1}$$

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของสารเคมีในการขึ้นรูปไฮโดรเจล

ลำดับ	สูตรไฮโดรเจล	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)					
		CS	น้ำกลั่น	PVA	CA	TA	KPS
1	CS25	25	75	-	-	-	-
2	CS30	30	70	-	-	-	-
3	CS25CA2.	25	70	2.5	2	-	0.5
4	CS25CA2.5	25	69.5	2.5	2.5	-	0.5
5	CS25CA3	25	69	2.5	3	-	0.5
6	CS30CA2	30	65	2.5	2	-	0.5
7	CS30CA2.5	30	64.5	2.5	2.5	-	0.5
8	CS30CA3	30	64	2.5	3	-	0.5
9	CS25TA2	25	70	2.5	-	2	0.5
10	CS25TA2.5	25	69.5	2.5	-	2.5	0.5
11	CS25TA3	25	69	2.5	-	3	0.5
12	CS30TA2	30	65	2.5	-	2	0.5
13	CS30TA2.5	30	64.5	2.5	-	2.5	0.5

ลำดับ	สูตรไฮโดรเจล	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)					
		CS	น้ำกลั่น	PVA	CA	TA	KPS
14	CS30TA3	30	64	2.5	-	3	0.5

3.3 ศึกษาหาปริมาณน้ำคงอยู่ (Water retention, WR) เตรียมชิ้นงานไฮโดรเจลตัวอย่างที่มีขนาด $1.5 \times 1.5 \times 1.5$ เซนติเมตร จากนั้นนำไฮโดรเจลไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (30°C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานไฮโดรเจลออกมาซับแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก บันทึกน้ำหนักไฮโดรเจลเป็นน้ำหนักเริ่มต้น และวางทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้อง (30°C) แล้วชั่งน้ำหนักทุกชั่วโมงหรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณหาปริมาณน้ำคงอยู่ของไฮโดรเจลตามเวลา ดังสมการที่ 2 [8]

$$\text{ร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่} = \frac{\text{ปริมาณน้ำ ณ เวลาใด}}{\text{ปริมาณน้ำเริ่มต้น}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 2}$$

3.4 ศึกษาสมบัติย่อยสลายในดินของไฮโดรเจล เตรียมชิ้นงานไฮโดรเจลให้ได้ขนาด $1 \times 1 \times 1$ เซนติเมตร นำตัวอย่างแช่ในน้ำกลั่น 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักจากนั้นฝังลงในดิน ความลึก 5 เซนติเมตร นำชิ้นงานออกมาชั่งน้ำหนักเมื่อครบ 7, 14, 21 และ 28 วัน ก่อน ชั่งน้ำหนักใช้แปรงเล็กๆ ปัดดินออกก่อน คำนวณหาร้อยละการย่อยสลายของไฮโดรเจลดังสมการที่ 3 โดยที่ W_1 คือน้ำหนักก่อนฝังดิน W_2 คือน้ำหนักหลังการฝังดินวันที่ 7, 14, 21 และ 28

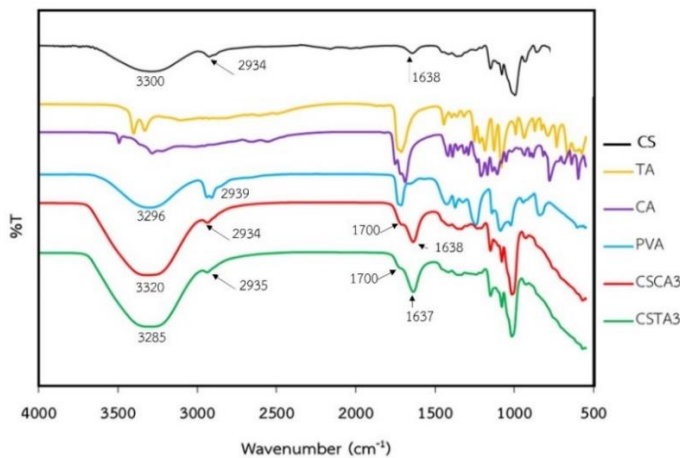
$$\text{ร้อยละการย่อยสลาย} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad \text{สมการที่ 3}$$

3.5 ศึกษาสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) Netzsch รุ่น TG 209 F3 Tarsus ที่อุณหภูมิห้องจนถึง 600°C ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยมีอัตราการให้ความร้อนเท่ากับ 10°C ต่อนาที

3.6 ศึกษาสมบัติไฮโดรเจลต่อการปลูกพืช โดยปรับปรุงวิธีการทดสอบจากชัยวุฒิ [14] เริ่มจากการนำถั่วเขียวแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการปลูกลงดิน 3 วัน ใส่เมล็ดต้นถั่วเขียวกระถางละ 2 ต้น ในดินลึก 5 เซนติเมตร รดน้ำ 100 มิลลิลิตร เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำไฮโดรเจล ขนาด $1 \times 1 \times 1$ เซนติเมตร ใส่ในกระถางที่ปลูกถั่วเขียวกระถางละ 4 ชั้น ฝังในดินลึก 5 เซนติเมตร รดน้ำ 100 มิลลิลิตรในวันแรกจากนั้นงดการรดน้ำ สังเกตและบันทึกผลทุก 7 วัน จนครบ 14 วัน

