

การสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลจากน้ำยางพาราโดยวิธีการเชื่อมขวางทางเคมีด้วย ไบโอพอลิเมอร์เพื่อใช้เป็นวัสดุปลูกพืชไร้ดิน

Synthesis of Natural Rubber Hydrogel by Chemical Crosslinking with Biopolymer for Using as Growing Media in Soilless Culture

ทรงชัย แสงแก้ว (Songchai Sangkaew)* คณิดา ตั้งคณานุกรักษ์ (Kanita Tungkananuruk)^{1**}

ดร.สุธี จรรย์สาสวธิวงศ์ (Dr.Suthee Janyasuthiwong)^{***}

(Received: April 16, 2022; Revised: August 2, 2022; Accepted: August 3, 2022)

บทคัดย่อ

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุทางเลือกที่น่าสนใจซึ่งประเทศไทยมีวัตถุดิบที่สามารถนำมาสังเคราะห์อยู่เป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้ากันและคุณสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของไบโอพอลิเมอร์ โดยนำน้ำยางพารา(Nr) เชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking) ด้วย MBA (N,N'-methylene-bis-acrylamide) ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลัง(St) เพคติน(Pt) และไคโตซาน(Ct) อัตราส่วน 3:7, 5:5 และ 7:3 ของปริมาณเนื้อสาร พบว่าอัตราส่วน Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct มีความเข้ากันในทุกอัตราส่วนยกเว้น Nr/Ct ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ การดูดซึมน้ำสูงสุดอยู่ที่ 29.80 เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วน Nr/St 5:5 เช่นเดียวกับการดูดซึมน้ำสารละลายธาตุอาหารอยู่ที่ 13.55 เปอร์เซ็นต์และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 95$) ในส่วนประสิทธิภาพการคงไว้ของน้ำ Nr/Pt 5:5 มีเปอร์เซ็นต์สูงสุดอยู่ที่ 78.24 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ประสิทธิภาพการคงไว้ของสารละลายธาตุอาหาร Nr/St 5:5 สูงสุดอยู่ที่ 90.14 เปอร์เซ็นต์และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 95$) การงอกของเมล็ดผักสลัดกรีนโอ๊คบนแผ่นไฮโดรเจล Nr/St 5:5 มีค่าอยู่ที่ 11.00 เปอร์เซ็นต์และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 95$) รวมถึงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของแผ่นไฮโดรเจลในดินเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา

ABSTRACT

Hydrogel is interesting alternative material which Thailand has a large amount of raw materials that can be synthesized. This research objective was to determine biopolymer compatibility and its potential as a hydroponic material. By chemical crosslinking of Natural rubber (Nr) with MBA (N,N'-methylene-bis-acrylamide) mixed between Cassava starch (St), Pectin (Pt) and Chitosan (Ct) ratios 3:7, 5:5 and 7:3 of the substance content. It found that Nr/St, Nr/Pt and Nr/Ct ratios were compatible in all ratios but Nr/Ct unable to form plate. The highest water absorption at 29.80 % of Nr/St 5:5 same with the absorption of nutrient solution at 13.55 % and not significant ($P \geq 95$). As highest water absorption efficiency Nr/Pt 5:5 at 78.24 %. while the higher nutrient solution absorption efficiency Nr/St 5:5 at 90.14 % and significant ($P \geq 95$). The hydrogel seed germination was 11.00 % not significant ($P \geq 95$). Including the hydrogel degradation in soil increases with time.

คำสำคัญ: ไฮโดรเจล น้ำยางพารา ไบโอพอลิเมอร์

Keyword: Hydrogel, Natural rubber, Biopolymers

¹Corresponding author: kanita.t@ku.ac.th

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

***อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

ไฮโดรเจลมีลักษณะโครงสร้างเป็นโครงร่างตาข่าย (Network) ที่เกิดจากการเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน เช่น -OH, -COOH, -CONH-, NH₂ และ -SOH ซึ่งเป็นหมู่ที่ละลายน้ำจึงทำให้ไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic polymers) ไฮโดรเจลมีลักษณะเป็นกึ่งของแข็งและกึ่งของเหลว สามารถดูดซับน้ำและของเหลวโดยที่ไฮโดรเจลจะไม่ละลาย [1] ไฮโดรเจลมักถูกใช้เป็นสารปรับปรุงสภาพในดินสำหรับพืชโดยจะดูดซับสารอาหารและปลดปล่อยอย่างช้าๆเพื่อให้พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้นานยิ่งขึ้นซึ่งช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้ [2] การปลูกพืชไร้ดินเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมอย่างมากจากผู้บริโภคที่คำนึงถึงสุขภาพและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ [3] ปัจจุบันได้มีการนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้เพื่อเป็นวัสดุปลูกพืชไร้ดิน เช่น ระบบไฮโดรเมมเบรน (Hydro membrane) ใช้แผ่นไฮโดรเจลให้รากพืชยึดเกาะแทนดิน โดยสามารถให้ปุ๋ยในรูปแบบสารละลายธาตุอาหารได้เหมือนกับการใช้ระบบปลูกพืชไร้ดินทั่วไป [4] ไฮโดรเจลทางการค้าส่วนใหญ่เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymers) ที่มีสารตั้งต้นจากปิโตรเลียม เช่น พอลิไวนิล แอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) อะคริเลต พอลิเมอร์ (Acrylate polymers) พอลิ อะคริลาไมด์ (Poly acrylamide) เป็นต้น ข้อดี คือมีความแข็งแรงสูง แต่ย่อยสลายยากและมีมอนอเมอร์ตกค้างในชิ้นงาน เป็นอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม [5] จากสภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นในปัจจุบันจึงมีแนวคิดเคมีสีเขียว (Green chemistry) เป็นศาสตร์ที่มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากจุดเริ่มต้น ปรับเปลี่ยนการใช้วัตถุดิบหลักจากปิโตรเคมีมาใช้วัตถุดิบชีวภาพในรูปแบบต่างๆ เนื่องจากไม่ก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมสามารถย่อยสลายโดยธรรมชาติ ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยและเป็นผู้ผลิตอันดับหนึ่งของภูมิภาคอาเซียน [6-8] ซึ่งมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สูตรทางเคมีคือ C₅H₈ มีชื่อเรียกว่า ไอโซพรีน (Isoprene) และมีการจัดเรียงตัวโมเลกุลของยางธรรมชาติเป็นแบบ *cis*-1,4-polyisoprene น้ำยางสดที่กรีตได้จากต้นยางมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (Dry rubber) ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์แขวนลอยอยู่ในน้ำ อนุภาคของยางจะประกอบด้วยกลุ่มของโปรตีนและไขมัน หากนำน้ำยางที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) จนกระทั่งได้น้ำยางที่มีปริมาณยางแห้งเพิ่มขึ้นเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ เรียกว่า น้ำยางข้น (Concentrated latex) คุณสมบัติเด่นของยางคือ มีความยืดหยุ่น (Elasticity) ติดกัน (Tack) [9-10] ซึ่งสามารถพัฒนายางพาราให้เป็นไฮโดรเจลเพื่อใช้ประโยชน์ในการปลูกพืชลักษณะเดียวกับดินวิทยาศาสตร์ได้ แต่ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำเนื่องจากมีความเป็นไฮโดฟิลิก (Hydrophilic) ต่ำมากเพราะโครงสร้างของโมเลกุลไม่มี -CH₃ เป็น Side groups [11] จึงต้องมีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความชอบน้ำให้กับไฮโดรเจลจากยางพารา โดยทำการผสม แป้งมันสำปะหลัง เพคติน และไคโตซาน จัดอยู่ในกลุ่ม ไบโอฟอลิเมอร์ (Bio polymer) สามารถพบได้ทั่วไปในธรรมชาติและสิ่งมีชีวิต [12]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาการทำแผ่นไฮโดรเจลการด้วยวิธีเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical crosslinking) โดยใช้วัสดุจากธรรมชาติที่จัดหาได้ภายในประเทศไทย เพื่อทดสอบความเข้ากันของไบโอฟอลิเมอร์ ทดสอบคุณสมบัติการดูดซับน้ำและสารละลายธาตุอาหารของแผ่นไฮโดรเจล รวมถึงประสิทธิภาพการคงไว้ของน้ำในแผ่นไฮโดรเจล ทดสอบแผ่นไฮโดรเจลต่อการงอกของเมล็ดพืช และการย่อยสลายในดินของแผ่นไฮโดรเจล

