วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

บทความวิจัย

ไฮโดรเจลชีวภาพที่ซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็วสำหรับตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์

ณัฐกานต์ เจริญไทย และ พรนภา เกษมศิริ*

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น

* ผู้ประสานงานเผยแพร่ (Corresponding Author), E-mail: pornkas@kku.ac.th

วันที่รับบทความ: 12 ตุลาคม 2565; วันที่ทบทวนบทความ: 3 มกราคม 2566; วันที่ตอบรับบทความ: 18 มกราคม 2566
วันที่เผยแพร่ออนไลน์: 13 เมษายน 2566

บทคัดย่อ: ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าอัจฉริยะที่สามารถเป็นเซนเซอร์วัดความเครียดได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก นิยมนำมาใช้ในทางการแพทย์เพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์และตรวจสอบการดูแลสุขภาพส่วนบุคคล ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาไฮโดรเจลนำไฟฟ้าจาก กลูเตน/กัวกัม (GG) ที่เชื่อมขวางด้วยบอแรกซ์ (Borax) และกรดแทนนิก (TA) โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของ TA (0-5 wt%) ต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าและซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล การเติม TA เป็นส่วนประกอบของไฮโดรเจล ที่ความเข้มข้น 1.25-5 wt% แสดงความสามารถในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและแข็งแรง โดยเวลาในการซ่อมแซมตนเองลดลงจาก 20 วินาที เป็น 3 วินาที เมื่อความเข้มข้นของ TA เพิ่มขึ้น มีค่าการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจลในช่วง 0.022-0.027 S/m การทดสอบการยึดเกาะผิวหนังของมนุษย์แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่มี TA 2.5 wt% สามารถเกาะติดกับผิวหนังได้โดยปราศจากสิ่งตกค้างเมื่อนำตัวอย่างออก แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่มี TA 2.5 wt% เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไฮโดรเจล ไฮโดรเจลที่มี TA 2.5 wt% แสดงคุณสมบัติอัจฉริยะ เช่น การซ่อมแซมตนเอง การยึดเกาะ และความเสถียรของสัญญาณระหว่างการใช้งานตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ จากผลการทดลองสรุปได้ว่าไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมของ Borax และ TA 2.5 wt% สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดความเครียดในการตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ได้

คำสำคัญ: ไฮโดรเจลนำไฟฟ้า; เซนเซอร์วัดความเครียด; พอลิเมอร์ธรรมชาติ

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

บทความวิจัย

Rapid Self-healing Bio-based Hydrogels for Monitoring Human Motion

Nattakan Jaroenthai and Pornnapa Kasemsiri*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

* Corresponding author, E-mail: pornkas@kku.ac.th

Received: 12 October 2022; Revised: 3 January 2023; Accepted: 18 January 2023
Online Published: 13 April 2023

Abstract: Conductive hydrogels are widely used as strain sensor in medical application for detecting human motion and personal health care monitoring. This research aims to develop a conductive hydrogel based on gluten/guar gum (GG) crosslinked by borax and tannic acid (TA). The effect of TA content (0-5 wt%) on the conductivity and self-healing ability of hydrogels was investigated. The presence of TA at 1.25-5 wt% in the hydrogel showed rapid and strong self-healing. The self-healing time decreased from 20 s to 3 s when TA content increased. The conductivity of hydrogels was observed in the range of 0.022-0.027 S/m. The human skin adhesion test revealed that the hydrogel containing 2.5 wt% TA could adhere to the skin and left no residue when the sample was removed. It can be suggested that the 2.5 wt% TA was a suitable content for hydrogel preparation. The hydrogel containing 2.5 wt% TA integrated smart functions such as self-healing and self-adhere which performed reproducibility and the stability of the signals during monitoring of human limbs movement. According to the results, the hydrogel containing borax and 2.5 wt% TA could be applied as a strain sensor for monitoring human health.

