

การเตรียมแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์พอลิ (โซเดียม 2-อะคริลาไมโด-2-เมทิลโพรเพน ซัลโฟเนต) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อย

รัตน์ฐาภัทร บุญเกิด^{1*} ศศิธร อินทร์นอก²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอเมือง นครราชสีมา 30000

รุ่งลาวัลย์ สมสุนันท์³ และ โรเบิร์ต มอลลอย⁴

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง เชียงใหม่ 50200

* Corresponding Author: Ratthaphat_bun@hotmail.com

¹ อาจารย์ สาขาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์

² อาจารย์ สาขาชีววิทยาประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์

³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

⁴ อาจารย์ ศูนย์วิจัยวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 14 มกราคม 2563

แก้ไข : 26 มิถุนายน 2563

ตอบรับ : 13 สิงหาคม 2563

คำสำคัญ :

พอลิ (โซเดียม 2-อะคริลาไมโด-2-

เมทิลโพรเพน ซัลโฟเนต) /

สารสกัดใบเครือหมาน้อย /

ไฮโดรเจล /

พอลิเมอร์ไฮโดรเจลแบบใช้แสง /

โครงสร้างตาข่ายพอลิเมอร์แบบแทรกสอด

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการศึกษาการเตรียมแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์พอลิ (โซเดียม 2-อะคริลาไมโด-2-เมทิลโพรเพน ซัลโฟเนต) (P(Na-AMPS)) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อย แผ่นไฮโดรเจลเตรียมโดยใช้สารละลายมอนอเมอร์ Na-AMPS ความเข้มข้น 40% w/v ที่มีน้ำเป็นตัวกลางและสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยความเข้มข้น 2.25% w/v ที่อัตราส่วน 100:0 95:5 90:10 และ 85:15% v/v สารละลายผสมแต่ละอัตราส่วนเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไฮโดรเจลแบบใช้แสงภายใต้รังสีอัลตราไวโอเลต-ซี (UV-C) ที่ความยาวคลื่น 250 nm โดยใช้ 2-ไฮดรอกซี-4'- (2-ไฮดรอกซีอีทอกซี) -2-เมทิลโพรพิโอพีนอน (HHMP) ที่ความเข้มข้น 0.05% โมล เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา และเอ็น,เอ็น-เมทิล-บิส-อะคริลาไมด์ (NMBA) ที่ความเข้มข้น 1% โมล เป็นสารเชื่อมขวาง ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือแผ่นไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายพอลิเมอร์แบบแทรกสอดเต็ม (Full-IPN) วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค FT-IR และ TGA ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไฮโดรเจลขึ้นย่นได้ด้วย FT-IR สเปกตรัมที่ไม่ปรากฏพีคของ C=C ของมอนอเมอร์ Na-AMPS ที่ตำแหน่ง 1420 และ 970 cm^{-1} หลังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไฮโดรเจลขึ้น จากการทดสอบสมบัติของแผ่นไฮโดรเจลพบว่าสมบัติที่ดีที่สุดในแง่ของการเป็นเจล ปริมาณน้ำคงอยู่ และสมบัติเชิงกลได้มาจากสารละลายผสมที่อัตราส่วน 85:15% v/v

Preparation of Synthetic Hydrogel Sheets of Poly(sodium 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonate) Containing Extracts from Krueo Ma Noy Leaves

Ratthaphat Bunkerd^{1*}, Sasidhorn Innok²,

Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhon Ratchasima, 30000

Runglawan Somsunan³ and Robert Molloy⁴

Chiang Mai University, Muang, Chiang Mai, 50200

* Corresponding Author: Ratthaphat_bun@hotmail.com

¹ Lecturer, Program of Applied Chemistry, Faculty of Sciences and Liberal Arts.

² Lecturer, Program of Applied Biology, Faculty of Sciences and Liberal Arts.

³ Assistant Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science.

⁴ Lecturer, Materials Science Research Center, Faculty of Science.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: January 14, 2020

Revised: June 26, 2020

Accepted: August 13, 2020

Keywords:

Poly(sodium 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonate) /
Krueo Ma Noy leaves extracts /
hydrogel /
photopolymerization /
interpenetrating polymer network

The aim of this research was to study the preparation of synthetic hydrogel sheets of poly(sodium 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonate (P(Na-AMPS)) containing extracts from Krueo Ma Noy leaves. The sheets were prepared using Na-AMPS monomer at a concentration of 40% w/v in water and Krueo Ma Noy extract at a concentration of 2.25% w/v in various % v/v ratios of 100:0, 95:5, 90:10 and 85:15. Each solution mixture was photopolymerized under UV-C at a wavelength of 250 nm using 2-hydroxy-4'-(2-hydroxyethoxy-2-methylpropiophenone) at a concentration of 0.05 mol% as photoinitiator and N,N-methylene-bis-acrylamide at a concentration of 1 mol% as crosslinking agent. The final product was a full interpenetrating polymer network hydrogel sheet. Structural characterization of the hydrogel was carried out by means of Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy and thermogravimetric analysis. Polymerization was confirmed by the disappearance of the C=C peaks of the Na-AMPS monomer at 1420 and 970 cm⁻¹ in the FT-IR spectra. Property testing of the hydrogel sheets showed that the sheets with the best properties in terms of gel fraction, water retention and mechanical properties were obtained from the 85:15% v/v solution mixture.

