การศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา

THE STUDY ON SELF-HEALING PROPERTY OF SODIUM CARBOXYMETHYLCELLULOSE HYDROGEL REINFORCED WITH PINEAPPLE LEAF FIBER OR FUMED SILICA

นราภรณ์ นิธิกุล

นวพร บุญชาย

นิชารีย์ วีรวรรณ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา

THE STUDY ON SELF-HEALING PROPERTY OF SODIUM CARBOXYMETHYLCELLULOSE HYDROGEL REINFORCED WITH PINEAPPLE LEAF FIBER OR FUMED SILICA

นราภรณ์ นิธิกุล
นวพร บุญชาย
นิชารีย์ วีรวรรณ

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY ON SELF-HEALING PROPERTY OF SODIUM CARBOXYMETHYLCELLULOSE HYDROGEL REINFORCED WITH PINEAPPLE LEAF FIBER OR FUMED SILICA

NARAPORN NITHIKUL
NAWAPHON BOONCHAI
NICHAREE WEERAWAN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (INDUSTRIAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์-บอกซีเมทิลเซลลูโลสเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา The study on self-healing property of Sodium Carboxymethylcellulose hydrogel reinforced with pineapple leaf fiber or fumed silica	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนราภรณ์ นิธิกุล	รหัสนักศึกษา 57050429
	นางสาวนวพร บุญชาย	รหัสนักศึกษา 57050430
	นางสาวนิชารีย์ วีรวรรณ	รหัสนักศึกษา 57050437
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)	
ภาควิชา	เคมี	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ	

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาห-กรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธี ประธานกรรมการ	
ดร. ณวสิทธิ์ โชติแสง กรรมการ	
ผศ.ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์-บอกซีเมทิลเซลลูโลสเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนราภรณ์ นิธิกุล รหัสนักศึกษา 57050429
	นางสาวนวพร บุญชาย รหัสนักศึกษา 57050430
	นางสาวนิชารีย์ วีรวรรณ รหัสนักศึกษา 57050437
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (C) ที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด (F) หรือฟูมซิลิกา (Si) โดยใช้สารละลายกรดซิตริกกระตุ้นให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจนโดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนความเข้มข้นของ C และปริมาณการใส่สารเสริมแรงทั้งสองชนิดเพื่อศึกษาถึงสมบัติการซ่อมแซมตนเองและสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล โดยใช้ความเข้มข้นของ C เป็น 15 ส่วนและ 20 ส่วนในน้ำ 100 มิลลิลิตรและเปลี่ยนแปลงปริมาณของส่วนเสริมแรง ในกรณีของ F เป็น 0.5, 1, 2 และ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และกรณีของ Si เป็น 5, 15 และ 25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากการศึกษาสัณฐานวิทยาเพื่อดูการกระจายตัวของสารเสริมแรงในไฮโดรเจลพบว่ามีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจลมีค่าอยู่ในช่วง 60-67% และ 33-40% ตามลำดับ เมื่อนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ รวมทั้งสมบัติเชิงกลโดยการทดสอบความแข็งแรงกดและความแข็งพื้นผิวพบว่าไฮโดรเจลมีค่าความแข็งพื้นผิว ความเค้นและมอดุลัสที่ระยะกด 30% สูงขึ้น เมื่อปริมาณของส่วนเสริมแรงสูงขึ้นอีกทั้งพบว่าปริมาณความเข้มข้นของ C ที่มากขึ้นไฮโดรเจลที่ได้จะมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังมีการทดสอบสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลโดยการนำไฮโดรเจลที่ได้ตัดออกเป็น 2 ส่วนแล้วนำมาติดกันซึ่งพบว่าไฮโดรเจลมีความสามารถในการซ่อมแซมตนเองได้โดยมีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองสูงถึง 100%

คำสำคัญ : คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซิลิกา สมบัติการซ่อมแซมตนเอง เส้นใยสับปะรด ไฮโดรเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	The study on self-healing property of Sodium Carboxy methylcellulose hydrogel reinforced with pineapple leaf fiber or fumed silica
Students	Miss Naraporn Nithikul Student ID 57050429
	Miss Nawaphon Boonchai Student ID 57050430
	Miss Nicharee Weerawan Student ID 57050437
Degree	Bachelor of Science (Industrial chemistry)
Department	Chemistry
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2017
Advisor	Asst. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade

Abstract

This research studied on the preparation of hydrogel from sodium carboxymethylcellulose (C) reinforced with pineapple leaf fiber (F) or fumed silica (Si) using citric acid solution to induce crosslinking structure in the form of hydrogen bonding. The proportion of C and the amount of reinforcing agents were varied to study the self-healing and mechanical properties of the hydrogels. The concentration of C was selected at 15 or 20 parts in 100 ml water. The assigned contents of F were at 0.5, 1, 2 and 3 % wt. and Si were at 5, 15 and 25 % wt. The morphology showed the uniform distribution of reinforcing agents in hydrogels. The value of water content and solid content were at 60-67% and 33-40%, respectively. The mechanical properties in compression mode and hardness of hydrogels were tested. The results indicated that surface hardness, stress and modulus at 30% compression increased when increase the amount of reinforcing agents and/or the content of C. Self-healing property of hydrogels were also investigated by cutting the hydrogel into two parts with later adhering them together. The results showed that hydrogels are able to self-healing under specified condition. It was also found that the prepared hydrogels could gain high value of percent healing efficiency up to 100%.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords: Carboxymethylcellulose, Silica, Self-healing property, Pineapple leaf fiber, Hydrogel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำ ในการดำเนินโครงงานพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องในการทำโครงงานพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เส้นใยสับปะรดมาใช้ในโครงงานพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และ ดร.ณวสิทธิ์ โชติแสง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจทานและให้ข้อเสนอแนะเพื่อให้โครงงานพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์รวมถึงสารเคมีที่ใช้ในโครงงานพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจในการดำเนินโครงงานพิเศษนี้ รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือทำให้โครงงานพิเศษนี้เสร็จสมบูรณ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้ศึกษาขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นราภรณ์ นิธิกุล
นวพร บุญชาย
นิชารีย์ วีรวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูป ..... ฌ
คำย่อ/สัญลักษณ์ ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels) 4
2.1.1 ความหมายของไฮโดรเจล 4
2.1.2 วิธีการเตรียมไฮโดรเจล (Preparation methods of hydrogels) 4
2.1.3 สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจล 8
2.2 ไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้ (Self-healing hydrogels) 10
2.2.1 Dynamic covalent bonding 10
2.2.2 Hydrogen bonding 10
2.2.3 Ionic bonding 11
2.2.4 Supramolecular interactions 11
2.2.5 Hydrophobic bonding 12
2.3 โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethylcellulose, CMC) 12
2.4 เส้นใย (Fiber) 13
2.4.1 ประเภทของเส้นใย 13
2.4.2 เส้นใยสับปะรด (Pineapple leaf fiber, PALFs) 16
2.5 ฟูมซิลิกา (Fumed silica) 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1 กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกา 18
2.5.2 สมบัติทางกายภาพของฟูมซิลิกา 18
2.5.3 สมบัติทางเคมีของฟูมซิลิกา 19
2.5.4 การนำไปใช้งาน 19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 23
3.1 สารเคมี 23
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 24
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย 25
3.3.1 การเตรียมสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 8 M 25
3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล 26
3.4.1 การเตรียมไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ 26
3.4.2 การเตรียมไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับประรด 26
3.4.3 การเตรียมไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา 27
3.5 การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ 27
3.5.1 ขนาดและน้ำหนักของไฮโดรเจล 27
3.5.2 ความยาวของเส้นใย 27
3.5.3 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล (Mophology) 28
3.5.4 การทดสอบหาปริมาณน้ำ (Water content) และปริมาณของแข็ง (Solid content) ในไฮโดรเจล 28
3.5.5 การทดสอบความแข็งที่พื้นผิว (Hardness) 29
3.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล 29
3.5.7 การทดสอบการซ่อมแซมตนเอง 30
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล 31
4.1 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล 32
4.1.1 รูปร่างของชิ้นงาน 32
4.1.2 น้ำหนัก ขนาดและความหนาแน่นของไฮโดรเจล 32
4.1.3 ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไฮโดรเจล (Water content) 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.4 ปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจล (Solid content) 34
4.2 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล 36
4.3 ความแข็งที่พื้นผิว (Hardness) 37
4.4 ความแข็งแรงกด (Compressive stress) 39
4.5 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล (Healing efficiency) 41
4.6 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) 43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 45
5.1 สรุปผลการวิจัย 45
5.2 ข้อเสนอแนะ 46
เอกสารอ้างอิง 47
ภาคผนวก 51
ภาคผนวก ก ค่าเฉลี่ยขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจล 52
ภาคผนวก ข ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ 54
ภาคผนวก ค ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ 55
ภาคผนวก ง ค่าเฉลี่ยความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ 56
ภาคผนวก จ ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ 57
ภาคผนวก ฉ ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ 60
ภาคผนวก ช ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ 61
คำรับรองเล่มโครงงานพิเศษ 63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

3.1 สมบัติจำเพาะของนาโนซิลิกา 24
3.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับเส้นใยสับปะรด..... 26
3.3 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับฟูมซิลิกา..... 27
4.1 ตัวอย่างน้ำหนัก ขนาดและความหนาแน่นของไฮโดรเจล 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์ 4
2.2 การเชื่อมขวางของไฮโดรเจลโดยเกิดพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเมอร์และ Ca^{2+} 5
2.3 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล 6
2.4 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด Carboxymethylcellulose 6
2.5 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยการใช้สารเชื่อมขวาง Glutaraldehyde 7
2.6 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์ 8
2.7 กลไกการดูดน้ำของ Poly(sodium acrylate) 9
2.8 การเกิดพอลิคีเลตโทเจนระหว่างไฮโดรเจลกับโลหะหนัก 9
2.9 Acylhydrazone bond และ Disulfide bond 10
2.10 Hydrogen bond 11
2.11 Host-guest interaction 11
2.12 Hydrophobic bonding 12
2.13 โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 13
2.14 เส้นใยไหม (Silks) 14
2.15 เส้นใยหิน (Asbestos) 15
2.16 เส้นใยโลหะ (Metallic fibers) 15
2.17 โครงสร้างเซลลูโลส 16
2.18 เส้นใยสับปะรด (Pineapple leaf fibers, PALFs) 16
2.19 ภาพตัดขวางของเส้นใยสับปะรด จากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 160 เท่า 17
2.20 เครื่อง Roller card 18
2.21 Fumed silica 19
3.1 เส้นใยสับปะรด (Pineapple fiber) 23
3.2 แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด 4×4×4 cm^3 24
3.3 แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด 3×7.8×3 cm^3 25
3.4 เส้นใยสับปะรด 28
3.5 ไฮโดรเจลที่ถูกตัด 30
4.1 โครงสร้าง CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายกรดซิตริก 31
4.2 รูปร่างของชิ้นงานไฮโดรเจลทุกสูตรที่เตรียมได้ 32
4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล 35
4.5 ภาพตัดขวางของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด 36
4.6 ภาพตัดขวางของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา 37
4.7 ค่าความแข็งที่พื้นผิวไฮโดรเจล 38
4.8 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา 39
4.9 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา 40
4.10 ค่าประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล 41
4.11 สมบัติความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด 43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
Na-CMC หรือ C	โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethylcellulose)
PALFs หรือ F	เส้นใยสับปะรด (Pineapple leaf fibers)
Si	ฟูมซิลิกา (Fumed silica)
C20F3	ไฮโดรเจลที่มีโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 กรัม ในน้ำ 100 มิลลิลิตร และเส้นใยสับปะรด 3% ของน้ำหนักโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
C20Si25	ไฮโดรเจลที่มีโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 กรัม ในน้ำ 100 มิลลิลิตร และฟูมซิลิกา 25% ของน้ำหนักโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
RH	ความชื้นสัมพัทธ์
HE	ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (Healing efficiency)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ทันสมัยเกิดขึ้นมากมาย มีการสังเคราะห์วัสดุหลากหลายชนิดขึ้นมาเพื่อตอบสนองต่อการใช้งานทั้งในด้านความแข็งแรงคงทน ความสวยงามทันสมัย ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสมบัติการย่อยสลายได้ ในด้านอุตสาหกรรมทางการแพทย์เริ่มมีการพัฒนาวัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ที่เข้ากับร่างกายได้ดี เพื่อทำหน้าที่เป็นโครงเลี้ยงเซลล์ (Scaffold) ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้วัสดุชีวภาพจากธรรมชาติ มีการสังเคราะห์วัสดุชนิดหนึ่งที่เรียกว่า Self-healing materials ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติพิเศษคือมีความสามารถในการเยียวยาซ่อมแซมตนเองหลังจากถูกทำให้ขาดออกเป็น 2 ส่วน หรือเมื่อมีรอยแตกรอยขีดข่วนเกิดขึ้นวัสดุจะมีกลไกในการรักษาตนเองทำให้วัสดุกลับมาผสานกันได้อีกครั้งโดยไม่เห็นรอยต่อของความเสียหายเดิม

ไฮโดรเจล (Hydrogels) เป็นวัสดุที่สามารถพัฒนาให้มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองได้ โดยธรรมชาติของไฮโดรเจลจะมีน้ำแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างเป็นจำนวนมากอีกทั้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) ทำให้โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ดี ไฮโดรเจลจึงมีความยืดหยุ่นสูง โครงสร้างมีการเชื่อมโยงกันเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ด้วยพันธะโควาเลนต์หรือพันธะอื่นที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ เช่น พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาระหว่างไอออนของโลหะกับลิแกนด์ เป็นต้น ไฮโดรเจลจึงเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจในการนำมาศึกษาและพัฒนาต่อยอดเพื่อให้ได้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายในการนำไปใช้งาน มีการเตรียมไฮโดรเจลเพื่อใช้เป็นวัสดุที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้ (Self-healing Hydrogels) โดยปราศจากการกระตุ้นจากสภาวะภายนอกเพื่อนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ เช่น ใช้ในการเชื่อมติดกันของเนื้อเยื่อ ใช้เป็นสารหรือเป็นแผ่นฟิล์มในการอุดรอยรั่วซึม เป็นต้น ในปัจจุบันมีการเตรียมไฮโดรเจลจากสารตั้งต้นที่ได้จากการสังเคราะห์ (Petrochemicals) และสารตั้งต้นที่มาจากธรรมชาติ (Biochemicals) ไฮโดรเจลที่ได้จากการสังเคราะห์ส่วนใหญ่ผลิตขึ้นจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิอะคริลิกแอซิด (Poly(acrylic acid), PAA) [1] พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol), PVA) [2] เป็นต้น ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ได้จากแหล่งปิโตรเคมี สารตั้งต้นในการผลิตพอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้ล้วนแต่เป็นสารที่มีความเป็นพิษสูง แม้ว่าเมื่อนำมาผ่านกระบวนการสังเคราะห์ให้อยู่ในรูปของพอลิเมอร์แล้วจะไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษก็ตามแต่ยังคงมีสารตกค้างที่ยังหลงเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา ดังนั้นในงานวิจัยจึงมีการพัฒนาไฮโดรเจลที่มาจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพ (Biopolymers) มากยิ่งขึ้น ตัวอย่างสารตั้งต้นที่มาจากธรรมชาติในการเตรียมไฮโดรเจล เช่น เซลลูโลส [3] หรืออนุพันธ์ของเซลลูโลส [4] ไคติน ไคโตซาน [5] กัวกัม [6] และสารสกัดที่มาจากพืช [7] เป็นต้น เพื่อนำมาสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจลที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลที่ได้จากสารตั้งต้นที่มาจากธรรมชาติยังมีข้อจำกัดในด้านสมบัติเชิงกล กล่าวคือไฮโดรเจลที่ได้มีความเปราะของเนื้อเจล ไม่แข็งแรง ทำให้มีการพัฒนาและปรับเปลี่ยนพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเพื่อให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีมากยิ่งขึ้น

มีงานวิจัยที่ศึกษาและเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์ทางชีวภาพ เช่น ศึกษาและเตรียมไฮโดรเจลจากออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต (OSA) และพอลิอะคริลาไมด์ (PAM) เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่าง OSA และ PAM ด้วยพันธะไฮโดรเจนอีกทั้งความสามารถในการเกิดเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว (Conjugate) ระหว่าง OSA กับมอนอเมอร์ของอะคริลาไมด์ (AM) ด้วยการเกิดปฏิกิริยาชิฟเบส (Schiff base) ทำให้เกิดเป็นไฮโดรเจลที่มีสมบัติเด่นในด้านสมบัติเชิงกล สามารถรับแรงกระแทกได้สูง และสามารถซ่อมแซมตนเองได้ดี [8] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่มีการศึกษา Self healing Materials ซึ่งมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยมีการเตรียมไฮโดรเจลจากสารตั้งต้นที่มาจากธรรมชาติ

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ถูกปรับปรุงโครงสร้างชนิดหนึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมไฮโดรเจลและใช้กรดซิตริกเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจนในการเชื่อมโยงทางกายภาพและศึกษาสมบัติในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล แต่เนื่องจากไฮโดรเจลที่ได้จากการเตรียมจากพอลิเมอร์ทางชีวภาพยังมีข้อจำกัดในด้านสมบัติเชิงกลที่ไม่แข็งแรงพอต่อการนำมาใช้งาน [4] จึงมีการเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนต (SA) และพอลิอะคริลาไมด์ (PAAm) มีโครงสร้างการเชื่อมโยงเป็นแบบสองระบบ (Double network) และเสริมแรงด้วยซิลิกาเกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์และซิลิกาภายในไฮโดรเจล เมื่อเปรียบเทียบไฮโดรเจลที่มีซิลิกากับไฮโดรเจลที่ไม่มีซิลิกาพบว่าไฮโดรเจลที่มีซิลิกามีความแข็งแรงเชิงกล (มอดุลัสและความเค้นแตกหัก (Fracture stress)) เพิ่มขึ้นและมีการดึงยืด (Elongation) ที่ดีในขณะที่ยังสามารถคงรูปร่างไว้ได้ในระดับสูง [9] นอกจากนี้ยังมีการเตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไฮโดรเจล (PVA Hydrogel) จากกระบวนการ Freezing–Thawing cycles และเสริมแรงด้วยเส้นใยที่ได้จากถั่วเหลือง (Soy fiber) โดยเตรียมเส้นใยเป็นผืนที่ไม่ได้มีการถักทอ (Non-woven microfiber mat) พบว่าไฮโดรเจลที่ได้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ค่ามอดุลัส (Modulus) ค่าความเหนียว (Toughness) และการดึงยืด (Elongation) เพิ่มขึ้น อีกทั้งเส้นใยที่ได้จากถั่วเหลืองนี้ยังมีความเป็นพิษต่อเซลล์ร่างกายของสิ่งมีชีวิตต่ำอีกด้วย [10]

ในงานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองและเพิ่มสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลโดยสารตั้งต้นที่ใช้คือ Sodium Carboxymethylcellulose (Na-CMC) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลส มีการเชื่อมโยงโครงสร้างด้วยพันธะไฮโดรเจนโดยใช้กรดซิตริกเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการเชื่อมโยง วัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการเสริมแรงคือเส้นใยสับปะรดและฟูมซิลิกา เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับไฮโดรเจล มีการศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลแต่ละสูตรโดยการตัดไฮโดรเจลออกเป็น 2 ส่วนแล้วต่อให้ติดกันจากนั้นเก็บชิ้นงานไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมเพื่อศึกษาและติดตามผลของการซ่อมแซมตนเอง โดยเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลโดยการทดสอบความแข็งแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Compressive stress) และความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของไฮโดรเจลที่เตรียมได้และไฮโดรเจลที่ซ่อมแซมตนเอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) เพื่อศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
2) เพื่อศึกษาผลของสารเสริมแรงเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกาที่มีผลต่อความแข็งแรงของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
2) เตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีเส้นใยสับปะรด
3) เตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีฟูมซิลิกา
4) ตรวจวิเคราะห์ และทดสอบสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจล
5) ศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถเตรียมไฮโดรเจลที่มีสมบัติการซ่อมแซมตนเองจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
2) ทราบถึงผลของสารเสริมแรงที่มีต่อความแข็งแรงของไฮโดรเจล

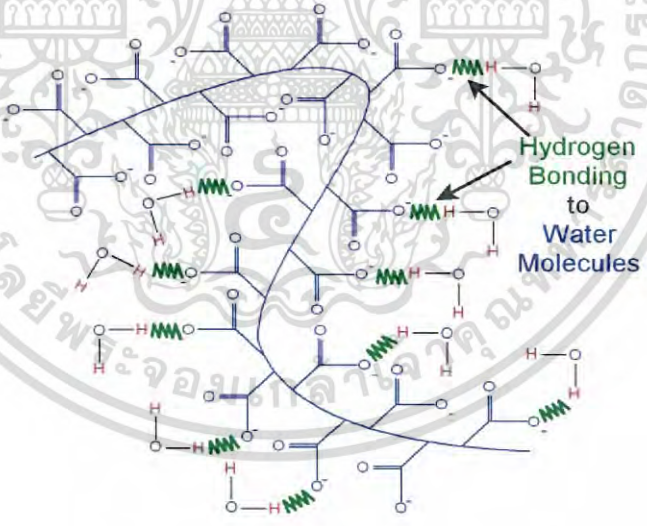
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

2.1.1 ความหมายของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่มีลักษณะสายโซ่ของโมเลกุลเป็นโครงข่ายสามมิติ (Three-dimensional network) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเคมีโดยส่วนใหญ่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ขึ้นอยู่กับลักษณะของเจลชนิดนั้นด้วย ภายในโครงสร้างประกอบด้วยน้ำปริมาณมากจัดเป็นพอลิ-เมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ซึ่งเกิดจากการมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น $-NH_2$, -COOH, -OH, $-CONH_2$, -COONH, $-SO_3H$ เป็นต้น ทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้มากถึง 90% ของปริมาตรทั้งหมดโดยที่ไม่ละลายน้ำ นอกจากนั้นยังมีลักษณะที่อ่อนนุ่ม ยืดหยุ่น คงรูป มีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไฮโดรเจลจึงถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในด้านต่าง ๆ เช่น ใช้ในการผลิตคอนแทคเลนส์ ผลิตภัณฑ์สุขอนามัย วิศวกรรมเนื้อเยื่อ ระบบขนส่งยา และวัสดุปิดแผล เป็นต้น [2]



รูปที่ 2.1 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์ [11]

2.1.2 วิธีการเตรียมไฮโดรเจล (Preparation methods of hydrogels)

การเตรียมไฮโดรเจลเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีสมบัติตามต้องการและเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานที่เจาะจง โดยไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้หลายวิธีดังนี้

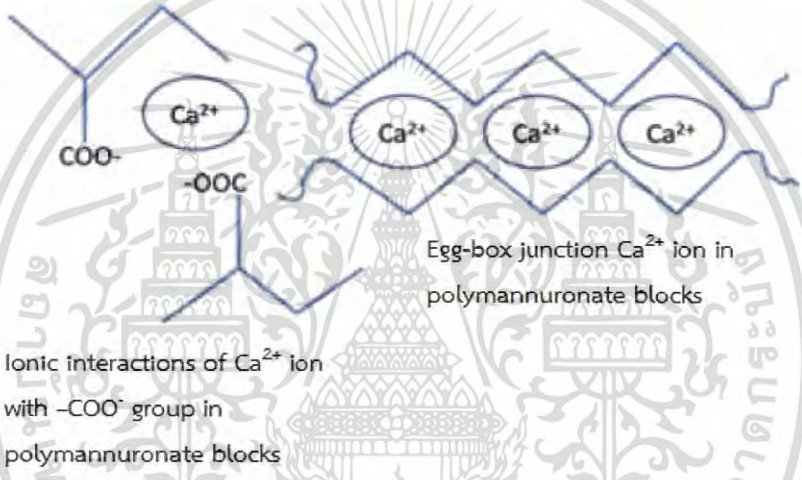
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Physical crosslinking

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมขวางทางกายภาพนี้เป็นวิธีที่ได้รับความสนใจมาก เนื่องจากสะดวก ทำได้ง่าย และมีข้อดี คือ ไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมขวางซึ่งช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล ประกอบด้วยหลายวิธี ได้แก่

1.1 Ionic interaction

วิธีนี้อาศัยการเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นแอนไอออนิกและไอออนบวกภายในสายโซ่ของไฮโดรเจล เช่น การเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอนไอออนิก (Polymannuronate) คือ COO^- และมีการเติม $CaCl_2$ ที่เป็นไอออนบวกทำให้เกิดเป็นไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นไอออนิกพอลิเมอร์

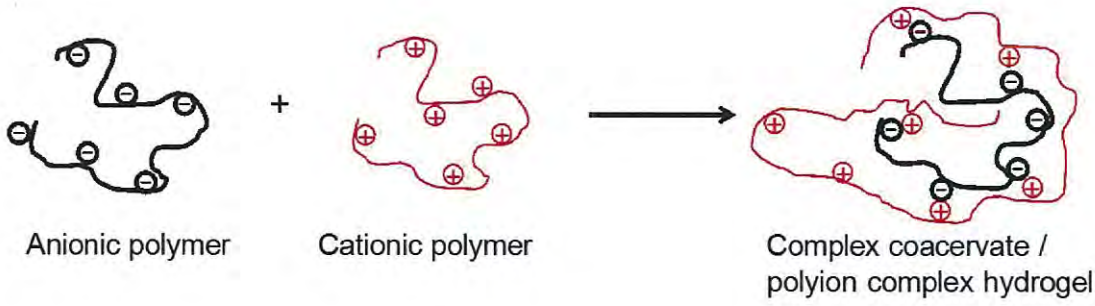


รูปที่ 2.2 การเชื่อมขวางของไฮโดรเจลโดยเกิดพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของพอลิเมอร์และ Ca^{2+} [12]

1.2 Complex coacervation

วิธีนี้ทำได้โดยเชื่อมขวางพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกัน โดยการนำพอลิเมอร์ที่เป็นแคทไอออนิกเชื่อมขวางกับพอลิเมอร์ที่เป็นแอนไอออนิก เมื่อนำมาผสมกันจะทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน เช่น การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจลโดยนำแซนแทนกัมซึ่งเป็นแอนไอออนิกพอลิเมอร์มาเชื่อมขวางกับไคโตซานซึ่งเป็นแคทไอออนิกพอลิเมอร์ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนพอลิไอออนิกไฮโดรเจล

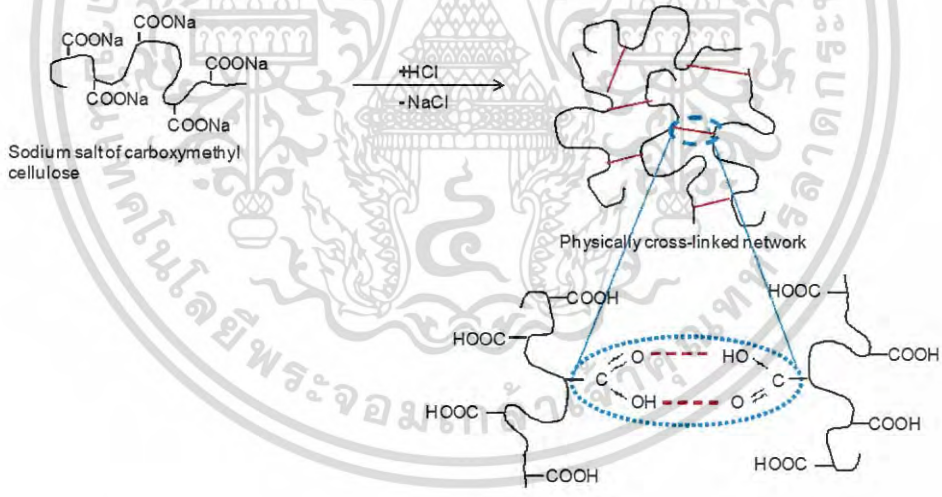
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล [12]

1.3 H-bonding

วิธีนี้อาศัยการสร้างพันธะไฮโดรเจนในการเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล เช่น การเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โดยการเชื่อมขวางโมเลกุลด้วยการทำให้สารละลายพอลิเมอร์มีความเป็นกรด และเกิดการถ่ายโอนประจุของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) จากนั้นโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซิลิกด้วยกันเองจนเกิดการเชื่อมขวางและเกิดเป็นเจลในที่สุด

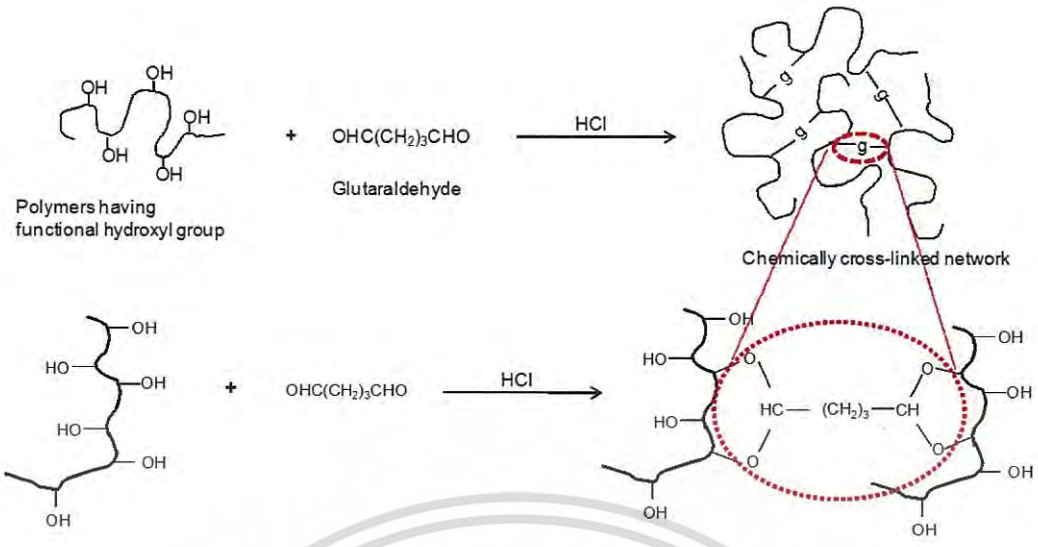


รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิด Carboxymethylcellulose [12]

2. Chemical crosslinking

วิธีนี้ใช้การเชื่อมขวางทางเคมีซึ่งเป็นการเชื่อมโยงของมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์โดยอาศัยการเติมสารเชื่อมขวางเป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์สองสายโซ่เข้าด้วยกัน ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยการใช้สารเชื่อมขวาง Glutaraldehyde [12]

สารเชื่อมขวางที่นิยมใช้ได้แก่ Glutaraldehyde (GA) และ Ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA) เป็นต้น วิธีเตรียมไฮโดรเจลโดยอาศัยวิธีการเชื่อมขวางทางเคมี 2 แบบ ดังนี้

2.1 การเติมสารเชื่อมขวาง (Chemical cross-linkers) เป็นการเติมสารเชื่อมขวางและอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโซ่พอลิเมอร์

2.2 การกราฟต์ (Grafting) ใช้สารเชื่อมขวางหรือรังสีความร้อนช่วยให้เกิดตำแหน่งว่องไว (active site) ขึ้นมา จากนั้นมอนอเมอร์จะเข้าไปกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์ และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน การทำให้เกิดการกราฟต์ของมอนอเมอร์บนสายโซ่พอลิเมอร์ก็ยังสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

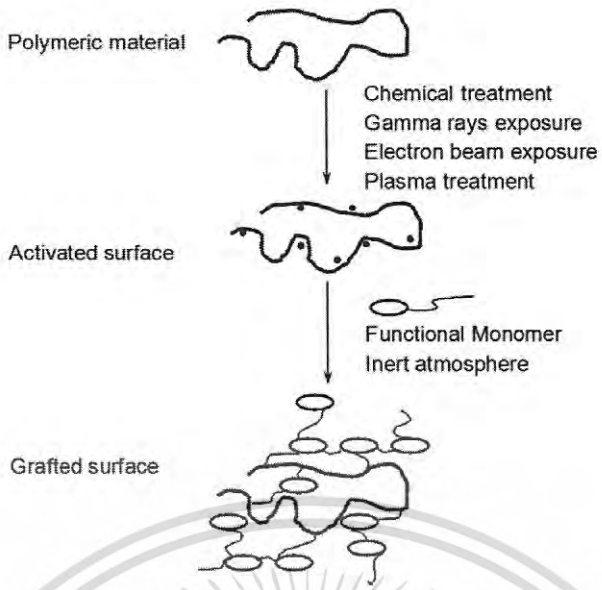
(1) Chemical grafting

เป็นวิธีเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้สารเคมีเชื่อมขวางทำให้เกิดตำแหน่งว่องไว (active sites) แล้วเติมมอนอเมอร์เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเมอร์

(2) Radiation grafting

เป็นวิธีที่อาศัยการฉายรังสีความร้อนที่มีพลังงานสูง เช่น รังสีแกมมา ไมโครเวฟ และลำแสงอิเล็กตรอน เป็นต้น เพื่อให้เกิดตำแหน่งว่องไว (active sites) ก่อนแล้วจึงเติมมอนอเมอร์เข้าไปกราฟต์บนสายโซ่ของพอลิเมอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการกราฟต์บนสายโซ่พอลิเมอร์ [12]

2.3 Radiation crosslinking

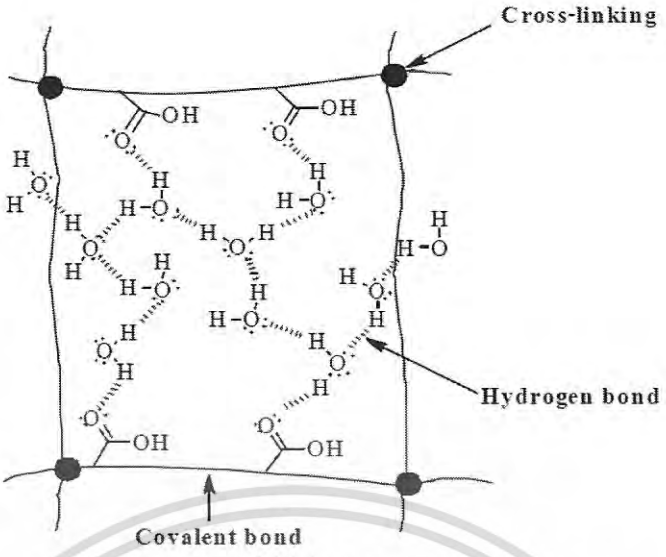
ใช้การฉายรังสีเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมต่อของมอนอเมอร์ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้ทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทั้งด้านโครงสร้างและสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น

2.1.3 สมบัติที่สำคัญของไฮโดรเจล

1. การดูดน้ำของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับน้ำและสามารถคงรูปร่างอยู่ได้โดยไม่ละลายในน้ำ เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นร่างตาข่าย การดูดซับน้ำเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของน้ำกับหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ โดยการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลของน้ำกับคู่อิเล็กตรอนโดดเดี่ยว (Lone pair electron) ของอะตอมออกซิเจนในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (-COOH) จากนั้นโมเลกุลของน้ำจะดึงดูดน้ำโมเลกุลอื่น ๆ เข้ามาเก็บไว้ในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลโดยการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำด้วยกันเอง

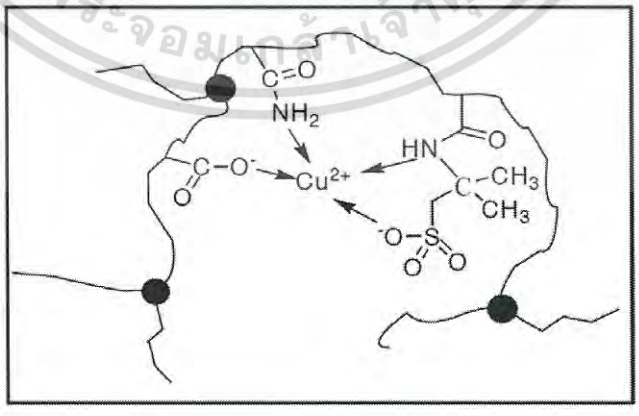
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 กลไกการดูดน้ำของ Poly(sodium acrylate) [12]

2. การดูดซับโลหะหนัก (Heavy metal adsorption)

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่สามารถใช้กำจัดหรือแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ โดยไฮโดรเจลกับโลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกัน การเกิดการคีเลตระหว่างพอลิเมอร์กับไอออนโลหะหนักเรียกว่า พอลิคีเลตโทเจน (Polychelatogens) โดยไอออนโลหะหนักจะคีเลตกับอะตอมที่ให้อิเล็กตรอน (Electron donor atoms) ของพอลิเมอร์ เช่น ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และออกซิเจนโดยสร้างพันธะโคออดิเนตโควาเลนต์ (Coordinatecovalent bonds) ซึ่งพอลิเมอร์ที่นำมาใช้ส่วนมากจะมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับหรือเกิดพอลิคีเลตโทเจนกับไอออนโลหะหนักได้ดีอยู่ในโครงสร้าง เช่น เอไมด์ แอมโมเนียม เอมีน และคาร์บอกซิล เป็นต้น [12]



รูปที่ 2.8 การเกิดพอลิคีเลตโทเจนระหว่างไฮโดรเจลกับโลหะหนัก [12]

