

สมบัติของฟิล์มไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและว่านหางจระเข้

Properties of Hydrogel Films from Carboxymethylcellulose and *Aloe vera* (Linn.) Burm. f.

ชนิษฐา เจริญลาภ^{1*}, ธัญลักษณ์ ศรีสุข², ปทุมทิพย์ ปราบพาล³, ศศิวิมล วุฒิกนกกาญจน์⁴
Khanittha Charoenlarp^{1*}, Tanyalak Srisuk², Pathumthip Prabphane³,
Sasiwimol Wootthikanokkhan⁴

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเคมีสิ่งทอ คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงทพ

²สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงทพ

³สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงทพ

⁴สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงทพ

¹Department of Textile Chemical Engineering, Faculty of Textile Industries, Rajamangala University of
Technology Krungthep, Thailand

²Department of Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

³Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Krungthep, Thailand

⁴Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology
Krungthep, Thailand

*Corresponding Author. Tel. 08 9142 5195, E-mail: khanittha.c@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส กับว่านหางจระเข้ โดยใช้ เอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์ เป็นสารก่อก้อนเชื่อมโยง แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา และกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ รวมทั้งศึกษาสมบัติสมบัติเชิงกลและสมบัติการดูดซึมน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ ทดลองโดยแปรผันอัตราส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับสารสกัดหยาบจากว่านหางจระเข้ ปริมาณเอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์ ปริมาณแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต และปริมาณกลีเซอรอล ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรเจล คือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส: สารก่อก้อนว่านหางจระเข้: เอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์: แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต: กลีเซอรอล ในอัตราส่วน 10: 20: 0.2: 0.2: 1 อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง ได้ไฮโดรเจลที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึง 0.014 ± 0.004 เมกะพาสคัล ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ร้อยละ 158.2 ± 6.7 การบวมน้ำที่สมดุลร้อยละ 314.66 ± 12.16 และมีปริมาณเจลร้อยละ 34.83 ± 1.45

คำสำคัญ : ไฮโดรเจล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ว่านหางจระเข้

Received 18-12-2020

Revised 31-01-2021

Accepted 02-02-2021

ABSTRACT

The objective of this research was to synthesize hydrogel film from carboxymethyl cellulose with *Aloe vera* (Linn.) Burm. f. by using N, N'-methylene-bis-acrylamide as a crosslinking agent, ammonium persulfate as initiator of the reaction, and glycerol as a plasticizer. The mechanical properties and water absorption properties of synthetic hydrogel films were studied. The experiments were performed by varying the ratios of carboxymethyl cellulose and crude extract from *Aloe vera* (Linn.) Burm. f., N, N'-methylene-bis-acrylamide content, ammonium persulfate content and glycerol content. The results showed that the optimum condition for hydrogel preparation was to use carboxymethyl cellulose: crude extract from *Aloe vera* (Linn.) Burm. f.: N, N'-methylene-bis-acrylamide: ammonium peroxide: glycerol in the ratio of 10: 20: 0.2: 0.2: 1, and 60 degrees Celsius for 6 hours. This hydrogel had a tensile strength of 0.014 ± 0.004 Mpa, elongation at break of $158.2 \pm 6.7\%$, equilibrium swelling of $314.66 \pm 12.16\%$ and the gel content of $34.83 \pm 1.45\%$.

Keyword: hydrogel, carboxymethyl cellulose, aloe vera

1. บทนำ

ไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นพอลิเมอร์เชื่อมขวาง (Crosslinked polymer) ชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic polymer) มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติที่เกิดการเชื่อมต่อกันเองตามธรรมชาติหรือใช้สารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับโมเลกุลของน้ำ หรือส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) เช่น หมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group, -COOH) และหมู่อะมิโน (Amino group, -NH₂) เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic group) เช่น หมู่เมทิลีน (methylene group, -CH₂-) และหมู่เมทิล (methyl group, -CH₃) เป็นต้น [1] ระหว่างสายโซ่มีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจนหรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่าง ๆ ในสายโซ่ ประกอบ

กันเป็นสายโซ่ยาวจำนวนมากมาย โมเลกุลมีการพันตัวกันหรือขดตัวทำให้ภายในโครงสร้างโดยรวมเกิดรูพรุนขนาดเล็ก ๆ สมบัติเด่นของไฮโดรเจลคือสามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นร่างตาข่าย (Crosslinked network structure) สามารถบวมตัวในตัวทำละลายที่เหมาะสม และหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป [2]–[4] ไฮโดรเจลจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย เช่น ด้านการแพทย์นำไปใช้เป็นวัสดุปิดแผล ใช้บรรจุยาที่สามารถควบคุมการปลดปล่อย ด้านการเกษตรใช้โรยในดินเพื่อเพิ่มความชุ่มชื้น ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ผ้าอ้อม คอนแทคเลนส์ เป็นต้น [1], [5] ไฮโดรเจลทางการค้าส่วนใหญ่เตรียมจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีสารตั้งต้นจากปิโตรเลียม เช่น พอลิเมทาคริลิก พอลิอะคริลิก พอลิอะคริลาไมด์ ข้อดีคือมีความแข็งแรงสูง แต่ย่อยสลายยากและมีมอนอเมอร์ตกค้างในชิ้นงาน เป็นอันตรายต่อมนุษย์

