


สมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและแซนแทนกัม
เชื่อมโยงด้วยประจุ Ca^{2+} และ Fe^{3+}

WATER RESISTANCE PROPERTIES OF HYDROGEL FILMS FROM
ALGINATE AND XANTHAN GUM CROSSLINKED BY Ca^{2+} and Fe^{3+}



นางสาวธัญนิชา วิมลสุตร์
นางสาวพรชนก ชัยเลิศ
นางสาวเพลินตา วีริยะ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

สมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและแซนแทนกัม
เชื่อมโยงด้วยประจุ Ca^{2+} และ Fe^{3+}

WATER RESISTANCE PROPERTIES OF HYDROGEL FILMS FROM
ALGINATE AND XANTHAN GUM CROSSLINKED BY Ca^{2+} and Fe^{3+}



นางสาวณัฐนิชา วิมลสูตร
นางสาวพรชนก ชัยเลิศ
นางสาวเพลินตา วิริยะ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

WATER RESISTANCE PROPERTIES OF HYDROGEL FILMS FROM
ALGINATE AND XANTHAN GUM CROSSLINKED BY Ca^{2+} and Fe^{3+}

MISS NUTNICHA

VIMOLSUTR

MISS PORNCHANOK

CHAILERT

MISS PLERNTA

WIRIYA



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณี KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2014

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและแซนแทนกัม
เชื่อมโยงด้วยประจุ Ca^{2+} และ Fe^{3+}

Water Resistance Properties of Hydrogel Films from Alginate
and Xanthan Gum Crosslinked by Ca^{2+} and Fe^{3+}

นักศึกษา นางสาวณัฐนิชา วิมลสูตร รหัสนักศึกษา 54050170
นางสาวพรชนก ชัยเลิศ รหัสนักศึกษา 54050223
นางสาวเพลินตา วิริยะ รหัสนักศึกษา 54050235

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)

ภาควิชา เคมี

ปีการศึกษา 2557

อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภัทราวุธ มนต์วิเศษ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(เคมีอุตสาหกรรม) ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญารากร ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งให้สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและแซนแทนกัม เชื่อมโยงด้วยประจุ Ca^{2+} และ Fe^{3+}
นักศึกษา	นางสาวณัฐนิชา วิมลสูตร รหัสนักศึกษา 54050170 นางสาวพรชนก ชัยเลิศ รหัสนักศึกษา 54050223 นางสาวเพลินตา วิริยะ รหัสนักศึกษา 54050235
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรม)
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจิเนต (Alginate, A) และแซนแทนกัม (Xanthan gum, X) โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง A : X เท่ากับ 100:0, 95:5 และ 90:10 โดยน้ำหนักที่มีการเชื่อมโยงทางประจุด้วยโลหะไอออน โดยมีการเชื่อมโยง 2 ระบบ คือ 1.) การเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวขณะขึ้นรูปด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 10, 15 และ 20 มิลลิลิตร และความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ 2.) นำฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วมาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ผลการศึกษาพฤติกรรมบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายบัฟเฟอร์ (pH 1.2, 4, 7 และ 9.6) ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) พบว่าที่สภาวะสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ฟิล์มไฮโดรเจล มีค่าการบวมตัวต่ำสุดและมีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือสูงสุด โดยเสถียรภาพของฟิล์มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนของ A:X สูงและเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นสูง ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลทั้งที่ไม่มีการเชื่อมโยงและมีการเชื่อมโยง ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% มีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสของยังสูง แต่มีค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดต่ำเมื่อเทียบกับฟิล์มไฮโดรเจลในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% ในกรณีของฟิล์มสูตรเชื่อมโยง 2 ชั้นตอนในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% พบว่าการใช้สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ทำให้ฟิล์มไฮโดรเจลมีความแข็งแรงมากที่สุด และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ทำให้ฟิล์มไฮโดรเจลสามารถดึงยืดได้มากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งที่มาของเอกสารฉบับนี้ก่อนการนำเอกสารฉบับนี้ไปใช้

คำสำคัญ : การบวมตัว แคลเซียมคลอไรด์ แซนแทนกัม เฟอร์ริกซัลเฟต อัลจิเนต ไฮโดรเจล

Special Project Title	Water resistance properties of hydrogel films from alginate and xanthan gum crosslinked by Ca^{2+} and Fe^{3+}		
Students	Miss Nutnicha	Vimolsutr	Student ID 54050170
	Miss Pornchanok	Chailert	Student ID 54050223
	Miss Plernta	Wiriya	Student ID 54050235
Degree	Bachelor of Science (Industrial Chemistry)		
Department	Chemistry		
Academic Year	2014		
Advisor	Asst.Prof.Dr.Pathavuth Monvisade		

ABSTRACT

This research studied the preparation of hydrogel films from alginate and xanthan gum crosslinked by ionic crosslinking (i.e. Ca^{2+} and Fe^{3+}). The weight ratios of alginate to xanthan gum were varied at 100:0, 95:5, and 90:10. Two methods of crosslinking were applied during film forming. Firstly, the films were prepared by using calcium chloride solutions of 0.01 M (20 mL), 0.02 M (10, 15 and 20 mL) and 0.03 M (10 mL). For another method, Ca^{2+} -crosslinked films were immersed into ferric sulfate solution (0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 and 0.5 M). Swelling behaviors of the hydrogel films in distilled water and buffer solution (pH 1.2, 4, 7, and 9.6) at room temperature (25 ± 2 °C) were investigated. The results showed that the hydrogel films in buffer solution pH 1.2 exhibited the lowest swelling ratio and the highest percentages of solid remains meaning the stability of the hydrogel films. From the results, it can be suggested that the stability of hydrogel films increased with increasing A:X ratio and ferric sulfate concentration. The mechanical properties of the hydrogel films were also measured. Tensile strength values and Young's moduli of non-crosslinked and crosslinked films at 0%RH were relatively high, while the values of elongation at break were relatively low in comparison with the films at 80%RH. For two-steps crosslinked films at 80%RH, the highest value of tensile strength was obtained by using 0.25 M ferric sulfate meanwhile the highest value of elongation at break was obtained by using 0.02 M ferric sulfate.

Keywords : Swelling, Calcium chloride, Xanthan gum, Ferric sulfate, Alginate, Hydrogel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายกเว้นในกรณีที่มีผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินตและแซนแทนกัม
เชื่อมโยงด้วยประจุ Ca^{2+} และ Fe^{3+} จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้หากขาดผู้สนับสนุนในการดำเนินโครงการ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการ
พิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ช่วยแนะนำ
แก้ไข พร้อมทั้งให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานนี้ ทำให้การจัดทำโครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้ศึกษารู้อีกซึ่งเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ ผศ.ดร.ชลลดา ถตวิรุฬห์ และ
รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษเล่มนี้ให้มี
ความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาเคมีทุกท่านที่เอื้อเฟื้อความสะดวกใน
เรื่องอุปกรณ์และสารเคมีตลอดจนเครื่องมือต่างๆ ในการวิเคราะห์และทดสอบชิ้นงานตลอดการ
ดำเนินงานโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา รุ่นพี่ และเพื่อนๆ ภาควิชาเคมี สาขาเคมีอุตสาหกรรม
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับความช่วยเหลือ
คำแนะนำ และกำลังใจจนการดำเนินโครงการพิเศษเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ประโยชน์และความรู้อันพึงมีจากโครงการพิเศษเล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา
ครอบครัว ผู้มีพระคุณ และคณาจารย์ทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับ และ
ขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวณัฐนิชา วิมลสุตร์

