การสังเคราะห์และสมบัติของแผ่นไฮโดรเจลพอลิ(โซเดียม 2-อะคริลามิโด-2-เมทธิลโพรเพน ซัลโฟเนต) และผลของการเติมแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์

Synthesis and Properties of Poly(sodium 2-acrylamido-2-methypropane sulfonate) Hydrogel Sheets and Effect of Adding Gelatinized Cassava Starch

พจนีย์ ทองโพธิ์[1], พิมภนิจภา กันทาดง[1], โรเบิร์ต มอลลอย[2] และ รัตน์ฐาภัทร บุญเกิด[1*]

Potjanee Thongpo[1], Pimpanitpa Kuntadong[1], Robert Molloy[2] and Ratthaphat Bunkerd[1*]

[1] *สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน*

[2]*กลุ่มวิจัยพอลิเมอร์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่*

[1]*Program of Applied Chemistry, Faculty of Sciences and Liberal Arts,*

Rajamangala University of Technology Isan

[2]*Polymer Research Group, Department of Chemistry, Faculty of Science, Chiang Mai University, Chiang Mai*

Received : 25 April 2018

Accepted : 17 July 2018

Published online : 24 July 2018

บทคัดย่อ

การสังเคราะห์และวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจลผสม พอลิ(โซเดียม 2-อะคริลามิโด-2-เมทธิลโพรเพน ซัลโฟเนต) P(Na-AMPS) กับแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ โดย P(Na-AMPS) สังเคราะห์ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัลด้วยรังสีอัตราไวโอเลตที่มีน้ำเป็นตัวกลาง ใช้ 0.1 % โมล ของ 4, 4'-เอโซ-บีส(4-ไซยาโนเพนตาโนอิค แอซิด) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาแบบใช้แสง และ 1 % โมล เอ็น, เอ็น'-เมทธิลีน-บีส-อะคริลาไมด์ (NMBA) เป็นสารเชื่อมขวาง P(Na-AMPS) ที่ได้จากการสังเคราะห์จะถูกมาผสมกับแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ในอัตราส่วนโดยปริมาตร (% v/v) ดังนี้ 100:0, 97:3, 95:5 และ90:10 หรืออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (% w/w) ดังต่อไปนี้ 100:0 97:0.15 95:0.25 และ 90:0.50 วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะด้วยเทคนิค FT-IR และ TGA ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันยืนยันได้ด้วย FT-IR สเปกตรัม โดยพีคของ C=C ของมอนอเมอร์ Na-AMPS ที่ตำแหน่ง 1417 และ 950 เซนติเมตร$^{-1}$ หายไปหลังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเป็น P(Na-AMPS) จากผลการทดสอบพบว่าไฮโดรเจลผสมอัตราส่วนโดยปริมาตร 95:5 % v/v มี ปริมาณน้ำองค์ประกอบ ปริมาณน้ำคงอยู่ และสมบัติเชิงกลดีที่สุด

คำสำคัญ : ไฮโดรเจล, แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์, พอลิ(โซเดียม 2-อะคริลามิโด-2-เมทธิลโพรเพน ซัลโฟเนต), รังสีอัตราไวโอเลต, การเริ่มปฏิกิริยาด้วยแสง

***Corresponding author. E-mail** : Ratthaphat_bun@hotmail.com

Abstract

Hydrogel blends of poly(sodium 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonate), P(Na- AMPS), and gelatinized cassava starch were synthesized and characterized. P(Na-AMPS) was synthesized by photopolymerization under UV-irradiation in aqueous solution using 0.1 mole %of 4,4'-azo-bis-(4-cyanopentanoic acid) as photoinitiator and 1 mole % of N,N'-methylene-bis-acrylamide (NMBA) as crosslinking agent. The P(Na-AMPS) was then blended with gelatinized cassava starch in various v/v % ratios of 100:0, 97:3, 95:5 and 90:10 or w/w ratios of 100:0, 97:0.15, 95:0.25 and 90:0.50. Characterization was carried out by means of FT-IR and TGA. Polymerization was confirmed by the disappearance of the C=C peaks of the Na-AMPS monomer at 1417 and 950 cm^{-1} in the FT-IR spectrum. Subsequent testing of the hydrogel blends showed that the best combination of water content, water retention and mechanical properties were obtained in the case of the 95:5 % v/v blend.