และสิ่งแวดล้อม [1] จึงมีการศึกษาวิจัยเพื่อนำเอาวัสดุทางธรรมชาติมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมไฮโดรเจล เช่น ไคโตซาน [6], [7] อัลจิเนต [8] เพกติน [9] แป้งมันสำปะหลัง [10] และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [11], [12] เป็นต้น โดยเฉพาะคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose, CMC) หรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl methylcellulose) เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส เกิดจากการแทนที่โครงสร้างเดิมด้วยหมู่เมทิลและหมู่คาร์บอกซีเมทิล จัดอยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ มีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันที่สามารถดัดแปลงด้วยปฏิกิริยาเคมีและเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลได้หลายรูปแบบ จึงถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น อาหารเภสัชกรรม และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น [13]–[16] และเพื่อเป็นการลดต้นทุน และปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของไฮโดรเจล ได้มีการผสมสารสกัดจากพืชที่มีเพกตินเป็นองค์ประกอบหลักเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลชนิดโครงร่างตาข่าย (Crosslinked polymer network) [17] เนื่องจากเพกตินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์มีดี-กาแลกทูโรนิก แอซิด (D-galacturonic acid) เป็นมอนอเมอร์ต่อกันเป็นโซ่ยาวโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล [18] มีการศึกษาพบว่าเพกตินที่สกัดจากว่านหางจระเข้สายพันธุ์บาบาร์-เดนซิสมิลเลอร์ มีเพกตินที่มีปริมาณเมทอกซิลต่ำ (Low methoxyl pectin, LMP) และมีปริมาณดี-กาแลกทูโรนิก แอซิดสูง ซึ่งเป็นเพกตินที่สามารถเกิดโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลได้ [19], [20] นอกจากนี้ว่านหางจระเข้ยังมีสรรพคุณ เป็นยาฆ่าเชื้อ ฝาดสมานแผล ห้ามเลือด ในขณะเดียวกันก็เป็นตัวกระตุ้นเซลล์เนื้อเยื่อให้เจริญเติบโต ทำให้แผลหาย

เร็วขึ้น โดยพบว่าว่านหางจระเข้สามารถนำมาใช้รักษาแผลธรรมดา แผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก แผลที่เกิดจากการฉายรังสี ลดอาการอักเสบ ฆ่าเชื้อโรค ป้องกันผิวไหม้เพราะแดด บำรุงผิวหน้า กำจัดฝ้า ยาระบาย [21]–[24] ด้วยสรรพคุณของว่านหางจระเข้จึงมีการศึกษาการผลิตไฮโดรเจลจากว่านหางจระเข้โดยนำมาผสมกับอัลจิเนต [8] และไคโตแซน [25] และใช้เคลือบผิวผักผลไม้หลังเก็บเกี่ยว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และสารสกัดยาจากว่านหางจระเข้ โดยใช้ เอ็น,เอ็น-เมทิลีน-บิส-อะคริลาไมด์ เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา และกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ รวมทั้งศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับสารสกัดยาจากว่านหางจระเข้ ปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยง ปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยา ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัสดุ

ว่านหางจระเข้ พันธุ์บาบาร์-เดนซิสมิลเลอร์ (Aloe barbadensis Miller) จากแปลงเพาะปลูกเกษตรกร จังหวัดสมุทรสาคร คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Carboxymethylcellulose sodium salt) loss on drying (110 °C) ≤ 15%, pH 5.5-8.5, (DS = 0.6-0.95) ของบริษัท Fluka เอทานอล (Ethanol, C₂H₅OH) ของบริษัท Merck แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate, (NH₄)₂S₂O₈ ของบริษัท UNIVA เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (N, N-

methylene-bis-acrylamide) ของบริษัท CARLO
กลีเซอรอล (Glycerol) ของบริษัท UNIVAR

อุปกรณ์

เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ
METTLER TOLEDO รุ่น XS204 เครื่องกวนสารละลาย
ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7 เครื่องอบลมร้อน ยี่ห้อ Binder
รุ่น FD115 เครื่องวิเคราะห์ความชื้น Moisture analyzer
รุ่น MX-50 ยี่ห้อ AND เครื่องทดสอบเนกประสงค์
(Universal Testing Machine) ยี่ห้อ Testometric รุ่น
M350-5AT

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 เตรียมสารสกัดหยากว่นหางจรเข้

นำว่นหางจรเข้อายุ 8 เดือน ทำ
ความสะอาดด้วยน้ำ ซับด้วยผ้าให้แห้ง ปอกเปลือกจะได้
เนื้อเจลใส นำเนื้อเจลที่ได้ตัดให้มีขนาดกว้างประมาณ
2 เซนติเมตร (รูปที่ 1ก) ปั่นในเครื่องปั่นน้ำผลไม้ กรอง
ผ่านผ้ากรองที่มีขนาด 100 T (T คือจำนวนเส้นด้ายหนึ่ง
ตารางนิ้ว) เพื่อแยกกากและสารสกัดหยากว่นหางจรเข้
ออกจากกัน (รูปที่ 1ข) แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นที่
ความเข้มข้นร้อยละ 2 น้ำหนักโดยปริมาตร



ก

ข

รูปที่ 1 การเตรียมสารสกัดหยากว่นหางจรเข้

2.2.2 เตรียมแผ่นไฮโดรเจลจากคาร์บอกซี-

เมทิลเซลลูโลส และสารสกัดหยากว่นหางจรเข้

นำสารสกัดหยากว่นหางจรเข้
มาผสมกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยใช้
เอ็นเอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (BIS) เป็นสารก่อพันธะ

เชื่อมโยง แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต (APS) เป็นสารริเริ่ม
ปฏิกิริยา และกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ อัตรา
ส่วนผสมแต่ละสูตรแสดงในตารางที่ 1 นำส่วนผสม
อัตราส่วนต่าง ๆ มาผสมกันตามลำดับ กวนด้วยเครื่อง
กวนแม่เหล็กไฟฟ้า 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 องศา
เซลเซียส เทส่วนผสมในแต่ละสูตรลงบนจานเพาะเชื้อ
อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง [26]