นางสาวพรชนก ชัยเลิศ

นางสาวเพลินตา วิริยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำย่อและสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)	4
2.1.1 สมบัติของไฮโดรเจล	4
2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล	5
2.1.3 ประเภทของไฮโดรเจล	7
2.1.3.1 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์	7
2.1.3.2 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้	9
2.1.3.3 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง	10
2.1.3.4 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามขนาดรูพรุน	11
2.1.4 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล	11
2.1.5 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจล	13
2.2 กัมธรรมชาติ (Natural gums)	14
2.2.1 กัมธรรมชาติแบ่งตามแหล่งที่มา	14
2.2.1.1 กัมจากสาหร่ายทะเล	14
-อะการ์ (Agar)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
-คาราจีแนนท์ (Carragenan)	16
-อัลจิเนต (Alginate)	18
2.2.1.2 กัมจากส่วนต่างๆ ของพืช	20
-กัมอะราบิก (Gum arabic)	20
-กัมคารายา (Gum karaya)	21
-กัวร์กัม (Guar gum)	22
-โลคัสบีมีกัม (Locust bean gum)	23
2.2.1.3 กัมจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก	24
-แซนแทนกัม (Xanthan gum)	24
2.3 ระบบเชื่อมโยง	25
2.3.1 การเชื่อมโยงด้วยประจุ	25
2.3.1.1 การเชื่อมโยงประจุแบบโมโนวาเลนต์	25
2.3.1.2 การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์	26
2.3.1.3 การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์	27
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	31
3.1 สารเคมี	31
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	31
3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย	32
3.3.1 การเตรียมสารละลายอัลจิเนต ความเข้มข้น 1%	32
3.3.2 การเตรียมสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้น 1%	32
3.3.3 การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	32
3.3.4 การเตรียมสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต	32
3.3.5 การเตรียมสารละลาย Simulated gastric fluid (pH 1.2)	32
3.3.6 การเตรียมสารละลายโซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ (pH 4)	32
3.3.7 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7)	33
3.3.8 การเตรียมสารละลายคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ (pH 9.6)	33
3.4 การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงขั้นตอนเดียว	33
3.4.1 ทดสอบพฤติกรรมกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 ทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต	35
3.5 การเชื่อมโยงฟิล์มไฮโดรเจลแบบจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต	35
3.6 การทดสอบ	36
3.6.1 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่นและสารละลายต่างๆ	36
3.6.2 การทดสอบหาปริมาณของแข็งคงเหลือ	36
3.6.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	39
4.1 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยง ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	41
4.2 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงชั้นตอนเดียว	41
4.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น	41
4.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต	44
4.3 การทดสอบ	47
4.3.1 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	47
4.3.2 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	51
4.3.3 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	54
4.3.4 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	56
4.3.5 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	58
4.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลการวิจัย	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	67
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจล AX ที่ยังไม่มีสารเชื่อมโยง ในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	73
ภาคผนวก ข พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	77
ภาคผนวก ค พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ที่ความเข้มข้น และปริมาตรสารเชื่อมโยงที่ต่างกัน	80
ภาคผนวก ง พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	83
ภาคผนวก จ พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	87
ภาคผนวก ฉ พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	91
ภาคผนวก ช พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)	95
ภาคผนวก ซ ค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มสูตรต่างๆ	97
ภาคผนวก ฌ สมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 องค์ประกอบของฟิล์มไฮโดรเจลระหว่างสารละลายอัลจินต (A) และสารละลายแซนแทนกัม (X) ที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์	34
4.1 สูตรฟิล์มไฮโดรเจลที่ใช้ในการศึกษา	39
4.2 เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง (25±2 องศาเซลเซียส)	50
4.3 เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่อุณหภูมิห้อง (25±2 องศาเซลเซียส)	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล	5
2.2 อันตรกิริยาของโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล	6
2.3 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย	7
2.4 ไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ	7
2.5 ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว	8
2.6 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก	8
2.7 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์	9
2.8 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์	10
2.9 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ	10
2.10 โครงสร้างทางเคมีของตัวเชื่อมโยงสายโซ่ (ก) N,N'-methylene-bis-acrylamide, NMBA และ (ข) ethyleneglycol dimethacrylate, EGDM	12
2.11 โครงสร้างของอะการ์	15
2.12 กลไกการเกิดเจลของอะการ์	16
2.13 หน่วยซ้ำของคาร์ราจีแนน (ก) Kappa Carrageenan, (ข) Iota Carrageenan และ (ค) Lambda Carrageenan	16
2.14 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน	18
2.15 โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) ชนิดต่างๆ	19
2.16 การเกิดเจลของ Calcium alginate (Egg-box model)	19
2.17 โครงสร้างโมเลกุลของกัมอะราบิก	21
2.18 โครงสร้างของกัวร์กัม	23
2.19 โครงสร้าง Locust bean gum	23
2.20 โครงสร้างโมเลกุลของแซนแทนกัม	24
2.21 สูตรโครงสร้างซิลเวอร์ไนเทรต	26
2.22 การแลกเปลี่ยนไอออนของพอลิเอมิกแอซิดกับโลหะไอออน	26
2.23 แบบจำลองการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างระหว่างแซนแทนกัม และ Divalent cation	26
2.24 สูตรโครงสร้างเฟอร์ริกซัลเฟต	27
3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ; (ก) CaCl_2 0.01 M ปริมาตร 20 mL (ข) CaCl_2 0.02 M ปริมาตร 10 mL (ค) CaCl_2 0.02 M ปริมาตร 15 mL (ง) CaCl_2 0.02 M ปริมาตร 20 mL และ (จ) CaCl_2 0.03 M ปริมาตร 10 mL	42
4.2 การเชื่อมโยงโครงสร้างของอัลจินตและแซนแทนกัมด้วยโลหะไอออน (Ca^{2+})	43
4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ; (ก) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.01 M (ข) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.02 M (ค) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.05 M (ง) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.1 M (จ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.25 M (ฉ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.5 M	45
4.4 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น เปรียบเทียบการเชื่อมโยงใน สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.01 M (ข) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.02 M (ค) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.05 M (ง) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.1 M (จ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.5 M	48
4.5 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 เปรียบเทียบ การเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.01 M (ข) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.02 M (ค) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.05 M (ง) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.1 M (จ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.5 M	51
4.6 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 เปรียบเทียบ การเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.01 M (ข) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.02 M (ค) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.05 M (ง) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.1 M (จ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.5 M	54
4.7 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 เปรียบเทียบ การเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.01 M (ข) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.02 M (ค) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.05 M (ง) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.1 M (จ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.5 M	56
4.8 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 เปรียบเทียบ การเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.01 M (ข) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.02 M (ค) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.05 M (ง) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.1 M (จ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.5 M	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) ของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่ไม่เชื่อมโยงและ Ca220 ; (ก) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ (ข) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%	60
4.10 ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่ไม่เชื่อมโยงและ Ca220 ; (ก) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ (ข) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%	61
4.11 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation) ของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่ไม่เชื่อมโยงและ Ca220 ; (ก) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ (ข) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%	61
4.12 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองชั้นตอน ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%	63
4.13 ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองชั้นตอน ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%	64
4.14 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองชั้นตอน ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

A	อัลจินต
AX	อัลจินต-แซนแทนกัม
Ca, CaCl ₂	แคลเซียมคลอไรด์
Ca ²⁺	แคลเซียมไอออน
EWC	ปริมาตรน้ำสมดุล
Fe, Fe ₂ (SO ₄) ₃	เฟอร์ริกซัลเฟต
Fe ³⁺	เฟอร์ริกไอออน
IPN	ไฮโดรเจลแบบอินเทอร์เพเนเตรตติงพอลิเมอร์ เน็ตเวิร์ก
R	น้ำหนักของฟิล์มไฮโดรเจลที่อบหลังแช่
r	น้ำหนักของฟิล์มไฮโดรเจลเริ่มต้น
SR	สัดส่วนของการบวมตัว
w	น้ำหนักของฟิล์มที่บวมตัว
WC	ร้อยละของปริมาตรน้ำที่อยู่ในไฮโดรเจล
w _o	น้ำหนักฟิล์มที่แห้ง
X	แซนแทนกัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ไฮโดรเจล (Hydrogels) เป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย (Network) เมื่ออยู่ในน้ำจะเกิดการบวมตัวโดยยัดน้ำเอาไว้ในโครงสร้าง ซึ่งความสามารถในการดูดซับน้ำหรือการบวมตัวของไฮโดรเจล เกิดจากการมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น $-OH$, $-COOH$, $-NH_2$, $-CONH_2$, $-CONH-$ และ $-SO_3H$ เป็นต้น [1] รวมถึงปริมาตรอิสระในสายโซ่โมเลกุล ปัจจุบันไฮโดรเจลถูกนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ มากมาย เช่น ใช้ดูดซับของเสียจากการขับถ่ายของร่างกาย ทางเภสัชกรรมใช้ในการเคลือบเมล็ดพันธุ์ เคลือบปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ทางการแพทย์ใช้เป็นตัวนำพา ยา ใช้เป็นวัสดุปิดแผล [2] เนื่องจากไฮโดรเจลมีความชุ่มชื้นสูงสามารถเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ จึงช่วยดูดซับน้ำเหลืองและของเหลวที่ไหลออกมาจากแผลได้ดี ในขณะที่ตัวกันออกซิเจนสามารถผ่านรูพรุนของเจลได้ ทำให้ร่างกายสามารถสร้างเนื้อเยื่อได้ดีกว่าปกติ นอกจากนี้ นักวิทยาศาสตร์ยังสนใจไฮโดรเจลในแง่ของการเป็นวัสดุนำส่งยา (Drug delivery system) เพราะมีสมบัติในการดูดซับของเหลวที่ดีจึงน่าจะดูดซับยาเก็บไว้แล้วปลดปล่อยยาออกมาในปริมาณที่ต้องการได้

วัสดุที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลเชิงพาณิชย์ โดยทั่วไปเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer) ที่เป็นสารตั้งต้นมาจากปิโตรเลียม เช่น พอลิเมทาคริลิก พอลิอะคริลิก พอลิอะคริลาไมด์ [3] ซึ่งมีข้อดีคือมีความแข็งแรงสูง แต่ย่อยสลายยากและมีมอนอเมอร์ตกค้างอยู่ในชิ้นงาน จึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ส่วนพอลิเมอร์จากธรรมชาติ (Natural polymer) เช่น โปรตีน เซลลูโลส ไคโตซาน กัม และแป้ง [4] เป็นต้น สามารถนำมาใช้เตรียมวัสดุไฮโดรเจลได้ ซึ่งมีข้อดีคือไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม ทั้งยังสามารถย่อยสลายเองตามธรรมชาติและไม่เป็นพิษเมื่อเกิดการย่อยสลาย อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ธรรมชาติมีสมบัติการละลายน้ำได้ง่ายกว่า พอลิเมอร์สังเคราะห์ จึงมีการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติมาพัฒนาให้มีความต้านทานน้ำที่ดีขึ้น ด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการศึกษา การเชื่อมโยงทางเคมีด้วยพันธะโควาเลนต์ เช่น การศึกษาฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินเตและกัวร์กัมที่เชื่อมโยงด้วยกลูตาโรลดีไฮด์ [5] และโซเดียมเทรโบเรต [6] นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้สารเชื่อมโยงแบบประจุประเภทโลหะไอออน เช่น การศึกษาการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากแซนแทนกัมและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ที่เชื่อมโยงด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต [7] และทำการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินเตและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ อัลจินเต และแซนแทนกัม มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจล เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ไม่เป็นพิษ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม หาได้ง่าย ย่อยสลายได้ง่าย และสามารถละลายหรือบวมตัวในน้ำได้ดี เพราะในโครงสร้างของพอลิ-