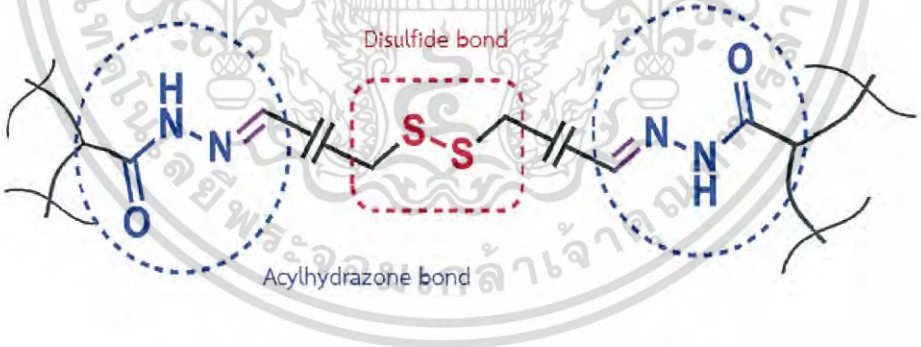
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้ (Self-healing hydrogels)

กลไกการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับความสามารถในการผันกลับได้ (Reversibility) ของการเชื่อมโยงกันระหว่างพันธะที่ทำหน้าที่เป็นพันธะเชื่อมโยงในไฮโดรเจล เช่น พันธะโควาเลนต์แบบไดนามิก พันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิก ซุปเปอร์โมเลกุล โฮสต์-เกสต์ และอันตรกิริยาของส่วนไม่ชอบน้ำรวมกันอยู่ในโครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลที่ซ่อมแซมตนเองได้ โดยจำนวนพันธะของการเชื่อมโยงและความแข็งแรงของพันธะในการเชื่อมโยงจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง [13]

2.2.1 Dynamic covalent bonding

การเชื่อมโยงชนิดนี้เป็นการใช้พันธะโควาเลนต์ที่สามารถถูกทำลายและสร้างขึ้นใหม่ได้ ขึ้นอยู่กับสภาวะ พันธะเหล่านี้จะสามารถเปลี่ยนเป็นพันธะที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์หรือพันธะที่ยึดติดกันแน่นเหมือนพันธะโควาเลนต์ได้ เช่น การใช้พันธะโควาเลนต์สองชนิดร่วมกัน คือ พันธะเอซิล-ไฮดราโซน (Acylhydrazone bond) และพันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bond) ในไฮโดรเจล Poly(ethylene oxide) (PEO) พันธะเอซิลไฮดราโซนสามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับในสภาวะกรด ในขณะที่ปฏิกิริยาผันกลับได้ของพันธะซัลไฟด์เกิดขึ้นในสภาวะเบส ไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถซ่อมแซมตนเองที่อุณหภูมิห้อง (20°C) อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลชนิดนี้ไม่สามารถซ่อมแซมตนเองได้ในสภาวะที่เป็นกลาง



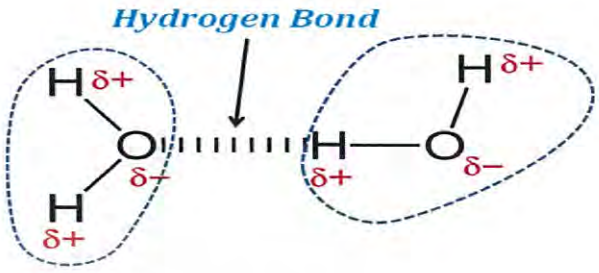
รูปที่ 2.9 Acylhydrazone bond และ Disulfide bond [14]

2.2.2 Hydrogen bonding

พันธะไฮโดรเจนเป็นอันตรกิริยาทางกายภาพที่อ่อนแอกว่าพันธะโควาเลนต์แบบไดนามิกและพันธะไอออนิก เมื่ออะตอมของไฮโดรเจนเกิดพันธะโดยตรงกับอะตอมที่มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีที่สูง (เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน หรือฟลูออรีน) ประจุบวกจะอยู่ที่อะตอมของไฮโดรเจน และลบจะอยู่ที่อะตอมที่มีค่าอิเล็กโทรเนกาติวิตีสูง การเชื่อมโยงแบบย้อนกลับสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างสายโซ่พอลิ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมอร์ที่แตกต่างกันโดยอันตรกิริยาอะตอมไฮโดรเจน และอะตอมของอิเล็กโทรเนกาทีฟที่มีค่าสูงของสองโมเลกุลที่แตกต่างกัน



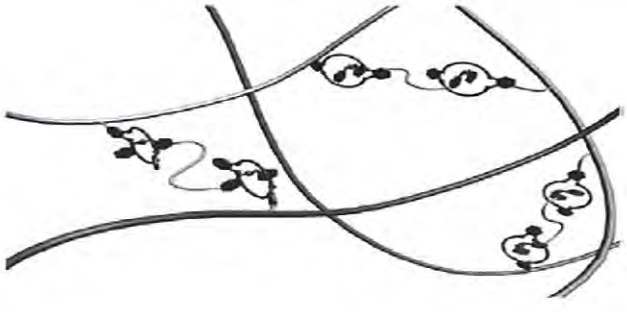
รูปที่ 2.10 Hydrogen bond [15]

2.2.3 Ionic bonding

กลไกการซ่อมแซมตนเองแบบไอออนิกเกิดขึ้นจากอันตรกิริยาที่ย้อนกลับได้ของไอออนที่มีประจุตรงข้ามกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีประจุกับสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้าม หรือไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับสภาวะในการทดลอง โดยอาจกลายเป็นการแตกตัวให้โปรตอน (Deprotonated) และส่งผลให้เกิดการขจัดออกของไฟฟ้าสถิตทำให้ขัดขวางการซ่อมแซมตนเอง การรวมตัวกันของพอลิอิเล็กโทรไลต์หรือเคาน์เตอร์ไอออนในสารละลายจะเกิดอันตรกิริยาและสร้างโครงข่ายสามมิติของไฮโดรเจลจากพันธะไอออนิก ลักษณะทางกายภาพของอันตรกิริยาแบบไฟฟ้าสถิตนี้ทำให้เหมาะสำหรับการใช้เป็นกลไกในการซ่อมแซมตนเอง

2.2.4 Supramolecular interactions

อันตรกิริยาแบบโฮสต์-เกสต์เกี่ยวข้องกับสารเคมีสองชนิดหรือมากกว่าสองชนิด เกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุล ด้วยอันตรกิริยาที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ (เช่น พันธะไฮโดรเจน) เช่น โมเลกุลเกสต์ แทรกตัวอยู่ในโมเลกุลโฮสต์ เกิดเป็นซุปราโมเลคิวลาร์หรือซุปราโมเลกุล (Supramolecular) ซึ่งการเชื่อมโยงที่ผันกลับได้นี้จะสามารถใช้เป็นกลไกในการซ่อมแซมตนเอง



รูปที่ 2.11 Host-guest interaction [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 Hydrophobic bonding

แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำเกิดขึ้นโดยการรวมตัวของโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) การรวมตัวกันแน่นของโครงสร้างที่ไม่ชอบน้ำเกิดขึ้นได้ง่ายและเมื่อมีการรบกวนขึ้นอีกครั้งจะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบไมเซลล์เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการรวมตัวของโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำในไฮโดรเจลโดยปราศจากการทำลายส่วนที่ชอบน้ำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำกับมอนอเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำและเกิดเป็นไมเซลล์ โดยการเกิดไมเซลล์นี้ถูกนำมาใช้เป็นกลไกในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

รูปที่ 2.12 Hydrophobic bonding [17]

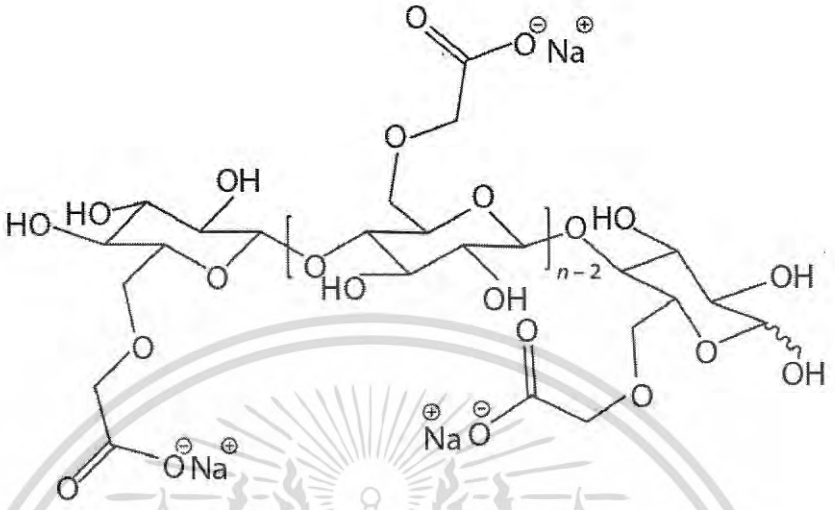
2.3 โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethylcellulose, CMC)

โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสธรรมชาติที่พบได้ในผนังเซลล์ของพืชและแบคทีเรีย เป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ประเภทพอลิเมอร์ชนิดที่ชอบน้ำที่ถูกดัดแปรมาจากเซลลูโลส โดยมีหมู่คาร์บอกซีเมทิลเข้ามาแทนที่โครงสร้างเดิมที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิล ลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีพิษ ละลายได้ดีในน้ำ ไม่ส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม มีคุณสมบัติเป็นสารช่วยเพิ่มความหนืด คงสภาพ และเป็นสารยึดเกาะ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในเชิงการค้าส่วนใหญ่มีค่าองศาการแทนที่ประมาณ 0.4-1.5 สามารถละลายได้ในน้ำ แต่ CMC ที่มีค่าองศาการแทนที่อยู่ที่ 0.1-0.3 จะละลายได้ไม่ดีในน้ำ เกรดของ CMC แบ่งจากค่าองศาการแทนที่ ความสม่ำเสมอของหมู่แทนที่ องศาการเกิดพอลิเมอร์ และองศาความบริสุทธิ์

การนำไปใช้ประโยชน์ เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก Anti-redeposition agent ซึ่งเป็นประจุลบที่ผลักอนุภาคของสิ่งสกปรกไม่ให้กลับมาเกาะที่เนื้อผ้าระหว่างการซักล้างอีก ใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ผสมในสีพิมพ์ผ้าให้มีเนื้อข้นเพื่อเคลือบเนื้อผ้า ช่วยให้ผ้าไม่สกปรกง่ายและยังเป็น Sizing agent เคลือบให้เส้นใยลื่นทนต่อแรงดึงและแรงเสียดทานระหว่างการทอผ้า อุตสาหกรรมอาหารและยาเลือกใช้ CMC เกรดที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นสารคงรูปของไอศกรีม เป็นสารป้องกันการตกผลึกของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำตาลในอาหารประเภทน้ำเชื่อม เป็นสารป้องกันการเกิดคอลลอยด์และเป็นตัวประสานในเม็ดยา เป็นต้น [18]



รูปที่ 2.13 โครงสร้างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [19]

2.4 เส้นใย (Fiber)

เส้นใย หมายถึง วัสดุที่มีลักษณะเป็นเส้นยาวมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ความยาวขึ้นอยู่กับชนิดของเส้นใยนั้น ๆ เป็นวัสดุที่มาจากธรรมชาติหรือมาจากการสังเคราะห์ขึ้น เช่น เส้นใยจากเซลลูโลสธรรมชาติ เส้นใยจากพอลิเมอร์ เป็นต้น เส้นใยสามารถแบ่งได้ตามแหล่งกำเนิดของเส้นใย คือเส้นใยสังเคราะห์ และเส้นใยธรรมชาติ เส้นใยสังเคราะห์คือเส้นใยที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่าง ๆ ตามการใช้งาน เช่น ความเงางาม การทนอุณหภูมิ ความยืดหยุ่น เป็นต้น [20]

2.4.1 ประเภทของเส้นใย

1. เส้นใยสังเคราะห์

(1) เส้นใยเซลลูโลสสังเคราะห์ (Synthetic cellulose fibers)

เป็นเส้นใยจากเซลลูโลสที่นำมาผลิตขึ้นใหม่ (Regenerated cellulose) รู้จักกันในชื่อว่าไหมเทียมหรือเรยอน

(2) เส้นใยโปรตีนสังเคราะห์ (Synthetic protein fibers)

เป็นเส้นใยโปรตีนที่ผลิตจากหางน้ำนม (Casein) โดยมีการพัฒนาให้ได้สมบัติที่ดียิ่งขึ้นและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น นอกจากนั้นยังมีเส้นใยโปรตีนที่ผลิตจากถั่วเหลือง ถั่วลิสง ข้าวโพด เป็นต้น

(3) เส้นใยพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer fibers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเส้นใยที่สังเคราะห์ขึ้นจากสารเคมีหรือพอลิเมอร์ ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยเส้นใยแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบเป็นสารเคมีที่แตกต่างกัน เช่น ไนลอน อะคริลิก พอลิเอสเทอร์ เป็นต้น [21]

2. เส้นใยธรรมชาติ

เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ ได้จากพืชและสัตว์ เช่น ฝ้าย ป่าน ปอ ลินิน ใย ไผ่ ไหม แร่ใยหิน ขนสัตว์ เป็นต้น โดยเส้นใยจากพืชจะมีราคาถูกกว่าเส้นใยที่ได้จากสัตว์ และยังเป็นที่นิยมเพราะหาได้ง่าย เส้นใยธรรมชาติแบ่งเป็น 4 ประเภทด้วยกัน

(1) เส้นใยโปรตีนจากธรรมชาติ (Protein fibers)

เส้นใยโปรตีนธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากสัตว์ ได้แก่ ใยขนสัตว์และใยไหม เส้นใยขนสัตว์คือใยที่ได้จากขนสัตว์ เช่น แกะ อูฐ ลามา แอลปากา วิคูนา เป็นต้น และยังมีขนสัตว์อีกประเภทหนึ่งที่มีขนาดลำตัวเล็ก เช่น ขนมิงค์ กระต่าย บีเวอร์ เป็นต้น จะให้เส้นใยที่อ่อนนุ่มกว่าขนสัตว์ประเภทแรก จะเรียกว่า Fur fiber ส่วนเส้นใยไหม เป็นเส้นใยที่ได้จากตัวไหมซึ่งขับสารชนิดหนึ่งออกมาจากต่อมใกล้ปาก เพื่อสร้างรังห่อหุ้มให้กับตัวเอง เส้นใยโปรตีนธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ให้ความอบอุ่น และดูดความชื้นได้ดีกว่าเส้นใยจากเซลลูโลส แต่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีไม่ทนต่อด่างและสารฟอกขาวประเภทคลอรีน เส้นใยโปรตีนจากธรรมชาติประกอบด้วยกรดอะมิโนซึ่งจับกันในรูปของพอลิเปปไทด์ (Polypeptide chains) มีน้ำหนักโมเลกุลค่อนข้างสูง

รูปที่ 2.14 เส้นใยไหม (Silks) [22]

(2) เส้นใยธรรมชาติจากแร่ (Mineral fibers)

- เส้นใยหิน (Asbestos) เป็นใยที่แยกได้จากหินที่มีสีเขียวเรียกว่า Serpentine มีลักษณะเป็นชั้นลื่นเหมือนสบู่ ใยหินที่ได้จะถูกนำมาทำความสะอาด แยกประเภทและส่งไปตามโรงงานสิ่งทอ ใยหินจะมีความเหนียว แข็งแรง ทนความร้อนได้สูงในระยะเวลาสั้น ๆ และทนสารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 เส้นใยหิน (Asbestos) [23]

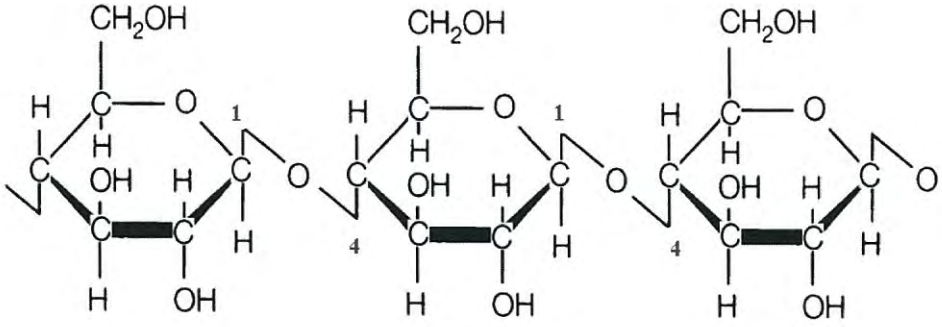
- เส้นใยโลหะ (Metallic fibers) เส้นใยโลหะเป็นเส้นใยที่นิยมทำจากโลหะแท้ เช่น ทองซึ่งมีราคาแพงมาก เงิน ทองแดง อลูมิเนียม เป็นต้น ส่วนใยโลหะสังเคราะห์ทำจากโลหะอลูมิเนียม หรือโลหะหุ้มพลาสติก สารที่พ่นทับโลหะ ได้แก่ สารพอลิเอสเทอร์ สารเซลลูโลส เส้นใยโลหะจะไม่เหนียวมากนิยมนำมาตกแต่งผืนผ้ามากกว่าทอเป็นผ้าทั้งผืน

รูปที่ 2.16 เส้นใยโลหะ (Metallic fibers) [24]

(3) เส้นใยเซลลูโลสธรรมชาติ (Natural cellulose fibers)

เป็นเส้นใยที่ได้จากพืช โครงสร้างของโมเลกุลประกอบด้วยกลุ่มแอนไฮโดรกลูโคสเกาะเกี่ยวกันเป็นสายโซ่ยาวโมเลกุลใหญ่ สายโมเลกุลนี้รวมกันจำนวนมากจะเกิดเป็นเส้นใยและยิ่งมีความยาวมากจะมีผลทำให้เซลลูโลสมีความเหนียวมากขึ้น โซ่โมเลกุลจะยาวมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนโมเลกุลกลูโคส กลูโคสแต่ละหน่วยประกอบด้วยคาร์บอน 44.4% ไฮโดรเจน 1.2% และออกซิเจน 49.4% การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลส มีทั้งแบบที่เป็นโครงผลึกและอสัณฐาน โดยส่วนที่เป็นผลึกจะมีความแข็งแรงเพราะมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ และส่วนที่เป็นอสัณฐานจะมีช่องว่างระหว่างโมเลกุลทำให้มีการจัดเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบและขาดความแข็งแรง [24]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