1. บทนำ

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ในการแพทย์ ทั้งแผ่นปิดแผล แผ่นปิดรักษาสิว และแผ่นบำรุงหน้า เป็นต้น เนื่องจากมีโครงสร้างแบบตาข่ายสามมิติและมีรูพรุนมากเพราะโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) คาร์บอกซิลิก แอซิด (-COOH) เอไมด์ (-CONH) เอมีน (-NH₂) และ ซัลโฟนิก แอซิด (-SO₃H) เป็นต้น ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้โดยยังคงรูปร่างและไม่ละลายในน้ำ เมื่อนำไปปิดบาดแผลสามารถปิดได้แบบสนิทไม่หลุดลอก แต่ไม่เกาะติดกับเนื้อเยื่อที่ซ่อมแซมขึ้นมาใหม่ และเมื่อดึงออกจากบาดแผลไม่ทำให้เกิดการเจ็บปวดในระหว่างการเปลี่ยนวัสดุปิดแผล [1-4]

ไฮโดรเจลพอลิ (ไซเตียม 2-อะคริลามิโด-2-เมทิลโพรเพน ซัลโฟเนต (P(Na-AMPS)) เป็นไฮโดรเจลอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะนอกจากมีโครงสร้างตาข่ายสามมิติและสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ยังเป็นวัสดุที่ไม่ระคายเคืองเนื้อเยื่อ ไม่เป็นพิษ เนื่องจากปรับให้อยู่ในรูปของสารละลายเกลือ และโครงสร้างทางเคมีของ (Na-AMPS) ประกอบด้วยหมู่ซัลโฟเนต (SO₃⁻) ที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกที่ดี ส่งผลให้ไฮโดรเจลดูดซับและกักเก็บความชุ่มชื้นได้ดี หมู่ -CH₃ ที่ช่วยรักษาความเสถียรทางความร้อน [5-6] และแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์สามารถเตรียมผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต (UV-Photoinitiator) โดยใช้ตัวเริ่มและสารเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยาแบบฟรีแรดิคัลได้ในแสงอัลตราไวโอเลต เช่น ตัวริเริ่ม HHPM และ สารเชื่อมขวาง NMBA เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมที่ง่ายและสะดวก [7]

แต่อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลที่เตรียมได้จาก P(Na-AMPS) ยังมีราคาสูง ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนและปรับปรุงสมบัติต่างๆ จึงได้มีการนำไปผสมกับไฮโดรเจลทางธรรมชาติ เช่น สารสกัดจากพืชที่มีเพกตินเป็นองค์ประกอบหลักเพื่อให้เป็นโครงสร้างตาข่ายพอลิเมอร์แบบแทรกสอดเต็ม (Full-Interpenetrating Polymer Network, Full-IPN) เพกตินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์มี ดี-กาแลกทูโรนิก แอซิด (D-galacturonic acid) เป็นมอนอเมอร์ต่อนกันเป็นโซ่ยาว โครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่ COOH [8] ที่สกัดได้จากพืชท้องถิ่น เช่น กรุงเขมา หรือเครือหมาน้อย มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Cissampelos pareira* จัดอยู่ในวงศ์บอเรเพ็ด

และเป็นพืชสมุนไพรท้องถิ่นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย จากการศึกษาปริมาณเพกตินที่มีอยู่ในใบเครือหมาน้อย พบว่าใบเครือหมาน้อยมีปริมาณเพกตินที่มีดีกรีของเมทิลเลชันอยู่ประมาณ 34% w/w จึงจัดเพกตินที่สกัดได้จากใบเครือหมาน้อยเป็นเพกตินชนิดเมทอกซิลต่ำ (Low Methoxyl Pectin, LM) ซึ่งเป็นเพกตินที่สามารถเกิดเจลได้เมื่อมีไอออนของ Ca²⁺ เพียงพอคืออย่างน้อย 1 mM ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวางระหว่างหมู่ COOH ในสายโซ่โมเลกุลของเพกตินทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายสามมิติขึ้น และเพกตินสกัดจากใบเครือหมาน้อยนี้ยังพบไอออนของ Ca²⁺ เป็นองค์ประกอบ [9-11]

ในงานวิจัยนี้จึงสนใจเตรียมแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) ที่บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบใช้แสง (Photopolymerisation) เพื่อลดปริมาณการใช้ (Na-AMPS) ที่มีราคาแพงและศึกษาผลปริมาณสารสกัดต่อสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล การเกิดเจล ปริมาณน้ำองค์ประกอบ ปริมาณน้ำคงอยู่ เพื่อให้ได้วัสดุทางชีวการแพทย์ที่แข็งแรงและยืดหยุ่นเหมาะสมและสะดวกกับการใช้งานมากขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีวิจัย

2.1 การสกัดสารจากใบเครือหมาน้อย

นำใบเครือหมาน้อยที่ปลูกในเขตจังหวัดนครราชสีมา มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำผึ่งทิ้งไว้ในร่มให้น้ำระเหยแห้งก่อนอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และบดให้ละเอียด จากนั้นชั่งน้ำหนักใบเครือหมาน้อยแห้ง (w_d) ก่อนสกัดเพกตินด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนใบเครือหมาน้อยแห้งต่อน้ำ 1:20 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร คนให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที กรองด้วยผ้าขาวบางนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 6000 รอบ/นาที เป็นเวลา 25 นาที เพื่อให้ได้สารสกัดหยาบเพกตินจากส่วนของเหลวเหนือตะกอน [8-9] จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปตกตะกอนด้วยเอทานอล 95% ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) และนำไปอบที่อุณหภูมิ 55°C ภายใต้สุญญากาศ จนน้ำหนักคงที่ (w_d) และพบว่าปริมาณสารสกัดหยาบเพกตินที่สกัดได้ประมาณ 27% ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$\% \text{ Pectin Extracts} = \frac{w_d}{w_e} \times 100 \quad (1)$$