Keywords: Conductive hydrogel; Strain sensor; Biopolymer

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

1. บทนำ

เซนเซอร์วัดความเครียด (Strain Sensor) ที่มีความยืดหยุ่นได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก มีการใช้กันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวมใส่ได้ เช่น การตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ การตรวจสอบดูแลสุขภาพส่วนบุคคล ผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์ และหุ่นยนต์อัจฉริยะ [1] โดยทั่วไปเซนเซอร์วัดความเครียด ประกอบจากวัสดุนำไฟฟ้า (เช่น อนุภาคนำไฟฟ้าอนินทรีย์, กราฟีน, ท่อนาโน, คาร์บอน และลวดนาโนโลหะ) และอีลาสโตเมอร์ การกระจายสารเติมแต่งในอีลาสโตเมอร์อย่างสม่ำเสมอจำเป็นต้องใช้กระบวนการที่ซับซ้อนและเทคโนโลยีขั้นสูง นอกจากนี้เกิดการเสียดสีระหว่างอีลาสโตเมอร์และสารเติมแต่งที่เป็นสื่อนำกระแสไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อประสิทธิภาพทางกลของเซนเซอร์ [2] ไฮโดรเจล (Hydrogel) คือวัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งมีพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทำให้มีโครงสร้างร่างแหสามมิติ [3] สามารถออกแบบให้มีสมบัติอัจฉริยะ เช่น การซ่อมแซมตัวเองเพื่อซ่อมแซมชิ้นงานที่ได้รับความเสียหายขณะใช้งาน

ในปัจจุบันไฮโดรเจลที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง, อุปกรณ์สวมใส่ที่ยืดหยุ่น และเซนเซอร์ การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติในการเตรียมไฮโดรเจลเป็นแนวทางที่ทำให้ได้วัสดุที่มีความเป็นพิษต่ำและเข้ากันได้ทางชีวภาพ กลูเตน (Gluten) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีอยู่ในข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาร์เล่ย์ องค์ประกอบหลักของ กลูเตน ได้แก่ กลูเตนินและไกลอะดิน ซึ่งจะทำให้มีลักษณะเหนียว ยืดหยุ่น และไม่ละลายน้ำ [4] Han และคณะ [5] พัฒนาวัสดุชีวภาพนำไฟฟ้าจากกลูเตนที่นำไฟฟ้า (i- Gluten) ด้วยวิธีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แสดงคุณสมบัติทางกลและความยืดหยุ่นที่ดีโดยมีค่าความต้านทานแรงดึง 150 กิโลปาสคาล และ ระยะยืดสูงสุด ณ จุดขาดเท่ากับ 600% ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าที่ได้สามารถนำมาใช้เพื่อติดตามพฤติกรรมการเคลื่อนไหวของมนุษย์และยังสามารถยึดติดกับพื้นผิวต่างๆ ด้วยตัวเอง เช่น หนังหมู พลาสติก แก้ว กระดาษ และสแตนเลส นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Ounkaew และคณะ [6] ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบของกลูเตนและกัวกัม (GG) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้จากการสกัดเมล็ดกัว โดยมีองค์ประกอบหลักได้แก่ กลูเตนินและไกลอะดิน สมบัติทั่วไปของ GG มีลักษณะเหนียว และยืดหยุ่น จากการศึกษาสมบัติการยึดติดบนพื้นผิวต่าง ๆ พบว่า ไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนกลูเตน/GG เท่ากับ 10/0.15 แสดงความแข็งแรงในการยึดเกาะที่สูงที่สุด เนื่องจากการเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน และการรวมตัวของโมเลกุลที่ลดลง ทำให้พื้นผิวของ กลูเตน/GG มีความขรุขระที่สูง ความขรุขระที่สูงนั้นเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างพื้นผิวและส่งเสริมการยึดติดของพื้นผิว นอกจากนี้การเติมบอแรกซ์ใน กลูเตน/GG สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ผ่านพันธะโคเวเลนต์ ทำให้ซ่อมแซมตัวเองและขึ้นรูปใหม่ได้ แต่ทั้งนี้ไฮโดรเจลที่มีส่วนประกอบของกลูเตน/GG ยังมีข้อจำกัด เนื่องจากใช้ระยะเวลานานถึง 3 ชั่วโมง ในการซ่อมแซมตัวเอง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