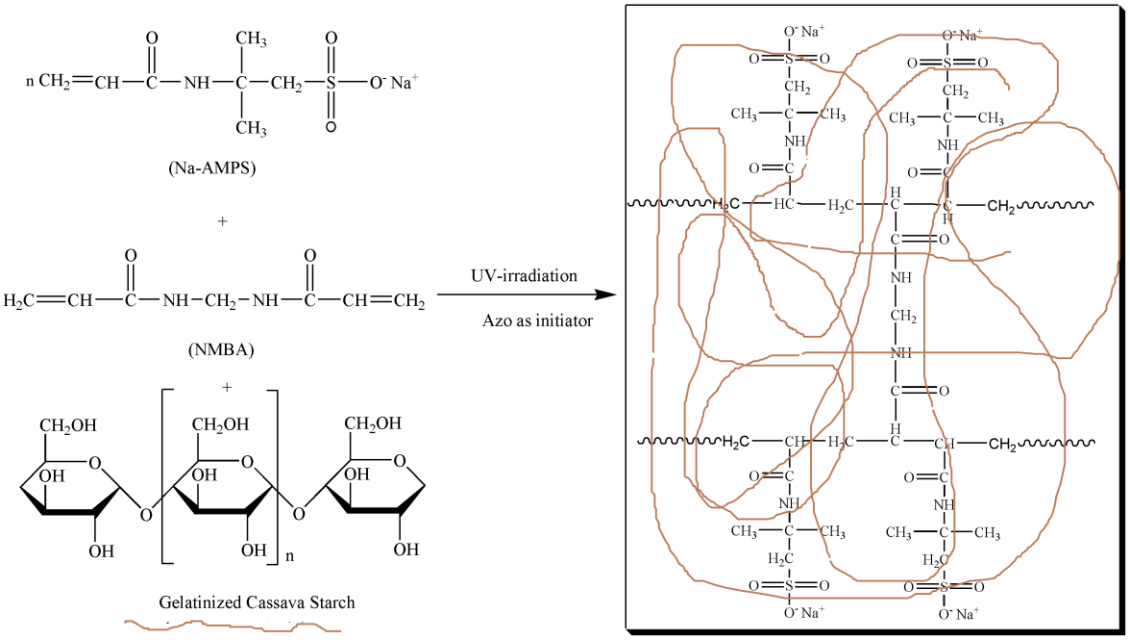
Keywords : hydrogel, gelatinized cassava starch, poly(sodium 2- acrylamido-2-methylpropane sulfonate), UV-irradiation, photoinitiation

บทนำ

โซเดียม 2-อะคริลามิโด-2-เมทธิลโพรเพน ซัลโพเนต (sodium 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonate, Na-AMPS สังเคราะห์ให้เป็นพอลิเมอร์และขึ้นรูปเป็นแผ่นไฮโดรเจลได้ เมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยตัวเริ่มปฏิกิริยาและเติมสารเชื่อมขวางให้เป็นพอลิเมอร์ชนิดโครงร่างตาข่ายสามมิติที่ไม่ละลายน้ำแต่ดูดซับน้ำได้มาก เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของมอนอเมอร์มีหมู่ซัลโฟเนตเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นหมู่ที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกที่ดี และมีหมู่ $-CH_3$ ที่ช่วยรักษาความเสถียรทางความร้อน และที่สำคัญ คือ มีหมู่ฟังก์ชันของอะคริลิค (acrylic function group) ที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (Liu *et al., 2003*) จากองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น ไฮโดรเจล P(Na-AMPS) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านการแพทย์อย่างกว้างขวาง เช่น แผ่นเจลปิดแผล วัสดุปลดปล่อยยา เป็นต้น (Durmaz & Okay, 2000): (Madaghiele *et al.,* 2014) การสังเคราะห์ P(Na-AMPS) เกิดผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัล (free radical polymerization ในระบบแสงอัลตร้าไวโอเลต (photoinitiation) เพื่อให้ตัวเริ่มปฏิกิริยาแตกตัวได้ฟรีแรดิคัลเพื่อเหนี่ยวนำให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและสารเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ (crosslinker) เกิดปฏิกิริยาเพื่อทำให้โครงสร้างของไฮโดรเจลมีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยใช้แสง (photopolymerisation) เป็นระบบที่ประโยชน์มากเครื่องมือยังสามารถประดิษฐ์ขึ้นได้เอง โดยใช้หลอดยูวีทางการค้าที่หาได้ทั่วไป ง่ายต่อการใช้งานและการควบคุม อีกทั้งวิธีการนี้นอกจากจะเกิดพอลิเมอไรเซชันแล้วยังเป็นการขึ้นรูปและฆ่าเชื้อได้ในขั้นตอนเดียว (Zhou *et al.,* 2005) ได้ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด P(AMPS) ซึ่งใช้ 2-hydroxy-1-[4-(2-hydroxy ethoxy) phenyl]-2-methyl-1-propanone เป็นตัวริเริ่มสำหรับการใช้แสงอัลตราไวโอเลต และใช้ NMBA เป็นตัวเชื่อมต่อสายโซ่ พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของมอนอเมอร์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ไฮโดรเจลที่ได้มีค่าสัดส่วนการบวมลดลง อันเนื่องมาจากความหนาแน่นของโครงร่างตาข่ายที่เพิ่มมากขึ้น เพราะเกิดการเชื่อมต่อทั้งทางกายภาพและอันตรกิริยาทางเคมี เช่นดียวกับ (Witthayaprapakorn, 2010) สังเคราะห์โดยทำ 2-อะคริลามิโด-2-เมทธิลโพรเพนซัลโฟนิก แอซิด (AMPS) ทำให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ การสังเคราะห์โดยใช้ตัวเชื่อมต่อ