2.2.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบโดยตัดแผ่นไฮโดรเจลขนาด 1x5
เซนติเมตร นำไปวัดความแข็งแรงต่อแรงดึง (Tensile
strength) และร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด (%
Elongation at break) ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์
(Universal testing machine) ตามมาตรฐาน ASTM
D882 [27] โดยมีภาวะของการทดสอบดังนี้ ระยะห่าง
ของตัวรองรับตัวอย่าง (Gauge length) 50.0 มิลลิเมตร
ตัววัดแรง (Load cell) 1 นิวตัน ความเร็วของคันสำหรับ
ยืดตัววัดแรง (Crosshead speed) 10 มิลลิเมตรต่อนาที
ทดสอบตัวอย่างละ 5 ครั้ง

$$\text{ความแข็งแรงต่อแรงดึง} = P_{\text{fracture}} / A_0$$

$$P_{\text{fracture}} = \text{แรงกระทำสุดท้ายที่เกิดการแตกหัก}$$

$$A_0 = \text{พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน}$$

$$\text{ร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด} = (L_f - L_0) \times 100$$

$$L_f = \text{ขนาดความยาวสุดท้ายของชิ้นงาน}$$

$$L_0 = \text{ขนาดความยาวเริ่มต้นของชิ้นงาน}$$

2.2.4 การทดสอบสมบัติของไฮโดรเจล

ตัดแผ่นไฮโดรเจลให้มีขนาด 2 x 2
เซนติเมตร แล้วนำไปทดสอบสมบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำของ
แผ่นไฮโดรเจล โดยทดสอบตัวอย่างละ 5 ครั้ง

$$\text{การดูดซึมน้ำ (Water uptake)}$$

อบแผ่นไฮโดรเจลที่อุณหภูมิ 35.0 ± 1.0
องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (W_1)
บันทึกผล แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35.0 ± 1.0

องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเจลเปียก (W_2) นำมาคำนวณการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลจากสมการที่ 1 [28]

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = [(W_2 - W_1) / W_1] \times 100 \quad (1)$$

การบวมน้ำที่สมดุล (Equilibrium swelling)

อบแผ่นไฮโดรเจลที่อุณหภูมิ 35.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักที่แน่นอน (W_1) บันทึกผล แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 35.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักเจลเปียก (W_2) คำนวณค่าการดูดซึมน้ำที่สมดุลของไฮโดรเจล คำนวณได้จากสมการที่ 2 [29]

ร้อยละการบวมน้ำที่สมดุล

$$= [(W_2 - W_1) / W_1] \times 100 \quad (2)$$

การกักเก็บน้ำ (Water retention)

แช่แผ่นไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ

35.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำออกมา ชั่งน้ำหนัก (W_0) แล้วอบที่อุณหภูมิ 35.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส นำตัวอย่างออกมาชั่งทุกชั่วโมง (W_t) จนน้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณน้ำที่คงอยู่ในแผ่นไฮโดรเจล ณ เวลาต่าง ๆ ตามสมการที่ 3 [28]

ร้อยละการกักเก็บน้ำ

$$= (W_t / W_0) \times 100 \quad (3)$$

ตารางที่ 1 อัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

สูตรที่	CMC 5% (w/v) (mL)	Aloe2% (w/v) (mL)	BIS (g)	APS (g)	Glycerol (mL)
1	5	25	0.2	0.2	1
2	10	20	0.2	0.2	1
3	15	15	0.2	0.2	1
4	20	10	0.2	0.2	1
5	25	5	0.2	0.2	1
6	30	0	0.2	0.2	1
7	20	10	0.2	0.2	0
8	20	10	0.4	0.2	1
9	20	10	0.6	0.2	1
10	20	10	0.8	0.2	1
11	20	10	0.2	0.4	1
12	20	10	0.2	0.6	1
13	20	10	0.2	0.8	1

หมายเหตุ: สูตรที่ 1-6 ศึกษาผลของอัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับสารสกัดยาบัวบกทางจะเข้ และกลีเซอรอล
สูตรที่ 4 และ 7 ศึกษาผลของกลีเซอรอล ซึ่งเป็นสารพลาสติกไซเซอร์
สูตรที่ 8-10 ศึกษาผลของอินทรีย์สารอินทรีย์-โพลีเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นการก่อพันธะเชื่อมขวาง
สูตรที่ 11-13 ศึกษาผลของแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต ซึ่งเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา

ความเป็นเจล (Gel fraction)

อบแผ่นไฮโดรเจล ที่อุณหภูมิ 35.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักที่

แน่นอน (W_1) บันทึกผล แล้วนำไปแช่ในน้ำกลั่นจนอิ่มตัว

อบที่อุณหภูมิ 35.0 ± 1.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24

ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักหลังแช่ (W_2) คำนวณความสามารถในการเป็นเจล ตามสมการที่ 4 [28]

$$\text{ร้อยละของเจล} = (W_2/W_1) \times 100 \quad (4)$$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้สังเคราะห์ฟิล์มไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และสารสกัดหยาบจากว่านหางจระเข้ ใช้ เอ็น,เอ็น-เมทิลีน-บิส-อะคริลาไมด์ เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา และกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ที่อัตราส่วนต่าง ๆ นำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลไปทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

3.1 ผลของกลีเซอรอล

ศึกษาผลของกลีเซอรอลที่มีต่อการขึ้นรูปแผ่นไฮโดรเจล โดยใช้ส่วนผสมตามอัตราส่วนในสูตรที่ 4 และ 7 จากตารางที่ 1 ได้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลแสดงในรูปที่ 2



มีกลีเซอรอล



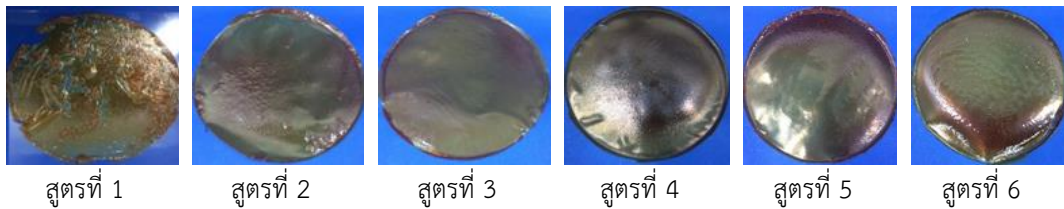
ไม่มีกลีเซอรอล

รูปที่ 2 ผลของกลีเซอรอลต่อลักษณะของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และสารสกัดหยาบจากว่านหางจระเข้