ผลการศึกษา

1. ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของไฮโดรเจลจากแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการใช้กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริกเป็นสารเชื่อมขวาง ถูกพิสูจน์การเกิดโครงสร้างร่างแหในโครงสร้างด้วยผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเครื่อง FTIR โหมด ATR ดังภาพที่ 1 พบว่า สเปกตรัมของไฮโดรเจลที่มีสารเชื่อมขวางกรดซิตริก และกรดทาร์ทาริกร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก (CSCA3, CSTA3) พีคส่วนใหญ่มีตำแหน่งสอดคล้องกันที่เลขคลื่นในช่วง $3200-3500\text{ cm}^{-1}$ เป็นการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) O-H stretching และพีคที่ 2900 cm^{-1} เป็นการสั่นของ C-H Stretching ที่มีอยู่มากในแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [15] นอกจากนี้ในช่วงของการดูดกลืนแสง $1,700\text{ cm}^{-1}$ ไฮโดรเจลที่มีการเติมสารเชื่อมขวางมีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น แสดงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=O stretching ซึ่งคาดว่าเป็นหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์จากการเชื่อมขวางของโมเลกุลแป้งมันสำปะหลังกับกรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก [16-17] และพีคในช่วงค่าดูดกลืนแสง $1100-990\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีคของการสั่นของ C-O stretching ใน C-O-C และ C-O-H ในวงไกลโคซิดิกของ CS [12]

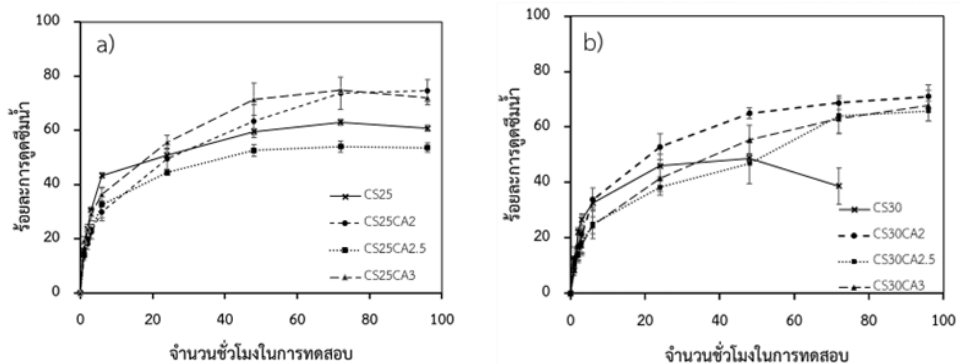


ภาพที่ 1 สเปกตรัม FTIR-ATR ของไฮโดรเจลแป้งมันสำปะหลังผสมสารเชื่อมขวางชนิดกรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก

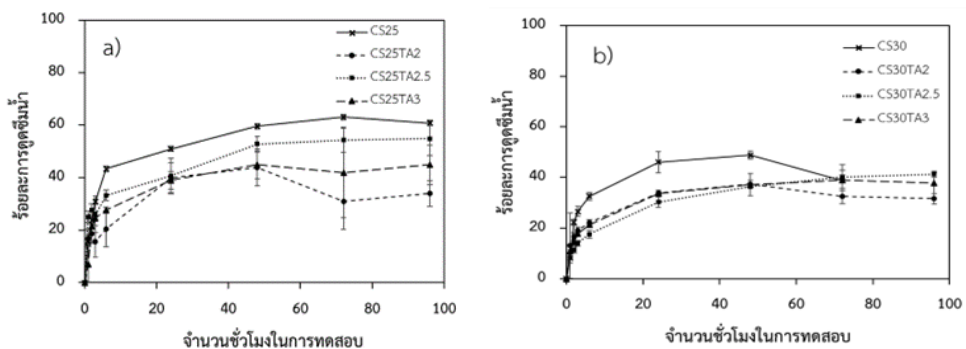
2. ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วน CS แตกต่างกันที่ร้อยละ 25 และ 30 โดยน้ำหนัก มีชนิดและปริมาณของสารเชื่อมขวางที่แตกต่างกันร้อยละ 2.5 และ 3 โดยน้ำหนักพบว่า การดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลมีค่าสูงที่สุดในไฮโดรเจลสูตร CS25CA2 โดยมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงสุดใน 72 ชั่วโมงที่ร้อยละ 74.66 (ภาพที่ 2a) ปริมาณ CS มีผลต่อการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจล โดยพบว่าไฮโดรเจลที่มี CS ร้อยละ 25 มีค่า

ร้อยละการดูดซึมน้ำมากกว่าไฮโดรเจลที่มีปริมาณ CS ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก โดยร้อยละการดูดซึมน้ำสูงกว่าประมาณร้อยละ 5-10 (ภาพที่ 2a และ 2b)