สายโซ่ชนิด NMBA และ 4,4'-เอโซ-บีส (4-ไซยาโนเพนตาโนอิค แอซิด) เป็นตัวเริ่มผ่านปฏิกิริยาฟรีแรดิคัลพอลิเมอไรเซชันในสารละลายที่มีน้ำตัวกลางเพื่อใช้เป็นแผ่นปิดแผล แต่จากผลการทดสอบพบว่าสมบัติต่างๆ ยังคงด้อยอยู่มาก จึงได้มีงานวิจัยเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการนำไปผสมกับพอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น แป้งจากพืชต่างๆ (Baodong, *et al.*, 2016) เตรียมไฮโดรเจลจากอะคริลิก แอซิด และ 2-อะคริลามิโด-2-เมทธิลโพรเพนซัลโฟนิก แอซิด โคพอลิเมอร์ผสมกับแป้งรากดอกบัวสังเคราะห์โดยโคพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดดิคัล NMBA เป็นสารเชื่อมขวาง ใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (KPS) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยาด้วยระบบความร้อน พบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้น การบวมตัว (swelling) ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และอลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ที่อุณหภูมิ 25–65 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการบวมตัวได้นานขึ้น นอกจากนี้พบว่าไฮโดรเจลสามารถตอบสนองต่อค่าพีเอชต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว แป้งมันสำปะหลังจัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่มากในประเทศไทย โครงสร้างภายในประกอบด้วยอะไมโลส และอะไมโลแพคติน แป้งจึงประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซีอยู่เป็นจำนวนมาก (Riyajan *et al.*, 2015) ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ผสมกับแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ในอัตราส่วนต่างๆ ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัลในระบบแส่งอัลตราไวโอเลต โดย 4,4'-เอโซ-บีส(4-ไซยาโนเพนตาโนอิค แอซิด) (Azo) เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา และ NMBA เป็นสารเชื่อมขวาง โครงสร้างเคมีและกลไกการสังเคราะห์นี้ ดังแสดงในภาพที่ 1 พร้อมทั้งศึกษาผลของการเติมแป้งต่อสมบัติต่างๆ เช่น ปริมาณน้ำองค์ประกอบ (water content) ปริมาณน้ำคงอยู่ (water retention) และสมบัติเชิงกล เป็นต้น เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มสมบัติเชิงกล โดยที่ไม่ทำให้ปริมาณน้ำองค์ประกอบ และปริมาณน้ำคงอยู่ของแผ่นไฮโดรเจลที่เตรียมได้ลดลง ก่อนนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เป็นวัสดุปิดแผลที่มีความแข็งแรงมากขึ้น



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงกลไกการสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS)เบลนด์กับแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมี

2-อะคริลามิโด-2-เมทธิลโพรเพน ซัลโฟนิกแอซิด ความบริสุทธิ์ 97 % และ เอ็น, เอ็น'-เมทธิลีน-บีส-อะคริลาไมด์ (NMBA) ความบริสุทธิ์ 98 % จากบริษัท ACROS ORGANICS โซเดียมไฮดรอกไซด์ จากบริษัท AJAX FINECHEM แป้งมันสำปะหลังจากบริษัทเอี่ยมเฮงโมดิฟายด์ สตาทซ์, นครราชสีมา ประเทศไทย 4, 4'-เอโซ-บีส(4-ไซยาโนเพนตาโนอิค แอซิด) ความบริสุทธิ์ 96 % จากบริษัท FLUKA

2. อุปกรณ์และเครื่องมือ

เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปคโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น Spectrum100 เครื่องเทอร์มอล กราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ ยี่ห้อ Perkin-Elmer รุ่น STA 6000 เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ ยี่ห้อ LLOYD Instrument รุ่น LF plus เครื่องพีเอชมิเตอร์ ยี่ห้อ Sartorius รุ่น Doeu-pH+-1 doe เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น ED224S หลอดกำเนิดแสงอัตราไวโอเลต ยี่ห้อ Philipp รุ่น UV-C

3. วิธีการทดลอง

3.1) การสังเคราะห์และการเตรียมแผ่นไฮโดรเจลจาก Na-AMPS และแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์

ในการทดลองนี้ได้ทำการสังเคราะห์และเตรียมไฮโดรเจลผสม P(Na-AMPS) กับแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ P(Na-AMPS) ผ่านระบบบริเริ่มของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้แสงอัลตราไวโอเลตที่มีน้ำเป็นตัวกลาง เริ่มจากปิเปตสารละลาย Na-AMPS (40 % w/v) และแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ (2 % w/v) อัตราส่วนโดยปริมาตร (% v/v) ต่างๆ ดังนี้ 100:0 97:3 95:5 และ 90:10 หรืออัตราส่วนโดยน้ำหนัก (% w/v) 100:0 97:0.15 95:0.25 และ90:0.50 ลงในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติม 0.1 % โมล ของ 4,4'-เอโซ-บีส(4-ไซยาโนเพนตาโนอิค แอซิด) เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา และ 1.0 % โมล ของ NMBA เป็นสารเชื่อมขวาง ปั่นกวนสารละลายผสมจนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน จึงเทสารละลายผสมลงในแม่พิมพ์ แล้วนำแม่พิมพ์เข้าเครื่องกำเนิดแสงอัลตราไวโอเลต โดยฉายแสงอัลตราไวโอเลตในระยะห่างจากแม่พิมพ์ 2.5 เซนติเมตร ในทิศทางขนานกับแม่พิมพ์เป็นเวลา 60 นาที ก่อนนำไปวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป

3.2) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรเจล ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟาเรดสเปกโทรโฟโทเมตเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันตั้งแต่เลขคลื่น 4000-600 เซนติเมตร$^{-1}$

3.3) วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

การวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อน อุณหภูมิการสลายตัวด้วยความร้อน และลักษณะการสูญเสียน้ำหนักเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคเทอร์มอลกราวิเมตริกอนาไลซิส (Thermal gravimetric analysis, TGA) โดยเตรียมตัวอย่างไฮโดรเจลให้มีขนาดเล็กๆ น้ำหนักประมาณ 5-10 มิลลิลิตร บรรจุลงในถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่าง ศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 ถึง 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศการไหลเวียนของแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที รายงานผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ช่วงอุณหภูมิที่สูญเสียน้ำหนักของสสาร และอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (Thermal Degradation Temperature , T_d)

3.4) การหาปริมาณน้ำองค์ประกอบ (Water Content, WC)

การหาปริมาณน้ำสมดุลเป็นการวัดความสามารถในการดูดซับน้ำของแผ่นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นได้โดยทำการตัดแผ่นไฮโดรเจลขนาด 1.5 x 1.5 เซนติเมตร$^{-2}$ ต่อจากนั้นนำไปไว้ในอินคิวเบเตอร์ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักซึ่งก็คือน้ำหนักของแผ่นไฮโดรเจลที่แห้ง จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งนาที แล้วนำแผ่นไฮโดรเจลขึ้นมาซับน้ำที่เกินพอออกด้วยกระดาษทิชชูหรือกระดาษกรอง แล้วชั่งน้ำหนักจากนั้นนำแผ่นไฮโดรเจลกลับลงไปแช่น้ำกลั่นต่อในทุกๆ หนึ่งนาที ทำการทดลองจนกระทั่งน้ำหนักของแผ่นไฮโดรเจลที่ชั่งมีน้ำหนักคงที่ การหาปริมาณน้ำร้อยละที่มีเป็นองค์ประกอบอยู่ภายในไฮโดรเจลสามารถคำนวณได้จากสมการ 1 (Li *et al.*, 2008)

$$\% \text{ ปริมาณน้ำองค์ประกอบ} = \frac{(\text{น้ำหนักเจลที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักเจลที่แห้ง})}{\text{น้ำหนักเจลที่ดูดซับน้ำ}} \times 100 \qquad (1)$$

3.5) การหาปริมาณน้ำคงอยู่ (Water Retention, WR)

การหาปริมาณน้ำคงอยู่เป็นการหาความสามารถในการรักษาโมเลกุลน้ำของแผ่นไฮโดรเจลเมื่อมีการปล่อยให้อยู่ในสภาวะที่โมเลกุลน้ำสามารถระเหยออกไปได้การทดสอบเริ่มจากนำแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่างที่มีขนาด 1.5 x 1.5 เซนติเมตร$^{-2}$ ไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมาซับน้ำแล้วนำไปชั่งน้ำหนักบันทึกน้ำหนักไฮโดรเจลเป็นเริ่มต้นจากนั้นนำแผ่นตัวอย่างไปไว้ในอินคิวเบเตอร์ที่ควบคุมให้มีอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนักตามช่วงเวลาที่ต้องการจนน้ำหนักคงที่จากนั้นคำนวณหาค่าปริมาณน้ำคงอยู่ของแผ่นไฮโดรเจลตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ ตามสมการ 2 (Li *et al., 2008)*

$$\% \text{ ปริมาณน้ำคงอยู่} = \frac{\text{ปริมาณน้ำ ณ เวลาใด}}{\text{ปริมาณน้ำเริ่มต้น}} \times 100 \qquad (2)$$

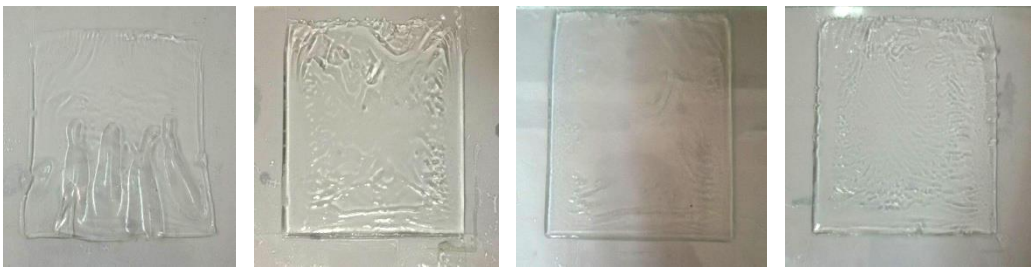
3.6) ศึกษาสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ ของบริษัท LLOYD Instrument รุ่น LF plus ตามมาตรฐาน ASTM D882-91 ชิ้นงานที่ทดสอบรูปแบบแผ่นไฮโดรเจลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความกว้าง 1 เซนติเมตร ความยาว 10 เซนติเมตร และความหนา 0.70$\pm$0.03 โดยที่ตัววัดแรงแรงดึง (Load cell) 1 กิโลนิวตัน ความเร็วในการทดสอบ (Crosshead speed) 1 เซนติเมตรต่อนาที ระยะหางตัวรองรับตัวอย่าง (Gauge length) 5 เซนติเมตร ทำการทดสอบแต่ละตัวอย่างด้วยชิ้นงานทดสอบอย่างน้อย 5 ชิ้น

