

การศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียม
คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์

STUDY ON SELF-HEALING PROPERTY OF HYDROGELS FROM
SODIUM CARBOXYMETHYL CELLULOSE/POLY(VINYL ALCOHOL)
REINFORCED BY MONTMORILLONITE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2564

KMITL-2021-SC-M-012-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON SELF-HEALING PROPERTY OF HYDROGELS FROM
SODIUM CARBOXYMETHYL CELLULOSE/POLY(VINYL ALCOHOL)
REINFORCED BY MONTMORILLONITE



NICHAREE WEERAWAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2021

KMITL-2021-SC-M-012-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนิชาธิย์ วีรวรรณ
รหัสประจำตัว	61605065
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้จากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) โดยไฮโดรเจลถูกเตรียมด้วยวิธีการแช่ในสารละลายกรดซิตริกเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง Na^+ ของ CMC กับ H^+ ของกรดซิตริก และเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่าง CMC และ PVA ด้วยพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเสริมแรง MMT ในไฮโดรเจลเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองให้กับไฮโดรเจล จากการศึกษาพื้นฐานวิทยาของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลสูตรที่เสริมแรงด้วย MMT 1% มีการกระจายตัวของ MMT อย่างสม่ำเสมอในไฮโดรเจล โดยไฮโดรเจลที่มีการเติมสารเสริมแรงมีขนาดรูพรุนที่เล็กลงและมีผนังไฮโดรเจลที่หนาขึ้น นอกจากนี้ยังมีการทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกด โดยค่าความแข็งแรงดึงอยู่ในช่วง 35.0-64.0 kPa และค่าความแข็งแรงกดอยู่ในช่วง 7.3-20.3 kPa โดยไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณ PVA และ MMT มากส่งผลให้ไฮโดรเจลมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสามารถคำนวณได้จากค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลตั้งต้นและไฮโดรเจลที่เกิดการซ่อมแซมตนเองแล้ว พบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณ PVA 1% และ MMT 1% (P1C8M1) มีค่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองสูงที่สุด (94%) การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ จึงสรุปได้ว่าไฮโดรเจลมีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองได้เมื่อได้รับความเสียหายและไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

คำสำคัญ : การซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล พันธะไฮโดรเจน คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มอนต์มอริลโลไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study on self-healing property of hydrogels from sodium carboxymethyl cellulose/poly(vinyl alcohol) reinforced by montmorillonite
Student Name	Miss Nicharee Weerawan
Student ID	61605065
Degree	Master of Science (Polymer Technology)
Department	Chemistry
Year	2021
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pathavuth Monvisade

Abstract

In this article, we prepared the self-healing hydrogels based on sodium carboxymethyl cellulose/poly(vinyl alcohol) reinforced by montmorillonite. The hydrogels were prepared by the acidifying method, in which Na^+ of sodium carboxymethyl cellulose were replaced by H^+ of acid and hydrogen bonds between CMC and PVA occurred. In addition, montmorillonite was added into hydrogels to improve their mechanical and self-healing properties. In morphology analysis, it showed good distribution of MMT in the hydrogels, while the pore size decrease and the pore wall increased with the presence of montmorillonite in the hydrogels. Mechanical properties of hydrogels were measured by tensile and compressive tests. The hydrogels showed tensile strength values of 35.0-64.0 kPa and compressive strength values of 7.3-20.3 kPa depending on PVA and MMT contents. The higher amount of PVA and MMT, the higher mechanical properties were obtained. The self-healing efficiency of hydrogels can be calculated by the tensile strength of original hydrogels and healed hydrogels, indicating that the hydrogel with 1% PVA and 1% MMT (P1C8M1) displayed the highest healing efficiency (94%). For cytotoxicity test, the hydrogels were not toxic to Vero cells. Therefore, the hydrogels could self-healed after the damage and non-toxic for cell.

Keywords : Self-healing hydrogel, Hydrogen bond, Carboxymethyl cellulose, Poly(vinyl alcohol), Montmorillonite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และ ผศ.ดร.ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค อาจารย์ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจทานและให้ข้อเสนอแนะเพื่อให้งานวิทยานิพนธ์นี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มอบเงินทุนสนับสนุนในการศึกษาทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่มอบเงินทุนสนับสนุนในการเสนอผลงานทางวิชาการทำให้มีโอกาสนำผลงานวิจัยนี้ไปเผยแพร่แก่ผู้อื่นและได้รับประสบการณ์ความรู้มากขึ้น

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือฯ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือ รวมถึงสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจในการทำงาน ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือ รวมถึงพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในหน่วยงานวิจัยการสังเคราะห์พอลิเมอร์และวัสดุเฉพาะทางที่ช่วยให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวนิชาธิ์ วีรวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels).....	4
2.1.1 การเกิดไฮโดรเจล (Hydrogels formation).....	5
2.1.1.1 ชนิดพันธะของไฮโดรเจล.....	5
2.1.2 การแบ่งประเภทของไฮโดรเจลตามองค์ประกอบของพอลิเมอร์.....	11
2.1.3 สมบัติของไฮโดรเจล.....	11
2.1.3.1 สมบัติในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล.....	13
2.1.3.2 พันธะที่ใช้ในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล.....	13
2.1.4 การนำไฮโดรเจลไปใช้งาน.....	16
2.2 โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose).....	17
2.2.1 โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	17
2.2.2 การนำโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไปใช้งาน.....	18
2.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ Poly(vinyl alcohol).....	19
2.3.1 โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	19
2.3.3 การนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปใช้งาน.....	21
2.4 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite; MMT).....	21
2.4.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	21
2.4.2 การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์.....	23
2.4.3 สมบัติการเสริมแรงของมอนต์มอริลโลไนต์.....	24
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 สารเคมี.....	30
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	30
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT).....	32
3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 8 โมล/ลิตร.....	32
3.5 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ซาลินพีเอช 5.5.....	32
3.6 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์ซาลินพีเอช 7.4.....	32
3.7 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล.....	32
3.7.1 การเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CMC-PVA).....	32
3.7.2 การเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ (CMC-PVA-MMT).....	33
3.8 การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ.....	34
3.8.1 วัดขนาดและชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล.....	34
3.8.2 สัญญาณวิทยาของไฮโดรเจล (Morphology).....	34
3.8.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM).....	34
3.8.2.2 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital microscope).....	35
3.8.3 การหาปริมาณน้ำ (Water content) และปริมาณของแข็ง (Solid content) ในไฮโดรเจล.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.8.4 ทดสอบความแข็งของไฮโดรเจล (Hardness).....	36
3.8.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	36
3.8.5.1 ทดสอบความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	36
3.8.5.2 ทดสอบความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	37
3.8.6 การทดสอบสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล.....	38
3.8.6.1 ทดสอบสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล.....	38
3.8.6.2 ศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลในสภาวะต่าง ๆ.....	39
3.8.7 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเทคนิค MTT assay.....	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	41
4.1 น้ำหนัก ขนาดและความหนาแน่นของไฮโดรเจล.....	42
4.2 ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล.....	44
4.3 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล.....	45
4.4 การทดสอบความแข็ง.....	47
4.5 การทดสอบความแข็งแรงดึง.....	49
4.6 การทดสอบความแข็งแรงกด.....	52
4.7 การซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล.....	56
4.7.1 ไฮโดรเจลที่ซ่อมแซมตนเองในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90±5%.....	56
4.7.2 ไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองภายใต้สภาวะ กรด, เบส และ กลาง.....	58
4.7.3 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล.....	60
4.8 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์.....	61
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	63
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
เอกสารอ้างอิง.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติจำเพาะของมอนต์มอริลโลไนต์.....	23
3.1 ตารางแสดงองค์ประกอบของไฮโดรเจลทุกสูตร.....	34
4.1 ขนาดน้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ก่อนและหลังเก็บไว้ในกล่อง.....	
ความชื้นสัมพัทธ์ 90±5% เป็นระยะเวลา 10 วัน	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงร่างแหสามมิติของไฮโดรเจล.....	4
2.2 การเกิดพันธะอิมินระหว่างหมู่คาร์บอนิลและหมู่อะมิโนของพอลิเมอร์.....	6
2.3 พันธะไดซัลไฟด์.....	7
2.4 การเกิดไฮโดรเจลด้วยการเชื่อมโยงแบบ Free Radical Polymerization.....	7
2.5 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	8
2.6 การเกิดพันธะไอออนิกระหว่างแคลเซียมกับอัลจิเนต.....	9
2.7 การเกิด Hydrophobic interaction.....	10
2.8 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล.....	10
2.9 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์.....	12
2.10 การเกิดพอลิอีเลโทรไลต์ระหว่างไฮโดรเจลกับโลหะหนัก.....	12
2.11 Acylhydrazone bond และ Disulfide bond.....	13
2.12 การผันกลับของพันธะไอออนิก.....	14
2.13 การซ่อมแซมตนเองด้วยพันธะไฮโดรเจน.....	15
2.14 การเกิดพันธะอิมิน.....	15
2.15 Host-guest interaction.....	16
2.16 การนำไฮโดรเจลไปใช้งาน.....	17
2.17 โครงสร้างโซ่เติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	18
2.18 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	19
2.19 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	20
2.20 ขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	20
2.21 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์.....	22
2.22 การบวมตัวของมอนต์มอริลโลไนต์.....	24
2.23 การกระจายตัวของสารเสริมแรงในนาโนคอมโพสิต.....	25
3.1 แม่พิมพ์ซิลิโคน.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ขนาดไฮโดรเจลที่ใช้ทดสอบความแข็ง.....	36
3.3 ขนาดไฮโดรเจลที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงดึง.....	37
3.4 ขนาดไฮโดรเจลที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงกด.....	38
3.5 ไฮโดรเจลขนาด $3 \times 7.8 \times 0.4 \text{ cm}^3$ ตัดออกเป็น 2 ส่วน.....	38
4.1 รูปไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เสริมแรงด้วย มอนต์มอริลโลไนต์.....	42
4.2 ค่าปริมาตรน้ำและปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจลทุกสูตร.....	44
4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโหมดสัญญาณตกต่ำ (LV-SEM) ที่กำลังขยาย 800x แสดงการกระจายตัวของ MMT บริเวณพื้นผิวของไฮโดรเจล สูตร..... P1C8M1 : ก. ภาพการกระจายตัวของ MMT บริเวณพื้นผิวไฮโดรเจลสูตร P1C8M1,..... ข. ภาพการกระจายตัวของธาตุ Si ที่เป็นองค์ประกอบของ MMT และ..... ค. ภาพการกระจายตัวของธาตุ Al ที่เป็นองค์ประกอบของ MMT.....	45
4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโหมดสัญญาณตกต่ำ (LV-SEM) ที่กำลังขยาย 800x แสดงการกระจายตัวของ MMT บริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจล..... สูตร P1C8M1 : ก. ภาพการกระจายตัวของ MMT บริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลสูตร..... P1C8M1, ข. ภาพการกระจายตัวของธาตุ Si ที่เป็นองค์ประกอบของ MMT และ..... ค. ภาพการกระจายตัวของธาตุ Al ที่เป็นองค์ประกอบของ MMT.....	46
4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM-EDS) ที่กำลังขยาย 1000x แสดง... ลักษณะรูพรุนและความหนาของผนังไฮโดรเจล : ก. ไฮโดรเจลสูตร P1C8, ข. ไฮโดรเจลสูตร. P1C8M0.5 และ ค. ไฮโดรเจลสูตร P1C8M1.....	47
4.6 ค่าความแข็งที่บริเวณพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ..	48
4.7 ผลของปริมาณ MMT ต่อค่า Tensile strength ของไฮโดรเจลตั้งต้นและไฮโดรเจลที่ผ่านการ ซ่อมแซมตนเองสูตร : ก. P1C8, ข. P2C8 และ ค. P3C8.....	50
4.8 ผลของอัตราส่วน PVA ต่อค่า Tensile strength ของไฮโดรเจลตั้งต้นและไฮโดรเจลที่ผ่านการ ซ่อมแซมตนเอง.....	51
4.9 ค่า Young's Modulus ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	52

เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 ผลของปริมาณ MMT ต่อค่า Compressive strength ของไฮโดรเจลสูตร : ก. P1C8,..... ข. P2C8 และ ค. P3C8.....	54
4.11 ผลของอัตราส่วน PVA ต่อค่า Compressive strength ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	55
4.12 Compressive Modulus ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	55
4.13 การซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1.....	56
4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่ระยะห่างจากชิ้นงาน 1 ซม. แสดงการซ่อมแซม..... ตนเองของไฮโดรเจลสูตรในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ $90\pm 5\%$ ในวันที่ 0 และ 10 : ก. P1C8, ข. P1C8M0.1, ค. P1C8M0.5, ง. P1C8M1, จ. P2C8, ฉ. P2C8M1, ช. P3C8.... และ ซ. P3C8M1.....	57
4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่ระยะห่างจากชิ้นงาน 1 ซม. แสดงการซ่อมแซม..... ตนเองของไฮโดรเจลสูตรในสถานะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ $90\pm 5\%$ ในวันที่ 0 และ 10 : ก. P1C8, ข. P1C8M0.1, ค. P1C8M0.5, ง. P1C8M1, จ. P2C8, ฉ. P2C8M1, ช. P3C8.... และ ซ. P3C8M1 (ต่อ).....	58
4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่ระยะห่างจากชิ้นงาน 1 ซม. แสดงการซ่อมแซม..... ตนเองของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 ที่หยุดสารละลายกรด, เบส และ กลางในสถานะ..... ความชื้นสัมพัทธ์ $90\pm 5\%$ ในวันที่ 0 และ 10 : ก. ไฮโดรเจลที่หยุดสารละลายกรด,..... ข. ไฮโดรเจลที่หยุดสารละลายเบส และ ค. ไฮโดรเจลที่หยุดน้ำกลั่น.....	59
4.16 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	61
4.17 เปอร์เซ็นต์ Cell viability ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ.....	62

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
CMC, C	Sodium carboxymethyl cellulose
PVA, P	Poly (vinyl alcohol)
MMT, M	Montmorillonite
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
HE	ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเอง (Healing efficiency)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ไฮโดรเจล (Hydrogels) เป็นวัสดุที่มีความชอบน้ำโดยสามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้ในปริมาณมาก มีความอ่อนนุ่มและมีความยืดหยุ่นดี มีการพัฒนาสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจลขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้งาน ไฮโดรเจลมีการเชื่อมโยงกันเป็นโครงร่างแห 3 มิติ ทำให้สามารถคงรูปร่างไว้ได้ พันธะที่ใช้ในการเชื่อมโยงมีทั้งการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical crosslinking) เช่น พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds) [1] และการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslinking) เช่น พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds) [2] เป็นต้น การเชื่อมโยงที่แตกต่างกันนี้ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพและสมบัติของไฮโดรเจลที่ได้มีความแตกต่างกัน สารตั้งต้นที่ใช้สังเคราะห์ไฮโดรเจลมีทั้งพอลิเมอร์ที่มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี (Petro based polymer) เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol); PVA) [3] และพอลิเมอร์ที่มาจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ (Bio based polymer) เช่น โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose; Na-CMC) [4] ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่ด้วยข้อจำกัดในการใช้งานด้านความแข็งแรงทำให้พอลิเมอร์จากธรรมชาติยังไม่สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลายจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาไฮโดรเจลที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

ปัจจุบันมีการนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้งานมากขึ้น โดยสามารถใช้งานได้ทั้งภายในร่างกายและภายนอกในร่างกาย ไฮโดรเจลจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อนำไปสู่การใช้งานที่หลากหลายมากขึ้น การนำไฮโดรเจลมาใช้งานที่พบมากมักใช้ในทางการแพทย์ โดยไฮโดรเจลที่เลือกใช้มีสารตั้งต้นมาจากธรรมชาติหรือเป็นสารที่ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ทำให้สามารถเข้ากันได้กับร่างกายของมนุษย์ มีการนำไฮโดรเจลมาทำวัสดุปิดแผล (Wound dressing) [5] และวัสดุปลดปล่อยตัวยา (Drug release) [6] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำไฮโดรเจลมาทำเป็นวัสดุตรวจวัดการตอบสนองต่อการกดอัดและการดึงยืดหลังจากนั้นแปลงสัญญาณเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในดำนอิเล็กทรอนิกส์หรือพัฒนาใช้ในทางการแพทย์ (Electronic skin) [7]

สมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล (Self-healing properties) เป็นสมบัติหนึ่งที่น่าสนใจ โดยสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลนั้นเกิดจากการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่สามารถกลับมาเชื่อมโยงกันได้อีกครั้งหลังจากที่ไฮโดรเจลได้รับความเสียหายทำให้ไฮโดรเจลมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น จากงานวิจัยมีการศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีการใช้สารเชื่อมโยงคือกรดซิตริก (Citric acid) และ อะลูมิเนียมคลอไรด์ (Aluminium chloride) [8] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose nanofibrils, CNF) และ PVA โดยใช้บอแรกซ์ (Borax) และกรดแทนนิก (Tannic acid) เป็นสารเชื่อมโยงเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงสองระบบ (Double network) ทำให้ไฮโดรเจลมีความยืดหยุ่นและสามารถซ่อมแซมตนเองได้อย่างรวดเร็ว [9]

ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นจากธรรมชาติมีข้อจำกัดด้านความแข็งแรงจึงมีการใช้สารเสริมแรงเพื่อช่วยให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงคงทนมากยิ่งขึ้น มีการใช้มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite; MMT) ซึ่งเป็นแร่ดินจากธรรมชาติที่มีโครงสร้างเรียงซ้อนทับกันหลายชั้น มีอลูมินาและซิลิกาเป็นองค์ประกอบในโครงสร้าง และมีอัตราส่วนด้านกว้าง/ยาวต่อความหนา (Aspect ratio) สูง ทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นสารเสริมแรง โดยมีงานวิจัยที่มีการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้จากไซโลสที่ถูกดัดแปรโครงสร้าง (Modified xylose) และมีการเสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ที่เกิดอันตรกิริยากับโซเดียมพอลิอะคริเลต (Sodium polyacrylate) [10]

ในงานวิจัยนี้มีความสนใจในการพัฒนาไฮโดรเจลที่มีสมบัติการซ่อมแซมตนเองโดยสารตั้งต้นที่ใช้คือ Na-CMC และ PVA ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่สามารถย่อยสลายได้ไม่มีความเป็นพิษ และยังช่วยให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรง สามารถคงรูปร่างได้ เนื่องจาก PVA มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) เป็นองค์ประกอบจำนวนมากทำให้สามารถเกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนกับ CMC ที่ตำแหน่งหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl group) และกับ PVA ด้วยกันเองที่ตำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิล นอกจากนี้ยังมีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งเป็นสารเสริมแรง (Reinforcing agent) ที่มาจากธรรมชาติเข้าไปช่วยให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงและช่วยให้ไฮโดรเจลมีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองมากขึ้น โดยศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลด้วยการตัดไฮโดรเจลออกเป็นสองส่วนและนำมาวางต่อติดกัน หลังจากนั้นเก็บไฮโดรเจลที่ต่อติดกันแล้วไว้ในสภาวะความชื้นที่เหมาะสมเพื่อนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่เตรียมจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) เตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ โดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ในอัตราส่วน 0.1, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ตรวจสอบวิเคราะห์ทดสอบสมบัติเชิงกลและประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถเตรียมไฮโดรเจลที่ซ่อมแซมตนเองได้จากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

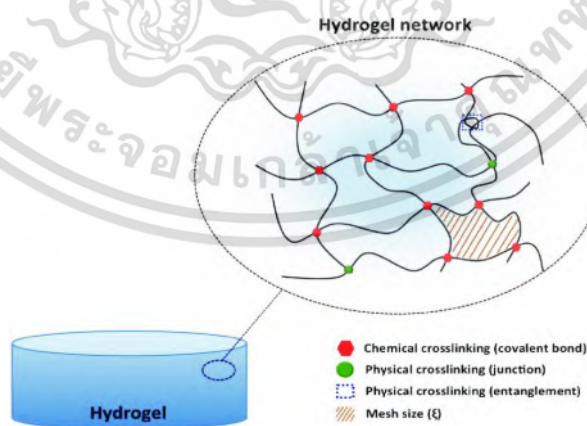
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีความชอบน้ำ และมีน้ำในโครงสร้างปริมาณมาก ไฮโดรเจลประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ (Hydrophilic) เชื่อมโยงเป็นโครงร่างแหสามมิติ (Three dimensional network) ด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds) พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds) พันธะไอออนิก (Ionic bonds) เป็นต้น สารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลมีทั้งพอลิเมอร์สังเคราะห์และพอลิเมอร์จากธรรมชาติ

ในปัจจุบันมีการศึกษาการใช้วัสดุจากธรรมชาติจำนวนมากเนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ง่าย มีความเข้ากันได้กับร่างกาย ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์และเหมาะที่จะนำมาพัฒนาเพื่อเป็นวัสดุที่ใช้ในงานทางการแพทย์และด้วยข้อดีของไฮโดรเจลที่มีความชอบน้ำ สามารถอุ้มน้ำไว้ในโครงสร้างได้มาก เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ทำให้ไฮโดรเจลถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น ใช้ทำคอนแทคเลนส์ หรือไฮโดรเจลที่ใช้งานด้านการเกษตร ไฮโดรเจลอัจฉริยะใช้เป็นตัวตรวจวัดที่ตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อนำไปพัฒนาในด้านอิเล็กทรอนิกส์ ไฮโดรเจลที่ใช้ในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อ (Tissue Engineering) นำไปใช้ในการแพทย์เป็นเนื้อเยื่อเทียมที่สามารถเข้ากันได้กับร่างกายของสิ่งมีชีวิต หรือใช้เป็นวัสดุปิดแผลเพื่อปลดปล่อยตัวยา (Drug release) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงร่างแหสามมิติของไฮโดรเจล [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การเกิดไฮโดรเจล (Hydrogels formation)

การเกิดเจลสามารถเกิดจากการเกี่ยวพันกันเป็นโครงร่างแหสามมิติของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เป็นสารตั้งต้นของไฮโดรเจลนั้น ๆ โดยสายโซ่พอลิเมอร์นั้นมีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดการสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันบนสายโซ่พอลิเมอร์อีกเส้นหนึ่งทำให้เกิดโครงร่างแหสามมิติและเกิดการยึดเกาะกันเป็นไฮโดรเจลที่สามารถคงรูปร่างไว้ได้ การเกิดไฮโดรเจลสามารถเกิดการสร้างพันธะได้หลายแบบซึ่งการสร้างพันธะของไฮโดรเจลนั้นมีทั้งการเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical interaction) และการเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical interaction) ทำให้ไฮโดรเจลที่เกิดจากการเชื่อมขวางที่แตกต่างกันมีสมบัติที่ต่างกันออกไป ชนิดของพันธะที่ใช้เชื่อมขวางไฮโดรเจลมีดังนี้

2.1.1.1 ชนิดพันธะของไฮโดรเจล

1. การเชื่อมขวางทางเคมี (Chemical interaction)

การเชื่อมขวางทางเคมีคือกระบวนการเชื่อมโยงสายโซ่พอลิเมอร์เพื่อให้เกิดเป็นโครงร่างแหสามมิติซึ่งจะช่วยลดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์และช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับพอลิเมอร์ โดยการเชื่อมขวางทางเคมีจะมีการใช้สารที่ช่วยในการเชื่อมโยง (Crosslinking agents) ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันสองหมู่ฟังก์ชันขึ้นไปในโครงสร้าง เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับสารเชื่อมโยง ตัวอย่างสารเชื่อมโยงได้แก่ Glutaraldehyde (GA), Ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA), *N,N'*-Methylenebisacrylamide เป็นต้น วิธีการเชื่อมขวางทางเคมีของไฮโดรเจลที่พบบ่อยมีดังนี้

1.1 การเติมสารช่วยในการเชื่อมขวาง (Crosslink agents)

การเติมสารช่วยเชื่อมขวางทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นและเกิดเป็นตัวเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทั้งสองเส้นเข้าด้วยกันเป็นโครงร่างแหสามมิติและเกิดเป็นไฮโดรเจล

1.2 การกราฟต์ (Grafting)

เป็นการทำให้เกิดจุดที่ว่องไวบนสายโซ่พอลิเมอร์ โดยใช้วิธีการฉายรังสี หรือใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้นเพื่อให้เกิดตำแหน่งที่ว่องไวบนสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อมีการเติมมอนอเมอร์ลงไป จะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันขึ้น มอนอเมอร์จะเกิดการกราฟต์ลงบนสายโซ่พอลิเมอร์และเกิดการเชื่อมขวางเป็นโครงร่างแหสามมิติขึ้น

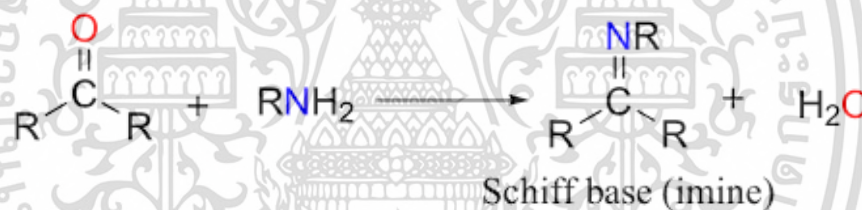
1.3 การฉายรังสี (Radiation crosslinking)

เป็นการฉายรังสีเพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างมอนอเมอร์กับสายโซ่พอลิเมอร์ วิธีการฉายรังสีนี้เป็นวิธีการที่ช่วยลดระยะเวลาในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลและยังช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ให้มีสมบัติเชิงกลที่ดียิ่งขึ้น

ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดการเชื่อมขวางทางเคมีแสดงรายละเอียดดังนี้ [12]