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความเข้ากันจากการเตรียมแผ่นไฮโดรเจลของน้ำยางพาราด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางเคมีที่มีไบโอฟอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบ

2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพขั้นพื้นฐานและกลไกการทำงานของแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากน้ำยางพาราต่ออัตราส่วนของไบโอพอลิเมอร์เพื่อทำเป็นวัสดุปลูกพืชไร้ดิน

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมแผ่นไฮโดรเจล

1.1 จากงานวิจัย [13] น้ำยางพาราเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เติมพอลิซอร์เบต 80 ($C_{64}H_{124}O_{27}$) 5 phr (Part per hundred of rubber) ตามด้วยโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ($K_2S_2O_8$) 1 phr เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา กวนส่วนผสมเป็นเวลา 20 นาที ปรับอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ทำการเชื่อมขวางน้ำยางพาราด้วย MBA (N,N'-methylene-bis-acrylamide) 1 phr เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ได้เป็นไฮโดรเจลเชื่อมขวางแบบกึ่งโครงร่างตาข่าย (Semi interpenetrating polymer network ; Semi-IPN)

1.2 เตรียมสารละลายเจลาตินในซอสของ แป้งมันสำปะหลัง (St) เพคติน (Pt) ความเข้มข้นร้อยละ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในน้ำ ให้ความร้อนสารละลายที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กวนจนสารละลายเปลี่ยนจากสีขุ่นเป็นสารละลายสีใส และทิ้งไว้ให้เย็น ส่วนสารละลายไคโตซาน (Ct) เข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในสารละลายกรดแอสซิดิกเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำน้ำยางพาราที่ทำการเชื่อมขวางโดยสมบูรณ์ผสมกับสารละลายเจลาตินในซอสที่เตรียมไว้โดยแปรตามส่วนผสมดังต่อไปนี้

น้ำยางพารา(Nr) ต่อแป้งมันสำปะหลัง(St) ที่ 3/7, 5/5 และ 7/3 ของปริมาณเนื้อสาร

น้ำยางพารา(Nr) ต่อเพคติน(Pt) ที่ 3/7, 5/5 และ 7/3 ของปริมาณเนื้อสาร

น้ำยางพารา(Nr) ต่อไคโตซาน(Ct) ที่ 3/7, 5/5 และ 7/3 ของปริมาณเนื้อสาร

กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกันได้ไฮโดรเจลเชื่อมขวางแบบกึ่งโครงร่างตาข่าย (Semi interpenetrating polymer network ; Semi-IPN) ของยางธรรมชาติร่วมกับ แป้งมันสำปะหลัง เพคติน และไคโตซาน แล้วเท Semi-IPN Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct ลงแม่พิมพ์จานเลี้ยงเชื้อแบบแก้ว (Petri dish) อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแห้งและนำหนักคง เพื่อเพิ่มความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) แข็งขึ้นตัวอย่างในสารละลาย KOH ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบคุณสมบัติดังต่อไปนี้

2. ศึกษาสมบัติของแผ่นไฮโดรเจล (Semi - IPN Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct)

2.1 ศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำและสารละลายธาตุอาหารที่ใช้สำหรับปลูกพืชไร้ดิน ของแผ่น Semi-IPN Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct จากงานวิจัย [14] เตรียมชิ้นตัวอย่าง ขนาด 1 x 1 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร แช่ในน้ำกลั่นควบคู่ไปกับการแช่ในสารละลายธาตุอาหารปริมาณ 20 มิลลิลิตร 720 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องใช้สมการคำนวณดังนี้ [15]

$$\text{Absorption (\%)} = 100 \times \frac{W_2 - W_1}{W_1}$$

เมื่อ W1 และ W2 เป็นน้ำหนักของ Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct ขณะแห้งและเปียกตามลำดับ

2.2 การทดสอบประสิทธิภาพการคงตัวของน้ำในแผ่นไฮโดรเจล ประยุกต์จากงานวิจัย [13] โดยนำแผ่น Semi-IPN Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct เตรียมขึ้นตัวอย่างขนาด 2 x 2 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทดสอบควบคู่ไปกับสารละลายธาตุอาหารที่ใช้สำหรับปลูกพืชไร้ดิน เมื่อครบกำหนดชั่งน้ำหนัก นำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ใช้สมการคำนวณดังนี้ [16]

$$\text{Absorption efficiency (\%)} = (A_2 / A_1) \times 100$$

เมื่อ A_1 และ A_2 เป็นน้ำหนักของไฮโดรเจลเมื่อใช้งานครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ตามลำดับ