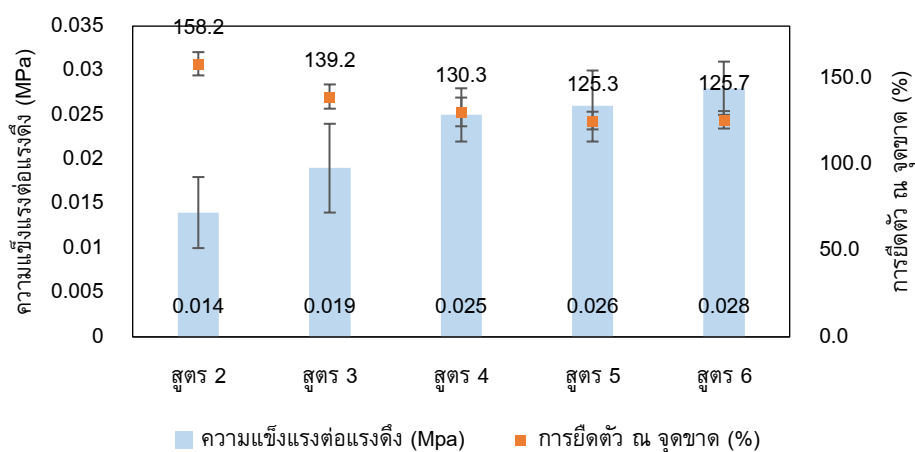
ผลการทดลองพบว่า กลีเซอรอลมีผลต่อการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล ส่วนผสมที่ไม่ใช้กลีเซอรอล (สูตร 7) ทำให้ได้แผ่นฟิล์มที่มีความแข็งขาดความยืดหยุ่น เปราะ และลอกออกจากแม่พิมพ์ยาก ในขณะที่ส่วนผสมที่มีการเติมกลีเซอรอล (สูตร 4) ได้แผ่นฟิล์มที่มีลักษณะเรียบเนียน มีความยืดหยุ่น และสามารถลอกออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม โดยเฉพาะสมบัติด้านความอ่อนตัว ทำให้ตัดโค้งได้ง่าย โดยลดค่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (Glass transition temperature หรือ T_g) ของพอลิเมอร์ ทำให้สภาพตึงเครียดมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยเพิ่มการเข้ากันได้ของส่วนผสมทั้งหมด [30], [31]

3.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส และสารสกัดหยาบจากว่านหางจระเข้

ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส และสารสกัดหยาบจากว่านหางจระเข้ โดยใช้ส่วนผสมตามอัตราส่วนในสูตรที่ 1 – 6 จากตารางที่ 1 ได้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลแสดงในรูปที่ 3 นำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลไปวัดค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ได้ผลแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และสารสกัดหยาบจากว่านหางจระเข้ต่อลักษณะของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล



รูปที่ 4 ผลของอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และสารสกัดหยาบจากว่านหางจระเข้ต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

ผลการทดลองพบว่า ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีผลต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม โดยปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้อยเกินไป ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ (สูตร 1) และเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้นแผ่นฟิล์มที่ได้จะมีความแข็งแรงต่อแรงดึงมากขึ้น ในขณะที่มีการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีโครงสร้างอสัณฐาน เมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นส่งผลให้โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้น และช่องว่างระหว่างโมเลกุลลดลง ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรง

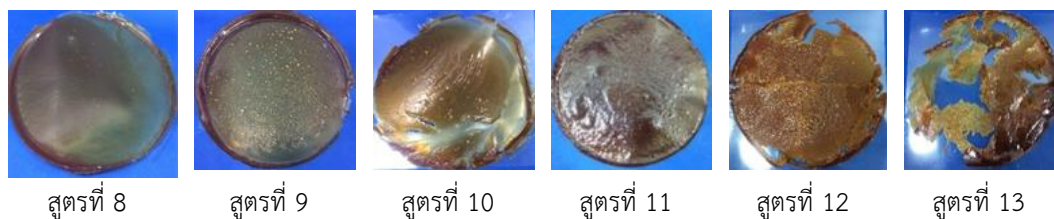
เพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นลดลง [11], [32], [33] โดยส่วนผสมในสูตรที่ 4 ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุดคือ 0.025 ± 0.003 เมกะพาสคัล และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำที่สุด คือร้อยละ 130.3 ± 8.3 ส่วนผสมในสูตรที่ 2 ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำที่สุดคือ 0.014 ± 0.004 เมกะพาสคัล และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุด คือร้อยละ 158.2 ± 6.7

3.2 ผลของปริมาณ เอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะครีลาไมด์ และแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต

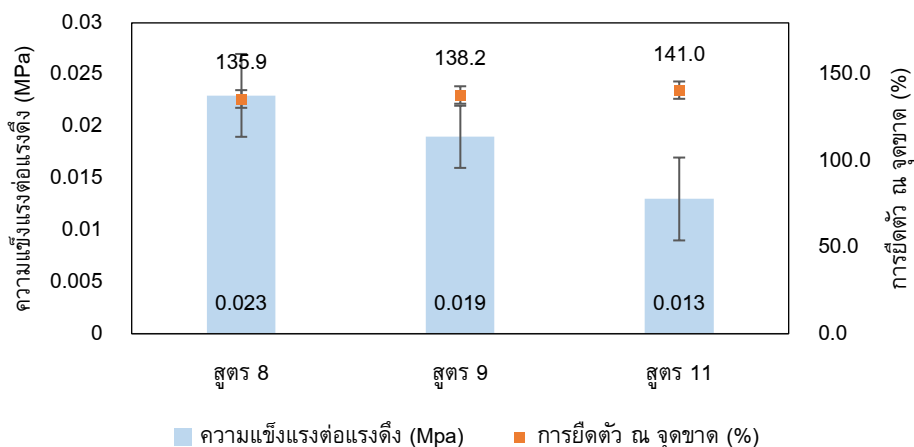
ศึกษาผลของปริมาณเอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะครีลาไมด์ และแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต โดย

ใช้ส่วนผสมตามอัตราส่วนในสูตรที่ 4 และ 8 – 13 จากตารางที่ 1 ได้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลแสดงในรูปที่ 5 นำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลไปวัดค่าความแข็งแรงต่อแรง