- Schiff base reaction

การเกิดการเชื่อมโยงพันธะด้วยปฏิกิริยา Imine หรือ Schiff base สามารถเกิดขึ้นได้โดยมีแอลดีไฮด์ (Aldehyde) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอกซาลดีไฮด์ (-CHO) ที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์หรือมีคีโตน (Ketone) เป็นสารอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (-CO-) ที่ปลายสายโซ่ของพอลิเมอร์โดยเกิดการสร้างพันธะกับสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่อะมิโน (-NH₂)

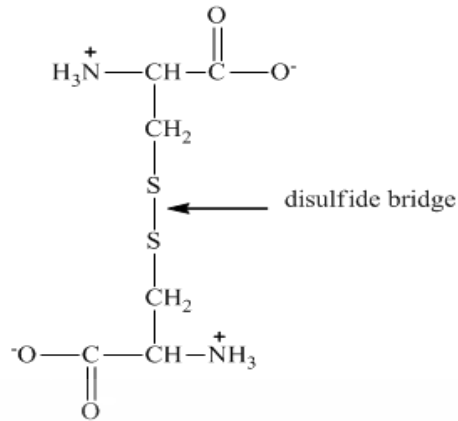


รูปที่ 2.2 การเกิดพันธะอิมินระหว่างหมู่คาร์บอนิลและหมู่อะมิโนของพอลิเมอร์ [13]

- Disulfide reaction

พันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bond) เป็นพันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่ไทออล (-SH) สองหมู่ของกรดอะมิโน สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ทั้งภายในโมเลกุลของพอลิเพปไทด์และระหว่างโมเลกุลของพอลิเพปไทด์

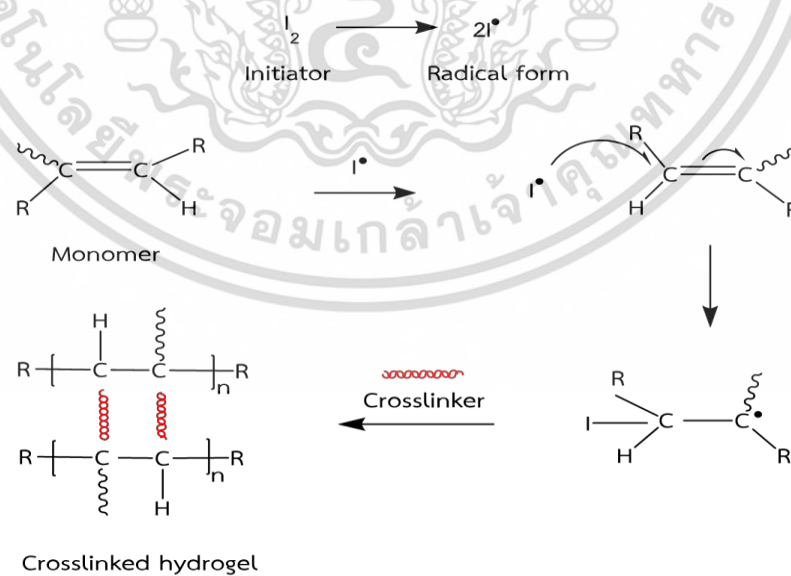
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 พันธะไดซัลไฟด์ [14]

- Free Radical Polymerization

เป็นการเกิดการเชื่อมโยงกันของสายโซ่พอลิเมอร์โดยใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ โดยตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะถูกกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal initiator) หรือการแตกตัวโดยใช้แสง (Photo initiator) เป็นต้น [15]



รูปที่ 2.4 การเกิดไฮโดรเจลด้วยการเชื่อมโยงแบบ Free Radical Polymerization

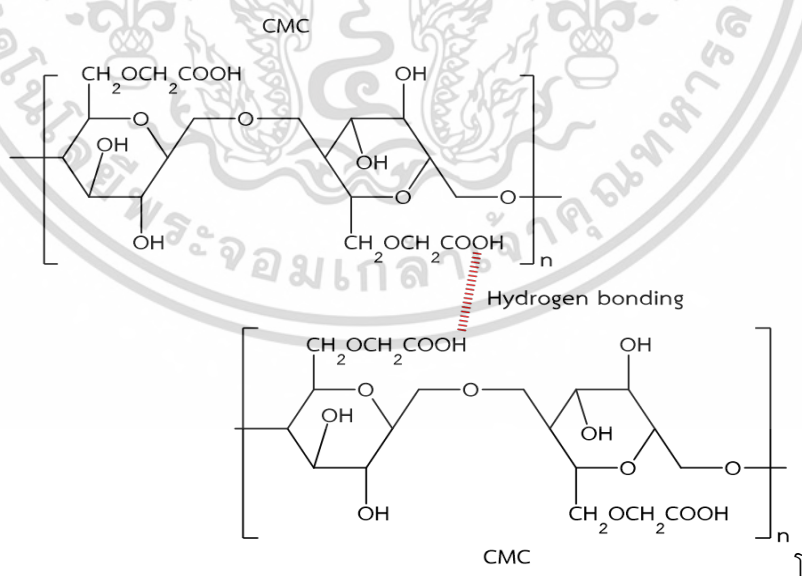
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical interaction)

เป็นการเชื่อมขวางสายโซ่พอลิเมอร์โดยไม่ต้องใช้สารช่วยในการเชื่อมโยง ซึ่งเกิดการเชื่อมโยงกันได้หลายวิธีขึ้นกับหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของพอลิเมอร์ ซึ่งการเชื่อมขวางทางกายภาพเป็นอันตรกิริยาที่ไม่ได้มีความแข็งแรงเท่าการเชื่อมขวางทางเคมี ตัวอย่างการเชื่อมขวางทางกายภาพที่พบมากได้แก่

2.1 Hydrogen bonding

การเชื่อมขวางทางกายภาพด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงอ่อน ๆ ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ โดยพันธะไฮโดรเจนเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอะตอมที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity; EN) สูง เช่นออกซิเจนของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลในคาร์บอกซิลิก (-COO⁻) ไนโตรเจนของหมู่อะมิโนในเอมีน (-NH₂) กับอะตอมของไฮโดรเจนที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่ำ เกิดอันตรกิริยากันเป็นพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดได้ทั้งภายในโมเลกุลด้วยตัวเองและเกิดระหว่างโมเลกุลกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น ตัวอย่างการเกิดพันธะไฮโดรเจนในไฮโดรเจลที่พบมาก เช่น การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกกับหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยตัวเอง หรือการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับหมู่คาร์บอกซิลิกของนาโนเซลลูโลส เป็นต้น

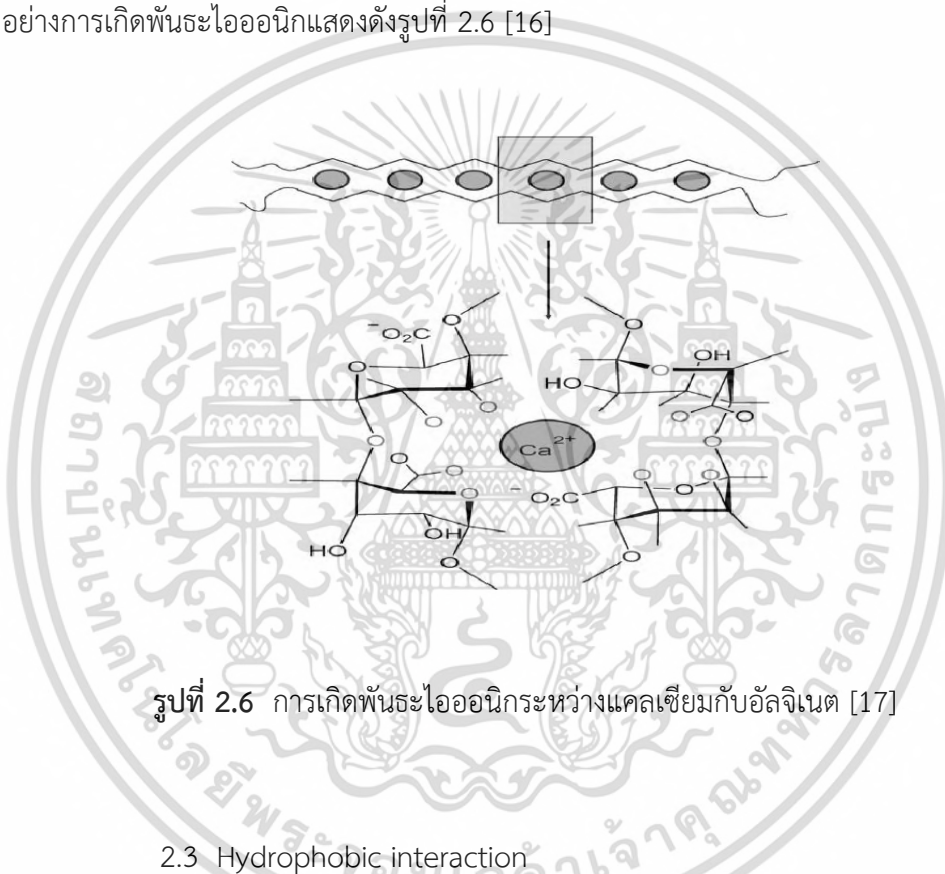


รูปที่ 2.5 การเกิดพันธะไฮโดรเจนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Ionic interaction

พันธะไอออนิกเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากกว่าพันธะไฮโดรเจน เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของอะตอมกับประจุลบของอะตอมโดยมีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างอะตอมทั้งสองซึ่งส่วนมากมักเกิดกับอะตอมของโลหะเนื่องจากอะตอมของโลหะมีอิเล็กตรอนวงนอก (Valence electron) ที่ไม่เสถียรทำให้ง่ายต่อการเกิดพันธะไอออนิกเพื่อให้มีอิเล็กตรอนวงนอกครบแปดตามกฎออกเตต การเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไอออนิกของไฮโดรเจลส่วนมากมักมีการเติม Ca^{2+} Fe^{3+} Fe^{2+} และ Ag^+ ลงไปเพื่อใช้เป็นสารเชื่อมโยงให้เกิดพันธะไอออนิกกับสายโซ่พอลิเมอร์ ตัวอย่างการเกิดพันธะไอออนิกแสดงดังรูปที่ 2.6 [16]

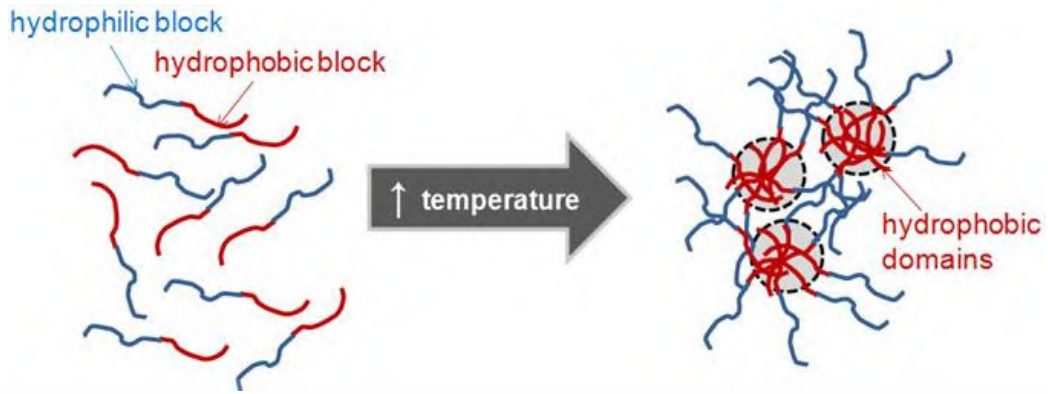


รูปที่ 2.6 การเกิดพันธะไอออนิกระหว่างแคลเซียมกับอัลจินเต [17]

2.3 Hydrophobic interaction

Hydrophobic interaction หรือแรงดึงดูดของโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำ โดยในโครงสร้างของพอลิเมอร์จะเกิดการรวมตัวกันอาจเกิดเป็นไมเซลล์หรือเกิดการรวมตัวกันอย่างหนาแน่นของสายโซ่พอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำและมีส่วนปลายสายโซ่หรือส่วนที่ชอบน้ำยื่นออกไปด้านนอก ทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นโครงร่างแหและสามารถขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจลที่คงรูปได้ ซึ่งการเกิดแรงดึงดูดของโมเลกุลที่ไม่ชอบน้ำนั้นสามารถถูกกระตุ้นได้จากการให้อุณหภูมิดังตัวอย่างในรูปที่ 2.7

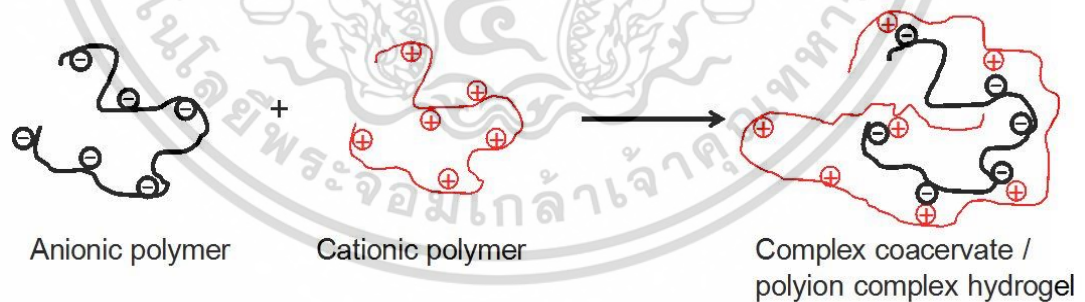
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเกิด Hydrophobic interaction [18]

2.4 Complex coacervation

เป็นการสร้างพันธะจากพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงข้ามกัน คือแคทไอออนิกหรือประจุบวกกับแอนไอออนิกหรือประจุลบมาทำให้เกิดอันตรกิริยากันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางกันเป็นโครงร่างแหสามมิติและสามารถเกิดเป็นไฮโดรเจล ตัวอย่างเช่นการเกิดไฮโดรเจลจากอัลจินตที่มีโครงสร้างเป็นประจุลบกับไคโตซานที่มีโครงสร้างเป็นประจุบวกสามารถเกิดอันตรกิริยาต่อกันได้และเกิดเป็นไฮโดรเจลขึ้น



รูปที่ 2.8 การเตรียมพอลิไอออนิกไฮโดรเจล [19]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การแบ่งประเภทของไฮโดรเจลตามองค์ประกอบของพอลิเมอร์

1. Homopolymeric hydrogels

Homopolymeric hydrogels คือไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ชนิดเดียว มีการเชื่อมโยงกันเป็นโครงร่างแหสามมิติ

2. Copolymeric hydrogels

Copolymeric hydrogels ประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่านั้นที่มีองค์ประกอบเป็นส่วนที่มีความชอบน้ำอย่างน้อย 1 ชนิด จัดเรียงตัวแบบสลับ (Alternating copolymer) แบบสุ่ม (Random copolymer) หรือแบบบล็อก (Block copolymer) เป็นโครงร่างแหสามมิติ

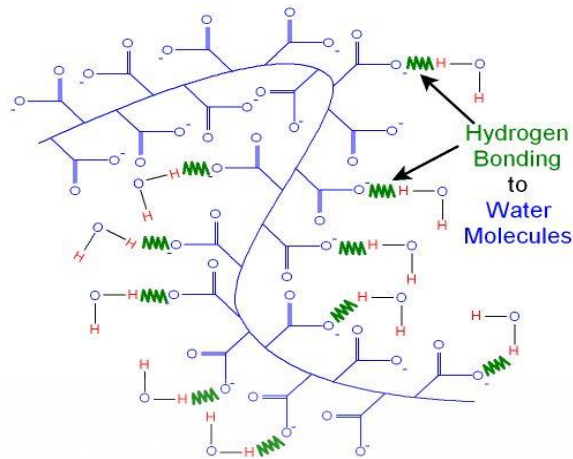
3. Multipolymer Interpenetrating polymeric hydrogel (IPN)

ไฮโดรเจลมีการเชื่อมโยง 2 ระบบ ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ เช่นมีการเชื่อมโยงกันระหว่างพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำกับพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ 1 ระบบ และมีการเชื่อมโยงกันระหว่างพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำกับพอลิเมอร์ที่ไม่ชอบน้ำอีก 1 ระบบ ส่งผลให้ไฮโดรเจลชนิดนี้มีความแข็งแรงมากขึ้น [20]

2.1.3 สมบัติของไฮโดรเจล

1. การดูดน้ำของไฮโดรเจล

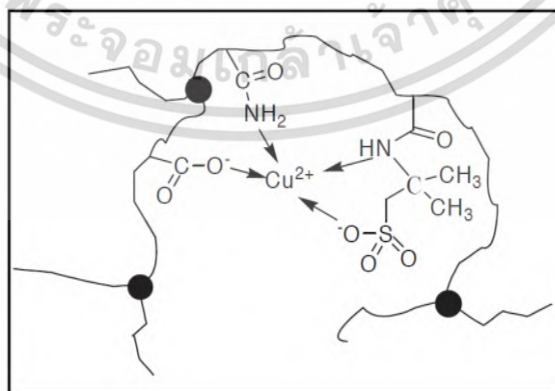
ไฮโดรเจลจัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำเนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่มีความชอบน้ำทำให้ไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับและกักเก็บน้ำได้ในปริมาณมาก ตัวอย่างเช่นเมื่อนำไฮโดรเจลที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกไปแช่น้ำ อะตอมของไฮโดรเจนที่มีหมู่คาร์บอกซิลิกในสายโซ่พอลิเมอร์จะทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น H_3O^+ ส่งผลให้ประจุของพอลิเมอร์อยู่ในสภาพขั้วที่เป็นลบและสามารถเกิดการสร้างพันธะกับอะตอมไฮโดรเจนของน้ำได้เกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนขึ้น และเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของน้ำเข้าสู่ไฮโดรเจลทำให้ไฮโดรเจลเกิดการบวมตัวขึ้น แต่ไฮโดรเจลยังมีความสามารถในการทนน้ำ เนื่องจากไฮโดรเจลมีโครงสร้างที่เป็นโครงร่างแหสามมิติ มีความแข็งแรงทำให้สามารถทนน้ำได้ นอกจากนี้ไฮโดรเจลที่สูญเสียน้ำไปแล้วยังมีความสามารถในการดูดซับน้ำให้กลับมาได้อีกด้วย



รูปที่ 2.9 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสายโซ่พอลิเมอร์ [21]

2. การดูดซับโลหะหนัก

การกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนมากับแหล่งน้ำหรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมสามารถทำได้ยาก ไฮโดรเจลเป็นวัสดุหนึ่งที่มีความสามารถในการกำจัดหรือแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ โดยไฮโดรเจลสามารถจับกับโลหะหนักและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้เรียกว่าพอลิคีเลโทเจน (Polychelators) โดยไอออนโลหะหนักจะคีเลตกับอะตอมที่ให้อิเล็กตรอนของพอลิเมอร์ได้ เช่น ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และออกซิเจนโดยมีการสร้างพันธะโคออดิเนตโควาเลนต์ (Coordinate covalent bonds) ขึ้น พอลิเมอร์ที่ใช้เป็นไฮโดรเจลจะมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถจับหรือเกิดพอลิคีเลโทเจนกับไอออนโลหะหนักได้ดี เช่น เอไมด์ แอมโมเนียม เอมีน และคาร์บอกซิล เป็นต้น



รูปที่ 2.10 การเกิดพอลิคีเลโทเจนระหว่างไฮโดรเจลกับโลหะหนัก [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

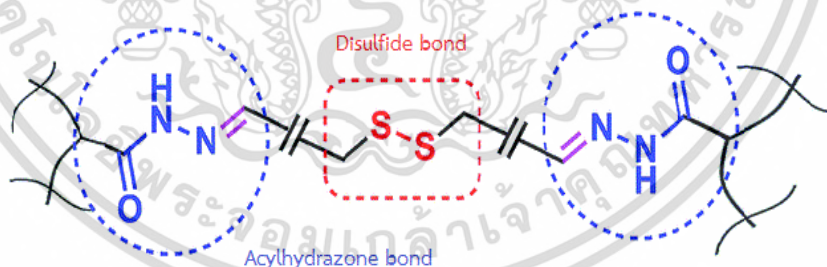
2.1.3.1 สมบัติในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีความชอบน้ำมีน้ำในโครงสร้างปริมาณมาก และมีความยืดหยุ่นดี นอกจากนี้ไฮโดรเจลยังมีกลไกในการซ่อมแซมตนเองโดยมีการผันกลับของพันธะ (Reversibility) ทำให้ไฮโดรเจลที่ได้รับความเสียหายเกิดการสร้างพันธะขึ้นใหม่และเกิดการซ่อมแซมตนเองได้ พันธะที่ใช้ในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล เช่น พันธะโควาเลนต์ พันธะไอออนิก พันธะไฮโดรเจน พันธะอิมิน และซูปเปอร์โมเลกุลโฮสต์-เกสต์ เป็นต้น

2.1.3.2 พันธะที่ใช้ในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

1. Dynamic covalent bonding

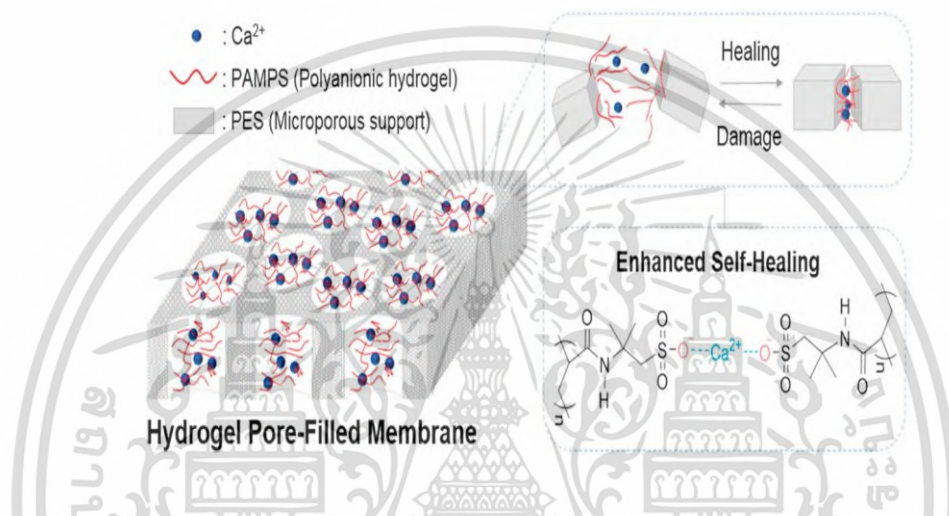
พันธะโควาเลนต์เป็นการเชื่อมโยงที่มีความแข็งแรง สามารถถูกทำลายและสร้างขึ้นใหม่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะ โดยสามารถเปลี่ยนเป็นพันธะที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์หรือพันธะที่เกิดอันตรกิริยาที่แข็งแรงเหมือนพันธะโควาเลนต์ เช่น พันธะโควาเลนต์สองชนิดที่รวมกัน คือ พันธะเอซิลไฮดราโซน (Acylhydrazone bond) และพันธะไดซัลไฟด์ (Disulfide bond) โดยพันธะเอซิลไฮดราโซนสามารถเกิดการผันกลับได้ในสภาวะที่เป็นกรดและพันธะไดซัลไฟด์สามารถเกิดการผันกลับในสภาวะที่เป็นเบสทำให้ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงด้วยพันธะโควาเลนต์สองชนิดนี้รวมกันเกิดการซ่อมแซมตนเองได้ในสภาวะที่เป็นกรดและเบสแต่ไม่สามารถเกิดการซ่อมแซมตนเองได้ในสภาวะที่เป็นกลาง



รูปที่ 2.11 Acylhydrazone bond และ Disulfide bond [22]

2. Ionic bonding

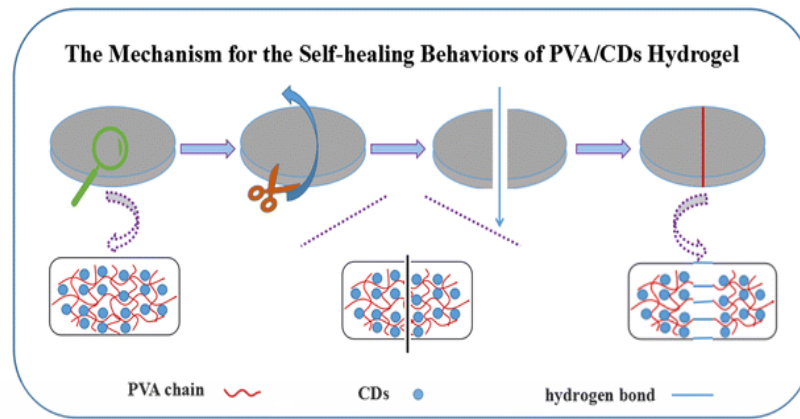
การซ่อมแซมตนเองด้วยพันธะไอออนิกสามารถเกิดการผันกลับของพันธะได้โดยไอออนที่มีประจุตรงข้ามกันเกิดการสร้างพันธะกันอีกครั้งหลังจากพันธะถูกทำลายลงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์สามารถกลับมาเชื่อมโยงกันได้อีกครั้ง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสถานะในการทดลองซึ่งถ้ามีการแตกตัวของโปรตอนจะส่งผลให้ไปขัดขวางการเกิดอันตรกิริยาของพันธะไอออนิกทำให้ไม่สามารถเกิดการซ่อมแซมตนเองได้ของไฮโดรเจล



รูปที่ 2.12 การผันกลับของพันธะไอออนิก [23]