เมอร์ดังกล่าวมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ คือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่คาร์บอกซิเลต (-COO⁻) [9] ซึ่งหมู่คาร์บอกซิเลตที่มีอยู่ในโครงสร้างของอัลจินเตและแซนแทนกัมสามารถเชื่อมโยงทางประจุด้วยพันธะไอออนิกได้ ทำให้ฟิล์มไฮโดรเจลต้านทานน้ำมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้จะทำการเชื่อมโยงฟิล์มไฮโดรเจลด้วยประจุ โดยแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ การเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวขณะขึ้นรูปด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และการเชื่อมโยงสองชั้นตอนโดยนำฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วมาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ศึกษาผลของอัตราส่วนอัลจินเตต่อ แซนแทนกัม และผลของระบบเชื่อมโยง รวมถึงความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงที่มีต่อพฤติกรรมการบวมตัว (Swelling behavior) เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ (%Solid remain) และสมบัติเชิงกล (Mechanical properties)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินเตและแซนแทนกัม โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจล เช่น อัตราส่วนของอัลจินเตต่อแซนแทนกัม ความเข้มข้น ปริมาตรของสารเชื่อมโยง และขั้นตอนการเชื่อมโยง

2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวและความสามารถในการต้านทานการละลายน้ำ และสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ (pH = 1.2, 4, 7 และ 9.6) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และการเชื่อมโยงสองชั้นตอนโดยนำฟิล์มที่ทำการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วมาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินเตและแซนแทนกัม โดยศึกษาอัตราส่วนของสารละลายอัลจินเตต่อสารละลายแซนแทนกัม เท่ากับ 100:0, 95:5 และ 90:10 โดยน้ำหนัก

2. เตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินเตและแซนแทนกัม ที่มีการเชื่อมโยงทั้ง 2 ระบบด้วยโลหะไอออน โดยศึกษาผลของความเข้มข้น และปริมาตรของสารเชื่อมโยง รวมถึงขั้นตอนการเชื่อมโยงได้แก่

2.1 การเชื่อมโยงชั้นตอนเดียว ทำในขณะขึ้นรูปฟิล์มด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นและปริมาตร ดังนี้

- สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

- สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 10, 15 และ 20

มิลลิลิตร

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

2.2 การเชื่อมโยงแบบจุ่มโดยนำฟิล์มจากข้อ 2.1 มาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์

3. ศึกษาพฤติกรรมกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น และสารละลายบัฟเฟอร์ (pH 1.2, 4, 7 และ 9.6) ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) เปรียบเทียบของแข็งคงเหลือหลังการบวมตัว 24 ชั่วโมง และสมบัติเชิงกล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลที่มีองค์ประกอบหลักจากอัลจินตและแซนแทนกันัมได้
2. ทราบปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานน้ำ การบวมตัว และสมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล
3. ผลงานวิจัยที่ได้สามารถนำไปพัฒนาและปรับปรุง เพื่อใช้งานในด้านอื่นๆ ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

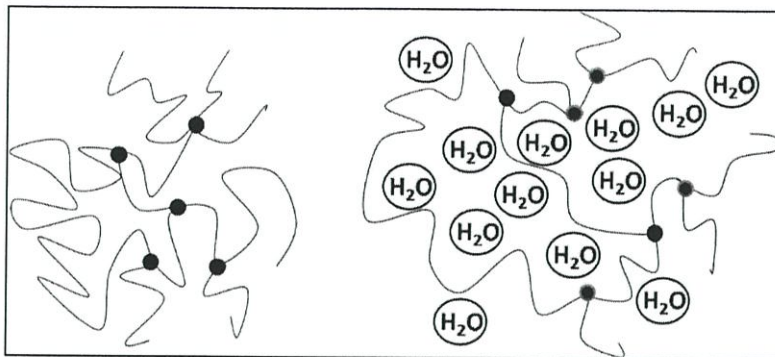
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels) [10]

ไฮโดรเจล (Hydrogels) เป็นพอลิเมอร์ชนิดไฮโดรฟิลิกที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย (Network) ซึ่งสามารถบวมตัวและละลายน้ำได้ บางครั้งพบในลักษณะเจลคอลลอยด์ (Colloidal) ในน้ำ โครงสร้างของไฮโดรเจลประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของน้ำ หรือเรียกว่า ส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) เช่น หมู่ $-OH$, $-COOH$, $-NH_2$, $-CONH_2$, $-CONH-$ และ $-SO_3H$ เป็นต้น และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic group) เช่น หมู่ $-CH_2-$ และ $-CH_3$ เป็นต้น โมเลกุลระหว่างสายโซ่หรือภายในสายโซ่มีการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะโควาเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรือเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ และโมเลกุลมีการเกี่ยวพันกันหรือขดตัวกันอยู่ภายในโครงสร้าง ซึ่งโครงสร้างโดยรวมจะเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กๆ มากมาย เมื่อสัมผัสหรือแช่น้ำทำให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ภายในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network structure) ได้มากกว่า 20% หรืออาจจะหลายเท่าของน้ำหนักไฮโดรเจลพร้อมกับสามารถบวมตัวหรือขยายตัวออกได้ และยังสามารถหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป นอกจากนี้ไฮโดรเจลโดยทั่วไปจะไม่สามารถละลายในตัวทำละลายทุกชนิด

2.1.1 สมบัติของไฮโดรเจล (Properties of hydrogels) [11]

สมบัติเฉพาะของไฮโดรเจล คือ เมื่ออยู่ในน้ำจะสามารถบวมตัวแต่ไม่ละลายในน้ำ และจะยึดน้ำเอาไว้ในโครงสร้างโดยยังคงรักษาสภาพโครงร่างตาข่ายไว้ อีกทั้งยังสามารถเกิดการหดตัวได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไป เนื่องจากไฮโดรเจลประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำ และไม่ชอบน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจลไปแช่น้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแพร่ผ่าน และแทรกเข้าไปอยู่ในบริเวณที่ว่างหรือรูพรุนภายในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลนั้นได้ เนื่องจากแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) ทำให้โมเลกุลน้ำบางส่วนเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์แล้วผลักดันให้สายโซ่เกิดการขยายตัวหรือเกิดการบวมตัวขึ้น ซึ่งเป็นการปรับโครงสร้างของไฮโดรเจลให้เกิดสมดุลใหม่ ไฮโดรเจลเมื่อขยายตัวเต็มที่จะไม่แยกขาดออกจากกัน เนื่องจากภายในประกอบด้วยพอลิเมอร์ที่มีความยาวจำกัดและยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยมีตัวเชื่อมโยงสายโซ่ (Crosslinker) เป็นตัวช่วยยึดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ไว้ การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวแสดงดังรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการบวมตัวของไฮโดรเจล [11]

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวของไฮโดรเจล [11]

ไฮโดรเจลสามารถเกิดการขยายตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ เมื่อโมเลกุลน้ำบางส่วนเกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์ จึงพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการบวมตัวได้ ดังนี้

1. แรงดันออสโมติก เนื่องจากปริมาณน้ำภายในและภายนอกไฮโดรเจลมีไม่เท่ากัน จึงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ดังนั้นน้ำจากภายนอกจึงแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลนั้น ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมาก น้ำก็จะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมากขึ้น
2. แรงกระทำระหว่างโมเลกุลน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสม สามารถเกิดอันตรกิริยากับน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วจะทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวโมเลกุลน้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก
3. ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์มาก น้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มาก
4. ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าสายโซ่มีความยืดหยุ่นที่ดีจะเป็นการลดแรงต้าน (Resistance force) ของการแพร่ของโมเลกุลน้ำเพื่อเข้าสู่สมดุลง่ายขึ้น ทำให้โมเลกุลน้ำแพร่ผ่านเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มาก
5. ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้ามีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงมากจะเปรียบเสมือนกับเป็นการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายตัวของไฮโดรเจล ทำให้ความสามารถในการบวมตัวลดลง โมเลกุลน้ำที่อยู่ภายในไฮโดรเจลมี 2 ลักษณะใหญ่ๆ แสดงดังรูปที่ 2.2 ได้แก่ โมเลกุลน้ำที่ไม่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์เรียกว่า “Free water” สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและระเหยได้ง่าย มีผลต่อสมบัติของไฮโดรเจลไม่มากนัก และโมเลกุลน้ำที่เกิดอันตรกิริยากับสายโซ่พอลิเมอร์เรียกว่า “Bound water” มีการเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยากกว่า และต้องใช้ความร้อนปริมาณหนึ่งในการระเหยโมเลกุลน้ำออก ปริมาณน้ำร้อยละที่เป็น

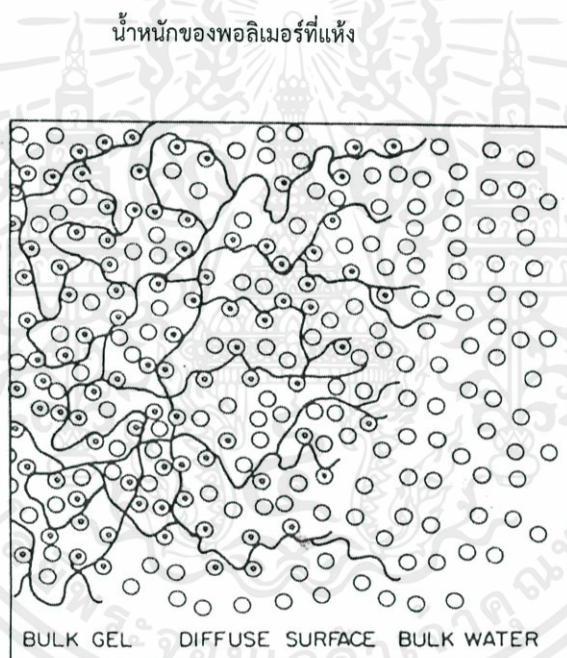
องค์ประกอบอยู่ภายในไฮโดรเจล (Water content, WC) สามารถคำนวณได้จากสมการ (2.1) [11]

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ ปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบ} = \frac{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ}} \times 100 \% \quad (2.1)$$

สำหรับปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในไฮโดรเจลในขณะที่ไฮโดรเจลบวมตัวเต็มที่แล้วเรียกว่า “ปริมาณน้ำสมดุล” (Equilibrium water content, EWC) นอกจากการหาปริมาณน้ำร้อยละที่เป็นองค์ประกอบที่อยู่ในไฮโดรเจลในตัวแปรของ WC ยังมีการศึกษาในตัวแปรสัดส่วนของการบวมตัว (Swelling ratio, SR) ซึ่งเป็นการแสดงน้ำหนักของน้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปเทียบกับพอลิเมอร์ที่แห้งการคำนวณ หา SR แสดงดังสมการ (2.2) [11]

$$\text{สัดส่วนการบวมตัว} = \frac{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ดูดซับน้ำ} - \text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่แห้ง}}{\text{น้ำหนักของพอลิเมอร์ที่แห้ง}} \quad (2.2)$$



-  คือ สายโซ่พอลิเมอร์
-  คือ โมเลกุลอิสระ
-  คือ โมเลกุลน้ำที่เกิดพันธะกับสายโซ่พอลิเมอร์

รูปที่ 2.2 อันตรกิริยาของโมเลกุลของน้ำในโครงสร้างไฮโดรเจล [11]

สมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของไฮโดรเจล คือ การยอมให้มีการแพร่ผ่านของโมเลกุลต่างๆ เช่น น้ำ โปรตีน ยา ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการแพทย์และด้านการเกษตร

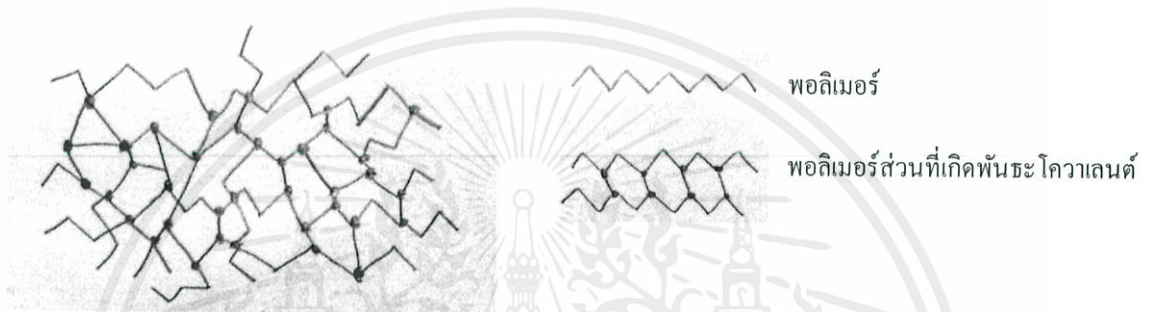
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ประเภทของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

2.1.3.1 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ [11]

1.) ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network) เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสารละลายผสมของมอนอเมอร์ ตัวริเริ่มปฏิกิริยา และตัวเชื่อมโยง (Crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจเติมตัวทำละลายลงไปด้วย จากนั้นเทลงไปในแม่พิมพ์ โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย [9]

2.) ไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ มักนำไปใช้เพื่อเคลือบพื้นผิวของวัสดุต่างๆ ไฮโดรเจลชนิดนี้มีโครงสร้างภายในที่ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ซึ่งส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะช่วยป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวทำละลายต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.4

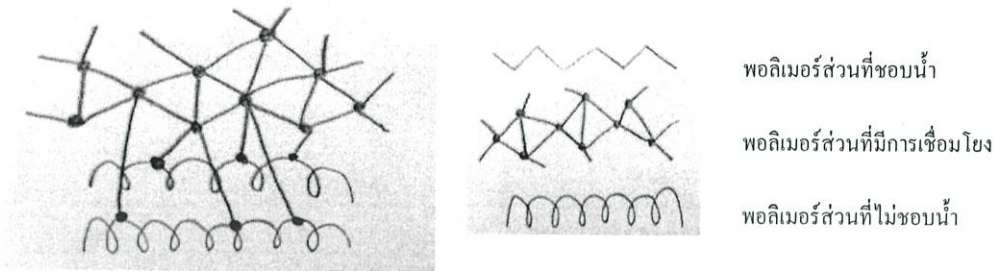


รูปที่ 2.4 ไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ [9]

3.) ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer) เป็นการทำให้ไฮโดรเจลเกิดพันธะบนพอลิเมอร์อื่นที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลให้ตรงกับความต้องการ และเหมาะกับการนำไป

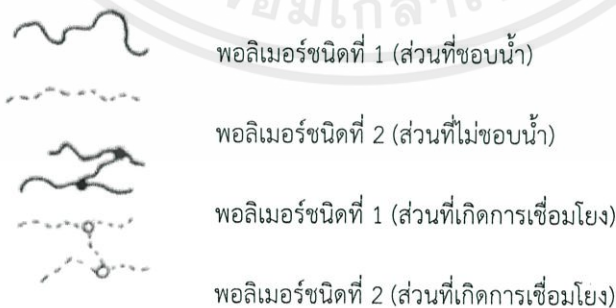
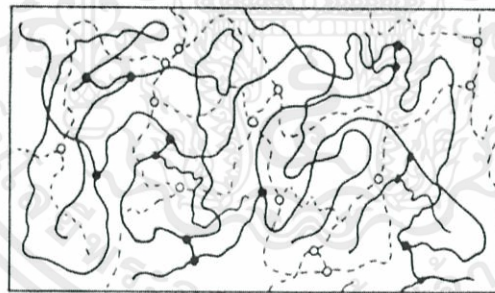
ประยุกต์ใช้งาน เช่น ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นโดยทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่มากกว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดีกว่าหรือการทำให้ไฮโดรเจลที่ละลายน้ำได้กลายเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว [9]

4.) ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating polymer network, IPN) เป็นไฮโดรเจลที่มีโครงร่างตาข่าย 2 ชนิด แทรกกันอยู่และไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ส่งผลให้โครงสร้างโดยรวมมีความแข็งแรงมากขึ้นหรือมีสมบัติอื่นที่ตรงกับความต้องการในการประยุกต์ใช้งานได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจลชนิดที่เป็นแบบกึ่งอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Semi-IPN) คือ ไฮโดรเจลที่มีพอลิเมอร์โครงร่างตาข่ายกับพอลิเมอร์ที่ไม่มีโครงร่างตาข่ายเกี่ยวพันกันอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งทั้งสองเทคนิคเป็นการปรับปรุงสมบัติของไฮโดรเจลอีกทางหนึ่งเพื่อให้ตรงต่อการใช้งานไปประยุกต์ใช้งานในแต่ละแบบ

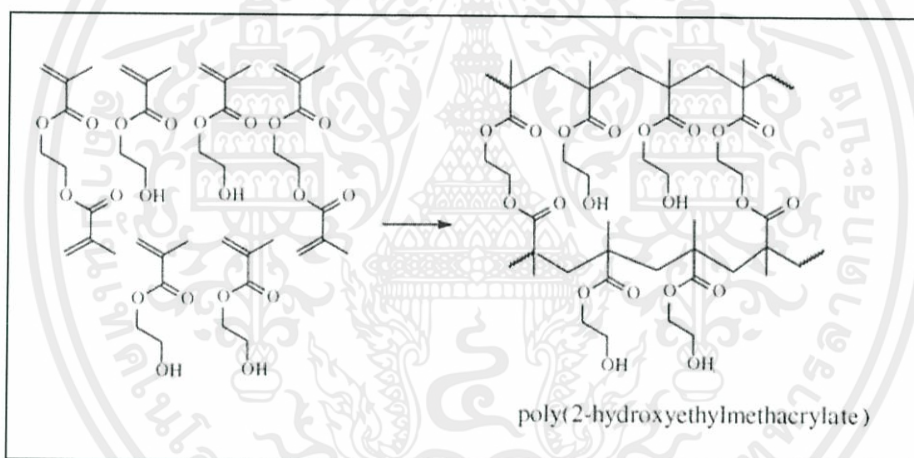


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ **รูปที่ 2.6 ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์เพเนตเรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก [9]** ปรึกษาประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.2 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามสารตั้งต้นที่ใช้ [11]

1.) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์

ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่างมอนอเมอร์ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic monomer) และมอนอเมอร์ร่วมที่มีหลายหมู่ฟังก์ชัน (Polyfunctional comonomer) โครงสร้างร่างแหของไฮโดรเจลเกิดจากการเชื่อมโยงกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันของแต่ละมอนอเมอร์ ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้เช่น พอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต ((2-Hydroxyethyl)methacrylate, HEMA) กับเอทิลีนไกลคอลบิสเมทาคริเลต (Ethylene glycol bismethacrylate, EGDMA) [12] แสดงดังรูปที่ 2.7 ไฮโดรเจลที่ได้นำมาใช้เป็นคอนแทคเลนส์แบบนิ่ม การพอลิเมอไรซ์ของไวนิลมอนอเมอร์ส่วนใหญ่จะใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ เช่น เปอร์ออกไซด์ (Peroxide) หรือสารประกอบเอโซ (Azo compound) เป็นต้น โดยเมื่อมีการให้ความร้อนจะทำให้ตัวริเริ่มแตกตัวให้อนุมูลอิสระ หรืออาจใช้ตัวริเริ่มแบบรีดอกซ์ เช่น Ammonium persulfate คู่กับ N,N-tetramethylethylene diamine (TEMED) [11] รวมถึงการใช้ระบบ Photo



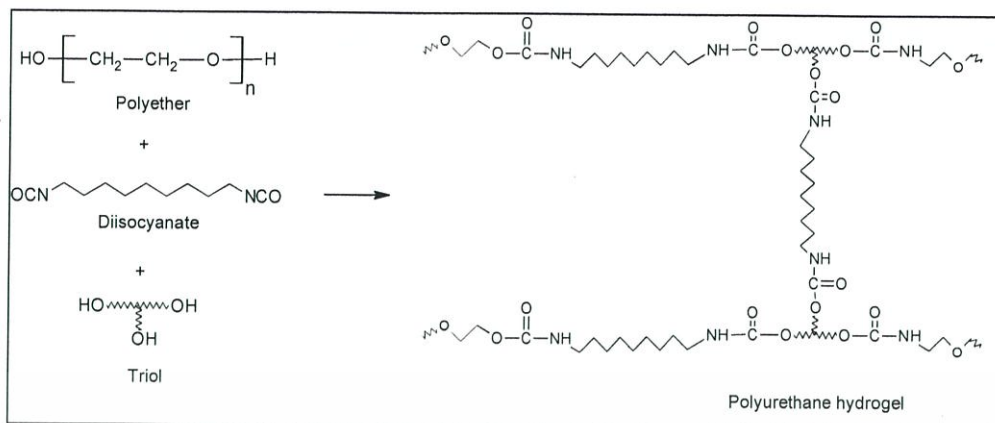
initiator ด้วย

รูปที่ 2.7 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นมอนอเมอร์ [11]

