

ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าอัจฉริยะจากการบอซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/ กลีเซอรอล เชื่อมโยงขวางโดยกรดบอริก

Smart Conductive Hydrogel Based on Carboxymethyl Cellulose/Polyvinyl Alcohol/Glycerol Crosslinked by Borax Acid

อิทธิพล เต้สุวรรณ (Ittipol Taesuwan)* ดร.พรนภา เกษมศิริ (Dr.Pornnapa Kasemsiri)^{1**}

ดร.แก้วตา เจตศรีสุภาพ (Dr.Kaewta Jetsrisuparb) *** Dr.Jesper Knijnenburg****

ณัฐวัฒน์ ศรีขาว (Natwat Srikhao)***** อัจจิมา อุ่นแก้ว (Artjima Ounkaew)*****

(Received: October 6, 2020; Revised: December 20, 2020; Accepted: December 22, 2020)

บทคัดย่อ

ไฮโดรเจลอัจฉริยะที่สามารถนำไฟฟ้าได้เป็นวัสดุความสำคัญที่มีการนำไปประยุกต์กับงานเซนเซอร์ทางด้านวัสดุทางการแพทย์ อย่างไรก็ตามสำหรับการใช้เซนเซอร์ไฮโดรเจลที่สามารถนำไฟฟ้าได้มีข้อจำกัดคือ การสูญเสียน้ำของไฮโดรเจลที่อุณหภูมิปกติทำให้ไฮโดรเจลแห้งและไม่สามารถใช้งานได้ เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหานี้ จึงนำมาสู่เป้าหมายในการพัฒนาไฮโดรเจลนำไฟฟ้าอัจฉริยะที่มีคุณสมบัติการรักษาดตัวเองเมื่อได้รับความเสียหาย การต้านทานการแช่แข็ง การต้านทานการแห้ง และการนำไฟฟ้า ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าสามารถเตรียมได้จาก คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) / พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) / กลีเซอรอล (GA) เชื่อมโยงขวางกับกรดบอริก ที่ 5-25 โดยน้ำหนักสรุปได้ว่าไฮโดรเจลที่มีปริมาณกรดบอริก 5-25 โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดความต้านทานสัมผัสที่ร้อยละ 15-20 ซึ่งความต้านทานจะลดลงตามการเติมกรดบอริกที่เพิ่มขึ้นในชั้นงาน กรดบอริกในไฮโดรเจลจะทำให้เกิดแตกตัวออกเป็นบอเรท ไอออน ทำหน้าที่เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในไฮโดรเจล ความสามารถในการรักษาตัวเองจะเกิดขึ้นได้ในเวลา 30-360 นาที เวลาในการรักษาตัวเองจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดบอริก การเชื่อมโยงขวางย้อนกลับระหว่างบอเรทไอออนและหมู่ไฮดรอกซิล ของ CMC/PVA/GA การทดสอบการต้านทานการแห้งที่ 30°C เป็นเวลา 7 วัน ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักของของ CMC/PVA อยู่ที่ร้อยละ 80 ของน้ำหนักทั้งหมด แต่ของ CMC/PVA/GA ลดลงเพียงร้อยละ 5 ของน้ำหนักทั้งหมด เนื่องจากกลีเซอรอลในไฮโดรเจลทำหน้าที่เป็นสารป้องกันความเย็น-ความร้อนซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพของไฮโดรเจลได้ในช่วง 1 สัปดาห์ จากคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าอัจฉริยะจึงมีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นเซนเซอร์ที่ตรวจวัดความเครียดได้

คำสำคัญ: ไฮโดรเจล ด้านทานการแช่แข็ง การรักษาตนเอง

Keywords: Hydrogel, Anti-freezing, Self-healing

¹ Corresponding author: pornkas@kku.ac.th

*นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

****อาจารย์ คณะวิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*****นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ABSTRACT

Conductive hydrogel is an important material that has been applied as bioactuators and health recording electrodes. The using of conductive hydrogel still has limitations. The loss of water in hydrogel at operating temperature decreases hydrogel properties. To overcome this obstacle, this study aims to develop smart conductive hydrogel with self-healing, anti-freezing, anti-drying. The conductive hydrogel can be prepared based on carboxymethyl cellulose (CMC)/ polyvinyl alcohol (PVA)/glycerol (GA) crosslinked by various borax acid content at 0-25 wt%. Based on the results, the conductive hydrogel containing 5-25 wt% showed relative resistance at 15-20 %. The relative resistance decreased with increasing borax acid in samples. The dissolved borax acid in hydrogel created borate ions which acted as electrolyte in hydrogel. The self-healing ability were observed at 30-360 minutes. The time for self-healing decreased with increasing borax acid content. The reversible linkage between borate ion and hydroxyl groups of CMC/PVA/GA resulting in self-healable phenomenon. The tests of anti-drying were performed at 30°C, for 7 days. The weight loss of PVA/CMC was 80% whereas PVA/CMC/GA was 5%. The GA in hydrogel acted as cryoprotectant which remarkably improve hydrogel stability over 1 week. The obtained conductive hydrogel has potential to apply as strain-sensitive sensors.