ดังนั้น การพัฒนาเซนเซอร์ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าให้มีการซ่อมแซมตัวเองที่รวดเร็วขึ้น จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะทำให้มีความสะดวกต่อการใช้ Wenjiao Ge และคณะ[7] สังเคราะห์ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเซลลูโลสนาโนไฟเบอร์ (CNF) โดยใช้กรดแทนนิก (TA) ร่วมกับบอแรกซ์ในอัตราส่วน 5/1 (v/v) พบว่าการเกิดพันธะบอเรตเอสเตอร์และพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์บอแรกซ์และ TA ส่งผลให้ไฮโดรเจลสามารถซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 10 วินาที เนื่องจากปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ และบอเรตที่เพียงพอในไฮโดรเจลสามารถสร้างพันธะบอรอเนตเอสเตอร์และพันธะไฮโดรเจนในการเกิดปฏิกิริยาผันกลับ จากงานวิจัยของ Li Zhoa และคณะ [8] ได้ศึกษาการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น TA ในไฮโดรเจล พบว่าเมื่อปริมาณของ TA เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไฮโดรเจลมีค่าความเครียดที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าความทนต่อแรงดึงก็มีค่าลดลง ดังนั้นเพื่อลดเวลาในการซ่อมแซมตัวเอง การใช้บอแรกซ์และ TA ร่วมกัน จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจและในการพัฒนาในไฮโดรเจลอัจฉริยะที่ซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็ว

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการพัฒนาไฮโดรเจลสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นเซนเซอร์วัดความเครียดจาก กลูเตน/GG ที่เชื่อมขวางด้วย Borax และใช้ TA เป็นสารเชื่อมขวาง เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางด้านความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองและการนำไฟฟ้า นอกจากนี้ยังศึกษาความสามารถในการตรวจจับการเคลื่อนไหวต่าง ๆ ของมนุษย์ในชีวิตประจำวันร่วมด้วย

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุอุปกรณ์

กลูเตนและกัวกัม (GG) จากห้างสรรพสินค้าทั่วไป จังหวัดขอนแก่น กลีเซอริล โมโนสเตียเรท (GMS) จากบริษัท Krungthepchemi กลีเซอรอล ความบริสุทธิ์ 99.5% จาก Elago Enterprises กรดบอแรกซ์ (Borax) ความบริสุทธิ์ 99% จากบริษัท Intereducation Supplies และกรดแทนนิก (TA) มวลโมเลกุล 1,701.20 กรัม/โมล จากบริษัท Sigma-Aldrich

2.2 วิธีการทดลอง

เตรียมสารละลายกลูเตน โดยละลายกลูเตน 10 กรัม ในสารละลายที่ประกอบด้วยกลีเซอรอล 14 มิลลิลิตร และน้ำ DI 30 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเตรียมสารละลาย GG โดยละลาย GG 0.15 กรัม และ GMS 0.012 กรัม ในน้ำ DI 10 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ทำการผสมสารละลายกลูเตน/GG จากนั้นเติมสารละลายบอแรกซ์ โดยละลายบอแรกซ์ 3 กรัม ในน้ำ DI 10 มิลลิลิตร แล้วกวนผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เมื่อสารละลายเข้ากันดีแล้วเติมสารละลาย TA ที่ความเข้มข้น 0 1.25 2.5 3.75 และ 5 wt% กวนผสมต่อเป็นเวลา 14 นาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ไฮโดรเจลอัจฉริยะ

2.3 การทดสอบสมบัติของไฮโดรเจล

2.3.1 วิเคราะห์สมบัติของหมู่ฟังก์ชั่นด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) ที่ความยาวคลื่น 3500-600 cm^{-1}

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

2.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล โดยการตัดแบ่งออกเป็นสองส่วน แล้วประกบเข้าด้วยกัน ที่อุณหภูมิห้อง จับเวลาในการซ่อมตนเอง จากนั้นนำไปทดสอบความแข็งแรงโดยการถ่วงน้ำหนัก 50 กรัม

2.3.3 การทดสอบการนำไฟฟ้า (Conductivity Properties Testing) ทำการทดสอบโดยใช้หลักการ Two Point Probe ด้วยเครื่อง LCR รุ่น KEITHLEY model 2400 ซึ่งสามารถหาความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยกำหนดระยะห่างและความหนาของชิ้นงานและใช้คำนวณในสมการที่ (1)

$$\sigma = \frac{L}{(R \cdot S)} \quad (1)$$

เมื่อ σ = ค่าการนำไฟฟ้า (S/m)
L = ระยะห่างระหว่างจุดสองจุด (m)
R = ความต้านทาน (Ω)
S = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