ผลของชนิดสารเชื่อมขวางที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าร้อยละการดูดซึมน้ำ ดังในภาพที่ 2 และ 3 ไฮโดรเจลที่ใช้กรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวางให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากกว่าไฮโดรเจลสูตรที่ใช้กรดทาร์ทาริก เมื่อเปรียบเทียบสูตรที่ให้ค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงสุดของกรดซิตริกที่สูตร CS25CA2 มีค่าเท่ากับ 74.66 และไฮโดรเจลที่ใช้กรดทาร์ทาริกที่สูตร CS25TA2.5 มีค่าร้อยละดูดซึมน้ำสูงสุดเท่ากับ 54.35 จะเห็นได้ว่ามีค่าแตกต่างกันถึงร้อยละ 20

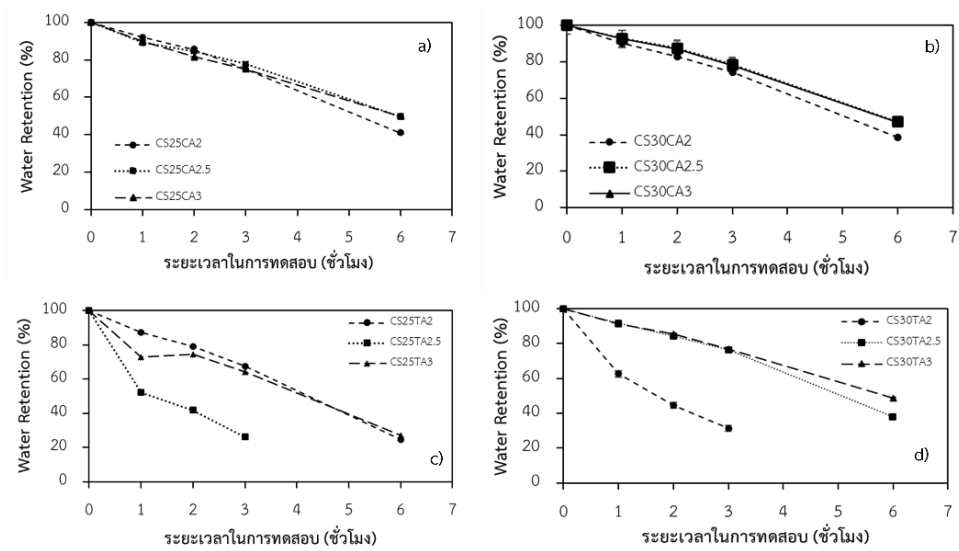


ภาพที่ 2 ร้อยละการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจล a) ไฮโดรเจลที่มี CS ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก b) ไฮโดรเจลที่มี CS ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่มี CA เป็นสารเชื่อมขวาง



ภาพที่ 3 ร้อยละการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจล a) ไฮโดรเจลที่มี CS ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก b) ไฮโดรเจลที่มี CS ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่มี TA เป็นสารเชื่อมขวาง



3. ผลการศึกษาปริมาณน้ำค้างอยู่ การหาความสามารถในการรักษาโมเลกุลน้ำของไฮโดรเจลเมื่อปล่อยให้อยู่ในสภาวะที่โมเลกุลน้ำสามารถระเหยออกไปจากโครงสร้างไฮโดรเจลได้ [8] ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4 ร้อยละปริมาณน้ำค้างอยู่ของไฮโดรเจล ณ เวลาต่างๆ เมื่อระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มขึ้นร้อยละปริมาณน้ำที่คงอยู่ในโครงสร้างไฮโดรเจลมีปริมาณลดลง โดยปริมาณของ CS ไม่ส่งผลต่อปริมาณน้ำค้างอยู่เมื่อเทียบกับชนิดของสารเชื่อมขวาง โดยไฮโดรเจลสูตรที่มี CA เป็นสารเชื่อมขวาง เมื่อทดสอบที่ระยะเวลา 6 ชั่วโมง ร้อยละปริมาณน้ำค้างอยู่ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 50 แต่มากกว่าไฮโดรเจลสูตรที่ใช้ TA เป็นสารเชื่อมขวาง



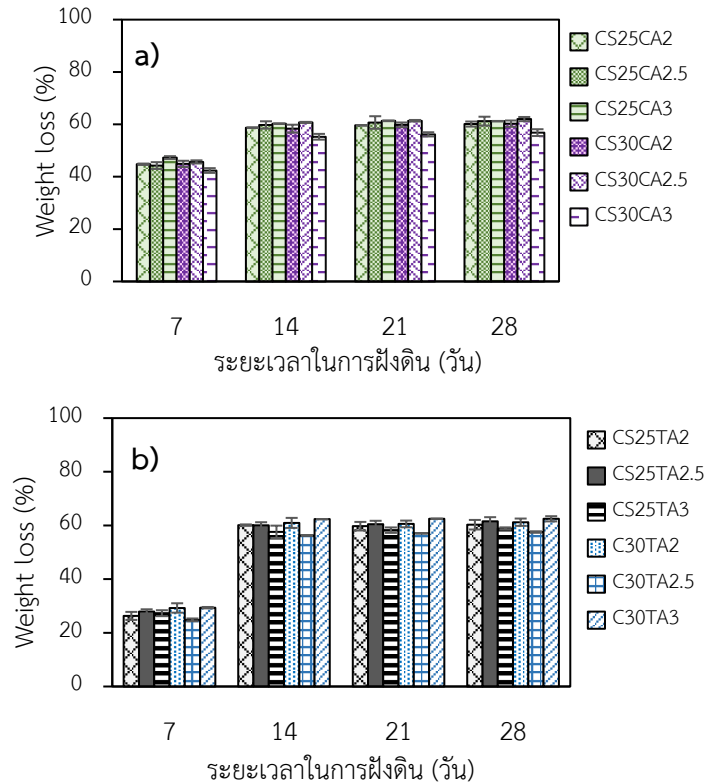
ภาพที่ 4 ร้อยละปริมาณน้ำค้างอยู่ของไฮโดรเจล a) และ b) ไฮโดรเจลที่มี CS ร้อยละ 25 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่มี CA เป็นสารเชื่อมขวาง c) และ d) ไฮโดรเจลที่มี CS ร้อยละ 25 และ 30 โดยน้ำหนัก ที่มี TA เป็นสารเชื่อมขวาง