บทนำ

ปัจจุบันไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าหรือที่เรียกว่าไฮโดรเจลอัจฉริยะได้นำมาใช้เป็นวัสดุในการเตรียมเซนเซอร์และมีการศึกษามอบัติของไฮโดรเจลประเภทนี้อย่างแพร่หลาย โดยจะมีการพัฒนาให้มีสมบัติอื่นร่วมด้วย เช่น การซ่อมแซมตัวเอง เนื่องจากเป็นสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งาน เช่น การรักษาตัวเอง เมื่อได้รับความเสียหายจากแรงภายนอก, การตอบสนองต่อการทำงานทางอิเล็กทรอนิกส์, ทนต่อการรับแรงได้ดี มีสมบัติการคืนรูป [1] ไฮโดรเจลอัจฉริยะที่มีความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง สามารถเตรียมขึ้นได้จากทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์และชีวภาพ ด้วยกระบวนการสังเคราะห์หลากหลายวิธี เช่น การใช้สารเคมี การใช้ความร้อน รวมไปถึงการฉายรังสี [2] พอลิเมอร์ที่นำมาเตรียมไฮโดรเจลมีหลายประเภท เช่น โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol : PVA) และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethyl Cellulose : CMC) และปัจจุบันไฮโดรเจลอัจฉริยะนำมาประยุกต์ใช้เป็นนาโนไบโอเซนเซอร์สำหรับการตรวจสอบวิเคราะห์ เนื้อเยื่อเทียม อุปกรณ์ทางการแพทย์ เกสซ์และอีกมากมาย [3]

PVA เป็นเทอโมพลาสติกที่มีการใช้งานอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอางและยา เนื่องจากความเข้ากันได้ทางชีวภาพที่ยอดเยี่ยม มีคุณสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพ มีความเป็นพิษต่ำและต้นทุนที่ต่ำ ทำให้เป็นตัวเลือกที่น่าสนใจอย่างมากสำหรับการใช้งานเป็นวัสดุสำหรับเตรียมไฮโดรเจลอัจฉริยะเพื่อใช้งานด้านชีวการแพทย์ นอกจากนี้ PVA สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลและทางกายภาพให้สูงขึ้นได้โดยการผสมกับ CMC โดย CMC จะเข้าไปทำให้ไฮโดรเจลจากความแข็งแรงและค่าโมดูลัสของยัง [4-6] ทั้งนี้เนื่องมาจากโครงสร้างวงแหวนที่แข็งแรงของ CMC ทำให้เกิดการเชื่อมขวางด้วยพันธะไฮโดรเจนขึ้นภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล การเกิดการเชื่อมขวางนี้ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงกล ได้แก่ ค่าความเครียด – ความเค้นและค่าโมดูลัสของยังของไฮโดรเจลเพิ่มสูงขึ้น รวมไปถึงสมบัติการชอบน้ำของ CMC ยังส่งผลให้ ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำและสารละลายได้สูงขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมจาก PVA/CMC จึงเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมและการแพทย์ ที่ต้องการไฮโดรเจลที่มีคุณสมบัติการดูดซับและสมบัติความแข็งแรงที่ดี [7]

อย่างไรก็ตามการใช้งานของไฮโดรเจลอัจฉริยะในปัจจุบันพบว่ามีข้อจำกัด เนื่องจากการใช้ไฮโดรเจลที่มีอุณหภูมิสูงจะส่งผลให้องค์ประกอบที่เป็นน้ำภายในไฮโดรเจลเกิดการระเหยออกจากไฮโดรเจลในช่วงอุณหภูมิสูง ข้อจำกัดนี้ทำให้ไฮโดรเจลสามารถใช้ในช่วงอุณหภูมิหนึ่งเท่านั้น เพื่อให้ไฮโดรเจลสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น ดังนั้นการกักน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของไฮโดรเจลจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติการต้านทานการแห้งและการเยือกแข็งได้ดีขึ้น ในปัจจุบันการกักน้ำภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลสามารถทำได้โดย การเติมสารต้านทานการเยือกแข็ง (Cryoprotectants : CPAs) ที่มีช่วงอุณหภูมิของการเยือกแข็งและการระเหยที่สูง ทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติในการต่อต้านการแช่แข็งและไม่ทำให้แห้งในการใช้งานที่สภาวะต่าง ๆ ได้ดีขึ้น [8-9] จากงานวิจัยของ F.Chen และคณะ [10] ได้นำเสนอวิธีการกักตัวทำละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบจากโครงสร้างของไฮโดรเจลที่ได้จากการเตรียมโดยกระบวนการแบบหม้อเดียวด้วยการใช้กลีเซอรอลเป็นสาร CPAs ซึ่งการเติมกลีเซอรอลเข้าไปทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติต้านทานการแช่แข็งและต้านทานการแห้งได้ในช่วงอุณหภูมิ -78 °C ถึง 80 °C โดยที่ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวน้ำหนักของชิ้นงานจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