3. Hydrogen bonding

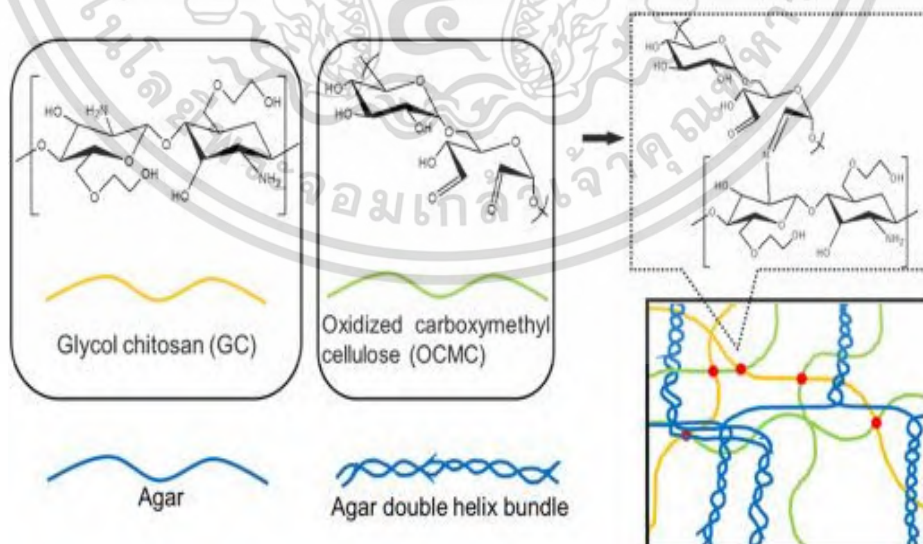
พันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงไม่มากนัก เป็นแรงยึดเหนี่ยวอ่อน ๆ และไม่แข็งแรงเท่าพันธะโควาเลนต์แต่สามารถเกิดการผันกลับได้ ทำให้ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนสามารถเกิดการซ่อมแซมตนเองได้ แต่ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับปริมาณของหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดอันตรกิริยากันและเกิดเป็นพันธะไฮโดรเจนได้ เช่นการเกิดพันธะไฮโดรเจนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่คาร์บอกซิลิกของพอลิเมอร์ข้างเคียง เป็นต้น



รูปที่ 2.13 การซ่อมแซมตนเองด้วยพันธะไฮโดรเจน [24]

4. Imine bonding

พันธะอิมินเป็นพันธะที่สามารถเกิดการผันกลับได้โดยมีสภาวะกรดเป็นตัวเร่ง ทำให้การเชื่อมโยงด้วยพันธะอิมินถูกนำมาใช้ในกระบวนการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล การสร้างพันธะอิมินเป็นการควบแน่นระหว่างแอลดีไฮด์หรือคีโตนกับเอมีน ตัวอย่างการเกิดพันธะอิมิน เช่น ไกลคอลไคโตซานกับออกซีไดซ์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส สามารถเกิดการสร้างพันธะอิมินได้ตรงหมู่อะมิโนของไคโตซานกับหมู่คาร์บอนิลของออกซีไดซ์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นต้น



รูปที่ 2.14 การเกิดพันธะอิมิน [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Supramolecular interactions

อันตรกิริยาแบบโฮสต์-เกสต์ คือการรวมตัวกันของโมเลกุลสองชนิดด้วยอันตรกิริยาที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์แต่เป็นการแทรกตัวของโมเลกุลโฮสต์เข้าไปอยู่ในโมเลกุลเกสต์ เรียกว่าซูปราโมเลกุล (Supramolecular) โดยอันตรกิริยาแบบโฮสต์-เกสต์ เกิดการผันกลับได้จึงสามารถใช้เป็นกลไกในการเชื่อมโยงพันธะเพื่อให้เกิดการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลได้

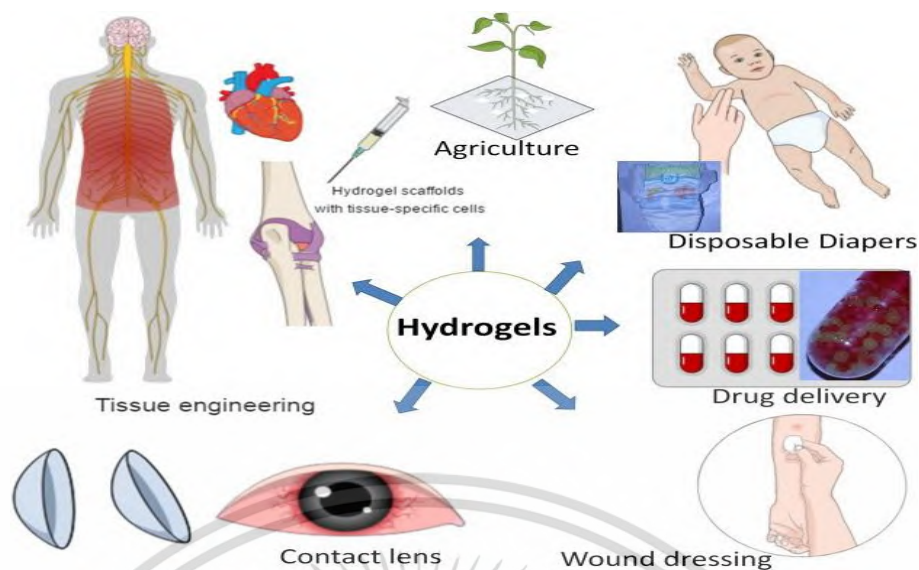


รูปที่ 2.15 Host-guest interaction [26]

2.1.4 การนำไฮโดรเจลไปใช้งาน

ในปัจจุบันมีการพัฒนาวัสดุทดแทนขึ้นมามากมายเพื่อให้ตอบสนองต่อการใช้งาน ในด้านความแข็งแรง ความสวยงามรวมถึงความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไฮโดรเจลเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจและถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ย่อยสลายได้ง่าย และสามารถเลือกใช้สารตั้งต้นในการสังเคราะห์ได้หลากหลายเพื่อให้เหมาะสมกับสมบัติเชิงกลและการใช้งาน การนำไฮโดรเจลไปใช้งานโดยทั่วไปมีทั้งการใช้งานในด้านการเกษตรเป็นไฮโดรเจลสำหรับเพาะปลูกพืช การนำไฮโดรเจลไปใช้งานในด้านการกำจัดสีหรือโลหะหนักในน้ำเสียหรือไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่อค่า pH และการนำไฮโดรเจลไปใช้งานในด้านการแพทย์ เช่น วิศวกรรมเนื้อเยื่อ โครนัลเซลล์ หรือเป็นไฮโดรเจลปิดแผลที่สามารถปลดปล่อยตัวยาได้ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาไฮโดรเจลให้มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองเพื่อให้มีความแข็งแรงคงทนและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การนำไฮโดรเจลไปใช้งาน [27]

2.2 โขเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium Carboxymethylcellulose)

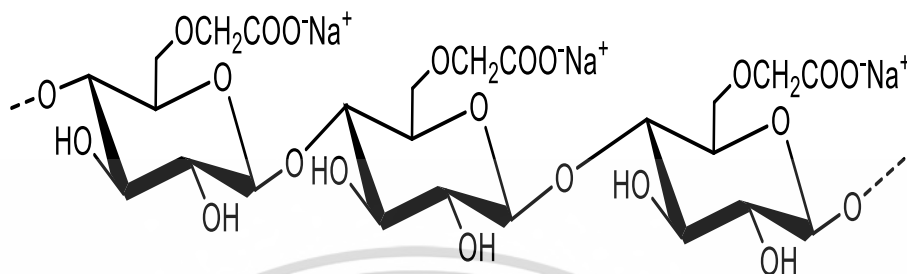
2.2.1 โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสจากธรรมชาติ จัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำ (hydrophilic) โขเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสถูกตัดแปรรูปโครงสร้างมาจากเซลลูโลส โดยมีการแทนที่ตำแหน่งไฮดรอกซิลในโครงสร้างเดิมด้วยหมู่คาร์บอกซีเมทิล การเตรียมโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถเตรียมได้จากเซลลูโลสคุณภาพสูง ส่วนใหญ่ได้จากพวกไม้ยืนต้น เช่น สนและยูคาลิปตัส หรือวัสดุเหลือใช้จากพืชท้องถิ่น เช่น ใบสับปะรด ต้นกก ช้างข้าวโพด กาบมะพร้าว ก้านกล้วย เป็นต้น

ลักษณะทางกายภาพของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นผงสีขาวขนาดเล็ก สามารถละลายน้ำได้ดี เมื่อละลายน้ำจะมีลักษณะเป็นสารขุ่นเหลวและไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ โขเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารที่ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 2,100–500,000 กรัม/โมล มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 6.5–8.0 เกรดของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถแบ่งได้จากค่าองศาการแทนที่ ค่าองศาการเกิดพอลิเมอร์ และความสม่ำเสมอของหมู่แทนที่ โดยในเชิงพาณิชย์มีค่าองศาการแทนที่ประมาณ 0.4-1.5 จะทำให้ CMC ละลายน้ำได้ดี แต่ CMC ที่มี

ค่าองศาการแทนที่อยู่ในช่วง 0.1-0.3 จะละลายน้ำได้ไม่ดี CMC มีสมบัติเป็นสารช่วยเพิ่มความหนืด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นสารเพื่อให้คงสภาพและเป็นสารช่วยในการยัดเกาะ นอกจากนี้ยังเป็นสารที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต [28]



รูปที่ 2.17 โครงสร้างโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

2.2.2 การนำโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไปใช้งาน

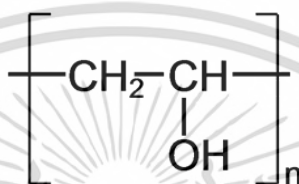
โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหารและยา เครื่องสำอาง อุตสาหกรรมผงซักฟอก อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารช่วยป้องกันการตกผลึกในน้ำเชื่อม เป็นสารช่วยให้เกิดการแขวนลอยในนมและน้ำผลไม้ เป็นสารที่ช่วยให้เกิดความหนืดและเป็นสารเพิ่มเสถียรภาพ ในอุตสาหกรรมยา มีการใช้โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเคลือบเม็ดยาเพื่อป้องกันการละลายในกระเพาะอาหารที่มีสถานะที่เป็นกรดใช้สำหรับยาบางชนิดที่ต้องการให้ออกฤทธิ์ที่ลำไส้ ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอางใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดเพื่อให้มีความคงตัวใช้ในครีม สบู่เหลว ยาสีฟัน หรือยาสระผม และยังมี การนำไปผสมในผงซักฟอกเพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกที่หลุดออกจากเสื้อผ้ากลับมาติดบนผ้าเนื่องจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีประจุลบทำให้เกิดการผลักอนุภาคสิ่งสกปรกออกไป มีการนำไปใช้เป็นสารแขวนลอยในการผสมดินในอุตสาหกรรมเซรามิกและนอกจากนี้ยังมีการใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ มักใช้เป็นสารที่ทำให้สีพิมพ์ผ้ามีความหนืดข้นและใช้เป็นสารเคลือบกระดาษเพื่อให้หมึกติดกระดาษได้ดียิ่งขึ้น [29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ Poly(vinyl alcohol)

2.3.1 โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVOH หรือ PVA) มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้าง ลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาวขนาดเล็ก ไม่มีกลิ่นไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เมื่อละลายน้ำแล้วจะใสไม่มีสี



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [30]

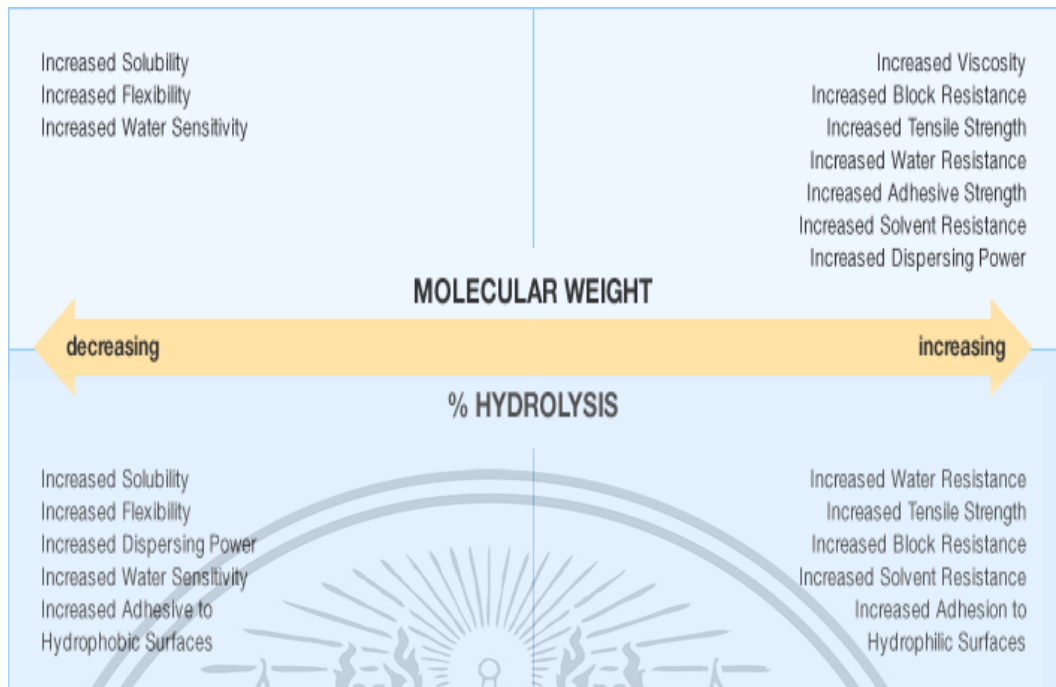
2.3.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความชอบน้ำและละลายน้ำได้ดี สามารถละลายน้ำได้หมดที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส มีสมบัติเป็นกาว ทนต่อน้ำมันและไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดีนอกจากนี้ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังสามารถใช้เป็นตัวป้องกันกลิ่นและออกซิเจนได้

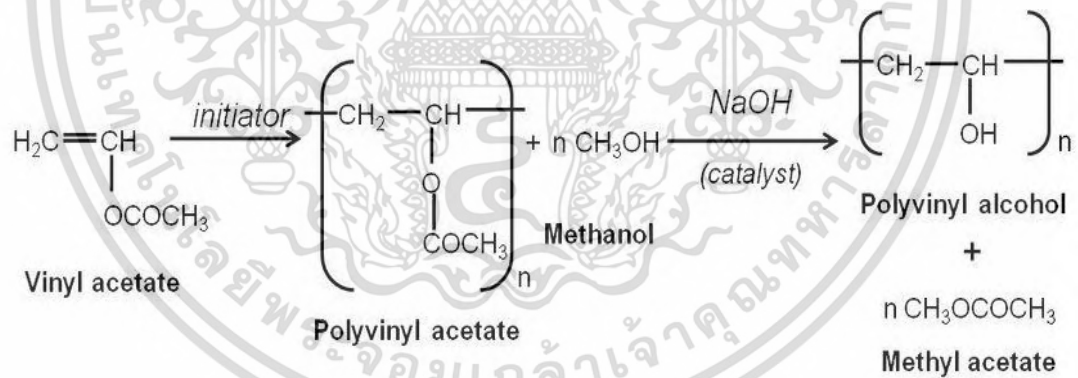
การสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สังเคราะห์ได้จากไวนิลอะซิเตต (Vinyl acetate) เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้โคพอลิเมอร์ (Copolymer) ระหว่างไวนิลแอลกอฮอล์และไวนิลอะซิเตตซึ่งเกรดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถแบ่งได้จากปริมาณของไวนิลแอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นเรียกว่า ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis level) โดยปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะอยู่ในช่วงร้อยละ 87-99 ซึ่งส่งผลต่อสมบัติการละลายน้ำของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยถ้ามีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิส 99 เปอร์เซ็นต์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะละลายน้ำยากขึ้น เนื่องจากการมีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิสสูงส่งผลให้มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างมากทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนมากและเกิดผลึกขึ้นมาก การละลายน้ำจึงยากขึ้น น้ำหนักโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์อยู่ในช่วงหลักพันถึงหลักแสน ซึ่งส่งผลต่อความหนืด โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมีความหนืดสูงและมี

ความสามารถในการละลายที่ลดลง [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [32]



รูปที่ 2.20 ขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การนำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปใช้งาน

การใช้งานพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในอุตสาหกรรมเซรามิกนิยมใช้เป็นตัวประสานเนื่องจากมีความอ่อนตัว (Plasticize) สามารถเข้ากันได้ดีกับสารหล่อลื่นชนิดอื่น ๆ นอกจากนี้สมบัติการละลายน้ำได้ดีของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังส่งผลให้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถกระจายตัวได้ดีในสารแขวนลอย ไม่เกาะกลุ่มกันเป็นก้อนในชิ้นงาน ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ นำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไปทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้ได้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ละลายน้ำและนำมาทำเป็นเส้นใยที่สามารถดูดซับน้ำได้ดี มีความแข็งแรงทนทาน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีสมบัติเป็นสารแขวนลอยและเป็นสารที่ช่วยยึดติดมีความยืดหยุ่นดีจึงนิยมนำมาทำเป็นกาวนอกจากนี้ยังนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฟิล์มเคลือบกระดาษเพื่อป้องกันรอยขีดข่วนและช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษได้ ในปัจจุบันมีการพัฒนานำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หรือถุงพลาสติกที่สามารถละลายน้ำได้ง่ายเพื่อลดมลภาวะทางน้ำ ลดขยะในแหล่งน้ำและมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในการใช้งานด้านการแพทย์มีการใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อใช้เป็นผิวหนังเทียม วัสดุปิดแผลเพื่อปลดปล่อยตัวยา คอนแทคเลนส์ และมีการนำมาพัฒนาเป็นไฮโดรเจลที่มีความสามารถในการซ่อมแซมตนเองเพื่อนำไปใช้งานในด้านการแพทย์และด้านอื่น ๆ ให้ตอบสนองต่อการใช้งานและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น [31]

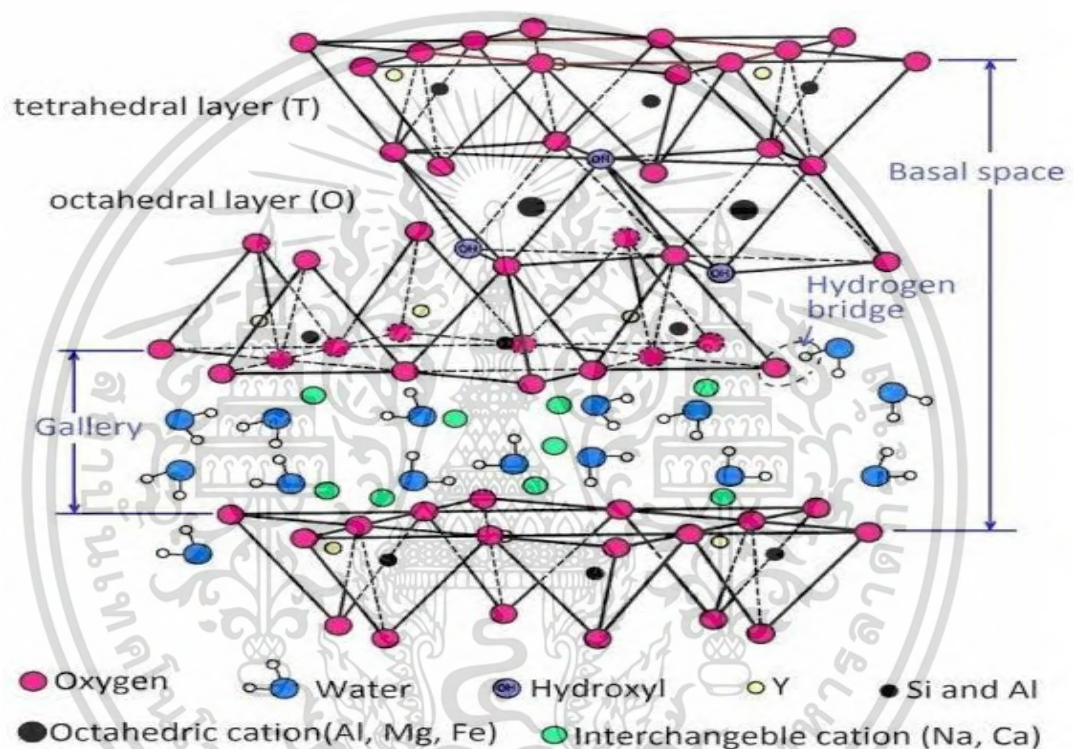
2.4 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite; MMT)

2.4.1 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์

มอนต์มอริลโลไนต์คือแร่ที่ได้มาจากธรรมชาติเป็นแร่จากดินภูเขาไฟ มีสีขาวหรือสีเหลืองอ่อน โครงสร้างทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์คือ $(\text{OH})_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นสารประกอบของไฮเดรตอลูมิเนียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์อยู่ในรูปของอนุภาคขนาดเล็ก โครงสร้างทางกายภาพของอนุภาคมอนต์มอริลโลไนต์มีลักษณะเป็นแผ่นซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ แต่ละแผ่นมีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบทรงสี่หน้า (Tetrahedral) และทรงแปดหน้า (Octahedral) ในชั้นที่จัดเรียงแบบทรงสี่หน้าประกอบไปด้วยซิลิกาและออกซิเจนเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ยึดเกาะกัน ชั้นที่มีการจัดเรียงแบบทรงแปดหน้าประกอบด้วยอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียมยึดเกาะกับออกซิเจนเป็นอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) โดยอัตราส่วนของ SiO_2 จะมีมากกว่า Al_2O_3 แร่มอนต์มอริลโลไนต์มีแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างชั้นแต่ละชั้นเป็นแรงอ่อน ๆ คือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals force) และมีประจุบวกระหว่าง

เอกสารนี้เขียนของมอนต์มอริลโลไนต์จึงทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปตรงกลางระหว่างชั้นของแร่ได้และเกิดการไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวมตัว ระยะห่างระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์มีความกว้างประมาณ 1-2 นาโนเมตร โครงสร้างแต่ละชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์อาจมีประจุเกิดขึ้นหรือมีประจุที่เปลี่ยนไปได้เนื่องจากการแทนที่ขององค์ประกอบอื่นในผลึกแรโดยไม่ต้องมีการตัดแปรรโครงสร้าง เช่น Al^{3+} แทนที่ Si^{4+} ในชั้นที่จัดเรียงแบบทรงสี่หน้า และมีการแทนที่ Al^{3+} ด้วย Mg^{2+} , Fe^{2+} และ Fe^{3+} ในชั้นที่จัดเรียงแบบทรงแปดหน้า ในระนาบแต่ละชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์จะมีประจุลบและกลุ่มของหมู่ไฮดรอกซิลที่เชื่อมโยงกับอะลูมิเนียมหรือแมกนีเซียมไว้ระหว่างชั้น



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [34]

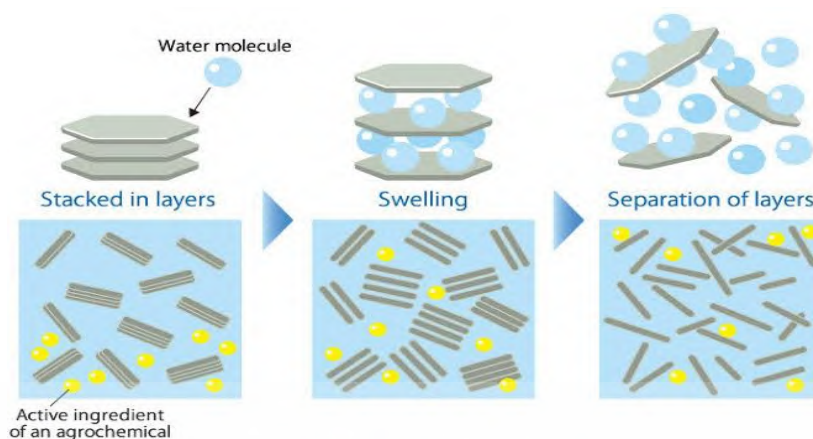
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติจำเพาะของมอนต์มอริลโลไนต์ [35]

สมบัติ	ข้อมูล
ความหนาแน่น (Density)	2-3 g/cm ³
ระบบผลึก (Crystal system)	ระบบโมโนคลินิก (Monoclinic)
ความแข็งที่พื้นผิว (Hardness)	1-2 Mohs scale
การแตก (Fracture)	แตกแบบไม่เรียบ (Uneven)
แนวแตก (Cleavage)	แนวแตกแบบสองหน้าขนาน
ประกาย (Luster)	เหมือนดิน (Earthy, dull)
ความโปร่งใส (Transparency)	โปร่งแสง (Translucent)
สี (Color)	สีขาว สีเหลืองอ่อน สีเหลือง

2.4.2 การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในแร่เบนโทไนท์ มีโครงสร้างเป็นผลึกรูปแผ่นที่มีความหนาประมาณ 1 นาโนเมตรและกว้างหลายร้อยนาโนเมตร อยู่ในรูปผงขนาดเล็กซึ่งมีการเรียงซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ เมื่อนำมาละลายในน้ำโมเลกุลของน้ำจะแทรกผ่านระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์และจะเป็นตัวแยกผลึกรูปแผ่นแต่ละชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ออกจากกัน ผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์มีประจุลบบนผิวและมีประจุบวกระหว่างชั้นดังนั้นเมื่อมีการกระจายตัวในน้ำน้ำจะแทรกผ่านเข้าไประหว่างชั้น อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของน้ำจะเกิดอันตรกิริยากับประจุบวกของมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ชั้นแต่ละชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์แยกห่างออกจากกันและเกิดการบวมตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ ผลึกรูปแผ่นแต่ละผลึกจะเกิดการผลักกันระหว่างผิวด้านบนที่มีประจุลบเหมือนกันทำให้มอนต์มอริลโลไนต์แต่ละผลึกอยู่ห่างกันและเกิดการกระจายตัวส่วนระยะห่างระหว่างชั้นแต่ละชั้นในผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์จะเกิดการบวมตัวเนื่องจากมีน้ำเข้ามาแทรกในแต่ละชั้นทำให้มอนต์มอริลโลไนต์เกิดการกระจายตัวและบวมตัวที่ติน้ำ