4. ผลการทดสอบย่อยสลายในดินของไฮโดรเจลลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลเมื่อทดสอบการย่อยสลายในดินของสูตรที่ใช้กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการศึกษาการย่อยสลายในดินของไฮโดรเจล

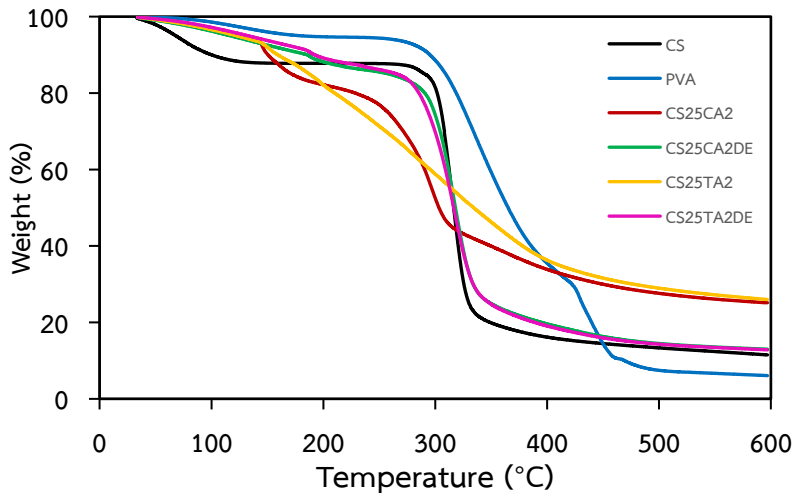
ไฮโดรเจล	ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลขณะทดสอบการย่อยสลายในดิน				
	เริ่มต้น	7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
CS25CA2					
CS25TA2					

ผลการทดสอบตั้งแต่เริ่มต้น 7, 14, 21 และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลทั้ง 2 สูตรที่ใช้สารเชื่อมขวางแตกต่างกัน มีลักษณะเปลี่ยนจากนิ่ม ยืดหยุ่นได้เป็นโครงสร้างที่มีความแข็ง แห้ง และมีเศษดินที่ไม่สามารถกำจัดออกไปได้ ไม่มีลักษณะยืดหยุ่นอุ้มน้ำ เมื่อศึกษาร้อยละน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานไฮโดรเจล (%Weight loss) ดังภาพที่ 5 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการทดสอบผ่านไป 7 วัน ไฮโดรเจลที่มี CS ร้อยละ 25 และ 30 และใช้ CA เป็นสารเชื่อมขวางมีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปอยู่ที่ร้อยละ 40 แต่ไฮโดรเจลสูตรที่ใช้ TA เป็นสารเชื่อมขวางมีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปอยู่ที่ประมาณร้อยละ 20 แสดงว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีการใช้ CA ย่อยสลายได้รวดเร็วกว่าไฮโดรเจลที่มีการใช้ TA จากนั้นตั้งแต่วันที่ 14 เป็นต้นไปไฮโดรเจลทุกสูตรมีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปคงที่ที่ร้อยละ 60

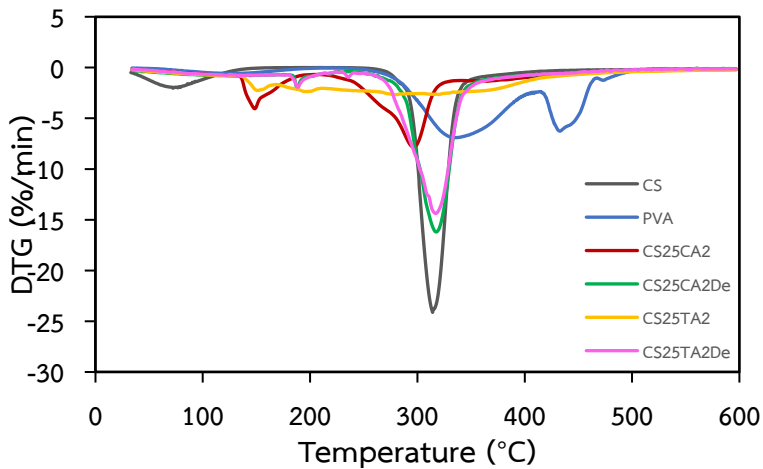


ภาพที่ 5 ร้อยละน้ำหนักไฮโดรเจลที่หายไปในการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินของไฮโดรเจล a) กรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวาง b) กรดทาร์ทริกเป็นสารเชื่อมขวาง

5. ผลการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของไฮโดรเจล จากผลการทดสอบด้วย TGA ดังภาพที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าแป้งมันสำปะหลังบริสุทธ์ (CS) มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน 2 ช่วง ช่วงแรกที่มีอุณหภูมิ 70-100 °C เป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำหรือความชื้น ช่วงที่ 2 เป็นการสลายตัวขององค์ประกอบในโมเลกุลแป้งมันสำปะหลัง [16] ร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 76.28 และจากกราฟ DTG ภาพที่ 7 อุณหภูมิที่องค์ประกอบแป้งมันสำปะหลังสลายตัวอยู่ที่ 314.2 °C ในส่วนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนทั้งหมด 3 ช่วง ช่วงแรกที่มีอุณหภูมิ 60-160 °C เป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำของตัวอย่างชิ้นงาน ช่วงที่ 2 คือช่วงอุณหภูมิ 260-400 °C เกิดจากปฏิกิริยากำจัดน้ำ (dehydration) ทำให้เกิดโครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่ (polyene) ขั้นตอนนี้มีน้ำหนักที่หายไปถึงร้อยละ 62.70 และที่มีอุณหภูมิสลายตัวที่ 335.6 °C และขั้นที่ 3 มีอุณหภูมิสลายตัวอยู่ที่ 432.9 °C เป็นช่วงที่โครงสร้างพอลิเมอร์ที่มีพันธะคู่เปลี่ยนจากโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากเป็นพอลิเมอร์น้ำหนักโมเลกุลน้อย [18]



ภาพที่ 6 กราฟ TGA ของแป้งมันสำปะหลัง (CS) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ไฮโดรเจลสูตรที่มีกรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวางก่อนย่อยสลาย (CS25CA2) หลังย่อยสลาย (CS25CA2DE) ไฮโดรเจลสูตรที่มีกรดทาร์ทาริกเป็นสารเชื่อมขวางก่อนย่อยสลาย (CS25TA2) หลังย่อยสลาย (CS25TA2DE)


















ภาพที่ 7 กราฟ DTG ของแป้งมันสำปะหลัง (CS) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) ไฮโดรเจลสูตรที่มีกรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวางก่อนย่อยสลาย (CS25CA2) หลังย่อยสลาย (CS25CA2DE) ไฮโดรเจลสูตรที่มีกรดทาร์ทาริกเป็นสารเชื่อมขวางก่อนย่อยสลาย (CS25TA2) หลังย่อยสลาย (CS25TA2DE)

ผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่หายไปกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น(ภาพที่ 7) ของไฮโดรเจล CS25CA2 มีช่วงอุณหภูมิสลายตัว 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิ 120-180 °C เป็นการสลายตัวของโมเลกุลน้ำหรือความชื้นที่ถูกดูดซึมไว้ด้วยโครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจล โดยในช่วงนี้มีร้อยละน้ำหนักที่หายไปเท่ากับ 18.39 ที่อุณหภูมิสลายตัวสูงที่สุด 148.5 °C อุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 2 อยู่ในช่วง 200-320 °C ที่อุณหภูมิสลายสูงที่สุด 296.5 °C ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แล้วพบว่ามีความต่ำกว่า สำหรับไฮโดรเจลที่มีกรดทาร์ทาริก CS25TA2 พบว่ามีเสถียรภาพทางความร้อนน้อยกว่าไฮโดรเจลที่มีกรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวาง โดยอุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่ 2 น้อยกว่าโดยอยู่ที่ 279.7 °C

6. ผลการศึกษสมบัติไฮโดรเจลต่อการเจริญเติบโตของต้นถั่วเขียว ลักษณะการเจริญเติบโตของต้นถั่วเขียวซึ่งเป็นพืชตัวแทนที่ถูกปลูกด้วยดินผสมไฮโดรเจล ที่ใช้เวลาในการทดสอบ 14 วัน แสดงดังตารางที่ 3 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเมื่อทดลองปล่อยให้ต้นถั่วเขียวขาดน้ำเป็นเวลา 7 วัน ต้นถั่วเขียวที่ปลูกด้วยดินที่ไม่ผสมไฮโดรเจลและดินที่ผสมไฮโดรเจลนั้นเริ่มเหี่ยวแห้ง ต้นถั่วเขียวที่เติบโตในดินที่ฝังไฮโดรเจลสูตรที่มีการใช้กรดทาร์ทาริกมีความสดของใบมากกว่าสูตรที่ใช้กรดซิตริก เมื่อทดลองปล่อยให้ต้นถั่วเขียวขาดน้ำเป็นระยะเวลา 14 วัน ต้นถั่วเขียวที่ปลูกในดินที่ไม่มีไฮโดรเจลนั้นไม่สามารถเจริญเติบโตได้ แต่ต้นถั่วเขียวที่ปลูกด้วยดินผสมไฮโดรเจล สูตร CS30CA2 และ CS25TA2 ยังมีการเจริญเติบโตได้ เนื่องจากดินผสมที่ใช้ปลูกมีความสามารถในการรักษาความชุ่มชื้นในดินไว้ได้ดีกว่าสูตรอื่น ซึ่งมาจากการฝังไฮโดรเจลที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำไว้ในโครงสร้างได้มาก