นอกจากข้อจำกัดในการใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ ที่อาจจะทำให้ไฮโดรเจลแห้งหรือแข็งตัว ยังมีข้อจำกัดอีกประการหนึ่งคือ ประสิทธิภาพที่ลดลงของไฮโดรเจลเมื่อเกิดความเสียหาย หรือเกิดการฉีกขาด ดังนั้น การทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติในการรักษาตัวเองได้ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่ทำให้ไฮโดรเจลสามารถกลับมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ หนึ่งในแนวทางการเพิ่มสมบัติการรักษาตัวเองได้ให้กับไฮโดรเจลทำได้โดยการเติมกรดบอริกลงในโครงสร้างของไฮโดรเจล ซึ่งกรดบอริกจะทำให้เกิดพันธะบอโรน เอสเตอร์ กับน้ำที่อยู่ภายในไฮโดรเจลทำให้เกิดการเชื่อมขวางในโครงสร้างของไฮโดรเจลที่สามารถฟื้นกลับได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เมื่อไฮโดรเจลเกิดความเสียหายการมีพันธะเชื่อมขวางที่ฟื้นกลับได้จะส่งผลให้ไฮโดรเจลสามารถเกิดการรักษาตนเองให้กลับสู่สภาพเดิมได้ [11-12] จากงานวิจัยของ X. Pan [13] ได้มีการเติมการเติมกลีเซอรอลและกรดบอริกลงในโครงสร้างภายในของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลมีคุณสมบัติในการรักษาตัวเองอีกทั้งยังพบว่ากรดบอริกที่เติมลงไปเกิดการแตกตัวทำให้เกิดเป็นบอโรไทออน ส่งผลให้ของเหลวที่อยู่ภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลอยู่ในสภาพเป็นละลายอิเล็กโทรไลต์จึงทำให้ไฮโดรเจลอยู่ในสภาพที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าได้ อีกด้วย [14] อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้มีการศึกษาอิทธิพลของกรดบอริกต่อสมบัติของไฮโดรเจล

ในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการพัฒนาไฮโดรเจลอัจฉริยะที่คุณสมบัติต้านทานการเยือกแข็งที่อุณหภูมิต่ำและเกิดการแห้งที่อุณหภูมิสูง มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองและสามารถนำไฟฟ้าได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์ทางการแพทย์ ซึ่งไฮโดรเจลจะถูกเตรียมจาก CMC/PVA/กลีเซอรอล โดยมีกรดบอริกทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง และทำการเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานการต้านทานการแห้งที่อุณหภูมิ 30°C สมบัติการรักษาตนเองของไฮโดรเจลหลังจากได้รับความเสียหาย และวัดค่าความต้านทานความสัมผัส ของไฮโดรเจลที่ใช้ปริมาณกรดบอริก ร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25 โดยน้ำหนัก

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาสมบัติการต้านทานการต้านทานการแห้งที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 7 วัน
2. เปรียบเทียบการรักษาตนเองของไฮโดรเจลหลังจากได้รับความเสียหายที่กรดบอริกที่ปริมาณร้อยละ 0-25 โดยน้ำหนัก
3. ทดสอบความต้านทานความสัมผัสเมื่อเกิดการขยับของไฮโดรเจลสำหรับการประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเป็นผิวหนังอิเล็กทรอนิกส์

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การเตรียมสารละลาย (Solution Hydrogel)

เตรียมสารละลาย CMC โดยการละลายในน้ำร้อยละ 2 ปั่นกวนเป็นเวลา 5 ชม. และเตรียมสารละลาย PVA โดยละลายในน้ำร้อยละ 4 ปั่นกวนเป็นเวลา 6 ชม. ที่อุณหภูมิ 90 °C นำส่วนผสมทั้งหมดผสมกันรวมกันและปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชม. เพื่อให้กระจายเป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นเติมสารละลายกรดบอริก โดยการละลายในน้ำร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 ผสมเข้ากับกลีเซอรอล 15 มิลลิลิตร ปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 60 °C เพื่อให้ได้สารละลายไฮโดรเจล

การเตรียมไฮโดรเจล (Hydrogel Preparation)

เตรียมไฮโดรเจล โดยวิธีการขึ้นรูปด้วยความร้อน นำสารละลายไฮโดรเจลที่เตรียมไว้เทลงแม่พิมพ์ ขนาด 11.5 x 11.5 cm² นำไปอบในตู้อบ (BIOBASE, Model BOV-V45F) ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเข้าเครื่องอบแห้ง (Medfuture, Model FD10T) แช่แข็งที่อุณหภูมิ -40 °C และความดันที่ 0.0135 kPa เป็นเวลา 2 ชม. และอบแห้งสุญญากาศ เป็นเวลา 22 ชม.