ดึง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาด ได้ผลแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 5 ผลของปริมาณ เอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์ และแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตต่อลักษณะของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล



รูปที่ 6 ผลของปริมาณ เอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์ และแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

ผลการทดลองพบว่า เอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์ และแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต มีผลต่อการขึ้นรูป และสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์ม ทั้งนี้ เอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์ เป็นสารที่ช่วยให้เกิดการก่อพันธะเชื่อมโยงเป็นพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ โดยจะเกิดพันธะเคมีเชื่อมระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยเอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์ โครงสร้าง

โมเลกุลจะมีพันธะคู่ที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยอนุมูลอิสระถึง 2 ตำแหน่ง จึงมีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารเชื่อมขวางในการเตรียมไฮโดรเจล [34] ส่วนแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตเป็นสารช่วยริเริ่มการเกิดปฏิกิริยา ในการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน พบว่าถ้าเติมแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตปริมาณมากเกินไป ทำให้การเกิดเป็นฟิล์มลดลง เนื่องจากแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตไปเร่งให้

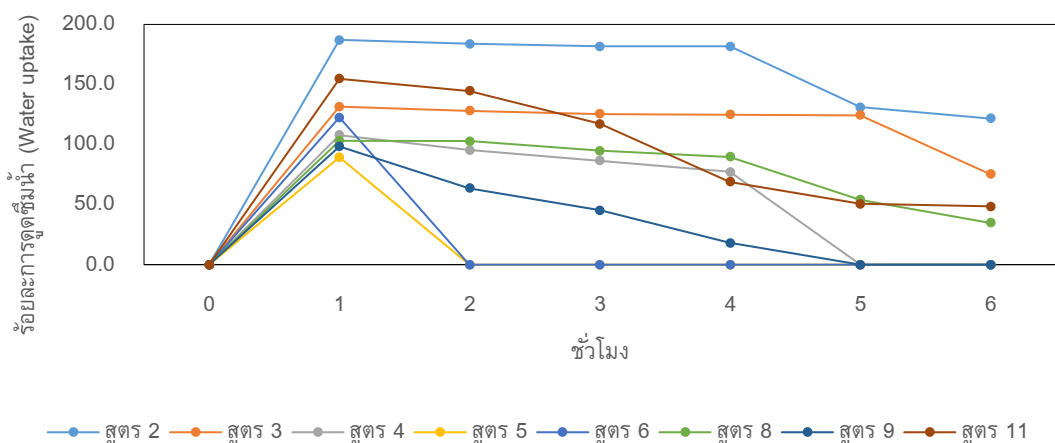
การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันเกิดอย่างรวดเร็วเกินไปจนทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่สมบูรณ์ ดังนั้น สัดส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สารก่อพันธะเชื่อมโยง และสารริเริ่มปฏิกิริยา ต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม [35], [36] โดยส่วนผสมในสูตรที่ 8 ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงที่สุดคือ 0.023 ± 0.004 เมกะพาสคัล และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดต่ำที่สุดคือร้อยละ 135.9 ± 5.1 ส่วนผสมในสูตรที่ 11 ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำที่สุดคือ 0.013 ± 0.004 เมกะพาสคัล และมีค่าการยืดตัว ณ จุดขาดสูงที่สุดคือร้อยละ 141.04 ± 5.02 และส่วนผสมในสูตรที่ 10, 12, และ 13 ได้แผ่นฟิล์มที่ไม่สมบูรณ์ มีพื้นผิวขรุขระ

ลอกออกจากแม่พิมพ์ยาก และไม่สามารถทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดึง และค่าร้อยละการยืดตัว ณ จุดขาดได้

3.4 ทดสอบสมบัติที่เกี่ยวข้องกับน้ำของแผ่นไฮโดรเจล

3.4.1 สมบัติการดูดซึมน้ำ (Water uptake) ของแผ่นไฮโดรเจล

นำตัวอย่างแผ่นไฮโดรเจลที่สามารถลอกแผ่นจากแม่พิมพ์ได้ ได้แก่แผ่นไฮโดรเจลจากส่วนผสมในสูตรที่ 2 – 6, 8 – 9, และ 11 ทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water uptake) ได้ผลแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ความสามารถในการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจล

ผลการทดลองพบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลแต่ละสูตร มีความสามารถในการดูดซึมน้ำแตกต่างกันพบว่าสูตรที่ 2 มีค่าการดูดซึมน้ำสูงที่สุด คือร้อยละ 187 ± 4.2 โดยแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจะดูดซึมน้ำได้อย่างรวดเร็ว ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นในชั่วโมงแรก และเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีผลต่อความสามารถในการ

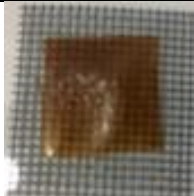
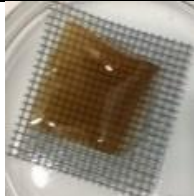
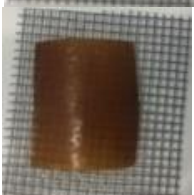
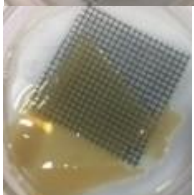
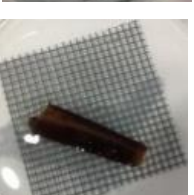
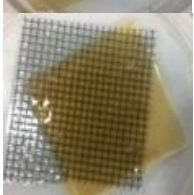
ดูดซึมน้ำ แต่ถ้ามากเกินไปจะละลายไปกับน้ำ เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COO}-$) และหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}-$) ที่มีสมบัติชอบน้ำ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำกับออกซิเจนของหมู่คาร์บอกซิลที่มีอยู่ในแผ่นฟิล์ม รวมทั้งสารก่อพันธะเชื่อมโยงทำให้โมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

