

การศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจาก
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/เจลาติน/มอนต์มอริลโลไนต์

STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF HYDROGEL
FROM POLY(VINYL ALCOHOL)/GELATIN/
MONTMORILLONITE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจาก
พอลิไวนิลแอลกอฮอล์/เจลาติน/มอนต์มอริลโลไนต์

STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF HYDROGEL
FROM POLY(VINYL ALCOHOL)/GELATIN/
MONTMORILLONITE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF HYDROGEL
FROM POLY(VINYL ALCOHOL)/GELATIN/
MONTMORILLONITE



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์/
เจลาติน/มอนต์มอริลโลไนต์

Study on Mechanical properties of Hydrogel from
Poly(vinyl alcohol)/Gelatin/Montmorillonite

ชื่อนักศึกษา

นางสาวกระวี ศรีสุมา รหัสนักศึกษา 57050372

นางสาวรัชชา จารุพัฒน์เดช รหัสนักศึกษา 57050420

นางสาววิษุภา ศรีทอง รหัสนักศึกษา 57050494

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา

เคมี

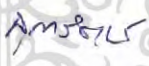
ปีการศึกษา

2560

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ ประธานกรรมการ	
ดร.ณวิสิทธิ์ โชติแสง กรรมการ	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์/ เจลาติน/มอนต์มอริลโลไนต์		
	Study on Mechanical properties of Hydrogel from Poly(vinyl alcohol)/Gelatin/Montmorillonite		
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกระวี ศรีสุมา	รหัสนักศึกษา	57050372
	นางสาวธันชชา จารุพัฒน์เดช	รหัสนักศึกษา	57050420
	นางสาวรวิษฐา ศรีทอง	รหัสนักศึกษา	57050494
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)		
ภาควิชา	เคมี		
ปีการศึกษา	2560		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทธารุธ / มนต์วิเศษ		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Freeze-thaw เตรียมได้จากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด N ความเข้มข้น 10 %w/v และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G ความเข้มข้น 20, 25, 30, 35 และ 40 %w/v โดยมีเจลาติน 2 %w/v เป็นสารช่วยในการคงรูปของไฮโดรเจลและมอนต์มอริลโลไนต์ 1, 2 และ 3 %w/v เป็นสารช่วยในการคงรูปของไฮโดรเจลและสารเสริมแรง จากการศึกษาสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน การหาปริมาณน้ำและของแข็งคงเหลือในไฮโดรเจล รวมถึงการทดสอบความแข็งพื้นผิวด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์ พบว่าปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G แปรผันตรงกับปริมาณของแข็งคงเหลือและแปรผกผันกับปริมาณน้ำในไฮโดรเจล ส่วนค่าความแข็งพื้นผิวมีค่าอยู่ในช่วง 26-42 ซึ่งอยู่ในช่วงนี้มากและจากการทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ พบว่าไฮโดรเจลสูตร M3G40 ซึ่งเป็นสูตรที่มีปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G และปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์มากที่สุด มีความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกดอัด โมดูลัสของยังและโมดูลัสยืดหยุ่นมากที่สุด โดยมีค่า 315, 150, 883 และ 992 kPa ตามลำดับ

คำสำคัญ : เจลาติน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ มอนต์มอริลโลไนต์ ไฮโดรเจล

Title	Study on Mechanical properties of Hydrogel from Poly(vinyl-alcohol)/Gelatin/Montmorillonite	
Students	Miss Kornrawee Srisuma	Student ID 57050372
	Miss Thanatcha Jarupatnadech	Student ID 57050420
	Miss Rawitsada Srithong	Student ID 57050494
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL)	
Academic Year	2017	
Advisor	Asst.Prof.Dr. Pathavuth Monvisade	

Abstract

This research studied on mechanical properties of hydrogels by Freeze-thaw method. The hydrogels were prepared by 10 %w/v of poly(vinyl alcohol) grade N and poly(vinyl alcohol) grade G with various concentrations at 20, 25, 30, 35 and 40 %w/v. Gelatin (2 %w/v) was added as a stabilizer. Montmorillonite at various amount of 1, 2 and 3 %w/v as a stabilizer and reinforcing agent was also utilized. The cross-section morphology was determined by Scanning electron microscope. It was found that the distribution of montmorillonite were well-dispersed within the hydrogel. The water content, solid content and hardness test by Shore durometer were determined. The results showed that the amount of poly(vinyl alcohol) grade G, directly varies with the solid content but inversely varies with the water content. In addition, the hardness values of all hydrogels are in the range of 26-42 indicating extra soft materials. The mechanical properties of hydrogels were tested by Universal testing machine. The results showed that M3G40 hydrogel which contained highest amount of poly(vinyl alcohol) grade G and montmorillonite had highest values of tensile strength, compressive strength, young's modulus and elastic modulus at 315, 150, 883 and 992 kPa, respectively.

Keywords : Gelatin, Poly(vinyl alcohol), Montmorillonite, Hydrogel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรารุณ มนต์วิเศษ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการวิจัยนี้ ที่กรุณาได้รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาให้แก่คณะผู้วิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ทำให้คณะผู้วิจัยได้รับข้อมูลที่ครบถ้วน ทำให้สามารถนำมาใช้วิเคราะห์วางแผนและสรุปข้อมูลได้อย่างราบรื่น คณะผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภารัตน์ รักชลธี และ ดร.ณวสิทธิ์ โชติแสง ซึ่งเป็นอาจารย์คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ตลอดจนให้คำแนะนำเพื่อให้โครงการพิเศษนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้ความรู้และข้อแนะนำที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมถึงขอขอบพระคุณ พี่ ๆ ปริญญาโทและปริญญาเอกในหน่วยงานวิจัยการสังเคราะห์พอลิเมอร์และวัสดุเฉพาะทางที่คอยให้คำแนะนำและให้ข้อมูลที่เป็นอย่างอื่นต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัยโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณค่าอันพึงมีจากงานวิจัยเล่มนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณ บิดามารดา ครูอาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และวางรากฐานการศึกษาแก่คณะผู้วิจัย

กระวี	ศรีสุมา
ธัชชา	จารุพัฒน์เดช
วิภา	ศรีทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อ/สัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels).....	3
2.1.1 สมบัติของไฮโดรเจล.....	3
2.1.1.1 การบวมน้ำ (Swelling).....	3
2.1.1.2 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยง (Cross-linking density).....	3
2.1.1.3 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation).....	3
2.1.1.4 ความยืดหยุ่น (Elasticity).....	3
2.1.2 วิธีการเตรียมไฮโดรเจล	4
2.1.2.1 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมโยงโดยใช้สารเคมี (Chemical crosslinking).....	4
2.1.2.2 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslinking).....	4
2.1.2.3 การเตรียมไฮโดรเจลโดยการใช้อัลตราไวโอเลต (Hydrogel preparation by irradiation).....	4
2.1.3 ประเภทของไฮโดรเจล	4
2.1.3.1 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตาม ลักษณะการเกิดประจันในโครงสร้าง.....	4

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.3.2 การแบ่งประเภทของไฮโดรเจลตาม ชนิดพันธะภายในโครงสร้าง.....	5
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจล.....	6
2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)	7
2.2.1 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	7
2.2.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	7
2.2.3 การใช้เทคนิค Freeze-thaw กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	8
2.3 เจลาติน (Gelatin).....	9
2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน.....	9
2.3.2 สมบัติของเจลาติน	9
2.3.2.1 การละลาย.....	9
2.3.2.2 การเกิดเจล.....	9
2.3.3 การจำแนกประเภทของเจลาติน	10
2.3.4 การใช้ประโยชน์ของเจลาติน.....	10
2.3.4.1 อุตสาหกรรมอาหาร.....	10
2.3.4.2 อุตสาหกรรมการแพทย์.....	11
2.4 มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT).....	12
2.4.1 การใช้มอริลโลไนต์ในการเสริมแรง.....	13
2.4.2 การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ.....	14
2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	15
2.5 โซเดียมเบนโซเอต.....	15
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	19
3.1 สารเคมี.....	19
3.2 อุปกรณ์.....	19
3.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	20
3.4 การเตรียมไฮโดรเจล.....	21
3.4.1 การเตรียมไฮโดรเจลที่ปราศจากมอนต์มอริลโลไนต์	21
3.4.2 การเตรียมไฮโดรเจลที่เติมมอนต์มอริลโลไนต์.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ	23
3.5.1 ความหนา (Thickness)	23
3.5.2 สัณฐานวิทยา (Morphology)	23
3.5.3 ทดสอบความแข็งแรงต่อการดึงยืด (Tensile strength)	23
3.5.4 ทดสอบความแข็งแรงต่อการกดอัด (Compressive strength)	24
3.5.5 การทดสอบหาปริมาณน้ำ (Water content) และของแข็ง (Solid content) ในไฮโดรเจล	25
3.5.6 ทดสอบความแข็งพื้นผิว (Hardness)	26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	27
4.1 การเตรียมไฮโดรเจล	27
4.2 สัณฐานวิทยา (Morphology)	28
4.3 ปริมาณน้ำ (Water content) และของแข็งคงเหลือ (Solid content) ในไฮโดรเจล	30
4.4 ความแข็งพื้นผิว (Surface hardness)	32
4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)	33
4.5.1 ศึกษาผลของปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G ในไฮโดรเจล	33
4.5.1.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)	33
4.5.1.2 การทดสอบแรงกด (Compression test)	34
4.5.2 ศึกษาผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ ที่มีผลต่อความแข็งแรงของไฮโดรเจล	35
4.5.2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)	35
4.5.2.2 การทดสอบแรงกด (Compression test)	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	39
5.1 สรุปผลงานวิจัย	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	45
ภาคผนวก ก ภาพตัดขวางของไฮโดรเจล	46
ภาคผนวก ข ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	48
ภาคผนวก ค ค่าความแข็งแรงกดอัดของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ง ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล	52
ภาคผนวก จ ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล	53
ภาคผนวก ฉ ความแข็งพื้นผิวไฮโดรเจล.....	54
คำรับรองเล่มโครงงานพิเศษ	55



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สมบัติจำเพาะของ PVA เกรดต่าง ๆ	19
3.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์แบบมีประจุ	5
2.2 โครงสร้างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	7
2.3 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส	8
2.4 กรดอะมิโนองค์ประกอบทางเคมีของเจลาติน	9
2.5 การเกิดเจลของเจลาติน	10
2.6 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์	13
2.7 การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์	14
2.8 การเกิดนาโนคอมโพสิต	14
2.9 โครงสร้างทางเคมีของไฮเดียมเบนโซเอต	15
3.1 แม่พิมพ์ขนาด $3 \times 7.9 \times 3 \text{ cm}^3$	20
3.2 แม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm และความลึก 2 cm	20
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (เกรด NL-05) 10 %w/v	21
3.4 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	23
3.5 ชิ้นงานตัวอย่างรูปทรงกระบอก	24
4.1 (ก) ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ข) ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับเจลาติน และ (ค) ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์	27
4.2 แบบจำลองของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์	28
4.3 ภาพตัดขวางของไฮโดรเจล (ก) M1G40, (ข) M2G40 และ (ค) M3G40	29
4.4 ภาพตัดขวางบริเวณขอบของไฮโดรเจลสูตร M3G40 (ก-ข) และ ภาพตัดขวางบริเวณกึ่งกลางของไฮโดรเจลสูตร M3G40 (ค-ง)	29
4.5 ภาพตัดขวางบริเวณกึ่งกลางของไฮโดรเจล สูตร (ก) M1G40 (ข) M2G40 และ (ค) M3G40	30
4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล	31
4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือในไฮโดรเจล	32
4.8 ค่าความแข็งพื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ	32
4.9 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่ามอดุลัสของยังของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ อันเนื่องจากผลของปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	34
4.10 ค่าความแข็งแรงกดอัดและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ อันเนื่องจากผลของปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสของยังของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ อันเนื่องจากผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์.....	36
4.12 ค่าความแข็งแรงกดอัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ อันเนื่องจากผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์.....	37
4.13 ไฮโดรเจลสูตร M2G20 ในการทดสอบความแข็งแรงกดอัด (ก) ภาพก่อนการทดสอบ (ข) ภาพระหว่างการทดสอบ และ (ค) ภาพหลังการทดสอบ.....	38
4.14 ไฮโดรเจลสูตร M2G25 ในการทดสอบความแข็งแรงกดอัด (ก) ภาพก่อนการทดสอบ (ข) ภาพระหว่างการทดสอบ และ (ค) ภาพหลังการทดสอบ.....	38



คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
M, MMT	Montmorillonite
G	Polyvinyl alcohol (GL-05)
N	Polyvinyl alcohol (NL-05)
PVA	Polyvinyl alcohol
SEM	Scanning electron microscope



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไฮโดรเจล (Hydrogel) คือวัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ซึ่งมีพันธะหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทำให้เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหสามมิติ มีสมบัติพิเศษในการดูดซับน้ำและกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ดี โดยเมื่อดูดซับน้ำแล้ว โครงสร้างร่างแหสามมิติของไฮโดรเจลจะไม่ละลายน้ำ แต่จะบวมพองและสามารถคงรูปร่างไว้ได้ โดยทั่วไปไฮโดรเจลมีความอ่อนนุ่ม และแตกง่าย เนื่องจากมีองค์ประกอบหลักเป็นน้ำ ไฮโดรเจลมีสมบัติความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น นำมาทำเป็นกระดูกอ่อนเทียม หรือหอนรองกระดูกสันหลังเทียม โดยสมบัติของไฮโดรเจลที่จะนำมาใช้กับงานเหล่านี้ได้ต้องสามารถยืดและขยายตัวภายใต้แรงกด (Compression) และแรงดึง (Tension) ได้โดยไม่เกิดการฉีกขาด

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่มีสารพิษ ไม่มีกลิ่น มีความแข็งแรงดึง และความยืดหยุ่นสูง สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ [1] ดังนั้นจึงนิยมเตรียมเป็นไฮโดรเจลที่ใช้ในทางการแพทย์ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw [2] ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงโดยไม่ใช้สารเคมี ไม่เป็นพิษ ทั้งนี้ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนรูปเช่นเดียวกับเนื้อเยื่อทำให้สามารถใช้เป็นตัวทดแทนเนื้อเยื่อได้ นอกจากนี้ยังมีการนำเอาพอลิเมอร์ชีวภาพอื่นผสมร่วมกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพื่อช่วยในการเชื่อมโยง เช่น เจลาติน [3] อะการ์ [4] คาราจีแนน [5] เป็นต้น อย่างไรก็ตามความแข็งแรงยังไม่เพียงพอต่อการใช้งานบางประเภท จึงมีงานวิจัยที่เสริมความแข็งแรงของโครงสร้างไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยการใช้อนุภาคนาโนเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลนาโนคอมโพสิตที่มีสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพและทางเคมีเพิ่มขึ้น [6] โดยงานวิจัยส่วนใหญ่ที่เกี่ยวกับไฮโดรเจลนาโนคอมโพสิต มีการผสมดินขาวที่เป็นอนุภาคนาโน เช่น ลาไพนต์ [7] มอนต์มอริลโลไนต์ [8-12] ไฮโดรทัลไซต์ [13] และเบนโทไนต์ [14]

เทคนิคในการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญและเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของไฮโดรเจลที่ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นและพัฒนากระบวนการผลิตไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยวิธีการเชื่อมโยงทางกายภาพ ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw โดยใช้เจลาตินเป็นสารเพิ่มการเชื่อมโยงทางกายภาพ อีกทั้งยังใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นอนุภาคนาโนที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงและการคงรูป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมร่วมกับเจลาตินและมอนต์มอริลโลไนต์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เตรียมไฮโดรเจลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์
- 2) ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของไฮโดรเจล
- 3) ศึกษาการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลแบบส่องกราด
- 4) ศึกษาผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่ส่งผลต่อการคงรูป และความแข็งแรงของไฮโดรเจล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถเตรียมไฮโดรเจลที่มีความแข็งแรงโดยมีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์
- 2) ทราบถึงผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีต่อสมบัติของไฮโดรเจล



ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่ทำจากพอลิเมอร์มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย มีความอ่อนนุ่มและแตกง่าย แต่เมื่อไฮโดรเจลอยู่ในน้ำเกิดการบวมตัว สามารถยัดน้ำเอาไว้ในโครงสร้าง สามารถคงรักษาสภาพโครงร่างตาข่ายสามมิติไว้ได้ โดยไม่ละลายในตัวทำละลายทุกชนิด ปัจจุบันมีการพัฒนาสมบัติของไฮโดรเจลบางชนิดให้มีความเหนียวและยึดตัวได้มากเป็นพิเศษ

2.1.1 สมบัติของไฮโดรเจล [15]

2.1.1.1 การบวมน้ำ (Swelling)

การบวมน้ำของไฮโดรเจลในสารละลายส่งผลให้ไฮโดรเจลถูกนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์เพื่อใช้เป็นเจลสมานบาดแผล และเพื่อรักษาความชุ่มชื้นของแผลโดยไม่เกิดการหมักหมม และช่วยในการดูดซับส่วนของเลือดและน้ำหนองอันเกิดจากแผล การบวมน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยซึ่งประกอบไปด้วย ประเภทและองค์ประกอบของมอนอเมอร์ ความหนาแน่นของพันธะ และปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิ pH และความแข็งแรงของพันธะไอออนิก

2.1.1.2 ความหนาแน่นในการเชื่อมโยง (Cross-linking density)

ความหนาแน่นในการเชื่อมโยงของไฮโดรเจลสัมพันธ์กับสมบัติอื่น ๆ เช่น การบวมน้ำของไฮโดรเจลโดยความหนาแน่นในการเชื่อมโยงนี้มีสมบัติที่สำคัญ คือ ความแข็งแรงของโครงสร้าง การให้ของเหลวและอากาศซึมผ่านได้ ซึ่งความแข็งแรงของโครงสร้างไฮโดรเจลจะมีพื้นฐานที่สำคัญมาจากองค์ประกอบและโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่จะนำมาเตรียมไฮโดรเจล ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะตาข่าย (Network) เจลจึงสามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณที่มาก