วิเคราะห์สมบัติทางเคมีของสารสกัดจากใบเครือหมาน้อย ที่มีเพกตินเป็นองค์ประกอบหลักโดยวิเคราะห์ปริมาณเมทอกซิลและระดับเอสเทอร์ฟิเคชันตามวิธีของ Vardhanabhudi และคณะ [12] มีค่าประมาณ 1.8 และ 15.2 % ตามลำดับ วิเคราะห์ปริมาณกรดกาแลกทูโรนิกซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายโซ่โมเลกุลหลักของเพกตินตามวิธีของ Sukboonyasatit และคณะ [13] มีค่าประมาณ 55 % สารสกัดจากใบเครือหมาน้อยนี้จึงจัดเป็นเพกตินชนิดเมทอกซิลต่ำสอดคล้องกับการศึกษาของ Singthong และคณะ Promsakha na Sakon Nakhon และคณะ และ Vardhanabhudi และ Ikeda [9-12] วิเคราะห์หาปริมาณไอออน Ca^{2+} ในสารสกัดโดยการไทเทรตแบบเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิติก แอซิด [EDTA] [14] และจากการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่าสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยนี้มีความเข้มข้นของไอออน Ca^{2+} อยู่ประมาณ 2.6 mM ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่สามารถทำให้เพกตินเกิดเจลได้ [10]

2.2 การเตรียมแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ (Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อย

เนื่องจากมอนอเมอร์ตั้งต้น (AMPS-H) (Acros Organics) มีความเป็นกรดสูงมาก จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนให้เป็นกลางในรูปของเกลือ (Na-AMPS) ก่อนนำไปเตรียมเป็นแผ่นไฮโดรเจลที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้จริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เตรียมสารละลาย (Na-AMPS) ความเข้มข้น 40% w/v โดยละลาย (AMPS-H) 40 g ในน้ำกลั่น ทำให้สารละลายเป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 40% w/v ในระบบที่มีการหล่อเย็นและคนอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันจากความร้อนของปฏิกิริยาการสะเทิน ในขณะที่

เตรียมสารละลาย NaOH วัดค่าการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบส (pH) ด้วยพีเอชมิเตอร์ เมื่อ pH มีค่าเข้าใกล้ 7 ให้เปลี่ยนความเข้มข้นสารละลาย NaOH 1.0 M และ 0.1 M ตามลำดับ [6] ปรับจนได้สารละลาย pH อยู่ในช่วง 7.1-7.2 จากนั้นถ่ายลงขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ml และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

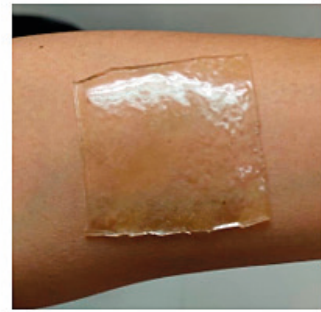
เตรียมแผ่นไฮโดรเจลจากระบบริเริ่มโดยใช้แสงอัลตราไวโอเลต-ซี (UV-C) โดยการผสมสารละลายมอนอเมอร์ Na-AMPS เข้มข้น 40% w/v ที่เตรียมได้ กับ 0.05% โมล ของ HHMP (Sigma Aldrich) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบใช้แสงอัลตราไวโอเลต 1.0% โมล NMBA (Acros Organics) เป็นสารเชื่อมขวาง และสารละลายสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยความเข้มข้น 2.25% w/v ซึ่งมีลักษณะเหลืองใส ดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ Na-AMPS ต่อเพกติน สกัดเป็นดังนี้ 100:0 95:5 90:10 และ 85:15% v/v ซึ่งสารละลายผสมทุกอัตราส่วนมี pH อยู่ในช่วง 7.0-7.2 และเพกตินสกัดนี้จะเติมได้สูงสุดเพียง 15% v/v เท่านั้น เพราะหากเติมในปริมาณที่มากกว่านี้จะไม่สามารถสังเคราะห์ให้เป็นแผ่นได้ นำพอลิเมอร์ผสมไปปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เทลงในแม่พิมพ์ที่มีส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วนำแม่พิมพ์เข้าในเครื่องกำเนิด UV-C ที่ความยาวคลื่น 250 nm (Philipp รุ่น UV-C 15 วัตต์) โดยฉายแสงในระยะห่างจากแม่พิมพ์ 2.5 cm ในทิศทางขนานกับแม่พิมพ์ เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง แผ่นไฮโดรเจลที่ได้มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) และกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้นี้จะถูกนำไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 (ก) เพกตินสกัดสกัดจากใบเครือหมาน้อย (ข) สารละลายสารสกัดจากใบเครือหมาน้อย และ (ค) ลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสกัดจากใบเครือหมาน้อย



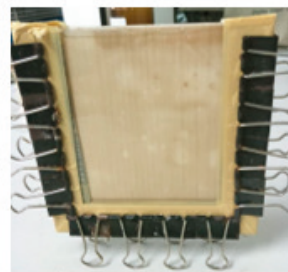
(ก)



(ข)