2.) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์

ไฮโดรเจลประเภทนี้เตรียมโดยการเชื่อมโยงพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ และมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ หรือโอลิโกเมอร์ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยง α,ω -hydroxyl poly(ethylene glycol) ด้วย Diisocyanate แสดงดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงแบบไตรออล ไฮโดรเจลที่ได้จัดเป็นพอลิยูรีเทนที่ชอบน้ำ [13-14]

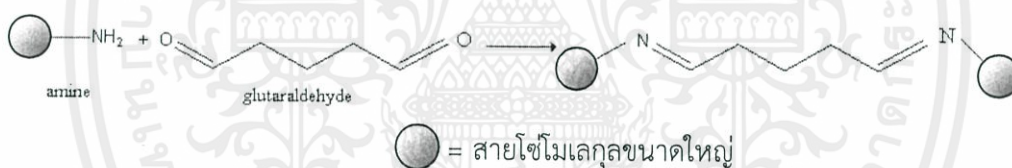
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพรีพอลิเมอร์ [13-14]

3.) ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ

ไฮโดรเจลประเภทนี้เกิดจากการเชื่อมโยงทางเคมีของพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ ตัวอย่างเช่น การเชื่อมโยงโมเลกุลของโปรตีนด้วยฟอร์มัลดีไฮด์หรือกลูตาโรลดีไฮด์ แสดงดังรูปที่ 2.9 นอกจากนี้พอลิเมอร์ยังสามารถเชื่อมโยงได้ด้วยโลหะไอออน ซึ่งใช้ตัวเชื่อมโยงที่มีประจุเป็น 2⁺, 3⁺ เช่น การสังเคราะห์ไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินเตดด้วยตัวเชื่อมโยงที่ให้ Ca²⁺ เป็นต้น [9]



รูปที่ 2.9 ไฮโดรเจลที่ใช้สารตั้งต้นเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ [12]

2.1.3.3 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง

สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้ [15]

1.) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical hydrogel) มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรงมาก โดยในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์ที่เกิดพันธะมักมีหมู่ฟังก์ชันอยู่หลายตำแหน่งที่สามารถเกิดการเชื่อมโยงได้ ไฮโดรเจลที่ได้จะไม่เกิดการบวมการย้อนกลับทางความร้อน คือ ไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก หากให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัวสมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกได้อีกชื่อว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต เนื่องจากไฮโดรเจลชนิดนี้มีความคงทน ไม่หลอมเหลว และไม่ละลายในตัว

เอกสารนี้ทำละลาย เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่มีการเชื่อมโยงด้วยเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต [16] เป็นต้น ไม่ว่าจะวิธีใดก็ตามนี้ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical hydrogel) มีการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะไฮโดรเจน หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจลชนิดนี้เกิดการผันกลับทางความร้อนได้ จึงเรียกได้อีกชื่อว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมได้เมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง ซึ่งการให้ความร้อนไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิดทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย รวมทั้งการผสมสารอื่นลงในไฮโดรเจล เช่น สารต้านจุลินทรีย์ และยา เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลชนิดนี้ เช่น พอลิ(อะคริลาไมด์-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน) (Poly(acrylamine-co-methylmetacrylate-co-vinylamine)) [17] เป็นต้น

2.1.3.4 ประเภทของไฮโดรเจลแบ่งตามขนาดรูพรุน

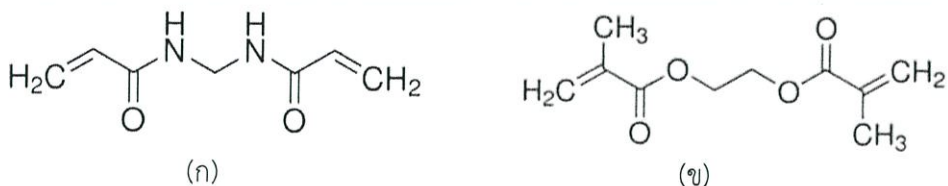
1.) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดี โดยที่มอนอเมอร์ พอลิเมอร์ และสารเชื่อมโยง สามารถละลายในตัวทำละลายได้ไฮโดรเจลที่ได้มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจจะเรียกว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous hydrogel) เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA:H₂O เท่ากับ 2:1 [16] เป็นต้น

2.) ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous hydrogel) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดนี้ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะไม่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับการพอลิเมอไรซ์ แต่จะตกตะกอนแยกออกมา ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีสีขาวขุ่น เรียกได้ว่าเป็นไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel) เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน HEMA:H₂O เท่ากับ 1.25:1 [16] เป็นต้น

2.1.4 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล

มอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลจะต้องมีหมู่ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic group) อยู่ในโครงสร้าง เช่น -OH, -NH₂, -COOH และ -SO₃H เป็นต้น เพื่อที่จะทำให้ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถดูดซับน้ำได้ ตัวอย่างมอนอเมอร์ที่มีการนำไปสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจล เช่น 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต อะคริลาไมด์ และ AMPS เป็นต้น ในส่วนของตัวเชื่อมโยงสายโซ่จะต้องมีพันธะคู่ (C=C bond) อย่างน้อยสองตำแหน่งอยู่ในโครงสร้างเพื่อให้โครงสร้างของไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์เทอร์โมเซต (Thermoset polymer) ซึ่งมีสมบัติที่สามารถดูดซับและบวมตัวได้ในน้ำ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายทุกชนิด ตัวอย่างตัวเชื่อมโยงสายโซ่ที่นิยมใช้ เช่น NMBA และ EGDM เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของตัวเชื่อมโอยงสายโซ่ (ก) N,N'-methylene-bis-acrylamide, NMBA และ (ข) ethyleneglycol dimethacrylate, EGDM

การสังเคราะห์ไฮโดรเจลส่วนใหญ่จะเกิดผ่านปฏิกิริยาฟรีเรดิคอลลพอลิเมอไรเซชันในสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมี 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนเริ่มต้น (Initiation) ขั้นแผ่ขยาย (Propagation) และขั้นสิ้นสุด (Termination) ซึ่งก่อนที่จะเกิดขั้นเริ่มต้นจะต้องมีตัวริเริ่มเป็นตัวช่วยให้เกิดขั้นเริ่มต้น การเกิดฟรีเรดิคอลลในปฏิกิริยาเคมีอินทรีย์ส่วนใหญ่ก่อนที่จะเกิดผลิตภัณฑ์มักจะเกิดผ่านตัวกลางก่อน ซึ่งตัวกลางนี้จะมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่เรียกว่า ฟรีเรดิคอลล (Free radical) การทำให้เกิดฟรีเรดิคอลลมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal initiation) ของสารอินทรีย์ เปอร์ออกไซด์ หรือไฮโดรเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตัวริเริ่มที่ใช้ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันน้อยมากเพียง 0.1-1.0% ของน้ำหนักมอนอเมอร์ตัวริเริ่มที่ใช้กันทั่วไปมีดังนี้ เช่น เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide) 2,2-เอโซบิสไอโซบิวโรไนล์ (Azobisisobutyronitrile, AIBN) และเปอร์ซัลเฟต (Persulphates) เป็นต้นสารประกอบเอโซ (Azo compound) สามารถทำให้สลายตัวได้ด้วยความร้อน และแสง (Photoinitiation) ตัวอย่างตัวริเริ่มที่สามารถแตกตัวได้โดยวิธีนี้คือ AIBN เป็นต้น และสามารถเกิด ฟรีเรดิคอลลได้จากปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox initiation) โดยตัวริเริ่มที่ใช้เป็นพวกเกลือของเหล็ก และโลหะอื่นๆ ซึ่งกรณีนี้เรียกว่า Accelerator ใส่ลงไปร่วมกับตัวริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ และให้ฟรีเรดิคอลลไปทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์แล้วได้พอลิเมอร์ ลักษณะพิเศษของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นนี้คือ จะมีพลังงานกระตุ้นต่ำมาก เพราะฉะนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นโดยรีดอกซ์สามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำๆ และวิธีสุดท้ายจะอาศัยพลังงานจากรังสีอิเล็กตรอน (Electroinitiation) ซึ่งมีลักษณะที่แตกต่างออกไปจากการริเริ่มที่ได้อธิบายผ่านมา กล่าวคือในวิธีนี้จะไม่มีการใช้ตัวริเริ่มและตัวเชื่อมโอยงสายโซ่ ซึ่งการเกิดพอลิเมอไรเซชันและการเชื่อมโอยงระหว่างสายโซ่จะเกิดขึ้นจากการแตกตัวของพันธะคู่ (C=C bond) ในมอนอเมอร์เป็นเรดิคอลลโดยอาศัยพลังงานจากรังสีอิเล็กตรอน

กลไกของการเกิดเจลสามารถแบ่งออกได้ 5 ขั้นตอนดังนี้ Initiation, Microgel formation, Cluster formation, Macrogelation และ Post-gelation ตามลำดับ เมื่อระบบประกอบด้วยสารละลายมอนอเมอร์ จากขั้นเริ่มต้น (Initiation) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อใหตัวริเริ่มแตกตัวได้ฟรีเรดิคอลล โดยฟรีเรดิคอลลที่ได้จากข้างต้นจะทำอันตรกิริยากับมอนอเมอร์และ/หรือตัวเชื่อมโอยงสายโซ่เกิดเป็น Monomeric radicals จากนั้น Monomeric radicals ดังกล่าวจะเกิดการเชื่อมโอยงกันเป็น 2 ลักษณะ คือ การเชื่อมโอยงกันเองภายใน Monomeric radical ซึ่งนำไปสู่การ