2.3 ทดสอบแผ่นไฮโดรเจลต่อการงอกของเมล็ดพืช ประยุกต์จากงานวิจัย [17] นำแผ่น Semi-IPN Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct ที่เตรียมไว้วางเมล็ดผักสลัดกรีนโอ๊คบนแผ่นไฮโดรเจล 15 เมล็ดต่อ 1 จาน เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตรต่อ 1 กลุ่ม ควบคุม เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมงในที่มืด คำนวณดัชนีการงอกโดยใช้สมการดังนี้ [18]

$$G_{\text{index}} = ((G/G_0) * (L/L_0)) * 100$$

G และ L = จำนวนเมล็ดงอกและความยาวรากขณะใช้ไฮโดรเจลที่ควบคุมตามลำดับ

G_0 และ L_0 = จำนวนเมล็ดงอกและความยาวรากในสภาวะควบคุมปกติตามลำดับ

2.4 ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพในดิน ประยุกต์จากงานวิจัย [16] นำตัวอย่างแผ่น Semi-IPN Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct ขนาด 2×2 เซนติเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ผึ่งดินลึก 7 เซนติเมตร รดน้ำลงดินทุกๆ สัปดาห์ ตลอด 3 เดือน ในแต่ละเดือนนำแผ่นไฮโดรเจลล้างด้วยน้ำกลั่น นำไปบดที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที คำนวณใช้สมการดังนี้ [19]

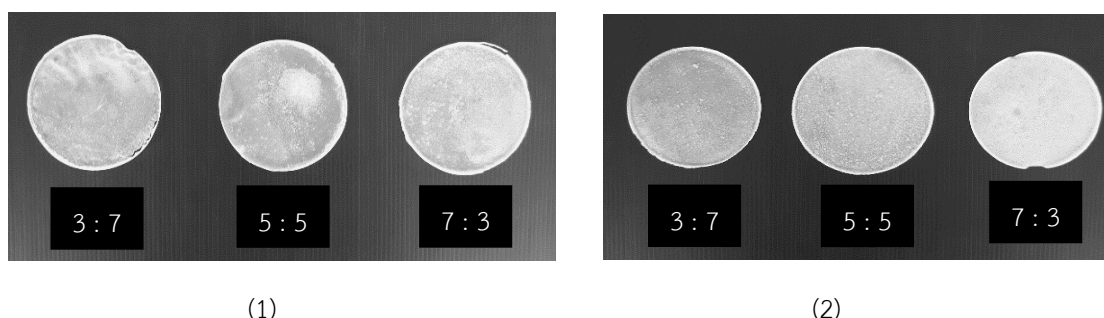
$$\text{Degradation (\%)} = \frac{W_0 - W_d}{W_0} \times 100$$

เมื่อ W_0 และ W_d เป็นน้ำหนักของ Nr/St, Nr/Pt และ Nr/Ct ก่อนและหลังย่อยสลาย

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

1. ความสามารถในการขึ้นรูป

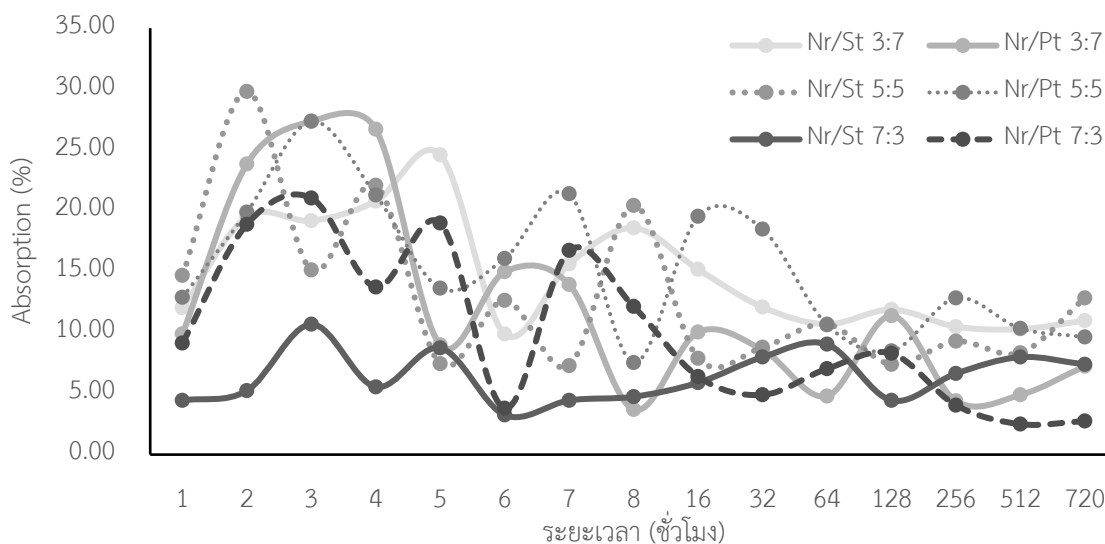
ความสามารถในการขึ้นรูปของไฮโดรเจลของน้ำยางพาราที่ทำการเชื่อมขวางด้วย MBA ที่ผสมแป้งมันสำปะหลัง เพคติน และไคโตซาน อัตราส่วนระหว่าง 3:7, 5:5 และ 7:3 พบว่าลักษณะภายนอกของแผ่นไฮโดรเจลที่ผสมด้วยแป้งมันสำปะหลังและเพคตินเจลาตินในชั้นในทุกอัตราส่วนมีความเข้ากันสามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ดี การเกิดเจลาตินในชั้นเซชันของแป้งมันสำปะหลังและเพคตินที่อุณหภูมิเหมาะสมส่งผลให้เกิดการคืนตัว (Set back) ที่ดี [20] (ภาพที่ 1) แผ่นไฮโดรเจลมีสีเหลืองใสเนื่องจากค่าความขุ่น (Haze) จะขึ้นกับความหนาของแผ่นไฮโดรเจลที่มีปริมาณสารละลายมากจะมีความขุ่นมากตามไปด้วย สำหรับสีและความใสของแผ่นไฮโดรเจลเป็นลักษณะภายนอกไม่ส่งผลต่อการดูดซึม [21] ในส่วนของไคโตซานที่ผ่านการเจลาตินในชั้นเมื่อทำการผสมน้ำยางพาราที่เชื่อมขวางจะมีลักษณะเหมือนคอลลอยด์คล้ายจะเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้แตกต่างจากเจลาตินซ็อก 2 ชนิดซึ่งให้ตัวได้ง่ายกว่า เนื่องจากการใช้สารละลายกรดอะซิติกภายใต้อุณหภูมิ 30 – 40 องศาเซลเซียสจะทำให้ไคโตซานมีความเป็นเจลที่หนืดและเหนียว [22]