2.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพเซนเซอร์สำหรับตรวจจับการเคลื่อนไหว (Strain Sensor Testing) การทดสอบการเคลื่อนไหวของมนุษย์ได้แก่ ข้อมือ นิ้ว เข่า และศอก เพื่อทดสอบความสามารถในการตรวจสอบการเคลื่อนไหวโดยการต่อวงจรอนุกรมด้วยเครื่อง RMS multimeter รุ่น Fluke 289 โดยมีสมการในการคำนวณดังสมการที่ 2

$$RR = \frac{(R - R_0)}{R_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ RR = ความต้านทานสัมพัทธ์ (%)
R = ความต้านทานที่เกิดขึ้น (Ω)
R_0 = ความต้านทานที่จุดเริ่มต้าน (Ω)
S = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชั่นของไฮโดรเจลด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

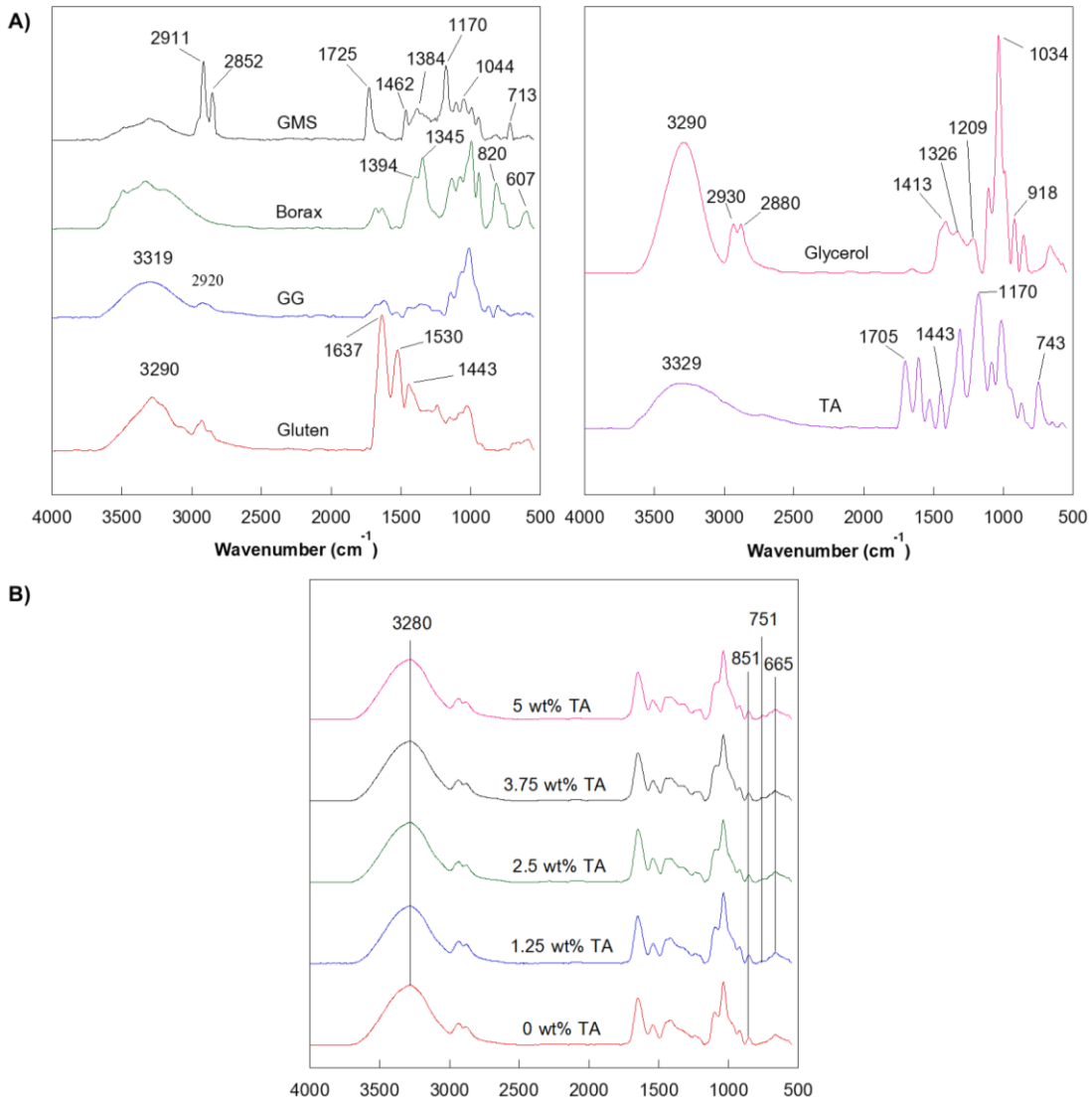
สเปกตรัมของ ATR-FTIR ของไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมของกลูเตน GG GMS กลีเซอรอล TA และบอแรกซ์ แสดงในรูปที่ 1 และสรุปลักษณะหมู่ฟังก์ชันตามตำแหน่งเลขคลื่นในตารางที่ 1 สเปกตรัมของไฮโดรเจล 0 wt% TA จะพบพีคของการเชื่อมขวางของ B-O-B และพีคของการสั่นยืดของพันธะ B-O ที่ 665 cm^{-1} และ 851 cm^{-1} ตามลำดับ สำหรับไฮโดรเจลที่มีการเติม TA จะพบที่ตำแหน่ง 751 ซึ่งแสดงถึงลักษณะของ TA บ่งบอกถึงการรวมตัวกันของ TA และเมตริกซ์ที่ดี โดยกระบวนการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ภายในพอลิเมอร์เมตริกซ์แสดงในรูปที่ 2