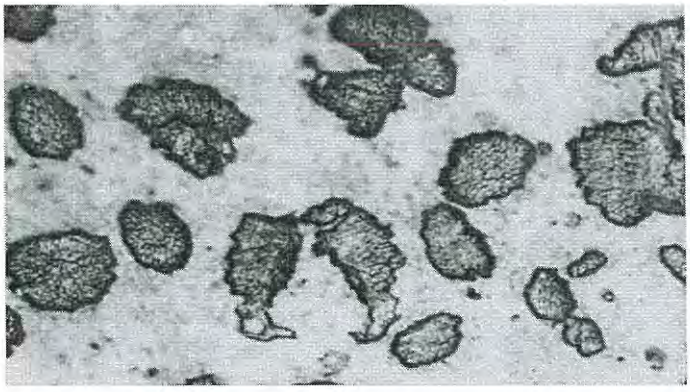
รูปที่ 2.17 โครงสร้างเซลลูโลส [25]

2.4.2 เส้นใยสับปะรด (Pineapple leaf fibers, PALFs)

รูปที่ 2.18 เส้นใยสับปะรด (Pineapple leaf fibers, PALFs) [26]

เส้นใยสับปะรด (Ananas comosus) เป็นเส้นใยที่ได้จากใบของสับปะรดมีสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม เส้นใยสับปะรดจัดเป็นเส้นใยลิกโนเซลลูโลสมีโครงสร้างคล้ายริบบิ้นเชื่อมติดกันด้วยลิกนิน ซึ่งทำให้เส้นใยมีความแข็งแรง เส้นใยมีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 10 ไมโครเมตร ความยาวเฉลี่ย 4.5 มิลลิเมตร และ Aspect ratio เท่ากับ 450 ความหนาของผนังเซลล์มีค่าเท่ากับ 8.3 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ภาพตัดขวางของเส้นใยสับปะรดจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 160 เท่า [27]

1. สมบัติของเส้นใยสับปะรด

เส้นใยสับปะรดถูกนำไปใช้ในการเสริมแรงในด้านสมบัติเชิงกลให้กับคอมโพสิต เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลในด้านให้ความแข็งแรง มีค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) อยู่ในช่วง 170–1,627 MPa ค่ามอดุลัสแรงดึง (Tensile modulus) อยู่ในช่วง 6.26-82.5 GPa และค่าระยะยืด ณ จุดขาดอยู่ในช่วง 0.8-3.37% ซึ่งเป็นผลจากปริมาณเซลลูโลสที่สูงและมุมในการบิดเกลียวที่ต่ำถึง 14° อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงขณะเปียก (Wet bundle strength) ลดลงถึง 50% [27]

2. กระบวนการผลิตเส้นใยสับปะรด

เส้นใยสับปะรดถูกแยกออกมาด้วยวิธีเชิงกลและการหมัก โดยการนำใบสับปะรดไปทำความสะอาดก่อนเข้าเครื่องรีด เพื่อให้ใบสับปะรดแยกออกจากกัน หลังจากนั้นนำใบสับปะรดไปหมักในน้ำเป็นระยะเวลา 25-30 วัน เมื่อครบกำหนดนำไปตากแดดให้แห้งก่อนนำมาตัดให้เส้นใยมีความยาวตามขนาดที่ต้องการ ใช้เครื่อง Roller card เพื่อแยกเส้นใยออกจากกันและให้มีความนุ่มมากยิ่งขึ้น จำนวนรอบของการเดินเครื่องขึ้นอยู่กับลักษณะเส้นใยที่ต้องการ เช่น ความนุ่มของเส้นใย ความสม่ำเสมอของเส้นใย เป็นต้น [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.20 เครื่อง Roller card [28]

2.5 ฟูมซิลิกา (Fumed silica)

2.5.1 กระบวนการสังเคราะห์ซิลิกา

ซิลิกามีโครงสร้างทั้งแบบผลึก, อสัณฐาน และอสัณฐานสังเคราะห์ มีวิธีการสังเคราะห์ 3 วิธี

1. การให้ความร้อน (Thermal route) เป็นการให้ความร้อนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ที่อุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส

2. วิธีแบบเปียก (Wet route) เป็นวิธีการตกตะกอนหลังจากเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเป็นสารช่วยให้ตกตะกอน จะได้ซิลิกาที่เป็นอสัณฐาน

3. วิธีซิลิกาโซล (Silica sols, Colloidal silica) เป็นการนำซิลิกอนเตตระคลอไรด์ (Silicon tetrachloride) มาทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในน้ำ [30]

2.5.2 สมบัติทางกายภาพของฟูมซิลิกา

ฟูมซิลิกามีลักษณะเป็นผลึกหรืออสัณฐาน ไม่มีสีหรือเป็นผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น รส พบมากในดินและหิน ฟูมซิลิกามีขนาดอนุภาคที่เล็กมากมีขนาดประมาณ 100-1,000 นาโนเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 10-25 ตารางเมตร/กรัม มีน้ำหนักโมเลกุล 60.1 กรัม/โมล ฟูมซิลิกาไม่ละลายในน้ำหรือละลายได้น้อยและไม่ละลายในกรดทุกชนิดยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริกและสามารถละลายได้โดยการหลอมกับด่าง พื้นผิวของซิลิกามีความชอบน้ำ (Hydrophilic) ขึ้นอยู่กับปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างที่สร้างพันธะกับซิลิกอนเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจน การเปลี่ยนแปลงรูปของซิลิกาจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก แต่จะเกิดขึ้นได้เร็วมากเมื่อหลอมรวมกับอัลคาไล (Alkali), วานาเดต (Vanadate), คลอไรด์ (Chloride) และบอเรตท์ (Borate) แต่จะไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพมากนัก [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.21 Fumed silica [31]

2.5.3 สมบัติทางเคมีของฟูมซิลิกา

ซิลิกามีสมบัติทางเคมีที่ค่อนข้างเสถียรที่อุณหภูมิปกติ และไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารเคมีหลายชนิด แต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้โดยซิลิกาชนิดอสัณฐานจะไวต่อปฏิกิริยามากกว่าซิลิกาชนิดผลึก เพราะซิลิกาอสัณฐานมีพื้นผิวมากกว่า ส่วนสารละลายกรดจะไม่มีผลต่อซิลิกา ยกเว้นกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาจนได้ H_2SiF_6 ทั้งนี้ซิลิกาในรูปแบบที่ต่างกันจะเกิดปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้ต่างกันขึ้นกับความหนาแน่นเป็นหลัก โดยซิลิกาที่มีความหนาแน่นสูงจะเกิดปฏิกิริยาได้น้อยกว่าซิลิกาที่มีความหนาแน่นต่ำ [30]

2.5.4 การนำไปใช้งาน

(1) ซิลิกา (Silica)

- ซิลิกาเป็นวัตถุดิบสำหรับเป็นส่วนผสมในวัสดุก่อสร้าง

(2) ซิลิกาอสัณฐาน (Silica nanoparticle)

- ใช้เป็นองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา
- ใช้เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นในผลิตภัณฑ์ยาง พลาสติก และพอลิเมอร์
- ใช้เป็นสารเพิ่มแรงยึดติดในผลิตภัณฑ์กาว
- ใช้เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างของแข็งที่แขวนลอยในของเหลว
- ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น จารบี หมึกพิมพ์ สี ยา และเครื่องสำอาง
- ใช้เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ทำให้สารที่ไม่ละลายให้ผสมเข้ากันได้ดี เช่น น้ำกับน้ำมัน
- ใช้เป็นสารป้องกันการเกิดโฟม
- ใช้เป็นสารดูดความชื้น [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lui, S. และคณะ [8] เตรียมไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้จากอนุพันธ์ของพอลิ-แซคคาไรด์ที่ผ่านการดัดแปร คือ ออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนต (OSA) เกิดปฏิกิริยาชิฟเบส (Schiff base reaction) กับอะคริลาไมด์มอนอเมอร์ (AM) เกิดเป็นโครงสร้างคอนจูเกตของ OSA-AM และทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบอนุมูลอิสระเกิดเป็นไฮโดรเจลจากออกซิไดซ์โซเดียมอัลจิเนตพอ-ลิอะคริลาไมด์ (OSA-PAM) ที่มีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ในงานวิจัยจะปรับเปลี่ยนสัดส่วนมวล (Mass ratio) ของ OSA ต่อ AM เป็นสูตรต่าง ๆ คือ OSA-PAM-1 (1:20), OSA-PAM-2 (1:10), OSA-PAM-3 (1:5), OSA-PAM-4 (1:3.3) และ OSA-PAM-5 (1:2.5) พบว่าความแข็งแรงกด (Compression strength) ของไฮโดรเจล สูตร OSA-PAM-2 มีค่าสูงสุดคือ 8.2 MPa ที่ระยะการดึงยืด (Strain%) 94% และค่าความแข็งแรงจะลดลงเมื่อปริมาณ OSA มากขึ้น อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองที่สูงเนื่องจากผลของการมีอันตรกิริยาแบบไดนามิกชิฟเบสและพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของไฮโดรเจล อีกทั้งมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากไอออนอิสระที่มีในโครงสร้างของไฮโดรเจล OSA-PAM

Zhang, H. และคณะ [2] ใช้กระบวนการ Freezing-Thawing ในการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ทำให้โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เป็นผลึกที่มีการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) เป็นโครงร่างตาข่ายได้เป็นไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเอง ในงานวิจัยนี้พบว่าเวลาในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลคือ 10 วินาที ไฮโดรเจลมีความสามารถในการทนต่อแรงดึงได้สูงถึง 10 kPa และเมื่อหลังจาก 48 ชั่วโมง ไฮโดรเจลสามารถคืนตัวกลับมาได้ถึง 72% ของความแข็งแรงดึงเริ่มต้น อย่างไรก็ตามพบว่าพฤติกรรมการซ่อมแซมตนเอง (Healing behavior) ของไฮโดรเจลจะขึ้นกับเวลา (Time-dependent) กล่าวคือเมื่อยืดระยะเวลาในการแยกตัวกันของไฮโดรเจลให้นานขึ้นจะส่งผลให้ไฮโดรเจลสูญเสียความสามารถในการซ่อมแซมตนเอง เนื่องจากเกิดหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ (Free Hydroxyl group) ติดอยู่บนพื้นผิวไฮโดร-เจลส่วนที่ถูกตัดทำให้มีพันธะไฮโดรเจนที่อยู่ภายในสายโซ่โมเลกุลหรือที่อยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองและมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีนั้นจะต้องมีสมดุลระหว่างปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลอิสระบนพื้นผิวไฮโดรเจลที่เพียงพอในการสร้างพันธะไฮโดรเจนและความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่ (Chain mobility) ที่มีการกระจายตัวอยู่ระหว่างรอยต่อของไฮโดรเจลที่เกิดการฉีกขาด

Wen, J Z. และคณะ [4] เตรียมไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองจากโซเดียมคาร์-บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) โดยการแช่สารละลาย Na-CMC เข้มข้นในสารละลายกรดซิตริกเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมไอออน (Na^+) กับโปรตอน (H^+) ซึ่งหมู่คาร์บอกซิเลต ($-COO^-$) ถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอกซิลิก (-COOH) ทำให้ Na-CMC เกิดอันตรกิริยาแบบพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่เป็นไฮโดรเจลและยังเป็นกลไกในการซ่อมแซมตนเอง โดยงานวิจัยนี้พบว่าการแช่สารละลาย Na-CMC เข้มข้นในสารละลายกรดซิตริกเข้มข้น 8 mol/L จะทำให้มีสมบัติเชิงกลสูงแต่

เอกสารนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของไฮโดรเจลจะลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาระยะเวลาการแช่ในกรด พบว่าสัดส่วนการเชื่อมโยง (Cross-linking ratio) ของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการแช่กรดนานขึ้นแต่ความแข็งแรงกด (Compressive strength) ลดลง จากงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีปริมาณสัดส่วนการเชื่อมโยง 50% โดยใช้ระยะเวลาการแช่ในกรดเป็นเวลา 3 ชั่วโมงได้ค่าความแข็งแรงกดสูงที่สุดคือ 2.5 MPa และมีประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูงถึง 81.6% โดยใช้ระยะเวลาในการเชื่อมติดกัน 12 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25°C

Xu, X. และคณะ [9] ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจิเนต (SA) และอะคริลาไมด์ (AAm) โดยมีโครงสร้างการเชื่อมโยงเป็นแบบสองระบบ (Double network) คือพันธะโควาเลนต์และพันธะไอออนิก โดยเสริมแรงด้วยซิลิกาและเปลี่ยนแปลงปริมาณซิลิกาที่ใช้คือ 0, 2.48, 4.96, 7.44, 8.68 และ 9.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt) พบว่าสัดส่วนการบวมตัว (Swelling ratios) ของไฮโดรเจลลดลงเมื่อปริมาณซิลิกาเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีความหนาแน่นการเชื่อมโยง (Crosslink density) เพิ่มขึ้นและไฮโดรเจลที่มีปริมาณซิลิกาเป็น 8.68%wt มีสมบัติเชิงกลที่ดี มีค่าความเค้นแตกหัก (Fracture stress) สูงเป็น 3 เท่าและค่ามอดุลัสสูงเกือบ 7 เท่าเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลที่ไม่มีการใส่ซิลิกา

Wood, A. T. และคณะ [10] เตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จากกระบวนการ Freezing-Thawing เพื่อเป็นวัสดุที่นำไปใช้งานในด้านการแพทย์โดยมีการเสริมแรงไฮโดรเจลด้วยเส้นใยถั่วเหลือง (Soy fiber) ที่เตรียมเป็นผืนโครงเส้นใยไม่ถักทอ (Non-woven microfiber scaffold) ด้วยกระบวนการเตรียมที่เรียกว่า Wet-lay process และพบว่าคอมโพสิตพอลิไวนิลแอลกอฮอล์-เส้นใยถั่วเหลืองนี้มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) เพิ่มขึ้นจาก 0.11 MPa เป็น 0.24 MPa ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นจาก 0.17 kPa เป็น 5.76 kPa เมื่อเทียบกับไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั่วไป อีกทั้งมีค่าความเหนียว (Toughness) และค่าการดึงยืด (Elongation) เพิ่มขึ้นจาก 2.52 MPa เป็น 25.6 MPa และ 51.89% เป็น 111.16% ตามลำดับโดยเปรียบเทียบกับเส้นใยเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าการเสริมแรงด้วยเส้นใยถั่วเหลืองสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลได้

การศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองโดยมีกลไกการซ่อมแซมตนเองแบบเชื่อมโยงทางกายภาพเป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากกลไกการซ่อมแซมตนเองในเชิงเคมีอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษตกค้างอยู่ในวัสดุ เป็นอันตรายต่อร่างกาย [8] อีกทั้งสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลที่มาจากปิโตรเคมี จะก่อให้เกิดมลพิษไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [2] และโดยธรรมชาติของเนื้อเจลในการเตรียมไฮโดรเจลนี้มีความเปราะ ไม่แข็งแรงทนทานต่อการนำไปใช้งานได้ [4] ในงานวิจัยนี้จึงได้เตรียมไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ชีวภาพ คือ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจนและเพิ่มสมบัติความแข็งแรงแก่ไฮโดรเจลด้วยสารเสริมแรง 2 ชนิดคือ ซิลิกาและเส้นใยธรรมชาติ แล้วศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลโดยการทดสอบสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงกลของไฮโดรเจลเพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงเชิงกลของไฮโดรเจลที่เตรียมได้และไฮโดรเจลที่ซ่อมแซมตนเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethylcellulose : Na-CMC) Acros Organics Co.,Ltd. M.W. 90,000, DS=0.7
2. กรดซิตริก (Citric acid) ACS-ISO-For analysis, Assay on dry : 99.5-100.5%
3. โซเดียมเบนโซเอต (Sodium benzoate) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagent Co.,Ltd.
4. เส้นใยสับปะรด (Pineapple leaf Fibers, PALFs) ความยาวเฉลี่ย 0.88 cm (เตรียมโดยทีมวิจัยของ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล)

รูปที่ 3.1 เส้นใยสับปะรด (Pineapple leaf Fibers, PALFs)

5. ฟูมซิลิกา (Fumed silica) เกรดการค้า HL-200 Chemical Village Co.,Ltd.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สมบัติจำเพาะของนาโนซิลิกา [32]

ข้อมูล	HL-200
Specific surface area (BET)	200±20 m^2/g
Particle size	20-30 nm
pH value in 4% dispersion	3.7-4.5
Loss on drying (2h, 105°C)	≤2.0%
Loss on ignition (2h 1000°C, based on material dried for 2 h, 105°C)	≤2.0%
Sieve residue (μm)	≤0.04%
Silica content (Based on ignited material)	≥99.8%
Tamped density (Based on material dried for 2 h, 105°C)	40-60 g/L
Carbon content (Based on material dried for 2 h, 105°C)	≥0.15%

6. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องแก้ว
2. จานเพาะเชื้อ
3. แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด 4×4×4 cm^3

รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด 4×4×4 cm^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด 3×7.8×3 cm^3

รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ซิลิโคน 3×7.8×3 cm^3

5. ไม้บรรทัด
6. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
7. มีดผ่าตัด (Scalpel Blade) เบอร์ 22 Swann Morton Co.,Ltd.
8. โถดูดความชื้น (Desiccator) ความชื้น 80±5% RH
9. ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ Merck Co.,Ltd.
10. เครื่องกวนผสมสารเคมี (Mechanical overhead stirrer) IKA Co.,Ltd.
11. เครื่องกวนสารละลายพร้อมให้ความร้อน (Magnetic Stirrer) IKA Co.,Ltd. รุ่น HS-7
12. เครื่องชั่งแบบอ่านละเอียด Denver Instrument Co.,Ltd. รุ่นSI-234
13. เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier caliper) ยี่ห้อ NAZA
14. ดูโรมิเตอร์แบบชอร์ (Shore durometer) Intro Enterprise Public Co.,Ltd.
15. เครื่องทดสอบแรงดึงแรงกด (Universal Tensile Testing Machine) Lloyd Instruments Co.,Ltd. รุ่น LR5K
16. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น QUANTA250

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

3.3.1 การเตรียมสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 8 M

1. ชั่งกรดซิตริก 153.6 กรัม
2. ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร พร้อมให้ความร้อนและปั่นกวนจนละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล

3.4.1 การเตรียมไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

1. ใส่โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15, 20 หรือ 25 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และปั่นกวนจนละลาย
3. ใส่โซเดียมเบนโซเอต 0.1% ของน้ำหนักสารละลาย และปั่นกวนจนละลาย
4. เทสารละลายที่ได้ลงแม่พิมพ์
5. เติมสารละลายกรดซิตริกปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงในแม่พิมพ์ แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
6. เก็บไฮโดรเจลที่เตรียมได้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH เป็นเวลา 7 วัน ก่อนการทดสอบขั้นต่อไป

3.4.2 การเตรียมไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด

1. เลือกสูตรที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.1
2. ชั่งเส้นใยสับปะรด และโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับเส้นใยสับปะรด

สูตร	องค์ประกอบ	
	Na-CMC (กรัม)	เส้นใยสับปะรด (%)
C15F0.5	15	0.5
C15F1		1
C15F2		2
C15F3		3
C20F0.5	20	0.5
C20F1		1
C20F2		2
C20F3		3