รวมตัวกลายเป็นกลุ่มก้อน (Intramolecular crosslink) หรือเกิดการเชื่อมโยงกันระหว่าง Monomeric radical กลายเป็นโครงร่างตาข่าย (Intermolecular crosslink) ซึ่งการเกิดทั้งสองลักษณะข้างต้นจะนำไปสู่การเกิด Microgel การดำเนินไปของปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้มีสัดส่วนประมาณ 20% จากนั้นปฏิกิริยาดำเนินต่อไปสู่ขั้นตอนที่ 3 (Cluster formation) ซึ่งอยู่ในช่วง 40-80% ของการดำเนินไปของปฏิกิริยา กล่าวคือเป็นขั้นตอนที่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจาก Microgel ก้อนอื่น หรือจากมอนอเมอร์และตัวเชื่อมโยงสายโซ่ที่ยังไม่เกิดการเชื่อมโยงสารละลายภายในระบบของขั้นตอนนี้จะเกิดความหนืดเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเริ่มเข้าใกล้จุดของการเกิดเจล (Gel point) เมื่อเข้าสู่ขั้นตอนที่เกิดเจลหรือขั้นตอนที่ 4 (Macrogelation) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเจลก้อนเล็กๆ (Microgel) กลายเป็นกลุ่มก้อนที่ใหญ่ขึ้น (Macrogel) จากนั้นปฏิกิริยาก็ดำเนินต่อไปสู่ขั้นตอนสุดท้ายคือ Post-gelation เป็นขั้นตอนที่อัตราของปฏิกิริยาลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคืออัตราของขั้นตอนการแผ่ขยายมีน้อยกว่า และตามด้วยขั้นสิ้นสุด ตามลำดับ

2.1.5 การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจล (Applications of hydrogels)

2.1.5.1 ด้านการแพทย์ [18]

ไฮโดรเจล ถูกนำมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ เนื่องจากสามารถเข้ากันได้กับร่างกายมนุษย์ เช่น การใช้เป็นแผ่นปิดแผลไฟไหม้ น้ำร้อนลวก ซึ่งมีความชุ่มชื้นสูง ช่วยดูดซับน้ำเหลือง และของเหลวที่ไหลออกมาจากแผลได้ดี ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยออกซิเจนสามารถแทรกผ่านรูพรุนของเจลได้ ทำให้ร่างกายสามารถสร้างเนื้อเยื่อได้ดีกว่าปกติ และด้วยความใส ทำให้สังเกตความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับแผลได้เป็นอย่างดี หรือใช้ทำคอนแทคเลนส์ ที่ให้ความสบายต่อดวงตา ลดการระคายเคือง บางยี่ห้อสามารถสวมใส่ได้ตลอด 30 วัน โดยไม่ต้องถอด และสามารถใช้แทนซิลิโคนในการศัลยกรรมตกแต่ง

ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์สนใจพัฒนาไฮโดรเจลเป็นสารนำส่งยา หรือ Drug delivery system ด้วยสมบัติในการดูดซับของเหลวได้ดีจึงน่าจะดูดซับยาเก็บไว้แล้วปลดปล่อยยาออกมาในปริมาณที่ต้องการได้ และนอกจากนี้ยังนำมาใช้ทำเจลแต้มสิว ที่มีส่วนผสมของ Salicylic acid หรือ BHA ซึ่ง BHA เป็นตัวยาในกลุ่มที่ช่วยละลาย Keratin (โปรตีนที่เป็นส่วนประกอบของผิวชั้นนอก ผม และเล็บ) ใช้รักษาโรคผิวหนังที่มีผื่นหนา เป็นขุย ใช้ใน Chemical peeling เพื่อลดเลือนริ้วรอย และรักษาสิว BHA ออกฤทธิ์โดยทำให้ Keratin ที่แข็งนุ่มลง ทำให้ผิวที่แห้ง เป็นขุย หลุดออกง่าย และลดการอักเสบในสิว BHA ช่วยให้การหลุดลอกของเซลล์เยื่อในรูขุมขนช้าลง ป้องกันการอุดตัน และช่วยสลายสิวลุดตันทั้งชนิดปลายเปิดและปลายปิด ซึ่ง BHA ที่ใช้ในการรักษาสิว มีหลายรูปแบบทั้ง

เอกสารนี้ สคริป, เจล, โลชั่น และแผ่นแปะสิว เป็นต้น เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5.2 ด้านการเกษตรกรรม

ไฮโดรเจลถูกนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุอุ้มน้ำและแร่ธาตุต่างๆ ในดิน ซึ่งเป็นการนำไฮโดรเจลเติมลงในดิน ทำให้ดินมีสมบัติที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของพืช ช่วยอุ้มน้ำในดิน ทำให้ดินมีความชุ่มชื้นสูง เมื่อพืชใช้น้ำในดินหมด ไฮโดรเจลจะค่อยๆ ปล่อยน้ำที่ดูดไว้ออกมา นอกจากนี้ยังช่วยดูดซับแร่ธาตุต่างๆ ในดินไม่ให้ถูกชะลงไปที่ดินชั้นล่างทำให้พืชสามารถรับประโยชน์จากแร่ธาตุหรือปุ๋ยในดินได้ดีขึ้น หรือใช้เป็นวัสดุทดแทนดิน ในการเลี้ยงต้นไม้ประเภทไม้กระถางและพุ่มต่างๆ หรือใช้เคลือบเมล็ดพันธุ์ต่างๆ เพื่อช่วยให้เมล็ดพันธุ์ดูดซับน้ำไว้ใช้ในเวลาที่ไม่มีฝน ซึ่งจะทำให้เมล็ดพันธุ์มีอายุยาวนานขึ้น

2.2 กัมจากธรรมชาติ (Natural gums) [19]

กัม (Gum) เป็นสารประกอบประเภทพอลิแซคคาไรด์ และอนุพันธ์ของพอลิแซคคาไรด์ แหล่งที่พบมาจากธรรมชาติ มีทั้งจากพืชชนิดต่างๆ และจากจุลินทรีย์สามารถละลายได้ทั้งในน้ำเย็น น้ำอุ่น และน้ำร้อน โดยสารที่ได้จะมีความหนืดสูง แม้ว่าจะมีความเข้มข้นของกัมเพียงเล็กน้อย ดังนั้นจึงมีการนำกัมจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ประโยชน์อย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหารโดยจะใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดหรือสารข้น สารเพิ่มเสถียรภาพ สารช่วยให้เกิดเป็นเจล อิมัลซิไฟเออร์ ใช้เป็นกาว สารยึดติด และสารช่วยในการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม เป็นต้น

2.2.1 กัมจากธรรมชาติ แบ่งตามแหล่งที่มาได้เป็น 3 แหล่งใหญ่ๆ ดังนี้

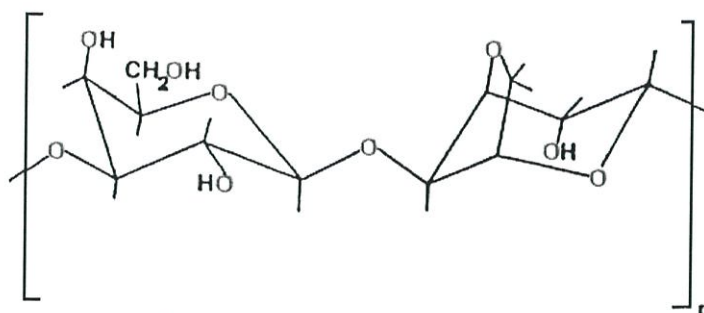
2.2.1.1 กัมจากสาหร่ายทะเล (Algae source)

เป็นแหล่งวัตถุดิบที่ได้จากสาหร่ายทะเล (Marine algae) ได้แก่ กลุ่มสาหร่ายทะเลสีแดง เช่น อะการ์ (Agar) คาร์ราจีแนน (Carrageenan) และกลุ่มสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล เช่น อัลจิเนต (Alginate) เป็นต้น

➤ อะการ์ (Agar)

เป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) อะการ์จัดเป็นพอลิแซคคาไรด์ชนิดสายโซ่ตรงประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาลกาแลคโตส (Galactose) โครงสร้างของอะการ์แสดงดังรูปที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของอะการ์ [21]

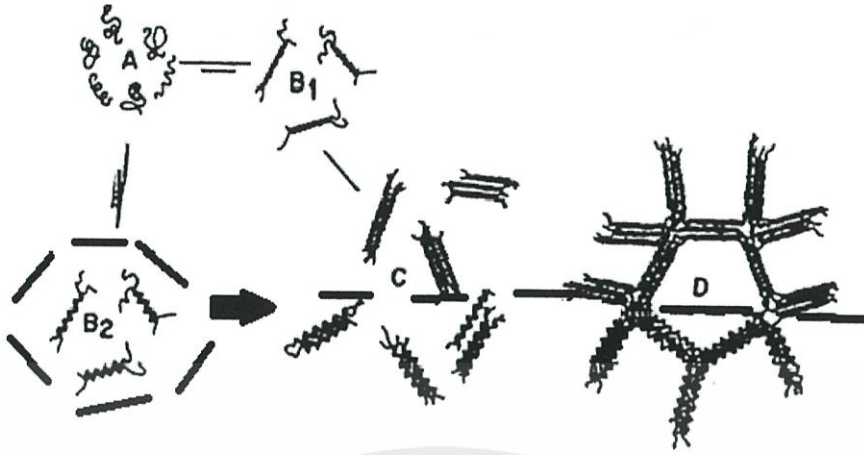
อะการ์ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์ 2 ประเภทหลัก คือ อะกาโรส (Agarose) และอะกาโรเพคติน (Agaropectin)