มีการเชื่อมขวาง ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรง การใช้ในปริมาณสูงเกินไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแทนที่ และอาจเกิดการเชื่อมขวางในโมเลกุลสูงมากขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายของไฮโดรเจลมีความแข็งแรงมาก มีความยืดหยุ่นน้อยลง และลดขนาดช่องว่างที่จับโมเลกุลน้ำ ทำให้ไฮโดรเจลกักเก็บน้ำได้น้อย แต่ถ้าใช้น้อยเกินไปทำให้เกิดการเชื่อมขวางน้อยลง โครงสร้างของไฮโดรเจลไม่แข็งแรง เมื่อนำไปดูดซึมน้ำ ทำให้ไฮโดรเจลบางส่วนละลายไปกับน้ำได้ [1], [37], [38]

3.4.2 สมบัติการบวมน้ำที่สมดุล (Equilibrium swelling) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

จุดสมดุลเป็นจุดที่แสดงความสามารถสูงสุดในการดูดซึมน้ำของแผ่นฟิล์ม ในการทดลองนี้ศึกษาเฉพาะไฮโดรเจล ที่มีการดูดซึมน้ำสูงในสามอันดับแรก คือสูตรที่ 2, 3 และ 11 มาทดสอบการบวมน้ำที่สมดุล ได้ผลแสดงในตารางที่ 2

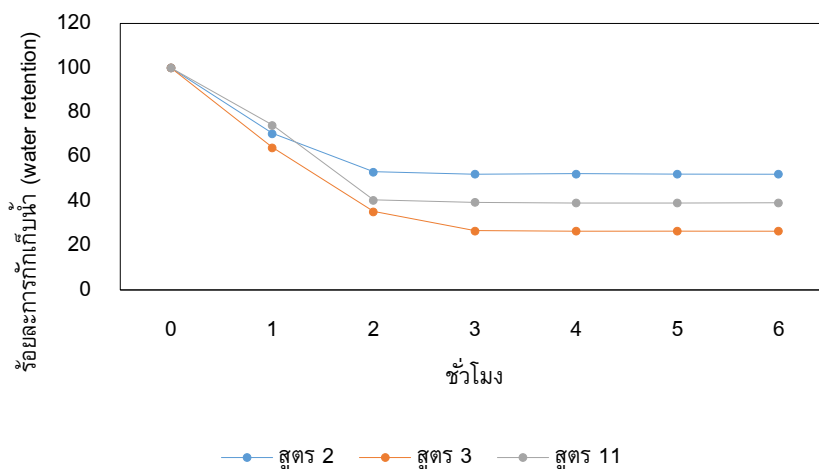
ตารางที่ 2 ร้อยละการบวมน้ำที่สมดุล (Equilibrium swelling) และลักษณะของแผ่นไฮโดรเจล

สูตร	ก่อนแช่น้ำ	ระหว่างแช่น้ำ	แช่น้ำ 72 ชั่วโมง	ร้อยละการบวมน้ำที่สมดุล
2				314.7±12.2
3				280.9±23.9
11				175.6±23.9

ผลการทดลองพบว่าส่วนผสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมีผลต่อสมบัติการบวมน้ำที่สมดุลของไฮโดรเจล โดยสูตรที่ 2 ให้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมีค่าการบวมน้ำที่ภาวะสมดุลสูงที่สุดคือร้อยละ 314.66 ± 12.16

3.3.3 สมบัติการกักเก็บน้ำ (Water retention) ของแผ่นฟิล์ม

นำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล จากสูตรที่ 2, 3 และ 11 มาทดสอบสมบัติการกักเก็บน้ำของแผ่นฟิล์ม ได้ผลแสดงในรูปที่ 6



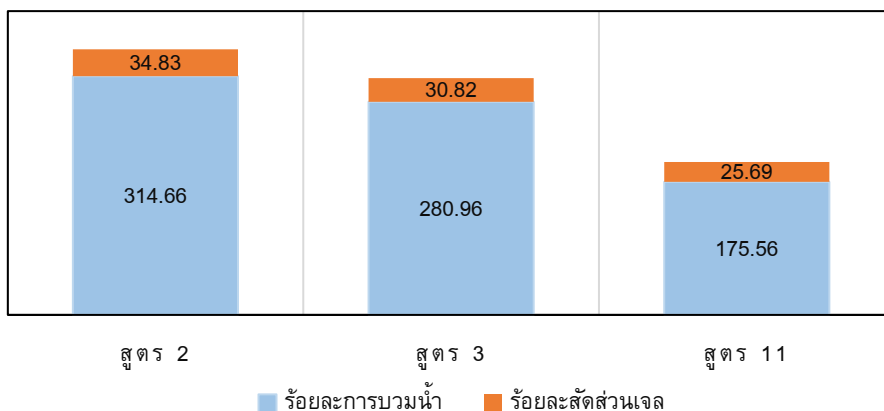
รูปที่ 8 ร้อยละการกักเก็บน้ำ ณ จุดสมดุล (Water retention)

ลักษณะน้ำที่แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลดูดซับไว้แบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ 1) น้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจลเป็นส่วนที่ระเหยง่ายที่สุด (Free water) 2) น้ำที่แทรกอยู่ในโมเลกุลของไฮโดรเจล (Interfacial water) และ 3) น้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรเจลซึ่งระเหยยากที่สุด (Bound water) จากการทดสอบปริมาณการกักเก็บน้ำ พบว่าน้ำจะระเหยออกจากแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลทุกสูตรอย่างรวดเร็วในช่วงชั่วโมงแรก หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนคงที่ แสดงว่าน้ำที่อยู่บริเวณผิวนอกของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลของทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน และระเหยออกจากแผ่นฟิล์มในช่วงชั่วโมงแรก เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง น้ำที่เหลือในแผ่นฟิล์ม เป็นน้ำที่เก็บอยู่ในช่องว่างระหว่างโครงตาข่าย (Interfacial water) ปริมาณน้ำที่กักเก็บในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่ 2 จะกักเก็บน้ำได้มากที่สุด โดยเมื่อพิจารณาอัตราส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อปริมาณสารก่อกวนเชื่อมโยงบพบว่อัตราส่วนปริมาณสารก่อกวนเชื่อมโยงบต่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในสูตรที่ 2 มีอัตราส่วนของ