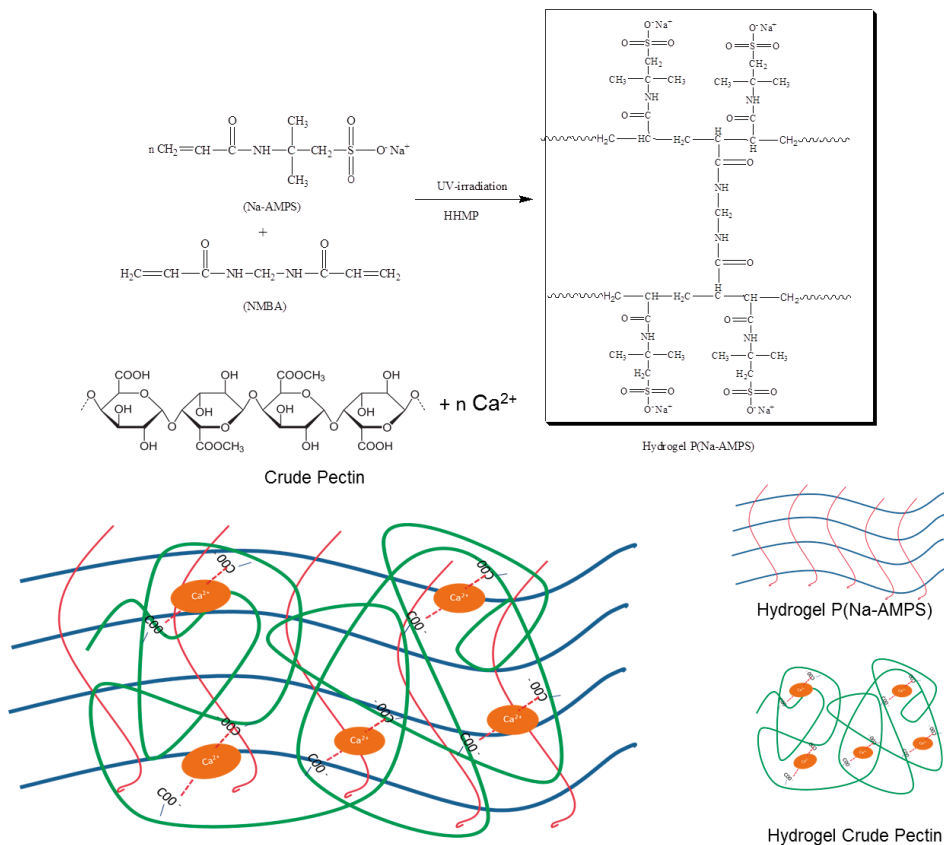


(ค)



(ง)

รูปที่ 2 ส่วนประกอบของเมมฟิมพ์ (ก) แผ่นกระจกใสที่ติดพอลิเอธิลีนเทอเรฟทาเรต (ข) กระจกใส (ค) แผ่นกั้นที่มีลักษณะเป็นถ้วย และ (ง) เมมฟิมพ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์



รูปที่ 3 กลไกการเตรียมไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยแทรกสอดแบบแบบเต็ม (full-IPN) [15]

2.3 การหาลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

2.3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคเอท-เทนนูทโทโลรีแฟกแทนซ์ฟูเรียทรานสฟอร์ม อินฟราเรด สเปกโทรสโกปี (ATR-FTIR)

วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจล ด้วยเทคนิค ATR-FTIR (ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น Spectrum 100) โดยนำแผ่นเจลขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$ หนา $0.045 \pm 0.002 \text{ cm}$ อบที่อุณหภูมิ 60°C ภายใต้อุณหภูมิอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่ วิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น $4000-600 \text{ cm}^{-1}$ ในห้องควบคุมอุณหภูมิ $25 \pm 1.0^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ $47 \pm 1\%$

2.3.2 การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก แอนาไลซิส (TGA) (ATR-FTIR)

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไฮโดรเจลและเสถียรภาพทางความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยเทคนิค TGA (ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น STA 6000) โดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60°C ภายใต้อุณหภูมิอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจนน้ำหนักคงที่ ประมาณ 5-10 mg ศึกษาในช่วงอุณหภูมิ $50-600^\circ\text{C}$ ด้วยอัตราการเพิ่มความร้อน $20^\circ\text{C}/\text{min}$ ภายใต้อุณหภูมิอากาศไนโตรเจน

2.4 ทดสอบสมบัติเกี่ยวข้องกับน้ำของแผ่น

ไฮโดรเจลสังเคราะห์

2.4.1 การทดสอบการเป็นเจลของไฮโดรเจล

ตัดแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ให้มีพื้นที่ $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ นำแผ่นไฮโดรเจลไปอบที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ จนน้ำหนักของเจลคงที่ ซึ่งน้ำหนักที่แน่นอน (น้ำหนักก่อนแช่, W_{i1}) และบันทึกผล นำแผ่นไฮโดรเจลที่ซึ่งน้ำหนักแล้วแช่ในน้ำกลั่นจนอิ่มตัว แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนัก (น้ำหนักหลังแช่, W_{i2}) และบันทึกผลที่ได้ ทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ครั้ง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการเป็นเจล (Gel Fraction) ดังสมการ 2 [16]

$$\% \text{ Gel Fraction} = \frac{W_{i2}}{W_{i1}} \times 100 \quad (2)$$

2.4.2 ทดสอบการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

นำแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มาตัด ให้มีพื้นที่ $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ นำแผ่นไฮโดรเจลไปอบให้แห้ง แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (W_{i1}) บันทึกผล จากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลมาแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักเจลเปียก (W_{i2}) และบันทึกผล จากนั้นนำมาคำนวณหาการดูดซับน้ำของแผ่นไฮโดรเจล (Water Uptake) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 ทำการทดลองตัวอย่างละ 5 ครั้ง [16]

$$\% \text{ Water Uptake} = \frac{W_{i2} - W_{i1}}{W_{i1}} \times 100 \quad (3)$$

2.4.3 การหาปริมาณน้ำองค์ประกอบ

ตัดแผ่นไฮโดรเจลให้มีพื้นที่ $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ จากนั้นนำไปไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก ซึ่งก็คือน้ำหนักของแผ่นไฮโดรเจลที่แห้ง (W_{i1}) จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ เป็นเวลาหนึ่งนาทีก่อน แล้วนำแผ่นไฮโดรเจลขึ้นมาซับน้ำที่เกินพอออกด้วยกระดาษทิชชูแล้วชั่งน้ำหนัก (W_{i2}) จากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลกลับลงไปแช่ในน้ำกลั่นต่อในทุกๆ หนึ่งนาทีก่อน ทำการทดลองเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำหนักของแผ่นไฮโดรเจลที่ซึ่งมีน้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณน้ำองค์ประกอบของไฮโดรเจล (Water Content) ดังสมการที่ 4 ทำการทดลอง

ตัวอย่างละ 5 ครั้ง [16]

$$\% \text{ Water Content} = \frac{W_{i2} - W_{i1}}{W_{i2}} \times 100 \quad (4)$$