3.2 สมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล (Self-healing)

ในการทดสอบการซ่อมแซมตนเอง ไฮโดรเจลถูกตัดแบ่งเป็นสองส่วนแล้วประกบเข้าด้วยกัน ที่อุณหภูมิห้อง โดยปราศจากสิ่งกระตุ้นภายนอก พบว่าไฮโดรเจลสามารถซ่อมแซมตนเองได้ โดยกลไกการซ่อมแซมตนเองสามารถอธิบายโดยการผันกลับของพันธะโควาเลนต์ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของกลูเตน GG กลีเซอรอล TA และบอแรกซ์ การผันกลับของพันธะบอรอเนตเอสเทอร์ทำหน้าที่ในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล หลังจากได้รับความเสียหายของโครงข่ายจะสามารถเกิดการเชื่อมขวางแบบผันกลับได้ อีกทั้งจากการทดสอบพบว่าการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น TA ส่งผลให้เกิดการซ่อมแซมตนเองเร็วขึ้น โดยพบว่าเวลาในการซ่อมแซมลดลงจาก 20 วินาที

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

สำหรับไฮโดรเจลที่มี TA 1.25 wt% ถึง 3 วินาที สำหรับไฮโดรเจลที่มี TA 5 wt% ดังตารางที่ 2 การมี TA ในไฮโดรเจลทำให้ความแข็งแรงในการซ่อมแซมเพิ่มขึ้น โดยสามารถถ่วงน้ำหนัก 50 กรัมได้นานกว่าไฮโดรเจลที่ไม่มี TA ดังรูปที่ 3 ทั้งนี้การซ่อมแซมที่รวดเร็วนั้นเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลอิสระและบอเรตในปริมาณที่เพียงพอสำหรับการสร้างพันธะบอรอเนตเอสเทอร์และพันธะไฮโดรเจนภายในไฮโดรเจล [7]