สารก่อกวนเชื่อมโยงบที่สูงที่สุด แสดงว่าการเติมสารก่อกวนเชื่อมโยงบ ทำให้พันธะเกิดการเชื่อมโยงบมากขึ้น สามารถกักเก็บน้ำไว้ได้มาก แต่อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าการใช้สารก่อกวนเชื่อมโยงบในปริมาณสูงเกินไป จะทำให้เกิดปฏิกิริยาแทนที่ และอาจเกิดการเชื่อมขวางในโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสูงมาก และส่งผลให้โครงสร้างตาข่ายของไฮโดรเจลที่ได้มีความแข็งแรงมาก ทำให้พอลิเมอร์เกิดพันธะเชื่อมโยงบมากและลดขนาดช่องว่างที่จับโมเลกุลน้ำ ทำให้มีความยืดหยุ่นน้อยจึงกักเก็บน้ำได้น้อย และถ้าใช้สารก่อกวนเชื่อมโยงบน้อยเกินไปอาจทำให้เกิดการเชื่อมขวางที่ต่ำจะทำให้โครงสร้างของไฮโดรเจลไม่แข็งแรง เมื่อนำไปดูดซึมน้ำทำให้ไฮโดรเจลบางส่วนละลายไปกับน้ำได้ [39]

3.3.4 ร้อยละค่าสัดส่วนของเจล

นำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล จากสูตรที่ 2, 3 และ 11 มาทดสอบปริมาณเจลของแผ่นฟิล์ม ได้ผลแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ร้อยละการบวมน้ำที่จุดสมดุล และร้อยละสัดส่วนเจลของแผ่นไฮโดรฟิล์ม

ผลการทดลอง พบว่าส่วนผสมในการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมีผลต่อปริมาณเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล โดยแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจากสูตรที่ 2 มีสัดส่วนร้อยละการบวมน้ำที่จุดสมดุลสูงสุดที่สุด คือร้อยละ 314.66 ± 12.16 และมีร้อยละสัดส่วนความเป็นเจลสูงที่สุดคือร้อยละ 34.83 ± 1.45

4. สรุปผลการทดลอง

ภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรเจล คือผสมสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับสารสกัดหยาบว่านหางจระเข้ โดยใช้ เอ็น,เอ็น-เมทิลลีน-บิส-อะคริลาไมด์ เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา และกลีเซอรอล เป็นสารพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วน 10: 20: 0.2: 0.2: 1 อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 6 ชั่วโมง ได้ไฮโดรเจลที่มีความแข็งแรงต่อแรงดึง 0.014±0.004 เมกะพาสคัล ค่าการยึดตัว ณ จุดขาดร้อยละ 158.2±6.7 สามารถดูดซึมน้ำไว้ภายในโครงสร้างในปริมาณร้อยละ 314.66 ± 12.16 สามารถคงรูปอยู่ได้โดยไม่ละลายน้ำ เนื่องจากภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล มีการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์

ในปริมาณที่เหมาะสม โดยมีปริมาณเจลร้อยละ 34.83 ± 1.45

5. กิตติกรรมประกาศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สนับสนุนทุนการวิจัยจากเงินอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2562

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmed EM. Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review. J Adv Res. 2015; 6(2):105–21.
- [2] Andrea T, Francesca S, Massimiliano B, et al. Hyaluronan delivery by polymer demixing in polysaccharidebased hydrogels and membranes for biomedical applications. Carbohydr Polym. 2016; 150:408–18.
- [3] Yue Y, Han J, Han G, et al. Cellulose nanofibers reinforced sodium alginate-polyvinyl alcohol hydrogels: Coreshell

- structure formation and property characterization. *Carbohydr Polym.* 2016;147:155–64.
- [4] Lai J-Y, Hsieh A-C. A gelatin-g-poly (N-isopropylacrylamide) biodegradable in situ gelling delivery system for the intracameral administration of pilocarpine. *Biomaterials.* 2012 ;33(7):2372–87.
- [5] Kamoun EA, Kenawy E-RS, Chen X. A review on polymeric hydrogel membranes for wound dressing applications: PVA-based hydrogel dressings. *J Adv Res.* 2017; 8(3):217–33.
- [6] Huang B, Liu M, Zhou C. Chitosan composite hydrogels reinforced with natural clay nanotubes. *Carbohydr Polymer.* 2017; 175:689–98.
- [7] Kudracik-Kramarczyk S, Drabczyk A, Tyliczszak B. Synthesis of Bees' Chitosan Based Hydrogels Containing Aloe Vera. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich.* 2017;(nr IV/2):1687–98.
- [8] Pereira R, Mendes A, Bártolo P. Alginate/Aloe Vera Hydrogel Films for Biomedical Applications. *Procedia CIRP.* 2013; 5:210–5.
- [9] Jung J, Arnold RD, Wicker L. Pectin and charge modified pectin hydrogel beads as a colon-targeted drug delivery carrier. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces.* 2013 ;104:116–21.
- [10] Ortega-Toro R, Collazo-Bigliardi S, Roselló J, et al. Antifungal starch-based edible films containing Aloe vera. *Food Hydrocolloids.* 2017 Nov 1;72:1–10.
- [11] Fekete T, Borsa J, Takács E, et al. Synthesis of carboxymethylcellulose /starch superabsorbent hydrogels by gamma-irradiation. *Chem Cent J* [Internet]. 2017 May 30 [cited 2018 Mar 6]; 11(1) Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5449362/>
- [12] Kono H. Characterization and properties of carboxymethyl cellulose hydrogels crosslinked by polyethylene glycol. *Carbohydrate Polymers.* 2014 Jun 15;106:84–93.
- [13] Chen XY, Chen C, Zhang ZJ, et al. Nitrogen-Doped Porous Carbon Prepared from Urea Formaldehyde Resins by Template Carbonization Method for Supercapacitors. *Ind Eng Chem Res.* 2013; 52(30):10181–8.
- [14] Zhang T, Li G, Guo L, et al. Synthesis of thermo-sensitive CS-g-PNIPAM/CMC complex nanoparticles for controlled release of 5-FU. *Int J Biol Macromol.* 2012; 51(5):1109–15.
- [15] Hu D, Wang H, Wang L. Physical properties and antibacterial activity of quaternized chitosan/carboxymethyl cellulose blend films. 2016 [cited 2021