2.1.1.3 การย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradation)

ไฮโดรเจลบางชนิดสามารถย่อยสลายตัวเองได้อย่างช้า ๆ และสลายตัวได้ในร่างกาย ทำให้มีการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านระบบนำส่งยา (Drug delivery) โดยมีการพัฒนากลไกย่อยสลายนี้เพื่อควบคุมการปลดปล่อยยา (Controlled drug release) และใช้ทางด้านเนื้อเยื่อวิศวกรรม (Tissue-engineering) ซึ่งสามารถย่อยสลายด้วยการไฮโดรไลซิสอย่างง่ายหรือการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เกิดการไฮโดรไลซิส

2.1.1.4 ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ความยืดหยุ่นของวัสดุอธิบายโดยกลไกของแรงที่กระทำต่อวัสดุ ซึ่งอาจจะทำให้เจลเปลี่ยนรูปร่างขยายตัวหรือหดตัว ค่าสัมประสิทธิ์ของการยืดหยุ่นเป็นค่าที่ใช้ในการอ้างอิงถึง

ความสามารถในการกลับคืนตัวของเจล กล่าวคือเมื่อมีแรงกระทำเจลจะเปลี่ยนรูปร่างและเมื่อเอาแรงกระทำออกเจลจะสามารถกลับคืนตัวได้ ซึ่งการบวมตัวของไฮโดรเจลจะมีความสำคัญต่อความยืดหยุ่นของเจลและขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลด้วย

2.1.2 วิธีการเตรียมไฮโดรเจล [15]

2.1.2.1 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical cross-linking)

การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีนี้เป็นการเชื่อมโยงที่ใช้กับกลุ่มของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่พร้อมทำปฏิกิริยา เพื่อทำให้เกิดการรวมตัวกันของโครงสร้างให้มีขนาดใหญ่ หรือการเตรียมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะมีลักษณะการพองตัวขึ้นของเจลโดยรีเอเจนต์ (Reagents) จะทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์และสารรีเอเจนต์

2.1.2.2 การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical cross-linking)

วิธีการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมโยงทางกายภาพนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสะดวก ทำได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมโยง ซึ่งช่วยลดต้นทุนในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล การเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการเชื่อมโยงทางกายภาพมีหลายวิธี เช่น

- Ionic interaction การเตรียมไฮโดรเจลโดยอาศัยการเกิดแรงระหว่างประจุของหมู่ฟังก์ชันภายในสายโซ่ของไฮโดรเจล
- H-bonding การเตรียมไฮโดรเจลโดยอาศัยการสร้างพันธะไฮโดรเจนเชื่อมต่อกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล

2.1.2.3 การเตรียมไฮโดรเจลโดยใช้รังสี (Hydrogel preparation by irradiation)

วิธีนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลที่ทำให้มีการปนเปื้อนของสารที่นำมาใช้ในการเชื่อมโยงน้อย ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหนียวแน่นให้เกิดพอลิเมอร์โซ่สั้นด้วยรังสีภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล รูปแบบหรือลักษณะการเชื่อมโยงที่ทำขึ้นจากวิธีนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางเคมีของชนิดพอลิเมอร์ที่ใช้ โดยรังสีที่ใช้ในการเตรียมไฮโดรเจล เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ เป็นต้น

2.1.3 ประเภทของไฮโดรเจล [15]

2.1.3.1 การแบ่งชนิดของไฮโดรเจลตามลักษณะการเกิดประจุในโครงสร้าง

แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

- พอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ (Non-ionic polymer) จะมีการดูดซับน้ำหรือ

ของเหลวเข้าไปภายในโครงสร้างโดยอาศัยความแตกต่างของโครงสร้างไฮโดรเจล ซึ่งมีส่วนที่มีระเบียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และไม่มีระเบียบ (Entropic interactions) และส่วนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มักอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ตลอดความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยหมู่ที่ชอบน้ำจะเกิดพันธะกับโมเลกุลของน้ำด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) เมื่อทำการเชื่อมต่อโมเลกุลแล้วจะทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์มีขนาดใหญ่ ไม่ละลายน้ำแต่ก็สามารถที่จะเปลี่ยนรูปร่างหรือปริมาตรได้ ทำให้เจลมีการพองตัวและเป็นเจลที่นุ่ม (Soft gel)

- พอลิเมอร์ที่มีประจุ (Ionic polymer) จะมีการดูดซับน้ำได้มากกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีประจุ เนื่องจากมีจำนวนไอออนมากกว่า และมีแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นเป็นแบบแรงดึงดูดระหว่างประจุ (Ion-dipole interaction) โดยโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่มีประจุจะมีหมู่ที่มีประจุลบ (Anionic polymer) หรือบวก (Cationic polymer) บนสายโซ่ของพอลิเมอร์ที่เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย ดังนั้นเจลจึงสามารถดึงดูดโมเลกุลของน้ำเข้ามาล้อมรอบตัวเองได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์แบบมีประจุ [16]

2.1.3.2 การแบ่งประเภทของไฮโดรเจลตามชนิดพันธะภายในโครงสร้าง

การเตรียมไฮโดรเจลโดยการทำให้เกิดพันธะภายในโครงสร้างนั้นจะมีการเชื่อมโยงของพอลิเมอร์จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่ายหลายมิติ ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของไฮโดรเจล โดยชนิดของพันธะที่เชื่อมระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์นั้น แบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonds) พันธะไอออนิก (Ionic bonds) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds)

- พันธะโควาเลนต์เป็นการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของสายโซ่หลักซึ่งทำปฏิกิริยากับสารที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (2 หรือ 3 หมู่) โดยอาจจะเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งแบบควบแน่น (Condensation reaction) หรือแบบเติม (Addition reaction) ทำให้พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย เช่น การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบควบแน่น เป็นต้น ในการเลือกวิธีการเชื่อมโยงแบบพันธะโควาเลนต์สามารถเลือกชนิดของสารที่นำมาเป็นสารเชื่อมโยง สภาพที่ใช้ในการเตรียมและควบคุมกระบวนการเตรียมได้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเชื่อมโยงแบบไอออนิกเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างพอลิวาเลนต์ ไอออนกับสายโซ่พอลิเมอร์ โดยเกิดการจับพันธะของประจุที่ต่างชนิดกัน สารเชื่อมโยงระบบนี้มีผลต่อ โครงสร้างของไฮโดรเจลน้อยกว่าการเชื่อมโยงแบบโควาเลนต์ ในการดูดซับของเหลวอาจจะเกิดการ แลกเปลี่ยนประจุกันของพอลิเมอร์ การเตรียมไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยพันธะไอออนิกนี้จะได้ ยากเนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็วมาก ทำให้ควบคุมได้ยาก

- การเชื่อมโยงแบบกายภาพเป็นการสร้างพันธะไฮโดรเจนของสายโซ่หลัก กับอีกสายโซ่หนึ่ง ทำให้พันธะที่เกิดขึ้นมีลักษณะแข็งแรงจึงเกิดการรวมตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งการ เชื่อมโยงชนิดนี้มีข้อเสีย คือ เมื่อถูกความร้อนจะทำให้โครงสร้างนั้นถูกทำลายไปและเมื่อเกิดการดูด ซับไฮโดรเจลจะขยายเฉพาะส่วนที่เชื่อมโยงมากกว่าส่วนที่เป็นสายโซ่พอลิเมอร์

2.1.4 การประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจล

เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีเป็นโครงสร้างตาข่ายและมีรูพรุนมาก ทำให้ไฮโดรเจล สามารถดูดซับน้ำได้ยังคงรูปร่างอยู่ได้และไม่ละลายในน้ำ จึงทำให้ไฮโดรเจลถูกนำไปประยุกต์ใช้งาน ในหลาย ๆ ด้าน ได้แก่ ด้านเกษตรกรรม ระบบขนส่งยา ระบบการนำส่งโปรตีน วัสดุตกแต่งบาดแผล เครื่องสำอาง เนื้อเยื่อวิศวกรรม ชีวการแพทย์ และใช้เป็นตัวดูดซับในการดูดซับโลหะหนัก เป็นต้น

- ระบบนำส่งยา ไฮโดรเจลได้รับการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เนื่องจากสามารถ เข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ จึงประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลเพื่อเป็นระบบนำส่งยา (Drug delivery system) เนื่องด้วยสมบัติในการดูดซับของเหลวได้ดี จึงน่าจะดูดซับยาเก็บไว้แล้วปลดปล่อย ยาออกมาในปริมาณและตามสภาวะที่ต้องการได้

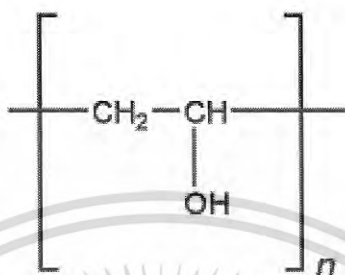
- วัสดุปิดแผล การนำไฮโดรเจลมาประยุกต์ใช้งานในด้านวัสดุปิดบาดแผล เนื่องจาก สมบัติของไฮโดรเจลที่สามารถดูดซับน้ำหรือของเหลวได้หลายเท่าตัวโดยไม่ละลาย ไฮโดรเจลจึงถูก นำมาใช้ในการดูดซับของเหลวต่าง ๆ ที่ไหลออกมาจากบาดแผลและใช้ในการรักษาความชุ่มชื้นของ บาดแผลให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม อีกทั้งออกซิเจนก็สามารถผ่านรูพรุนของไฮโดรเจลได้ด้วย ทำให้ ร่างกายสามารถสร้างเนื้อเยื่อได้ดีกว่าปกติ

- การดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย เนื่องจากสมบัติของไฮโดรเจลสามารถเกิด สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะและเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนไอออนได้โดยการคิเลตระหว่าง ไอออนโลหะหนักกับไฮโดรเจล จึงทำให้ไฮโดรเจลถูกนำไปประยุกต์ใช้งานด้านโรงงานอุตสาหกรรมใน การดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียหรือน้ำทิ้งจากโรงงาน

2.2 พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA)

2.2.1 โครงสร้างของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่อื่น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslink)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

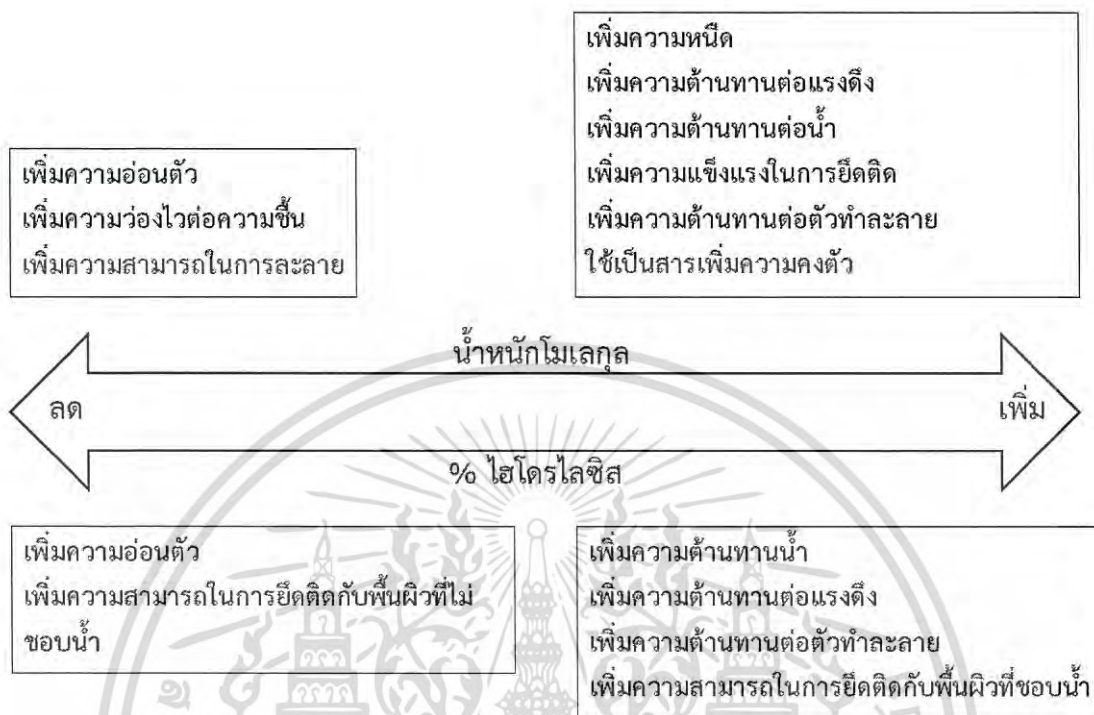
2.2.2 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส (Degree of hydrolysis) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีระดับการไฮโดรไลซิสสูงจะมีความสามารถทนต่อแรงกระทำได้ดีกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีระดับการไฮโดรไลซิสต่ำ เพราะมีความเป็นผลึกสูงกว่า และสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลได้มากกว่า

นอกจากนี้สมบัติทางกายภาพของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ยังขึ้นกับความชื้นของสิ่งแวดล้อมด้วย เพราะน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ เมื่ออากาศมีความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นความสามารถในการทนต่อแรงดึงของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะลดลง แต่ความสามารถในการยึดตัวออกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำ

สำหรับความสามารถในการละลายน้ำ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถละลายในน้ำได้โดยละลายอย่างช้า ๆ ในน้ำเย็น แต่จะละลายเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และทั่วไปสามารถละลายได้หมดที่อุณหภูมิสูงกว่า 90°C โดยความสามารถในการละลายขึ้นกับระดับการไฮโดรไลซิสของโมเลกุลเช่นกัน โดยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถละลายในน้ำได้ดีที่สุดเมื่อมีระดับการไฮโดรไลซิสประมาณร้อยละ 80 สำหรับผลของน้ำหนักโมเลกุล พอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลลดลง แต่ความแข็งแรง ความต้านทานต่อการดึงยึดและความทนต่อการฉีกดีขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น ส่วนความต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สามารถต้านทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้เป็นอย่างดี และความสามารถนี้จะเพิ่มขึ้นตามระดับการไฮโดรไลซิสที่สูงขึ้น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลสูง (มีระดับการไฮโดรไลซิสสูง) จะไม่

ละลายในไฮโดรคาร์บอน เอสเทอร์และคีโตน เป็นต้น เนื่องจากสภาพขั้วที่แตกต่างกันแต่จะละลายในเอทิลีนไกลคอลและกลีเซอรอล เป็นต้น [17]



รูปที่ 2.3 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลและระดับการไฮโดรไลซิส [17]

2.2.3 การใช้เทคนิค Freeze-thaw กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สำหรับการใช้งานทางการแพทย์ การเชื่อมโยงทางเคมีอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษและอาจเกิดปัญหาความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาการเชื่อมโยงทางกายภาพของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิค Freeze-thaw

ในปี ค.ศ. 1975 Peppas N.A. [18] สามารถเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยเทคนิค Freeze-thaw เป็นครั้งแรก ซึ่งทำได้โดยการนำสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นระหว่างร้อยละ 2.5 และ 15 โดยมวลไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C จากนั้นนำมาวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้เกิดเป็นผลึกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ขึ้น สังเกตได้จากความขุ่นของไฮโดรเจล โดยความเป็นผลึกนั้นขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เวลาในการแช่แข็งและเวลาในการวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง

นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิค Freeze-thaw หลายรอบเพื่อดึงน้ำออกจากโครงสร้างของไฮโดรเจลได้มากกว่าเดิม โดยพบว่าสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงดึงและกดอัดสูงขึ้น เมื่อจำนวนรอบในการ Freeze-thaw เพิ่มมากขึ้น

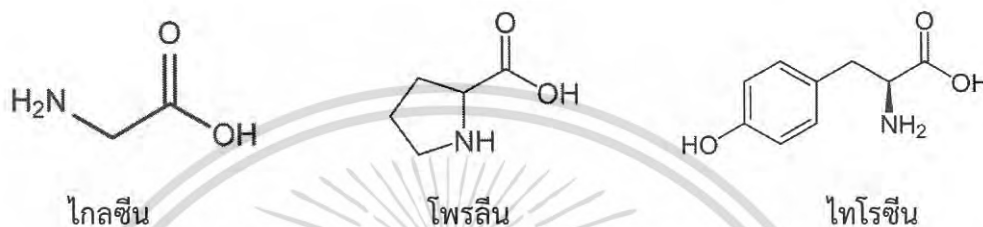
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เจลาติน (Gelatin)

เจลาตินเป็นสารประกอบประเภทโปรตีน มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 10,000 – 100,000 ได้จากการสกัดคอลลาเจน ซึ่งมีอยู่ในเอ็น พังผืดของสัตว์ โดยการใช้กรดหรือด่างสกัด

2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของเจลาติน

เจลาตินเป็นโครงสร้างของพอลิเปปไทด์ที่มีองค์ประกอบเป็นไกลซีน (Glycine) 30.5 % โพรลีน (Proline) 18 % และไทโรซีน (Tyrosine) 0.2 % [19]



รูปที่ 2.4 กรดอะมิโนองค์ประกอบทางเคมีของเจลาติน [19]

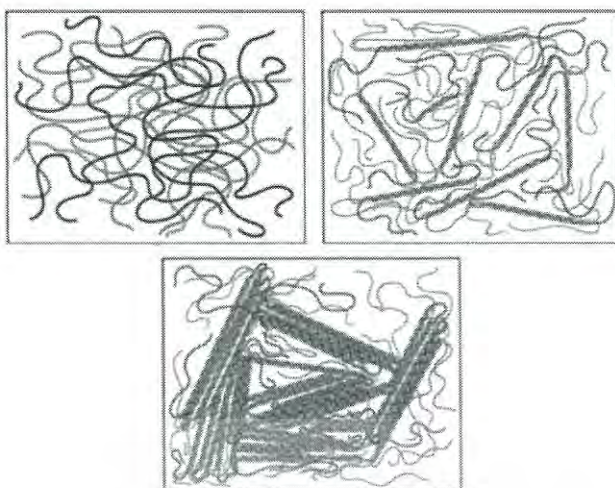
2.3.2 สมบัติของเจลาติน

2.3.2.1 การละลาย

เจลาตินมีลักษณะเป็นแผ่น ชื่น เกล็ด หรือผงสีเหลืองอ่อน ละลายได้ในน้ำร้อน ไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะอ่อนนุ่ม พองตัวและอุ้มน้ำได้ 5-10 เท่าของน้ำหนักเดิม ละลายได้ในกรดแอซิติก (Acetic acid) ไม่ละลายในอีเทอร์คลอโรฟอร์มและเอทานอล 98 % [19]