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของไฮโดรเจลที่สัดส่วนต่าง ๆ

Sample	CMC (g)	PVA (g)	Glycerol (ml)	Borax (g)
CMC/PVA-NG	2	4	0	0
CMC/PVA	2	4	15	0
CMC/PVA/B5	2	4	15	0.3
CMC/PVA/B10	2	4	15	0.6
CMC/PVA/B15	2	4	15	0.9
CMC/PVA/B20	2	4	15	1.2
CMC/PVA/B25	2	4	15	1.5

การรักษาดตนเอง (Self-Healing Property Analysis)

นำชิ้นงานตัวอย่าง หลังจากดูดซับน้ำแล้วมาทำการแยกชิ้นงานออกเป็น 2 ส่วนเพื่อทดสอบการรักษาดตนเองในลักษณะเดียวกัน โดยวิเคราะห์ด้วยการสังเกต เป็นเวลาทุก ๆ 15 นาที และทำการบันทึกภาพเพื่อสังเกตการรักษาดตนเอง 2 ส่วนให้เข้าหากันอย่างสมบูรณ์

การทดสอบการต้านทานการเยือกแข็งและการแห้ง (Non-Drying Test)

ทดสอบการต้านทานการระเหยโดยวางชิ้นงานไว้ในอุณหภูมิ 30°C ที่เวลา 7 วัน จากนั้นชั่งน้ำหนักก่อนและหลัง เพื่อดูน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากการระเหยโดยมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$\text{Weight Ratio} = \frac{W_t}{W_{t=0}} \quad (1)$$

เมื่อ

$W_{t=0}$ = น้ำหนักของไฮโดรเจลเริ่มต้น

W_t = น้ำหนักของไฮโดรเจลหลังวางชิ้นงานในอุณหภูมิ 30°C ณ เวลาใด ๆ

การทดสอบเซนเซอร์โดยการทดสอบทางไฟฟ้า (Strain-Sensitive Properties)

ตรวจสอบการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจลผ่านการตรวจสอบจากมัลติมิเตอร์ (Multimeter, Model MU61A) โดยพิจารณาความต้านทานที่เกิดขึ้นบนไฮโดรเจล เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความต้านทานพร้อมกันภายใต้สิ่งเร้าต่าง ๆ บนผิวไฮโดรเจล โดยจะตรวจสอบความต้านทานสัมผัสที่เกิดขึ้นบนไฮโดรเจลในจอและขีดตัวของไฮโดรเจล

$$\text{Relative Resistance (\%)} = \frac{R - R_0}{R_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

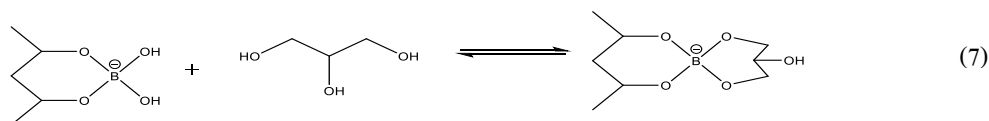
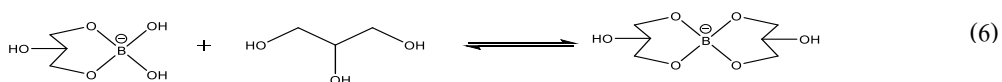
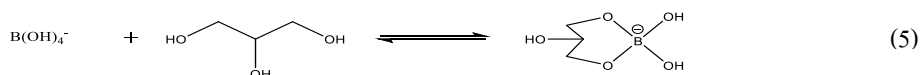
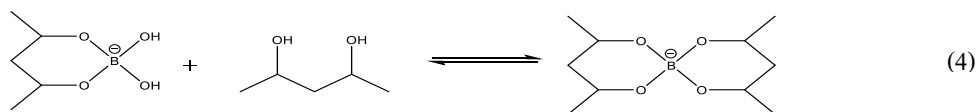
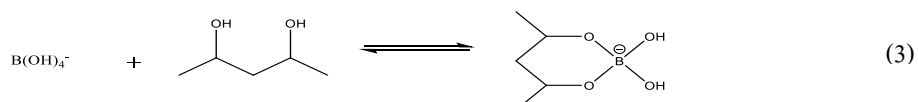
R = ความต้านทานไฟฟ้าเมื่อเกิดการเคลื่อนไหว

R_0 = ความต้านทานไฟฟ้าเริ่มต้น

ผลการวิจัย

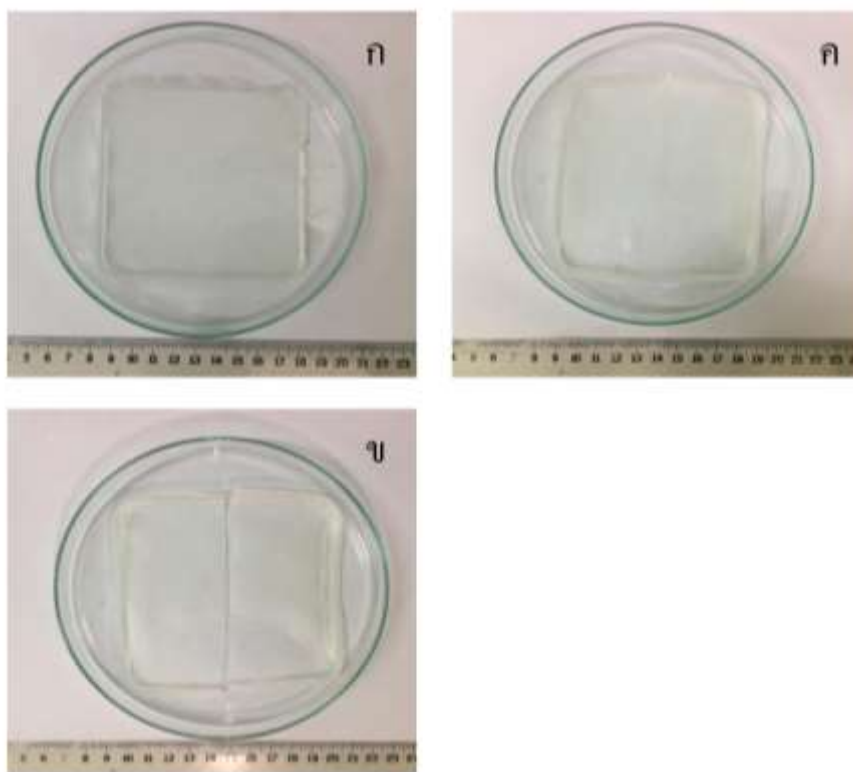
การรักษาดตนเอง (Self-Healing Property Analysis)