ตารางที่ 3 ผลการศึกษาการเจริญเติบโตของต้นถั่วเขียวที่ปลูกด้วยดินผสมไฮโดรเจล

ดินผสม ไฮโดรเจล	ลักษณะทางกายภาพของต้นถั่วเขียว		
	เริ่มต้น	ไม่รดน้ำ 7 วัน	ไม่รดน้ำ 14 วัน
ดินไม่ผสม ไฮโดรเจล			
CS25CA2			
CS30CA2			
CS25TA2			
CS30TA2			

วิจารณ์

การเตรียมไฮโดรเจลจาก CS ผสมPVAที่มีการใช้ CA และ TA เป็นสารเชื่อมขวาง สำหรับใช้เป็นวัสดุอุ้มน้ำในดินนั้น โครงสร้างทางเคมีของไฮโดรเจลมีผลต่อการดูดซึมน้ำเป็นอย่างมาก จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีของไฮโดรเจลที่เตรียมได้นั้นประกอบด้วย หมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) กับโมเลกุลน้ำได้ ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซึมน้ำได้ และการเกิดโครงสร้างเชื่อมขวางในโมเลกุลทำให้ไฮโดรเจลสามารถกักเก็บน้ำไว้ในโมเลกุลได้ [16-17]

เมื่อทำการทดสอบหาค่าร้อยละการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลที่มีปริมาณ CS แตกต่าง กันพบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณ CS ร้อยละ 25 มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำมากกว่าสูตรที่มี CS ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อาจเนื่องมาจากในสูตรที่มีปริมาณ CS มากกว่ามีจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่า จึงมีโอกาสเกิดโครงสร้างร่างแหด้วยสารเชื่อมขวางที่เติมลงไปได้

มากกว่าเล็กน้อย ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลที่หนาแน่นขึ้นภายใน ทำให้โมเลกุลน้ำไม่สามารถเข้าสู่โครงสร้างไฮโดรเจลได้ ความยืดหยุ่นในไฮโดรเจลลดลง สอดคล้องกับงานวิจัย พัชรารณณ์ [9] จากการเปรียบเทียบชนิดของสารเชื่อมขวางทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ CA เป็นสารเชื่อมขวางมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำสูงกว่าไฮโดรเจลสูตรที่ใช้ TA เนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีของกรดซิตริกมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ที่มากกว่ากรดทาร์ทาริก ซึ่งเมื่อเกิดการเชื่อมขวางกับโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังแล้วยังมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ อาจสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ มีผลทำให้ร้อยละการดูดซึมน้ำมากกว่าสูตรที่มีการใช้กรดทาร์ทาริก นอกเหนือจากการศึกษาร้อยละการดูดซึมน้ำแล้ว ความสามารถในการรักษาน้ำไว้ในโครงสร้างไฮโดรเจลก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน จะเห็นได้ว่าร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่ เมื่อระยะเวลาในการทดสอบเพิ่มมากขึ้นจนถึงชั่วโมงที่ 6 ร้อยละปริมาณน้ำที่คงอยู่ในโครงสร้างของไฮโดรเจลมีค่าลดลง เนื่องมาจากการสูญเสียโมเลกุลน้ำจากการระเหยสู่บรรยากาศ ไฮโดรเจลสูตรที่ใช้กรดซิตริกเป็นสารเชื่อมขวาง มีร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 50 แต่ยังคงมากกว่าไฮโดรเจลสูตรที่ใช้กรดทาร์ทาริกที่ในบางสูตรปริมาณน้ำลดลงกว่าร้อยละ 50 เมื่อผ่านไปเพียง 3 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการดูดซึมน้ำที่ไฮโดรเจลสูตรที่ใช้กรดซิตริกมีร้อยละการดูดซึมน้ำมากกว่า การที่ไฮโดรเจลนั้นสามารถรักษาน้ำไว้ในโครงสร้างได้ อยู่เมื่อเวลาผ่านไปหลายชั่วโมงเกิดจากการที่หมู่ไฮดรอกซิลเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำ จึงสามารถจับโมเลกุลน้ำให้ระเหยออกไปได้ยาก [8,20]

การเตรียมไฮโดรเจลที่ใช้เป็นวัสดุอุ้มน้ำในดินนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาการย่อยสลายในดินประกอบด้วย จากผลการศึกษาร้อยละน้ำหนัที่หายไปของไฮโดรเจลเมื่อเวลาผ่านไป 28 วันแล้วพบว่า มีร้อยละน้ำหนัที่หายไปสูงถึงร้อยละ 60 ที่เป็นเช่นนี้มีรายงานการศึกษาวิจัยพบว่า การย่อยสลายของไฮโดรเจลที่เกิดจากแป้งมันสำปะหลังผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์นั้น การย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความชื้น และสามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ในดิน โมเลกุลของแป้งส่วนแอลฟาอะไมโลส (α -amylose) ที่เคลื่อนที่ได้โดยง่ายจะถูกละลายก่อน สำหรับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เป็นพอลิเมอร์ ชนิดกึ่งผลึก ส่วนที่เป็นอสัณฐานจะถูกละลายด้วยจุลินทรีย์ [21] สำหรับพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อนำไปทดสอบการย่อยสลายในดิน พอลิเมอร์ผสมจะถูกละลายไปก่อน PVA และแป้งมันสำปะหลัง [21] คาดว่าส่วนที่เหลืออยู่จากการทดสอบการย่อยสลายในดิน 28 วันน่าจะเป็นส่วนของอะไมโลเพกตินที่มีโครงสร้างแบบกึ่งที่มีความเกาะกะ [22] และส่วนที่แป้งมันสำปะหลังหรือพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีการเชื่อมขวางด้วยสารเชื่อมขวางกรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก เมื่อเปรียบเทียบสารเชื่อมขวาง 2 ชนิดที่ใช่พบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีการใช้กรดซิตริกย่อยสลายได้เร็วกว่าคาดมาจากการเข้ากันได้ดี