อะกาโรส เป็นพอลิเมอร์ร่วมระหว่าง 1,3 linked β -D-galactopyranose และ 1,4 linked 3,6-anhydro- α -L-galactopyranose เรียงสลับกันไปทีตำแหน่ง 1,3 linked สายโซ่สามารถถูกตัดได้ด้วยกรด แต่ที่ตำแหน่ง 1,4 linked สายโซ่จะต้องตัดโดยใช้เอนไซม์

อะกาโรเพคติน เป็นพอลิแซคคาไรด์ซัลเฟต มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับอะกาโรสคือ มีหน่วยซ้ำของ β -D-galactopyranose และมีโครงสร้างเหมือนอะกาโรส แต่ 3,6-anhydro- α -L-galactopyranose บางโมเลกุลถูกแทนที่ด้วยซัลเฟตประมาณ 5-8%

อะการ์ไม่ละลายในน้ำเย็น ละลายได้อย่างช้าๆ ในน้ำร้อน อะการ์มีความสามารถในการดูดน้ำได้ดี และทำให้เกิดเป็นเจลได้เมื่อมีเนื้ออะการ์มากกว่า 0.5% ที่อุณหภูมิ 75-90 องศาเซลเซียส ซึ่งการเกิดเจลแบบนี้เรียกว่า Physical gels โดยเมื่อโมเลกุลของอะกาโรสละลายอยู่ในน้ำ จะมีลักษณะเป็น Random coil และเมื่ออุณหภูมิลดลงใกล้อุณหภูมิจุดเกิดเจล จะเกิดการจับกันของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นแบบ B1 (Antisymmetric double helices) หรือ B2 (Symmetric double helices) และจะได้โครงสร้างลักษณะเป็นแบบ C, D (ส่วนบน) หรือ C, D (ส่วนล่าง) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.12 การที่จะเกิดรูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วในการลดลงของอุณหภูมิ ถ้าลดลงเร็วจะได้โครงสร้างเป็นแบบรูป B1 และ C, D (ส่วนบน) เจลที่ได้สามารถเกิดการผันกลับทางความร้อนได้ เรียกว่า เทอร์โมรีเวอร์ซิเบิลเจล (Thermoreversible gel) เจลที่ได้มีลักษณะเนื้อแข็งขุ่นสีเหลืองอ่อน เปราะ แตกได้ง่าย (Brittle) และเกิด Syneresis การเติมน้ำตาลหรือเดกซ์ทรินหรือผสมกับ Lucust bean gum จะทำให้เจลที่เกิดขึ้นมี Gel strength ความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และลดการเกิด Syneresis แต่ถ้าเติมแป้งหรือโซเดียมอัลจินเตตจะให้ผลตรงกันข้ามคือ ทำให้เจลที่ได้มีความแข็งแรงลดลง เจลที่เกิดจากอะการ์จะทนความร้อน เพราะอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจล และจุดหลอมเหลวของเจลมีช่วงห่างกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



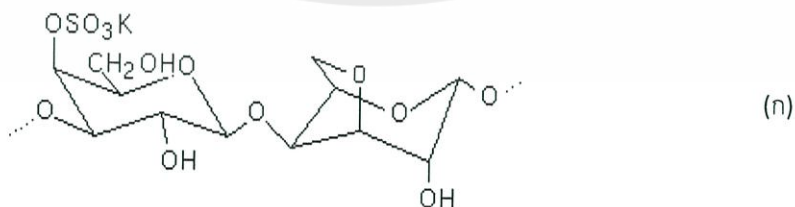
รูปที่ 2.12 กลไกการเกิดเจลของอะการ์ [20]

การใช้อะการ์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีดังนี้

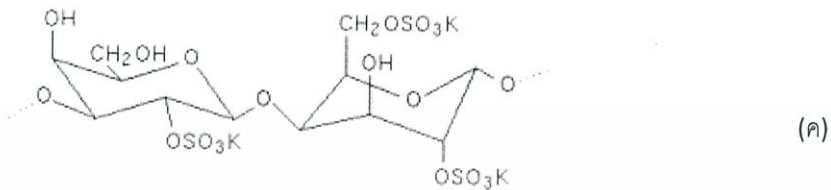
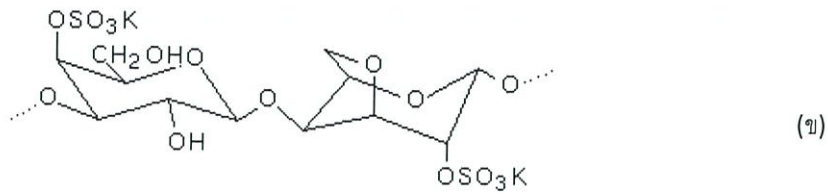
- อุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Tissue Culture Industry)
- อุตสาหกรรมขนมหวาน (Dessert Industry)
- อุตสาหกรรมนม (Milk and Related Industry)
- อุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ (Pharmaceutical Industry)
- อุตสาหกรรมทางจุลชีววิทยา (Microbiological Industry)

➤ คาร์ราจีแนน (Carrageenan)

คาร์ราจีแนน เป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง (Rhodophyceae) มีโครงสร้างหลักเป็น Galactose เชื่อมโยงด้วยพันธะ Glycosidic linkage และเป็น Sulphated polysaccharides ซึ่งคาร์ราจีแนนแบ่งเป็นกลุ่มย่อยอีกหลายชนิดตามจำนวน และตำแหน่งของกลุ่ม Ester sulphate และจำนวน 3,6 anhydro-D-galactose (3,6-AG) ได้แก่ Kappa, Lota และ Lambda คาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิดนี้ประกอบด้วยโครงสร้างของพอลิแซคคาไรด์หลักที่ซ้ำๆ กันหลายหน่วย แสดงดังรูปที่ 2.13



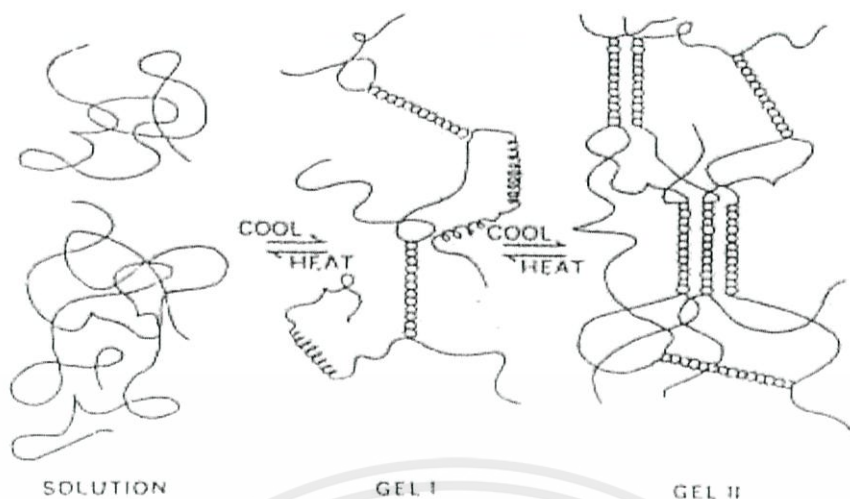
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 หน่วยซ้ำของคาร์ราจีแนน (ก) Kappa Carrageenan, (ข) Iota Carrageenan และ (ค) Lambda Carrageenan [20]

คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota มีความสามารถที่จะเกิดเจลได้ เมื่อสารละลายของคาร์ราจีแนนเย็นตัวลง ซึ่งเจลเหล่านี้จะเป็น Thermoreversible aqueous gel คือสามารถที่จะละลายเมื่อได้รับความร้อนและเกิดเจลอีกครั้งเมื่อเย็นตัวลง ในปี ค.ศ. 1969 Rees ได้กล่าวว่าเมื่อคาร์ราจีแนนละลายน้ำจะเกิดเจล เนื่องจากเกิดการสร้างเป็น Double helix ที่อุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลว และการปั่นกววนสามารถทำให้ Helices คลายตัวเป็น Random coil เมื่อเย็นตัวลงจะเกิดพอลิเมอร์โครงร่างตาข่าย แต่ละสายโซ่ของพอลิเมอร์จะรวมตัวกันเกิด Junction point (gel I) และเมื่อปล่อยให้เย็นลงอีก จะเกิดการเกาะกันของ Junction point (gel II) มากขึ้น ทำให้เกิดการแข็งตัวของเจล แสดงดังรูปที่ 2.14 การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่น Kappa carrageenan เมื่อเติม K^+ จะเกิดอีลาสติกเจล (Elastic gel) ถ้าเติม Ca^{2+} จะเกิด Rigid gel ส่วน Iota carrageenan เมื่อเติม Ca^{2+} จะเกิดอีลาสติกเจล ถ้าผสมคาร์ราจีแนนชนิด Kappa กับ Iota เข้าด้วยกันจะทำให้มีสมบัติในการเกิดเจลได้มากขึ้นเจลที่ได้มีอีลาสติกเพิ่มขึ้น และเกิด Syneresis น้อยลง และนำไปใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น Dessert gels, Whipped topping และ Fluid milk products เป็นต้น

คาร์ราจีแนนทุกชนิดละลายได้ในน้ำร้อน ถ้าเป็นเกลือโซเดียมของคาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota จะสามารถละลายได้ในน้ำเย็น ในขณะที่เกลือของไอออนชนิดอื่นๆ เช่นโพแทสเซียมหรือแคลเซียม ไม่สามารถละลายได้อย่างสมบูรณ์ ส่วนคาร์ราจีแนนชนิด Lambda จะละลายได้ในน้ำเย็นโดยไม่ขึ้นกับชนิดของไอออน ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์ราจีแนนและไอออนที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่คาร์ราจีแนนชนิด Kappa และ Iota ต้องใช้อุณหภูมิในการละลายมากกว่า $70^{\circ}C$ นอกจากนี้คาร์ราจีแนนทุกชนิดจะไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายในตัวทำละลายที่ละลายน้ำได้ เช่น แอลกอฮอล์ และพรอพิลีนไกลคอล