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

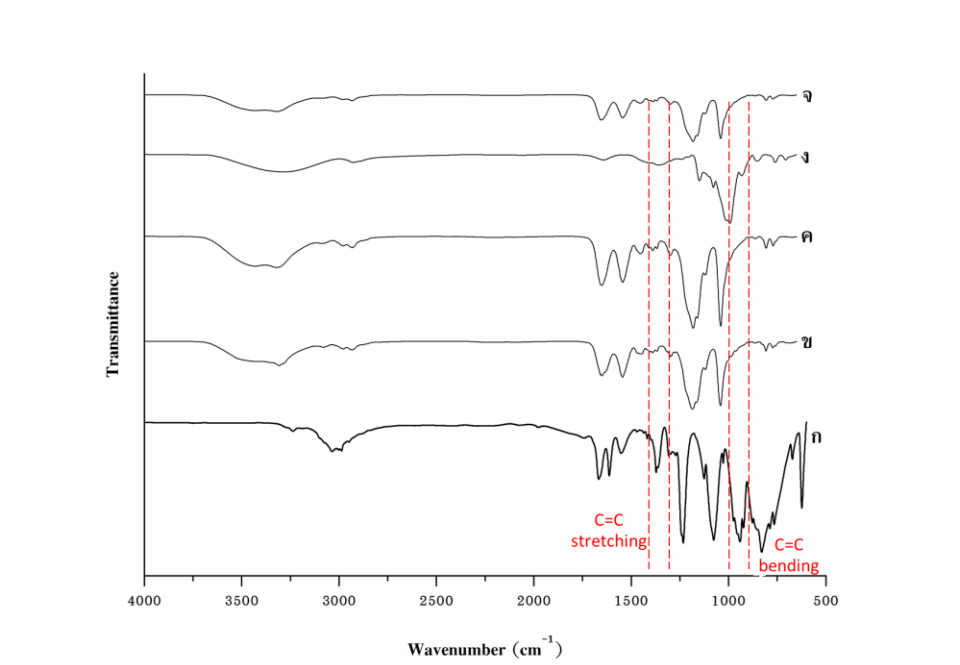
1) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ของไฮโดรเจลแบบผสม P(Na-AMPS) กับแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ที่สังเคราะห์ได้จากระบบบริเริ่มของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบใช้แสงอัลตราไวโอเลต พบว่าแผ่นตัวอย่างที่อัตราส่วนผสม P(Na-AMPS) กับแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ 95:5 โดยปริมาตร มีความคงรูปมากที่สุด เนื่องจากอัตราส่วนนี้มีปริมาณแป้งที่เหมาะสม สายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงกระจายตัวแทรกสอดได้อย่างสม่ำเสมอในโครงร่างตาข่ายสามมิติของ P(Na-AMPS) ตรงข้ามกับอัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งน้อยกว่าและมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยในกรณีที่ปริมาณแป้งน้อยกว่าส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลไม่เพียงพอที่จะเข้าไปแทรกสอดในโครงร่างตาข่าย และอัตราส่วนที่มีปริมาณแป้งมากเกินไปนั้นทำให้เกิดการแยกเฟสระหว่าง P(Na-AMPS) กับแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ จึงทำแผ่นไฮโดรเจลไม่คงรูป ดังแสดงในภาพที่ 2 จากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างด้วย FT-IR พบว่าสเปคตรัมของมอนอเมอร์ AMPS P(Na-AMPS) แผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ และไฮโดรเจลเบลนด์ P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก-จ) พบว่าพีคส่วนใหญ่มีตำแหน่งที่สอดคล้องกัน ซึ่งอาจเป็นเพราะพอลิเมอร์ทั้งสามชนิดมีโครงสร้างคล้ายกัน แต่พบหลักฐานสำคัญที่สามารถยืนยันการเกิดพอลิเมอไรเซชันได้ จากพีคในช่วงเลขคลื่น 1417 และ 950 เซนติเมตร$^{-1}$ ซึ่งเป็นช่วงการสั่นของโมเลกุล C=C แบบยืดและแบบงอ ตามลำดับ (Maleki *et al.*, 2016) ของมอนอเมอร์ AMPS หายไปหลังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเป็น P(Na-AMPS) ดังแสดงภาพที่ 3 (ก-ข) ถึงแม้ว่าสเปตรัมของ P(Na-AMPS) และแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) จะไม่แตกต่างกัน ดังแสดงภาพที่ 3 (ข-ค) แต่ P(Na-AMPS) ก็สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นไฮโดรเจลได้หลังเติมสารเชื่อมขวางดังแสดงในภาพที่ 2 เช่นเดียวกับ FT-IR สเปคตรัมของสำปะหลังเจลาติไนซ์ และไฮโดรเจลผสม P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ ดังแสดงในภาพที่ 3 (ง-จ) เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองไม่เกิดปฏิกิริยากัน เกิดเพียงอันตรกิริยาเท่านั้น ซึ่งการเกิดอันตรกิริยานี้ส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของแผ่นเจลดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