3. กระจายตัวเส้นใยสับปะรดในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
4. ใส่โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส
5. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C และปั่นกวนจนละลาย
6. ใส่โซเดียมเบนโซเอต 0.1% ของน้ำหนักสารละลาย และปั่นกวนจนละลาย
7. เทสารละลายที่ได้ลงแม่พิมพ์
8. เติมสารละลายกรดซิตริกปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงในแม่พิมพ์ แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. เก็บไฮโดรเจลที่เตรียมได้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH เป็นเวลา 7 วัน ก่อนการ ทดสอบขั้นต่อไป

3.4.3 การเตรียมไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา

1. เลือกสูตรที่เหมาะสมจากข้อ 3.4.1
2. ชั่งโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และฟูมซิลิกา ตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบของไฮโดรเจลระหว่างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับฟูมซิลิกา

สูตร	องค์ประกอบ	
	Na-CMC (กรัม)	Fumed silica (%)
C15S5	15	5
C15S15		15
C15S25		25
C20S5	20	5
C20S15		15
C20S25		25

3. ใส่โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ทีอุณหภูมิ 90°C และปั่นกวนจนละลาย
4. ใส่ฟูมซิลิกา และปั่นกวนจนกระจายตัวดี
5. ใส่โซเดียมเบนโซเอต 0.1% ของน้ำหนักสารละลาย และปั่นกวนจนละลาย
6. เทสารละลายที่ได้ลงแม่พิมพ์
7. เติมสารละลายกรดซิตริกปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงในแม่พิมพ์ แช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
8. เก็บไฮโดรเจลที่เตรียมได้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH เป็นเวลา 7 วัน ก่อนการทดสอบขั้นต่อไป

3.5 การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ

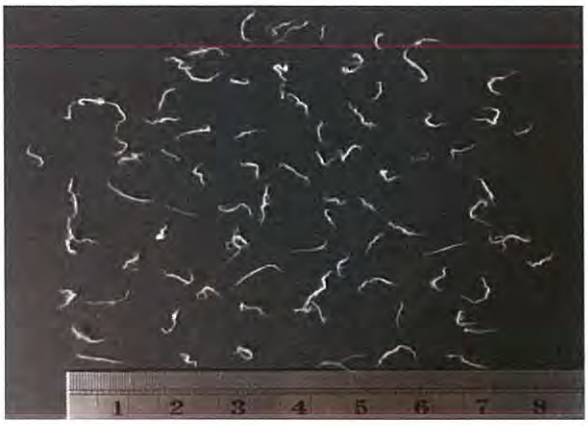
3.5.1 ขนาดและน้ำหนักของไฮโดรเจล

ชั่งน้ำหนัก และวัดขนาดของไฮโดรเจลโดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ 5 ตำแหน่ง และหาค่าเฉลี่ย

3.5.2 ความยาวของเส้นใย

วัดความยาวของเส้นใยอย่างน้อย 10 ตัวอย่าง โดยใช้ไม้บรรทัด และหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 เส้นใยสับปะรด

3.5.3 สัญฐานวิทยาของไฮโดรเจล (Morphology)

การศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยสับปะรด และฟูมซิลิกา ตรวจชิ้นงานขนาด 0.5×0.5×0.5 cm^3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ดังนี้

1. สูตรเส้นใยสับปะรด
   โหมด : Low vacuum
   กำลังขยาย : 100x
2. สูตรฟูมซิลิกา
   โหมด : ESEM
   กำลังขยาย : 500x

3.5.4 การทดสอบหาปริมาณน้ำ (Water content) และปริมาณของแข็ง (Solid content) ในไฮโดรเจล

1. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล 3 กรัม จำนวน 3 ตัวอย่างและบันทึกน้ำหนักที่แน่นอน
2. นำไฮโดรเจลไปอบที่อุณหภูมิ 90°C เป็นระยะเวลา 1 วัน แล้วชั่งน้ำหนักไฮโดรเจลหลังอบ
3. ทำซ้ำข้อ 2 จนน้ำหนักไฮโดรเจลคงที่
4. คำนวณหาปริมาณน้ำ (Water content) และปริมาณของแข็ง (Solid content) ใช้สูตรดังนี้

$$\text{Water content (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบ - น้ำหนักไฮโดรเจลหลังอบ}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบ}} \times 100$$

Solid content (%) = 100 – ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 การทดสอบความแข็งที่พื้นผิว (Hardness)

ทดสอบความแข็งที่พื้นผิวของชิ้นงานไฮโดรเจลที่เก็บในโถดูดความชื้น 80±5% RH เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน โดยใช้ดูโรมิเตอร์แบบชอร์ ทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง ดังนี้

ขนาดชิ้นงาน : 2×2×1 cm^3

ชนิดหัวกด : shore oo

น้ำหนักกด : 400 กรัม

จำนวนชิ้นงาน : 10 ชิ้น

3.5.6 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลที่เก็บในโถดูดความชื้น 80±5% RH เป็นเวลาอย่างน้อย 7 วัน โดยใช้ Universal Testing Machine ทำการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง ดังนี้

1) ทดสอบความแข็งแรงกดอัด [4]

ขนาดชิ้นงาน : 2×2×1 cm^3

อัตราเร็วในการกดอัด : 5 mm/min

Load cell : 100 N

จำนวนชิ้นงาน : 8 ชิ้น

ระยะกดชิ้นงาน : 30% ของความสูงชิ้นงาน

คำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{ความเค้นแรงกด (Compressive Stress)} = \frac{F}{A}$$

$$\text{มอดุลัสกดอัด (Compressive modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}}$$

เมื่อ F = แรงที่กดอัดชิ้นงาน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

2) ทดสอบความแข็งแรงดึง

ขนาดชิ้นงาน : 3×7.8×0.4 cm^3

อัตราเร็วในการดึง : 30 mm/min

Gauge length : 30 mm

Load cell : 100 N

จำนวนชิ้นงาน : 8 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{ความเค้นแรงดึง (Tensile Strength)} = \frac{F_{max}}{A}$$

$$\text{มอดุลัสของยัง (Young's modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}}$$

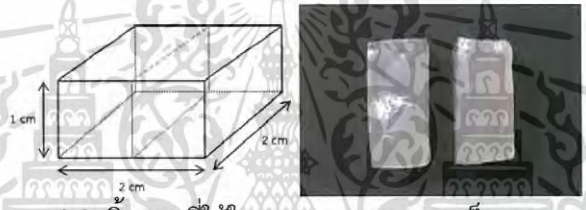
เมื่อ F = แรงสูงสุดที่ดึงชิ้นงาน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

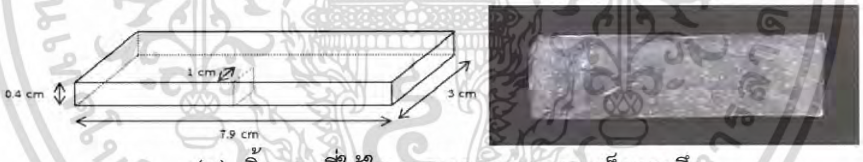
หมายเหตุ : การทดสอบความแข็งแรงกดใช้ชิ้นงานที่ตัดขาดออกเป็นสองส่วน และการทดสอบความแข็งแรงดึงใช้ชิ้นงานที่ตัด 1/3 ของความกว้างชิ้นงาน

3.5.7 การทดสอบการซ่อมแซมตนเอง

1. ตัดชิ้นงานขนาด 2×2×1 cm^3 ออกเป็นสองส่วน ดังรูปที่ 3.5 (ก) และตัดชิ้นงานขนาด 3×7.8×0.4 cm^3 เป็นระยะ 1/3 ของความกว้างชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.5 (ข)



(ก) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกด



(ข) ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง

รูปที่ 3.5 ไฮโดรเจลที่ถูกตัด

2. นำมาติดเข้าด้วยกัน เก็บที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH เป็นระยะเวลา 7 วัน
3. ตรวจสอบร่องรอยการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลโดยการถ่ายภาพ
4. นำชิ้นงานที่เก็บไว้ 7 วัน ไปทดสอบสมบัติเชิงกลตามข้อ 3.5.6
5. คำนวณประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองโดยใช้สูตรดังนี้ [4] (คำนวณจากผลการทดสอบความแข็งแรงกด)

$$\text{ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (Healing efficiency: HE)} = \left(\frac{Sr}{Sp}\right) \times 100$$

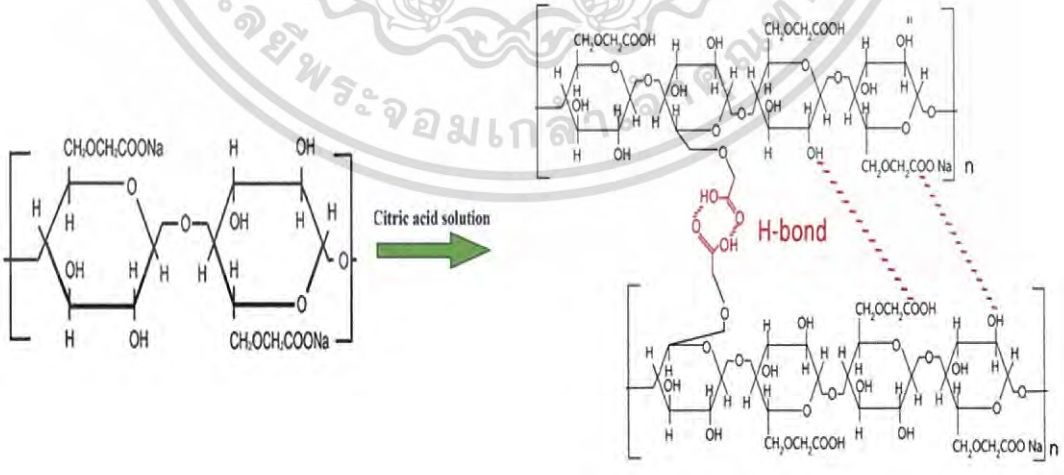
Sr = ความเค้นชิ้นงานที่ซ่อมแซมตนเองแล้ว (Healing stress)

Sp = ความเค้นชิ้นงานที่ไม่ได้ตัด (Original stress)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงงานพิเศษนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลที่มีสมบัติการซ่อมแซมตนเองจากโซเดียมคาร์บอก-ซีเมทิลเซลลูโลส (C) และเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด (F) หรือฟูมซิลิกา (Si) โดยการเตรียมโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสัดส่วนเท่ากับ 15 (C15) และ 20 (C20) ในน้ำ 100 มิลลิลิตร ในแต่ละสัดส่วนของ C15 และ C20 จะเปลี่ยนแปลงปริมาณการใส่ส่วนเสริมแรง คือ ส่วนของเส้นใยสับปะรดเท่ากับ 0.5 (F0.5) , 1 (F1) , 2 (F2) และ 3 (F3) เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส และส่วนของฟูมซิลิกา เท่ากับ 5 (Si5) , 15 (Si15) และ 25 (Si25) เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสแล้วแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 8 M ระยะเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่ง CMC ในไฮโดรเจลอยู่ในรูปของ Carboxylate (-COO$^-$) จะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Counter ion ของ Carboxylate กับโปรตอนของกรดซิตริกเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่งสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิลหรือหมู่คาร์บอกซิลิกภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นไฮโดรเจลโครงร่างตาข่ายกลไกแสดงดังรูปที่ 4.1 จากนั้นนำไฮโดรเจลที่ได้รูปร่างตามที่ต้องการมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจลได้แก่ วัดขนาดและชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล หาค่าปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจล (%Solid content) ค่าปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไฮโดรเจล (%Water content) และประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์สูตรต่าง ๆ ของไฮโดรเจลที่ได้เป็นดังนี้ C15, C20, C15F0.5, C15F1, C15F2, C15F3, C20F0.5, C20F1, C20F2, C20F3, C15Si5, C15Si15, C15Si25, C20Si5, C20Si15 และ C20Si25



รูปที่ 4.1 โครงสร้าง CMC ไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายกรดซิตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจล

4.1.1 รูปร่างของชิ้นงาน

ไฮโดรเจลทุกสูตรที่เตรียมได้มีรูปร่างตามแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปซึ่งในโครงงานพิเศษนี้เตรียมไฮโดรเจลโดยมีรูปร่างเป็น 2 รูปแบบเพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.2

(ก) รูปร่างชิ้นงานในการทดสอบความแข็งแรงกดและความแข็งที่พื้นผิว

(ข) รูปร่างชิ้นงานในการทดสอบความแข็งแรงดึง

รูปที่ 4.2 รูปร่างของชิ้นงานไฮโดรเจลทุกสูตรที่เตรียมได้

ไฮโดรเจลทุกสูตรที่เตรียมเป็นชิ้นงานในการทดสอบความแข็งแรงกดและความแข็งที่พื้นผิวจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 2×2×1 cm^3 และไฮโดรเจลทุกสูตรที่เตรียมเป็นชิ้นงานในการทดสอบความแข็งแรงดึงจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3×7.8×0.4 cm^3

4.1.2 น้ำหนัก ขนาดและความหนาแน่นของไฮโดรเจล

ชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของไฮโดรเจลทุกสูตรภายหลังจากการแช่กรด 3 ชั่วโมงแล้วนำไปเก็บไว้ภายใต้การควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 80±5% RH เป็นระยะเวลา 7 วัน โดยแสดงดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างน้ำหนัก ขนาด และความหนาแน่นของไฮโดรเจล

สูตร	ก่อน 7 วัน				
	น้ำหนัก (g)	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	ความหนาแน่น (g/cm^3)
C15F0.5	4.2	20.2	21.1	10.3	0.01
C15F1	4.3	19.6	20.9	10.1	0.01
C15F2	4.6	19.9	20.7	10.4	0.01
สูตร	หลัง 7 วัน				
C15F0.5	4.1	19.8	20.0	9.4	0.01
C15F1	4.0	19.6	21.0	9.4	0.01
C15F2	4.1	19.7	20.0	9.4	0.01

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลของขนาด น้ำหนัก และความหนาแน่นของชิ้นงานไฮโดรเจลที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกดโดยยกตัวอย่างไฮโดรเจลสูตร C15F0.5, C15F1 และ C15F2 มาชั่งน้ำหนักและวัดขนาดของไฮโดรเจลก่อนเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH และหลังเก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH เป็นระยะเวลา 7 วัน พบว่าไฮโดรเจลที่ได้จะมีขนาดและน้ำหนักลดลงเมื่อระยะเวลาในการเก็บไว้ภายใต้การควบคุมสภาวะที่ยาวนานขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจลเกิดการระเหยน้ำออกไปทำให้สูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างไฮโดรเจลจึงมีขนาดและน้ำหนักลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป โดยมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.01 g/cm^3 น้ำหนัก ขนาด และความหนาแน่นของไฮโดรเจลทุกสูตรแสดงไว้ในภาคผนวก ก

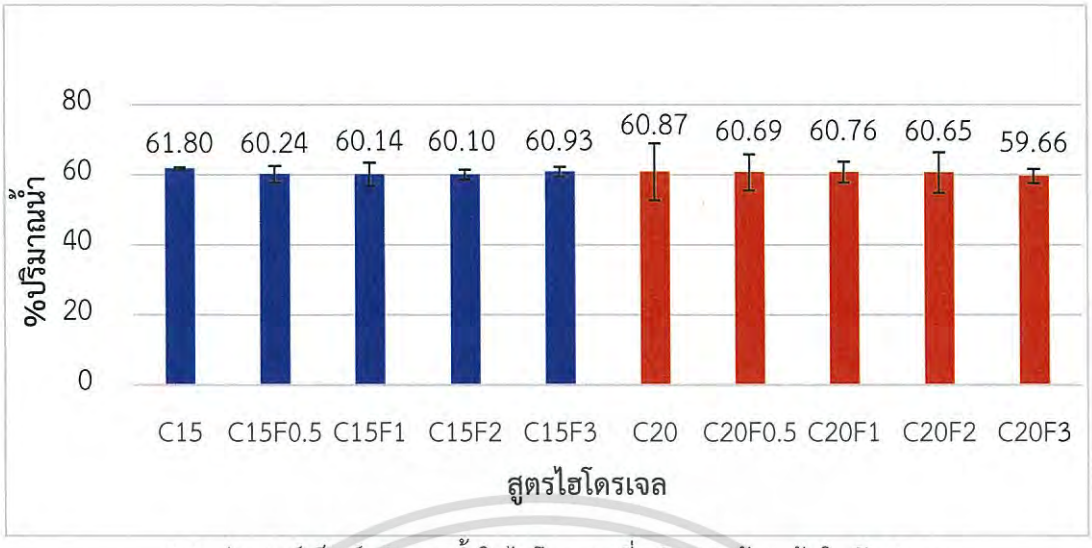
4.1.3 ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไฮโดรเจล (Water content)

ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไฮโดรเจลสามารถหาได้โดยนำไฮโดรเจลทุกสูตรที่เตรียมไว้ ไปชั่งน้ำหนักและบันทึกผลเป็นน้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบจากนั้นนำไฮโดรเจลไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 90°C จนได้น้ำหนักของไฮโดรเจลคงที่และบันทึกผลเป็นน้ำหนักไฮโดรเจลหลังอบ โดยคำนวณหาปริมาณน้ำในไฮโดรเจลจากสูตรดังนี้

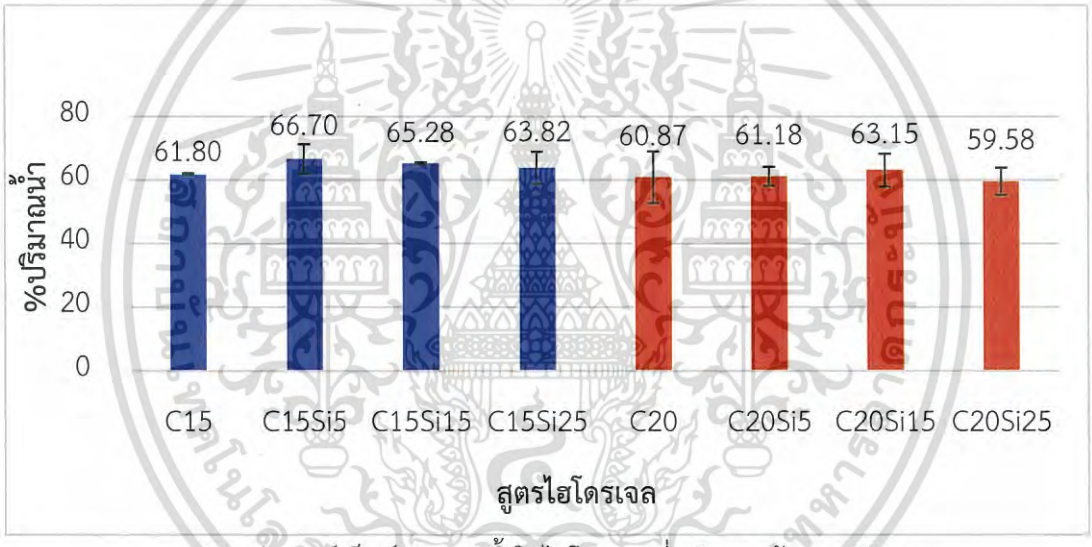
$$\text{Water content (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบ - น้ำหนักไฮโดรเจลหลังอบ}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลก่อนอบ}} \times 100$$

ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในไฮโดรเจลแสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด



(ข) ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา

รูปที่ 4.3 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลทุกสูตร โดยพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 60-67% โดยปริมาณ CMC เส้นใยสับปะรด และฟูมซิลิกา ไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีการเก็บตัวอย่างไฮโดรเจลไว้ในสภาวะควบคุมเดียวกัน

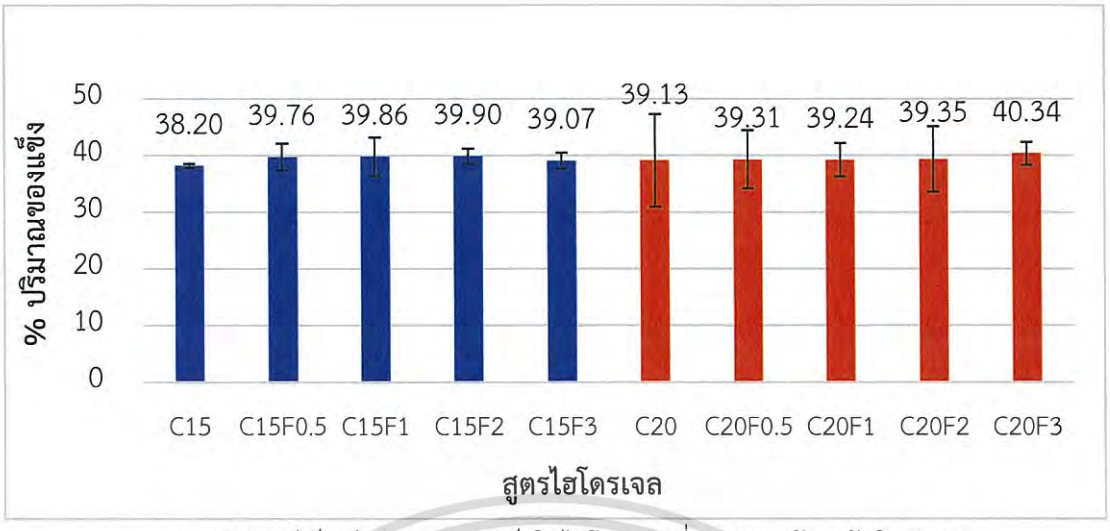
4.1.4 ปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจล (Solid content)

ปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจลทุกสูตรสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรดังนี้

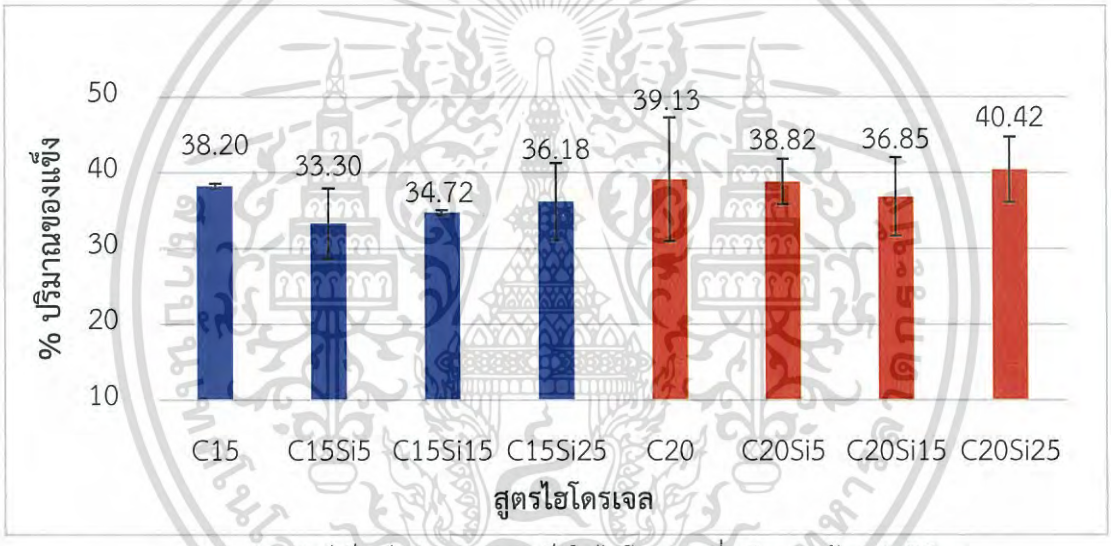
Solid content (%) = 100 – ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (%)

ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลแสดงดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด



(ข) ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา

รูปที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลทุกสูตรซึ่งพบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 33-40% โดยปริมาณ CMC เส้นใยสับปะรด และฟูมซิลิกาไม่ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับข้อมูลของเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล

การศึกษาการกระจายตัวของส่วนเสริมแรงทั้งสองชนิดคือเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกาจากภาคตัดขวางของไฮโดรเจลทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยไฮโดรเจลสูตรที่เลือกมาศึกษาสัณฐานวิทยาเป็นสูตรที่มีปริมาณความเข้มข้นของ CMC สูงสุด (C20)

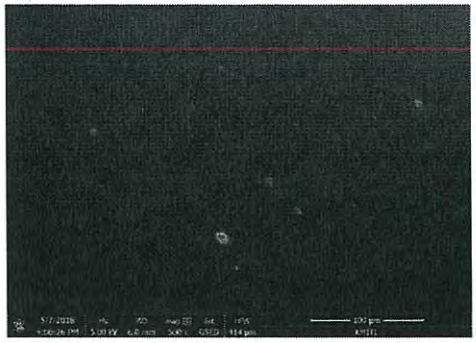
ไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดได้แก่สูตร C20F0.5, C20F1, C20F2 และ C20F3 ทดสอบที่กำลังขยาย 100 เท่า ใช้โหมดทดสอบ Low vacuum แสดงดังรูปที่ 4.5 และ ไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกาได้แก่สูตร C20Si5, C20Si15 และ C20Si25 ทดสอบที่กำลังขยาย 500 เท่า ใช้โหมดทดสอบ ESEM แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าส่วนเสริมแรงชนิดเส้นใยมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในเนื้อไฮโดรเจลมากกว่าการใช้สารเสริมแรงชนิดฟูมซิลิกา อย่างไรก็ตามภาพจากกล้อง SEM ยังคงพบว่ามีส่วนเสริมแรงบางส่วนโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีของฟูมซิลิกาเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน (Agglomerate) เนื่องจาก CMC มีความหนืดสูงทำให้สารเสริมแรงเคลื่อนที่ได้ยากจึงเป็นข้อจำกัดในการกระจายตัวของสารเสริมแรงในไฮโดรเจล

(ก) C20F0.5 (ข) C20F1

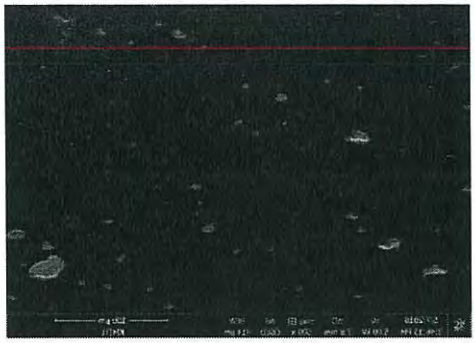
(ค) C20F2 (ง) C20F3

รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด

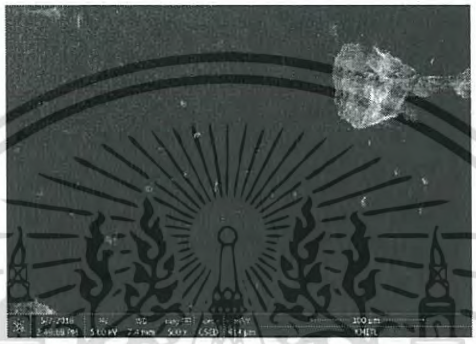
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) C20Si5



(ข) C20Si15



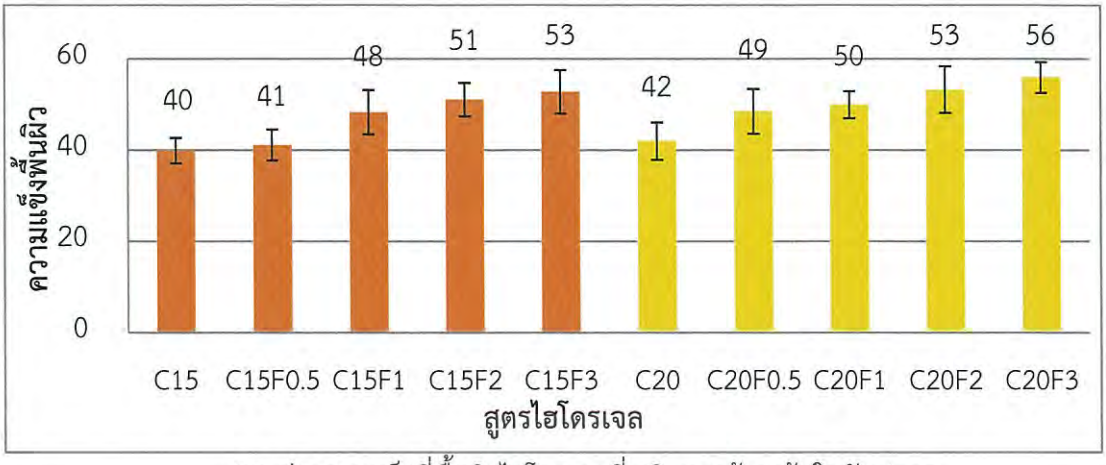
(ค) C20Si25

รูปที่ 4.6 ภาพตัดขวางของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา

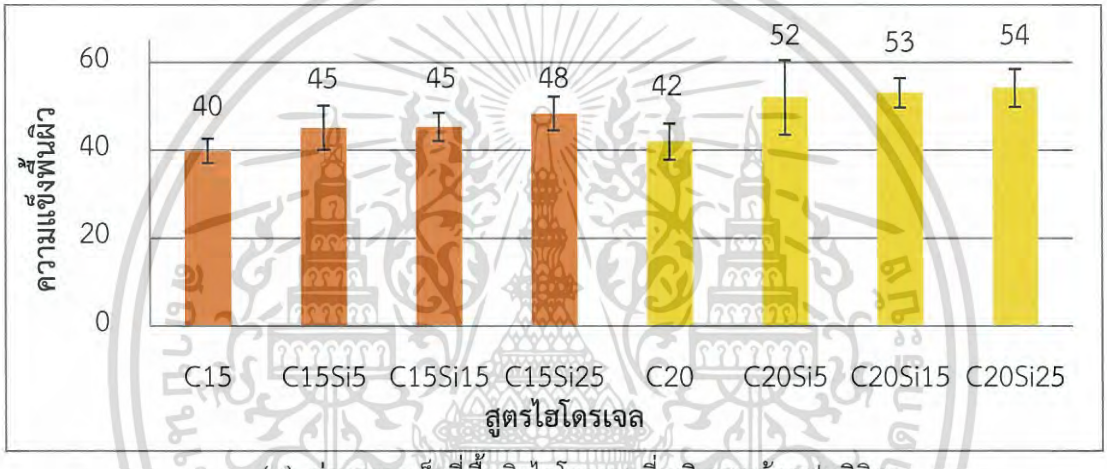
4.3 ความแข็งที่พื้นผิว (Hardness)

ไฮโดรเจลทุกสูตรที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกาจะถูกเก็บไว้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH เป็นระยะเวลา 7 วันก่อนนำมาทดสอบความแข็งที่พื้นผิวด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์ โดยใช้หัวกด Shore OO น้ำหนักกด 400 กรัม ตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ได้ค่าความแข็งที่พื้นผิวไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่าความแข็งที่พื้นผิวไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด



(ข) ค่าความแข็งที่พื้นผิวไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา

รูปที่ 4.7 ค่าความแข็งที่พื้นผิวไฮโดรเจล

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งที่พื้นผิวไฮโดรเจลทุกสูตรโดยพบว่าไฮโดรเจลที่มีการใส่สารเสริมแรงมีแนวโน้มของค่าความแข็งที่พื้นผิวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มีการใส่สารเสริมแรง เมื่อพิจารณาปริมาณของสารเสริมแรงพบว่าปริมาณของสารเสริมแรงที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งที่พื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ และการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ CMC ส่งผลให้ค่าความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลสูงขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ CMC และ/หรือสารเสริมแรงเป็นการเพิ่มเนื้อของแข็งในไฮโดรเจลจึงมีผลให้แนวโน้มของค่าความแข็งที่พื้นผิวไฮโดรเจลมีค่าเพิ่มขึ้น โดยไฮโดรเจลที่มีการใส่สารเสริมแรงชนิดฟูมซิลิกาควรมีค่าความแข็งที่พื้นผิวสูงกว่าไฮโดรเจลที่มีการใส่สารเสริมแรงชนิดเส้นใยสับปะรดเนื่องจากมีการใส่สารเสริมแรงชนิดฟูมซิลิกาปริมาณมากกว่าเมื่อเทียบกับสารเสริมแรงชนิดเส้นใยสับปะรด แต่พบว่าค่าความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลที่มีการใส่สารเสริมแรงชนิดฟูมซิลิกา (40-54) มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกับค่าความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลที่มีการใส่สารเสริมแรงชนิดเส้นใยสับปะรด (40-57) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากไฮโดรเจลที่มีการใส่สารเสริมแรงชนิด

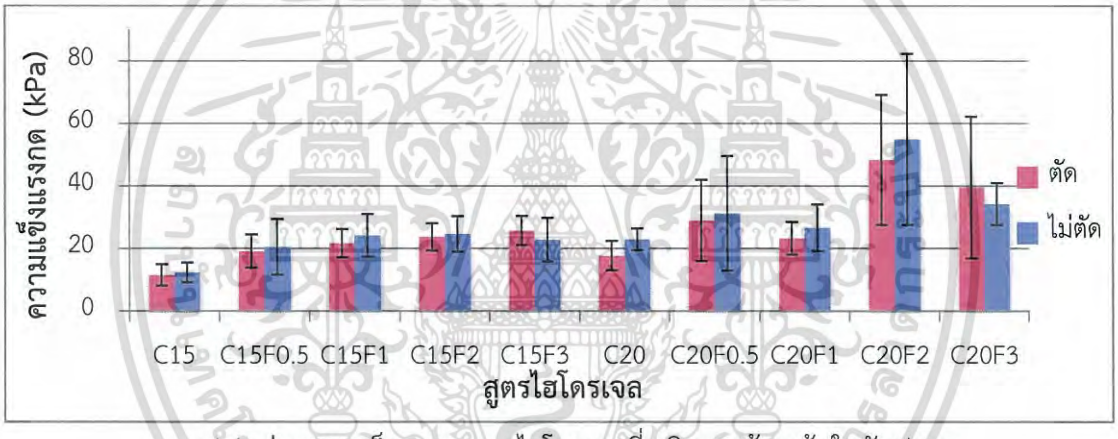
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟูมซิลิกามีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอและมีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนซึ่งสามารถแสดงการกระจายตัวได้จากรูปที่ 4.6 จึงทำให้ค่าความแข็งที่พื้นผิวไม่สูงเท่าที่ควร

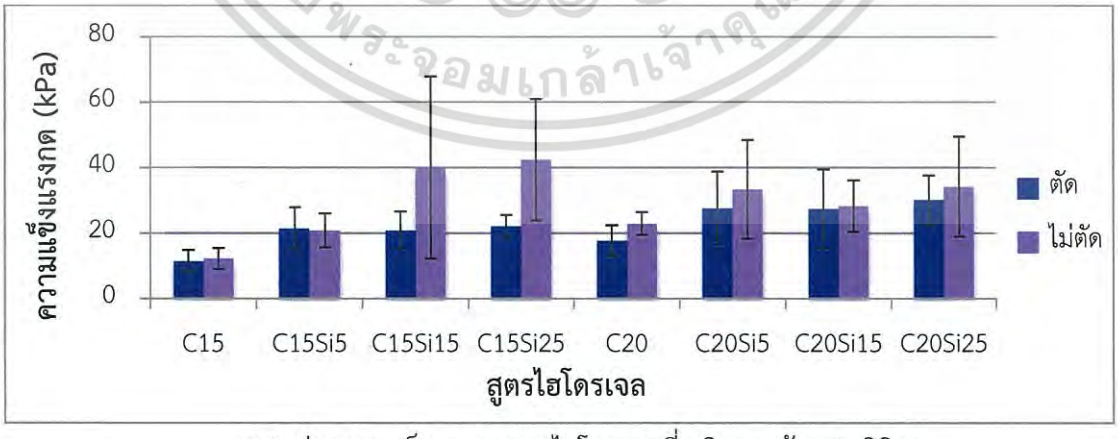
4.4 ความแข็งแรงกด (Compressive stress)

ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลเพื่อศึกษาถึงปัจจัยของส่วนเสริมแรงสองชนิดที่มีผลต่อความแข็งแรงในการเตรียมไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองได้ โดยจะแบ่งชิ้นงานออกเป็นสองแบบคือชิ้นงานที่ไม่ตัดและชิ้นงานที่ตัดขาดโดยไฮโดรเจลทุกสูตรจะเก็บไว้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH เป็นระยะเวลา 7 วันก่อนนำมาทดสอบความแข็งแรงกด

สภาวะในการทดสอบความแข็งแรงกดใช้ระยะการกด 30% Strain อัตราเร็วในการกด 5 mm/min ขนาดของ Load cell 100 N จากเครื่องทดสอบ Universal testing machine แสดงค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลทุกสูตร ดังรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



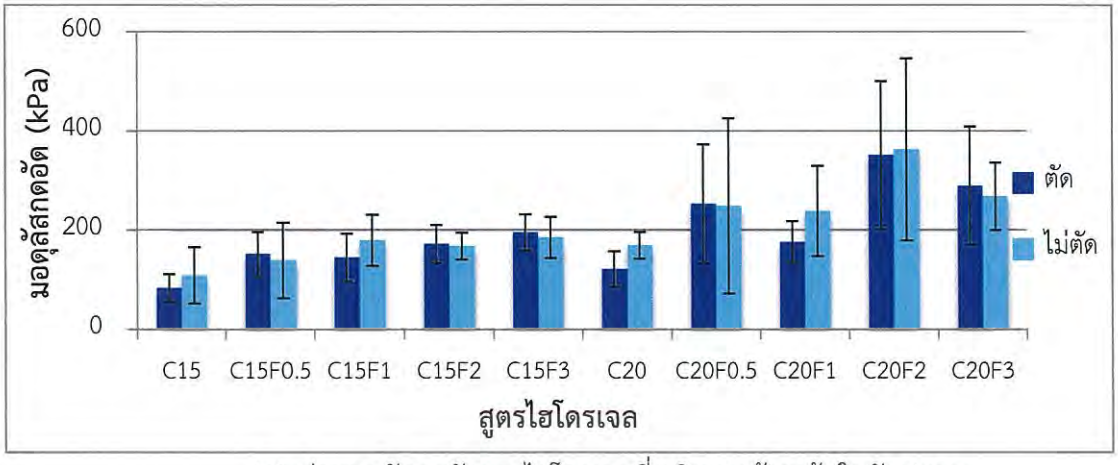
(ก) ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด



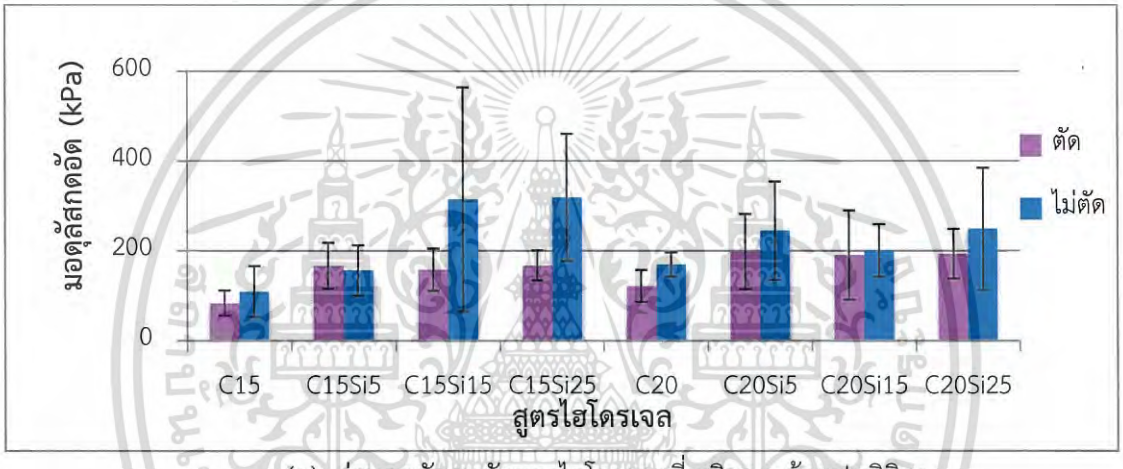
(ข) ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา

รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด



(ข) ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา

รูปที่ 4.9 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา

จากรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดที่ 30% Strain ของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกาตามลำดับ ในสัดส่วนของ CMC ต่อส่วนเสริมแรงที่แตกต่างกันพบว่าค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมส่วนเสริมแรงแต่การเพิ่มปริมาณสัดส่วนของส่วนเสริมแรงไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของไฮโดรเจลอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ปริมาณความเข้มข้นของ CMC ที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มของความแข็งแรงของไฮโดรเจลที่สูงขึ้นโดยชิ้นงานที่ตัดขาดของไฮโดรเจลสูตรที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดมีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 19-48 kPa และ 145-352 kPa ชิ้นงานที่ไม่ตัดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 20-55 kPa และ 139-363 kPa ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่ตัดขาดของไฮโดรเจลสูตรที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกามีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 21-30 kPa และ 158-199 kPa ชิ้นงานที่ไม่ตัดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 21-42 kPa และ 157-319 kPa ตามลำดับ จากกราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงกดและมอดุลัสกดอัดของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจลทั้งแบบที่ตัดขาดและไม่ตัดแสดงให้เห็นว่าการตัดขาดหรือไม่ตัดของชิ้นงานไฮโดรเจลไม่ส่งผลต่อความแตกต่างของค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสกดอัดอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสของไฮโดรเจลมีค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงกว้างและไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่ควรจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณสารเสริมแรง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเกิดฟองอากาศในชิ้นงานไฮโดรเจล ซึ่งเกิดจากการใช้สารละลาย CMC ความเข้มข้นสูงส่งผลให้ความหนืดสูงและไม่สามารถไล่ฟองอากาศออกไปได้หมด ทำให้ฟองอากาศที่เกิดขึ้นเป็นจุดตำหนิของชิ้นงานไฮโดรเจล ดังนั้นเมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงกด ฟองอากาศที่กระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในไฮโดรเจลจะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสของไฮโดรเจลต่ำกว่าที่ควรจะเป็น นอกจากนี้ความชื้นของชิ้นงานไฮโดรเจลที่ไม่เท่ากันในแต่ละชิ้นงานส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสของไฮโดรเจล โดยหากชิ้นงานไฮโดรเจลดูดความชื้นเข้าไปมากจะส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสของไฮโดรเจลต่ำกว่าชิ้นงานที่ดูดความชื้นน้อยกว่า ดังนั้นในแต่ละสูตรไฮโดรเจลจึงมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงกว้าง

4.5 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล (Healing efficiency)

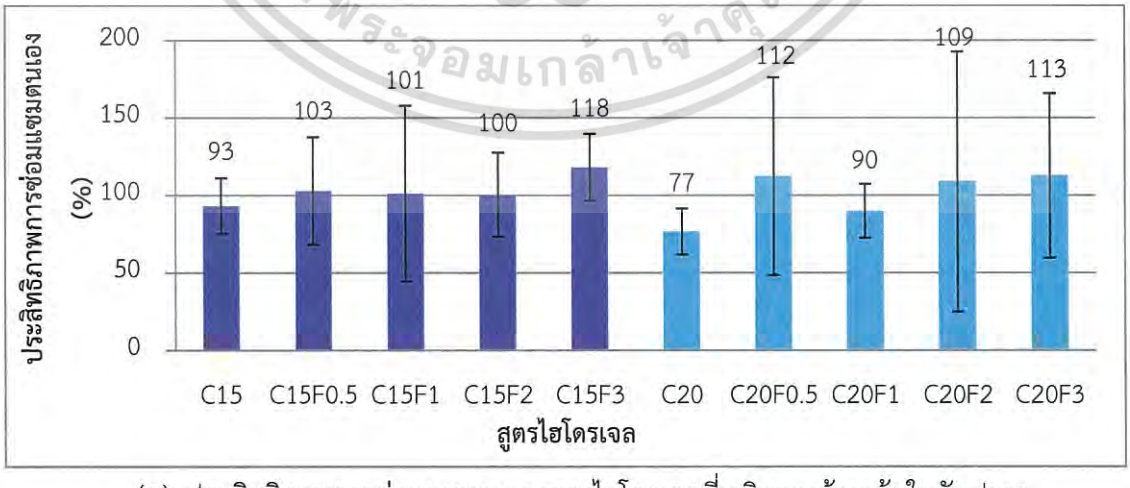
จากข้อมูลจากรูปที่ 4.8 นำมาคำนวณประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลโดยอ้างอิงจากงานวิจัย [4] จากสูตรดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (Healing efficiency: HE)} = \left(\frac{Sr}{Sp}\right) \times 100$$

Sr = ความเค้นชิ้นงานที่ซ่อมแซมตนเองแล้ว (Healing stress)

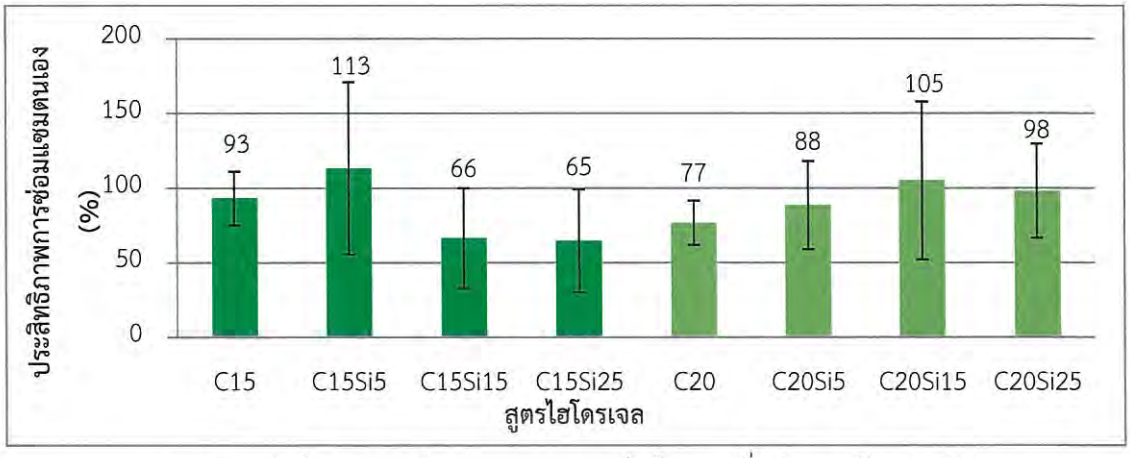
Sp = ความเค้นชิ้นงานที่ไม่ได้ตัด (Original stress)

ผลของประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.10



(ก) ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกา

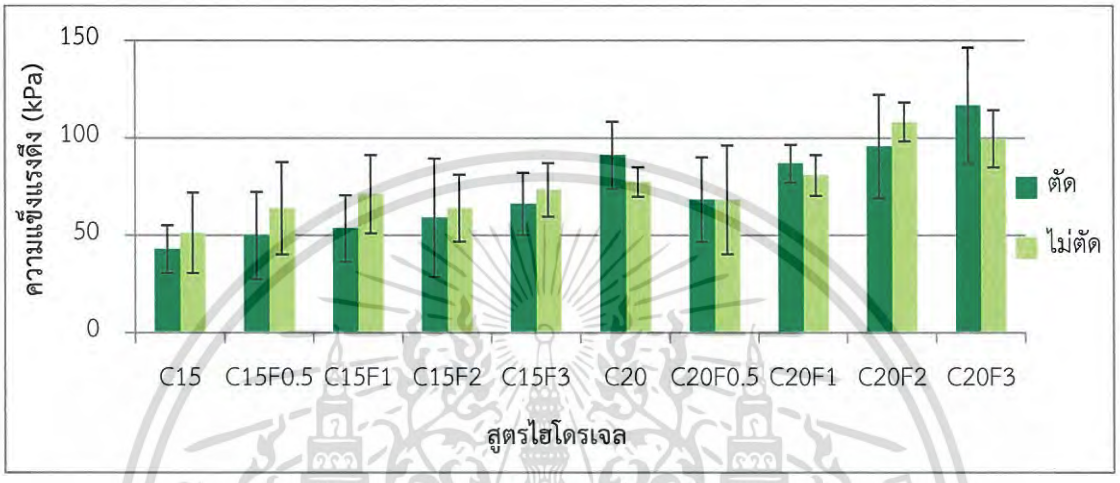
รูปที่ 4.10 ค่าประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกาพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล (%HE) ที่ได้ในบางสูตรมีค่าสูงเกิน 100% ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าชิ้นงานไฮโดรเจลที่ตัดขาดแล้วเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับสภาพแวดล้อมภายนอกเมื่อนำมาเก็บไว้ภายใต้สภาวะและระยะเวลาที่กำหนดอาจเกิดการระเหยของน้ำออกไปจากโครงสร้างได้มากขึ้นจึงทำให้ชิ้นงานแข็งขึ้นและมีขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลงส่งผลให้ชิ้นงานที่ตัดขาดมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงานไฮโดรเจลที่ไม่ได้ตัด เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของ CMC พบว่ากรณีที่ไม่มีสารเสริมแรง ปริมาณ CMC ในไฮโดรเจลที่เพิ่มขึ้น (C20) ส่งผลให้ค่า %HE ลดลงเมื่อเทียบกับสูตร C15 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดพบว่าไฮโดรเจลที่มีเส้นใยเป็นส่วนเสริมแรงไม่ส่งผลต่อการลดลงของค่า %HE แสดงถึงสารเสริมแรงประเภทเส้นใยสับปะรดไม่ได้ขัดขวางการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลและอาจช่วยเสริมให้การซ่อมแซมตนเองมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากพบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีเส้นใยสับปะรดเป็นสารเสริมแรงมีค่า %HE สูงขึ้นในระดับ100% ในกรณีของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิ-ลิกาพบว่าการเติมฟูมซิลิกาในปริมาณที่มากอาจส่งผลต่อการลดลงของประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองเนื่องจากพบว่า C15Si15 และ C15Si25 มีค่า %HE ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับสูตร C15Si5 อย่างไรก็ตามผลของ C20Si15 และ C20Si25 ไม่ได้มีแนวโน้มในทางเดียวกัน อาจเป็นเพราะสูตร C20Si5, C20Si15 และ C20Si25 มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่กว้างเป็นผลมาจากฟองอากาศที่กระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอในชิ้นงานไฮโดรเจลที่ไม่ตัดและชิ้นที่ตัดขาด ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่ได้ เมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล จึงส่งผลให้ค่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่กว้าง แม้จะมีการเก็บชิ้นงานไฮโดรเจลไว้ในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน

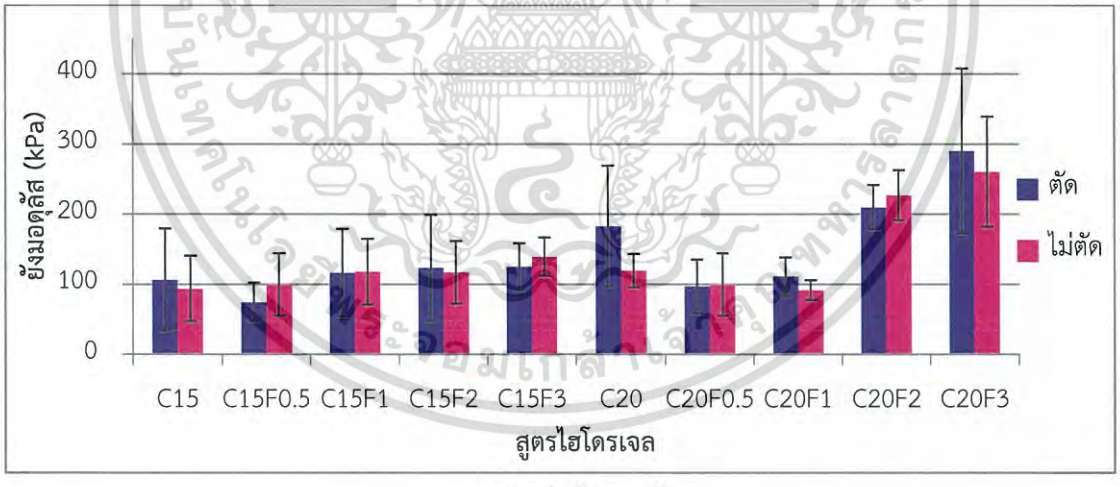
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ความแข็งแรงดึง (Tensile strength)

ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้นี้เป็นข้อมูลที่ช่วยสนับสนุนผลของค่าความแข็งแรงกดในการศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลโดยสภาวะที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึงคืออัตราเร็วในการดึง 30 mm/min น้ำหนัก Load cell 100 N แสดงค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่ายังมอดุลัส (Young's modulus) ของไฮโดรเจลสูตรที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดดังรูปที่ 4.11



(ก) ค่าความแข็งแรงดึง



(ข) ค่ายังมอดุลัส

รูปที่ 4.11 สมบัติความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดพบว่าชิ้นงานที่ตัดของไฮโดรเจลมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสเฉลี่ยอยู่ในช่วง 50-117 kPa และ 74-290 kPa ส่วนชิ้นงานที่ไม่ตัดมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 64-108 kPa และ 91-261 kPa ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวของชิ้นงานที่มีการตัดและไม่ตัดก่อนการทดสอบมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นัยสำคัญแสดงถึงประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองที่ดี อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงของไฮโดรเจลที่ได้นี้มีค่าต่ำกว่าที่ควรจะเป็น เนื่องจากในการทดสอบขณะดึงชิ้นงานตำแหน่งขาดของชิ้นงานไม่ได้ขาดตรงตำแหน่งของรอยตัดแต่ขาดตรงตำแหน่งของจุดที่จับชิ้นงาน (จุดที่ Gib จับ) ซึ่งเป็นจุดที่อ่อนแอ (Weak point) ของชิ้นงานในการทดสอบทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นเมื่อพิจารณาความแม่นยำของค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสที่ได้นั้น กล่าวได้ว่าค่ายังมอดุลัสมีความน่าเชื่อถือมากกว่า เนื่องจากค่าที่ได้เป็นการวัดค่าก่อนเกิดการขาดของชิ้นงาน เมื่อพิจารณาผลของค่าตัวแปรปริมาณของ CMC และปริมาณของเส้นใยสับปะรด พบว่าปริมาณ CMC และปริมาณเส้นใยสับปะรดที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสเพิ่มขึ้นโดยไฮโดรเจลสูตร C20F3 มีความแข็งแรงดึง และมอดุลัสสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 99.63 kPa และ 260.73 kPa ตามลำดับในกรณีที่ไม่ตัดชิ้นงาน และมีค่าเท่ากับ 116.77 kPa และ 290.13 kPa ตามลำดับในกรณีที่ตัดชิ้นงาน เนื่องจากความเข้มข้นของ CMC ที่สูงจะมีความหนืดสูงทำให้เมื่อมีการกระจายตัวของเส้นใยแล้วเกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อน (Agglomerate) ของเส้นใยได้ยากขึ้น ไฮโดรเจลที่ได้จึงมีความแข็งแรงสูงซึ่งสอดคล้องกับผลของ SEM (รูปที่ 4.5) ที่พบว่าไฮโดรเจลสูตรที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดมีการกระจายตัวที่ดี อย่างไรก็ตามในการทดสอบความแข็งแรงดึง พบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสของชิ้นงานไฮโดรเจลทุกสูตรยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงกว้าง เนื่องจากผลของฟองอากาศในไฮโดรเจลและความชื้นที่ไม่เท่ากันในแต่ละชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงงานพิเศษนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรด (F) หรือฟูมซิลิกา (Si) โดยแช่ในสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 8 โมลาร์เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันจากคาร์บอกซิเลต ($-COO^-$) เป็นคาร์บอกซิลิก (-COOH) ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนที่ใช้ในการเชื่อมโยงกันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลโดยมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นของ CMC และปริมาณของส่วนเสริมแรงทั้งสองชนิดโดยเก็บไว้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80±5% RH เป็นระยะเวลา 7 วันก่อนนำมาตรวจสอบสัณฐานวิทยา หาค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็ง และปริมาณน้ำในไฮโดรเจลรวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองและสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลคอมโพสิต

โดยมีข้อสรุปดังนี้

1. รูปร่างของไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีรูปร่างตามรูปแบบของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานลดลงเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการเก็บไฮโดรเจลภายใต้สภาวะการควบคุมนานขึ้น

2. ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลทุกสูตรที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกามีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 60-67% และ 33-40% ตามลำดับ โดยปริมาณ CMC เส้นใยสับปะรดและฟูมซิลิกาไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งอย่างมีนัยสำคัญ

3. ส่วนเสริมแรงทั้งสองชนิดที่ใช้ในการเสริมแรงไฮโดรเจลมีบางส่วนที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอในเนื้อไฮโดรเจลและมีบางส่วนที่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อน (Agglomerate) โดยเส้นใยสับปะรดมีการกระจายตัวได้ดีกว่าฟูมซิลิกา

4. ค่าความแข็งที่พื้นผิวไฮโดรเจลทุกสูตรพบว่าไฮโดรเจลที่มีปริมาณการใส่สารเสริมแรงเพิ่มขึ้นจะมีค่าความแข็งที่พื้นผิวเพิ่มขึ้นและเมื่อปริมาณความเข้มข้นของ CMC สูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลสูงขึ้นด้วย ไฮโดรเจลสูตร C20F3 และ C20Si25 เป็นสูตรที่มีความแข็งที่พื้นผิวสูงสุด

5. ไฮโดรเจลที่มีปริมาณ CMC เส้นใยสับปะรด และฟูมซิลิกาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสที่ระยะกด 30% เพิ่มขึ้นเนื่องจากไฮโดรเจลมีความแข็งแรงสูงขึ้นแต่การเพิ่มขึ้นของปริมาณ CMC เส้นใยสับปะรดและฟูมซิลิกาไม่ได้ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของไฮโดร-เจลอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าการตัดขาดหรือไม่ตัดของไฮโดรเจลไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกดและค่ามอดุลัสที่ระยะกด 30% ของไฮโดรเจลอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ไฮโดรเจลทุกสูตรมีความสามารถในการซ่อมแซมตนเองได้ โดยไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดมีส่วนช่วยส่งเสริมให้การซ่อมแซมตนเองมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเนื่องจากพบว่ามีค่า %HE สูงขึ้นโดยไฮโดรเจลสูตร C15F3 เป็นสูตรที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองสูงสุด ในกรณีของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยฟูมซิลิกาพบว่าการเติมฟูมซิลิกาในปริมาณที่มากอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลลดลง

7. ไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดสูตร C20F3 มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ายังมอดุลัสสูงสุดโดยชิ้นงานที่ตัดมีค่าเท่ากับ 99.63 kPa และ 260.73 kPa ตามลำดับ ชิ้นงานที่ไม่ได้ตัดมีค่าเท่ากับ 116.77 kPa และ 290.13 kPa ตามลำดับ และในการทดสอบขณะดึงพบว่าชิ้นงานไม่เกิดการขาดที่ตำแหน่งรอยตัดเดิมซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลมีประสิทธิภาพในการผสานกันภายหลังการซ่อมแซมตนเอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการเก็บไฮโดรเจลต้องควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมเพื่อให้ไฮโดรเจลยังคงความสามารถในการซ่อมแซมตนเองและความยืดหยุ่นของโครงสร้างไฮโดรเจลไว้ได้

2. เนื่องจากฟองอากาศที่มีอยู่ในชิ้นงานทำให้ลักษณะทางกายภาพของไฮโดรเจลที่ได้ไม่สวยงามอีกทั้งทำให้สมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลต่ำดังนั้นจึงต้องใส่สารกำจัดฟองอากาศในการเตรียมไฮโดรเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Anjum, S. Gurave, P. Badiger, V M. Torris, A and Tiwari, N. 2017 "Design and development of trivalent aluminum ions induced self-healing polyacrylic acid novel hydrogels." *Polymer*. 126(49) : 196-205.

[2] Zhang, H. Xia, H. and Zhao, Y. 2012 "Poly(vinyl alcohol) Hydrogel Can Autonomously Self-Heal." *ACS Macro letters*. 1(11) : 1233-1236.

[3] Isobe, N. Komamiya, T. Kimura, S. Kim, U-J and Wada, M. 2018 "Cellulose hydrogel with tunable shape and mechanical properties: From rigid cylinder to soft scaffold." *doi:10.1016/j.ijbiomac.2018.05.071, Articles in press.*

[4] Wen, J. Z. and Gao, J and Wei, Z and Zhou, J and Yong, M. C. 2015. "Facile fabrication of self-healing carboxymethyl cellulose hydrogels." *European Polymer Journal*. 72(14) : 514–522.

[5] Li, Y. Wang, X. Wei, Y and Tao, L. 2017 "Chitosan-based self-healing hydrogel for bioapplications." *Chinese Chemical Letters*. 28(4) : 2053-2057.

[6] Dai, L. Zhang, L. Wang, B. Yang, B. Khan, I. Khan, A and Ni, Y. 2017. "Multifunctional self-assembling hydrogel from guar gum." *Chemical Engineering Journal*. 330 : 1044-1051.

[7] Abaee, A. Mohammadian, M. and Jafari, M. S. 2017 "Whey and soy protein-based hydrogels and nano-hydrogels as bioactivedelivery systems." *Trends in Food Science & Technology*. 70(7) : 69-81.

[8] Liu, S. Kang, M. Li, K. Yao, F. Olayinka, O. Fu, G and Xu, L. 2017 "Polysaccharide-templated preparation of mechanically-tough, conductive and self-healing hydrogels." *Chemical Engineering Journal*. 334(52) : 2222-2230.

[9] Xu, X. Lu, S. Wang, X. Bai, X. Gao, N. and Liu, M. 2013. "One-pot facile synthesis of silica reinforced double network hydrogelsbased on triple interactions." *Chemical Engineering Journal*. 240(63) : 331-337.

[10] Wood, A. T. Everett, D. Budhwani, K. I. Dickinson, B and Thomas, V. 2016. "Wet-laid soy fi ber reinforced hydrogel scaffold: Fabrication, mechano-morphological and cell studies." *Materials Science and Engineering C*. 63(35) : 308-316.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Anonymous. 2018. **What is a hydrogel.** [Online]. Available : http://www.gcses-cience.com/o70.htm.

[12] วารุณี ตานันต์ และ สายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. "พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก : การสังเคราะห์ การวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ Super Absorbent Polymer : Synthesis, Characteri-zation, and Applications." *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.* 16(2) : 63-81.

[13] Taylor, D.L., Prof. 2016. "Self-Healing Hydrogels." *Advanced materials.* 28(41) : 9060–9093.

[14] Zhang, P. Deng, F. Peng, P. Chen, H. Gao, Y. and Li, H. 2014. "Redox- and pH responsive polymer gels with reversible sol-gel transitions and self-healing properties." *Royal Society of Chemistry.* 2014(4) : 47361-47367.

[15] Anonymous. 2018. **How Hydrogen Bond is Formed in Water.** [Online]. Availa-ble : www.easybiologyclass.com/how-hydrogen-bond-is-formed-in-water/.

[16] Zhang, M. Xu, D. Dr. Yan, X. Chen, J. Dong, S. Zheng, B. Huang, F. ,Prof. Dr. 2012. "Self-Healing Supramolecular Gels Formed by Crown Ether Based Host–Guest Interac-tions."*Angewandte Chemie International Edition.* 51(28) : 7011–7015.

[17] Tuncaboylu, C. D. Argun, A. Sahin, M. Sari, M. Okay, O. 2012. "Structure optimiza-tion of self-healing hydrogels formed via hydrophobic interactions." *Polymer.* 53(24) : 5513-5522.

[18] ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ. 2558. เอกสารการสอนวิชา ไบโอพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[19] Rutishauser, B. F. Muehlenfeld, C. Wamke, G. and Watson, T. 2016. **Factors Affecting Sterile Filtration of Sodium-Carboxymethylcellulose-Based Solutions.** [Online]. Available : http://www.bioprocessintl.com/analytical /downs-tream-develop-ment/factors-affecting-sterile-filtration-of-sodium-carboxymethylcellulose-based-solu-tions/.

[20] Anonymous. 2561. **เส้นใย (Fiber).** [Online]. Available : https://www.baanjomyut.com/library_2/extension-4/fiber/

[21] Anonymous. 2555. **เส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic).** [Online]. Availble : https:// www.ruedee.com/th/fabric/synthetic_fibers/.

[22] Anonymous. 2559. **เส้นไหมดิบ.** [Online]. Available : http://www.simplesilk.com/-product/1412204/เส้นไหมดิบ.html.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[23] Anonymous. 2555. **เส้นใยจากธรรมชาติ.** [Online]. Avaible : https://www.ruedee.-com/th/fabric/natural_fibers/

[24] Anonymous. 2018. **3D Printer Metallic Filament, 40% of Metal Content Filament - Copper / Brass / Bronze / Red Copper / Aluminum.** [Online]. Avaible : https://www.-aliexpress.com/item/3D-Printer-Metallic-Filament-40-of-Metal-Content-Filament-Cop-per-Brass-Bronze-Red-Copper Alumi num -1/32631570647.html.

[25] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. 2561. **Cellulose เซลลูโลส.** [Online]. Avaible : http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0612/cellulose-เซลลูโลส.

[26] รุ่งทิพย์ ลุยเลา ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2561. **ผ้าไม่ทอจากใยธรรมชาติ : สับปะรด.** [Online]. Avaible : http://www.thaitextile.org /index.php/-blog/2016/11/nonwoven5.

[27] สุปราณี แก้วภิรมย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา และ ศิริเดช บุญแสง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557. **โครงการ คอมโพสิตรักษ์สิ่งแวดล้อมจากพอลิแลคติกแอซิดและเส้นใยสับปะรด Green Compo-site from Poly(lactic acid) and Pineapple Leave Fiber.** [Online]. Avaible : http://-digital_collect.lib.buu.ac.th/dcms/files//2559_065.

[28] Anonymous. 2561. **นวัตกรรมเส้นใยรักษ์โลก : เส้นใยสับปะรด (Pineapple fibers).** [Online]. Avaible : https://sites.google.com/site/mju574/nwatkrrm-thangkar-kestr/-nwatkrrm-senyi-cak-sabpard/krabwnkar-phlit-senyi-sabpard.

[29] โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโนสถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร. 2561. **ลักษณะสมบัติเฉพาะ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2).** [Online]. Avaible : http://web.eng.nu.ac.th/eng-2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=5&p_id=167.

[30] Anonymous. 2561. **ซิลิกา (silica/SiO_2) และประโยชน์ซิลิกา.** [Online]. Avaible : http://www.siamchemi.com/ซิลิกา/

[31] Anonymous. 2018. Fumed Silica Powder (SiO2). [Online]. Avaible : https://

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[32] Jianprasert, A. 2017. "Study on modified PVAs from tungoil and natural rubber latex for coating material and water resistant film applications." Doctoral in nanoscience and nanotechnology King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ค่าเฉลี่ยขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจล

ตารางที่ ก 1 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (mm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3)
	สูง	กว้าง	ยาว		
C15	9.27	20.15	20.90	3.98	0.01
C20	10.29	19.38	20.11	4.33	0.01

ตารางที่ ก 2 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (mm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3)
	สูง	กว้าง	ยาว		
C15F0.5	9.69	19.78	20.49	4.15	0.01
C15F1	9.40	19.85	20.59	3.97	0.01
C15F2	9.21	19.56	20.46	3.97	0.01
C15F3	9.51	19.92	20.85	3.96	0.01

ตารางที่ ก 3 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (mm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3)
	สูง	กว้าง	ยาว		
C20F0.5	10.58	19.36	20.10	4.37	0.01
C20F1	10.17	19.02	20.02	4.11	0.01
C20F2	10.36	19.51	20.11	4.33	0.01
C20F3	10.03	19.44	20.26	4.43	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก 4 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (mm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3)
	สูง	กว้าง	ยาว		
C15Si5	9.71	19.96	20.63	4.09	0.01
C15Si15	9.58	19.81	20.31	4.15	0.01
C15Si25	9.33	19.42	19.97	3.96	0.01

ตารางที่ ก 5 ขนาด น้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	ขนาดเฉลี่ย (mm)			น้ำหนักเฉลี่ย (g)	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm^3)
	สูง	กว้าง	ยาว		
C20Si5	10.80	18.88	19.93	4.39	0.01
C20Si15	10.51	18.90	19.72	4.44	0.01
C20Si25	11.07	18.97	19.56	4.28	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ข 1 ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15	C20
ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (%)	61.80	60.87

ตารางที่ ข 2 ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15F0.5	C15F1	C15F2	C15F3
ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (%)	60.24	60.14	60.10	60.93

ตารางที่ ข 3 ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20F0.5	C20F1	C20F2	C20F3
ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (%)	60.69	60.76	60.65	59.66

ตารางที่ ข 4 ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15Si5	C15Si15	C15Si25
ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (%)	66.70	65.28	63.82

ตารางที่ ข 5 ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20Si5	C20Si15	C20Si25
ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล (%)	61.18	63.15	59.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค
ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ค 1 ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15	C20
ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล (%)	38.20	39.13

ตารางที่ ค 2 ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15F0.5	C15F1	C15F2	C15F3
ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล (%)	39.76	39.86	39.90	39.07

ตารางที่ ค 3 ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20F0.5	C20F1	C20F2	C20F3
ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล (%)	39.31	39.24	39.35	40.34

ตารางที่ ค 4 ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15Si5	C15Si15	C15Si25
ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล (%)	33.30	34.72	36.18

ตารางที่ ค 5 ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20Si5	C20Si15	C20Si25
ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล (%)	38.82	36.85	40.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
ค่าเฉลี่ยความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ง 1 ความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15	C20
ความแข็งที่พื้นผิว	40	42

ตารางที่ ง 2 ความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15F0.5	C15F1	C15F2	C15F3
ความแข็งที่พื้นผิว	41	48	51	53

ตารางที่ ง 3 ความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20F0.5	C20F1	C20F2	C20F3
ความแข็งที่พื้นผิว	49	50	53	56

ตารางที่ ง 4 ความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15Si5	C15Si15	C15Si25
ความแข็งที่พื้นผิว	45	45	48

ตารางที่ ง 5 ความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20Si5	C20Si15	C20Si25
ความแข็งที่พื้นผิว	52	53	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ จ 1 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15		C20	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่าความแข็งแรงกด (kPa)	11.48	12.29	17.67	22.96

ตารางที่ จ 2 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15F0.5		C15F1		C15F2		C15F3	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่าความแข็งแรงกด (kPa)	19.13	20.47	21.67	24.22	23.71	24.66	25.75	22.82

ตารางที่ จ 3 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20F0.5		C20F1		C20F2		C20F3	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่าความแข็งแรงกด (kPa)	28.99	31.26	23.27	26.65	48.37	54.94	39.60	34.24

ตารางที่ จ 4 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15Si5		C15Si15		C15Si25	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่าความแข็งแรงกด (kPa)	21.45	20.87	20.82	40.07	22.13	42.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ 5 ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20Si5		C20Si15		C20Si25	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่าความแข็งแรงกด (kPa)	27.62	33.39	27.42	28.34	30.17	34.26

ตารางที่ จ 6 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15		C20	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่ามอดุลัสกดอัด (kPa)	83.33	109.09	121.55	169.70

ตารางที่ จ 7 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15F0.5		C15F1		C15F2		C15F3	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่ามอดุลัสกดอัด (kPa)	152.08	139.32	145.44	179.79	172.42	168.06	195.65	185.34

ตารางที่ จ 8 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20F0.5		C20F1		C20F2		C20F3	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่ามอดุลัสกดอัด (kPa)	253.68	249.16	176.26	238.66	351.81	363.15	290.04	268.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ 9 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วน โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15Si5		C15Si15		C15Si25	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่ามอดุลัสกดอัด (kPa)	166.77	156.60	157.92	314.63	167.42	319.27

ตารางที่ จ 10 ค่ามอดุลัสกดอัดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วน โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20Si5		C20Si15		C20Si25	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่ามอดุลัสกดอัด (kPa)	198.88	245.06	191.00	200.77	193.71	249.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ฉ 1 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15	C20
ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (%)	93	77

ตารางที่ ฉ 2 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15F0.5	C15F1	C15F2	C15F3
ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (%)	103	101	100	118

ตารางที่ ฉ 3 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20F0.5	C20F1	C20F2	C20F3
ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (%)	112	90	109	113

ตารางที่ ฉ 4 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15Si5	C15Si15	C15Si25
ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (%)	113	66	65

ตารางที่ ฉ 5 ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล-เซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับฟูมซิลิกาที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20Si5	C20Si15	C20Si25
ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (%)	88	105	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ช
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ช 1 ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15		C20	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่าความแข็งแรงดึง (kPa)	42.97	51.30	91.14	77.41

ตารางที่ ช 2 ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15F0.5		C15F1		C15F2		C15F3	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่าความแข็งแรงดึง (kPa)	50.00	63.94	53.70	71.16	59.15	63.97	66.19	73.40

ตารางที่ ช 3 ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วนโดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20F0.5		C20F1		C20F2		C20F3	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่าความแข็งแรงดึง (kPa)	68.39	68.23	86.89	80.84	95.70	108.24	116.77	99.63

ตารางที่ ช 4 ค่ามอดุลัสของยังของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยน้ำหนักต่อปริมาตรแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15		C20	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่ามอดุลัสของยัง (kPa)	106.12	93.47	182.51	119.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ช 5 ค่ามอดุลัสของยังของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 15 ส่วน โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C15F0.5		C15F1		C15F2		C15F3	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่ามอดุลัสของยัง (kPa)	74.41	99.71	116.45	117.91	123.56	117.04	124.79	139.25

ตารางที่ ช 6 ค่ามอดุลัสของยังของไฮโดรเจลที่มีปริมาณโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 20 ส่วน โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับเส้นใยสับปะรดที่มีเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแตกต่างกัน

สูตรไฮโดรเจล	C20F0.5		C20F1		C20F2		C20F3	
	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด	ตัด	ไม่ตัด
ค่ามอดุลัสของยัง (kPa)	96.90	99.57	111.11	91.49	209.81	227.06	290.13	260.73

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คำรับรองเล่มโครงงานพิเศษ

วันที่ 1 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า	นางสาวนราภรณ์	นิธิกุล	รหัสนักศึกษา 57050429
	นางสาวนวพร	บุญชาย	รหัสนักศึกษา 57050430
	นางสาวนิชารีย์	วีรวรรณ	รหัสนักศึกษา 57050437

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงงานพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟูมซิลิกา

ชื่อภาษาอังกฤษ The study on self-healing property of Sodium Carboxymethylcellulose hydrogel reinforced with pineapple leaf fiber or fumed silica

ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่มิได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงงานพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 1.23%

ลงชื่อ นราภรณ์ นิธิกุล	ลงชื่อ นวพร บุญชาย	ลงชื่อ นิชารีย์ วีรวรรณ
(นางสาวนราภรณ์ นิธิกุล)	(นางสาวนวพร บุญชาย)	(นางสาวนิชารีย์ วีรวรรณ)
นักศึกษา	นักศึกษา	นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงงานพิเศษของนักศึกษาข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ.....

(ผศ.ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้