2.3.2.2 การเกิดเจล

กลไกการเกิดเจลของเจลาตินเริ่มจากการให้ความร้อน โดยสารละลายเจลาตินจะเปลี่ยนเป็นสารละลายคอลลอยด์ (Colloidal solution) โมเลกุลของเจลาตินจะยืดตัวออกอยู่ในรูปของ Random coil แต่เมื่อทำให้อุณหภูมิลดต่ำลงโมเลกุลที่ยืดตัวออกแล้วจะเริ่มเกิดการขดตัวอย่างช้า ๆ เมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงจุดก่อเจลจะมีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมากขึ้น จึงเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงขึ้น เชื่อมกันระหว่างโมเลกุลมากขึ้นด้วยพันธะไฮโดรเจน พันธะไอออนิกและพันธะไฮโดรโฟบิก จนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติซึ่งในระยนี้ทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลเกิดการจับตัวกันอย่างคงตัวและแข็งแรงมาก พันธะหลักที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมกันของโมเลกุลเจลาตินคือพันธะไฮโดรเจนและหากมีการให้ความร้อนอีกครั้งจะเกิดการหลอมเหลวเป็นสารละลาย การเปลี่ยนเฟสระหว่างสารละลายและเจลนี้เรียกว่า Sol-gel transition [20]



รูปที่ 2.5 การเกิดเจลของเจลาติน [21]

2.3.3 การจำแนกประเภทของเจลาติน

เจลาตินแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ เจลาตินชนิดเอและบี โดยจะแบ่งชนิดของเจลาตินตามการปรับสภาพที่เหมาะสมกับวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้ในการสกัดเจลาติน เจลาตินที่ได้จากการปรับสภาพด้วยกรดเรียกว่า เจลาตินชนิดเอ (Gelatin type-A) มีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 7 ถึง 9 มีค่าความแข็งแรงของเจล (Bloom strength) อยู่ในช่วง 50-300 กรัม ตัวอย่างที่มักเตรียมด้วยวิธีนี้ได้แก่ หนังกูและหนังวัว ส่วนเจลาตินที่ได้จากการปรับสภาพด้วยเบสเรียกว่า เจลาตินชนิดบี (Gelatin type-B) มีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 มีค่าความแข็งแรงของเจลอยู่ในช่วง 50-200 กรัม ตัวอย่างที่มักเตรียมโดยวิธีนี้คือกระดูกหมูและกระดูกวัว [19]

2.3.4 การใช้ประโยชน์ของเจลาติน

เจลาตินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้รับความนิยมและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เกษตรกรรม เครื่องสำอางและอุตสาหกรรมภาพถ่าย โดยในแต่ละผลิตภัณฑ์ต้องการสมบัติที่แตกต่างกัน

2.3.4.1 อุตสาหกรรมอาหาร

เจลาตินจัดอยู่ในกลุ่มอาหารที่มี E number คือ E 441 สำหรับอุตสาหกรรมอาหารมีการนำเจลาตินมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด โดยในแต่ละผลิตภัณฑ์ต้องการสมบัติที่แตกต่างกัน

วัตถุประสงค์ในการใช้เจลาตินผสมในอาหารมีดังนี้

1. ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดเจลและสามารถคืนตัวเป็นของเหลวได้เมื่อได้รับความร้อน

2. ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดความคงตัว (Stabilizer) เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ทำให้น้ำกับไขมันรวมตัวกันได้ดี ไม่แยกชั้น

3. ใช้ทดแทนไขมัน

4. ใช้สำหรับการจับและเก็บรักษากลิ่น รส

5. ใช้เคลือบผิวเพื่อรักษาความชุ่มชื้น เช่น แยม ขนมเค้ก

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้เจลาติน ได้แก่

- ผลิตภัณฑ์นม (Dairy products) นำนมพาสเจอร์ไรส์ นมยูเอชที นมเปรี้ยว (ใช้ 0.2-0.8 เปอร์เซ็นต์) ชวาร์ครีม ครีมชีส คอตเตจชีส (Cottage cheese)

- ขนมหวานและเค้ก พุดดิ้ง ไอศกรีม เยลลี่ มาชเมลโล่ หมากฝรั่ง ขนมที่เคลือบน้ำตาล รวมทั้งซีเรียลบาร์

- อาหารกระป๋องหรืออาหารแปรรูป (Processed food) เช่น ไส้กรอก แยม อาหารแช่แข็ง พวักซูป ซอสหรืออาหารสำเร็จรูปแบบซอง น้ำสลัด แยม รวมทั้งน้ำผลไม้กระป๋อง

2.3.4.2 อุตสาหกรรมการแพทย์

ในทางเภสัชกรรมใช้เจลาตินเพื่อประโยชน์หลายอย่าง ได้แก่ สารเคลือบ (Coating agent) สารก่อฟิล์ม (Film-forming agent) สารก่อเจล (Gelling agent) สารแขวนตะกอน (Suspending agent) สารช่วยยึดเกาะในยาเม็ด (Tablet binder) สารเพิ่มความหนืด (Viscosity increasing agent) นอกจากนี้ยังนิยมนำมาเตรียมเป็นแคปซูลเจลาตินชนิดแข็ง (Hard gelatin capsule) และแคปซูลเจลาตินชนิดนิ่มเพื่อใช้บรรจุยา [22]

ตัวอย่างเจลาตินที่ใช้ในเภสัชภัณฑ์และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ [23] ได้แก่

- แคปซูล (Capsules)

อุตสาหกรรมยาใช้เจลาติน 6.5 เปอร์เซ็นต์ของเจลาตินทั้งหมดที่ผลิตขึ้น โดยส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้เพื่อการผลิตแคปซูล โดยแคปซูลเจลาตินมี 2 ชนิด ได้แก่ แคปซูลเจลาตินชนิดแข็ง ประกอบด้วยเจลาตินบริสุทธิ์และสีผสมอาหารในปริมาณเล็กน้อยที่ประสานเข้าด้วยกัน แคปซูลเจลาตินอีกชนิดคือ แคปซูลชนิดนิ่มหรือแคปซูลยืดหยุ่น ซึ่งมีวิตามินบางชนิดบรรจุในแคปซูลชนิดนี้ แคปซูลเจลาตินถูกนำมาใช้ เนื่องจากเจลาตินเหล่านี้ละลายในกระเพาะอาหารหลังจากการรับประทานภายในไม่กี่นาที มีรสจืดและคงตัว แม้เก็บไว้เป็นเวลานานและยาเกือบทุกประเภทที่เป็นของแข็งสามารถบรรจุในแคปซูลได้

- ยาเม็ดและยาอม (Tablet and pastilles)

เจลาตินทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะในการทำเม็ดยา เจลาตินจะผสมกับสารตัวเร่งก่อนการบีบอัดเป็นเม็ดยา ชั้นแรกสารตัวเร่งจะเปลี่ยนเป็นเม็ดเล็กหรือชิ้นส่วนเล็ก ๆ โดยการผสมเข้ากับเจลาตินก่อนที่สารจะถูกนำไปร่อนและทำให้แห้ง นอกจากนี้ได้เพิ่มสารที่ช่วยให้เกิดการกระจายตัวสารหล่อลื่น สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนก่อนบีบอัดเป็นเม็ดยา

- ฟองน้ำเจลาติน (Gelatin sponge)

ฟองน้ำเจลาตินช่วยในการรักษาบาดแผล เนื่องจากเจลาตินสามารถหยุดการไหลของเลือดได้เป็นอย่างดี จึงอำนวยความสะดวกในขั้นตอนการรักษา ฟองน้ำเจลาตินถูกนำมาใช้เป็นประจำในทางทันตกรรม การแพทย์และในการศัลยกรรมสำหรับอุดบาดแผลชั่วคราวเพื่อทำให้เลือดหยุดไหล

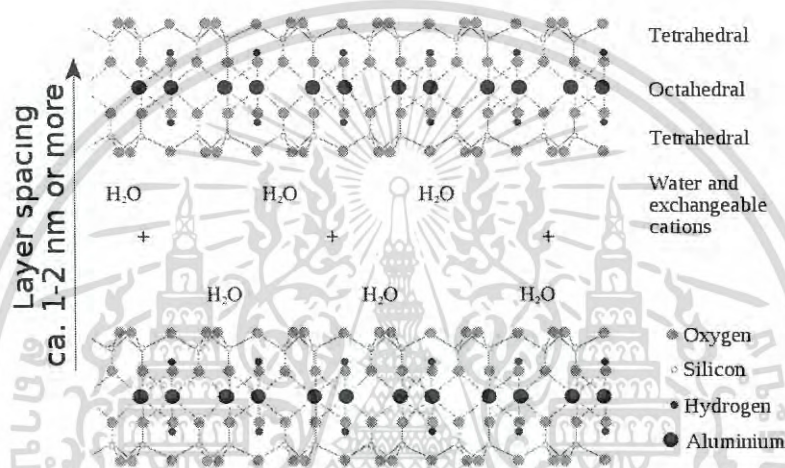
2.4 มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT)

มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารประกอบของไฮโดรตโซเดียมแคลเซียมอลูมิเนียมแมกนีเซียมซิลิเกต-ไฮดรอกไซด์ มีส่วนผสมของโพแทสเซียม เหล็กและไอออนประจุบวกอื่น ๆ เป็นส่วนประกอบ โดยอัตราส่วนของไอออนประจุบวกที่มีในมอนต์มอริลโลไนต์จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของมอนต์มอริลโลไนต์นั้น ๆ โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์จะมีลักษณะเป็นชั้นของออกตะฮีดรอลสลับกับเตตระฮีดรอลในแนวระนาบ โดยมีน้ำและไอออนประจุบวกแทรกอยู่ตรงกลาง มีระยะห่างของชั้นประมาณ 1-2 นาโนเมตรหรือมากกว่า เป็นแร่ดินในกลุ่มแรสเม็คไทต์ (Smectite) ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและอลูมินาหนึ่งแผ่นสอดอยู่ระหว่างแผ่นซิลิกาและเกาะยึดออกซิเจนร่วมกัน ผลึกจะเชื่อมต่อในแนวระดับเป็นชั้น ๆ และมักมีไอออนของโซเดียม แคลเซียมอยู่ด้วยในระหว่างชั้นโครงสร้าง สามารถขยายตัวได้เนื่องจากไม่มีพันธะไฮโดรเจนทำให้ประจุบวกต่าง ๆ สามารถเข้าแทรกในระหว่างชั้นโครงสร้างได้ง่ายอนุภาคชนิดนี้จึงมีความสามารถในการดูดซับสูงและเกิดการแตกสลายของผลึกได้ง่าย แร่ชนิดนี้มีประจุลบและสามารถดึงดูดไอออนที่มีประจุบวกได้ซึ่งประจุลบของมอนต์มอริลโลไนต์เกิดจากการแทนที่ของประจุจาก Al^{3+} ถูกแทนที่ด้วย Mg^{2+} หรือ Al^{3+} เข้าไปแทนที่ Si^{4+} ในแผ่นอลูมินา การแทนที่นี้เกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ทางโครงสร้างตามธรรมชาติของมอนต์มอริลโลไนต์ การจัดเรียงตัวของแผ่นซิลิกาจะขึ้นอยู่กับประจุบวกที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยปกติแล้วในแต่ละแผ่นจะมีโครงสร้างประกอบด้วยจำนวนของแผ่นที่รวมกันด้วยแรงดึงดูดระหว่างประจุซึ่งโครงสร้างนี้อาจเรียกว่าแทคทอยด์ (Tactoids) ในธรรมชาติพบว่าประจุบวกส่วนใหญ่ที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ คือ โซเดียมและแคลเซียม ดังนั้นมอนต์มอริลโลไนต์อาจแบ่งออกตามองค์ประกอบที่มีธาตุโซเดียมและแคลเซียม คือ

1. Sodium Montmorillonite เป็นมอนต์มอริลโลไนต์ที่ประกอบด้วยแร่ดินโซเดียม มีสมบัติในการดูดซับน้ำได้มากเพราะผลึกของดินที่มีขนาดเล็กมาก
2. Calcium Montmorillonite เป็นมอนต์มอริลโลไนต์ที่ประกอบด้วยแร่ดินแคลเซียม มีสมบัติในการดูดซับน้ำและพองขยายตัวได้น้อยกว่าชนิดแรก

น้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ได้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวในโมเลกุลของน้ำกับประจุบวกที่อยู่ระหว่างชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ เมื่อมีน้ำในโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์จะเกิดการพองตัว ซึ่งปริมาณการพองตัวขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ ระยะห่างระหว่างชั้นโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง [24]

ลักษณะทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารในกลุ่มชอบน้ำ (Hydrophilic) กล่าวคือชั้นโครงสร้างสามารถขยายตัวได้เมื่ออยู่ในน้ำจึงทำให้มอนต์มอริลโลไนต์มีพื้นที่ผิวสูงและสามารถนำมาปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นสารออร์แกโนฟิลิก (Organophilic) ได้ ซึ่งทำให้มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเมอร์อินทรีย์ (Organic polymers) [25]

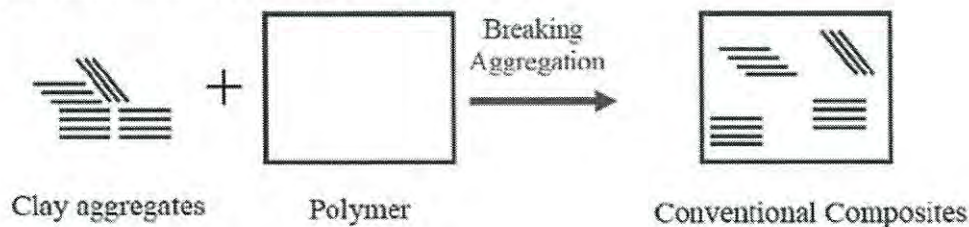


รูปที่ 2.6 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ [26]

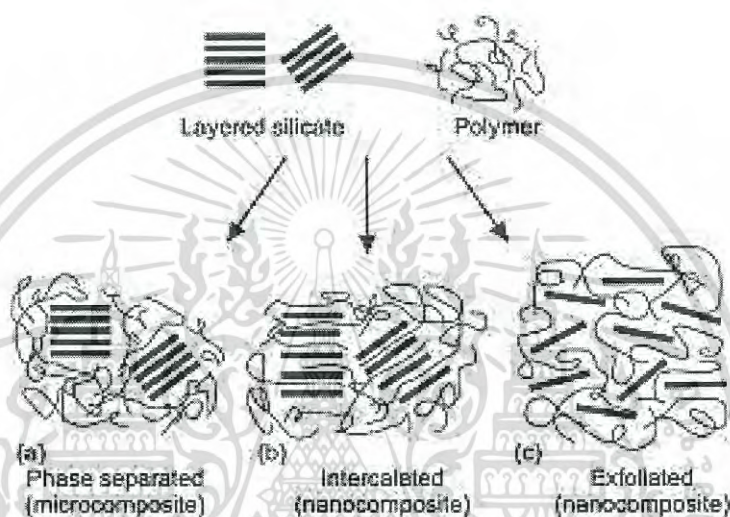
2.4.1 การใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารเสริมแรง

การใช้มอนต์มอริลโลไนต์เพื่อการเสริมแรงในวัสดุพอลิเมอร์ต้องทำให้อนุภาคของกลุ่มมอนต์มอริลโลไนต์เกิดการกระจายตัว รูปที่ 2.7 เมื่ออนุภาคของมอนต์มอริลโลไนต์กระจายตัวได้ดีจะสามารถช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล แต่ต้องใช้มอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณมากเพื่อปรับปรุงค่ามอดุลัส ในขณะที่ความแข็งแรงสูงสุด (Strength) และความเหนียว (Toughness) ของพอลิเมอร์จะลดลง ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและปรับปรุงสมบัติเชิงกลจึงต้องทำให้แต่ละชั้นของอนุภาคแตกออกด้วยเพื่อให้เกิดเป็นนาโนคอมโพสิต รูปที่ 2.8

Conventional micro – composite Approach



รูปที่ 2.7 การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ [27]



รูปที่ 2.8 การเกิดนาโนคอมโพสิต [28]

งานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาคอลิเมอร์/เคลย์นาโนคอมโพสิตที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเติมเคลย์ลงในพอลิเมอร์แล้ว สามารถช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้เป็นอย่างดี แม้ว่าจะใส่ปริมาณเคลย์ลงไปเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังสามารถทนทานต่อการติดไฟ ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซและยังส่งผลต่อสมบัติทางแสงของวัสดุ เนื่องจากความหนาของชั้นเคลย์แต่ละชั้นนั้นมีค่าที่ต่ำกว่าความยาวคลื่นแสง ดังนั้นการเกิด Exfoliated ในเคลย์จะช่วยทำให้ได้ชิ้นงานที่มีสีเดียวกับเนื้อพลาสติกและชิ้นงานไม่ขุ่นเหมือนกับการเติมสารเติมเนื้อที่มีขนาดใหญ่ [27]

2.4.2 การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ

การใช้สารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีประจุที่มีค่า Hydrophobic-lipophilic balance (HLB) สูง ซึ่งมีสมบัติละลายน้ำได้และสามารถแทรกเข้าไปในพื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ได้ จะช่วยในการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในน้ำ ส่งผลให้มอนต์มอริลโลไนต์แยกออกจากกันเป็นแผ่นบาง ๆ แต่การเพิ่มขึ้นของค่า HLB ของสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีประจุจะทำให้ความชอบน้ำของ