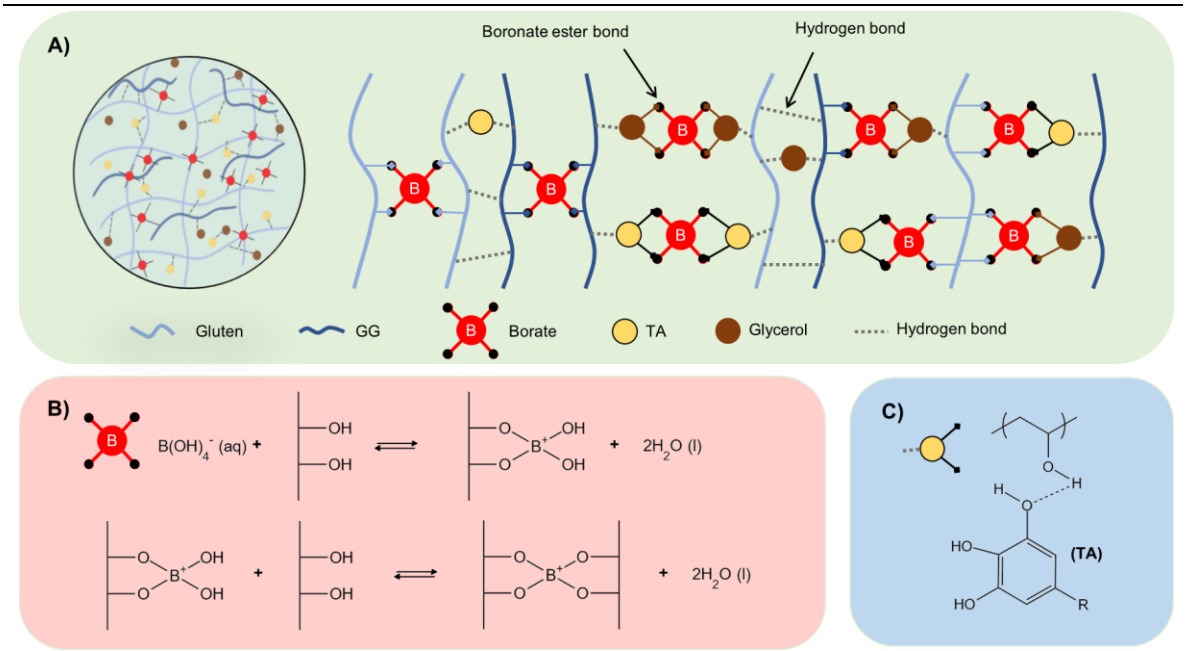


รูปที่ 1 สเปกตรัม ATR-FTIR: A) วัตถุดิบที่เป็นส่วนผสมของไฮโดรเจลอัจฉริยะ และ B) ไฮโดรเจล

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

ตารางที่ 1 หมู่ฟังก์ชั่นของกลูเตน GG GMS กลีเซอรอล บอแรกซ์ และ TA ตามตำแหน่งเลขคลื่นต่าง ๆ

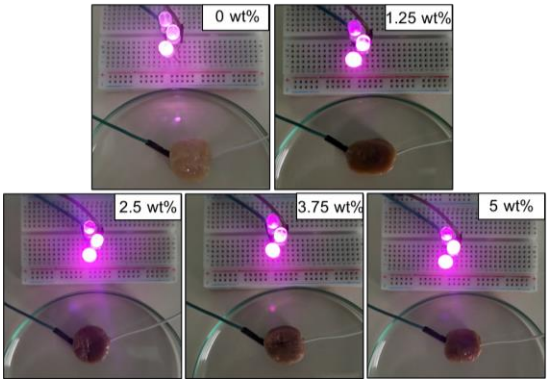
ATR-FTIR peaks (cm^{-1})						Vibration mode
Gluten	GG	GMS	Glycerol	Borax	TA	
3290	3319	3310		3000-3500	3329	O-H stretching
	1647					O-H Bending
	1405, 2920					C-H stretching
		713				C-H Bending
		1044, 1170	1034		1170	C-O stretching
1637		1725				C=O
					1705	C=O stretching
	1150					C-O-C stretching
					1443	C-C stretching
1520, 3100-3500						N-H
					754	C=C
				1300-1600, 851		B-O stretching



รูปที่ 2 A) แบบจำลองการเชื่อมขวางภายในไฮโดรเจล
B) ปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของพันธะบอรอเนตเอสเทอร์ C) พันธะไฮโดรเจน

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

รูปที่ 3 ทดสอบความแข็งแรงของไฮโดรเจลหลังการซ่อมแซมตนเอง ณ เวลา 60 วินาที



รูปที่ 4 ทดสอบการนำไฟฟ้าโดยต่อวงจรไฟฟ้ากับไฮโดรเจล

3.3 การนำไฟฟ้าของไฮโดรเจล

จากการทดสอบการนำไฟฟ้าโดยต่อวงจรไฟฟ้ากับไฮโดรเจล พบว่าสามารถทำให้หลอด LED สว่าง ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลสามารถนำไฟฟ้าได้ สำหรับค่าการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจลที่มี TA ในปริมาณแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 2 โดยพบว่ามีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 0.022-0.027 S/m การเพิ่มปริมาณ TA ไม่ได้ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอิทธิพลหลักของการนำไฟฟ้ามาจากกลไกการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ในโครงข่ายสามมิติของกลูเตน GG และกลีเซอรอลในไฮโดรเจลทำหน้าที่เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ [9-10]