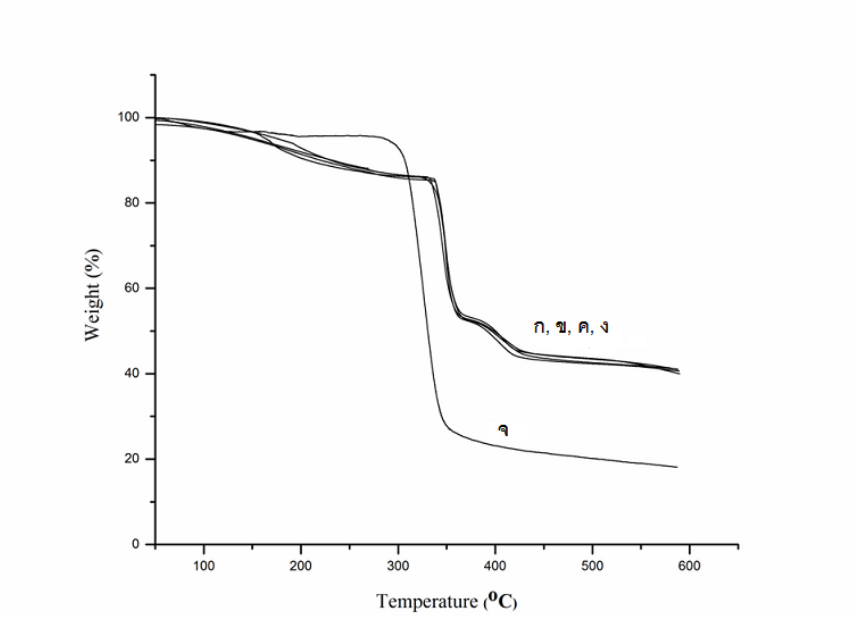
(ก) (ข) (ค) (ง)

ภาพที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นไฮโดรเจลผสม P(Na- AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ อัตราส่วนโดยปริมาตร (% v/v) (ก) 100:0, (ข) 97:3, (ค) 95:5, (ง) 90:10



ภาพที่ 3 FT-IR สเปคตรัมของ (ก) มอนอเมอร์ AMPS (ข) P(Na-AMPS) (ค) ไฮโดรเจล P(Na- AMPS) (ง) แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ และ (จ) ไฮโดรเจลผสม P(Na- AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์

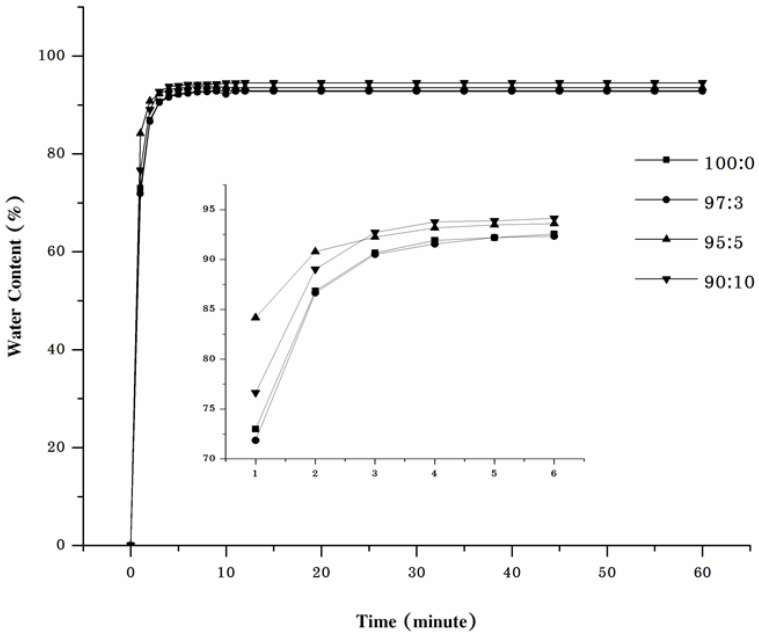
2) สมบัติทางความร้อน



ภาพที่ 4 TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์อัตราส่วนโดยปริมาตร(% v/v) (ก) 100:0 (ข) 97:3 (ค) 95:5 (ง) 90:10 และ (จ) แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์

จากลักษณะ TGA เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ 2 % w/v พบว่ามีการลดลงของน้ำหนัก 1 ขั้นตอน สูญเสียน้ำหนักประมาณ 72 % ณ อุณหภูมิ 308 °C เป็นการสูญเสียของ C-OH แตกต่างจาก TGA เทอร์โมแกรมของไฮโดรเจล poly (Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ในอัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0, 97:3, 95:5 และ 90:10 % v/v มีการลดลงของน้ำหนัก 3 ขั้นตอน ในช่วงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน คือ ในขั้นตอนแรกสูญเสียน้ำหนักประมาณ 13 % ณ อุณหภูมิ 113 °C เป็นการสูญเสียน้ำหนักของของความชื้น โมเลกุลที่มีสายโซ่สั้น และมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ในขั้นตอนที่สองสูญเสียน้ำหนักประมาณ 34 % ณ อุณหภูมิประมาณ 335 °C เป็นการสูญเสียน้ำหนักของโมเลกุลหมู่เมทธิล ($-CH_2$) ในส่วนของพอลิเมอร์หลักที่เกิดการเชื่อมต่อกันโดยการแตกตัวของพันธะคู่ (C=C) ของสารเชื่อมขวาง NMBA ในขั้นตอนสุดท้ายสูญเสียน้ำหนักประมาณ 8 % ณ อุณหภูมิประมาณ 400 °C เป็นการสูญเสียของของหมู่ซัลโฟนิก (–SOH) และเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดเป็นเถ้าของสารเหลืออยู่ (Baodong *et al.*, 2016) เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ไฮโดรเจลที่ไม่เติมแป้งในอัตราส่วน 100:0 กับไฮโดรเจลที่เติมแป้งในอัตราส่วน 97:3, 95:5 และ 90:10 % v/v พบว่าปริมาณของแป้งไม่มีผลเสถียรภาพทางความร้อนดังแสดงในภาพที่ 4 (ก-ง)