- Jan 20]; Available from: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/5249455>
- [16] Yadollahi M, Gholamali I, Namazi H, et al. Synthesis and characterization of antibacterial carboxy methyl cellulose/ZnO nanocomposite hydrogels. *Int J Biol Macromol*. 2015; 74:136–41.
- [17] Bajpai SK, Sharma S. Investigation of swelling/degradation behaviour of alginate beads crosslinked with Ca^{2+} and Ba^{2+} ions. *Reactive and Functional Polymers*. 2004;2(59):129–40.
- [18] Mishra R, Bantia A, Majeed A. Pectin based formulations for biomedical applications: A review. *Asian J Pharmaceut Clin Res*. 2012; 5:1–7.
- [19] Ni Y, Turner D, Yates KM, et al. Isolation and characterization of structural components of Aloe vera L. leaf pulp. *International Immunopharmacology*. 2004; 4(14):1745–55.
- [20] Ni Y, Yates KM, Zarzycki R. Aloe pectins [Internet]. US5929051A, 1999 [cited 2021 Jan 23]. Available from: <https://patents.google.com/patent/US5929051A/en>
- [21] Gupta VK, Malhotra S. Pharmacological attribute of Aloe vera: Revalidation through experimental and clinical studies. *AYU (An international quarterly journal of research in Ayurveda)*. 2012; 33(2):193.
- [22] Sharma A, Gautam S. An overview on medicinal properties of aloe vera antibacterial & antifungal aspects [Internet]. undefined. 2013 [cited 2021 Jan 23]. Available from: [/paper/An-overview-on-medicinal-properties-of-aloe-vera%3A-%26](#)
- [23] Tanaka M, Misawa E, Yamauchi K, et al. Effects of plant sterols derived from Aloe vera gel on human dermal fibroblasts in vitro and on skin condition in Japanese women. *Clin Cosmet Investig Dermatol*. 2015;8:95–104.
- [24] คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล. สารความรู้ด้านการแพทย์สาธารณสุข ประโยชน์ของว่านหางจระเข้ [Internet]. 2015 [cited 2021 Jan 22]. Available from: https://med.mahidol.ac.th/th/knowledge_awareness_health/11042015-1440-th
- [25] Singh S, Anjum S, Joy J, et al. Polysaccharide-Aloe vera bioactive hydrogels as wound care system. in: mondal MdIH, editor. *Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2019 [cited 2021 Jan 23]; p. 1473–90. (Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series). Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-77830-3_48

- [26] ณัฏฐ์ธวดี จินาพันธ์, เจิมขวัญ สังข์สุวรรณ, สุทธิรา สุทธิสุภา, สุรัสวดี คำไทย. คุณสมบัติของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเยื่อฟางข้าว. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 2555; 43(3 (พิเศษ)):615–20.
- [27] D20 Committee. Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting [Internet]. ASTM International; [cited 2021 Jan 24]. Available from: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D882-18>
- [28] Kokabi M, Sirousazar M, Hassan ZM. PVA–clay nanocomposite hydrogels for wound dressing. 2007.
- [29] Zhang J-T, Zhuo R-X, Chu C. Synthesis and properties of thermosensitive, crown ether incorporated poly(N-isopropylacrylamide) hydrogel. Polymer. 2002; 43:4823–7.
- [30] Sothornvit R, Olsen CW, Mchugh T, et al. Formation conditions, watervapor permeability, and solubility of compression molded whey protein films. J Food Sci. 2003; 68:1985–99.
- [31] สุจิตพรพรณ เข้มแก้ว, สุปราณี แก้วภิรมย์. ผลของกลีเซอรอล และเพค-10 ไดเมทิลโคนต์ต่อสมบัติของฟิล์มชีวภาพ จากเปลือกทุเรียน. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม. 2016; 12(2):11–21.
- [32] Ebrahimi B, Mohammadi R, Rouhi M, et al. Survival of probiotic bacteria in carboxymethyl cellulosebased edible film and assessment of quality parameters. LWT - Food Science and Technology. 2017 Aug 1;87.
- [33] El.Shafei A, Abou-Okeil A. ZnO/carboxy methyl chitosan bionano-composite to impart antibacterial and UV protection for cotton fabric. Carbohydrate Polymers. 2011; 2(83):920–5.
- [34] ชัยวุฒิ วัดจิ่ง. ผลของอัตราส่วนยางและแป้งต่อสมบัติของไฮโดรเจลชนิดพอลิเมอร์เชื่อมขวางแบบกึ่งโครงร่างตาข่ายและการประยุกต์ใช้ในการปลูกดาวเรือง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2560; 19(1):49–62.
- [35] จตุพร ประทุมเทศ, วริษฐา ศิลาอ่อน, ชัยวัฒน์ วัดจิ่ง, อุษณา พัวเพิ่มพูนศิริ. ผลของแป้งต่อคุณลักษณะของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากยางธรรมชาติ. วารสารเภสัชศาสตร์อีสาน. 2013; 9(1).
- [36] ชัยวุฒิ วัดจิ่ง, อุมาพร ไชยสุวรรณ, อุไรวรรณ พันธุ์แก่น และคณะ. ผลของสารเชื่อมขวางต่อสมบัติของไฮโดรเจลเชื่อมโยงบแบบกึ่งโครงร่างตาข่ายของยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 2013; 16(3):131–8.

- [37] Akhtar MF, Hanif M, Ranjha NM. Methods of synthesis of hydrogels. A review. Saudi Pharmaceutical Journal. 2016; 24(5):554–9.
- [38] Basiak E, Lenart A, Debeaufort F. Effect of starch type on the physico-chemical properties of edible films. Int J Biol Macromol. 2017 May 1;98:348–56.
- [39] Wong R, Ashton M, Dodou K. Effect of Crosslinking Agent Concentration on the Properties of Unmedicated Hydrogels. Pharmaceutics. 2015; 7(3):305–19.