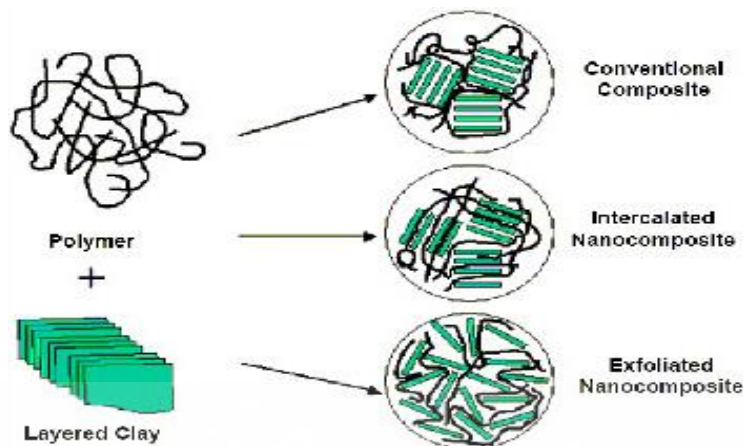


รูปที่ 2.22 การบวมตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ [36]

2.4.3 สมบัติการเสริมแรงของมอนต์มอริลโลไนต์

สมบัติการเสริมแรงของมอนต์มอริลโลไนต์มักถูกนำมาใช้กับพอลิเมอร์ โดยสายโซ่พอลิเมอร์ จะแทรกเข้าไปในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยในการเสริมแรงให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดียิ่งขึ้น แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานคือถ้ามีการใส่สารเสริมแรงในปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการ ตกตะกอนหรือเกิดการรวมกลุ่มกันของสารเสริมแรงทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุลดลงได้ จึงควร เลือกใช้สารเสริมแรงในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี ทำให้ค่าความแข็งแรง ความสามารถในการทนทานต่อความร้อน ความสามารถในการลดการซึมผ่านของก๊าซเพิ่มขึ้น มีการ แบ่งกลุ่มการกระจายตัวของสารเสริมแรงออกเป็น 3 แบบ โดยการกระจายตัวแบบ exfoliated nanocomposite เป็นการกระจายตัวของสารเสริมแรงอย่างสม่ำเสมอไม่รวมกลุ่มกันเป็นก้อนและมีการกระจายตัวได้ดีกว่าแบบ intercalated nanocomposite และแบบ conventional composite ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 การกระจายตัวของสารเสริมแรงในนาโนคอมโพสิต [37]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wen Jiang Zheng และคณะ [4] เตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ด้วยวิธีการแช่ในกรดซิตริกเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมไอออน (Na^+) ในโครงสร้างของ CMC กับโปรตอน (H^+) ในโครงสร้างของกรดซิตริก ทำให้หมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) ของ CMC ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของ CMC โมเลกุลอื่น ๆ ได้เกิดเป็นไฮโดรเจล มีการทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลโดยนำไปทดสอบการกดอัด (Compressive test) และการดึงยืด (Tensile test) และทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่เกิดจากการผันกลับของพันธะไฮโดรเจนหลังจากไฮโดรเจลถูกตัดขาดออกเป็น 2 ส่วน แล้วนำมาต่อติดกัน นำไปทดสอบความแข็งแรงกด โดยมีค่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองประมาณ 80 %

Yong Mei Chen และคณะ [8] เตรียมไฮโดรเจลเรืองแสงจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส คาร์บอนิลไดอิมิดาซอล ($\text{N,N}'$ -carbonyldiimidazole; CDI) และกรดซิตริก โดยมีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไอออนิกระหว่าง Al^{3+} กับโมเลกุลของ CMC และ PCAD มีการทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลด้วยการดึงยืดพบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีการเติม PCAD และ AlCl_3 15 wt% ของน้ำหนัก CMC มีความแข็งแรงมากที่สุดและไฮโดรเจลที่ได้มีความใสและสามารถเรืองแสงได้ดี การทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีการเติม PCAD และ AlCl_3 15 wt% ของน้ำหนัก CMC และถูกเก็บไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองดีที่สุดโดยมีค่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเอง 80%

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่ส่งไปขอคำปรึกษาและขอคำแนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Wenjiao Ge และคณะ [9] เตรียมไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้อย่างรวดเร็วและมีความต้านทานต่อเชื้อ *S. aureus* โดยสารตั้งต้นที่ใช้คือเส้นใยนาโนเซลลูโลส (Cellulose nanofibrils; CNF) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และกรดแทนนิก (Tannic acid; TA) ไฮโดรเจลที่ได้มีการเชื่อมโยงระหว่างบอแรกซ์กับ TA ตรงหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ไฮดรอกซิลของ TA หรือเกิดการเชื่อมโยงระหว่างบอแรกซ์กับหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ไฮดรอกซิลของ CNF เกิดพันธะเอสเทอร์ (Dynamic borate ester bond) นอกจากนี้ยังเกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่าง PVA กับ CNF, TA กับ PVA, TA กับ CNF ในงานวิจัยมีการทดสอบความสามารถในการดักจับไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลที่มีเพียง PVA และบอแรกซ์ ไม่สามารถดักจับได้แต่ไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบของ PVA CNF และบอแรกซ์สามารถดักจับได้ดีแต่สูตรที่ดีที่สุดคือไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบของ PVA, CNF, TA และบอแรกซ์ซึ่งสามารถดักจับได้ถึง 20 เท่าของความยาวเดิม ดังนั้นการเพิ่ม TA เข้าไปเป็นการเพิ่มโอกาสในการเชื่อมโยงช่วยให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ TA ยังช่วยยับยั้งเชื้อ *S. aureus* ได้ดี ศึกษาได้จากบริเวณ Clear zone ที่เกิดการยับยั้งเชื้อ *S. aureus* นอกจากนี้มีการศึกษาสมบัติในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบของ PVA, CNF, TA และบอแรกซ์สามารถซ่อมแซมตนเองได้อย่างรวดเร็วภายใน 10 วินาที หลังจากไฮโดรเจลได้รับความเสียหายในทันที

Yixi Wang และคณะ [3] มีการสังเคราะห์เซลลูโลสที่สามารถต้านทานเชื้อแบคทีเรียได้เพื่อใช้ในการเตรียมไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยง 2 ระบบ และสามารถซ่อมแซมตนเองได้ สารตั้งต้นที่ใช้คือ Quantanized cellulose (QCE) และ PVA โดยเติม Acrylic acid (AA) และ $FeCl_3$ เป็นสารเชื่อมโยงเพื่อให้เกิดพันธะไอออนิกเป็นการเชื่อมโยงทางเคมีและมีการเติม N,N'-methylene diacrylamide (MBA) เพื่อเป็นตัวเชื่อมโยงกับ Fe^{3+} และ QCE มีการเชื่อมโยง 2 ระบบในโครงสร้างคือการเชื่อมโยงด้วยพันธะไอออนิกและพันธะไฮโดรเจนโดยส่วนของ QCE มีโครงสร้างที่มีประจุบวกทำให้มีความต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรีย ในส่วนของ PVA จะช่วยเพิ่มความเหนียวและความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจล จากงานวิจัยนี้มีการทดสอบความแข็งแรงของไฮโดรเจลด้วยการทดสอบความแข็งแรงดึงและความแข็งแรงกดพบว่าไฮโดรเจลที่มีการเติม PVA ในปริมาณที่มากส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดสูงและมีค่าความแข็งแรงดึงสูง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการปรับปริมาณของ QCE พบว่าปริมาณ QCE ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดลดลงแต่ค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น การทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล ทดสอบโดยการตัดไฮโดรเจลออกเป็น 2 ส่วนแล้วนำมาต่อให้ติดกัน ไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองมาแล้วในระยะเวลาที่ต่างกันจะมีค่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองที่แตกต่างกันโดยที่ระยะเวลา 16 ชั่วโมง ค่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองมีค่าสูงถึง

เอกสารนี้ 93.45% ารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Xin Jing และคณะ [7] เตรียมไฮโดรเจลที่ตอบสนองต่อแรงกดอัด แรงดึงยืด แล้วนำมาแปลงสัญญาณเป็นกระแสไฟฟ้าเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับร่างกายของมนุษย์ สารตั้งต้นที่ใช้เตรียมไฮโดรเจลคือ PVA และ เส้นใยนาโนเซลลูโลส (CNF) โดยมีการเชื่อมโยง 2 ระบบ สารที่ใช้ในการเชื่อมโยงคือ Sodium tetraborate และ Calcium chloride (CaCl_2) โดยเกิดการสร้างพันธะระหว่าง Ca^{2+} กับ เซลลูโลสที่หมู่คาร์บอกซิเลตเป็นพันธะไอออนิกและเกิดการสร้างพันธะระหว่างบอเรตกับ PVA นอกจากนี้ยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง PVA กับ PVA ด้วยกันเองและ PVA กับ CNF ได้ด้วยเช่นกัน นำไฮโดรเจลที่ได้ไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยการดึงยืดพบว่าไฮโดรเจลจาก PVA มีค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดต่ำกว่าไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบของ PVA กับ CNF การทดสอบสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลทดสอบโดยการนำไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองแล้วไปดึงยืดพบว่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองใกล้เคียงกับไฮโดรเจลตั้งต้น การทดสอบความสามารถในการตอบสนองต่อการกดอัดและการดึงยืดทดสอบได้จากการต่อขั้วไฟฟ้าลงบนไฮโดรเจลทั้งสองฝั่งและคั่นกลางด้วยแผ่นพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) ให้แรงกดอัดและแรงดึงยืดพบว่ามีค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงประจุเกิดขึ้น เมื่อมีการปรับขนาดของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นพบว่าผลทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงประจุเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีปริมาณของโซเดียมไอออน (Na^+) แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ภายในไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น

Jai Prakash Chaughary และคณะ [38] เตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลอะกาโรส (Carboxymethylagarose; CMA) และ PVA มีการเชื่อมโยงทางกายภาพขึ้นด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่าง PVA กับ CMA และเชื่อมโยงทางเคมีด้วยบอแรกซ์กับ PVA ไฮโดรเจลที่ได้มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้องและความแข็งแรงสามารถกดอัดและดึงยืดได้มาก เมื่อเทียบกับความยาวเดิมของไฮโดรเจลทำให้สามารถนำไฮโดรเจลชนิดนี้ไปเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มหรือเส้นใยได้

Jiabao Niu และคณะ [39] พัฒนาไฮโดรเจลที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองและมีสมบัติเชิงกลที่ดีด้วยการเชื่อมโยงทางกายภาพ 2 ระบบ โดยการเกิดพันธะไอออนิกและพันธะไฮโดรเจน สารตั้งต้นของไฮโดรเจลในงานวิจัยนี้คือ พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) เสริมแรงด้วยเส้นใยเซลลูโลสและใช้ Fe^{3+} ช่วยเชื่อมโยงเพื่อให้เกิดพันธะไอออนิก มีการทดสอบความแข็งแรงของไฮโดรเจลโดยนำไฮโดรเจลที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร มาทดสอบความสามารถในการรับน้ำหนักซึ่งสามารถรับน้ำหนักได้ถึง 200 กรัม และสามารถยืดได้ถึง 12 เท่าของความยาวเดิม ในการทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลมีการใช้น้ำทาบริเวณรอยตัดของไฮโดรเจลเพื่อช่วยให้เกิดการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jiezhou Pan และคณะ [40] เตรียมไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้และสามารถต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรียเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์จากคาร์บอกซีเมทิลไคโตซาน (Carboxymethyl chitosan nanoparticles; CMCS NPs) สารเชื่อมโยงที่ใช้คือ polyacrylic acid (PAA) และ Al^{3+} ในงานวิจัยนี้มีการเชื่อมโยง 3 ระบบ โดยเกิดพันธะโควาเลนต์ แรงระหว่างประจุและพันธะไฮโดรเจน การทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากงานวิจัยนี้สามารถซ่อมแซมตนเองได้ในระยะเวลา 24 ชั่วโมง และเมื่อรบกวนระบบด้วยกรด เบสและเกลือ เช่น กรดอะซิติก สารละลายแอมโมเนียและโซเดียมคลอไรด์ ไฮโดรเจลยังคงความสามารถในการซ่อมแซมตนเองได้

Xianming Qi และคณะ [10] เตรียมไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้จากไซโลส (Xylose) และใช้ Methylguanidine hydrochloride ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ที่จะใช้กราฟต์กับไซโลสที่เป็นสายโซ่หลัก มีการใช้ Ethylene glycol เป็นสารช่วยเชื่อมโยง จากงานวิจัยใช้โซเดียมพอลิอะคริเลตเป็นตัวช่วยให้มอนอเมอร์ไซโลสเกิดการกระจายตัวได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากเกิดการเกี่ยวพันกันและเกิดการผลักรันของมอนอเมอร์ไซโลสในแต่ละผลึกที่มีประจุลบเหมือนกัน การเกิดไฮโดรเจลเกิดขึ้นโดย Xylose ที่ต่อกับ Methylguanidine hydrochloride เกิดการเชื่อมโยงกับมอนอเมอร์ไซโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนและแรงระหว่างประจุ (Electrostatic) โดยการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลเกิดจากการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์เข้าหากันแล้วเกิดพันธะไฮโดรเจนและแรงระหว่างประจุทำให้ไฮโดรเจลกลับมาเชื่อมติดกันได้อีกครั้ง

Mohammad Sirousazar และคณะ [41] ศึกษาวัสดุ นาโนคอมโพสิตที่เตรียมได้จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเสริมแรงด้วยมอนอเมอร์ไซโลสเตรียมเป็นไฮโดรเจลด้วยกระบวนการ Freeze-thaw ในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณมอนอเมอร์ไซโลสในไฮโดรเจลส่งผลให้สมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลดีขึ้น โดยค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูงขึ้น เนื่องจากมอนอเมอร์ไซโลสมีส่วนช่วยทำให้ขนาดของช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง และช่องว่างในการเชื่อมโยงลดลง ดังนั้นมอนอเมอร์ไซโลสจึงเป็นสารเสริมแรงที่ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับไฮโดรเจลได้ดี

Kazutoshi Haraguchi และคณะ [42] เตรียมไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้จากพอลิเอ็น เอ็น-ไดเมทิลอะคริลาไมด์ (poly(N,N-dimethylacrylamide)), พอลิเอ็นไอโซโพรพิลอะคริลาไมด์ (poly(N-isopropylacrylamide)) และ Inorganic clay ถูกใช้เป็นสารเชื่อมโยงไฮโดรเจลถูกเตรียมด้วยวิธี free-radical polymerization โดย Inorganic clay สามารถกระจายตัวได้ดีและเกิดอันตรกิริยากันระหว่าง clay กับสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังเกิด

การเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์กับแผ่นชั้นของดินเหนียวช่วยให้ไฮโดรเจลเกิดการซ่อมแซมตนเองได้อีกครั้งเมื่อได้รับความเสียหาย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองได้และมีสมบัติเชิงกลที่ดีด้วยสารตั้งต้นที่เป็นวัสดุจากธรรมชาติและวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผ่านกระบวนการเชื่อมโยงทางกายภาพ โดยสารตั้งต้นที่ใช้คือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เสริมแรงด้วยแร่ธรรมชาติคือมอนต์มอริลโลไนต์ ใช้วิธีการขึ้นรูปไฮโดรเจลด้วยการแช่ในสารละลายกรดเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเกิดการเชื่อมโยงด้วยพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิลิกและหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยกันเองและของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ไฮโดรเจลที่ได้นำไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการกดอัดและการดึงยืดและทดสอบประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose; Na-CMC) Acros organics Co.,Ltd MW 90,000, DS = 0.7
2. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เกรดการค้า NL-05, Nippon Gohsei Osaka Japan Viscosity, 4% 20°C, = 4.6-6 mPa.s, DS = 99-100
3. มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite ; MMT) เกรดการค้า SAC P (200 mesh), Thai Nippon Chemistry Industry
4. กรดซิตริก (Citric acid) ACS-ISO-For analysis, Assay on dry : 99.5-100.5%
5. โซเดียมเบนโซเอต (Sodium benzoate) เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Reagent Co.,Ltd
6. โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium Dihydrogen Phosphate CARLO ERBA Reagent Co.,Ltd
7. ไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Dipotassium Hydrogen Phosphate) CARLO ERBA Reagent Co.,Ltd
8. ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลินชนิดเม็ด (Phosphate buffer saline ; PBS) EMD Chemicals Inc.
9. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อุปกรณ์เครื่องแก้ว
2. ยูนิเวอร์ซัลอินดิเคเตอร์ Merck Co.,Ltd
3. จานเพาะเชื้อ
4. มีดผ่าตัด (Scalpel Blade) เบอร์ 23 Swann Morton Co.,Ltd
5. โต๊ะปรับระดับ
6. แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด $3 \times 7.8 \times 3 \text{ cm}^3$ (รูปที่ 3.1 ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. แม่พิมพ์ซิลิโคน ขนาด 4×4×4 cm³ (รูปที่ 3.1 ข)



ก.



ข.

รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์ซิลิโคน

8. แท่งแม่เหล็กปั่นกวนสาร (Magnetic bar)
9. เครื่องอัลตราโซนิก รุ่น S30tt, Elma Schmidbauer GmbH
10. เครื่องปั่นกวนสารละลายและให้ความร้อน (Magnetic Stirrer) IKA Co.,Ltd รุ่น HS-7
11. เครื่องปั่นกวนช่วยผสมสารละลาย (Mechanical overhead stirrer) IKA Co.,Ltd
12. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง Denver Instrument Co.,Ltd รุ่น SI-234
13. เครื่องชั่ง ทศนิยม 1 ตำแหน่ง DIETHLM & Co., Ltd
14. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) Universal 320 Hettich GmbH & Co. KG 78532 Tuttingen, GERMANY
15. เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Tensile Testing Machine) Lloyd Instruments Co.,Ltd รุ่น LR5K
16. คูโรมิเตอร์แบบชอร์ (Shore durometer) Intro Enterprise Co.,Ltd
17. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ยี่ห้อ FEI รุ่น QUANTA250
18. กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital microscope) รุ่น Dino-lite Pro 2, ANMO Electronics Corporation
19. เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer), CoolSafe™ Co.,Ltd., รุ่น Chamber CC5300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT)

1. เติม MMT 0.1, 0.5, และ 1 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ใช้บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนของผสมด้วยแท่งแม่เหล็กปั่นกวนสารเป็นระยะเวลา 30 นาที จน MMT กระจายตัว
3. นำของผสม MMT ไปกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิค โหมด Sweep เป็นระยะเวลา 30 นาที

3.4 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายกรดซिटริกความเข้มข้น 8 โมล/ลิตร

1. ใส่กรดซिटริก 153.6 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร
2. ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนสารละลายจนกรดซिटริกละลายหมด

3.5 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลินพีเอช 5.5

1. ชั่งน้ำหนักโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 13.61 กรัม
2. ละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตด้วยน้ำกลั่น
3. เทสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตจากข้อที่ 2 ลงในขวดปรับปริมาตรขวดที่ 1 ขนาด 1,000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
4. ชั่งน้ำหนักไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3.51 กรัม
5. ละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตด้วยน้ำกลั่น
6. เทสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตจากข้อที่ 5 ลงในขวดปรับปริมาตรขวดที่ 2 ขนาด 1,000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
7. ตวงสารละลายโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 96.4 มิลลิลิตร และสารละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต 3.6 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง ผสมสารทั้ง 2 ชนิดให้เข้ากัน ด้วยการปั่นกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

3.6 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ซาลินพีเอช 7.4

1. ละลาย PBS 1 เม็ด ด้วยน้ำกลั่น
2. เทสารละลายข้อ 1 ลงในขวดปรับปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
3. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.7 ขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจล

3.7.1 การเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (CMC-PVA)

1. แบ่งน้ำกลั่นออกเป็น 2 ส่วน 30 มิลลิลิตร และ 70 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ละลาย PVA 1, 2 หรือ 3 กรัม ในน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็กปั่นกวนสาร และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C จน PVA ละลายหมด
3. ละลาย CMC 8 กรัม ในน้ำกลั่น 70 มิลลิลิตร ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกล (Overhead stirrer) ที่อุณหภูมิห้องจน CMC ละลายหมด
4. นำสารละลาย PVA ในข้อ 2 เทผสมลงในสารละลาย CMC ในข้อ 3 ปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลที่อุณหภูมิห้องผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน ปั่นกวนเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง
5. เติมโซเดียมเบนโซเอต 0.1% ของน้ำหนักสารละลาย ปั่นกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
6. นำสารละลายที่ได้ไปกำจัดฟองอากาศด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง 5,000 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 10 นาที
7. วางแม่พิมพ์ซิลิโคนลงบนโต๊ะปรับระดับแล้วเทสารละลายลงในแม่พิมพ์ซิลิโคน
8. เทสารละลายกรดซิตริก 8 โมล/ลิตร จากข้อ 3.4 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ลงบนสารละลาย CMC-PVA ให้ท่วมสารละลาย CMC-PVA โดยไม่ต้องปั่นกวน
9. แช่สารละลาย CMC-PVA ในสารละลายกรดซิตริก 8 โมล/ลิตร เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง
10. นำไฮโดรเจลที่ได้ขึ้นจากสารละลายกรดซิตริก 8 โมล/ลิตร เก็บไฮโดรเจลไว้ในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ 90±5% เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 10 วัน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล และประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเอง

3.7.2 การเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ (CMC-PVA-MMT)

1. นำของผสมจากข้อ 3.3 มา 100 มิลลิลิตร และแบ่งเป็น 30 และ 70 มิลลิลิตร
2. ผสม PVA 1, 2 หรือ 3 กรัม ในของผสมจากข้อ 3.3 ปริมาตร 30 มิลลิลิตร
3. ละลาย PVA ด้วยเครื่องปั่นกวนและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C จน PVA ละลายหมด (PVA-MMT)
4. เติม CMC 8 กรัม ในของผสมจากข้อ 3.3 ปริมาตร 70 มิลลิลิตร
5. ละลาย CMC ด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลที่อุณหภูมิห้องจนละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (CMC-MMT)
6. ผสมของผสม (PVA-MMT) ในข้อ 3 ลงในของผสม (CMC-MMT) ในข้อ 5 และปั่นกวนด้วยเครื่องปั่นกวนเชิงกลเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (CMC-PVA-MMT)
7. ทำตามขั้นตอนในหัวข้อ 3.7.1 ข้อที่ 5-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงองค์ประกอบของไฮโดรเจลทุกสูตร

สูตร	PVA (%w/v)	CMC (%w/v)	MMT (%w/v)
P1C8	1	8	-
P1C8M0.1			0.1
P1C8M0.5			0.5
P1C8M1			1
P2C8	2	8	-
P2C8M1			1
P3C8	3	8	-
P3C8M1			1

3.8 การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ

3.8.1 วัดขนาดและซึมน้ำหนักไฮโดรเจล

วัดขนาดของไฮโดรเจลโดยวัด ความกว้าง ความยาว และความหนา ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ 3 ค่า นำมาหาค่าเฉลี่ย ซึมน้ำหนักไฮโดรเจลด้วยเครื่องชั่งแบบอ่านละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง จดบันทึกค่าที่ได้

3.8.2 สัณฐานวิทยาของไฮโดรเจล (Morphology)

3.8.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM)

เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลจากลักษณะรูพรุนภายในไฮโดรเจลโดยนำไฮโดรเจลเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อกำจัดน้ำภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลออก นำไฮโดรเจลที่ได้มาหักในไนโตรเจนเหลวเพื่อไม่ให้ขนาดและรูปร่างรูพรุนของไฮโดรเจลเปลี่ยนแปลงไป โดยไฮโดรเจลสูตรที่ทดสอบคือสูตร P1C8, P1C8M0.5 และ P1C8M1 เพื่อศึกษาผลของปริมาณของมอนอเมอร์ไลโกลไนด์ต่อขนาดและลักษณะของรูพรุน

โหมด : SEM-EDS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สละลิขสิทธิ์ : 1000x สำหรับการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในไฮโดรเจล ขนาดไฮโดรเจลที่ใช้ทดสอบมีขนาด $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ cm}^3$

โหมด : Low vacuum mode

กำลังขยาย : 800x

3.8.2.2 กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล (Digital microscope)

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลโดยศึกษาการรอยต่อระหว่างชิ้นงานของไฮโดรเจลที่ถูกตัดแล้วนำมาต่อติดกันเพื่อให้เกิดการซ่อมแซมตนเอง โดยมีการถ่ายภาพไฮโดรเจลที่มีการซ่อมแซมตนเองในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ ในวันที่ 0, 1, 5 และ 10 ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

3.8.3 การหาปริมาณน้ำ (Water content) และปริมาณของแข็ง (Solid content) ในไฮโดรเจล

1. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล 3 กรัม ด้วยเครื่องชั่งแบบอ่านละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง จดบันทึกน้ำหนักที่ได้
2. นำไฮโดรเจลไปเข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อกำจัดน้ำภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล
3. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจลที่แห้งแล้ว จดบันทึกค่าน้ำหนักที่ได้
4. ทำซ้ำสูตรละ 3 ตัวอย่าง
5. คำนวณหาปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลตามสมการ ดังนี้

$$\text{Water content (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักไฮโดรเจลสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{Solid content (\%)} = 100 - \text{Water content}$$

3.8.4 ทดสอบความแข็งของไฮโดรเจล (Hardness)

ทดสอบความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ที่ถูกเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $90\pm 5\%$ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 10 วัน ด้วยคูโรมิเตอร์แบบชอร์ ในสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิห้องโดยทดสอบความแข็งแรงกดบริเวณพื้นผิวด้านนอกของไฮโดรเจลและบริเวณภาคตัดขวาง (Cross-section) ของไฮโดรเจล

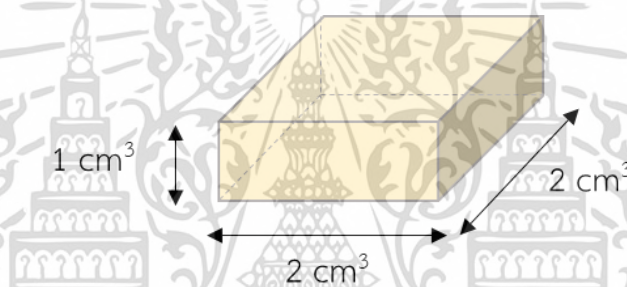
การทดสอบความแข็งที่พื้นผิว

ชนิดหัวกด shore oo

น้ำหนักกด 400 กรัม

ขนาดชิ้นงาน $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$

จำนวนชิ้นงาน 5 ชิ้น



รูปที่ 3.2 ขนาดไฮโดรเจลที่ใช้ทดสอบความแข็ง

3.8.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

3.8.5.1 ทดสอบความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

เก็บไฮโดรเจลในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $90\pm 5\%$ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 10 วัน แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Tensile Testing Machine) ในสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

การทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile test)

Load cell 100 N

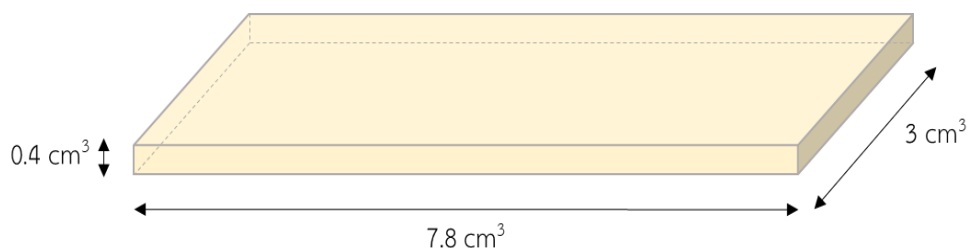
Gauge length 30 mm

อัตราเร็วในการดึง 30 mm/min

ขนาดชิ้นงาน $3 \times 7.8 \times 0.4 \text{ cm}^3$

จำนวนชิ้นงาน 5 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ขนาดไฮโดรเจลที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงดึง

สูตรในการคำนวณความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจล ดังนี้

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

เมื่อ F = แรงสูงสุดที่ใช้ดึงชิ้นงาน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

$$\text{มอดูลัสของยัง (Young's modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (stress)}}{\text{ความเครียด (strain)}}$$

หมายเหตุ : คำนวณค่ามอดูลัสของยังที่ 1-2% การดัดยัดของไฮโดรเจล

3.8.5.2 ทดสอบความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

เก็บไฮโดรเจลในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 10 วัน นำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Tensile Testing Machine) ในสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิห้อง

การทดสอบความแข็งแรงกด (Compressive test)

Load cell 100 N

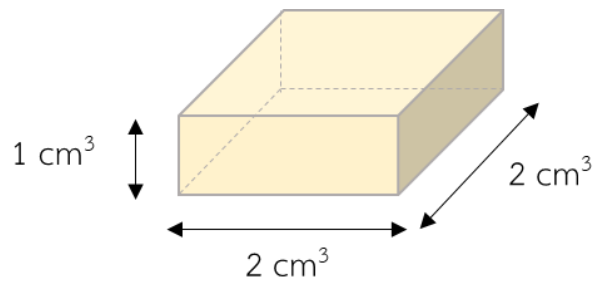
ระยะในการกดอัดชิ้นงาน 50% ของความสูงชิ้นงาน

อัตราเร็วในการกดอัด 5 mm/min

ขนาดชิ้นงาน $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$

จำนวนชิ้นงาน 5 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ขนาดไฮโดรเจลที่ใช้ทดสอบความแข็งแรงกด

สูตรในการคำนวณความแข็งแรงกดของไฮโดรเจล ดังนี้

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

เมื่อ F = แรงในการกดอัดขึ้นงาน (N)

A = พื้นที่หน้าตัดของขึ้นงาน (m^2)

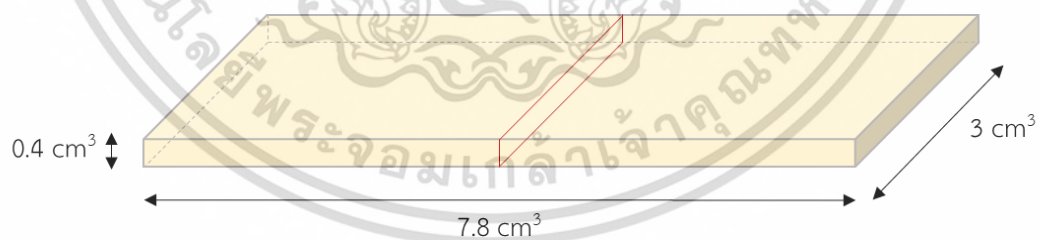
$$\text{มอดูลัสกดอัด (Compressive modulus)} = \frac{\text{ความเค้น (stress)}}{\text{ความเครียด (strain)}}$$

หมายเหตุ : ค่ามอดูลัสกดอัดที่ 1-2% การกดอัดของไฮโดรเจล

3.8.6 การทดสอบสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

3.8.6.1 ทดสอบสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

1. ตัดไฮโดรเจลขนาด $3 \times 7.8 \times 0.4 \text{ cm}^3$ ออกเป็น 2 ส่วน ด้วยมีดผ่าตัด



รูปที่ 3.5 ไฮโดรเจลขนาด $3 \times 7.8 \times 0.4 \text{ cm}^3$ ตัดออกเป็น 2 ส่วน

2. นำไฮโดรเจลทั้งสองส่วนต่อเข้าด้วยกัน
3. นำไฮโดรเจลที่ต่อติดกันแล้วไปเก็บในสถานะความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 10 วัน

4. นำไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองแล้วไปศึกษาสัณฐานวิทยาโดยถ่ายภาพรอยต่อ

ของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล ในวันที่ 0 และ 10 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองแล้วไปทดสอบความแข็งแรงดึง (หัวข้อ 3.8.5.1) และความแข็งแรงกด (หัวข้อ 3.8.5.2)
6. คำนวณประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลตามสูตร ดังนี้

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

เมื่อ Sr = ความเค้นขึ้นงานที่ซ่อมแซมตนเองแล้ว (Healing stress)

Sp = ความเค้นขึ้นงานดั้งเดิม (Original stress)

3.8.6.2 ศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลในสภาวะต่าง ๆ

1. ตัดไฮโดรเจลออกเป็น 2 ส่วน ด้วยมีดผ่าตัด
2. หยดสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5.5, 7.4 และน้ำกลั่น ระหว่างรอยตัดของไฮโดรเจล
3. นำไฮโดรเจลทั้งสองส่วนมาต่อเข้าด้วยกัน
4. นำไฮโดรเจลที่ต่อติดกันแล้วไปเก็บในสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 10 วัน
5. ศึกษาประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล โดยถ่ายภาพรอยต่อของไฮโดรเจลในวันที่ 0 และ 10

3.8.7 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเทคนิค MTT assay

1. เตรียมเซลล์ไลน์ Vero ในอาหาร DMEM เสริมด้วย 10 เปอร์เซ็นต์ของ FBS โดยเพาะเลี้ยงในขวดเพาะเลี้ยงขนาด 25 ตารางเซนติเมตร
2. เตรียม Stock สารตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ โดยกรองด้วยแผ่นกรองที่มีช่องผ่านขนาด 0.2 ไมโครเมตร และใส่ขวดแก้วที่ปิดสนิท เชื้อ คุ้มครองด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) เพื่อป้องกันแสง
3. เตรียมสารตัวอย่างความเข้มข้นสูงสุด 1,000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (กรณีไฮโดรเจลละลายหมด) ในสารละลาย PBS
4. ปลูกเซลล์ไลน์ Vero จำนวน 5×10^4 เซลล์/มิลลิลิตร ลงในจานเพาะเลี้ยงชนิด 96 หลุม (96-well plate) ปริมาตร 100 ไมโครลิตร/หลุม นำจานเพาะเลี้ยงที่ปลูกเซลล์แล้ว บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เซลล์จะเจริญเติบโตบริเวณก้นหลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำจานเพาะเลี้ยงเซลล์ออกจากตู้บ่ม จากนั้นดูดอาหารออกจากหลุมให้หมด แล้วเติมสารตัวอย่างความเข้มข้นที่กำหนด (กลุ่มควบคุมเป็นเซลล์ปกติซึ่งเพาะเลี้ยงในอาหาร DMEM ปริมาตร 100 ไมโครลิตร/หลุม) นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

6. เมื่อบ่มเซลล์ในสารละลายตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง ให้ดูดสารละลาย MTT ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ใส่ลงไปในแต่ละหลุมที่ทดสอบ โดยใส่ปริมาตร 10 ไมโครลิตร/หลุม จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง สารละลาย MTT จะเข้าไปในไมโทคอนเดรียของเซลล์ที่มีชีวิต และถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปของผลึกฟอร์มazan เป็นผลึกสีม่วงที่ไม่ละลายน้ำ

7. จากนั้นดูดสารละลาย MTT ทิ้ง แล้วเติมสารละลาย DMSO:10% SDS อัตราส่วน 9:1 ปริมาตร 150 ไมโครลิตร/หลุม เพื่อละลายผลึกฟอร์มazan ได้สารละลายสีม่วง

8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องไมโครโทเทอร์ เพลต รีดีเตอร์ ที่ความยาวคลื่นของแผ่นกรองแสงเท่ากับ 570 นาโนเมตร

9. คำนวณหาค่า %Cytotoxicity ของแต่ละความเข้มข้นดังนี้

$$\% \text{ Cytotoxicity} = \left(\frac{A-B}{A} \right) \times 100$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมควบคุม (หลุมที่มีเซลล์ในอาหารเพาะเลี้ยง)

B = ค่าการดูดกลืนแสงของหลุมที่มีเซลล์ในสารตัวอย่างแต่ละความเข้มข้น

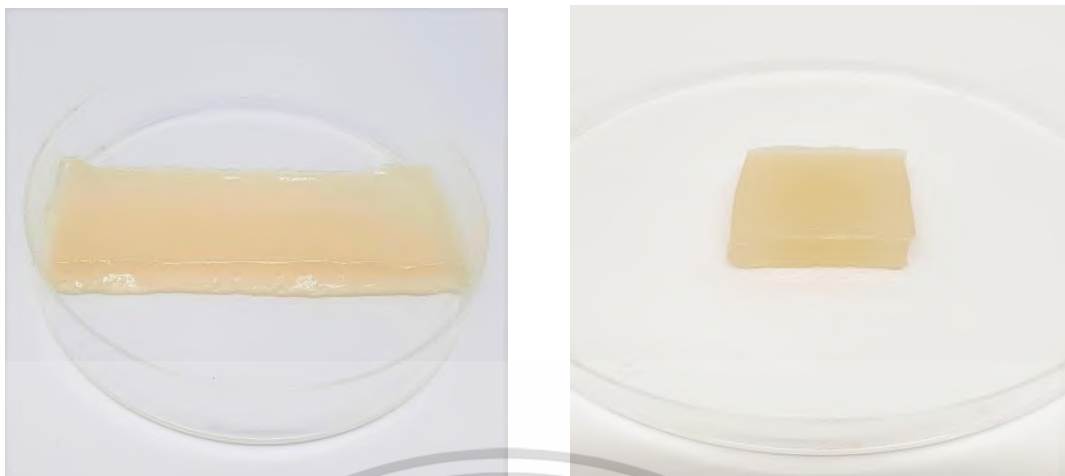
10. ถ้า %Cytotoxicity มีค่าต่ำกว่า 50% แสดงว่าชิ้นงานตัวอย่างไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ ถ้า %Cytotoxicity มีค่าสูงเกิน 50% แสดงว่าชิ้นงานตัวอย่างมีความเป็นพิษต่อเซลล์

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลที่สามารถซ่อมแซมตนเองได้และมีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้สารตั้งต้นมาจากธรรมชาติ และสามารถเข้ากันได้กับร่างกายของสิ่งมีชีวิต สามารถย่อยสลายได้ง่าย โดยเตรียมไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความสามารถในการซ่อมแซมตนเองให้กับไฮโดรเจล กระบวนการเตรียมไฮโดรเจลเตรียมได้จากการนำของผสมระหว่าง CMC, PVA และ MMT ในอัตราส่วนที่ต่างกันในแต่ละสูตรมาแช่ในสารละลายกรดซิตริก เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตของ CMC กับโปรตอนของกรดซิตริกทำให้หมู่คาร์บอกซิเลตของ CMC เปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิลิกและสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลหรือหมู่คาร์บอกซิลิกกับหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA และใน CMC เกิดการเชื่อมโยงเป็นโครงร่างสามมิติขณะขึ้นรูปเป็นไฮโดรเจล การใส่สารเสริมแรง MMT ซึ่งสายโซ่พอลิเมอร์สามารถเข้าไปแทรกในระหว่างชั้นของ MMT ได้ทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างของ MMT มีออกซิเจนและหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับ CMC และ PVA ได้ ไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วย MMT จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดี และสามารถเกิดการเชื่อมโยงใหม่ได้ หากได้รับความเสียหาย โดยไฮโดรเจลที่เตรียมได้นำไปศึกษาสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล ทดสอบสมรรถนะของไฮโดรเจล ทดสอบสมบัติเชิงกล ทดสอบสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลและการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของไฮโดรเจล โดยสูตรของไฮโดรเจลที่เตรียมและศึกษาสมบัติแสดงดังตารางที่ 4.1 โดยเตรียมไฮโดรเจลใน 2 รูปแบบคือ ขนาด $3 \times 7.8 \times 0.4 \text{ cm}^3$ เพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง และขนาด $2 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$ เพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกดตั้งรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ไฮโดรเจลที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึง ข. ไฮโดรเจลที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงกด

รูปที่ 4.1 รูปไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์

4.1 น้ำหนัก ขนาดและความหนาแน่นของไฮโดรเจล

การวัดขนาดและน้ำหนักของไฮโดรเจลในแต่ละสูตรกระทำครั้งแรกหลังจากแช่ในสารละลายกรด 3 ชั่วโมง และหลังเก็บในกล่องความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นระยะเวลา 10 วันขึ้นไป ความหนาแน่นของไฮโดรเจลคำนวณจากน้ำหนักของไฮโดรเจลหารด้วยปริมาตรของไฮโดรเจล และเปรียบเทียบความหนาแน่นของไฮโดรเจลหลังจากแช่กรดกับไฮโดรเจลที่ถูกเก็บในกล่องความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นระยะเวลา 10 วันขึ้นไป ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร

จากตารางที่ 4.2 แสดงขนาดและน้ำหนักของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ก่อนและหลังเก็บในกล่องความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่าไฮโดรเจลที่ถูกเก็บในกล่องความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นเวลา 10 วันขึ้นไป มีขนาดและน้ำหนักของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากไฮโดรเจลมีองค์ประกอบของ CMC, PVA และ MMT ที่มีความชอบน้ำจึงสามารถดูดซับความชื้นไว้ในโครงสร้างจนถึงจุดอิ่มตัว ไฮโดรเจลจึงมีขนาดและน้ำหนักเพิ่มมากขึ้น เมื่อคำนวณค่าความหนาแน่นพบว่าไฮโดรเจลทุกสูตรทั้งก่อนและหลังเก็บในกล่องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 0.001 g/cm^3 เท่ากันในทุก ๆ สูตร ดังนั้นการเก็บไฮโดรเจลในกล่องความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ จึงเป็นการควบคุมขนาด น้ำหนัก ปริมาณน้ำภายในไฮโดรเจลให้มีสภาวะใกล้เคียงกันและป้องกันการสูญเสียน้ำภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลก่อนนำไปทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดน้ำหนักและความหนาแน่นของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ก่อนและหลังเก็บไว้ในกล่อง ความชื้นสัมพัทธ์ 90±5% เป็นระยะเวลา 10 วัน

สูตร	ไฮโดรเจลหลังจากแช่ในสารละลายกรดซิตริก 3 ชั่วโมง				
	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	น้ำหนัก (g)	ความหนาแน่น (g/mm ³)
P1C8	28.00±0.34	76.01±1.12	3.11±0.26	7.8723±0.19	0.001±0.00
P1C8M0.1	27.77±0.02	74.77±0.56	3.02±0.16	7.8774±0.11	0.001±0.00
P1C8M0.5	27.99±0.92	75.71±0.75	2.55±0.17	7.7212±0.28	0.001±0.00
P1C8M1	27.04±0.86	75.90±2.78	2.56±0.17	7.3320±0.38	0.001±0.00
P2C8	28.28±0.27	74.75±1.27	3.19±0.28	8.0817±0.15	0.001±0.00
P2C8M1	28.59±2.01	75.16±1.24	3.04±0.32	7.8016±0.22	0.001±0.00
P3C8	28.07±0.38	74.83±1.58	3.01±0.34	8.3553±0.53	0.001±0.00
P3C8M1	28.59±0.62	75.00±1.67	2.90±0.33	8.0478±0.20	0.001±0.00
สูตร	ไฮโดรเจลหลังจากเก็บในกล่องความชื้นสัมพัทธ์ 90±5% 10 วัน				
P1C8	29.25±0.47	78.27±1.43	3.22±0.22	8.2266±0.30	0.001±0.00
P1C8M0.1	29.01±0.77	78.25±1.46	3.30±0.26	8.2584±0.42	0.001±0.00
P1C8M0.5	29.41±1.28	79.86±1.84	2.89±0.16	8.2241±0.44	0.001±0.00
P1C8M1	27.78±0.59	79.65±2.92	2.68±0.20	7.5469±0.31	0.001±0.00
P2C8	28.34±0.66	78.73±1.20	3.37±0.21	8.3174±0.22	0.001±0.00
P2C8M1	29.62±0.46	79.15±1.56	3.03±0.26	8.0127±0.27	0.001±0.00
P3C8	28.04±0.60	78.70±1.48	3.31±0.29	8.4155±0.58	0.001±0.00
P3C8M1	29.14±0.62	79.49±1.38	3.04±0.23	8.3028±0.26	0.001±0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

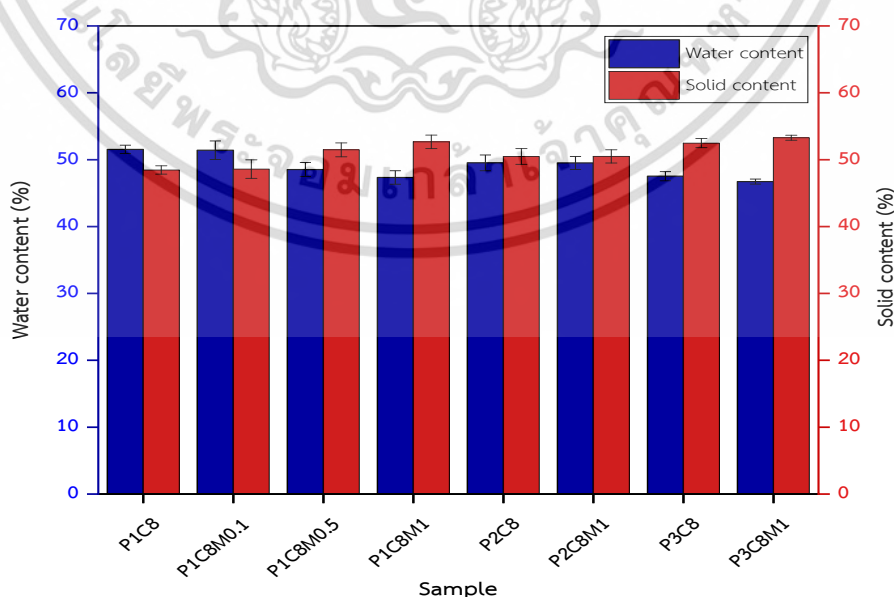
4.2 ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล

การหาปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลหาได้จากการนำไฮโดรเจลสูตรทุกสูตร น้ำหนัก 3 กรัม เข้าเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อกำจัดน้ำภายในไฮโดรเจลจนหมดหลังจากนั้น นำไฮโดรเจลที่ได้ไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง นำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งภายในไฮโดรเจลดังสมการ

$$\text{Water content\%} = \frac{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักไฮโดรเจลสุดท้าย}}{\text{น้ำหนักไฮโดรเจลเริ่มต้น}} \times 100$$

$$\text{Solid content\%} = 100 - \text{Water content\%}$$

รูปที่ 4.2 แสดงค่าปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจลทุกสูตรพบว่าปริมาณน้ำในไฮโดรเจลมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 47-52% และปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 48-53% ซึ่งแนวโน้มของปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งในไฮโดรเจลแต่ละสูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากในไฮโดรเจลทุกสูตรมีองค์ประกอบหลักคือ CMC ในปริมาณที่เท่ากันที่ 8% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ในขณะที่ปริมาณ PVA และ MMT ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละสูตรอยู่ในช่วง 1-3% และ 0.1-1% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่า CMC จึงไม่ส่งผลต่อค่าปริมาณน้ำและของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจลอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้มีการเก็บตัวอย่างชิ้นงานทุกสูตรในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นเวลาอย่างน้อย 10 วัน ในทุกสูตร

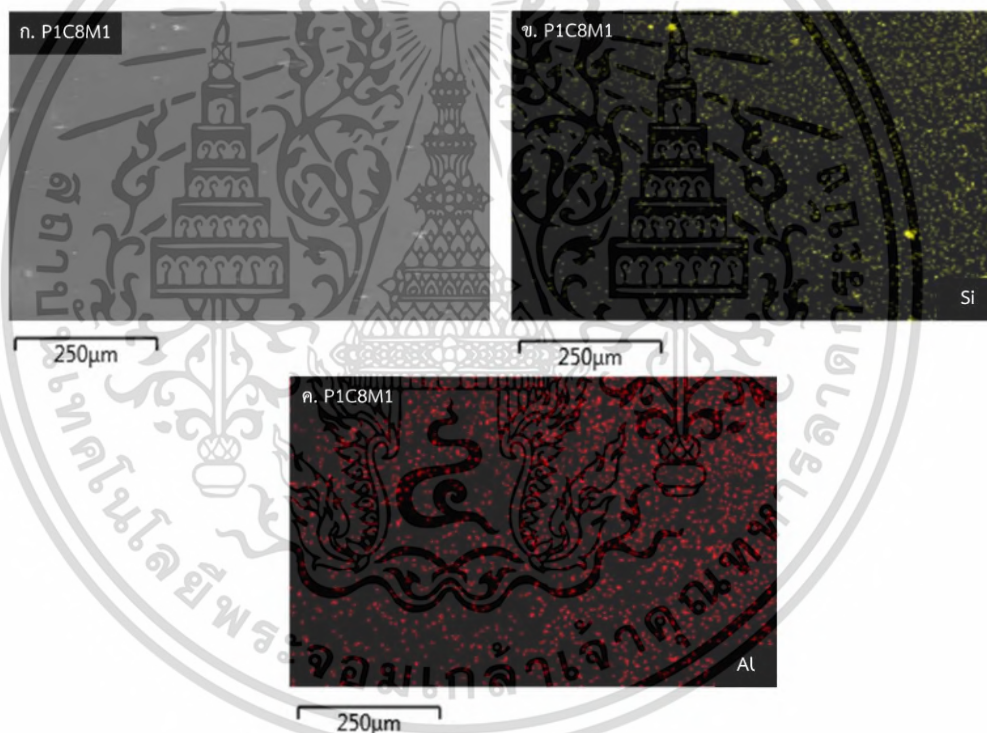


รูปที่ 4.2 ค่าปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในไฮโดรเจลทุกสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

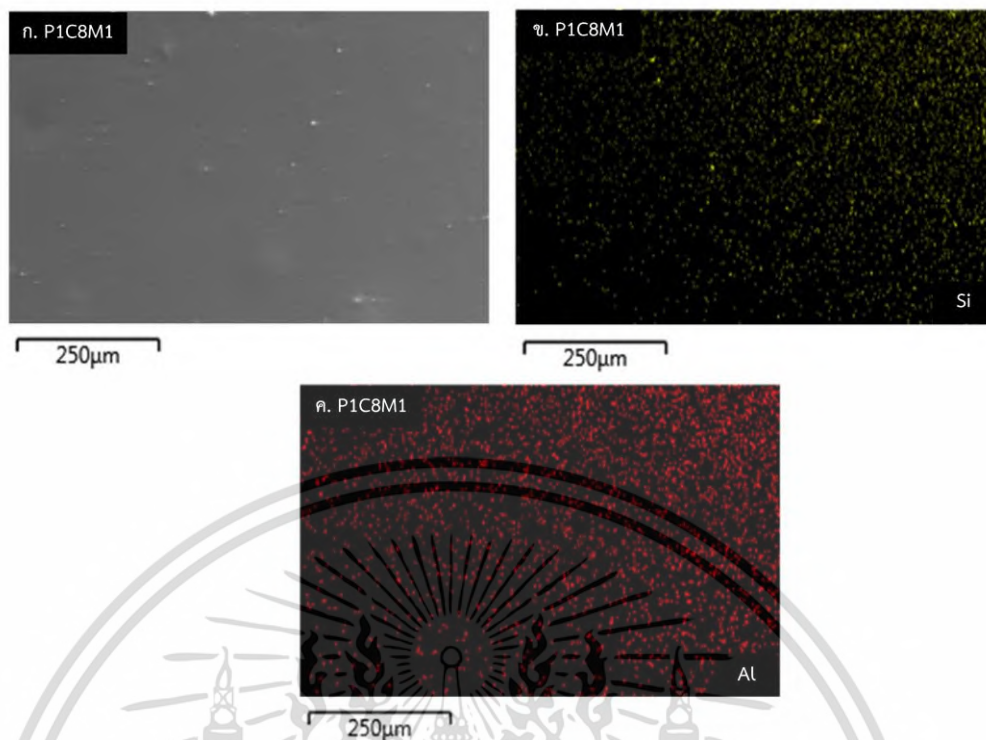
4.3 สันฐานวิทยาของไฮโดรเจล

การกระจายตัวของ MMT ในไฮโดรเจลศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ซึ่งสูตรที่เลือกมาทดสอบคือสูตร P1C8M1 เนื่องจากเป็นสูตรที่เกิดการซ่อมแซมตนเองได้ดี และมีปริมาณ MMT มากที่สุด โดยศึกษาการกระจายตัวของ MMT ในไฮโดรเจลทั้งบริเวณพื้นผิว (Surface) และภาคตัดขวาง (Cross-section) พบว่าการเติม MMT ที่ 1% มีการกระจายตัวที่ดีและไม่เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นก้อนทั้งที่พื้นผิวด้านนอกและด้านในของไฮโดรเจลซึ่งแสดงให้เห็นว่า MMT มีการกระจายตัวได้ดีขณะเตรียมไฮโดรเจล โดยรูปที่ 4.3 แสดงการกระจายตัวของ MMT บนพื้นผิวของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 และรูปที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของ MMT บริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 โดยธาตุ Si และ Al ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักใน MMT แสดงการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งบนพื้นผิวและภาคตัดขวาง



รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโหมตสุญญากาศต่ำ (LV-SEM) ที่กำลังขยาย 800x แสดงการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์บริเวณพื้นผิวของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 : ก. ภาพการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์บริเวณพื้นผิวไฮโดรเจลสูตร P1C8M1, ข. ภาพการกระจายตัวของธาตุ Si ที่เป็นองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์ และ ค. ภาพการกระจายตัวของธาตุ Al ที่เป็นองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์

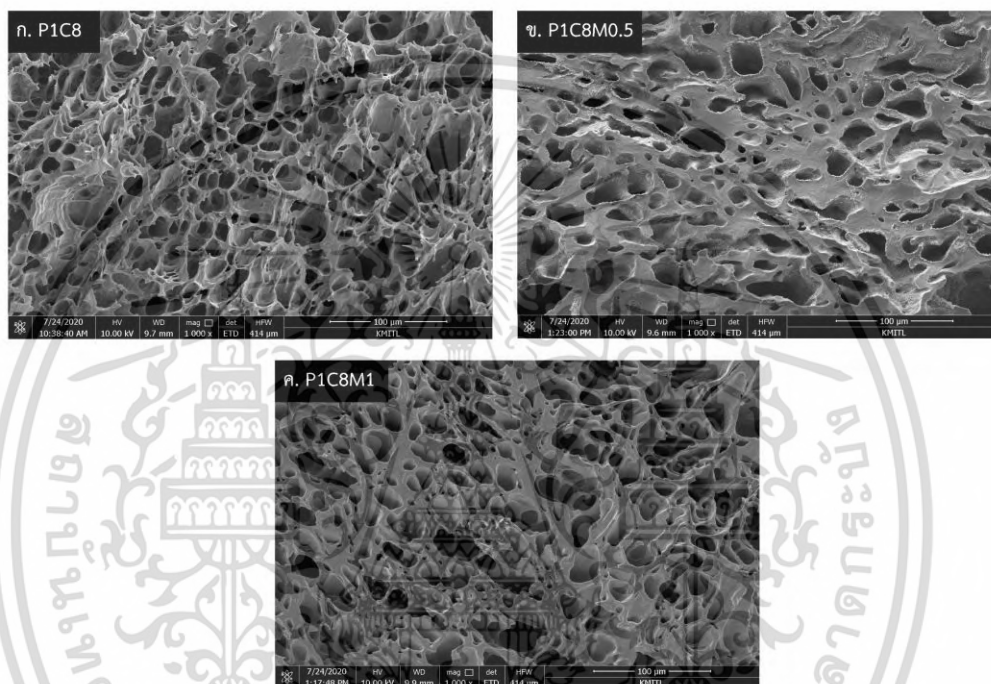
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโหมดสัญญาณต่ำ (LV-SEM) ที่กำลังขยาย 800x แสดงการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์บริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 : ก. ภาพการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์บริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1, ข. ภาพการกระจายตัวของธาตุ Si ที่เป็นองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์ และ ค. ภาพการกระจายตัวของธาตุ Al ที่เป็นองค์ประกอบของมอนต์มอริลโลไนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาขนาดรูพรุน (Pore size) และความหนาของผนัง (Wall thickness) ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ หลังดึงน้ำออกด้วยกระบวนการ Freeze-dry เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของขนาดรูพรุนและความหนาของผนังภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลที่เสริมแรงและไม่เสริมแรงด้วย MMT โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (รูปที่ 4.5) ไฮโดรเจลสูตรที่เลือกมาศึกษาคือสูตร P1C8, P1C8M0.5 และ P1C8M1 พบว่าไฮโดรเจลที่ไม่เสริมแรงด้วย MMT สูตร P1C8 มีขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยเท่ากับ $24 \pm 6 \mu\text{m}$ ไฮโดรเจลสูตรที่มีการเสริมแรงด้วย MMT คือสูตร P1C8M0.5 และ P1C8M1 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ $22 \pm 7 \mu\text{m}$ และ $23 \pm 4 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดรูพรุนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากช่องว่างภายในไฮโดรเจลเกิดจากการระเหยส่วนที่เป็นน้ำออกซึ่งไฮโดรเจลทั้ง 3 สูตรมีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ในปริมาณที่เท่ากันและปริมาณ MMT ที่เติมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรไฮโดรเจลมีสัดส่วนเพียงเล็กน้อย นั่นคือไฮโดรเจลทั้ง 3 สูตรมีองค์ประกอบของน้ำใกล้เคียงกัน ดังนั้นขนาดรูพรุนภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลจึงมีขนาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามยังพบว่าผนังของไฮโดรเจลที่เสริมแรงด้วย MMT มีลักษณะที่หนาขึ้นเนื่องจาก MMT มีลักษณะโครงสร้างเป็นแผ่นทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์กับแผ่นชั้นของ MMT เกิดอันตรกิริยาต่อกันไฮโดรเจลจึงเกิดการรวมตัวชิดกันมากขึ้นทำให้ไฮโดรเจลมีความหนาของผนังที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

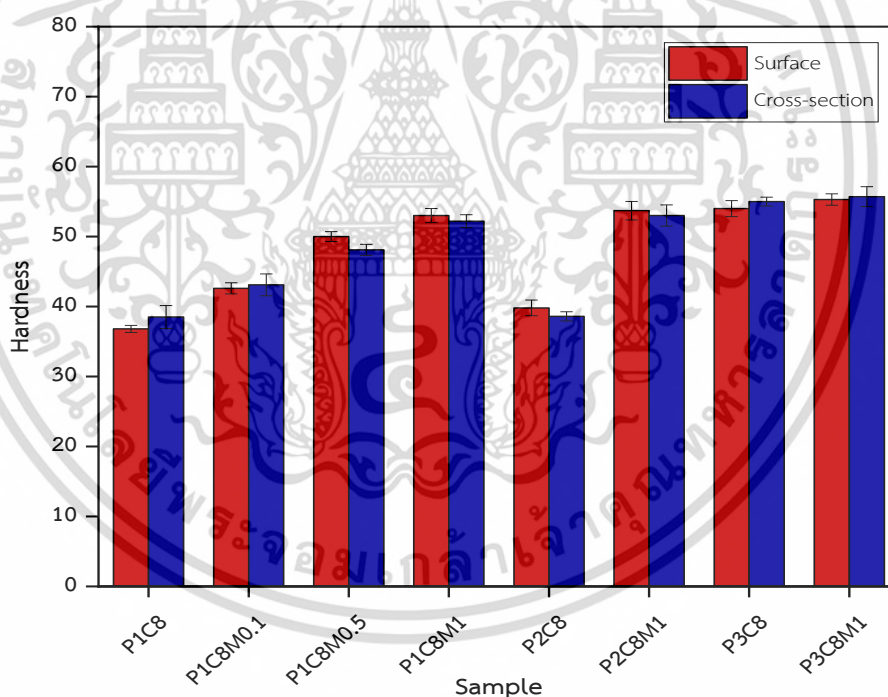


รูปที่ 4.5 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด SEM-EDS ที่กำลังขยาย 1000x แสดงลักษณะรูพรุนและความหนาของผนังไฮโดรเจล : ก. ไฮโดรเจลสูตร P1C8, ข. ไฮโดรเจลสูตร P1C8M0.5 และ ค. ไฮโดรเจลสูตร P1C8M1

4.4 การทดสอบความแข็ง

การทดสอบความแข็งของไฮโดรเจลทดสอบโดยใช้หัวกด shore oo ซึ่งมีการทดสอบความแข็งที่พื้นผิวด้านนอก (Surface) และพื้นผิวบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจล (Cross-section) เพื่อเปรียบเทียบความแข็งที่พื้นผิวของไฮโดรเจลด้านนอกและด้านใน และเพื่อศึกษาความสม่ำเสมอของการเชื่อมโยงไฮโดรเจลโดยใช้กรดซิมผ่านเข้าไปในชิ้นงานไฮโดรเจล จากผลการทดสอบพบว่าความแข็งบริเวณพื้นผิวด้านนอกและภาคตัดขวางของไฮโดรเจลในแต่ละสูตร มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงสารละลายกรดสามารถซึมผ่านเข้าไปในไฮโดรเจลได้ทั่วถึงทั้งชิ้นงานเกิดการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แลกเปลี่ยน H^+ ไอออนของกรดกับ Na^+ ของ Na-CMC เปลี่ยนหมู่ COO^- เป็น $COOH$ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนขององค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ CMC และ PVA สม่าเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน และยังพบว่า การเติม MMT ในไฮโดรเจลมีผลทำให้ความแข็งบริเวณพื้นผิวด้านนอกและความแข็งบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้น โดยไฮโดรเจลสูตร P1C8 มีความแข็งบริเวณพื้นผิวและภาคตัดขวางเท่ากับ 36.8 และ 38.5 ตามลำดับ และไฮโดรเจลสูตรที่มีการเติม MMT คือสูตร P1C8M1 มีความแข็งบริเวณพื้นผิวและภาคตัดขวางเท่ากับ 53.0 และ 52.2 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรเจลที่มีการเพิ่มปริมาณ PVA ช่วยเพิ่มความแข็งที่พื้นผิวให้กับไฮโดรเจลเนื่องจากเมื่อปริมาณ PVA มากขึ้นส่งผลให้มีการเชื่อมโยงกันระหว่าง PVA, CMC และ MMT ด้วยพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น โดยไฮโดรเจลสูตร P3C8 มีความแข็งบริเวณพื้นผิวและภาคตัดขวางเท่ากับ 54.0 และ 55.0 ตามลำดับ ซึ่งมีความแข็งมากกว่าไฮโดรเจลสูตร P1C8 และ P2C8 อย่างไรก็ตามการเติม MMT ในสูตร P3C8 พบว่าความแข็งของพื้นผิวไฮโดรเจลไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



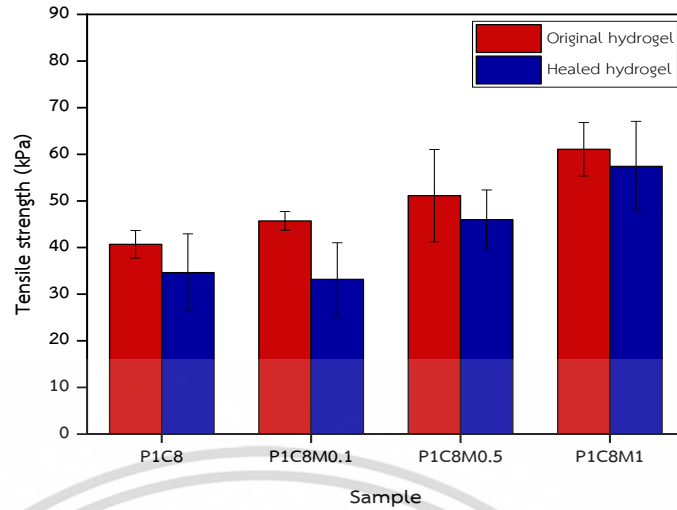
รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งที่บริเวณพื้นผิวภายนอกและพื้นผิวบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

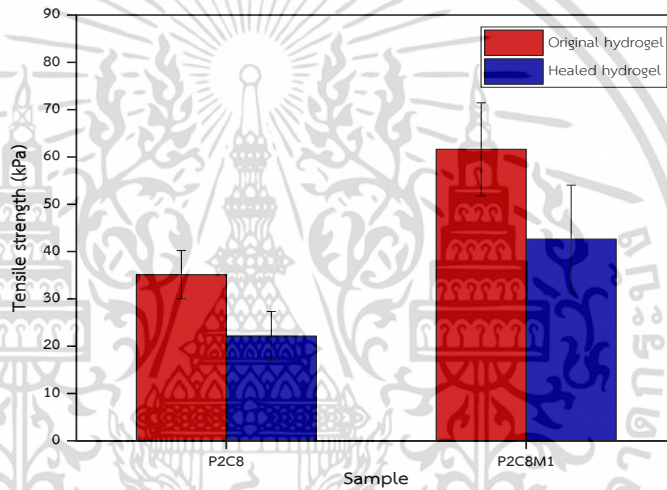
4.5 การทดสอบความแข็งแรงดึง

ความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลแต่ละสูตรทดสอบด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ โดยทดสอบความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลตั้งต้นและไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองแล้วเพื่อนำค่าความแข็งแรงดึงที่ได้มาประเมินความแข็งแรงของไฮโดรเจลและคำนวณค่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลในแต่ละสูตร รูปที่ 4.7 แสดงค่าความแข็งแรงดึง (Strength : Stress at maximum load) ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ MMT ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเกี่ยวพันกันกับชั้นของ MMT ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงกว่าพอลิเมอร์ทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงมากขึ้น จากรูปที่ 4.7 ก. แสดงค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVA 1%w/v และมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารเสริมแรง MMT (0-1%w/v) พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก MMT มีส่วนช่วยในการเสริมแรงให้กับไฮโดรเจลโดยค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลตั้งต้นสูตร P1C8, P1C8M0.1, P1C8M0.5 และ P1C8M1 มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 40.7 kPa เป็น 45.7 kPa, 51.0 kPa และ 61.0 kPa ตามลำดับ และในรูปที่ 4.7 ข. และ ค. แสดงค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVA 2%w/v และ 3%w/v ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการใส่สารเสริมแรง MMT ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลมีค่าเพิ่มขึ้นโดยในสูตร P2C8 และ P2C8M1 มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 35.1 kPa และ 61.6 kPa ตามลำดับ ในสูตร P3C8 และ P3C8M1 มีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 40.3 kPa เป็น 64.0 kPa อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ PVA ในไฮโดรเจลพบว่าค่าความแข็งแรงดึงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในรูปที่ 4.8 สาเหตุสำคัญเนื่องจากลักษณะของชิ้นงานมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าส่งผลให้ขณะที่มีการทดสอบความแข็งแรงดึงไฮโดรเจลเกิดการขาดที่ตำแหน่งจุดจับชิ้นงาน (Gib) ค่าความแข็งแรงดึงที่ได้จึงมีความคลาดเคลื่อนในช่วงที่กว้างและมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงดึงที่แท้จริงซึ่งในทางทฤษฎีเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มขึ้นไฮโดรเจลจะมีความแข็งแรงมากขึ้นและมีค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเมื่อมีปริมาณ PVA มากขึ้นทำให้มีหมู่ไฮดรอกซิลมากขึ้น เกิดการเชื่อมโยงกับหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA ด้วยตัวเองและหมู่คาร์บอกซิลิกของ CMC เป็นโครงร่างแหสามมิติที่มีการเชื่อมโยงที่หนาแน่นทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงมากขึ้น

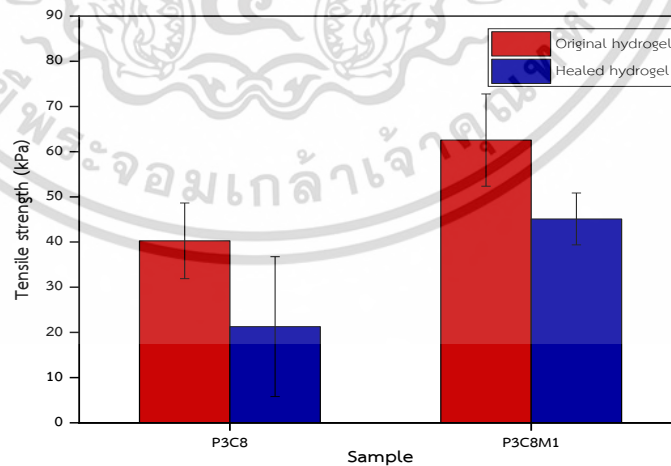
ก.



ข.

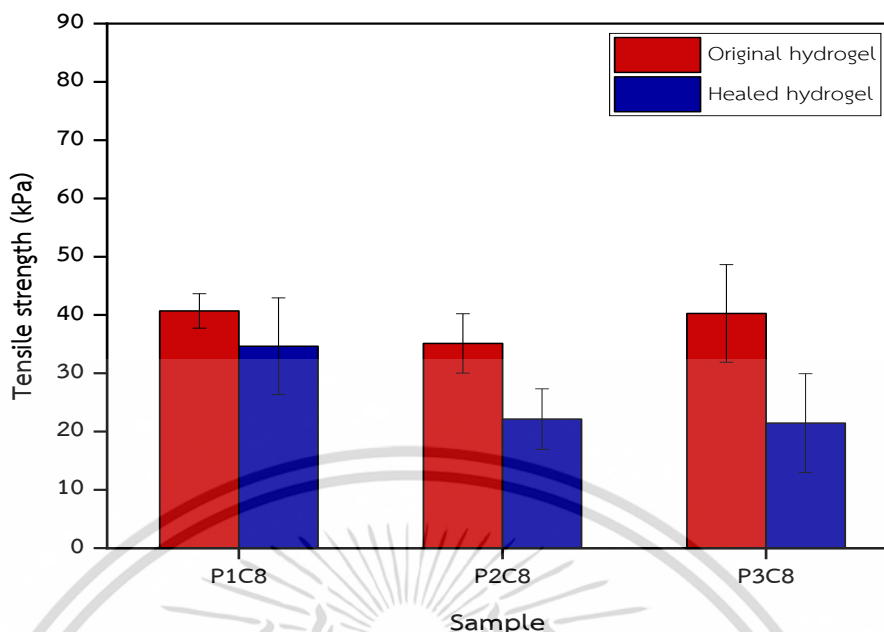


ค.



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณ MMT ต่อค่า Tensile strength ของไฮโดรเจลตั้งต้นและไฮโดรเจลที่ผ่าน

การซ่อมแซมตนเองสูตร : ก. P1C8 ข. P2C8 และ ค. P3C8 นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

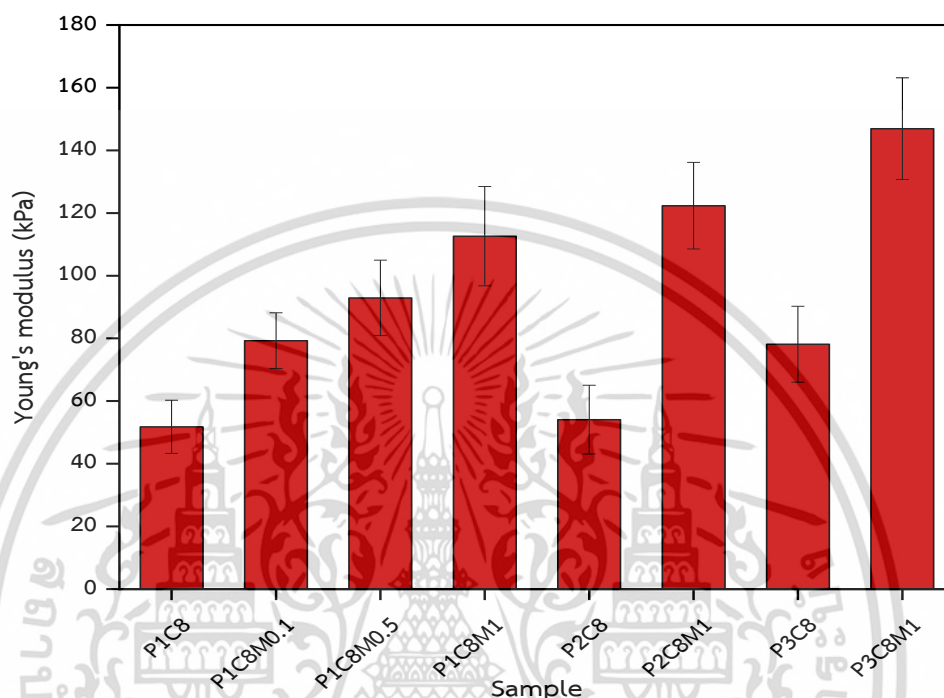


รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วน PVA ต่อค่า Tensile strength ของไฮโดรเจลตั้งต้นและไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเอง

รูปที่ 4.9 แสดงค่า Young's Modulus ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ โดยคำนวณค่ามอดูลัสของยังที่ 1-2% การดัดยัดของไฮโดรเจล พบว่าไฮโดรเจลตั้งต้นที่มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ PVA (1-3%w/v) ส่งผลให้ค่า Young's Modulus ของไฮโดรเจลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ PVA ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสูตร P3C8 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 75.0 kPa โดยมีค่าสูงกว่า P1C8 (56.0 kPa) เนื่องจากเมื่อปริมาณ PVA เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงกันของสายโซ่พอลิเมอร์มากขึ้น ไฮโดรเจลจึงมีค่า Young's Modulus สูงขึ้น อย่างไรก็ตามในไฮโดรเจลสูตร P1C8 และ P2C8 มีค่า Young's Modulus ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อาจมีผลมาจากการควบคุมสถานะความชื้นสัมพัทธ์ของไฮโดรเจลสูตร P2C8 ที่มีความชื้นในระบบมากกว่าปกติทำให้ไฮโดรเจลดูดซับความชื้นไว้ในโครงสร้างในปริมาณมากส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความต้านทานต่อการดัดยัดที่ต่ำลง และเมื่อศึกษาการเติมสารเสริมแรง MMT ในไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลมีค่า Young's Modulus เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมีการเติม MMT 1%w/v โดยไฮโดรเจลสูตร P1C8M1, P2C8M1 และ P3C8M1 มีค่า Young's Modulus เท่ากับ 105.4 kPa, 122.3. kPa และ 147.0 kPa ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าในสูตร P1C8, P2C8 และ P3C8 ที่ค่า 56.0 kPa, 54.0 kPa และ 75.0 kPa ตามลำดับ แสดงถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเสียรูปจากแรงดึงที่สูงขึ้นเมื่อมีการเติมสารเสริมแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MMT และการเพิ่มปริมาณ PVA โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรเจลสูตร P3C8M1 ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความแข็งแรงดึงข้างต้น จากผลการทดสอบข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการเติม MMT และการเพิ่มปริมาณ PVA ในไฮโดรเจลส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดึงและค่า Young's Modulus ที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.9 ค่า Young's Modulus ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

4.6 การทดสอบความแข็งแรงกด

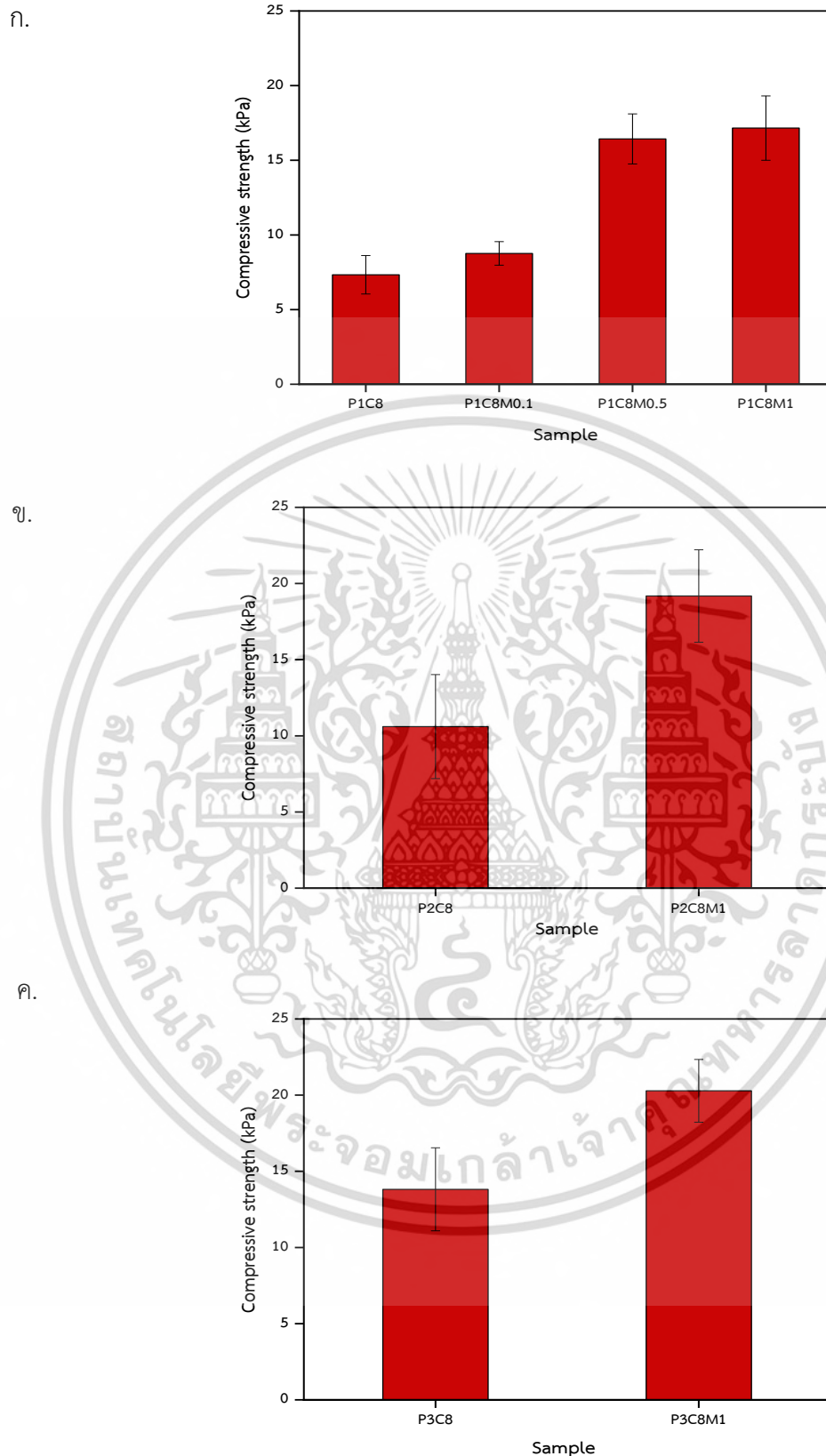
การทดสอบความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลศึกษาโดยนำไฮโดรเจลแต่ละสูตรที่มีขนาด $2 \times 2 \times 1$ cm³ มาทดสอบความแข็งแรงกดด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ที่เก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ เป็นระยะเวลา 10 วัน ก่อนนำมาทดสอบ จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งแรงกด (Compressive strength) ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ โดยรูป 4.10 ก. แสดงค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVA 1%w/v และมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ MMT พบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ MMT ค่าความแข็งแรงกดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่พอลิเมอร์เกิดการเกี่ยวพันกันกับชั้นแผ่นของ MMT ทำให้เกิดการเสริมแรงขึ้น [43] ค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลจึงเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณ MMT ที่เพิ่มขึ้น โดยไฮโดรเจลสูตร P1C8M0.1, P1C8M0.5 และ P1C8M1 มีค่าความแข็งแรงกดสูงขึ้นจากค่า 7.3 kPa ของ P1C8 เป็น 8.8 kPa, 16.4 kPa และ 17.2 kPa ตามลำดับ