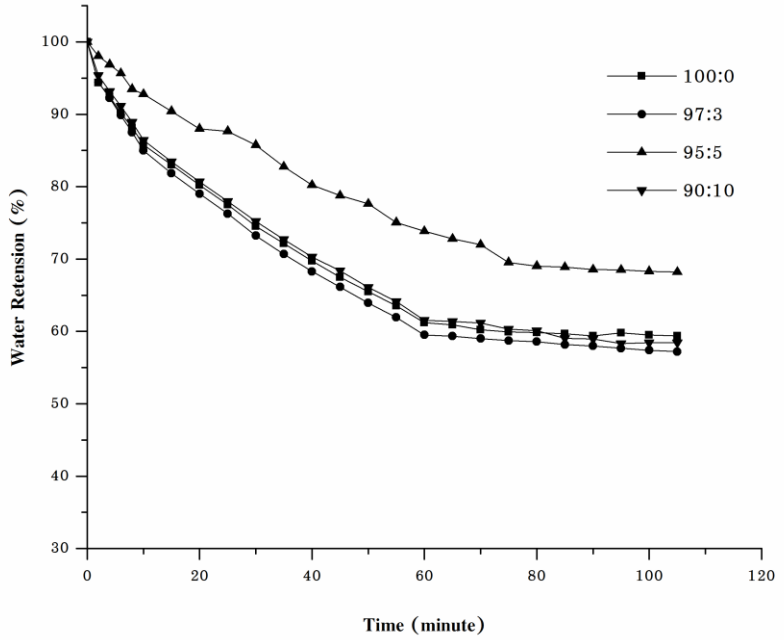
3) การหาปริมาณน้ำองค์ประกอบ (Water Content, WC)



ภาพที่ 5 ร้อยละปริมาณน้ำองค์ประกอบของแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ในอัตราส่วนโดยปริมาตร (% v/v) ต่างๆ

จากการศึกษาปริมาณน้ำองค์ประกอบ (water content) ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0, 97:3, 95:5 และ 90:10 % v/v ตามลำดับ พบว่าไฮโดรเจล P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ในทุกๆ อัตราส่วนมีประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่เติมแป้งในอัตราส่วนโดยปริมาตร 100:0 โดยสังเกตได้จากภาพที่ 5 อัตราส่วนโดยปริมาตร 95:5 มีปริมาณน้ำองค์ประกอบในช่วงนาทีแรกมากที่สุด ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวเกิดการกระจายที่ดีของมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ จึงแทรกสอดในโครงร่างสามมิติของไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ได้ดี หมู่ไฮดรอกซี (–OH) ของแป้งก็จะเกิดการกระจายตัวในแผ่นเจลได้อย่างสม่ำเสมอ จึงทำให้หมู่ (–OH) สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำจากภายนอกโมเลกุลได้มากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ

4) การหาปริมาณน้ำคงอยู่ (Water Retention, WR)



ภาพที่ 6 ร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่ของแผ่นไฮโดรเจล P(Na- AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ที่อัตราส่วนต่างๆ

จากการศึกษาปริมาณน้ำคงอยู่ (water retention) ณ เวลาต่างๆ ของแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์อัตราส่วนต่างๆ ดังนี้ 100:0, 97:3, 95:5 และ 90:10 % v/v ตามลำดับ พบว่าที่อัตราส่วนโดยปริมาตร 95:5 มีร้อยละปริมาณน้ำคงอยู่มากที่สุด อาจเนื่องจากการแทรกสอดภายในโครงสร้างของโมเลกุลระหว่างไฮโดรเจล P(Na-AMPS)และแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ของอัตราส่วนนี้เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงเกิดกระจายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์แป้งเจลลาติไนท์ที่สม่ำเสมอซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพ ดังแสดงในภาพที่ 2 (ค) ดังนั้น –OH ภายในโครงร่างตาข่ายจึงเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของน้ำได้ดีส่งผลให้แผ่นเจลสามารถดูดซับโมเลกุลน้ำไว้ในโครงสร้างตาข่ายได้มากดีกว่าอัตราส่วนอื่นๆ จึงทำให้น้ำระเหยออกไปได้ยาก ปริมาณน้ำคงอยู่จึงสูงสุด (Mileki *et al.*, 2017)