มอนต์มอริลโลไนต์ค่อย ๆ ลดลง ดังนั้นความสามารถในการบวมของมอนต์มอริลโลไนต์จึงมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์และค่า HLB ของสารลดแรงตึงผิว [29]

2.4.3 การประยุกต์ใช้งาน

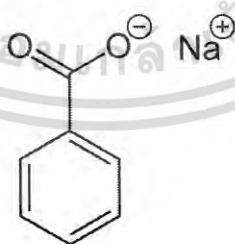
ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเช่น ทำฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์ การนำมอนต์มอริลโลไนต์ผสมในฟิล์มส่งผลให้มีความต้านทานต่อน้ำและเสถียรภาพทางความร้อนได้ดีขึ้นเมื่อปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้ฟิล์มมีสีคล้ำและมีแนวโน้มที่จะเป็นสีเหลือง อีกทั้งเมื่อมีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์มากเกินไปจะส่งผลให้ความสามารถในการซึมผ่านของออกซิเจน น้ำ และการซึมผ่านของไอลลดลง [30]

2.5 โซเดียมเบนโซเอต

กรดเบนโซอิกและเกลือเบนโซเอตสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ ซึ่งมีผลต่อผนังเซลล์และเอนไซม์ของจุลินทรีย์ โดยเบนโซเอตจะไปทำให้กระบวนการแทรกซึมของอาหารเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ผิดปกติ ในขณะเดียวกันจะยับยั้งการสร้างเอนไซม์บางชนิดและปฏิกิริยาการทำงานของเอนไซม์ที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์ ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ โดยทั่วไปมีปริมาณการใช้ไม่เกินร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักอาหาร

ความเป็นพิษของกรดเบนโซอิกและเกลือเบนโซเอตจัดอยู่ในประเภทพิษปานกลาง ถ้าได้รับในปริมาณน้อยจะไม่ทำให้เกิดการสะสมขึ้นในร่างกาย เนื่องจากร่างกายมีกลไกในการขจัดความเป็นพิษของกรดเบนโซอิกและเกลือเบนโซเอต

ความสามารถในการละลายน้ำของโซเดียมเบนโซเอตสามารถละลายได้ถึง 61.2 กรัมต่อน้ำ 100 กรัม ที่อุณหภูมิ 25°C [31]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของโซเดียมเบนโซเอต [31]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jiang, S. และคณะ [32] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไฮโดรเจล โดยทดสอบสมบัติเชิงกล และการวัดการเสียรูป เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสมบัติการใช้งานในลักษณะของเนื้อเยื่ออ่อน โดยเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และไดเมทิลซัลฟอกไซด์ ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw พบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไฮโดรเจลมีสมบัติการเปลี่ยนรูปเช่นเดียวกับเนื้อเยื่อทำให้สามารถใช้เป็นตัวทดแทนเนื้อเยื่ออ่อนได้ ยังพบว่ารอบจำนวนรอบของการ Freeze-thaw มีผลต่อความเค้น ความเครียด และโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ไฮโดรเจล

Hago, E.E. และคณะ [33] ได้นำเสนอแนวทางใหม่ในการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เจลาติน โดยการเชื่อมโยงเจลาตินความเข้มข้นต่าง ๆ ด้วยเอนไซม์ Transglutaminase ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw เพื่อศึกษาผลของกระบวนการ Freeze-thaw ที่มีต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา สัดส่วนเจล การบวมตัว สมบัติเชิงกล และการทำงานของเอนไซม์ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นและจำนวนรอบในกระบวนการ Freeze-thaw ไฮโดรเจลที่ได้มีการจัดเรียงโครงสร้างมากขึ้น มีสมบัติทางกายภาพและทางกลที่สูงขึ้นจากการทดสอบการบีบอัด อีกทั้งมีความหนาแน่นในการเชื่อมโยงสูงขึ้น นอกจากนี้การวิเคราะห์การทำงานของเอนไซม์และเซลล์สร้างเส้นใย (Fibroblasts) แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลสามารถเข้าได้ดีกับเนื้อเยื่อ ส่งผลให้ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเจลาตินเหมาะสำหรับการใช้งานด้านชีวการแพทย์ต่าง ๆ

Yurong, L. และคณะ [34] ได้ศึกษาไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเจลาตินที่จัดเป็นวัสดุชีวภาพในการเพาะเลี้ยงเซลล์หลอดเลือด เนื้อเยื่อและรากฟันเทียมโดยการเชื่อมโยงทางกายภาพด้วยเทคนิค Freeze-thaw พบว่าเจลาตินไม่มีผลต่อพฤติกรรมทางความร้อนของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ดังแสดงให้เห็นจากกราฟการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชิงมวล (DSC) และการวิเคราะห์ความร้อนเชิงกลแบบไดนามิก (DMTA) เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญในผลึกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ อีกทั้งยังศึกษาพฤติกรรมการไหลและทดสอบสมบัติเชิงกลโดยพบว่าสัดส่วนของพอลิเมอร์ (Polymer fraction) ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังศึกษาจำนวนรอบของกระบวนการ Freeze-thaw ที่มีผลกับไฮโดรเจล โดยพบว่าไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw มา 1 รอบจะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) องศาความเป็นผลึก สัดส่วนของพอลิเมอร์ (Polymer fraction) โมดูลัสสะสม (Storage modulus) และความแข็งแรงสูงสุดของไฮโดรเจลด้อยกว่าไฮโดรเจลที่ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw มาแล้ว 3 รอบ แสดงให้เห็นว่าการศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเจลาตินจะช่วยปรับสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจลให้เหมาะสำหรับการใช้งานด้านชีวการแพทย์

Mehrdad, K. และคณะ [35] ได้ศึกษานาโนคอมโพสิตไฮโดรเจล โดยเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล 1,700 กรัมต่อโมล และ Organophilic montmorillonite (OMMT) ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw เมื่อนำนาโนคอมโพสิตไฮโดรเจลมาทดสอบพบว่าการใส่ OMMT ส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้นจากค่ามอดูลัสและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break) ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีส่วนช่วยให้ไฮโดรเจลคงรูป มีความสามารถในการบวมตัวดีขึ้นเนื่องมาจากการที่นาโนคอมโพสิตไฮโดรเจลมีความยืดหยุ่นสูงและยังพบว่าการใส่ OMMT สามารถช่วยป้องกันจุลินทรีย์ได้

Mohammad, S. และคณะ [36] ได้เตรียมไฮโดรเจลนาโนคอมโพสิตที่ประกอบด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) ด้วยวิธี Freeze-thaw ซึ่งในงานวิจัยนี้เตรียมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยมวล มอนต์มอริลโลไนต์ 0, 2, 5, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล งานวิจัยนี้ศึกษาถึงปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีผลต่อสมบัติโครงสร้างไฮโดรเจลโดยปัจจัยที่ทำการศึกษา คือน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสายโซ่พอลิเมอร์ขณะเชื่อมโยง ความหนาแน่นในการเชื่อมโยง ขนาดช่องว่างของการเชื่อมโยง ค่ามอดูลัสแรงดึง และเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจล (% Gel fraction) จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของสายโซ่พอลิเมอร์ ขนาดช่องว่างของการเชื่อมโยงลดลง ส่วนความหนาแน่นในการเชื่อมโยง และเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลเพิ่มขึ้น จากการทดสอบแรงดึงเมื่อเพิ่มปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้เกิดส่วนเสริมแรงแก่ไฮโดรเจลมากขึ้นมีผลให้ค่ามอดูลัสแรงดึงเพิ่มขึ้น

Yu, Y.H. และคณะ [37] ได้เตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตที่ประกอบไปด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับชั้นดินของมอนต์มอริลโลไนต์โดยการกระจายตัวสารอนินทรีย์หรือมอนต์มอริลโลไนต์ในสารอินทรีย์ซึ่งก็คือพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เตรียมได้จากกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอนุโมลอิสระโดยใช้ไวนิลอะซิเตตเป็นมอนอเมอร์ หลังจากการสังเคราะห์วัสดุนาโนคอมโพสิตถูกนำมาตรวจสอบเอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FT-IR) เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์โพลาริซ์ (OPM) พบว่าความเป็นผลึกของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ น้ำหนักโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลดลงเมื่อเทียบกับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ไม่ได้เติมมอนต์มอริลโลไนต์ เป็นข้อบ่งชี้ว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์แทรกอยู่ในระหว่างชั้นดินของมอนต์มอริลโลไนต์ นอกจากนี้ยังใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) ดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (DSC) ไดนามิกแมคคานิคอลแอนาไลเซอร์ (DMA) และยูวีวิสิเบิล (UV-visible transmission spectra) เพื่อศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน ความแข็งแรงเชิงกล และความใสของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทั้งแบบผงและเมมเบรน พบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เติมมอนต์มอริลโลไนต์มีอุณหภูมิการเสื่อมสลายทางความร้อน อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว และความแข็งแรงเชิงกลเพิ่มขึ้น แต่มีความโปร่งใสน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Strawhecker, K.E. [38] ได้ศึกษาโครงสร้างและสมบัติของวัสดุนาโนคอมโพสิตจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ซึ่งเตรียมด้วยวิธีการหล่อ (Casting) จากการศึกษาสัณฐานวิทยาเพื่อดูการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) พบว่าโครงสร้างของวัสดุนาโนคอมโพสิตมี 2 ลักษณะด้วยกัน ได้แก่ Exfoliated คือชั้นซิลิเกตในมอนต์มอริลโลไนต์หลุดลอกออกจากกัน พบลักษณะนี้ได้เมื่อมีปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ต่ำ ๆ และ Intercalated คือโมเลกุลบางส่วนของพอลิเมอร์แทรกระหว่างชั้นซิลิเกต พบลักษณะนี้ได้เมื่อมีปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ปานกลาง นอกจากนี้ยังพบว่าที่ปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ชั้นซิลิเกตกระจายตัวดีในพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ซึ่งส่วนใหญ่ที่เกิดมีลักษณะแบบ Exfoliated จากการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเทคนิค DSC พบว่าวัสดุนาโนคอมโพสิตมีอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ที่สูงกว่าวัสดุที่มีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากการเกิดผลึกร่วมกันของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และซิลิเกต และจากการศึกษาสมบัติเชิงกล ซึ่งจะศึกษาในส่วนที่ปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ต่ำ ๆ พบว่าวัสดุนาโนคอมโพสิตที่ปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) สูงขึ้นถึง 300 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับวัสดุที่มีพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เพียงอย่างเดียว

Stammen, J.A. และคณะ [39] ได้เตรียมไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ด้วยวิธี Freeze-Thaw ที่มีปริมาณน้ำในไฮโดรเจลเท่ากับ 75-80 % เพื่อใช้เป็นวัสดุที่คล้ายกับเนื้อเยื่อกระดูกอ่อน งานวิจัยนี้ศึกษาถึงสมบัติการรับแรงกดอัด (Compress property) ของไฮโดรเจล จากการทดสอบแรงกดอัดในช่วงความเครียด (Strain) 10-60 % พบว่าไฮโดรเจลมีค่าความแข็งแรงกดอัดประมาณ 1-18 MPa ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกันกับความแข็งแรงของเนื้อเยื่อกระดูกอ่อน นอกจากนี้ยังพบว่าความเสียหายในการกดอัด (Compressive failure) ของไฮโดรเจล เกิดขึ้นที่ความเครียด 45-60 % ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณน้ำในไฮโดรเจลด้วย

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ผ่านกระบวนการ Freeze-thaw สามารถใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ได้ เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีความเข้ากันได้กับเนื้อเยื่อ ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษการเตรียมไฮโดรเจลนาโนคอมโพสิตจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 2 เกรด คือ เกรดที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิสสูง (เกรด N) เพื่อส่งเสริมให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจน และเกรดที่มีเปอร์เซ็นต์ไฮโดรไลซิสต่ำ (เกรด G) เพื่อช่วยให้วัสดุไฮโดรเจลมีปริมาณเนื้อพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มากขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุไฮโดรเจล โดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบ Freeze-thaw และใช้เจลาตินเป็นสารเพิ่มการเชื่อมโยงทางกายภาพ รวมถึงการใช้มอนต์มอริลโลไนต์เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและการคงรูปโดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกล

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เกรดการค้า NL-05, Nippon Gohsei Osaka Japan
2. พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) เกรดการค้า GL-05, Nippon Gohsei (UK) Limited

ตารางที่ 3.1 สมบัติจำเพาะของ PVA เกรดต่าง ๆ

Grade	Viscosity 4 %, 20°C (mPa.s)	Degree of hydrolysis (Mol %)
NL-05	4.6-6	99.0-100
GL-05	4.8-5.8	86.5-89.0

3. เจลาติน (Gelatin) เกรดการค้า Union Chemical 1986 Co.,Ltd.
4. มอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) เกรดการค้า SAC P (200 mesh), Thai Nippon Chemistry Industry
5. โซเดียมเบนโซเอต (Sodium benzoate) เกรดวิเคราะห์, Carlo erba reagents
6. สารละลายอิมัลชันแมกนีเซียมไนเตรต (Magnesium nitrate)

3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องแก้ว
2. เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง : รุ่น SI-234, Denver Instrument, Inc
3. เครื่องให้ความร้อน (Heater) พร้อมแท่งแม่เหล็ก : รุ่น MSH-20D, DAIHAN Scientific Co.,Ltd
4. เครื่องปั่นกวนชนิดความเร็วรอบสูง (High speed agitator) พร้อมใบพัดกวน : รุ่น RW 20, Digital, IKA Co.,Ltd
5. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine) : รุ่น LR-5K, LLOYD Instrument Co.,Ltd
6. เครื่องอัลตราโซนิก : รุ่น S30tt, Elma Schmidbauer GmbH
7. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : รุ่น QUANTA 250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. เครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์ (Shore durometer) : แบบหัวกด Shore OO
9. โถดูดความชื้น
10. แม่พิมพ์ ขนาด $3 \times 7.9 \times 3 \text{ cm}^3$ (รูปที่ 3.1)
11. แม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm และความลึก 2 cm (รูปที่ 3.2)
12. ตู้อุ่น



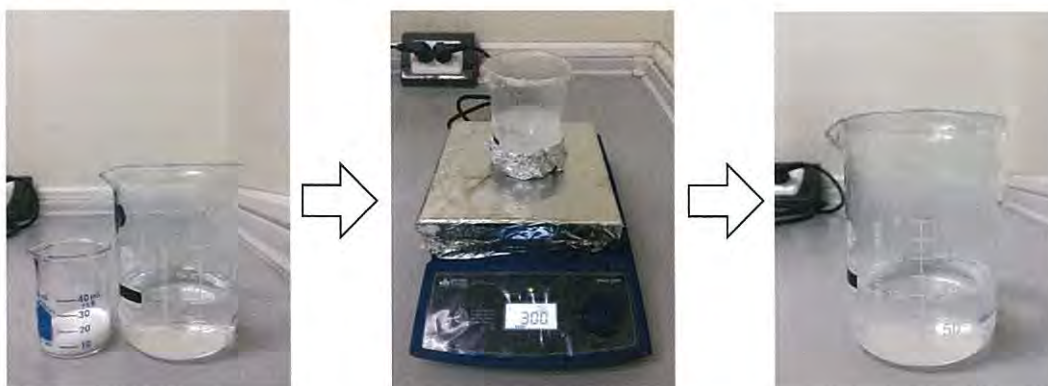
รูปที่ 3.1 แม่พิมพ์ขนาด $3 \times 7.9 \times 3 \text{ cm}^3$



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 cm และความลึก 2 cm

3.3 การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

ละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด NL-05 ในน้ำกลั่นที่ความเข้มข้น 10 %w/v โดยทำการชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ 10 กรัม เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 100 มิลลิลิตร โดยค่อย ๆ ใส่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-90°C และปั่นกวนที่ความเร็วรอบ 600 รอบ/นาที จนกระทั่งสารละลายใสเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (เกรด NL-05) 10 %w/v

3.4 การเตรียมไฮโดรเจล

3.4.1 การเตรียมไฮโดรเจลที่ปราศจากมอนต์มอริลโลไนต์

1. นำสารละลาย PVA (NL-05) จากข้อ 3.3 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. เติม PVA (GL-05) ตามสัดส่วนที่กำหนด (20, 25, 30, 35 และ 40 กรัม) ลงในสารละลาย
3. เติมเจลาติน 2 กรัม และโซเดียมเบนโซเอต 2 กรัม ลงในสารละลาย
4. เทสารละลายที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ลงในแม่พิมพ์ วางทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง
5. นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง
6. นำออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
7. ทำซ้ำข้อ 5-6 จำนวน 2 รอบ
8. นำไฮโดรเจลที่ได้เก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $80 \pm 5\%$ เป็นเวลา 3 วัน

3.4.2 การเตรียมไฮโดรเจลที่เติมมอนต์มอริลโลไนต์

1. นำสารละลาย PVA (NL-05) จากข้อ 3.3 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. เติมมอนต์มอริลโลไนต์ (MMT) ตามสัดส่วนที่กำหนด (1, 2 และ 3 กรัม) ลงในสารละลาย ดังตารางที่ 3.2
3. เติม PVA (GL-05) ตามสัดส่วนที่กำหนด (20, 25, 30, 35 และ 40 กรัม) ลงในสารละลาย ดังตารางที่ 3.2
4. เติมเจลาติน 2 กรัม และโซเดียมเบนโซเอต 2 กรัม ลงในสารละลาย ดังตารางที่

3.2

5. เทสารละลายที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ลงในแม่พิมพ์ วางทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

6. นำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20°C เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

7. นำออกมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

8. ทำซ้ำข้อ 6-7 จำนวน 2 รอบ

9. นำไฮโดรเจลที่ได้เก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $80 \pm 5\%$ เป็นเวลา 3 วัน