ไฮโดรเจลคาร์บอนิมิเทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่เตรียมด้วยวิธีการขึ้นรูปด้วยความร้อน โดยใช้ปริมาณของสารกรดบอริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากลักษณะการกระจายตัวของ PVA พร้อมกับการใช้กรดบอริกซึ่งละลายในน้ำเพื่อแยกตัวเป็นกรดบอริก (B(OH)_3) และบอเรตไฮดรอกไซด์ (B(OH)_4^-) ตามสมการที่ (1) และ (2) จากนั้นมีการจับกับพันธะ di-diol ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล ตามสมการที่ (3) และ (4) ซึ่งพบว่าสามารถเชื่อมข้ามกับ (B(OH)_4^-) และกลีเซอรอลได้อย่างง่ายดายผ่านทางพันธะ di-diol ตามสมการที่ (5), (6) และ (7) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 พันธะเคมีระหว่าง PVA/Borax และ Glycerol/Bora

กรคบอริก ทำหน้าที่เพิ่มความสามารถในการรักษาตนเองดังแสดงในภาพที่ 1 หลังจากได้รับความเสียหายซึ่ง
เครือข่ายของพอลิเมอร์ที่สร้างขึ้นทำให้สามารถเกิดการเชื่อมขวางแบบย้อนกลับได้จากการทดสอบจะเห็นว่ากรคบอริก
ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ขึ้นไปสามารถรักษาตนเองได้เมื่อเวลาผ่านไป 360 นาที พบว่าไฮโดรเจลเกิดการ
รักษาตนเองอย่างสมบูรณ์หลังเกิดการเสียหาย ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอัตราการฟื้นตัวของตัวเองของ
ไฮโดรเจลที่เชื่อมต่อกับกรคบอริกจะใช้เวลานาน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Xi Yang และคณะ เนื่องจากสารทั้งหมด
สามารถเชื่อมโยงกับโมเลกุลของน้ำผ่านพันธะไฮโดรเจนเพื่อสร้างเครือข่ายระหว่างกรคบอริก - กลีเซอรอล - น้ำ ไปยัง
การเชื่อมขวางย่อยเพื่อให้โครงสร้างของไฮโดรเจลถูกจัดเรียงใหม่ ในขณะที่เดียวกันการเติมกลีเซอรอลจะช่วยเพิ่มพันธะ
ไฮโดรเจนระหว่างเครือข่ายพอลิเมอร์ของเจล ซึ่งหากเติมกลีเซอรอลจะส่งผลให้ทำให้ความแข็งแรงของไฮโดรเจลลดลง
(เครือข่ายเชื่อมขวางระหว่าง PVA-borax) เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เชื่อมโยงขวางกับกรคบอริก ด้วยเหตุนี้การนำ
กลีเซอรอลเข้าสู่เครือข่ายของไฮโดรเจลจะทำให้ความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองของไฮโดรเจลดีขึ้นอย่างมาก ทั้งนี้
เป็นผลมาจากการกลีเซอรอลเป็นโมเลกุลเล็ก ที่สามารถแทรกเข้าไปในช่องว่างระหว่างโซ่พอลิเมอร์อีกทั้งสารเชื่อม
ขวางยังทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนและกรคบอริกเกิดการเชื่อมขวางได้มากขึ้นทำให้เกิดการรวมตัวของกรคบอริก
ได้ออลและพันธะไฮโดรเจนอีกครั้งที่พื้นผิวสัมผัสอย่างรวดเร็วทำให้ได้รับการฟื้นฟูอย่างเต็มที่หลังจากได้รับความ
เสียหาย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการสร้างไฮโดรเจลอัจฉริยะที่รักษาตัวเองได้ โดยระยะเวลาในการรักษาจะ
เพิ่มขึ้นตามปริมาณของกรคบอริก ที่มากขึ้น จึงส่งผลให้ใช้เวลาในการรักษาตนเองน้อยลง ดังแสดงในตารางที่ 2