ภาพที่ 1 แผ่นไฮโดรเจลที่ขึ้นรูป Nr/St (1) และ Nr/Pt (2) อัตราส่วน 3:7 , 5:5 และ 7:3

2. คุณสมบัติการดูดซึมน้ำกลั่นของแผ่นไฮโดรเจล

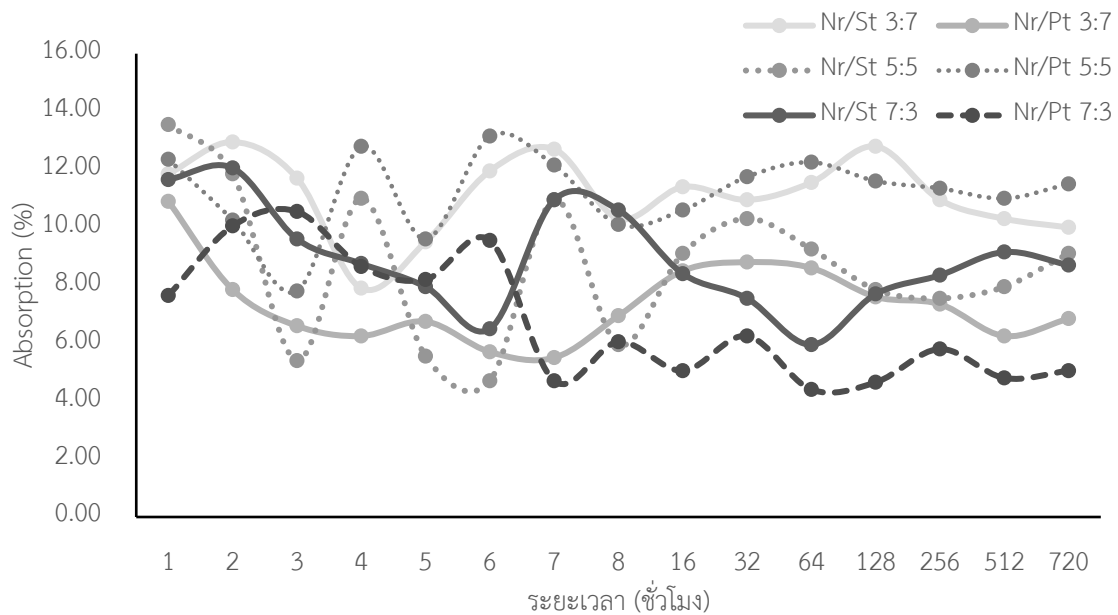
จากการทดลองอัตราการดูดซึมน้ำกลั่นจากชิ้นตัวอย่างของแผ่น Semi-IPN, Nr/St และNr/Pt ที่แช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 720 ชั่วโมงพบว่าอัตราส่วน Nr/St 5:5 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำสูงที่สุดอยู่ที่ 29.80 เปอร์เซ็นต์แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 95$) เมื่อเทียบกับทุกอัตราส่วนยกเว้นอัตราส่วน Nr/Pt 3:7 (ภาพที่ 2) เนื่องจากอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) มีคุณสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilicity) [16] เช่นเดียวกับเพคตินเป็นพอลิเมอร์ของกรดกาแล็กทูโรนิกภายในหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COOH}$) จะประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) [23] รองลงมาอัตราส่วน Nr/Pt 5:5 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำอยู่ที่ 27.35 เปอร์เซ็นต์และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 95$) กับอัตราส่วน Nr/Pt 3:7 และ 7:3 ซึ่งการเชื่อมขวางมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นในระยะเวลาอันสั้น [24] และเกิดแรง driving force ภายในของแผ่นไฮโดรเจลเมื่อน้ำเข้าไปมากเกินจะเกิดการปลดปล่อยเพื่อคงลักษณะของโครงสร้างภายใน [22]



ภาพที่ 2 การดูดซึมน้ำกลั่นของแผ่นไฮโดรเจลเป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง

3. คุณสมบัติการดูดซึมสารละลายธาตุอาหารของแผ่นไฮโดรเจล

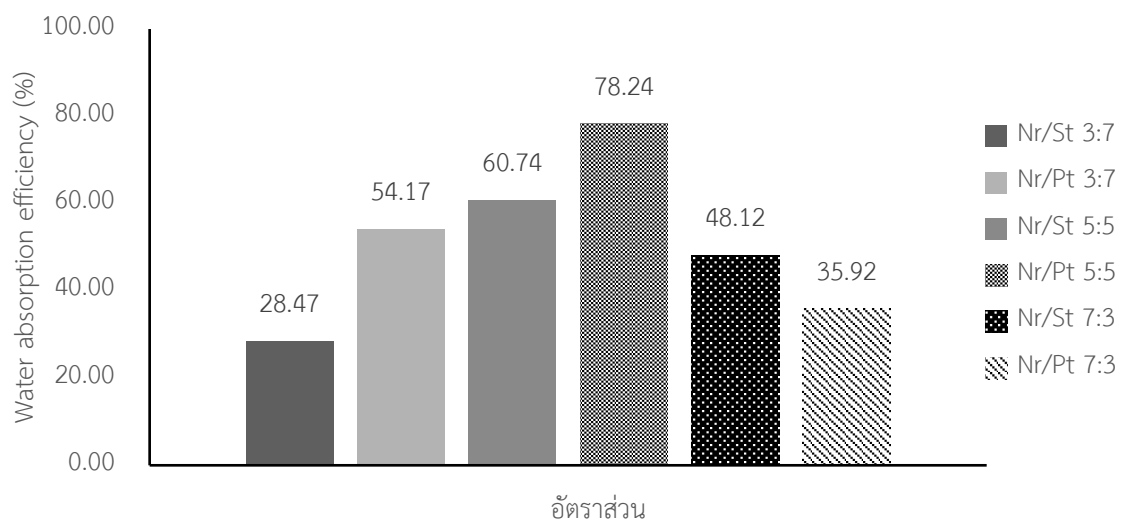
จากการทดลองอัตราการดูดซึมสารละลายธาตุอาหารของแผ่น Semi-IPN, Nr/St และNr/Pt ที่แช่ในสารละลายธาตุอาหารที่ใช้สำหรับปลูกพืชไร้ดินเป็นเวลา 720 ชั่วโมงพบว่า อัตราส่วน Nr/St 5:5 มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมสูงสุดอยู่ที่ 13.55 เปอร์เซ็นต์และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \geq 95$) เมื่อเทียบกับทุกอัตราส่วนยกเว้นอัตราส่วน Nr/Pt 3:7 (ภาพที่ 3) ซึ่งเพคตินมีคุณสมบัติชอบน้ำเหมือนแป้งมันสำปะหลังแต่ทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion inhibitor) ที่ดีกว่า [25] เพราะการนำแผ่นไฮโดรเจลแช่ในสารละลายธาตุอาหารจะเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าขึ้นโดยจะยอมให้ประจุที่มีชนิดตรงข้ามดูดเข้าหากันและผลักประจุที่มีชนิดเดียวกันออกไป [26] ซึ่งยางพารามีประจุไฟฟ้าพื้นผิวเป็นลบ [27] สารละลายธาตุอาหารที่ใช้ในการปลูกพืชไร้ดินมีปริมาณสารเคมีที่ผสมในน้ำทั้งหมดจาก 100 เปอร์เซ็นต์ จะประกอบด้วยธาตุอาหารไอออนบวก (Cation) และไอออนลบ (Anion) อย่างละ 50 เปอร์เซ็นต์ [28] ทำให้การดูดซึมมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดเกลือที่ไม่ละลายน้ำปิดกั้นพื้นผิวไฮโดรเจลซึ่งส่งผลต่อการดูดซึมได้ [29]



ภาพที่ 3 การดูดซึมสารละลายธาตุอาหารของแผ่นไฮโดรเจลเป็นระยะเวลา 720 ชั่วโมง

4. ทดสอบประสิทธิภาพการคงไว้ของน้ำในแผ่นไฮโดรเจล

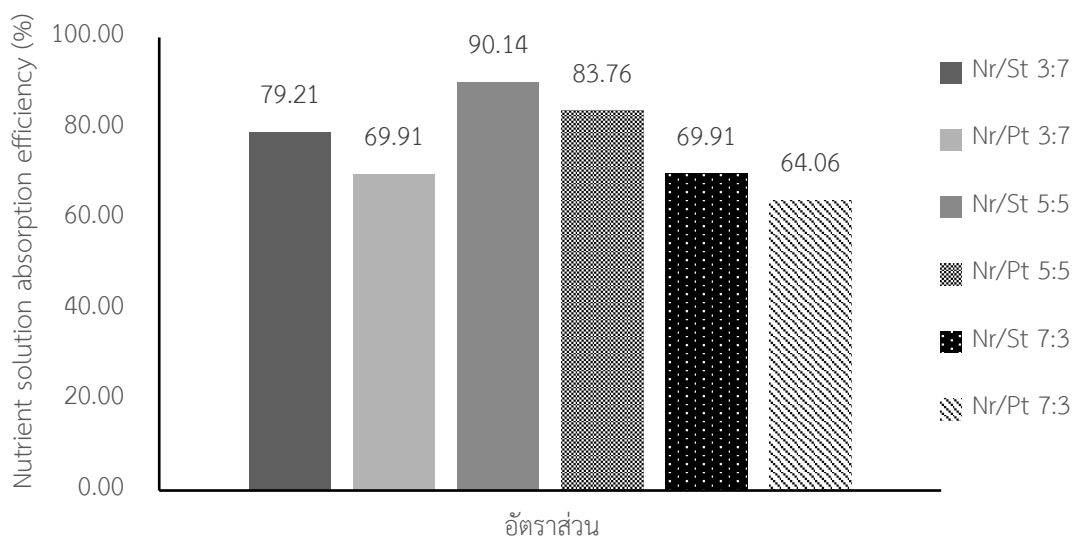
จากการทดลองประสิทธิภาพการคงไว้ของน้ำในแผ่นไฮโดรเจล Semi-IPN, Nr/St และNr/Pt พบว่าแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 95$) โดยอัตราส่วน Nr/Pt 5:5 มีเปอร์เซ็นต์สูงสุดอยู่ที่ 78.24 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาอัตราส่วน Nr/St 5:5 อยู่ที่ 60.74 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วน Nr/Pt 3:7 อยู่ที่ 54.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ (ภาพที่ 4) การมีเพคตินเป็นองค์ประกอบส่งผลต่อเสถียรภาพการใช้งานของแผ่นไฮโดรเจลหลังทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง เพราะมีคุณสมบัติให้ความคงตัว (Stabilizer) ที่ดีกว่า [30-31] ในส่วนของแป้งมันสำปะหลังเมื่อสัมผัสกับน้ำจะสลายตัวได้ดีกว่าทำให้ประสิทธิภาพของแผ่นไฮโดรเจลลดลงได้ [32] ซึ่งโมเลกุลของแป้งมันสำปะหลังและเพคตินไม่ได้ผ่านการเชื่อมขวางเพียงแค่สอดแทรกเข้าไปภายในโครงสร้างของแผ่นไฮโดรเจล [33] อีกทั้งการมีหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COO}^-$) จะสลายตัวในน้ำ [34] และการระเหยของน้ำในแผ่นไฮโดรเจลโดยใช้ความร้อนจะรบกวนโครงสร้างภายในเป็นผลให้ประสิทธิภาพการคงไว้ของน้ำลดลง [35]