ตารางที่ 2 เวลาในการซ่อมแซมตนเองและค่าการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจล

Samples (wt% TA)	Self-healing time (s)	Conductivity (S/m)
0	-	0.027
1.25	20	0.023
2.5	12	0.022
3.75	10	0.026
5	3	0.027

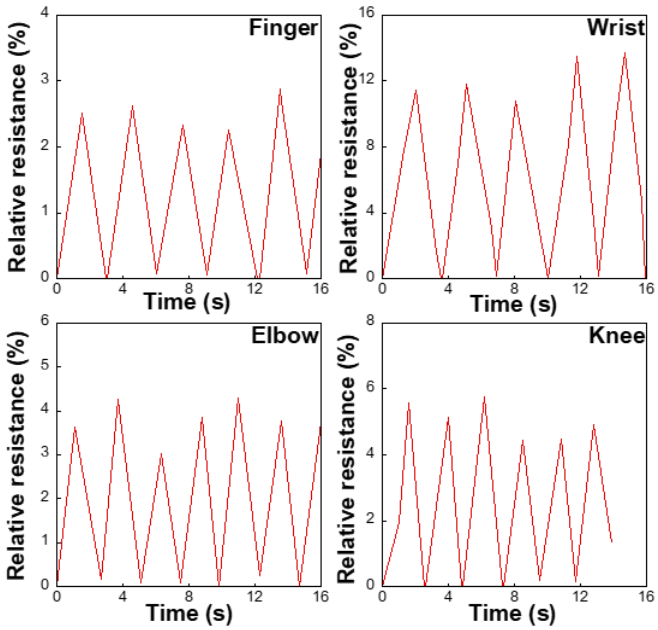
3.4 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนไหวของมนุษย์

ในการเลือกเซนเซอร์วัดความเครียดที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ชิ้นงานจะต้องสามารถติดและลอกออกได้โดยปราศจากเศษของชิ้นงาน โดยไฮโดรเจลที่มี TA ความเข้มข้นน้อยกว่า 2.5 wt% สามารถติดและลอกออกจากผิวหนังได้หมด ในขณะที่ความเข้มข้นของ TA ที่สูงขึ้นนั้นชิ้นงานไม่สามารถลอกออกจากผิวหนังได้หมด ดังแสดงในรูปที่ 5 เนื่องจากการมีอยู่ของหมู่ไฮดรอกซิลในไฮโดรเจลที่มากเกินพอสำหรับการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับผิวหนังได้ [6]

จากการทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดความเครียดโดยการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนไหวของมนุษย์โดยการวัดค่าการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจล พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเติม TA ความเข้มข้น 2.5 wt% สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้อย่างชัดเจน เช่น ข้อมือ ข้อศอก หัวเข่า และนิ้ว ดังรูปที่ 6

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

รูปที่ 5 ทดสอบการลอกออกของไฮโดรเจลที่มี TA 2.5 และ 3.75 wt%



รูปที่ 6 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเพื่อตรวจจับการเคลื่อนไหว

สัญญาณการเคลื่อนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากเซนเซอร์ กระแสไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นเมื่อเซนเซอร์อยู่ในสถานะผ่อนคลายและสัญญาณจะเพิ่มขึ้นถึงค่าสูงสุดเมื่อเซนเซอร์ที่ติดอยู่ตามร่างกายขยับ สัญญาณที่ได้รับสามารถสะท้อนในรูปแบบการเคลื่อนที่แต่ละรูปแบบ นอกจากนี้ยัง

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

สังเกตเห็นความสามารถในการทำซ้ำและความเสถียรของสัญญาณในการขยับและการเคลื่อนไหว ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของบอเรทไอออนที่เกิดจากสารละลายบอแรกซ์ภายในโครงข่ายของไฮโดรเจล เมื่อส่วนของร่ายการมีการโค้งงอทำให้โครงข่ายของไฮโดรเจลยืดออกส่งผลให้ความต้านทานเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อกลับสู่สภาพเดิม สรุปได้ว่า ไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมของ Borax และ TA เป็นเซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวที่ดีสำหรับการเคลื่อนไหวของมนุษย์