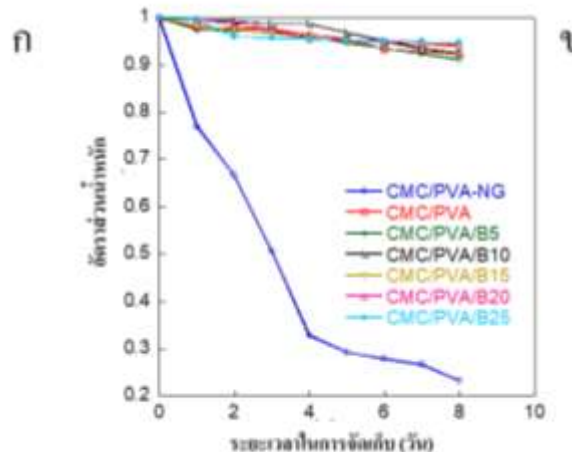
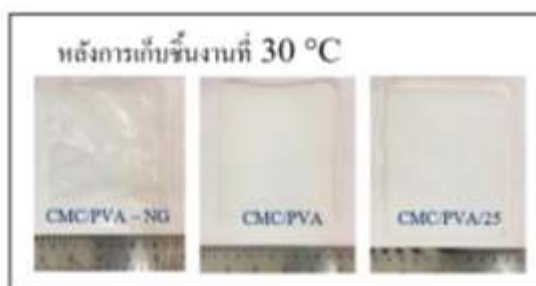
ภาพที่ 2 ความสามารถในการรักษาตัวเองของ CMC/PVA/ B25 hydrogel ที่อุณหภูมิห้อง (ก) ไฮโดรเจล
ดั้งเดิม (ข) ตัดแยกออกเป็น 2 ส่วน (ค) ไฮโดรเจลหลังจากรักษาตนเองเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 2 เวลาที่ใช้ในการรักษาตนเองหลังจากได้รับความเสียหายของไฮโดรเจลที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample	Self - Healing Time (min)
CMC/PVA-NG	-
CMC/PVA	-
CMC/PVA/B5	360
CMC/PVA/B10	225
CMC/PVA/B15	165
CMC/PVA/B20	60
CMC/PVA/B25	30