ภาพที่ 4 ประสิทธิภาพการคงไว้ของน้ำในแผ่นไฮโดรเจล

5. ทดสอบประสิทธิภาพการคงไว้ของสารละลายธาตุอาหารในแผ่นไฮโดรเจล

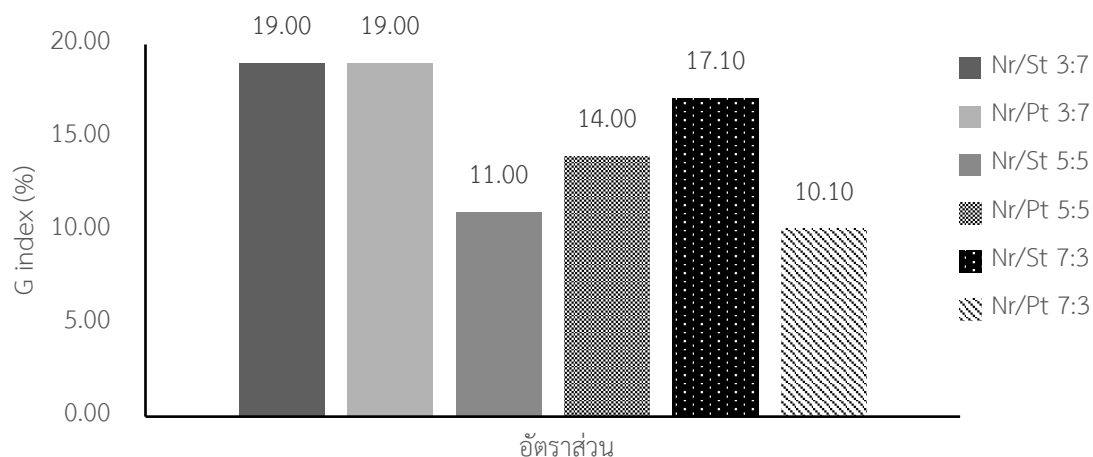
จากการทดลองประสิทธิภาพการคงไว้ของสารละลายธาตุอาหารของแผ่นไฮโดรเจล Semi-IPN, Nr/St และ Nr/Pt พบว่าแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 95$) โดยอัตราส่วน Nr/St 5:5 มีเปอร์เซ็นต์สูงสุดอยู่ที่ 90.14 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาอัตราส่วน Nr/Pt 5:5 อยู่ที่ 83.76 เปอร์เซ็นต์ และอัตราส่วน Nr/St 3:7 อยู่ที่ 79.21 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายธาตุอาหารได้ของแผ่นไฮโดรเจลเมื่อทดสอบซ้ำ 2 ครั้ง (ภาพที่ 5) เป็นผลมาจากการอบอุ่นและความชื้นเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหาร เมื่อแผ่นไฮโดรเจลได้รับผลกระทบจากปัจจัยดังกล่าว จะเกิดจากปฏิกิริยาผันกลับได้ของสารพอลิเมอร์ในตัววัสดุทำให้สามารถซ่อมแซมตัวเองได้ อีกทั้งปฏิกิริยาแบบผันกลับมีส่วนช่วยเสริมโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์อีกด้วย [36] ทำให้ยางพารามีความคงทนต่อสารเคมีและตัวทำละลายอินทรีย์มากยิ่งขึ้น [37] ซึ่งจะทำให้แผ่นไฮโดรเจลสามารถใช้เป็นวัสดุปลูกซ้ำในการปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์ได้ [38]



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพการคงไว้ของสารละลายธาตุอาหารในแผ่นไฮโดรเจล

6. ทดสอบแผ่นไฮโดรเจลต่อการงอกของเมล็ดพืช

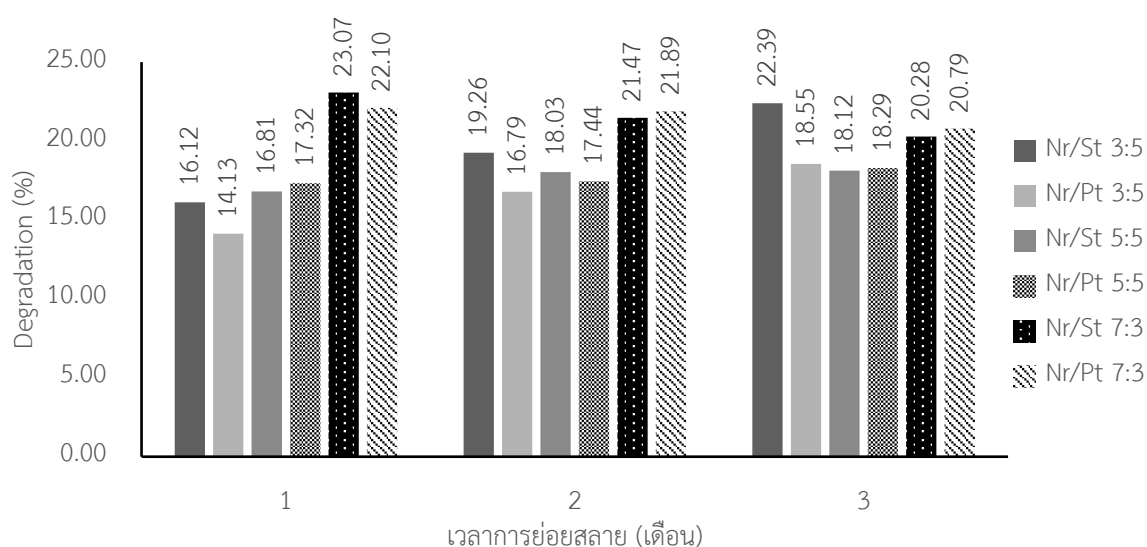
จากการทดลองนำเมล็ดผักสลัดกรีนโอ๊คเพาะบนแผ่นไฮโดรเจล Semi-IPN, Nr/St และ Nr/Pt เป็นเวลา 72 ชั่วโมงพบว่าไม่แตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P \geq 95$) โดยอัตราส่วน Nr/St 3:7 และ Nr/Pt 3:7 มีเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดสูงที่สุดเท่ากันอยู่ที่ 19.00 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาอัตราส่วน Nr/st 7:3 อยู่ที่ 17.10 เปอร์เซ็นต์ และต่ำที่สุดอยู่ที่ 10.10 เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วน Nr/Pt 7:3 (ภาพที่ 6) ซึ่งอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังและเพคตินที่มากมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดเพราะความเข้ากันได้ดีทางชีวภาพ [39] สามารถใช้เป็นสื่อให้รากพืชเจริญได้ [40] แต่ไม่สามารถเติบโตจนถึงระยะต้นอ่อน (Sprout) เนื่องจากสารบางกลุ่มที่ใช้สังเคราะห์ไฮโดรเจลขัดขวางการเจริญเติบโตของพืช [41-42] อีกทั้งการเติมสาร crosslink เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างตาข่ายมักพบปัญหาความเป็นพิษเกิดขึ้นจากสารที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา [43]