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

สูตร	PVA NL-05 (%w/v)	PVA GL-05 (g)	เจลาติน (g)	มอนต์มอริลโลไนต์ (g)	โซเดียมเบนโซเอต (g)
M1G20	10	20	2	1	2
M1G25	10	25	2	1	2
M1G30	10	30	2	1	2
M1G35	10	35	2	1	2
M1G40	10	40	2	1	2
M2G20	10	20	2	2	2
M2G25	10	25	2	2	2
M2G30	10	30	2	2	2
M2G35	10	35	2	2	2
M2G40	10	40	2	2	2
M3G20	10	20	2	3	2
M3G25	10	25	2	3	2
M3G30	10	30	2	3	2
M3G35	10	35	2	3	2
M3G40	10	40	2	3	2

3.5 การตรวจวิเคราะห์และการทดสอบ

3.5.1 ความหนา (Thickness)

วัดความหนาของไฮโดรเจลโดยใช้เวอร์เนีย (Vernier Caliper) วัด 5 ตำแหน่ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

3.5.2 สัณฐานวิทยา (Morphology)

ศึกษาสัณฐานวิทยาของไฮโดรเจลและการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยการเตรียมชิ้นงานขนาด $4 \times 4 \times 5 \text{ mm}^3$ นำชิ้นงานที่ได้มาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

3.5.3 ทดสอบความแข็งแรงต่อการดึงยืด (Tensile strength)

ทดสอบความแข็งแรงต่อการดึงยืดของไฮโดรเจล ซึ่งผ่านการเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $80 \pm 5 \%$ ก่อนนำมาทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบเนกประสงค์ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ มีดังนี้

ลักษณะชิ้นงาน	รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	$24 \times 72 \times 5 \text{ mm}^3$
อัตราเร็วในการดึง		10 mm/min
Load cell		100 N
Gauge length		30 mm
จำนวนชิ้นงาน		6 ชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ค่าความแข็งแรงดึง และค่ามอดุลัสของยัง สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึงยืด (Tensile Strength)} = \frac{F}{A}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus)} &= \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \\ \text{ณ ความชันเริ่มต้นสูงสุด} & \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ F = แรงดิ่งยึดชิ้นงานสูงสุด
 A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

วิธีการทดสอบ

1. นำชิ้นงานตัวอย่างที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ จำนวน 6 ชิ้น มาวัดความหนา และความกว้างของชิ้นงาน
2. ดึงยึดจนชิ้นงานทดสอบขาดออกจากกัน
3. บันทึกค่าแรงที่ได้
4. คำนวณความแข็งแรงต่อการดึงยึดได้จากสูตร

3.5.4 ทดสอบความแข็งแรงต่อการกดอัด (Compressive strength)

ทดสอบความแข็งแรงต่อการกดอัดของไฮโดรเจล ซึ่งผ่านการเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ $80 \pm 5\%$ ก่อนนำมาทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ มีดังนี้



รูปที่ 3.5 ชิ้นงานตัวอย่างรูปทรงกระบอก

ค่าความแข็งแรงกดอัด และค่ามอดุลัสยืดหยุ่น สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงกดอัด (Compressive Strength)} = \frac{F}{A}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus)} &= \frac{\text{ความเค้น (Stress)}}{\text{ความเครียด (Strain)}} \\ \text{ณ ความชันเริ่มต้นสูงสุด} & \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ F = แรงกดอัดขึ้นงานที่ 50 % ของความสูงเดิม

A = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)

วิธีการทดสอบ

1. นำชิ้นงานตัวอย่างทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ จำนวน 5 ชิ้น มาวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง และความสูงของชิ้นงาน
2. กดอัดจนชิ้นงานทดสอบมีความสูงเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของความสูงเดิม
3. บันทึกค่าแรงอัด
4. คำนวณความแข็งแรงต่อการกดอัดได้จากสูตร

3.5.5 การทดสอบหาปริมาณน้ำ (Water content) และของแข็ง (Solid content) ในไฮโดรเจล

1. ชั่งน้ำหนักไฮโดรเจล 3 กรัม ลงในกระชงพ้อยล์และบันทึกน้ำหนัก
2. เตรียมตัวอย่างไฮโดรเจล 3 ตัวอย่าง
3. นำไฮโดรเจลที่ชั่งน้ำหนักคงที่แล้วใส่ในตู้อบ โดยใช้อุณหภูมิ 90°C
4. นำไฮโดรเจลออกจากตู้อบจนน้ำหนักคงที่แล้วชั่งน้ำหนัก
5. ทำซ้ำข้อ 3 และ 4 จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง
6. คำนวณหาค่า Water content (%) จากสมการ

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

7. คำนวณหาค่า Solid content (%) จากสมการ

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

3.5.6 ทดสอบความแข็งพื้นผิว (Surface hardness)

นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบความแข็งที่พื้นผิวด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์โดยใช้หัวกด Shore OO น้ำหนักกด 400 กรัม

วิธีการทดสอบ

1. นำชิ้นงานตัวอย่างจำนวน 6 ชิ้น
2. กดหัวกดที่ติดกับสปริงลงบนพื้นผิวของชิ้นงาน
3. ทำการทดสอบกดซ้ำ 10 ครั้ง ที่ตำแหน่งอื่น แล้วหาค่าเฉลี่ย
4. บันทึกค่าแรงที่ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

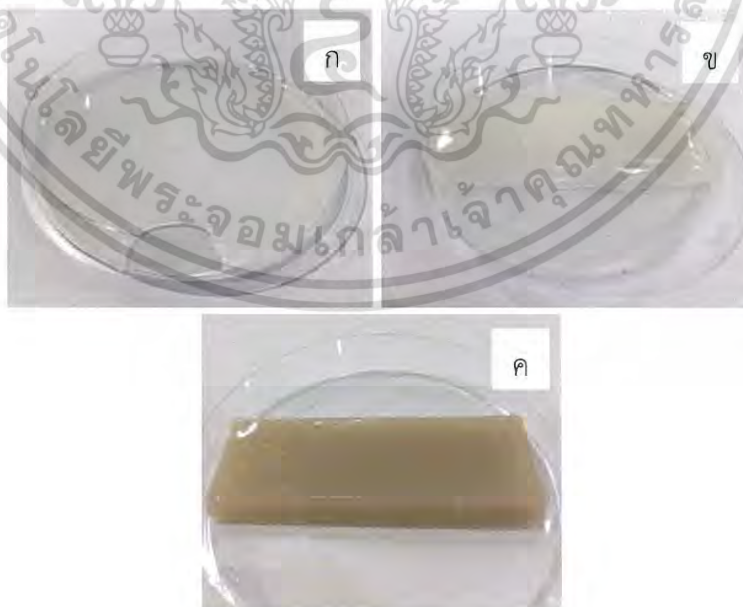
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมไฮโดรเจลที่ขึ้นรูปผ่านกระบวนการ Freeze-thaw โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ที่มีเจลาตินและมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยเพิ่มความคงรูปและเพิ่มความแข็งแรงให้กับไฮโดรเจล โดยทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G และปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจล จากนั้นนำมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เพื่อดูการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ รวมทั้งหาค่าความแข็งแรงพื้นผิว ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำและปริมาณของแข็งคงเหลือในไฮโดรเจล

4.1 การเตรียมไฮโดรเจล

เตรียมไฮโดรเจลจากการละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด N ที่ความเข้มข้น 10 %w/v และผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G ที่ความเข้มข้น (20, 25, 30, 35 และ 40 %w/v) เมื่อขึ้นรูปโดยกระบวนการ Freeze-thaw แล้วพบว่าไม่สามารถเตรียมชิ้นงานให้มีรูปร่างคงที่ได้จึงไม่สามารถนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้ จึงได้มีการเติมเจลาตินเพื่อเพิ่มการเชื่อมโยงทางกายภาพและมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการคงรูป

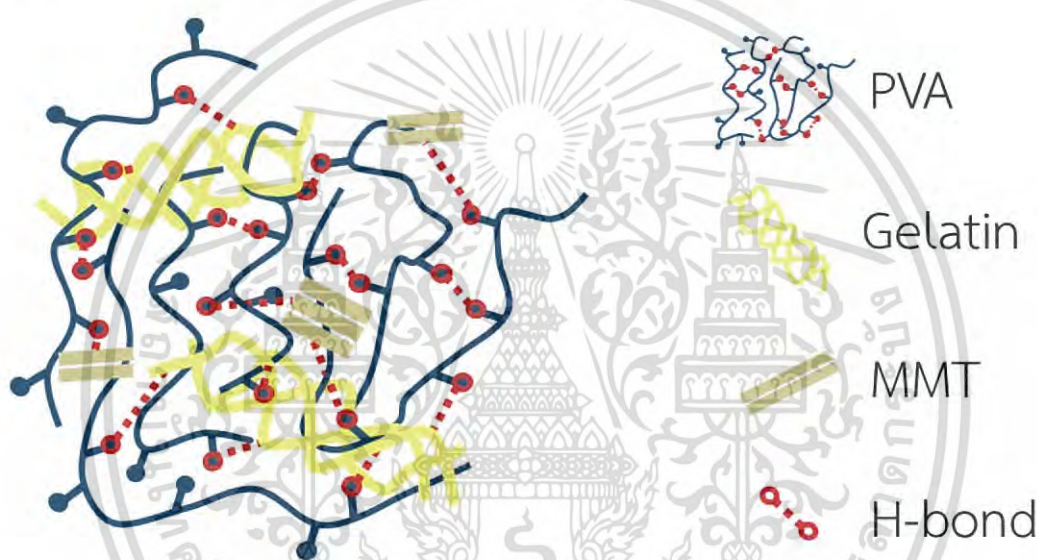


รูปที่ 4.1 (ก) ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (ข) ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์กับ

เจลาติน และ (ค) ไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

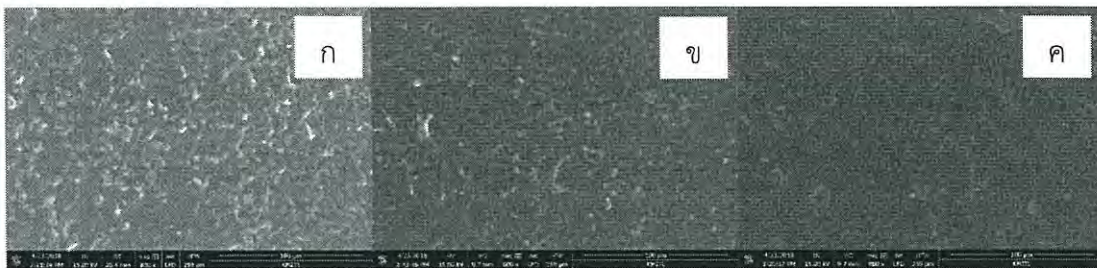
จากรูปที่ 4.1 (ก) แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่ขึ้นรูปผ่านกระบวนการ Freeze-thaw ไม่สามารถคงรูปได้ ดังนั้นจึงทำการเติมเจลาตินซึ่งมีสมบัติในการเชื่อมโยงทางกายภาพที่อุณหภูมิต่ำเพื่อให้ไฮโดรเจลสามารถคงรูปได้ ดังรูปที่ 4.1 (ข) โดยพบว่าเจลาตินช่วยในการขึ้นรูปไฮโดรเจลแต่ไม่สามารถนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้ เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดไม่คงที่ ดังนั้นจึงเติมมอนต์มอริลโลไนต์เพื่อช่วยเพิ่มเสถียรภาพในการคงรูปทำให้ไฮโดรเจลมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ดังรูปที่ 4.1 (ค) โดยรูปที่ 4.2 เป็นแบบจำลองของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์ ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลกับเจลาตินและมอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางกายภาพในไฮโดรเจล ส่งผลให้ไฮโดรเจลคงรูปได้อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.2 แบบจำลองของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เจลาติน และมอนต์มอริลโลไนต์

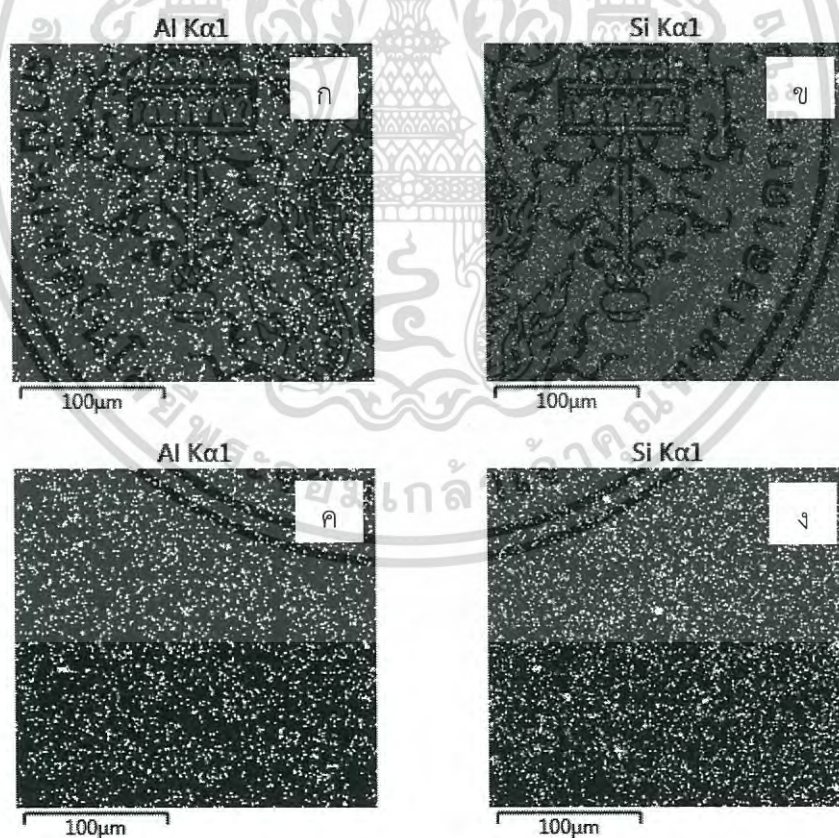
4.2 สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาการกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ ทำได้โดยการนำไฮโดรเจลมาตรวจสอบสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โหมดสุญญากาศต่ำ (Low vacuum) ที่กำลังขยาย 800 เท่า โดยไฮโดรเจลสูตรที่เลือกศึกษาสัณฐานวิทยาเป็นสูตรที่มีความแตกต่างกันของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ ได้แก่ ไฮโดรเจลสูตร M1G40, M2G40 และ M3G40 พบว่ามอนต์มอริลโลไนต์มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางของไฮโดรเจล (ก) M1G40 (ข) M2G40 และ (ค) M3G40

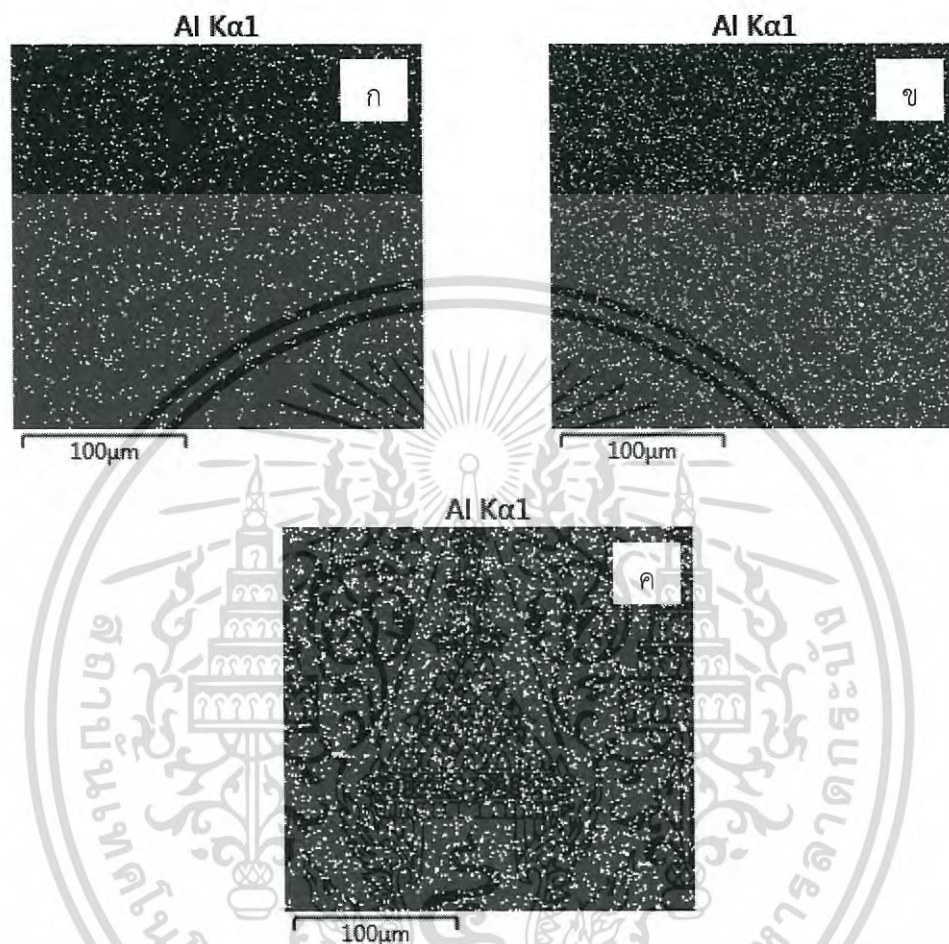
เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มแอสแม็คไทต์ (Smectite) ที่มีลักษณะเป็นแผ่นซิลิกา (Silica sheet) และแผ่นอะลูมินา (Alumina sheet) วางเรียงกันจึงสามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของมอนต์มอริลโลไนต์ในไฮโดรเจลได้ โดยการหาตำแหน่งของอะตอมอะลูมิเนียมและซิลิกอน โดยพบว่าไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 3 %w/v (M3G40) มีการกระจายตัวของธาตุอะลูมิเนียมและซิลิกอนตั้งแต่ขอบจนถึงกึ่งกลางของชิ้นงาน แสดงให้เห็นว่ามอนต์มอริลโลไนต์มีการกระจายตัวทั่วทั้งไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ภาพตัดขวางบริเวณขอบของไฮโดรเจลสูตร M3G40 (ก-ข) และภาพตัดขวางบริเวณกึ่งกลางของไฮโดรเจลสูตร M3G40 (ค-ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