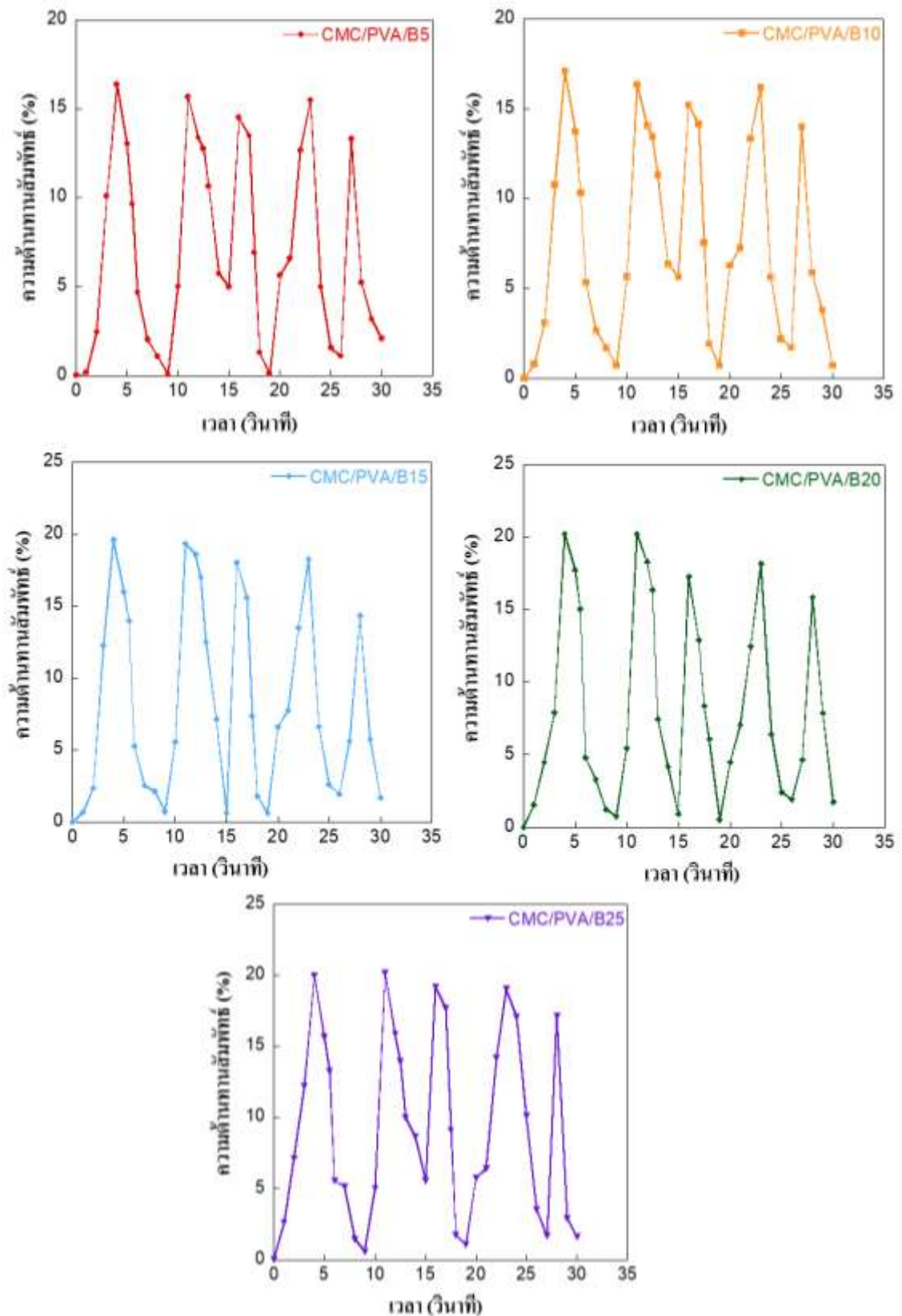
การทดสอบการต้านทานการแห้ง

การต้านทานการแห้งเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน พบว่าไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอล มีน้ำหนักลดลงถึงร้อยละ 70 แต่เมื่อเติมกลีเซอรอลจะเห็นว่าการต้านทานลดลงเล็กน้อยประมาณร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น ดังแสดงในภาพที่ 4 นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติม CPA เป็นองค์ประกอบโดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจลที่ใช้ น้ำจะถูกแช่แข็งได้ง่ายและระเหยได้ง่ายเนื่องจากมีคุณสมบัติของน้ำเป็นองค์ประกอบ กลีเซอรอลเป็นสาเหตุหลักที่สำหรับคุณสมบัติการแข็งตัวของไฮโดรเจลคือ (1) กลีเซอรอลสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงกับโมเลกุลของ น้ำและขัดขวางการก่อตัวของผลึกน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง (2) กรดบอริกช่วยเพิ่มเสถียรภาพของไฮโดรเจล โพลีเมอร์ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเยือกแข็ง



ภาพที่ 3 การรักษาน้ำหนักของไฮโดรเจลชนิดแข็งที่เติม CPA (ก) ภาพดิจิทัลของไฮโดรเจลที่ขึ้นรูปหลังจาก เก็บรักษาเป็นเวลา 7 วันที่อุณหภูมิ 30 °C (ข) การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไฮโดรเจลที่เติมกลีเซอรอลและไม่เติมกลีเซอรอล 30 °C

การทดสอบการทดสอบทางไฟฟ้า



ภาพที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความต้านทานสัมผัส CMC/PVA/Borax ไฮโดรเจล ช่วงความเข้มข้นต่าง ๆ แสดง
เซ็นเซอร์ความเครียดของไฮโดรเจลที่การเคลื่อนที่

จากการทดสอบคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของไฮโดรเจล เนื่องจากคุณสมบัติเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุที่กลุ่มไฮดรอกซิลที่บนพื้นผิวชิ้นงานสามารถสัมผัสกับผิวหนังได้ดีเนื่องจากสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่าง PVA CMC นอกจากนี้พบว่า CMC/PVA ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมขวางด้วยพันธะเอสเทอร์กับกรดบอริก จะมีความยืดหยุ่น อีกทั้งยังมีคุณสมบัติที่ไวต่อความเครียดได้ดี ในการตรวจสอบความไวต่อความเครียดของ PVA CMC ไฮโดรเจล เพื่อทดสอบความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อ ซึ่งการแปรผันของความต้านทานสัมพัทธ์ของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นในระดับที่แตกต่างกันโดยมีความเครียดตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 100 ตามลำดับ หลังจากผ่อนแรงแล้วจะกลับสู่ค่าเริ่มต้นอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถหมุนเวียนได้หลายรอบจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับครั้งแรกคิดเป็นร้อยละ 20 (5 ครั้ง) จากการทดลองการแปรผันของความต้านทานสัมพัทธ์ที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนรูปของไฮโดรเจล แสดงในภาพที่ 5 พบว่าเริ่มออกแรงจากสถานะเริ่มต้นความต้านทานสัมพัทธ์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นสูงสุดถึงร้อยละ 20 จากนั้นความต้านทานจะลดลงเมื่อกลับสู่ระยะยืดปกติของไฮโดรเจล ซึ่งจะเห็นได้ว่า ไฮโดรเจล มีความสามารถในการรักษาการคงรูปของไฮโดรเจลแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของไฮโดรเจลที่ประกอบด้วย CMC/PVA มีสมบัติในการนำไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากไอออนจากการแตกตัวของสารละลายกรดบอริกจนกลายเป็นบอเรท ไอออนจึงทำให้เกิดการนำไฟฟ้าของโครงสร้างเครือข่ายพอลิเมอร์ของไฮโดรเจลที่เป็นโครงสร้างสำหรับการเคลื่อนที่ของประจุไอออนในระบบ เมื่อขยับเครือข่ายพอลิเมอร์ของไฮโดรเจลยืดเข้า - ออกส่งผลให้ความต้านทานของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางกลนี้จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า CMC/PVA ไฮโดรเจลที่มีสื่อกระแสไฟฟ้านี้จะเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มสำหรับการใช้เป็นอุปกรณ์ทางการแพทย์ หรือ เครื่องมือทางวิศวกรรมศาสตร์