ภาพที่ 6 ทดสอบแผ่นไฮโดรเจลต่อการงอกของเมล็ดผักสลัดกรีนโอ๊ค

7. ทดสอบการย่อยสลายในดิน

จากการทดสอบย่อยสลายในดินของแผ่นไฮโดรเจล Semi-IPN, Nr/St และ Nr/Pt พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P \geq 95$) โดยอัตราส่วน Nr/St และ Nr/Pt 3:7 ย่อยสลายได้ดีที่สุดเช่นเดียวกับอัตราส่วน Nr/St และ Nr/Pt 5:5 (ภาพที่ 7) เนื่องจากอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังและเพคตินจัดอยู่ในกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) มีคุณสมบัติเด่นย่อยสลายง่ายในธรรมชาติ [44] แตกต่างจาก Nr/St และ Nr/Pt 7:3 เนื่องจากอัตราส่วนของยางพาราจะเกิดการย่อยสลายช้ากว่า ซึ่งในธรรมชาติแบคทีเรียแกมบวกและแกมลบในดินสามารถพบได้ทั่วไป [45] โดยจะทำการย่อยสลายพันธะคูในโครงสร้างทางเคมีของยางพาราด้วยเอนไซม์ Rubber oxygenase [46] ซึ่งในกลุ่ม CNM (Corynebacterium, Nocardia, Mycobacterium) จะย่อยสลายได้ดีที่สุด [47] แต่จุลินทรีย์มีความอ่อนไหวต่อสารเคมีและสารเติมแต่งที่ใช้ในยางพารา [48] ประกอบกับการเชื่อมขวางทางเคมีส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลทำให้มีความคงทนมากขึ้น [49]



ภาพที่ 7 การย่อยสลายในดินของแผ่นไฮโดรเจลระยะเวลา 3 เดือน

สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลจากยางพาราที่มีอัตราส่วนของไบโอพอลิเมอร์เป็นองค์ประกอบ พบว่าอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังและเพคติน มีความเข้ากันกับน้ำยางพาราที่ผ่านการเชื่อมขวางทางเคมีทำให้สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ดีกว่า ไคโตซาน ส่วนการดูดซึมน้ำแสดงให้เห็นว่าแผ่นไฮโดรเจลอัตราส่วน Nr/St 5:5 สามารถดูดซึมน้ำและสารละลายธาตุอาหารได้ดีที่สุด รวมถึงประสิทธิภาพการคงตัวของสารละลายธาตุอาหารในไฮโดรเจลจึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุปลูกพืชไร้ดิน แต่ด้วยเปอร์เซ็นต์อัตราการใช้พืชมะเขือเทศ ซึ่งระบบการปลูกไฮโดรโปนิคส์โดยทั่วไปจะใช้พืชมะเขือเทศในการเพาะเมล็ดแล้วจึงย้ายกล้าลงปลูกเพราะจะทำให้พืชตั้งตัวได้เร็ว ส่วนการย่อยสลายในดินของแผ่นไฮโดรเจลมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

แผ่นไฮโดรเจลจากไบโอพอลิเมอร์สามารถเป็นวัสดุปลูกได้ อีกทั้งวัตถุดิบที่ใช้เป็นสิ่งที่จัดหาได้ง่ายและมีปริมาณมากในธรรมชาติ แต่การจะใช้แทนไฮโดรเจลเชิงการค้ายังเกิดข้อจำกัดต่อการใช้งาน เพราะคุณสมบัติของไบโอพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน เช่น น้ำหนักโมเลกุล ประจุไฟฟ้า รวมถึงการดัดแปลงทางกายภาพหรือทางเคมี สิ่งเหล่านี้ส่งผลต่อคุณสมบัติของไฮโดรเจล การที่จะเพิ่มประสิทธิภาพไฮโดรเจลจากไบโอพอลิเมอร์ต้องปรับเปลี่ยนวิธีการและขั้นตอนในการทดลองให้หลากหลายขึ้นเพื่อที่จะได้ไฮโดรเจลตรงตามจุดประสงค์ของงานที่จะนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัย อาจารย์ที่ปรึกษา และบุคลากร คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

1. Warunee T, Sayan S. Super Absorbent Polymer: Synthesis, Characterization, and Applications. Science and Technology Journal. Ubon Ratchathani University; 2014. Thai.
2. Rengasamy P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. Functional Plant Biology. 2010; 37(7): 613–660.
3. Janjarus K. Marketing strategy for hydroponics vegetable business in Chiang Mai. Maejo University; 2017. Thai.
4. Yuichi M. New agro-technology (Imec) by hydrogel membrane. Reactive & Functional Polymers. 2013; 73: 936–938.
5. Ahmed E. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. Journal of Advanced Research. 2015; 6(2): 105–111.
6. Nitinart S. Natural Rubber: Applicationas Starting Materials to Replace the Use of Raw Materials from Petroleum. Burapha Science Journal. Prince of Songkla University; 2014. Thai.
7. Suthee B, Banchar S, Punrawich P, Thai Para-rubber Industry: The Status and Development Suggestions towards ASEAN Economic Community. Humanities and Social Sciences Journal; 2017.