2.4.4 การหาปริมาณน้ำคงอยู่

ตัดแผ่นไฮโดรเจลให้มีขนาดประมาณ $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ นำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $35.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาซับน้ำ แล้วชั่งน้ำหนักบันทึกน้ำหนักไฮโดรเจลเป็นเริ่มต้น (W_0) จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างไปไว้ในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมให้มีอุณหภูมิ $35 \pm 1.0^\circ\text{C}$ จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 นาที (W_t) จนน้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณน้ำคงอยู่ (Water Retention) ของแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ ดังตามสมการที่ 5 ทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ครั้ง [16]

$$\% \text{ Water Retention} = \frac{W_t}{W_0} \times 100 \quad (5)$$

2.5 ทดสอบสมบัติเชิงกล

การทดสอบความทนต่อแรงดึงของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ โดยทำการตัดไฮโดรเจลให้มีพื้นที่ $1.0 \times 5.0 \text{ cm}^2$ แล้วเก็บไว้ในถุงพลาสติกที่สะอาดและปิดให้มิดชิดวางไว้ในห้องทดสอบที่ควบคุมอุณหภูมิ $25 \pm 1.0^\circ\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ $47 \pm 1\%$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D882-91 โดยมีสภาวะของการทดสอบดังนี้ ระยะห่างของตัวรองรับตัวอย่าง (gauge length) 50.0 mm ตัววัดแรง (load cell) 1 N ความเร็วของการเคลื่อนสำหรับยึดตัววัดแรง (cross-head speed) 10 mm/min ทำการทดสอบตัวอย่างละ 5 ครั้ง

3. ผลและอภิปรายผลการทดลอง

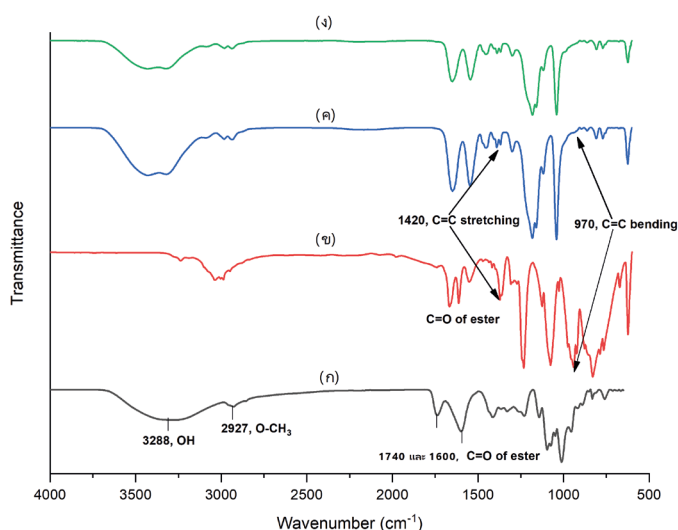
3.1. การหาลักษณะเฉพาะของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

3.1.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

แผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีลักษณะทางกายภาพเป็นเนื้อเดียวกัน โปร่งใส และสามารถติดกับผิวหนังโดยไม่ลอกหลุด ดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) มีความหนาอยู่ในช่วง $0.045 \pm 0.002 \text{ cm}$ เมื่อนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยเปรียบเทียบ FTIR สเปกตรัมของสารสกัดจากไบโอรีโอมานอย มอนอเมอร์ AMPS ไฮโดรเจล P(Na-AMPS) และไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสาร

สกัดจากใบเครือหมาน้อยอัตราส่วน 85:15 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก-ง) จาก FTIR สเปกตรัมดังกล่าว พบว่าสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยของงานวิจัยนี้ (รูปที่ 4 (ก)) แสดงถึงพิคลักษณะเฉพาะของเพกตินคือ O-CH₃ stretching ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2750-2950 cm⁻¹ เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่เมทิล-เอสเทอร์ของ galacturonic acid หมู่ OH stretching ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 2950-3280 cm⁻¹ หมู่ C=O ของเอสเทอร์ และ COO⁻ แสดงการสั่นของโมเลกุลที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1740 และ 1600 cm⁻¹ ตามลำดับสอดคล้องกับงานวิจัยของ Singthong และคณะ [9-10]

เมื่อเปรียบเทียบเส้นสเปกตรัมระหว่างมอนอเมอร์ AMPS ไฮโดรเจล P(Na-AMPS) และไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) ที่มีสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยอัตราส่วน 85:15% v/v ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข-ง) พบหลักฐานยืนยันการเกิดปฏิกิริยาโดยสังเกตจากพิคลักษณะเฉพาะ C=C ของมอนอเมอร์ AMPS ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1420 และ 970 cm⁻¹ หายไปเมื่อผ่านการพอลิเมอไรเซชันโดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) และผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพคือมีลักษณะเป็นแผ่นคงรูปไม่ละลายน้ำดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [17]



รูปที่ 4 FT-IR สเปกตรัมของ (ก) เพกตินสกัด (ข) มอนอเมอร์ AMPS (ค) ไฮโดรเจล P(Na-AMPS) และ (ง) ไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วน 85:15 % v/v

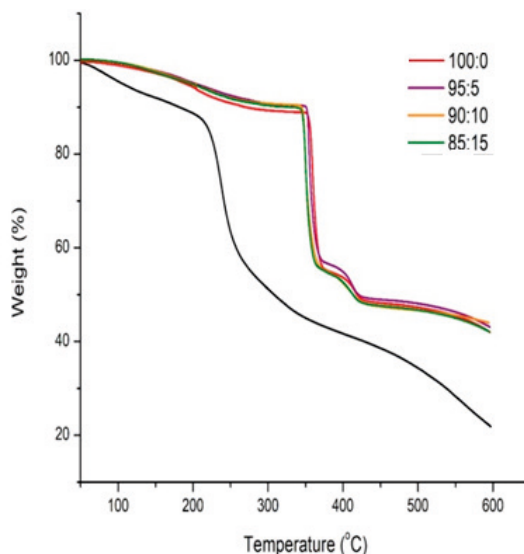
3.1.2 การวิเคราะห์ทางความร้อน

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนและการสูญเสีย น้ำหนักที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปด้วยเทคนิค TGA ของสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยที่มีเพกตินเป็นองค์ประกอบหลัก และไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดในอัตราส่วนๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่า TGA เทอร์โมแกรมของสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยมีการลดลงของน้ำหนัก 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกสูญเสีย น้ำหนัก 13% ที่อุณหภูมิ 50-200°C เป็นการสูญเสียน้ำหนักของความชื้นและสารที่โมเลกุลขนาดเล็กที่ได้การสกัด ขั้นตอนที่สองสูญเสียน้ำหนัก 48% ที่อุณหภูมิ 200-400°C เป็นการ