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

PVA/CMC/Borax มาพัฒนาเป็นไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางเป็นเครือข่ายพอลิเมอร์ เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ใช้เพียง PVA/ CMC จะเห็นได้ว่าไม่มีความสามารถในการรักษาตนเอง การต้านทานการแช่แข็ง การต้านทานการแห้ง และการนำไฟฟ้า แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าไฮโดรเจลในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการรักษาตนเองจากความสามารถในการเชื่อมขวางย้อนกลับทำให้เมื่อเกิดความเสียหายจะเกิดการรักษาตัวเองเกิดขึ้นได้โดยตัวมันเองและฟื้นฟูโครงสร้างภายในของไฮโดรเจลเพื่อยืดอายุการใช้งาน รวมไปถึงการเติมกลีเซอรอล ในไฮโดรเจลเพื่อให้จับพันธะกับหมู่ไฮดรอกซิล ผลของการเติมกลีเซอรอล คือไฮโดรเจลมีการต้านทานการเยือกแข็งและต้านทานการแห้งในเครือข่ายของพอลิเมอร์จากคุณสมบัติทางเคมีของกลีเซอรอลจนสามารถใช้งานในที่ที่อุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้คุณสมบัติเหล่านี้ยังนำไปสู่การสร้างไฮโดรเจลที่ไวต่อความเครียด เนื่องจากกรดบอริกในไฮโดรเจลจะให้ไอออนเมื่อละลายในน้ำ ทำให้ไอออนเกิดขึ้นในชิ้นงาน ดังนั้นผลลัพธ์คือเมื่อมีการขยับจะเกิดการต้านทานสัมพัทธ์ที่แตกต่างจากการงอและยืดของไฮโดรเจลสำหรับการใช้ในการศึกษาไฮโดรเจลที่ไวต่อความเครียด ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินกองทุนศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปีงบประมาณ 2562

เอกสารอ้างอิง

1. Wang S, Zhang Q, Tan B, Liu L, Shi L. pH-Sensitive Poly(Vinyl Alcohol)/Sodium Carboxymethylcellulose Hydrogel Beads for Drug Delivery. *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2011; 50(12): 2307–2317.
2. Pan X, et al. Multifunctional smart hydrogels: Potential in tissue engineering and cancer therapy. *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2019; 6(4) : 105–121.
3. Islam A, Yasin T. Controlled delivery of drug from pH sensitive chitosan/poly (vinyl alcohol) blend. *Journal of Carbohydrate Polymer*. 2012; 88(3) : 1055–1060.
4. Zhang K, Quyet Van Le. A review of polyvinyl alcohol-carboxymethyl cellulose (PVA/CMC) composites for various applications. *Journal of Composites and Compounds*. 2019; 2 : 10–17.
5. Diani J, Gall K. Absorbent Polyvinyl Alcohol–Sodium Carboxymethyl Cellulose Hydrogels for Propolis Delivery in Wound Healing Applications. *Society of Plastics Engineers*. 2006; 1–10.
6. Xiao C, et al. Preparation and Properties of Physically Crosslinked Sodium Carboxymethylcellulose-Poly(vinyl alcohol) Complex Hydrogels. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010; 116(5) 2658–2667.
7. Xi Yang Q, et al. A facile approach for polymer hydrogels with enhanced strength, self-healing and multiresponsive shape memory properties. *Materials Research Express*. 2007; 115(4) 18–23.
8. Liu H, Zhao W, Gao G, Ren X. Tough, anti-freezing and non-drying double network organohydrogels. *Materials Today Communications*. 2019 ; 21 1–11.
9. Chen M, et al. Anti-freezing flexible aqueous Zn-MnO₂ batteries working at -35 °C enabled by a borax-crosslinked polyvinyl alcohol/glycerol gel electrolyte. *Journal of Materials Chemistry A*. 2020; 8(14) 6828–6841.
10. Chen F, et al. Rational Fabrication of Anti-Freezing, Non-Drying Tough Organohydrogels by One-Pot Solvent Displacement. *Angewandte Chemie International Edition*. 2018 ; 57(22) 6568–6571.
11. Spoljaric S, Salminen A, Luong D, Seppälä J. self-healing hydrogels from nanofibrillated cellulose, poly(vinyl alcohol) and borax via reversible crosslinking. *European Polymer Journal*. 2014 ; 56(1) 105–117.
12. Qin Y, Wang J, Qiu C, Xu X, Jin Z. A Dual Cross-Linked Strategy to Construct Moldable Hydrogels with High Stretchability, Good Self-Recovery, and Self-Healing Capability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2019 ; 67(14) 3966–3980.
13. Pan X, et al. Ultraflexible Self-Healing Guar Gum-Glycerol Hydrogel. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2016 ; 4 109983.
14. Zhang J, et al. Highly Stretchable and Self-Healable MXene/Polyvinyl Alcohol Hydrogel Electrode for Wearable Capacitive Electronic Skin. *Advanced Electronic Materials*. 2019 5(7) .