และจากรูป 4.10 ข. และ ค. แสดงค่าความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVA 2%w/v และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเป็นสัญญาใด ๆ ในเชิงพาณิชย์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PVA 3%w/v โดยค่าความแข็งแรงกตของไฮโดรเจลสูตร P2C8M1 มีค่าความแข็งแรงกตเท่ากับ 19.2 kPa ซึ่งสูงกว่าค่า 10.6 kPa ของ P2C8 และ P3C8M1 มีค่าความแข็งแรงกตเท่ากับ 20.3 kPa ซึ่งสูงกว่าค่า 13.8 kPa ของ P3C8 เมื่อพิจารณาจากค่าความแข็งแรงกตของไฮโดรเจลที่มีการเพิ่มปริมาณ PVA ดังรูป 4.11 พบว่าแนวโน้มค่าความแข็งแรงกตของไฮโดรเจลตั้งต้นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ PVA เพิ่มขึ้น โดยค่าความแข็งแรงกตของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นจากค่า 7.3 kPa ของ P1C8 เป็น 10.6 kPa และ 13.8 kPa ของ P2C8 และ P3C8 ตามลำดับ เนื่องจากไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVA มากขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงที่หนาแน่นขึ้นอันเนื่องมาจากการมีหมู่ไฮดรอกซิลที่หนาแน่นขึ้น จึงมีโอกาสของการเกิดพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของ PVA ส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงมากขึ้นและมีค่าความแข็งแรงกตที่เพิ่มขึ้น จากผลข้างต้นจึงสรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณ PVA และ MMT ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกตของไฮโดรเจลเพิ่มสูงขึ้น

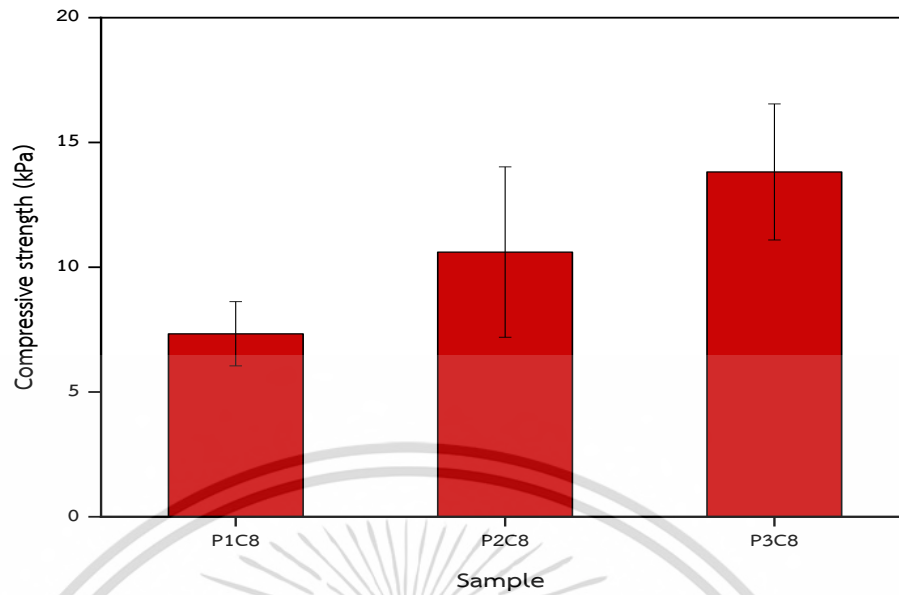
ค่า Compressive Modulus ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ คำนวณจากค่า Compressive Modulus ที่ 1-2% การกดอัดของไฮโดรเจล แสดงดังรูปที่ 4.12 ข้างต้นให้ผลสอดคล้องกับค่าความแข็งแรงกตอัด โดยไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVA เพิ่มขึ้น (1-3%w/v) ส่งผลให้มีค่า Compressive Modulus สูงขึ้น โดยไฮโดรเจลสูตร P1C8 มีค่า Compressive Modulus เท่ากับ 51.0 kPa และมีค่าเพิ่มขึ้นในสูตร P2C8 และ P3C8 โดยมีค่า Compressive Modulus เท่ากับ 53.4 kPa และ 134.0 kPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลสูตร P1C8 และ P2C8 มีค่า Compressive Modulus ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอาจเกิดจากขั้นตอนการเก็บและควบคุมสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของไฮโดรเจลสูตร P2C8 ที่มีความชื้นในระบบมากกว่าไฮโดรเจลสูตรอื่น ๆ ทำให้ไฮโดรเจลมีความชื้นในโครงสร้างมากและส่งผลให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงลดลง เมื่อนำไปทดสอบความแข็งแรงกตไม่เป็นไปตามแนวโน้มที่ควรเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ PVA และในการเติมสารเสริมแรง MMT ในไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลมีค่า Compressive Modulus สูงขึ้น โดยในสูตร P1C8M1, P2C8M1 และ P3C8M1 มีค่า Compressive Modulus เท่ากับ 103.6 kPa, 167.6 kPa และ 172.0 kPa ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าสูตร P1C8, P2C8 และ P3C8 ตามลำดับ แสดงถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเสียรูปที่สูงขึ้นเมื่อมีการเติม MMT หรือเพิ่มปริมาณ PVA



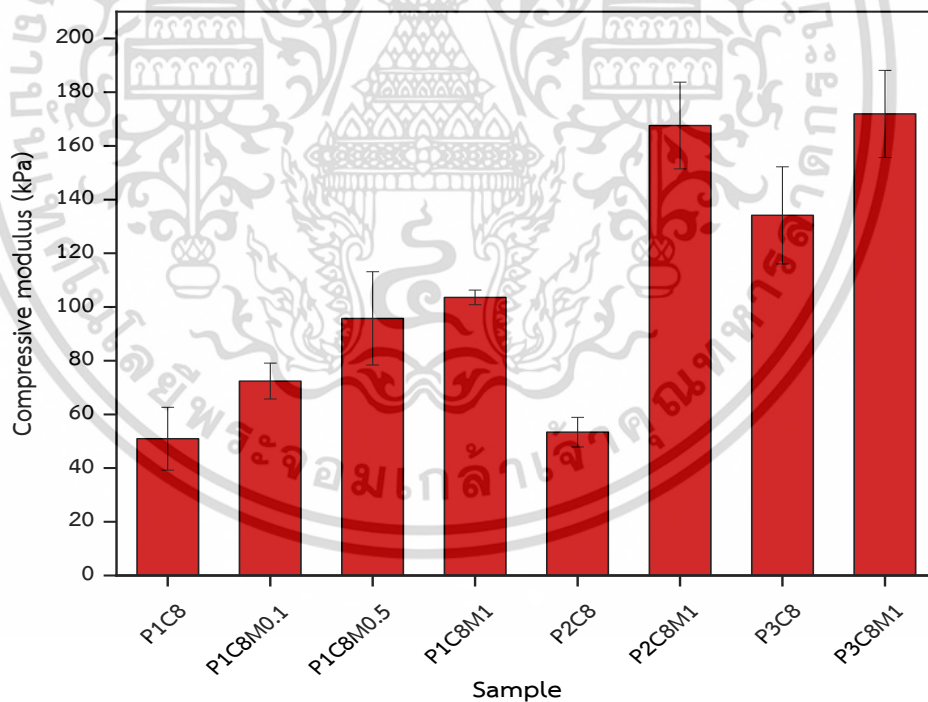
รูปที่ 4.10 ผลของปริมาณ MMT ต่อค่า Compressive strength ของไฮโดรเจลสูตร : ก. P1C8,

ข. P2C8 และ ค. P3C8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ผลของอัตราส่วน PVA ต่อค่า Compressive strength ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ



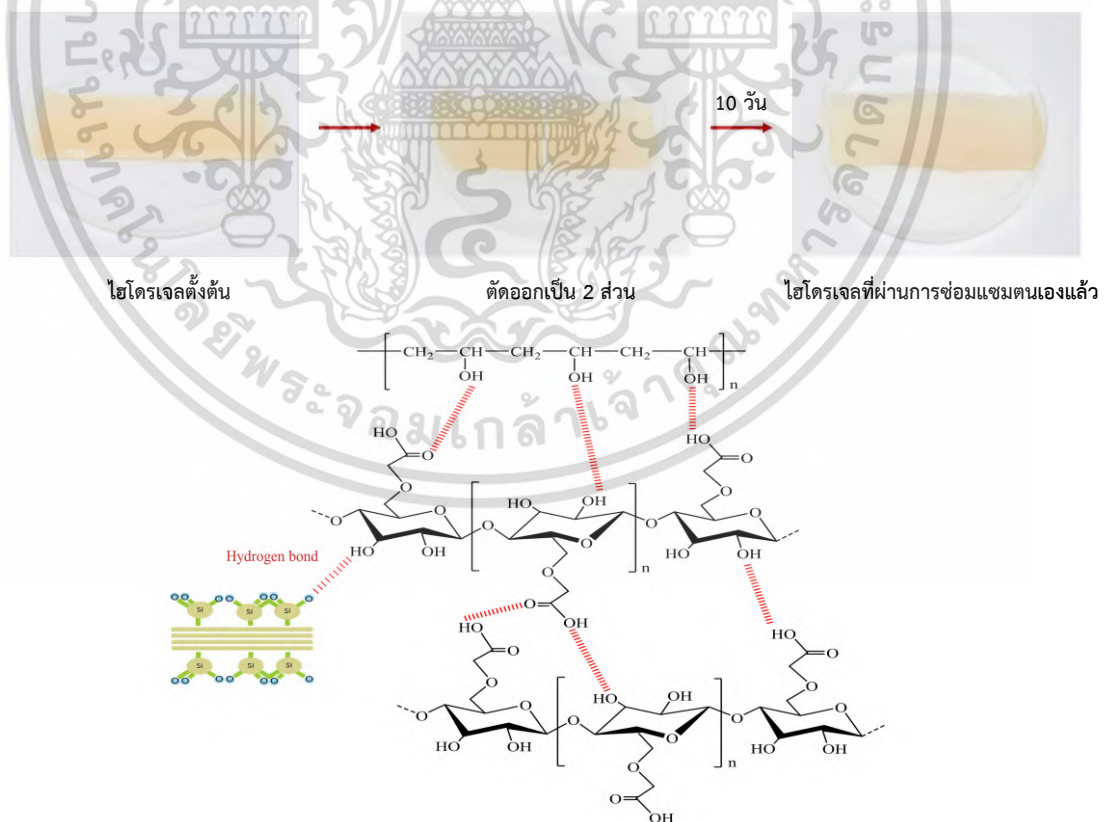
รูปที่ 4.12 Compressive Modulus ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

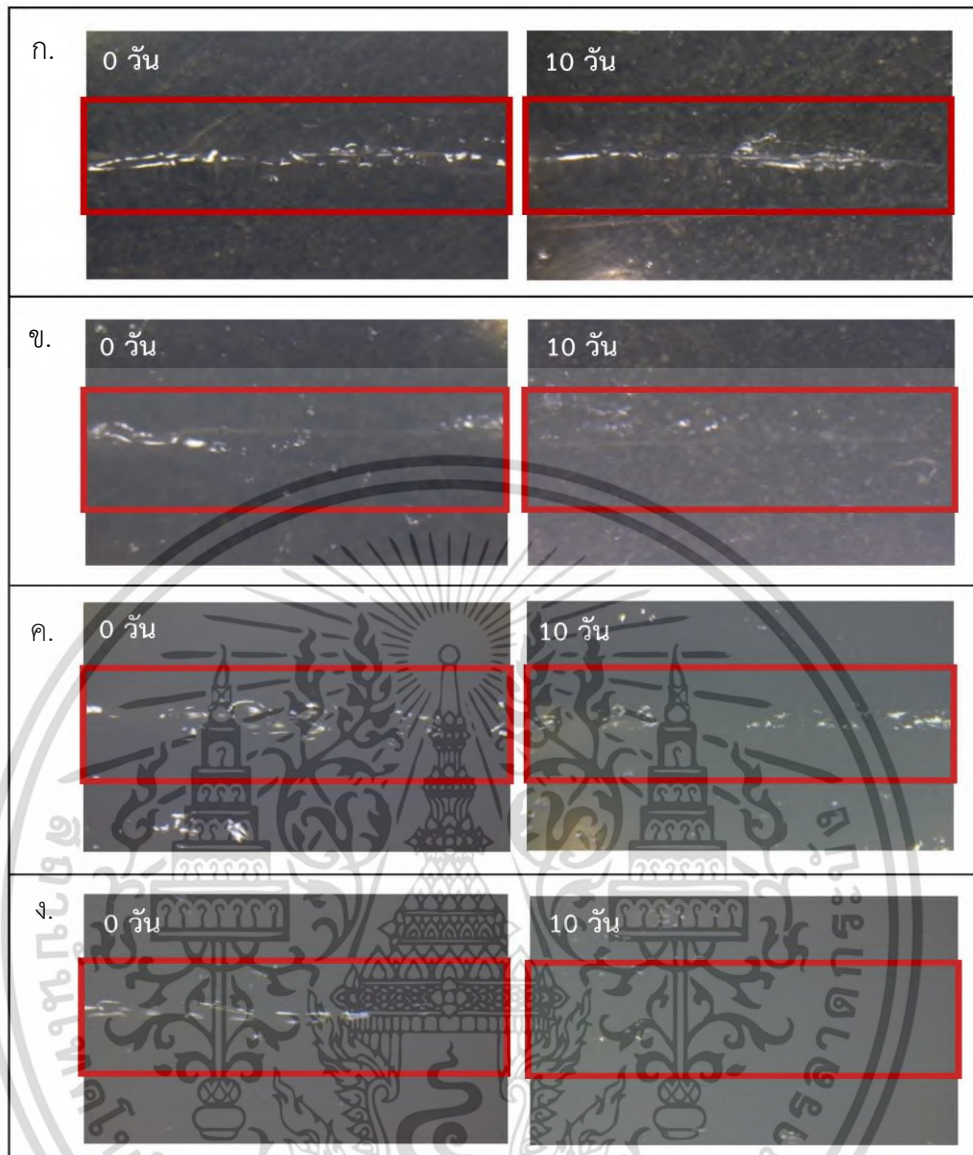
4.7.1 ไฮโดรเจลที่ซ่อมแซมตนเองในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90±5%

ผลการศึกษาการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลแสดงดังรูปที่ 4.13 โดยตัดไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 ออกเป็น 2 ส่วนและต่อให้ติดกันและเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90±5% เป็นระยะเวลา 10 วัน โดยไฮโดรเจลเกิดการซ่อมแซมตนเองได้ดีมีการเชื่อมติดเป็นชิ้นเดียวกันในลักษณะเดียวกันกับไฮโดรเจลเริ่มต้น ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงดังรูปที่ 4.14 แสดงถึงการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลที่ถูกเก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90±5% ในวันที่ 0 และ 10 พบว่าไฮโดรเจลทุกสูตรสามารถซ่อมแซมตนเองโดยรอยที่ถูกตัดขาดสามารถผสานติดกันได้ภายในระยะเวลา 10 วัน แต่ยังคงเห็นร่องรอยของการตัดอยู่เล็กน้อย โดยไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 เป็นไฮโดรเจลสูตรที่มีการซ่อมแซมตนเองได้ดีที่สุดเนื่องจากหมู่ไฮลาลานอลในโครงสร้างของ MMT สามารถเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA และ CMC ได้จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างพันธะไฮโดรเจนที่บริเวณส่วนที่เกิดความเสียหาย ไฮโดรเจลจึงเกิดการซ่อมแซมตนเองได้ดีขึ้นเมื่อได้รับความเสียหาย



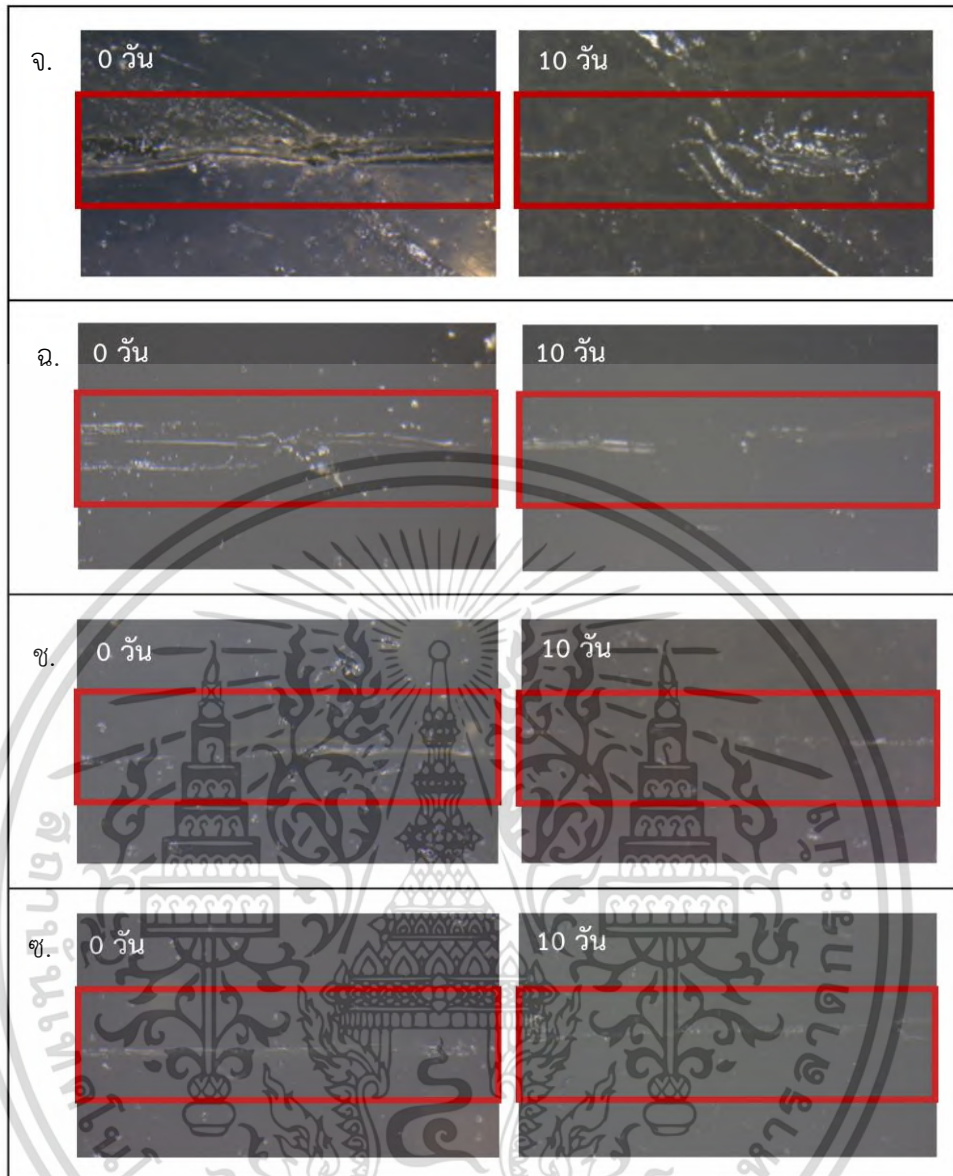
รูปที่ 4.13 การซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่ระยะห่างจากชิ้นงาน 1 ซม. แสดงการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลทุกสูตรในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ ในวันที่ 0 และ 10 :
 ก. P1C8, ข. P1C8M0.1, ค. P1C8M0.5, ง. P1C8M1, จ. P2C8, ฉ. P2C8M1, ช. P3C8
 และ ซ. P3C8M1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

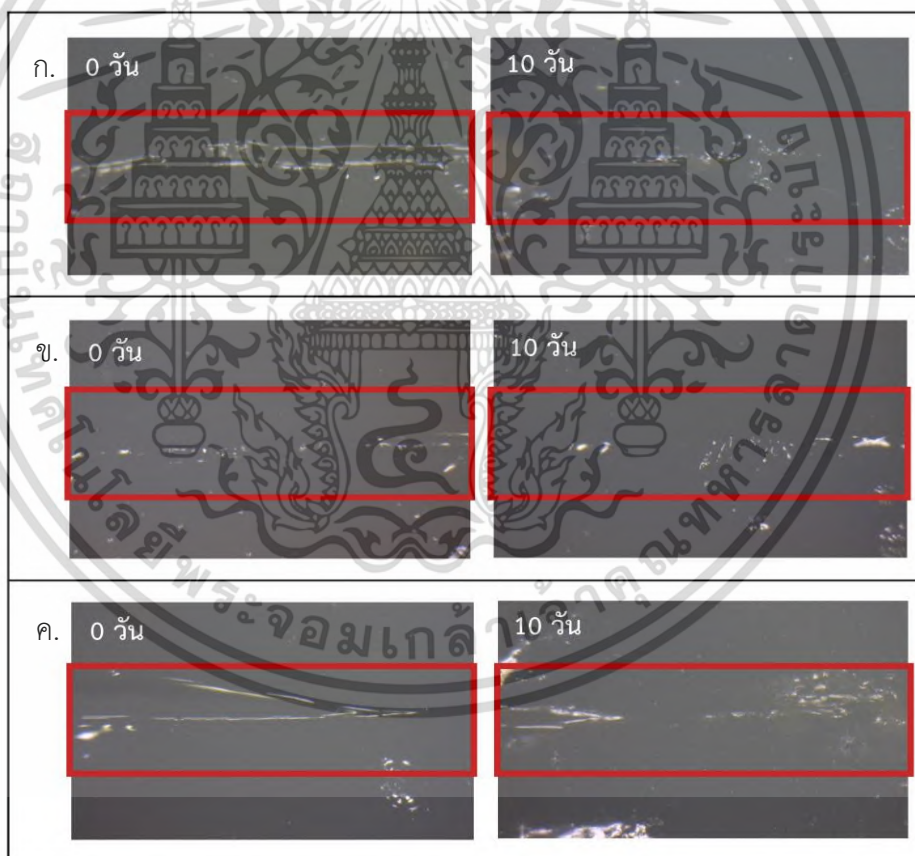


รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ดิฟฟิรอลที่ระยะห่างจากชิ้นงาน 1 ซม. แสดงการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลทุกสูตรในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ ในวันที่ 0 และ 10 : ก. P1C8, ข. P1C8M0.1, ค. P1C8M0.5, ง. P1C8M1, จ. P2C8, ฉ. P2C8M1, ช. P3C8 และ ซ. P3C8M1 (ต่อ)

4.7.2 ไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองภายใต้สภาวะ กรด, เบส และ กลาง

การซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลภายใต้สภาวะ กรด, เบส และกลาง ศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงถ่ายภาพไฮโดรเจลที่มีการตัดและหยุดสารละลาย กรด (สารละลาย PBS เอกสารนี้ pH 5.5), เบส (สารละลาย PBS pH 7.4) และกลาง (น้ำกลั่น) หลังจากนั้นนำมาต่อติดกันเพื่อให้เกิดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลโดยเก็บไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ และถ่ายภาพในวันที่ 0 และ 10 โดยเลือกไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 มาทดสอบโดยภาพไฮโดรเจลที่เกิดการซ่อมแซมตนเองเมื่อหยดสารละลายกรด, เบส และกลาง แสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าไฮโดรเจลที่หยดสารละลายกรด, เบส และ น้ำกลั่น (กลาง) สามารถซ่อมแซมตนเองได้ดีแต่ยังคงเห็นร่องรอยของการตัดเล็กน้อยหลังจากเกิดการซ่อมแซมตนเองเป็นระยะเวลา 10 วัน เหมือนกับไฮโดรเจลที่ไม่ได้หยดสารละลายกรด, เบส และกลางในหัวข้อ 4.7.1 โดยไฮโดรเจลเกิดการซ่อมแซมตนเองได้ดีที่สุดในสภาวะกรด เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโซเดียมไอออน (Na^+) ในโครงสร้างของ CMC กับโปรตอน (H^+) ของกรด อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลตั้งต้นมีสภาวะเป็นกรดอยู่แล้วดังนั้นเมื่อหยดสารละลายที่มีสภาวะเป็นกลางและเบสจึงไม่เป็นการรบกวนกระบวนการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลมากนัก ไฮโดรเจลจึงสามารถซ่อมแซมตนเองได้เมื่อมีการหยดสารละลายกรด, เบส และกลาง และซ่อมแซมตนเองได้ดีที่สุดในสภาวะการหยดสารละลายกรด