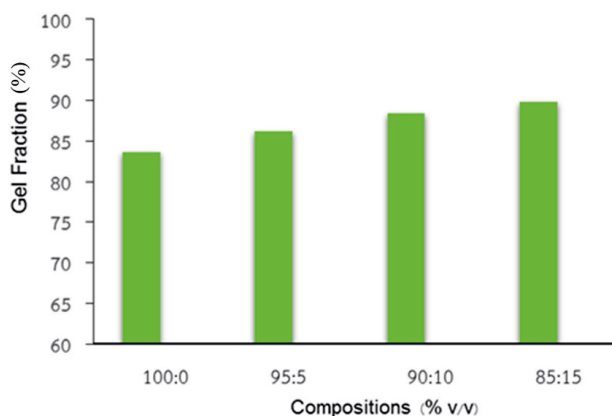
สูญเสียน้ำหนักของอะราบินแนนซึ่งเป็นพอลิเมอร์กิ่งของเพกติน และที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 เป็นการสูญเสียน้ำหนักของสายโซ่หลักของเพกตินสอดคล้องกับงานวิจัยของ Muthukumaran และคณะ [18]

ส่วน TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล P(Na-AMPS)/สารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วนต่างๆ 100:0 95:5 90:10 และ 85:15% v/v สูญเสียน้ำหนักสามขั้นตอน ในขั้นตอนแรก ที่อุณหภูมิ 105-350°C สูญเสียน้ำหนักประมาณ 11% เป็นการสูญเสียน้ำหนักของความชื้นและมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ในขั้นตอนที่สองสูญเสียน้ำหนัก 35% ที่อุณหภูมิ

ประมาณ 350-404°C เป็นการสูญเสียน้ำหนักของหมู่เมทิล (-CH₃) ในขั้นตอนสุดท้ายสูญเสียน้ำหนักประมาณ 7% ที่อุณหภูมิประมาณ 427°C เป็นการสูญเสียน้ำหนักของหมู่ซัลโฟเนต (-SO₃Na⁺) และเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เนื่องจากไฮโดรเจลสังเคราะห์มีโครงสร้างตาข่ายสามมิติ [19-20]



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบ TGA เทอร์โมแกรมเพกตินสกัด และไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วนต่างๆ



รูปที่ 6 ร้อยละการเป็นเจลของไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วนต่างๆ

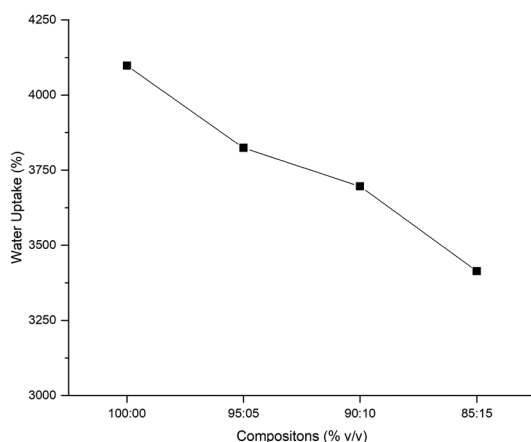
3.2 การทดสอบการเป็นเจลและการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้

เป็นการทดสอบสมบัติการเป็นเจลของไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) และสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0 95:5 90:10 และ 85:15% v/v

ตามลำดับ จากรูปที่ 6 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นเจลมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารสกัดซึ่งมีเพกตินองค์ประกอบหลักที่เติมเข้าไป และอัตราส่วน 85:15% v/v ความเป็นเจลสูงที่สุดถึง 90% เนื่องจากอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกระจายตัวของเพกตินใน P(Na-AMPS) และมากกว่านั้นปริมาณของไอออน Ca²⁺ ใน

เพกตินมีเพียงพอทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างหมู่ COOH ของเพกตินเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายเข้าไปแทรกสอดแบบเต็ม (Full-IPN) ในโครงร่างตาข่ายไฮโดรเจล P(Na-AMPS) จึงส่งผลให้โครงร่างตาข่ายมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ความเป็นเจลจึงเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับผลการทดสอบการดูดซับน้ำของแผ่นเจลลดลง

เมื่อการเป็นเจลเพิ่มขึ้นหรือปริมาณของเพกตินเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 7 แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้จะสามารถเติมสารสกัดได้มากที่สุดเพียง 15% v/v นั้น หากเติมในปริมาณที่มากกว่านี้ จะไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้ เนื่องจากจะเกิดการแยกเฟสระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด

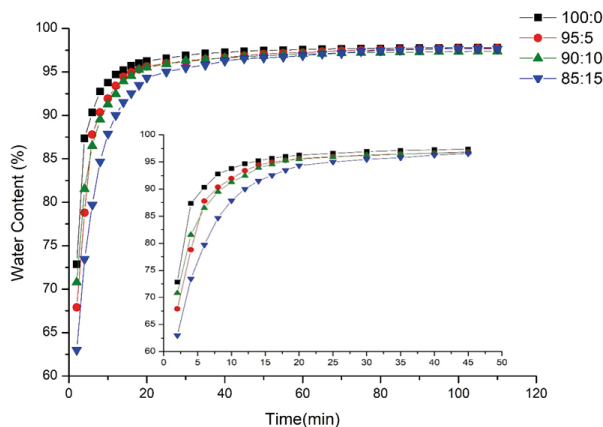


รูปที่ 7 ร้อยละการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วนต่างๆ

3.3 การหาปริมาณน้ำองค์ประกอบ

จากการศึกษาปริมาณน้ำองค์ประกอบ (Water Content) ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ผสมสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0 95:5 90:10 และ 85:15% v/v ตามลำดับ ดังแสดงรูปที่ 8 พบว่าไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยทุกอัตราส่วนมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำในช่วง 20 นาทีแรก

ลดลงตามปริมาณเพกตินในสารสกัดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นเจลที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2 เพราะโครงร่างตาข่ายของเพกตินที่เข้าไปแทรกสอดแบบเต็ม (Full-IPN) ในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ทำให้ความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายเพิ่มมากขึ้นและความเป็นรูพรุนของไฮโดรเจลลดลงจึงทำให้มีการดูดซับน้ำได้ลดลง เมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่ผสมสารสกัดในอัตราส่วน 100:0% v/v

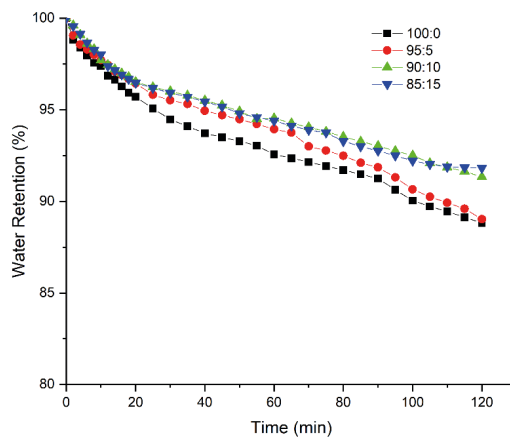


รูปที่ 8 ร้อยละปริมาณน้ำองค์ประกอบของแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วนต่างๆ

3.4 การหาปริมาณน้ำคงอยู่

จากการศึกษาปริมาณน้ำคงอยู่ (Water Retention) ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ผสมสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยที่อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0 95:5 90:10 และ 85:15% v/v ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 9 เป็นการหาความสามารถในการรักษาโมเลกุลน้ำของแผ่นไฮโดรเจลเมื่อปล่อยให้อยู่ในสภาวะที่โมเลกุลน้ำสามารถระเหยออกไปได้ จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วน 85:15% v/v มีร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่

มากที่สุด เนื่องจากสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยที่โครงสร้างเคมีที่ประกอบด้วยหมู่ OH และ COOH มากกว่าอัตราส่วนอื่น จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำได้ดี ส่งผลให้แผ่นไฮโดรเจลสามารถดูดซับโมเลกุลน้ำไว้ภายในโครงร่างตาข่ายได้ดีที่สุด จึงทำให้น้ำระเหยออกไปได้ยาก ปริมาณน้ำคงอยู่จึงสูงที่สุด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของไฮโดรเจลที่จะรักษาความชุ่มชื้นไว้ให้วัสดุได้นานขึ้นขณะใช้งาน



รูปที่ 9 ร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่ของไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS)บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วนต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS)บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อย

อัตราส่วน (%v/v)	ค่าความเค้น (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	ค่ามอดูลัส (MPa)
100:0	0.0232 ± 0.007	48.2 ± 2.05	0.0481 ± 0.001
95:5	0.0332 ± 0.009	90.1 ± 3.05	0.0368 ± 0.005
90:10	0.0318 ± 0.005	78.7 ± 2.73	0.0404 ± 0.010
85:15	0.0340 ± 0.004	95.9 ± 1.12	0.0354 ± 0.008

3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติสมบัติเชิงกลของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์ P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าทั้งความเค้น ร้อยละการยืด ณ จุดขาด

และค่ามอดูลัสของอัตราส่วน 85:15 %v/v เพิ่มขึ้นสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 1 เพราะนอกจากโครงร่างตาข่ายของเพกตินที่เข้าไปแทรกสอดแบบเต็ม (Full-IPN) ในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ทำให้ความหนาแน่นของโครงร่างตาข่าย

เพิ่มมากสมบัติเชิงกลจึงเพิ่มขึ้น โดยมีค่าความเค้นและร้อยละการยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 0.0340 MPa และ 96% ตามลำดับ ส่วนค่ามอดูลัสมีค่าเท่ากับ 0.0354 MPa ซึ่งมีค่าความเค้นเพิ่มขึ้น 46% และร้อยละการยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น 99% เมื่อเทียบกับแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ที่ไม่มีสารสกัดจากใบเครือหมาน้อย

4. สรุปผลการทดลอง

แผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์จาก P(Na-AMPS) และสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยในอัตราส่วน 100:0 95:5 90:10 และ 85:15% v/v สามารถเตรียมผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต โดยใช้ 0.05% โมล HHMP ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ 1% โมล NMBA เป็นสารเชื่อมขวาง จากผลการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะด้วย FTIR พบว่า C=C ของมอนอเมอร์ Na-AMPS หายไปหลังผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นคงรูปและไม่ละลายน้ำ จากผลการวิเคราะห์ TGA เทอร์โมแกรมได้แสดงลักษณะเฉพาะการสลายตัวขององค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของทั้งไฮโดรเจล P(Na-AMPS) บรรจุสารสกัด อีกทั้งยังเกิดการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ซึ่งเป็นการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาแบบเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุล เมื่อนำไฮโดรเจลสังเคราะห์ที่เตรียมได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าอัตราส่วน 85:15% v/v ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณเพกตินในสารสกัดจากใบเครือหมาน้อยมากที่สุดโดยไม่ทำให้แผ่นไฮโดรเจลเสียสภาพ งานวิจัยนอกจากจะเป็นการลดการใช้ P(Na-AMPS) ที่มีราคาแพงแล้วนั้นปริมาณเพกตินของอัตราส่วนนี้ ยังส่งผลต่อสมบัติต่างๆ เช่น เปอร์เซ็นต์การเป็นเจล ปริมาณน้ำคงอยู่ ค่าทนต่อแรงดึง และร้อยละการยืดสูงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติต่างๆ นี้ นำไปสู่การเพิ่มศักยภาพและยังเป็นแนวทางการนำสารสกัดที่ได้จากพืชในประเทศไปประยุกต์ใช้ให้หลากหลายและสะดวกมากขึ้น เช่น นำไปใช้เป็นวัสดุปิดแผล เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ สำหรับความอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงและอุปกรณ์พื้นฐานต่างๆ