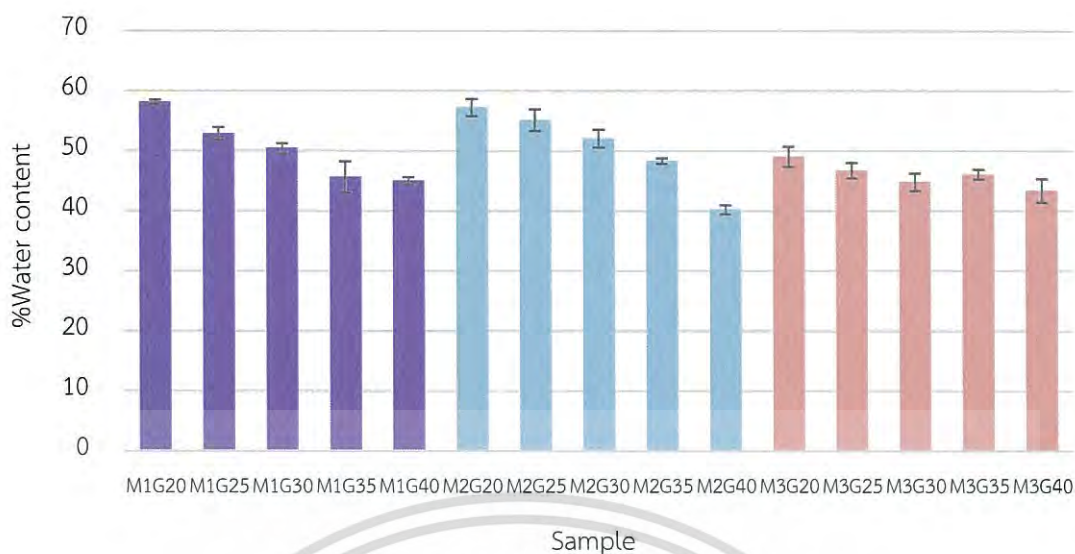
นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ในไฮโดรเจลสูตร M1G40 และ M2G40 กับสูตร M3G40 พบว่าสูตร M3G40 มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่มากกว่าโดยสังเกตได้จากปริมาณความหนาแน่นของธาตุอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางบริเวณกึ่งกลางของไฮโดรเจลสูตร (ก) M1G40 (ข) M2G40 และ (ค) M3G40

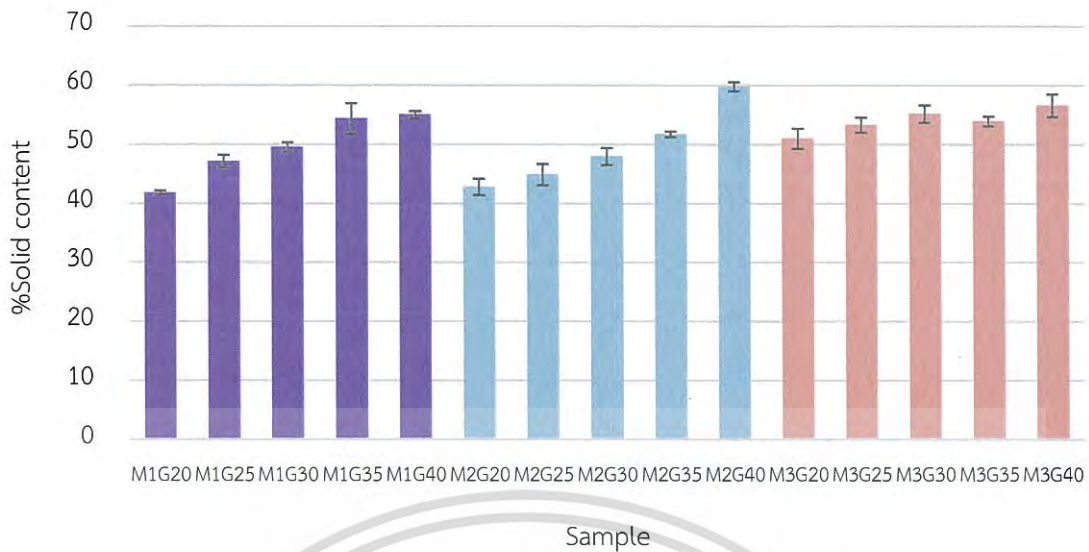
4.3 ปริมาณน้ำ (Water content) และของแข็งคงเหลือ (Solid content) ในไฮโดรเจล

ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลสามารถหาได้โดยนำไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ ไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 90°C จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ จากนั้นคำนวณผลโดยใช้สูตรดังแสดงในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5.5 ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำและของแข็งคงเหลือในไฮโดรเจล ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล

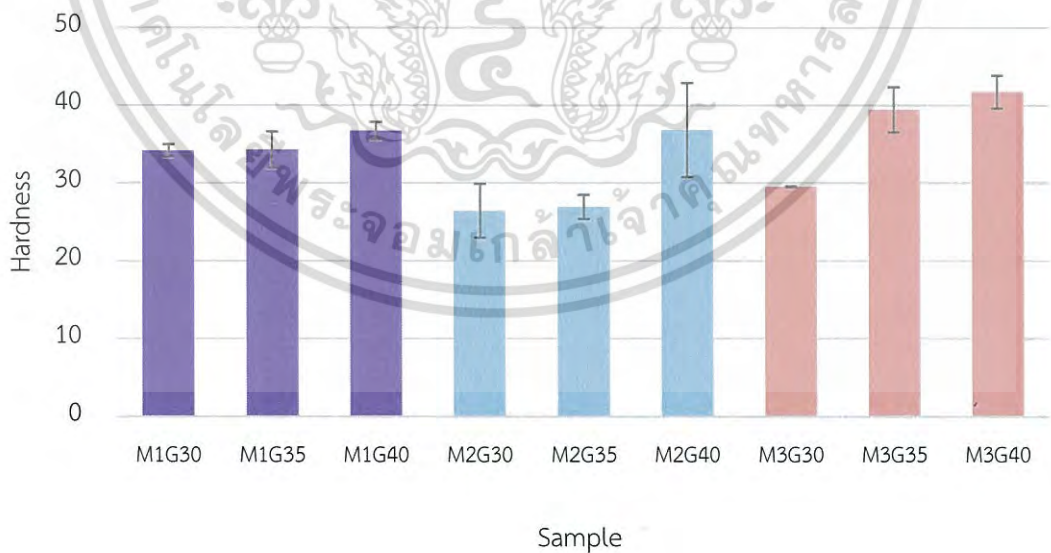
ค่าปริมาณน้ำในไฮโดรเจลมีค่าอยู่ในช่วง 40-60 % จากรูปที่ 4.6 ไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G เท่ากัน ตัวอย่างเช่นไฮโดรเจลสูตร M1G40, M2G40 และ M3G40 มีปริมาณน้ำในไฮโดรเจลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไฮโดรเจลที่มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G ไม่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น ไฮโดรเจลสูตร M1G20, M1G25, M1G30, M1G35 และ M1G40 มีปริมาณน้ำในไฮโดรเจลลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ไม่ส่งผลต่อปริมาณน้ำในไฮโดรเจล แต่การเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G ส่งผลต่อการลดลงของปริมาณน้ำในไฮโดรเจลอย่างมีนัยสำคัญ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ (1-3 %w/v) ในไฮโดรเจลมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (20-40 %w/v) จึงทำให้การเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีผลต่อค่าปริมาณน้ำในไฮโดรเจล โดยเป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อสาร ส่งผลให้ปริมาณของแข็งคงเหลือในไฮโดรเจลมากขึ้น ปริมาณน้ำในไฮโดรเจลจึงลดลงสอดคล้องกับปริมาณของแข็งคงเหลือในไฮโดรเจลดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณของแข็งคงเหลือในไฮโดรเจล

4.4 ความแข็งพื้นผิว (Surface hardness)

ค่าความแข็งแรงพื้นผิวสามารถหาได้โดยการนำไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ เก็บไว้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80±5 % เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นนำไปวัดค่าความแข็งพื้นผิวด้วยเครื่องดูโรมิเตอร์แบบชอร์ โดยใช้หัวกด Shore OO น้ำหนักกด 400 กรัมตามมาตรฐาน ASTM D 2240 ได้ค่าความแข็งพื้นผิว ดังนี้



รูปที่ 4.8 ค่าความแข็งพื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

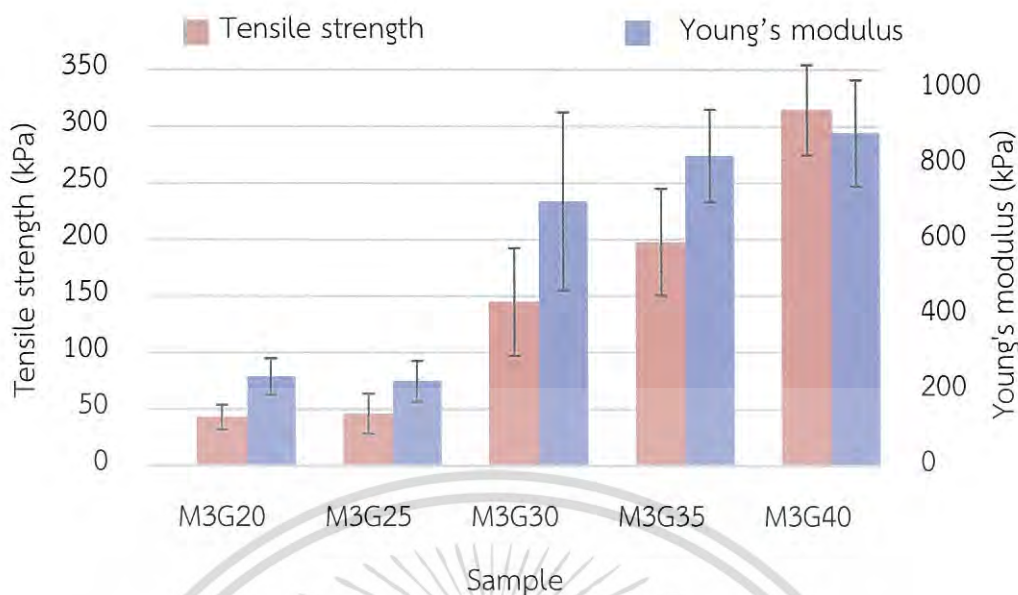
จากรูปที่ 4.8 พบว่าค่าความแข็งพื้นผิวของไฮโดรเจลอยู่ในช่วง 25-40 โดยไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G เท่ากัน ตัวอย่างเช่นสูตร M1G40, M2G40 และ M3G40 มีค่าความแข็งพื้นผิวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ไฮโดรเจลที่มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G มากจะมีค่าความแข็งพื้นผิวที่สูงกว่าไฮโดรเจลที่มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G น้อยกว่า ดังเช่นไฮโดรเจลสูตร M3G30, M3G35 และ M3G40 ส่วนสูตรที่มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G น้อยกว่า 30 % พบว่าไม่สามารถวัดค่าความแข็งพื้นผิวได้เนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างมีปริมาณน้ำในไฮโดรเจลมาก อย่างไรก็ตามค่าความแข็งพื้นผิวของไฮโดรเจลทุกสูตรไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากการเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรดเดียวกัน จึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงพื้นผิว ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีผลมาจากปริมาณน้ำในไฮโดรเจล

4.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

4.5.1 ศึกษาผลของปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G ที่มีผลต่อความแข็งแรงของไฮโดรเจล

4.5.1.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

จากรูปที่ 4.9 แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Tensile strength) และค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 ± 5 % ไฮโดรเจลทั้ง 5 สูตร ที่มีปริมาณมอนอเมอริลโกลีนต์คงที่ที่ 3 % มีค่าความแข็งแรงดึงอยู่ในช่วง 40-320 kPa และมีค่ามอดุลัสของยังอยู่ในช่วง 200-900 kPa โดยเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G จาก 20 % เป็น 40 % พบว่าค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 43 kPa เป็น 315 kPa และค่ามอดุลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 237 kPa เป็น 883 kPa เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G เป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อสารและพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลในเนื้อไฮโดรเจลมากขึ้น ความทนต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรเจลจึงสูงขึ้น ซึ่งไฮโดรเจลสูตรที่มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของยังสูงสุดคือ M3G40 โดยมีค่าเท่ากับ 315 kPa และ 883 kPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ มีค่าอยู่ในช่วงกว้าง อาจเนื่องมาจากปริมาณน้ำในไฮโดรเจลมีมากทำให้การควบคุมความชื้นของไฮโดรเจลแต่ละสูตรนั้นทำได้ยาก ความชื้นของไฮโดรเจลแต่ละชิ้นจึงอาจไม่เท่ากันส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อน

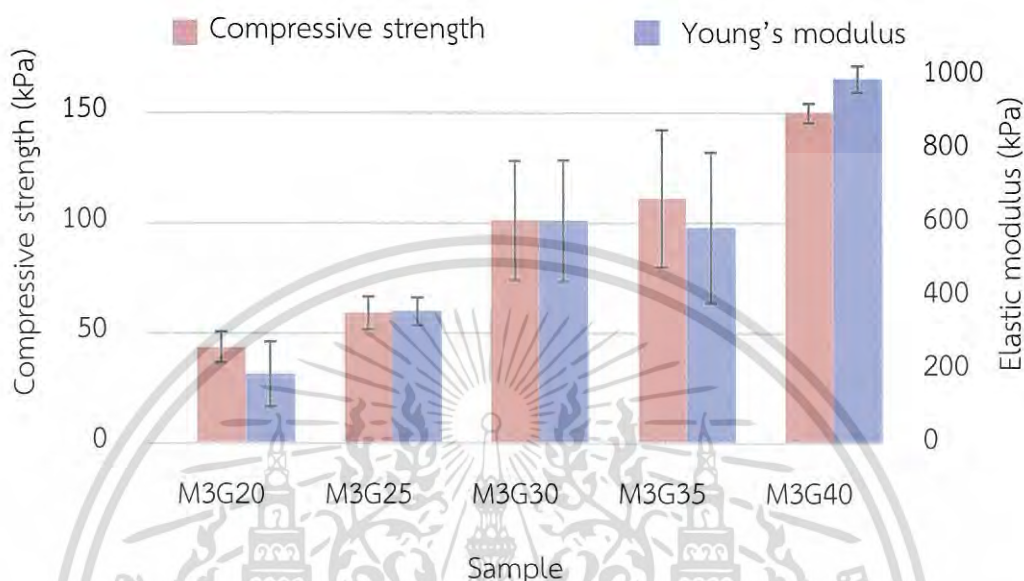


รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่ามอดูลัสของยังของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ อันเนื่องจากผลของปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

4.5.1.2 การทดสอบแรงกด (Compression test)

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าความแข็งแรงกดอัด (Compressive strength) และค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (Elastic modulus) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 ± 5 % ระยะเวลา 50 % ไฮโดรเจลทั้ง 5 สูตรที่ควบคุมปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่ 3 % มีค่าความแข็งแรงกดอัดอยู่ในช่วง 40-150 kPa และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 100-1000 kPa ซึ่งไฮโดรเจลสูตรที่มีค่าความแข็งแรงกดอัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นสูงสุดที่ระยะเวลา 50 % คือสูตร M3G40 โดยมีค่าความแข็งแรงกดอัดเท่ากับ 150 kPa และมีค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 992 kPa จากผลการทดลองเปลี่ยนปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G พบว่าค่าความแข็งแรงกดอัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความแข็งแรงกดอัดสูงสุดที่ระยะเวลา 50 % มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 44 kPa เป็น 150 kPa และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 189 kPa เป็น 992 kPa เมื่อเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G จาก 20 % เป็น 40 % เช่นเดียวกันกับการทดสอบแรงดึง การเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงกดอัดสูงสุดที่ระยะเวลา 50 % เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G เป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อสารซึ่งส่งเสริมให้เกิดพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลในเนื้อไฮโดรเจลมากขึ้น ความทนต่อแรงกดอัดและความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรเจลจึงสูงขึ้น อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลสูตร M3G30 และ M3G35 มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงกว้าง ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากการควบคุมความชื้นของไฮโดรเจลในแต่ละชิ้นไม่เท่ากัน ส่งผลให้แนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงกดอัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นไม่ชัดเจน โดยจะเห็นจากค่ามอดูลัสยืดหยุ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไฮโดรเจลสูตร M3G35 ที่มีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของไฮโดรเจลสูตร M3G30 ซึ่งคาดว่าเกิดจากปริมาณความชื้นของไฮโดรเจลสูตร M3G35 ที่ดูดซับไว้ได้มากทำให้สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้มากกว่าไฮโดรเจลสูตร M3G30 ดังนั้นจึงทำให้มอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า



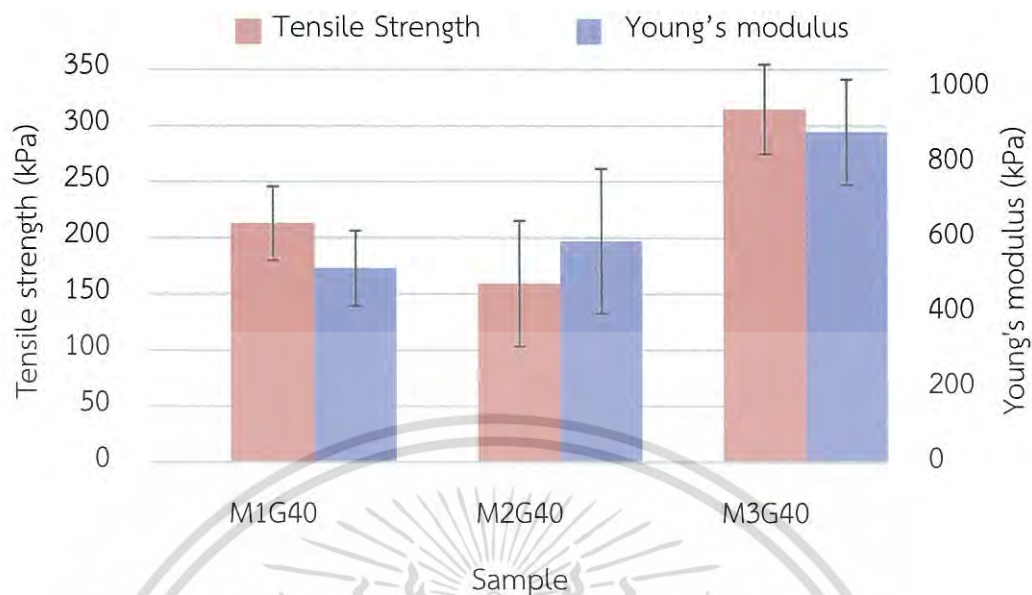
รูปที่ 4.10 ค่าความแข็งแรงกดอัดและค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ อันเนื่องจากผลของปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