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลจากกลูเตน/GG ที่เชื่อมขวางด้วย Borax และใช้ TA เป็นสารเชื่อมขวาง สามารถซ่อมแซมตัวเองได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากการผันกลับของพันธะบอรอเนตเอสเทอร์และพันธะไฮโดรเจน การมี TA ในพอลิเมอร์ช่วยส่งเสริมความแข็งแรงในการซ่อมแซมที่ดียิ่งขึ้น ในการนำไฟฟ้าพบว่าสามารถทำให้หลอด LED ติดสว่างได้ และมีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 0.022-0.027 S/m ไฮโดรเจลที่มีความเข้มข้นของ TA 2.5 wt% สามารถติดและลอกออกจากผิวหนังได้หมดและมีระยะเวลาในการซ่อมแซมตนเองได้อย่างรวดเร็วภายใน 12 วินาที อีกทั้งยังสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวต่าง ๆ ของมนุษย์ได้อย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไฮโดรเจลที่มีส่วนผสมของ Borax และ TA สามารถนำมาใช้เป็นเซนเซอร์วัดความเครียดได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

6. เอกสารอ้างอิง

[1] C. Choi, J.M. Lee, S.H. Kim, S.J. Kim, J. Di and R.H. Baughman, Twistable and stretchable sandwich structured fiber for wearable sensors and supercapacitors, Nano Letters, 2016, 16, 7677-7684.

[2] T.Q. Trung, S. Ramasundaram, B. Hwang and N. Lee, An all-elastomeric transparent and stretchable temperature sensor for body-attachable wearable electronics, Advanced Materials, 2016, 28(3), 502-509.

[3] A. Atrei, M. Fiorani, A. Bellingeri, G. Protano and I. Corsi, Remediation of acid mine drainage-affected stream waters by means of eco-friendly magnetic hydrogels crosslinked with functionalized magnetite nanoparticles, Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management, 2019, 12,100263.

[4] J.R. Biesiekierski, What is gluten?, Journal of Gastroenterology and Hepatology, 2017, 32(S1), 78-81.

[5] X. Han, W. Lu, W. Yu, H. Xu, S. Bi and H. Cai, Conductive and adhesive gluten ionic skin for eco-friendly strain sensor, Journal of Materials Science, 2021, 56, 3970-3980.

วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology)
ISSN (Print): 1686-9869, ISSN (online): 2697-5548
DOI: 10.14416/j.ind.tech.2023.04.003

[6] A. Ounkaew, P. Kasemsiri, N. Srichiangsa, K. Jetsrisuparb, J.T.N. Knijnenburg, M. Okhawilai, S. Hiziroglu and S.Theerakulpisut, Multifunctional gluten/guar gum copolymer with self-adhesion, self-healing, and remolding properties as smart strain sensor and self-powered device, Express Polymer Letters, 2022, 16(6), 607-623.

[7] W. Ge, S. Cao, F. Shen, Y. Wang, J. Ren and X. Wang, Rapid self-healing, stretchable, moldable, antioxidant and antibacterial tannic acid-cellulose nanofibril composite hydrogels, Carbohydrate Polymers, 2019, 224, 115147.

[8] L. Zhao, Z. Ren, X. Liu, Q. Ling, Z. Li and H. Gu, A Multifunctional, Self-Healing, Self-Adhesive, and Conductive Sodium Alginate/Poly(vinyl alcohol) Composite Hydrogel as a Flexible Strain Sensor, ACS Applied Materials and Interfaces, 2021, 13, 11344-11355.

[9] X. Pan, Q. Wang, D. Ning, L. Dai, K. Liu, Y. Ni, L. Chen and L. Huang, Ultraflexible self-healing guar gum-glycerol hydrogel with Injectable, Antifreeze, and Strain-Sensitive Properties, ACS Biomaterials Science and Engineering, 2018, 4, 3397-3404.

[10] I. Taesuwan, A. Ounkaew, M. Okhawilai, S. Hiziroglu, W. Jarernboon, P. Chindaprasirt and P. Kasemsiri, Smart conductive nanocomposite hydrogel containing green synthesized nanosilver for use in an eco-friendly strain sensor, Cellulose, 2022, 29, 273-286.