(Miscibility) ระหว่างแป้งมันสำปะหลัง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และกรดซิตริก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shuai [23] ซึ่งการย่อยสลายในดินที่เร็วกว่าของไฮโดรเจลสูตรกรดซิตริกส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นถั่วเขียวที่ปลูกด้วยดินผสมไฮโดรเจล ทำให้ต้นถั่วเขียวที่ปลูกด้วยดินผสมไฮโดรเจลสูตรกรดซิตริกไม่สามารถเจริญเติบโตได้เนื่องจากการขาดน้ำ ดินที่มีการผสมด้วยไฮโดรเจลที่ใช้กรดทาร์ทาริกสามารถรักษาการเจริญเติบโตของต้นถั่วเขียวได้ดีกว่าเนื่องมาจากการย่อยสลายในดินได้ช้ากว่า ซึ่งทำให้ไฮโดรเจลสามารถรักษาความชื้นในดินไว้ได้ในระยะเวลาที่ยาวนานกว่า

การทดสอบสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลที่เติมสารเชื่อมขวางมีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะโครงสร้างไฮโดรเจลเป็นโครงสร้างร่างแหและมีรูพรุนส่งผลให้เสถียรภาพทางความร้อนของไฮโดรเจลลดลง [9] และนอกจากนี้ไฮโดรเจลมีน้ำหนักของส่วนที่เหลือจากการให้ความร้อนที่ 600 °C หรือสูงกว่าร้อยละ 38.16 คาดว่ามาจากความซับซ้อนของโครงสร้างแป้งมันสำปะหลังกับกรดซิตริกที่เกิดการเชื่อมขวางที่ไม่ย่อยสลาย [19] ผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนของไฮโดรเจลที่มีการเติมสารเชื่อมขวางและผ่านการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินมาแล้ว 28 วัน พบว่า ทั้งสูตรไฮโดรเจล CS25CA2DE และ CS25TA2DE มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและปริมาณแก้วใกล้เคียงกับ CS อันเนื่องมาจากการฝังดินเป็นระยะเวลา 28 วันทำให้เกิดการย่อยสลายองค์ประกอบบางส่วนของไฮโดรเจลไปแล้วบางส่วน

สรุป

จากการศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลสำหรับการนำไปพัฒนาเป็นวัสดุอุ้มน้ำในการเกษตรจากแป้งมันสำปะหลังที่มีการใช้สารเชื่อมขวางแตกต่างกันสองชนิดได้แก่ กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริกนั้น เมื่อพิจารณาผลการทดสอบสมบัติของไฮโดรเจลที่ได้กล่าวมาสูตรของไฮโดรเจลที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นวัสดุอุ้มน้ำในดินต่อไปได้แก่ สูตรไฮโดรเจล CS30CA2 ที่มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 68 และสามารถรักษาปริมาณน้ำคงอยู่เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงไว้ได้อยู่ที่ร้อยละ 40 สำคัญที่สุดคือเมื่อนำไปผสมกับดินปลูกเพื่อปลูกถั่วเขียวสามารถทำให้การเจริญเติบโตของต้นถั่วเขียวเติบโตต่อไปได้แม้ไม่ได้รับการให้น้ำนานถึง 14 วัน แต่ทั้งนี้ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกลไกการปลดปล่อยน้ำในดิน ความสามารถในการนำไฮโดรเจลมาใช้ซ้ำเพื่อความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การทดลองไฮโดรเจลกับพืชชนิดอื่นและปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ผู้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภททุนภายใน ประจำปีงบประมาณ 2565 ขอขอบคุณนักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณาจารย์และสาขาวิทยาศาสตร์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้วัสดุ อุปกรณ์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ตลอดจนให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อผู้วิจัยเสมอมา