4.5.2 ศึกษาผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่มีต่อความแข็งแรงของไฮโดรเจล

4.5.2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile test)

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและค่ามอดุลัสของยัง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 ± 5 % ไฮโดรเจลทั้ง 3 สูตร มีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G คงที่ที่ 40 % มีค่าความแข็งแรงดึงอยู่ในช่วง 200-320 kPa และค่ามอดุลัสของยังอยู่ในช่วง 500-900 kPa ซึ่งไฮโดรเจลสูตรที่มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดุลัสของยังสูงสุดคือสูตร M3G40 มีค่าความแข็งแรงดึงเท่ากับ 315 kPa มีค่ามอดุลัสของยังเท่ากับ 883 kPa โดยพบว่าเมื่อเติมมอนต์มอริลโลไนต์ปริมาณ 1-2 %w/v ไม่เห็นความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ แต่การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 3 %w/v จะเห็นค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมอนต์มอริลโลไนต์เป็นสารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีพื้นที่ผิวมากจึงส่งผลให้ไฮโดรเจลรับแรงดึงได้เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามไฮโดรเจลสูตร M2G40 มีค่าความแข็งแรงดึงยืต่ำกว่ไฮโดรเจลสูตร M1G40 ซึ่งไม่เป็นไปตามแนวโน้ม อาจมีสาเหตุมาจากการเกาะกลุ่มกันของมอนต์มอริลโลไนต์และการควบคุมความชื้นของไฮโดรเจลในแต่ละชิ้นงานที่ไม่ได้ประสิทธิภาพ

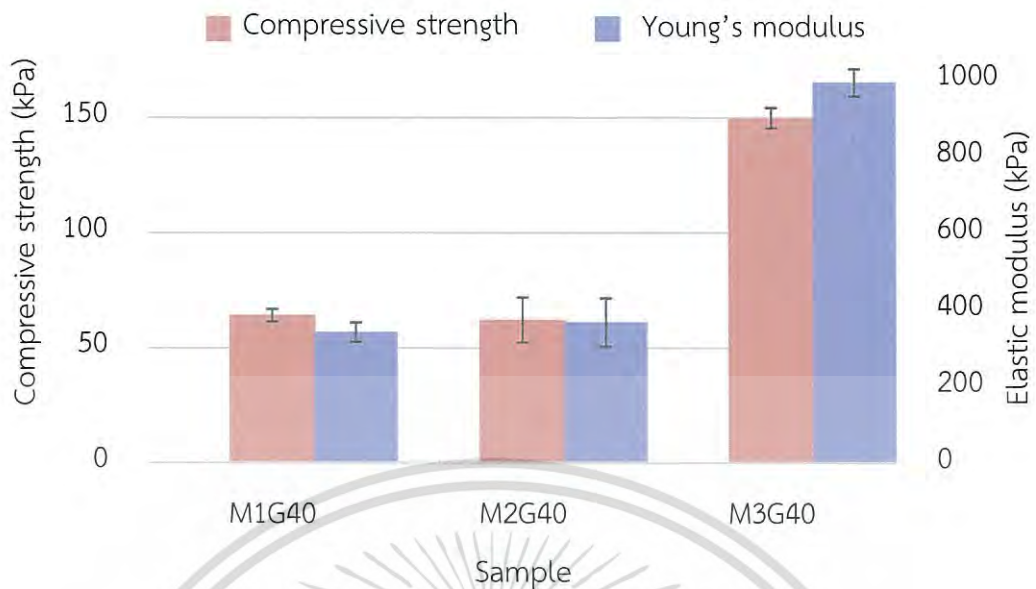
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดและความอดุลีของยางของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ อันเนื่องจากผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์

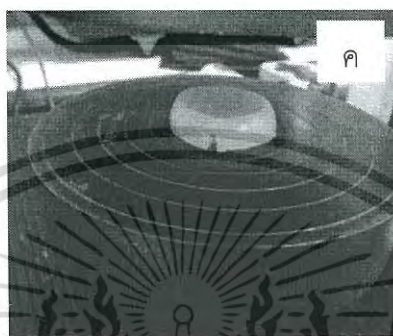
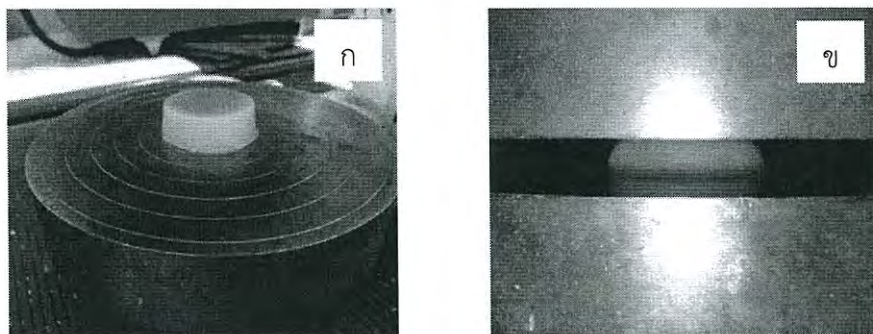
4.5.2.2 การทดสอบแรงกด (Compression test)

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าความแข็งแรงกดอัดและความอดุลียืดหยุ่น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 80 ± 5 % ระยะกดอัด 50 % ไฮโดรเจลทั้ง 3 สูตรมีปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G คงที่ที่ 40 %w/v ซึ่งมีค่าความแข็งแรงกดอัดอยู่ในช่วง 60-150 kPa และมีความอดุลียืดหยุ่นอยู่ในช่วง 300-1000 kPa โดยไฮโดรเจลสูตรที่มีค่าความแข็งแรงกดอัดและมอดุลียืดหยุ่นสูงสุดที่ระยะกด 50 % คือ M3G40 มีค่าความแข็งแรงกดอัดเท่ากับ 150 kPa มีค่ามอดุลียืดหยุ่นเท่ากับ 992 kPa โดยพบว่าเมื่อเติมมอนต์มอริลโลไนต์ลงในไฮโดรเจลในปริมาณ 1-2 %w/v ไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าความแข็งแรงกดอัดและความอดุลียืดหยุ่น แต่การเติมมอนต์มอริลโลไนต์ในปริมาณ 3 %w/v พบว่าค่าความแข็งแรงกดอัดและความอดุลีของยางมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับค่าความแข็งแรงดึง ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติการเป็นสารเสริมแรงของมอนต์มอริลโลไนต์ซึ่งเป็นสารเสริมแรงที่มีลักษณะเป็นแผ่น มีพื้นที่ผิวมากจึงส่งผลให้ไฮโดรเจลสามารถรับแรงกดได้เพิ่มมากขึ้น

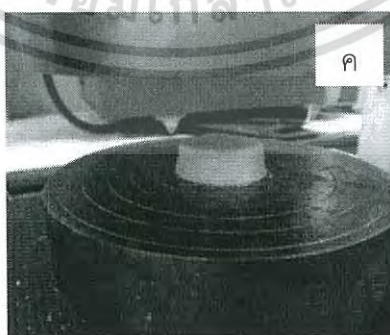


รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงกดอัดและค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ อันเนื่องจากผลของปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์

นอกจากนี้ในการทดสอบความแข็งแรงกดอัดพบว่าเมื่อทำการกดอัดชิ้นงานไฮโดรเจลทุกสูตรมีเพียงไฮโดรเจลสูตร M1G20 M1G25 และ M2G20 เกิดการแตก ไม่สามารถคงรูปและคืนตัวได้แสดงดังรูปที่ 4.13 (ค) แต่สำหรับไฮโดรเจลสูตรอื่น ๆ พบว่าสามารถคงรูปและคืนตัวได้หลังจากได้รับแรงกดอัดแสดงดังรูปที่ 4.14 (ค) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ไฮโดรเจลมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นเพียงพอที่จะสามารถคืนตัวได้ดังเดิม จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเตรียมคอมโพสิตไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมเจลาตินและมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้ได้ไฮโดรเจลที่แสดงสมบัติความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่ดี



รูปที่ 4.13 ไฮโดรเจลสูตร M2G20 ในการทดสอบความแข็งแรงกดอัด (ก) ภาพก่อนการทดสอบ (ข) ภาพระหว่างการทดสอบ และ (ค) ภาพหลังการทดสอบ



รูปที่ 4.14 ไฮโดรเจลสูตร M2G25 ในการทดสอบความแข็งแรงกดอัด (ก) ภาพก่อนการทดสอบ (ข) ภาพระหว่างการทดสอบ และ (ค) ภาพหลังการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ผสมร่วมกับเจลาตินและมอนต์มอริลโลไนต์ โดยศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

1. ปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G
2. ปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ในไฮโดรเจล

ผลจากการเตรียมไฮโดรเจลที่ขึ้นรูปผ่านกระบวนการ Freeze-thaw พบว่าไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด N และเกรด G ไม่สามารถคงรูปร่างได้ ดังนั้นจึงทำการเติมเจลาตินที่ทำหน้าที่เพิ่มการเชื่อมโยงทางกายภาพเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่คงรูปแต่การเติมเจลาตินเพียงอย่างเดียวยังคงไม่สามารถคงรูปไฮโดรเจลให้มีพื้นที่หน้าตัดที่คงที่เพื่อที่จะนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้ จึงต้องมีการเติมมอนต์มอริลโลไนต์ร่วมกับเจลาตินเพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่คงรูปและมีพื้นที่หน้าตัดที่คงที่

ผลการทดสอบไฮโดรเจลทั้ง 15 สูตร ที่ทำการศึกษาค่าปัจจัยเรื่องปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G และปริมาณของมอนต์มอริลโลไนต์ในไฮโดรเจล พบว่าไฮโดรเจลที่มีปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ต่างกัน แต่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากัน เช่น ไฮโดรเจลสูตร M3G20, M3G25, M3G30, M3G35 และ M3G40 จะมีความแข็งแรงดึงยืด โมดูลัสของยัง ความแข็งแรงกดอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อไฮโดรเจลมีปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์สูงขึ้น เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณเนื้อสารและส่งเสริมให้เกิดพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น ทำให้เกิดการเชื่อมโยงของโมเลกุลในเนื้อไฮโดรเจลมากขึ้น ความทนต่อแรงดึง แรงกดอัด และความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรเจลจึงสูงขึ้น ในกรณีของไฮโดรเจลที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ต่างกัน แต่มีปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เท่ากัน เช่นไฮโดรเจลสูตร M1G40, M2G40 และ M3G40 จะมีความแข็งแรงดึงยืด โมดูลัสของยัง ความแข็งแรงกดอัด และโมดูลัสยืดหยุ่นที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อไฮโดรเจลมีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ที่มากขึ้น โดยมอนต์มอริลโลไนต์ทำหน้าที่เป็นสารเสริมแรงซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นมีพื้นที่ผิวมากจึงส่งผลให้ไฮโดรเจลรับแรงดึงได้เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์เกรด G และปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์จะช่วยเสริมความแข็งแรงและความยืดหยุ่นคงรูปให้กับไฮโดรเจล โดยไฮโดรเจลสูตร M3G40 ให้ค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกดอัด โมดูลัสของยัง และโมดูลัสยืดหยุ่นสูงสุด เท่ากับ 315, 150, 883 และ 992 kPa ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ในไฮโดรเจลให้เท่ากันทุกชิ้น
2. เพิ่มปริมาณสารเสริมแรง เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับไฮโดรเจล
3. นำไฮโดรเจลไปประยุกต์ใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Muppalaneni, S and Omidian, H. 2013. "Polyvinyl Alcohol in Medicine and Pharmacy: A Perspective." *Journal of Developing Drugs*. 2(3) : 112-116.
- [2] Hassan, C.M. Ward, J.H. and Peppas, N.A. 2000. "Modeling of crystal dissolution of poly(vinyl alcohol) gels produced by freezing/ thawing processes." *Polymer*. 41(18) : 6729-6739.
- [3] Yurong, L. Luke, M.G. James, E.K. Clement, L.H. Paul, A.C. and Garrett, B.M. 2009. "Thermal behavior and mechanical properties of physically crosslinked PVA/Gelatin hydrogels." *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 3(2) : 203-209.
- [4] Samadi, N. Sabzi, M. and Babaahmadi, M. 2018. "Self-healing and tough hydrogels with physically cross-linked triple networks based on Agar/PVA/Graphene." *International Journal of Biological Macromolecules*. 107(Part B) : 2291-2297.
- [5] Gholam, R.M. Abdohossein, M. Ali, B. and Ebrahim, S. 2014. "Study of adsorption of cationic dye on magnetic kappa- carrageenan/ PVA nanocomposite hydrogels." *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2(3) : 1578-1587.
- [6] Haraguchi, K. and Takehisa, T. 2002. "Nanocomposite Hydrogels: A Unique Organic-Inorganic Network Structure with Extraordinary Mechanical, Optical, and Swelling/De-swelling Properties." *Advanced Materials*. 14(16) : 1120-1124.
- [7] Haraguchi, K. Takehisa, T. and Fan, S. 2002. "Effects of Clay Content on the Properties of Nanocomposite Hydrogels Composed of Poly(N- isopropyl acrylamide) and Clay." *Macromolecules*. 35(27) : 10162-10171.
- [8] Lee, W.F. and Fu, Y.T. 2003. "Effect of montmorillonite on the swelling behavior and drug-release behavior of nanocomposite hydrogels." *Journal of Applied Polymer Science*. 89(13) : 3652-3660.
- [9] Sur, G.S. Lyu, S.G. and Chang, J.H. 2003. "Preparation of thermosensitive poly(N- isopropylacrylamide) - clay nanocomposites and their phase transition behavior." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 9(1) : 58-62.