8. Nutkanin S, Phimpa S, Sirirat L, Natcha P, Panadda P, Sudarat S, et all. Green Chemistry. Science and Technology Journal. Ubon Ratchathani University; 2016. Thai.
9. Saowaluk B, Chaiwute V. Preparation of Water Swellable Rubber from Sodium Acrylate Grafted Natural Rubber. Ubon Ratchathani University; 2017. Thai.
10. Sam C, Stephen B, Katrina C. Natural rubber biosynthesis in plants, the rubber transferase complex, and metabolic engineering progress and prospects. Plant Biotechnology Journal; 2019. 1–21.
11. Sureuk K. The study of hydrogel preparation from natural rubber 2. Walailak University; 2010. Thai.
12. Ralph H, Tobias K, Clemen P. Pilot-scale press electrofiltration of biopolymers. Separation and Purification Technology. 2006; 51: 303-309.
13. Chaiyawut W. Preparation of Hydrogel from Natural rubber and Cassava Starch for the planting. Ubon Ratchathani University; 2012. Thai.
14. Havva K, Meltem Ç, Mehmet S, Levent A. Graft copolymerization of methyl methacrylate upon gelatin initiated by benzoyl peroxide in aqueous medium. Journal of Applied Polymer Science; 1999. 74. 1547-1556.
15. Saichon S. Preparation of highly absorbent graft copolymers using various starches with acrylonitrile. Chiang Mai University; 2010. Thai.
16. Riyajan S, Sasithornsonti Y, Phinyocheep P. Green natural rubber-g-modified starch for controlling urea Release. Carbohydrate Polymers. 2012; 89. 251-258.
17. Zucconi F, Monaco A, Forte M, Bertoldi M. Phytotoxins during the stabilization of organic matter. In Composting of Agricultural and Other Wastes. Gasser J.K.R. (ed). Elsevier Applied Science. London and New York; 1986. 73-88.
18. Mohammad J, Zohuriaan M, Kourosh K. Superabsorbent polymer materials: a review. Iranian Polymer Journal. 2008; 17: 451.
19. Milene M, Elaine C, Tito L, Jose C, Rosana L. Use of polyhydroxybutyrate and ethyl cellulose for coating of urea granules. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2013; 42: 9984–9991.
20. Klanarong S, Kanjana K, Vilai S. Fine structure of amylose, amylopectin and functional properties of cassava starches extracted from Kasetsart 50 at different harvesting time. Proceedings of the 36th Kasetsart University Annual Conference. Kasetsart University; 1998.
21. Achara K, Ekwit T, Pairote W. Preparation of Hydrogel from Deproteinized Natural Rubber Latex For Use as Wound Dressing. MJU Annual Conference. Maejo University; 2018.
22. Piyachat W. Development of Chitosan Film Containing Collagen. Burapha University; 2017. Thai.
23. Nithiya RN. Food chemistry. P 181–184. Bangkok; 2002.
24. Turakhiya M, Savani D, Patel M, Akbari V, Prajapati G, Shah S. A review superporous hydrogel (SPH) an approach for controlled drug delivery. Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences. 2013; 2(1): 47–58.

25. Antonela G, Jasna H, Senka D, Suzana B, Maja D, Zorana G. Utilization of Tomato Peel Waste from Cannin Factory as a Potential Source for Pectin Production and Application as Tin Corrosion Inhibition. *Food Hydrocolloids*. 2016; 52: 265-274.
26. Pongphitsanu M. Introduction of ion exchange membranes. National Metal and Materials. Technology Center; 2009.
27. Chompunuch S. Increasing Efficiency of Rubber Sheet Production by Foaming Reduction in Compound Mixing Process. Kasetsart University; 2015. Thai.
28. Derek T. Soilless Culture. 3th ed. Bangkok; 2007.
29. Shaukat S, Ansar Q, Farooq A, Inam U, Umer R. Improvement in the water retention characteristics of sandy loam soil using a newly synthesized poly (acrylamide-co-acrylic acid) superabsorbent hydrogel nanocomposite material. *Molecules*. 2012; 17: 9397-9412.
30. Voragen A, Pilnik W, Thibault J, Axelos M, Renard C. Pectins. In *Food Polysaccharides and Their Application*. A.M. Stephen ed. P 287-339 New York; 1995.
31. Koseki M, Kitabatake N, Doi E, Yasuno T, Ogino S, Ito A, Endo F. Determination of pectin in the presence of food polysaccharide. *Journal of food science*. 1989; 51(5): 1329-1332.
32. Supachai J. Utilization from cassava starch. *Journal of the Department of Science Service*. 2001; 49: 8-11.
33. Chaiyawut W. Properties of Hydrogel Semi-interpenetrating Polymer Network and Marigold Planting Application. Ubon Ratchathani University; 2017. Thai.
34. Khanittha C, Tanyalak S, Pathumthip P, Sasiwimol W. Properties of Hydrogel Films from Carboxymethylcellulose and Aloe vera (Linn.) Burm. *UTK RESEARCH JOURNAL*. 2021; 15.
35. Yingsak K, Dudsadee U, Vilai R, Chureerat P. Characterization of hydrogels prepared from cassava and canna starches. King Mongkut's University of Technology; 2007. Thai.
36. Chanon T, Sirinan K. Self-healing Materials and applications. *KKU Science Journal*. 2020; 48(1): 001-016.
37. Gelling I, Porter M. Natural Rubber science and technology. Roberts. A. D. ed. Oxford: University Press; 1988.
38. Montero J, Anton A, Munoz P, Lorenzo P. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidifies in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2009; 107: 323-332.
39. Joseph N, Tae O. Biopolymer Coatings for Biomedical Applications. *Polymers – MDPI*. 2020; 12.
40. Clark J, Whalley R, Leigh A, Dexter R, Barraclough B. Evaluation of agar and agarose gels for studying mechanical impedance in rice roots. *Plant Soil*. 1999; 207: 37-43.

41. Wei H, Wang H, Chu H, Li J. Preparation and characterization of slow-release and water-retention fertilizer based on starch and halloysite. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019; 133: 1210–1218.
42. Wang W, Yang S, Zhang A, Yang Z. Synthesis of a slow-release fertilizer composite derived from waste straw that improves water retention and agricultural yield. *Science of the Total Environment*. 2021; 768:144978.
43. Visit W. Polymer Hydrogel for an Application as Drug Controlled-Release Materials. Suranaree University of Technology; 2014. Thai.
44. Mohammad A, Nahid N, Sapana J, Mohd Z. Polysaccharide based superabsorbent hydrogels and their methods of synthesis: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2020; 1: 100014.
45. Linh D, Huong N, Tabata M, Imai S, Iijima S, Kasai D, Anh T, Fukuda M. Characterization and functional expression of a rubber degradation gene of a *Nocardia* degrader from a rubber-processing factory. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. 2017; 123: 412–418.
46. Ann B, Jean S, Chia Y, Kumar S. Microbial Degradation of Rubber: Actinobacteria. *Polymers*. 2021; 13: 2-27.
47. Linos A, Steinbuchel A, Sproer C, Kroppenstedt R. *Gordoniapolyisoprenivorans* sp. nov. a rubber degrading actinomycete isolated from an automobile tire. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 1999; 49: 1785–1791.
48. Meral Y, Alexander S. Historical and Recent Achievements in the Field of Microbial Degradation of Natural and Synthetic Rubber. *Applied and Environmental Microbiology*. 2012; 78(13): 4543–4551.
49. Qiao L, Liu C, Yang L, Zhang M, Liu W, Wang J, Jian X. Self-healing alginate hydrogel based on dynamic acylhydrazone and multiple hydrogen bonds. *Journal of Materials Science*. 2019; 54(11): 8814–8828.