เอกสารอ้างอิง

1. Ismail H, Irani M, Ahmad Z. Starch-based hydrogels: present status and applications. *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater* 2013;62(7):411-20.
2. Guo L, Luo D, Li C, FitzGibbon M. Preparation and properties of a slow-release membrane-encapsulated urea fertilizer with superabsorbent and moisture preservation. *Ind Eng Chem Res* 2005;44(12):4206-11.
3. Zohuriaan-Mehr MJ, Omidian H, Doroudiani S, Kabiri K. Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. *J Mater Sci.* 2010;45(21):5711-35.
4. Singh SK, Dhyani A, Juyal DS. Hydrogel: preparation, characterization and applications. *J Pharm Innov.* 2017;6(11):25-32.
5. 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.
6. Peng Z, Peng Z, Shen Y. Fabrication and properties of gelatin/chitosan composite hydrogel. *Polym Plast Technol Eng.* 2011;50(11):1160-4.
7. ชัยวุฒิ วัดจิ่ง, อุมภาพร ไชยสุวรรณ, อุไรวรรณ พันธุ์แก่น, ณัฐติยา ใจภักดี, ทิพย์สุดา บุญประสพ, จิราพร กวานเทียน และคณะ. ผลของสารเชื่อมขวางต่อสมบัติของไฮโดรเจลเชื่อมโยงแบบกึ่งโครงร่างตาข่ายของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง. *วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ* 2556;16(3):131-8.
8. พจนีย์ ทองโพธิ์, พิมภานิจภา กันทาตง, โรเบิร์ต มอลลอย, รัตน์ฐาภัทร บุญเกิด. การสังเคราะห์และสมบัติของแผ่นไฮโดรเจลพอลิ(ไซเตียม 2-อะคริลามิโด-2-เมทิล โพรเพน ซัลโฟเนต) และผลของการเติมแป้งมันสำปะหลังเจลาตินไนซ์ *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา* 2561;23(2):1059-69.

9. พัชรภรณ์ วุฒิเจริญมงคล, ปณิตธร รุ่งรัตนพร, จิตนิภา รุ่งเรืองประภา. การเตรียมและคุณสมบัติของไฮโดรเจลจากแป้งสาลี แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวโพด วิศวกรรมศาสตรมหาสาร 2561;4:3-9.
10. Biduski B, Silva WMF, Colussi R, Halal SLME, Lim LT, Dias ARG, et al. Starch hydrogels: the influence of the amylose content and gelatinization method. *Int J Biol Macromol.* 2018;113:443-9.
11. Wu Z, Wu J, Peng T, Li Y, Lin D, Xing B, et al. Preparation and application of starch/polyvinyl alcohol/citric acid ternary blend antimicrobial functional food packaging films. *Polymers (Basel).* 2017;9(3):102.
12. Keirudin A Z N, Yusof N. Crosslinked carboxymethyl sago starch/citric acid hydrogel for sorption of Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} and Zn^{2+} from aqueous solution. *Polymers (Basel).* 2020;12(11):2465.
13. กรมส่งเสริมการเกษตร. การปลูกถั่วเขียวในฤดูแล้ง. กรุงเทพฯ: นิเวศกรมการพิมพ์; 2560
14. ชัยวุฒิ วัตจิ่ง. ผลของอัตราส่วนยางและแป้งต่อสมบัติของไฮโดรเจลชนิดพอลิเมอร์เชื่อมขวางแบบกิ่งโครงร่างตาข่ายและการประยุกต์ใช้ในการปลูกดาวเรือง.วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 2560;19(1):49-62.
15. เพียงฤทัย บุญประสิทธิ์ ธนพงษ์ เชื้อฉุน ฐัฐวุฒิ รัตนารธรรมวัฒน์ ปวีณา จันทร์สีทอง การเตรียมและวิเคราะห์คุณสมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์. วารสารก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์ 2565; 22(1):28-45.
16. Chen WC, Syed Mohd Judah SNM, Ghazali SK, Munthoub DI, Alias H, Mohamad Z, et al. The effects of citric acid on thermal and mechanical properties of crosslinked starch film. *Chem Eng Trans.* 2021;83:199-204.
17. Seligra PG, Jaramillo CM, Famá L, Goyanes S. Biodegradable and non-retrogradable eco-films based on starch – glycerol with citric acid as crosslinking agent. *Carbohydr Polym.* 2016;138:66-74.
18. Remiš T, Belský P, Kovárik T, Kadlec J, Ghafouri Azar M, Medlín R, et al. Study on structure, thermal behavior, and viscoelastic properties of nanodiamond-reinforced poly (vinyl alcohol) nanocomposites. *Polymers (Basel).* 2021;13(9):1426.

19. Tamer T, Sabet M, Omer A, Abbas E, Eid A, Mohy E, et al. Hemostatic and antibacterial pva/kaolin composite sponges loaded with penicillin-streptomycin for wound dressing applications. *Sci Rep* 2021;11:3428
20. Maleki L, Edlund U, Albertsson AC. Synthesis of full interpenetrating hemicellulose hydrogel networks. *Carbohydr Polym.* 2017;170:254-63.
21. Chen L, Imam SH, Gordon SH, Greene RV. Starch-polyvinyl alcohol crosslinked film-performance and biodegradation. *J Environ Polym Degrad.* 1997;5(2):111-7.
22. Azahari NA, Othman N, Ismail H. Biodegradation studies of polyvinyl-alcohol/corn starch blend films in solid and solution media. *J Phys Sci.* 2011;22(2):15-31.
23. Shuai X, He Y, Asakawa N, Inoue Y. Miscibility and phase structure of binary blends of poly (L-lactide) and poly (vinyl alcohol). *J Appl Polym Sci.* 2001;81(3):762-72.