6. เอกสารอ้างอิง

1. Liu, Y., Xie, J.J. and Zhang, X.Y., 2003, "Synthesis and Some Properties of the Copolymer of Acrylamide with 2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonic Acid," *Journal of Applied Polymer Science*, 90, pp. 3481-3487.
2. Madaghiele, M., Demitri, C., Sannino, A. and Ambrosio, L., 2014, "Polymeric Hydrogels for Burn wound Care: Advanced Skin Wound Dressings and Regenerative Templates," *Burns and Trauma*, 2 (4), pp. 153-161.
3. Lee, T.W., Kim, J.C. and Hwang, S.J., 2003, "Hydrogel Patches Containing Triclosan for Acne Treatment," *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 56, pp. 407-412.
4. Pereira, R., Mendes, A. and Bartolo, P., 2013, "Alginate/Aloe Vera Hydrogel Films for Biomedical Applications," *Procedia CIRP*, 5, pp. 210-215.
5. Durmaz, S. and Okay, O., 2000, "Acrylamide/2-Acrylamido-2-Methyl propane Sulfonic Acid Sodium Salt-Based Hydrogels: Synthesis and Characterization," *Polymer*, 41 (10), pp. 693-704.
6. Nalampang, K., Suebsanit, N., Witthayaprapakorn, C. and Molloy, R., 2007, "Design and Preparation of AMPS-Based Hydrogels for Biomedical Use as Wound Dressings," *Chiang Mai Journal of Science*, 34 (2), pp. 183-189.
7. Zhou, J., Ronald, F.C. and Alicja, M.M., 2005, "Pore-Filled Nanofiltration Membranes Based on Poly(2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonic Acid) Gels," *Journal of Membrane Science*, 254 (2), pp. 89-99.
8. Mishra, R.K., Banthia, A.K. and Majeed, B., 2010, "Pectin Base Formulations for Biomedical Applications: A Review," *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 5 (44), pp. 1-7.
9. Singthong, J., Ningsanonda, S., Cui, S.W. and Goff,

- H.D., 2004, "Structural Characterization, Degree of Esterification and some Gelling Properties of Krueo Ma Noy (*Cissampelos pareira*) Pectin," *Carbohydrate Polymers*, 58, pp. 391-400.
10. Singthong, J., Ningsanonda, S., Cui, S.W. and Goff, H.D., 2005, "Extraction and Physicochemical Characterization of Krueo Ma Noy Pectin," *Food Hydrocolloids*, 19, pp. 793-801.
11. Promsakha na Sakon Nakhon, P., Jangchud, A. and Jangchud, K., 2011, "Process Development for Pectin Production from Krueo Ma Noy Leaves (*Cissampelos pareira* L.)," *Proceedings of 49th Kasetsart University Annual Conference: Agro-Industry*, Bangkok, Thailand, pp. 499-507. (In Thai)
12. Vardhanabhuti, B. and Ikeda, S. 2006, "Isolation and Characterization of Hydrocolloids from Monoi (*Cissampelos pareira*) Leaves," *Food Hydrocolloids*, 20, pp. 885-891.
13. Sukboonyasatit, D., Pronnikom, N. and Natyay, N., 2018, "Chemical and Physical Properties of Pectin from Okra," *Khon Kaen Agriculture Journal*, 46 (1), pp 1418-1423. (In Thai)
14. Harris, D.C., 1995, Quantitative Chemical Analysis, W.H. Freeman and Company, United State of America.
15. Baipai, S.K. and Sharma, S., 2003, "Investigation of Swelling/Degradation Behavior of Alginate Beads Crosslinked with Ca^{2+} and Ba^{2+} Ions," *Reactive and Functional Polymers*, 59, pp. 129-140.
16. Kokabi, M., Sirousazar, M. and Hassan, Z.M., 2007, "PVA-Clay Nanocomposite Hydrogel for Wound Dressing," *European Polymer Journal*, 43, pp. 773-781.
17. Li, X., Wu, W. and Liu, W., 2008, "Synthesis and Properties of Thermo-Responsive Guar Gum/Poly(N-Isopropyl Acrylamide) Interpenetrating," *Carbohydrate Polymers*, 71, pp. 394-402.
18. Muthukumaran, C., Kanmani, B.R., Sharmila, G., Kumar, N.M. and Shanmugaparakash, M., 2018, "Carboxymethylation of Pectin: Optimization, Characterization and in-vitro Drug Release Studies" *Carbohydrate Polymers*, 194, pp. 311-318.
19. Thongpo, P., Kuntadong, P., Molloy, R. and Bunkerd, R., 2018, "Synthesis and Properties of Poly(Sodium-2-Acrylamido-2-Methylpropane Sulfonate) Hydrogel Sheets and Effect of Adding Gelatinized Cassava Starch," *Burapha Journal of Science*, 23 (3), pp. 1060-1069.
20. Baodong, Z., Dongzhuo, M., Wang, J., Jianwei, Z. and Shuang, Z., 2016, "Multi-Responsive Hydrogel Based on Lotus Root Starch," *International Journal of Biological Macromolecules*, 89, pp. 599-604.