5) **สมบัติเชิงกล**

ตารางที่1 ค่าความเค้น ร้อยละการยืด และค่ามอดูลัสของยัง ของแผ่นไฮโดรเจลสังเคราะห์

อัตราส่วน (% v/v)	ค่าความเค้น (MPa)	ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	ค่ามอดูลัสของยัง (MPa)
100:0	0.0347 ± 0.010	45.9±0.090	0.0754±0.010
97:3	0.0251±0.007	36.7±0.100	0.0697±0.070
95:5	0.0580±0.015	82.6±0.130	0.0699±0.050
90:10	0.0381±0.005	48.9±0.080	0.0794±0.010

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลแบบทนแรงดึงของไฮโดรเจลผสม P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ความเข้มข้นอัตราส่วนต่างๆ พบว่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ทั้งความเค้น ร้อยละระยะยืดก่อนขาด ค่ายังมอดูลัสของยัง มีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วน มีเพียงอัตราส่วน 95:5 โดยปริมาตร เท่านั้นที่มีสมบัติเชิงกลทั้งความเค้นและร้อยละการยืดก่อนขาดเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 0.0580 MPa และ 82 % ตามลำดับ ส่วนค่ามอดูลัสลดลง มีค่าเท่ากับ 0.0699 ซึ่งค่าความเค้นเพิ่มขึ้น 67 % และร้อยละการยืดก่อนขาดเพิ่มขึ้น 80 % เมื่อเทียบกับแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) ที่ไม่มีแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ จากการผลทดลองดังกล่าวสามารถยืนยันได้ว่าไฮโดรเจลเตรียมได้ มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการคงรูปของแผ่นไฮโดรเจล ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วน 95:5 % v/v เป็นอัตราที่เหมาะสมทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น

สรุปผลการวิจัย

ไฮโดรเจลผสม P(Na-AMPS)และแป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ในอัตราส่วนต่างๆ สามารถสังเคราะห์และเตรียมได้ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัลในระบบแสงอัลตราไวโอเลต โดยออกแบบให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นกึ่งอินเตอร์เพเนเตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (semi-IPN) ซึ่งประกอบด้วยสายโซ่ของ P(Na-AMPS) ที่ถูกเชื่อมต่อด้วยสารเชื่อมขวางคือ NMBA ประกอบเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ และมีสายโซ่พอลิเมอร์แป้งเจลลาติไนซ์แทรกอยู่ภายในโครงร่างตาข่ายดังแสดงในภาพที่ 1 จากการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติต่างๆ ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยเทคนิค FT-IR และลักษณะทางกายภาพแสดงให้เห็นว่ามอนอเมอร์ AMPS เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีแรดิคัลโดยรังสีอัตราไวโอเลตเป็นแผ่นไฮโดรเจล P(Na-AMPS) และไฮโดรเจลเบลนด์ P(Na-AMPS)/แป้งมันสำปะหลังเจลาติไนซ์ได้ การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีเสถียรภาพทางความร้อนได้สูงถึง 335 องศาเซลเซียส แต่เสถียรภาพทางความร้อนไม่ขึ้นกับปริมาณของแป้งที่เติมลงไป จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนโดยปริมาตร 95:5 เป็นอัตราส่วนที่มี ปริมาณน้ำองค์ประกอบ ปริมาณน้ำคงอยู่ และสมบติเชิงกลเพิ่มขึ้น และมีความคงรูปมากที่สุด จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมนำไปประยุกต์ใช้ในด้านการแพทย์เป็นวัสดุปิดแผลที่ใช้งานได้สะดวกมากขึ้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปะศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา สำหรับอุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัยในหัวข้อนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

ASTM Standard D882-91, (2003)., “Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting”, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Baodong, Z., Dongzhuo, M., Wang, J., Jianwei, Z., & Shuang,Z. (2016). Multi-responsive hydrogel based on lotus root starch. *International Journal of Biological Macromolecules, 89*, 599-604.

Durmaz, S., & Okay, O. (2000). Acrylamide/2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid sodium salt-based hydrogels: synthesis and characterization. *Polymer, 41*(10), 3693-3704.

Li, X., Wu, W., & Liu, W. (2008). Synthesis and properties of thermo-responsive giuar gum/poly(n-isopropyl acrylamide) interpenetrating. *Carbohydrate Polymer, 71*, 394-402.

Liu, Y., Xie, J. J., & 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*, 3481-3487.

Madaghiele, M., Demitri, M., Sannino, A., & Ambrosio, L. (2014). Polymeric hydrogels for burn wound care: advanced skin wound dressings and regenerative templates. *Burns & Trauma*, *2*(4), 153-161.

Maleki, L., Edlund, U., & Albertson, A. (2017). Synthesis of full interpenetrating hemicellulose hydrogel networks. *Carbohydrate Polymer, 170*, 254-268.

Riyajan, S., Sukhlaaied, W., & Keawmang, W. (2015). Preparation and properties of a hydrogel of maleated poly(vinyl alcohol) (PVAM) grafted with cassava starch, *Carbohydrate Polymer, 122*, 301-307.

Witthayaprapakorn, C. (2011). Design and preparation of synthetic Hydrogels for biomedical use as wound dressings. *Procedia Engineering*, *8*, 286-291.

Zhou, J., Ronald, F. C., & Alicja, M. M. (2005). Pore-filled nanofiltration membranes based on poly(2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid) gels. *Journal of Membrane Science, 254*(1-2), 89-9