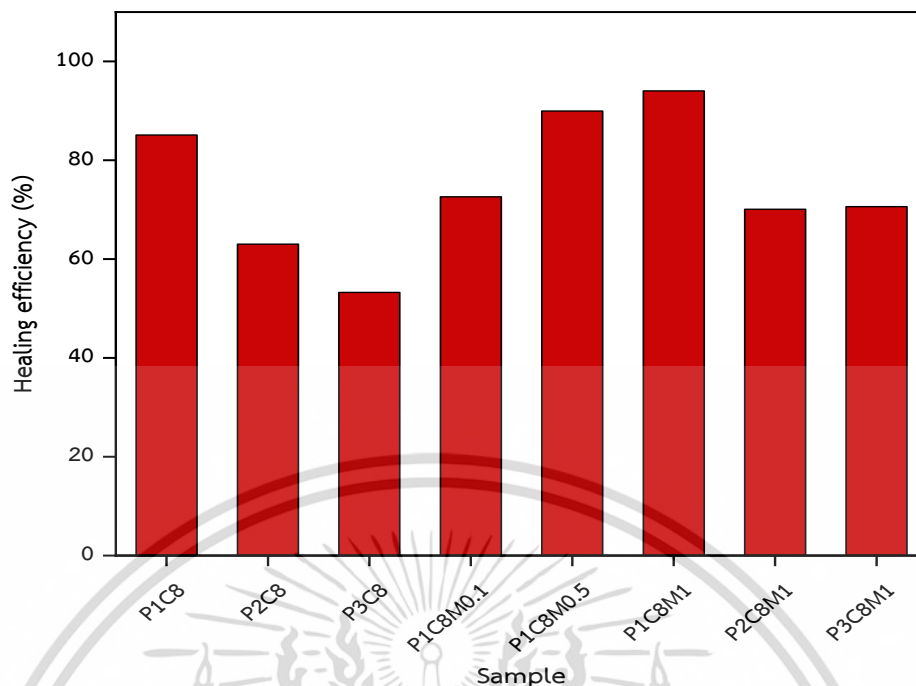
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลที่ระยะห่างจากชิ้นงาน 1 ซม. แสดงการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 ที่หยดสารละลายกรด, เบส และ กลาง ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ $90 \pm 5\%$ ในวันที่ 0 และ 10 : ก. ไฮโดรเจลที่หยดสารละลายกรด,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่: ข. ไฮโดรเจลที่หยดสารละลายเบส และ ค. ไฮโดรเจลที่หยดน้ำกลั่น ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.3 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองแล้วนำไปทดสอบความแข็งแรงดึง โดยค่าที่ได้จากการทดสอบ แสดงในหัวข้อที่ 4.5 รูปที่ 4.7 และ 4.8 (กราฟแท่งสีน้ำเงิน) จากผลการทดสอบพบว่าไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองแล้วมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำกว่าไฮโดรเจลตั้งต้นทุกสูตรและพบว่ามีค่าความแข็งแรงดึงลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ PVA โดยไฮโดรเจลที่ซ่อมแซมตนเองแล้วสูตร P1C8, P2C8 และ P3C8 มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 34.6 kPa, 22.0 kPa และ 21.4 kPa ตามลำดับ เนื่องจากไฮโดรเจลที่มีปริมาณ PVA มากส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงที่หนาแน่นขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ยาก ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลลดลง ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองแล้วจึงลดลง แต่เมื่อมีการเติมสารเสริมแรง MMT (P1C8M0.1, P1C8M0.5 และ P1C8M1) พบว่าค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลที่ผ่านการซ่อมแซมตนเองแล้วมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก MMT มีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างจึงสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA และหมู่คาร์บอกซิลิกของ CMC ได้อีกครั้งหลังจากไฮโดรเจลได้รับความเสียหายทำให้ไฮโดรเจลที่มีการเติม MMT มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองได้ดียิ่งขึ้น

ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ คำนวณจากสมการประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเอง (%HE) จากค่าความแข็งแรงดึงในหัวข้อ 3.8.6 แสดงดังรูปที่ 4.16 โดยพบว่าการเพิ่มปริมาณ PVA (P1C8, P2C8 และ P3C8) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองลดลงโดยมีค่าเท่ากับ 85%, 63% และ 53% ตามลำดับ และสูตรที่มีการเพิ่มปริมาณสารเสริมแรง MMT (P1C8M0.1, P1C8M0.5 และ P1C8M1) มีเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 73%, 90% และ 94% ตามลำดับ โดยสูตรที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองดีที่สุดคือสูตร P1C8M1



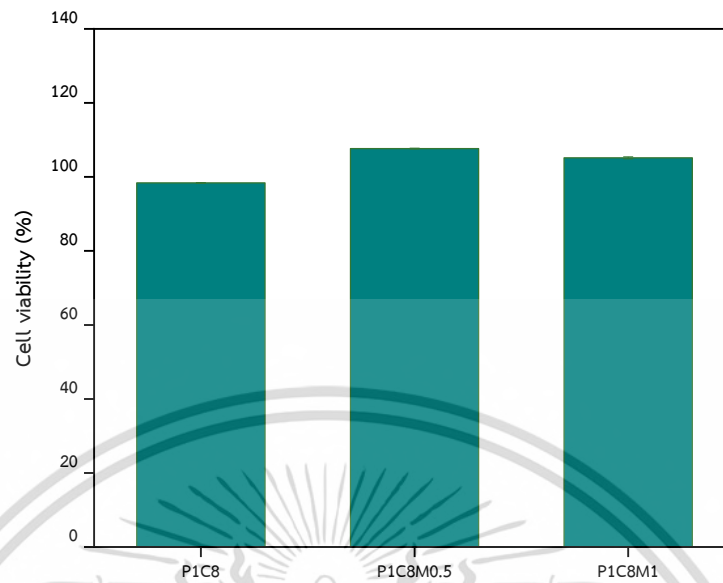
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

4.8 การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์

การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของไฮโดรเจลโดยเซลล์ที่ใช้ในทดสอบคือ African green monkey kidney cells ไฮโดรเจลสูตรที่ใช้ทดสอบคือสูตร P1C8, P1C8M0.5 และ P1C8M1 เพื่อศึกษาว่าไฮโดรเจลมีความเป็นพิษต่อเซลล์หรือไม่และปริมาณ MMT ที่เพิ่มขึ้นมีผลอย่างไรต่อค่าความเป็นพิษต่อเซลล์

ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ของไฮโดรเจลทั้ง 3 สูตร พบว่าไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ โดยค่าความเป็นพิษต่อเซลล์ของไฮโดรเจลสูตร P1C8, P1C8M0.5 และ P1C8M1 มีค่าเท่ากับ 1.61%, -7.64% และ -5.22% ตามลำดับ ค่าต่ำกว่า 50% แสดงถึงไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ และเมื่อนำค่าความเป็นพิษต่อเซลล์มาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ Cell viabilities พบว่ามีค่ามากกว่า 70% ตามมาตรฐาน ISO 10993-5 [44] โดยไฮโดรเจลสูตร P1C8, P1C8M0.5 และ P1C8M1 มีค่าเปอร์เซ็นต์ cell viability เท่ากับ 98.4%, 107.6% และ 105.0% ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.17 เมื่อมีการเติมสารเสริมแรง MMT ในไฮโดรเจล (P1C8M0.5 และ P1C8M1) พบว่าเซลล์มีการเจริญเติบโต โดยค่า cell viability มีค่ามากกว่า 100% แสดงถึงการเติม MMT ในไฮโดรเจลส่งผลให้มีการเจริญเติบโตของเซลล์ได้ดีเนื่องจากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการยึดเกาะของเซลล์ [45] จึง

สรุปได้ว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีการเติม MMT และไม่เติม MMT ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์ Cell viability ของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลที่มีสมบัติในการซ่อมแซมตนเองจากพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้และไม่มีความเป็นพิษ โดยไฮโดรเจลเตรียมขึ้นจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Na-CMC) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เสริมแรงด้วยมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ไฮโดรเจลถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการแช่ในสารละลายกรดซิดริกเพื่อเปลี่ยนหมู่คาร์บอกซิเลตของ Na-CMC เป็นหมู่คาร์บอกซิลิก และเกิดอันตรกิริยากันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่าง CMC, PVA และ MMT โดยไฮโดรเจลที่เตรียมได้นำมาคำนวณค่าปริมาณของแข็งและปริมาณน้ำในไฮโดรเจล ตรวจสอบสัดส่วนฐานวิทยาและการกระจายตัวของ MMT ในไฮโดรเจล ทดสอบสมบัติเชิงกลและคำนวณประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล โดยเก็บไฮโดรเจลไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90 ± 5 % เป็นระยะเวลา 10 วันก่อนนำไปทดสอบเพื่อควบคุมสภาวะความชื้นและปริมาณน้ำภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล

โดยมีข้อสรุปดังนี้

1. ไฮโดรเจลถูกเตรียมขึ้นด้วยวิธีการแช่ในสารละลายกรดซิดริก เก็บในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 90 ± 5 % เป็นระยะเวลา 10 วัน พบว่าไฮโดรเจลมีความหนาแน่นเท่ากับ 0.001 g/cm^3 เท่ากันในทุก ๆ สูตร โดยมีปริมาณน้ำและของแข็งเฉลี่ยอยู่ในช่วง 47-52% และ 48-53% ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

2. การตรวจสอบสัดส่วนฐานวิทยาของไฮโดรเจลโดยตรวจสอบการกระจายตัวของ MMT บริเวณพื้นผิวและบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 พบว่า MMT มีการกระจายตัวดีในไฮโดรเจล และการศึกษาขนาดรูพรุนของไฮโดรเจลพบว่า ไฮโดรเจลสูตรที่มีการใส่สารเสริมแรง MMT มีขนาดรูพรุนที่เล็กกว่าไฮโดรเจลสูตรที่ไม่ได้ใส่สารเสริมแรงเนื่องจาก MMT มีลักษณะเป็นชั้นซ้อนกันหลายชั้นและมีโครงสร้างเป็นแผ่นทำให้เกิดการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์กับแผ่นของ MMT และเกิดอันตรกิริยาต่อกันช่วยให้ไฮโดรเจลเกิดการเชื่อมโยงและมีปริมาณเนื้อสารมากขึ้น ขนาดรูพรุนภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลจึงเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวด้านนอกและบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวด้านนอกและบริเวณภาคตัดขวางของไฮโดรเจลมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ PVA และ MMT เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจนมากขึ้นระหว่าง PVA, CMC และ MMT โดยไฮโดรเจลสูตรที่มีค่าความแข็งแรงบริเวณพื้นผิวและบริเวณภาคตัดขวางสูงสุดคือ P3C8M1

4. การทดสอบความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ พบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีการเพิ่มปริมาณ PVA 1-2% (P1C8 และ P2C8) มีค่าความแข็งแรงดึงและค่า Young's Modulus ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ที่ปริมาณ PVA 3% (P3C8) ความแข็งแรงดึงและ Young's Modulus มีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณ MMT (0.1-1%) ในไฮโดรเจลพบว่าค่าความแข็งแรงดึงและค่า Young's Modulus ของไฮโดรเจลมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก PVA และ MMT มีส่วนช่วยให้เกิดการเชื่อมโยงและเป็นสารเสริมแรงให้กับไฮโดรเจล

5. การทดสอบความแข็งแรงกดของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ พบว่าไฮโดรเจลที่มีการเพิ่มปริมาณ PVA (1-3%) และ MMT (0.1-1%) มีค่าความแข็งแรงกดสูงขึ้น เนื่องจาก PVA และ MMT ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงที่หนาแน่นขึ้นและช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกดอัดของไฮโดรเจล

6. ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากภาพถ่ายรอยตัดของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงพบว่าไฮโดรเจลเกิดการซ่อมแซมตนเองแต่ยังคงเหลือร่องรอยของการตัดเพียงเล็กน้อย ซึ่งไฮโดรเจลทุกสูตรมีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองได้ภายในระยะเวลา 10 วัน การทดสอบหัตถสารละลายกรด, เบส และกลางระหว่างรอยตัดของไฮโดรเจลสูตร P1C8M1 พบว่าไฮโดรเจลสามารถซ่อมแซมตนเองได้โดยเหลือร่องรอยของการตัดเพียงเล็กน้อยภายในระยะเวลา 10 วันเช่นเดียวกับไฮโดรเจลที่ไม่ได้หัตถสารละลาย โดยสารละลายกรดให้ผลประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองดีที่สุด

7. จากการทดสอบความแข็งแรงดึงสามารถนำค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลตั้งต้นและไฮโดรเจลที่เกิดการซ่อมแซมตนเองแล้วมาคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลได้ โดยไฮโดรเจลสูตรที่มีการเพิ่มปริมาณ PVA 1-3% (P1C8, P2C8 และ P3C8) มีค่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองลดลง เนื่องจากเมื่อมีปริมาณ PVA มากส่งผลให้เกิดการเชื่อมโยงกันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจลมาก การเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์จึงเป็นไปได้ยาก ประสิทธิภาพการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจึงลดลง อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ MMT 0.1-1% (P1C8M0.1, P1C8M0.5 และ P1C8M1) ในไฮโดรเจลส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองที่สูงขึ้น โดยไฮโดรเจลสูตรที่มีประสิทธิภาพในการซ่อมแซมตนเองได้ดีที่สุดคือสูตร P1C8M1 ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพใน

การซ่อมแซมตนเองเท่ากับ 94% เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่าง MMT กับ CMC และ PVA ช่วยให้เกิดการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจล

8. การทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ด้วยเทคนิค MTT assay ของไฮโดรเจลสูตร P1C8, P1C8M0.5 และ P1C8M1 พบว่าไฮโดรเจลทั้ง 3 สูตรไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต โดยไฮโดรเจลสูตรที่มีการเติมสารเสริมแรง MMT (P1C8M0.5 และ P1C8M1) เซลล์สามารถเจริญเติบโตได้ โดยมีค่า Cell viability มากกว่า 100%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เตรียมไฮโดรเจลโดยมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของมอนต์มอริลโลไนต์ในช่วง 0.5-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
2. เตรียมไฮโดรเจลที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงดึงเป็นลักษณะรูปทรงดัมเบลเพื่อเพิ่มโอกาสให้ชิ้นงานขาดระหว่างช่วง gauge length ไม่ให้ชิ้นงานเกิดการขาดที่ตำแหน่งจุดจับชิ้นงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Deng, G. Li, F. Yu, H. Liu, F. Liu, C. Sun, W. Jiang, H. and Chen, Y. 2012. “Dynamic Hydrogels with an Environmental Adaptive Self-Healing Ability and Dual Responsive Sol–Gel Transitions.” *ACS Macro Letters*. 1(2) : 275-279.
- [2] Chirila, T.V. Lee, H.H. Odon, M. Nieuwenhuizen, M.M.L.. Blakey, I. and Nicholson, T.M. 2014. “Hydrogen-bonded supramolecular polymers as self-healing hydrogels: Effect of a bulky adamantyl substituent in the ureido-pyrimidinone monomer.” *Journal of Applied Polymer Science*. 131(4) : 1-12.
- [3] Wang, Y. Wang, Z. Wu, K. Wu, J. Meng, G. Liu, Z. and Guo, X. 2017. “Synthesis of cellulose-based double-network hydrogels demonstrating high strength, self-healing, and antibacterial properties.” *Carbohydrate Polymer*. 168 : 112-120.
- [4] Zheng, W.J. Gao, J. Wei, Z. Zhou, J. and Chen, M.Y. 2015. “Facile fabrication of self-healing carboxymethyl cellulose hydrogels.” *European Polymer Journal*. 72(14) : 514–522.
- [5] Sadeghi, S. Nourmohammadi, J. Ghaee, A. and Soleimani, N. 2020. “Carboxymethyl cellulose-human hair keratin hydrogel with controlled clindamycin release as antibacterial wound dressing.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 147 : 1239-1247.
- [6] Efthimiadou, K.E. Metaxa, A.F. and Kordas, G. 2014. “Modified Polysaccharides as Drug Delivery.” *Polysaccharide Hydrogels*. 2014 : 1-26.
- [7] Jing, X. Li, H. Mi, H.Y. Liu, Y.J. Feng, P.Y. Tan, Y.M. and Turng, L.S. 2019. “Highly transparent, stretchable, and rapid self-healing polyvinyl alcohol/cellulose nanofibril hydrogel sensors for sensitive pressure sensing and human motion detection.” *Sensors and Actuators B: Chemical*. 295 : 159-167.
- [8] Chenn, Y.M. Sun, L. Yang, S.A. Shi, L. Zheng, W.J. Wei, Z. and Hu, C. 2017. “Self-healing and photoluminescent carboxymethyl cellulose-based hydrogels.” *European Polymer Journal*. 94 : 501-510.

- [9] Ge, W. Cao, S. Shen, F. Wang, Y. Ren, J. and Wang, X. 2019. "Rapid self-healing, stretchable, moldable, antioxidant and antibacterial tannic acid-cellulose nanofibril composite hydrogels." *Carbohydrate Polymer*. 224 : 115147.
- [10] Qi, X. Guan, Y. Chen, G. Zhang, B. Ren, J. Peng, F. and Sun, R. 2015. "A non-covalent strategy for montmorillonite/xylose self-healing hydrogel." *Royal Society of Chemistry*. 5 : 41006-41012.
- [11] Fajardo, R.A. Pereira, G.B.A. Rubira, F.A.J. Valente, J.M.A. and Muniz, C.E. 2015. "Stimuli-Responsive Polysaccharide-Based Hydrogels." *Polysaccharide Hydrogels*. 9 : 325-366.
- [12] วารุณี ตานันต์ และ สายันต์ แสงสุวรรณ. 2557. "พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก : การสังเคราะห์การวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ Super Absorbent Polymer : Synthesis, Characterization, and Applications." *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*. 16(2) : 63-81.
- [13] Soderberg, T. 2019. **Imine (Schiff base) formation.** [Online]. Available : [https://chem.libretexts.org/Under_Construction/Purgatory/Book%3A_Organic_Chemistry_with_a_Biological_Emphasis_\(Soderberg\)/11%3A_Nucleophilic_carbonyl_addition_reactions/11.6%3A_Imine_\(Schiff_base\)_formation](https://chem.libretexts.org/Under_Construction/Purgatory/Book%3A_Organic_Chemistry_with_a_Biological_Emphasis_(Soderberg)/11%3A_Nucleophilic_carbonyl_addition_reactions/11.6%3A_Imine_(Schiff_base)_formation).
- [14] Chegg Study. n.d. **Essentials of General, Organic and Biochemistry.** [Online]. Available <https://www.chegg.com/homework-help/essentials-of-general-organic-and-biochemistry-1st-edition-chapter-11-problem-78ae-solution-9781429291019>.
- [15] Paulsen, H. 2018. **Synthesis and Characterization of Hydrogels prepared by Free Radical Polymerization.** Hamburg. : University of Hamburg.
- [16] Chem.Libretexts. 2019. **Ionic Bonds.** [Online]. Available : [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Chemical_Bonding/Fundamentals_of_Chemical_Bonding/Ionic_Bond](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Chemical_Bonding/Fundamentals_of_Chemical_Bonding/Ionic_Bond).
- [17] Leick, S. Henning, S. Degen, P. Suter, D. and Rehage, H. 2010. "Deformation of liquid-filled calcium alginate capsules in a spinning drop apparatus." *Physical Chemistry Chemical Physics*. 12 : 2950-2958.

- [18] Hoare, R.T. and Koha, S.D. 2008. “Hydrogels in drug delivery: Progress and challenges.” *Polymer*. 49(2008) : 1993-2007.
- [19] Saleem, H.M. 2016. “New Study for Nanocomposite Hydrogels for Biomedical Applications and Drug Delivery : Synthesis, Characterizations and Electrical Properties.” Degree of Ph.D. of Science in Chemistry, University of Baghdad.
- [20] Ahmed, A.E. 2013. “Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review.” *Advanced Research*. 6 : 105-121.
- [21] ฉัญญภรณ์ ศรีสุบิน. 2557. ไฮโดรเจล วัสดุดูดซับอัจฉริยะ. [Online]. Available : <http://www.dss.go.th/images/st-article/ct-10-2557-hydro.pdf>.
- [22] Taylor, D.L. 2016. “Self-Healing Hydrogels.” *Advanced materials*. 28(41) : 9060–9093.
- [23] Getachew, A.B. Kim, S.R. and Kim, J.H. 2018. “Improved stability of self-healing hydrogel pore-filled membranes with ionic cross-links.” *Membrane Science*. 553 : 1-9.
- [24] Zheng, Z. Li, T. Chen, B. Wang, S. and Guo, Z. 2017. “Self-healing supramolecular hydrogel of poly(vinyl alcohol)/chitosan carbon dots.” *Materials Science*. 52(14) : 1-10.
- [25] Cho, I.S. and Ooya, T. 2019. “Tuned cell attachments by double-network hydrogels consisting of glycol chitosan, carboxymethyl cellulose and agar bearing robust and self-healing properties.” *Biological Macromolecules*. 134 : 262-268.
- [26] Zhang, M. Xu, D. Dr. Yan, X. Chen, J. Dong, S. Zheng, B. and Huang, F. ,Prof. Dr. 2012. “Self-Healing Supramolecular Gels Formed by Crown Ether Based Host–Guest Interactions.” *Angewandte Chemie International Edition*. 51(28) : 7011–7015.
- [27] Varaprasad, K. Raghavendra, G.M. Jayaramudu, T. Yallapu, M.M. and Sadiku, R. 2017. “A mini review on hydrogels classification and recent developments in miscellaneous applications.” *Material Science and Engineering*. 79 : 958-971.
- [28] ปิยพร ร่มแสง, มัตติกา ไชยลังกา, รังสรรค์ กุณชนะนา, วิชชากร กันทรัญญ์, อนุวัฒน์ โรจน์สินทรัพย์, และ นพพล เล็กสวัสดิ์. ม.ป.ป. CMC Biopolymer. [Online]. Available : [www.agro.cmu.ac.th > absc > data](http://www.agro.cmu.ac.th/absc/data).
- [29] ยุภรณ์ มิลเลอร์. 2540. “โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.” วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 45(143) : 15-16.

- [30] Majewski, L.A. 2005. "Alternative Gate Insulators for Organic Field-Effect Transistors." A thesis submitted to the University of Sheffield for Ph.D. of Philosophy in the subject of Physic.
- [31] Bassner, S.L. and Klingenberg, E.H. 1998. **Using Poly (Vinyl Alcohol) as a binder.** 77(6) *สารคดี วิทยาศาสตร์สกุล. : สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*
- [32] Sekisui Specialty Chemicals. n.d. **Selvol™ Polyvinyl Alcohol Product Information.** [Online]. <https://www.sekisui-sc.com/products/polyvinyl-alcohol/>.
- [33] Peresin, M.S. 2011. **Novel Lignocellulosic Composites.** Carolina : Forest Biomaterials.
- [34] Gutierrez, G. 2010. **Oxidation of Clay Nanoreinforced Polyolefins.** Paris : Paris Teach.
- [35] Uddin, F. 2018. "Montmorillonite: An Introduction to Properties and Utilization." *Intech Open.* 77987 : 6-18.
- [36] Kunimine Industries. n.d. **Mechanism of a thickener.** [Online]. <https://www.kunimine.co.jp/english/products/flowable.html>.
- [37] Gacitua, W.E. Ballerini, A.A. and Zhang, J. 2005. "Polymer nanocomposites: synthetic and natural fillers a review." *Articulo.* 7(3) : 159-178.
- [38] Chaudhary, J.P. 2017. "Carboxymethylagarose-based multifunctional hydrogel with super stretchable, self-healable having film and fiber forming properties." *Arabian Journal of Chemistry.* 34 : 1-7.
- [39] Nui, J. Wang, J. Dai, X. Shao, Z. and Huang, X. 2018. "Dual physically crosslinked healable polyacrylamide/cellulose nanofibers nanocomposite hydrogels with excellent mechanical properties." *Carbohydrate Polymer.* 193 : 73-81.
- [40] Pan, J. Jin, Y. Lai, S. Shi, L. Fan, W. and Shen, Y. 2019. "An antibacterial hydrogel with desirable mechanical, self-healing and recyclable properties based on triple-physical crosslinking." *Chemical Engineering Journal.* 370 : 1228-1238.
- [41] Sirousazar, M. Kokabo, M. and Hassan, Z.M. 2012. "Swelling Behavior and Structural Characteristics of Polyvinyl Alcohol/Montmorillonite Nanocomposite Hydrogels." *Applied Polymer Science.* 123 : 50-58.
- [42] Haraguchi, K. Uyama, K. and Tanimoto, H. 2011. "Self-healing in Nanocomposite Hydrogels." *Macromolecular rapid communications.* 32 : 1253.

- [43] Mohd, S.S. Abdullah, M.A.A. and Mat Amin, K.A. 2016. "Gellan gum/clay hydrogels for tissue engineering application: Mechanical, thermal behavior, cell viability, and antibacterial properties." *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*. 31(6) : 648-666.
- [44] Kaolaor, A. Phunpee, S. Ruktanonchai, U. and Suwanton, O. 2019. "Effects of β -cyclodextrin complexation of curcumin and quaternization of chitosan on the properties of the blend films for use as wound dressings." *Journal of Polymer Research*. 26(2) : 43.
- [45] Sabzevari, A. Sabahi, H. and Nikbakht, M. 2020. "Montmorillonite, a natural biocompatible nanosheet with intrinsic antitumor activity." *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 190 : 110884.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นฉบับไม่มีหน้าภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวนิชารีย์ วีรวรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	2 กรกฎาคม พ.ศ. 2538
ที่อยู่ปัจจุบัน	135/45 หมู่ 2 ต. บ้านฉาง อ. บ้านฉาง จ.ระยอง 21130
ประวัติการศึกษา	ปี 2560 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 3.14 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	เงินทุนสนับสนุนในการเสนอผลงานทางวิชาการ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 1. นราภรณ์ นิธิกุล, นวพร บุญชาย และนิชารีย์ วีรวรรณ. 2560. “การศึกษาสมบัติการซ่อมแซมตนเองของไฮโดรเจลจากไซเตียมคาร์บอก ซีเมทิลเซลลูโลสเสริมแรงด้วยเส้นใยสับปะรดหรือฟุ้งซิลิกา.” โครงการ พิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2. Weerawan, N. Monvisade, P. and Chalitangkoon, J. 2021. “Effect of Montmorillonite on self-healing properties of sodium carboxymethyl cellulose/poly(vinyl alcohol) hydrogel.” The proceeding of The International Polymer Conference of Thailand (PCT-11), During July 1 st -2 nd , 2021 Online conference.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้