- [10] Zolfaghari, R. Katbab, A.A. Nabavizadeh, J. Tabasi, R.Y. and Nejad, M.H. 2006. "Preparation and characterization of nanocomposite hydrogels based on polyacrylamide for enhanced oil recovery applications." *Journal of Applied Polymer Science*. 100(3) : 2096-2103.
- [11] Al, E. Guclu, G. Iyim, T.B. Emik, S. and Ozgumus, S. 2008. "Synthesis and properties of starch-graft-acrylic acid/Na-montmorillonite superabsorbent nanocomposite hydrogels." *Journal of Applied Polymer Science*. 109(1) : 16-22.
- [12] Kasgoz, H. and Durmus, A. 2008. "Dye removal by a novel hydrogel-clay nanocomposite with enhanced swelling properties." *Polymers for Advanced Technologies*. 19(7) : 838-845.
- [13] Lee, W.F. and Chen, Y.C. 2004. "Effect of hydrotalcite on the physical properties and drug-release behavior of nanocomposite hydrogels based on poly[acrylic acid-co-poly(ethylene glycol) methyl ether acrylate] gels." *Journal of Applied Polymer Science*. 94(2) : 692-699.
- [14] Lee, W.F. and Chen, Y.C. 2004. "Effect of bentonite on the physical properties and drug-release behavior of poly(AA-co-PEGMEA)/bentonite nanocomposite hydrogels for mucoadhesive." *Journal of Applied Polymer Science*. 91(5) : 2934-2941.
- [15] วรินดา วราพันธ์. 2553. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของไฮโดรเจลคอมโพสิตชนิดไคโตซาน/อัลจินต-ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติเป็นเจลสมานแผล." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [16] Kondo, T. Nomura, K. Murou, M. Gemmei-Ide, M. Kitano, H. Noguchi, H. Uosaki, K. Ohno, K. and Saruwatari, Y. 2012. "Structure of water in the vicinity of a zwitterionic polymer brush as examined by sum frequency generation method." *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 100(1) : 126-132.
- [17] วรเวทย์ กาญจนานันท์. 2555. "ผลของยางธรรมชาติอีพ็อกไซด์ต่อสมบัติของฟิล์มและการยึดติดของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์." วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [18] Christie, M.H. and Nikolaos, A.P. 2001. "Structure and Applications of Poly(vinyl alcohol) Hydrogels Produced by Conventional Crosslinking or by Freezing/Thawing Methods." 37-65. *Advances in Polymer Science*. 153. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] ภัทราวุธ มนต์วิเศษ. 2558. เอกสารการสอนวิชา ไบโอฟอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] ณิชากัทร สมบูรณ์. 2556. “สมบัติของเจลผสมระหว่างวุ้นกับเจลาตินปลา.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหารและโภชนาการ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์
- [21] Thakur, S. Govender, P.P. Mamo, M.A. Tamulevicius, S. and Thakur, V.K. 2017. “Recent progress in gelatin hydrogel nanocomposites for water purification and beyond.” *Vacuum*. 146(1) : 396-408.
- [22] เขาวลิต มณฑล, จิระพรชัย สุขเสรี, ลักษณะ เจริญใจ และณัฐวรรธย์ จันคณา. 2557. “วัตถุดิบสำหรับการผลิตแคปซูลเจลาตินฮาลาล.” *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 22(4) : 582-590
- [23] Persatuan, P. 2006. A guide by consumers association of Penang. Penang : Pulau Pinang Press.
- [24] รัตนวรรณ เกียรติโกมล. 2548. การใช้มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ธรรมชาติ และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวแล้วเป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ในระบบหอดูดซับ. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [25] รัตนวรรณ วิบูลย์สวัสดิ์. 2545. การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำโดยใช้ Montmorillonite Clay (Removal of Organic Compounds from Water using Montmorillonite Clay). นครราชสีมา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [26] สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิจัยและนวัตกรรมเพื่อสิ่งแวดล้อม. 2555. โครงการพัฒนาฐานข้อมูลความปลอดภัยของวัสดุนาโน. [Online]. Available : http://web.eng.nu.ac.th/eng2012/ceri/nanodatabase/info2.php?cat_id=11&p_id=305.
- [27] วรณัฐ เรืองโกสม. 2550. การศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีน/เคลย์ นาโนคอมโพสิต (The study of properties of polyethylene / layered silicate nanocomposites). [Online]. Available : <http://www.thapra.lib.su.ac.th/>.
- [28] Henriette, M.C. 2009. “Nanocomposites for food packaging applications.” *Journal of Food Research International*. 42 (2009) : 1240-1253.
- [29] Chen, C. Chen, Y. Xie, J. Xu, Z. Tang, Z. Yang, F. and Fu, K. 2017. “Effects of montmorillonite on the properties of cross-linked poly(vinylalcohol)/boric acid film.” *Journal of Progress in Organic Coatings*. 112 (2017) : 66–74.
- [30] Zhuang, G. Zhang, Z. Wu, H. Zhang, H. Zhang, X. and Liao, L. 2017. “Influence of the nonionic surfactants’ nature on the structures and properties of organo,
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- montmorillonites.” *Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical. Eng. Aspects.* 518 (2017) : 116–123.
- [31] บริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด. 2561. โซเดียมเบนโซเอต (Sodium benzoate). [Online]. Available : <https://www.chemipan.com/home/index.php/635-สินค้า/646-สารเคมีทั่วไป/648-สารเคมีทั่วไป/1105/1105-sodium-benzoate-โซเดียม-เบนโซเอต-เคมีภัณฑ์-สารเคมี.html>
- [32] Jiang, S. Liu, S. and Feng, W. 2011. “PVA hydrogel properties for biomedical application.” *Journal of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials.* 4(1) : 1228-1233.
- [33] Hago, E.E. and Li, X. 2013. “Interpenetrating Polymer Network Hydrogels Based on Gelatin and PVA by Biocompatible Approaches: Synthesis and Characterization.” *Advances in Materials Science and Engineering.* 2013(1) : 1-9.
- [34] Yurong, L. Luke, M.G. James, E.K. Clement, L.H. Paul, A.C. and Garrett, B.M. 2009. “Thermal behavior and mechanical properties of physically crosslinked PVA/Gelatin hydrogels.” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials.* 3(2010) : 203-209.
- [35] Mehrdad, K. Mohammad, S. and Zuhair, M.H. 2007. “PVA–clay nanocomposite hydrogels for wound dressing.” *European Polymer Journal.* 43(3) : 773-781.
- [36] Mohammad, S. Mehrdad, K. and Zuhair, M.H. 2012. “Swelling Behavior and Structural Characteristics of Polyvinyl Alcohol/ Montmorillonite Nanocomposite Hydrogels.” *Journal of Applied Polymer Science.* 123(1) : 50-58.
- [37] Yu, Y.H. Lin, C.Y. Yeh, J.M. and Lin, W.H. 2003. “Preparation and properties of poly(vinyl alcohol)-clay nanocomposite materials.” *Polymer.* 44(1) : 3553-3560.
- [38] Strawhecker, K.E. and Manias, E. 2000. “Structure and Properties of Poly(vinyl-alcohol)/Na⁺ Montmorillonite Nanocomposites.” *Chemistry of Materials.* 12(10) : 2943-2949.
- [39] Stammen, J.A. Williams, S. Ku, D.N. and Guldborg, R.E. 2001. “Mechanical properties of a novel PVA hydrogel in shear and unconned compression.” *Biomaterials.* 22(8) : 799-806.

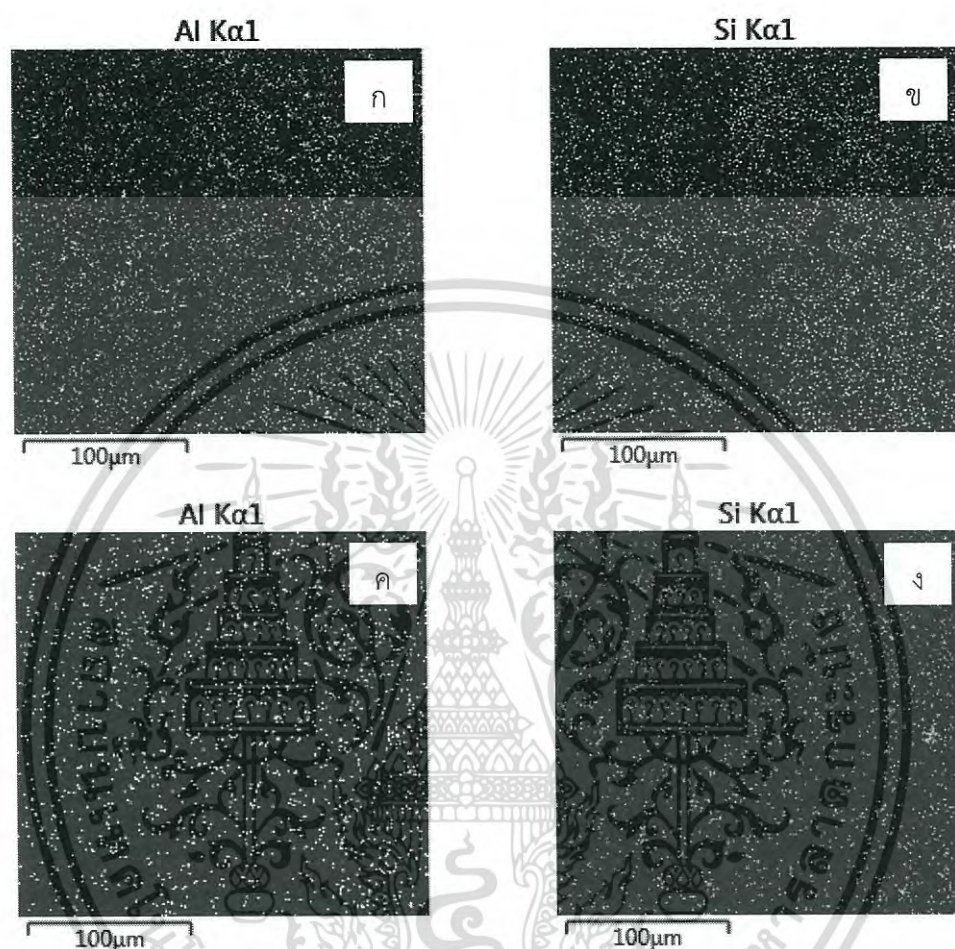


ภาคผนวก

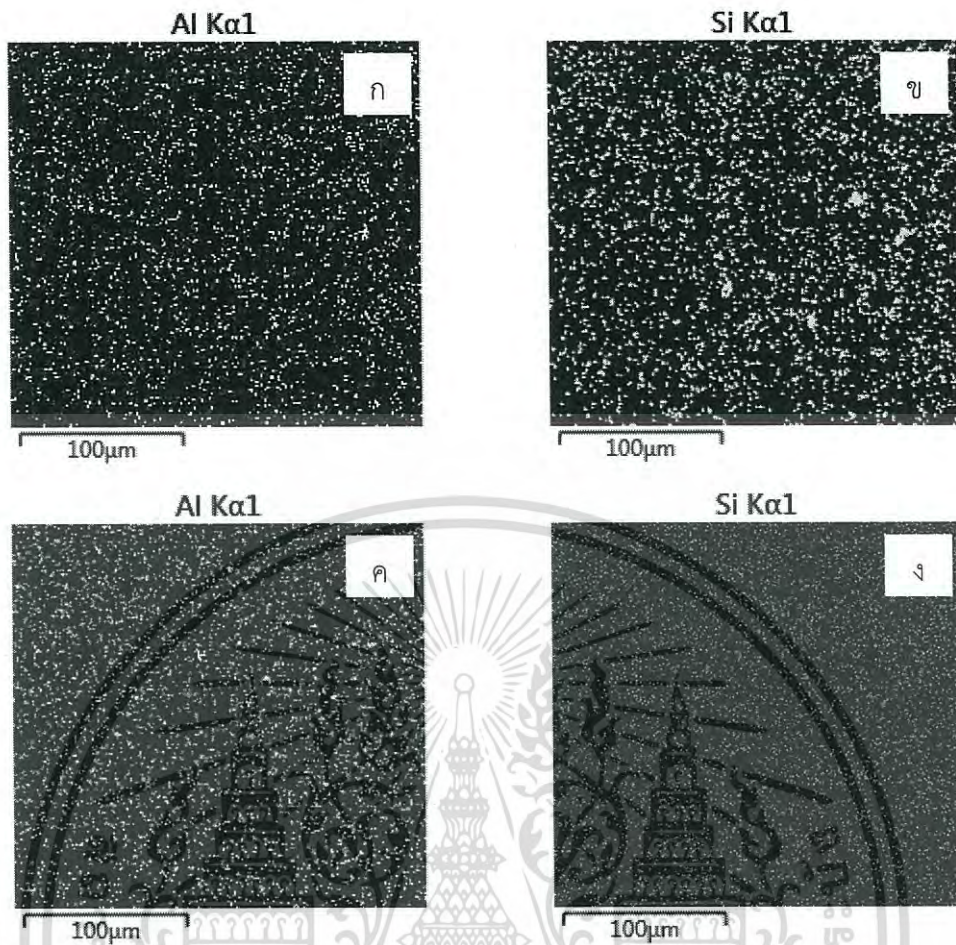
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ภาพตัดขวางของไฮโดรเจล



รูปที่ ก 1 ภาพตัดขวางบริเวณขอบของไฮโดรเจลสูตร M1G40 (ก-ข) และภาพตัดขวางบริเวณกึ่งกลางของไฮโดรเจลสูตร M1G40 (ค-ง)



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางบริเวณขอบของไฮโดรเจลสูตร M2G40 (ก-ข) และภาพตัดขวางบริเวณกึ่งกลางของไฮโดรเจลสูตร M2G40 (ค-ง)

ภาคผนวก ข

ค่าความแข็งแรงดึงของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ข 1 ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังของไฮโดรเจลที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 1 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M1G20	M1G25	M1G30	M1G35	M1G40
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง (kPa)	43.0±8.2	41.9±3.7	91.0±16.0	141.5±53.1	212.9±33.1
ค่าเฉลี่ยมอดูลัสของยัง (kPa)	111.4±23.5	134.3±37.6	360.8±94.9	439.2±102.4	519.2±100.3

ตารางที่ ข 2 ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังของไฮโดรเจลที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 2 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M2G20	M2G25	M2G30	M2G35	M2G40
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง (kPa)	26.6±5.8	34.7±19.2	75.7±9.1	91.2±24.2	159.3±56.0
ค่าเฉลี่ยมอดูลัสของยัง (kPa)	98.5±13.9	138.7±40.9	331.7±60.2	488.8±115.6	591.3±193.5

ตารางที่ ข 3 ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดุลัสของยังของไฮโดรเจลที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 3 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M3G20	M3G25	M3G30	M3G35	M3G40
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงดึง (kPa)	43.1±10.8	46.1±17.8	144.8±47.5	197.9±47.2	314.5±39.9
ค่าเฉลี่ยมอดุลัสของยัง (kPa)	236.8±48.0	224.4±53.8	701.3±235.9	822.5±122.0	883.0±140.5



ภาคผนวก ค

ค่าความแข็งแรงกดอัดของไฮโดรเจลสูตรต่าง ๆ

ตารางที่ ค 1 ค่าความแข็งแรงกดอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของไฮโดรเจลที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 1 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M1G20	M1G25	M1G30	M1G35	M1G40
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกดอัด (kPa)	39.5±3.5	35.1±4.5	37.5±8.9	223.2±29.0	203.0±68.7
ค่าเฉลี่ยมอดุลัสยืดหยุ่น (kPa)	162.7±20.0	182.5±40.2	209.6±70.2	1209.0±158.3	1083.9±25.3

ตารางที่ ค 2 ค่าความแข็งแรงกดอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของไฮโดรเจลที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 2 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M2G20	M2G25	M2G30	M2G35	M2G40
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกดอัด (kPa)	30.8±5.1	37.8±3.4	51.3±8.4	64.5±5.5	346.2±106.2
ค่าเฉลี่ยมอดุลัสยืดหยุ่น (kPa)	108.7±25.3	180.9±9.0	363.9±121.9	433.2±31.0	1988.7±499.9

ตารางที่ ค 3 ค่าความแข็งแรงกดอัดและมอดุลัสยืดหยุ่นของไฮโดรเจลที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 3 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M3G20	M3G25	M3G30	M3G35	M3G40
ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงกดอัด (kPa)	43.6±7.1	59.2±7.5	101.2±27.0	111.1±31.2	174.3±52.5
ค่าเฉลี่ยมอดุลัสยืดหยุ่น (kPa)	188.5±88.8	359.5±37.7	605.9±164.9	587.2±204.7	1134.6±348.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ปริมาณน้ำในไฮโดรเจล

ตารางที่ ง 1 ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำในไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 1 %w/v

สูตร	M1G20	M1G25	M1G30	M1G35	M1G40
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์น้ำในไฮโดรเจล	58.2±0.4	52.9±1.1	50.5±0.8	45.7±2.6	45.0±0.6

ตารางที่ ง 2 ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำในไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 2 %w/v

สูตร	M2G20	M2G25	M2G30	M2G35	M2G40
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์น้ำในไฮโดรเจล	57.2±1.4	55.1±1.8	52.1±1.5	48.3±0.5	40.3±0.78

ตารางที่ ง 3 ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำในไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 3 %w/v

สูตร	M3G20	M3G25	M3G30	M3G35	M3G40
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์น้ำในไฮโดรเจล	49.0±1.7	46.7±1.3	44.9±1.5	46.1±0.8	43.4±1.9

ภาคผนวก จ

ปริมาณของแข็งในไฮโดรเจล

ตารางที่ จ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งของแข็งในไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 1 %w/v

สูตร	M1G20	M1G25	M1G30	M1G35	M1G40
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของแข็งของแข็ง	41.8±0.3	47.1±1.1	49.5±0.8	54.4±2.6	55.0±0.6

ตารางที่ จ 2 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งของแข็งในไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 2 %w/v

สูตร	M2G20	M2G25	M2G30	M2G35	M2G40
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของแข็งของแข็ง	42.9±1.4	44.9±1.8	48.0±1.5	51.8±0.5	59.9±0.8

ตารางที่ จ 3 ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งของแข็งในไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 3 %w/v

สูตร	M3G20	M3G25	M3G30	M3G35	MG40
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของแข็งของแข็ง	51.1±1.6	53.3±1.3	55.3±1.5	54.1±0.8	56.8±2.0

ภาคผนวก ฉ

ความแข็งพื้นผิวไฮโดรเจล

ตารางที่ ฉ 1 ค่าเฉลี่ยความแข็งพื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 1 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M1G30	M1G35	M1G40
ค่าเฉลี่ย ความแข็งพื้นผิว	34.2±1.1	34.3±0.9	36.7±0.7

ตารางที่ ฉ 2 ค่าเฉลี่ยความแข็งพื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 2 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M2G30	M2G35	M2G40
ค่าเฉลี่ย ความแข็งพื้นผิว	26.4±0.8	26.9±0.8	36.8±0.7

ตารางที่ ฉ 3 ค่าเฉลี่ยความแข็งพื้นผิวของไฮโดรเจลสูตรที่มีปริมาณมอนต์มอริลโลไนต์ 3 %w/v

สูตรไฮโดรเจล	M3G30	M3G35	M3G40
ค่าเฉลี่ย ความแข็งพื้นผิว	29.0±0.3	39.5±0.5	41.7±0.4



งานทะเบียนคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คำรับรองเล่มโครงการพิเศษ

วันที่ 18 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

ข้าพเจ้า	นางสาวกรรระวี	ศรีสุมา	รหัสนักศึกษา 57050372
	นางสาวธนัชชา	จารุพัฒน์เดช	รหัสนักศึกษา 57050420
	นางสาวรวิษฐา	ศรีทอง	รหัสนักศึกษา 57050494

นักศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม ภาควิชา เคมี

ขอรับรองว่าโครงการพิเศษ เรื่อง

ชื่อภาษาไทย การศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์/เจลาติน/มอนตมอริลโลไนต์
ชื่อภาษาอังกฤษ Study on Mechanical properties of Hydrogel from Poly(vinyl alcohol)/Gelatin/
Montmorillonite
ปีการศึกษา 2560

เป็นผลงานวิจัยที่ได้คัดลอกหรือละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่นและได้ผ่านการตรวจสอบความซ้ำซ้อนเรียบร้อยแล้ว และได้
แนบเอกสารการตรวจสอบการลอกเลียนงานวรรณกรรมที่ตรวจสอบจากเล่มโครงการพิเศษฉบับสมบูรณ์แล้ว

โปรแกรมอักขราวิสุทธิ์ 0.88 %

ลงชื่อ กรรระวี ศรีสุมา ลงชื่อ ธนัชชา จารุพัฒน์เดช ลงชื่อ รวิษฐา ศรีทอง
(นางสาวกรรระวี ศรีสุมา) (นางสาวธนัชชา จารุพัฒน์เดช) (นางสาวรวิษฐา ศรีทอง)
นักศึกษา นักศึกษา นักศึกษา

ข้าพเจ้า ผศ.ดร. ภัทรารุ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ได้ตรวจสอบโครงการพิเศษของนักศึกษา
ข้างต้นแล้ว ขอรับรองว่าเป็นผลงานวิจัยของนักศึกษาจริงและมีเนื้อหาสมบูรณ์ จึงลงชื่อไว้เป็นหลักฐาน

ลงชื่อ ภัทรารุ มนต์วิเศษ
(ผศ.ดร.ภัทรารุ มนต์วิเศษ)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้