รูปที่ 2.14 กลไกการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน [20]

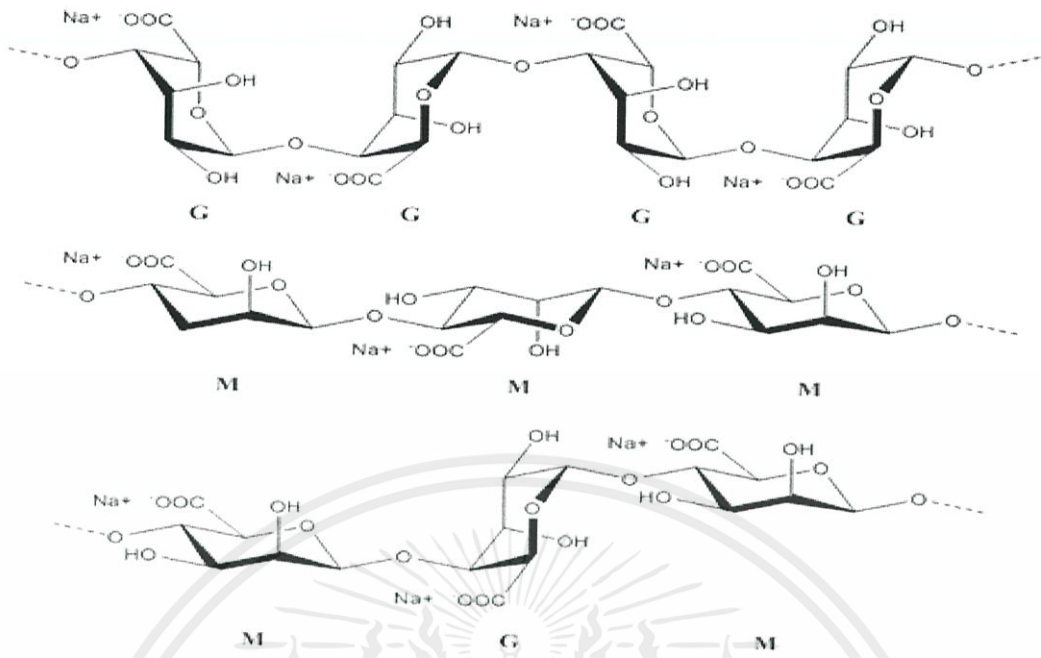
➤ อัลจิเนต (Alginate)

อัลจิเนตหรืออัลจิน เป็นสารที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (Phaeophyceae) อัลจิเนตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์เชิงเส้นซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยของมอนอแซ็กคาไรด์สองตัว คือ 1,4- β -D-manuronic acid (M) และ 1,4- α -L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วย Homopolymeric regions ของ M และ G ที่เรียกว่า M-blocks และ G-blocks ตามลำดับ และยังมีบางส่วนของโมเลกุลเป็น MG-blocks แสดงดังรูปที่ 2.15 โดยสัดส่วนของพอลิเมอร์ร่วม (Copolymer) และโครงสร้างเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดสมบัติของอัลจิเนต เช่น ถ้าพอลิเมอร์มี G ในปริมาณที่สูง เจลจะแข็งเปราะ และทนความร้อนได้ดี แต่ถ้าพอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบ M ปริมาณสูงจะเกิดเจลที่อ่อนนุ่ม มีความยืดหยุ่นมากกว่าเจลจากส่วน G และมีสภาวะการเกิดเจลที่กว้างกว่า

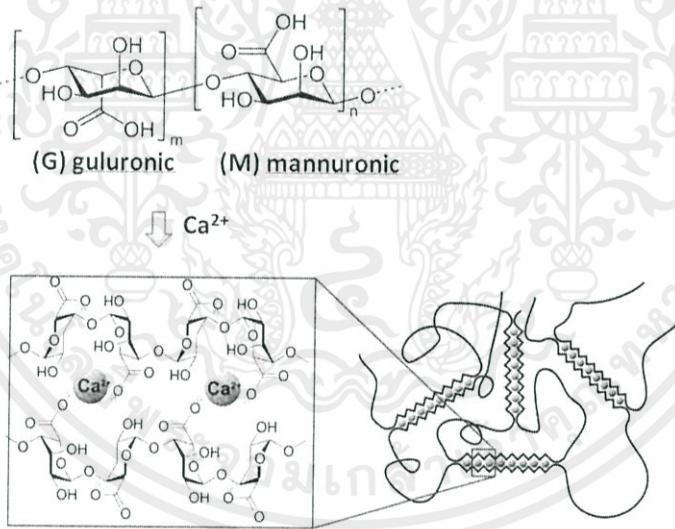
อัลจิเนตบางชนิดมีสมบัติเป็นเจล และจะเกิดเจลได้เมื่อทำปฏิกิริยากับ Ca^{2+} โครงสร้างของเจลมีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (Egg box) โดยมี Ca^{2+} เกาะอยู่กับสายโซ่พอลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 2.16 สมบัติที่ดีของอัลจิเนตคือ ทำให้เกิด Irreversible gel ในน้ำเย็นเมื่อมี Ca^{2+} รวมอยู่ด้วย

ความสามารถในการละลาย และการอุ้มน้ำ (Water holding capacity) ของอัลจิเนตขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ pH, น้ำหนักโมเลกุล, ความเข้มข้นของไอออนของตัวทำละลาย (Ionic strength) และไอออนที่ปรากฏอยู่ในระบบ โดยทั่วไปอัลจิเนตสามารถดูดซับน้ำได้ดี และอาจใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ทำให้เกิดความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของอัลจิเนต (Alginate) ชนิดต่างๆ [22]



รูปที่ 2.16 การเกิดเจลของ Calcium alginate (Egg-box model) [23]

อัลจิเนตถูกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1920 โดยเติมในอาหาร
 กระป๋องบางชนิด ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว สารทำให้เกิดเจล และสารยับยั้งการ
 เกิด Syneresis ตัวอย่างเช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน Propylene glycol alginate ใช้ในน้ำสลัด (Salad dressing) และเปียร์ เพราะงานการค้า
 มีความสามารถในการละลายสูงที่ pH ต่ำ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โขเดียมอัลจินเตใช้เป็นส่วนผสมในไส้พายมะนาวที่แช่เย็นเพื่อให้เกิดความคงตัวในระหว่าง Freeze-thaw
- ใช้เคลือบผิวชิ้นเนื้อปลา ก่อนนำไปแช่เยือกแข็งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิด Freeze burn กับชิ้นเนื้อปลา
- ใช้เป็นสารเพิ่มความคงตัวให้กับไอศกรีม, Frozen dessert, Sherbet, Processed cheese และใช้เป็น Alginate gel restructured products เช่น Onion rings และ Shrimp-like fish products

2.2.1.2 กัมจากส่วนต่างๆของพืช (Botanical source)

เป็นกัมธรรมชาติที่ได้จากส่วนต่างๆ ของพืช ได้แก่

- ดัน (Plant extrudate) เช่น กัมอะราบิก (Gum arabic), กัมคารายา (Gum karaya)
- เมล็ด (Seed gums) เช่น กัวร์กัม (Guar gum), Locust bean gum
- เยื่อไม้ (Plant tissue) เช่น Larch gum, เพคติน (Pectin)

➤ กัมอะราบิก (Gum arabic)

กัมอะราบิก (Gum arabic) หรือ กัมอะคาเซีย (Gum acacia) เป็นยางที่ได้จากต้น Acacia senegal และ Acacia seyal น้ำยางจะไหลเกาะกันเป็นก้อน เมื่อกระทบกับความร้อนจากแสงแดด จะแห้งและแข็งตัว มีลักษณะใสคล้ายแก้ว กัมอะราบิกเป็นพอลิแซคคาไรด์ ประเภท Heteropolysaccharide ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีโครงสร้างซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลและอนุพันธ์ของน้ำตาล 4 ชนิด คือ Galactose, Arabinose, L-rhamnose, Glucuronic acid และนอกจากนี้ยังประกอบด้วยกรดอะมิโน ได้แก่ ไฮดรอกซีโพรลีน (Hydroxyproline) และซีรีน (Serine) โครงสร้างโมเลกุลของกัมอะราบิก แสดงดังรูปที่ 2.17 กัมอะราบิกละลายได้ดีในน้ำ และได้สารละลายใสที่มีตั้งแต่สี่เหลี่ยมอ่อนจนถึงน้ำตาลส้ม จะให้ความหนืดที่ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัมการายาละลายน้ำได้น้อย แต่ดูดน้ำและบวมตัวได้ดี เนื่องจากมีหมู่ Acetyl ในโครงสร้าง ทำให้กัมการายาละลายในน้ำได้ไม่สมบูรณ์ แต่ให้สารละลายที่ใส โดยการดูดน้ำอย่างรวดเร็ว ให้ลักษณะเป็นคอลลอยด์ที่มีความหนืดที่ความเข้มข้นต่ำ (น้อยกว่า 0.02% ในน้ำเย็น และ 0.06% ในน้ำร้อน) เมื่อทำเป็นผงละเอียดจะเป็นตัวดูดน้ำและอุ้มน้ำที่ดี และเมื่อกระจายตัวอยู่ในน้ำจะบวมตัวได้ 60-100 เท่าของปริมาตรเดิม ได้เป็นสารละลายที่มีความหนืดสูง ความหนืดของสารละลายจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น เมื่อใช้ในปริมาณมากจึงมีสมบัติเป็น Strong adhesiveness ทำให้ได้สารละลายคอลลอยด์ที่มีความหนืดสูง สมบัติของสารละลายกัมการายา จึงขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาคในน้ำเย็นจะให้ความหนืดสูงกว่าในน้ำร้อน กัมการายาทนต่อความเป็นกรดได้สูง เพราะในโมเลกุลมีกรดยูโรนิก (Uronic acid) สูง และยังทนต่อการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกสูงถึง 10% ที่อุณหภูมิห้องนานอย่างน้อย 8 ชั่วโมง

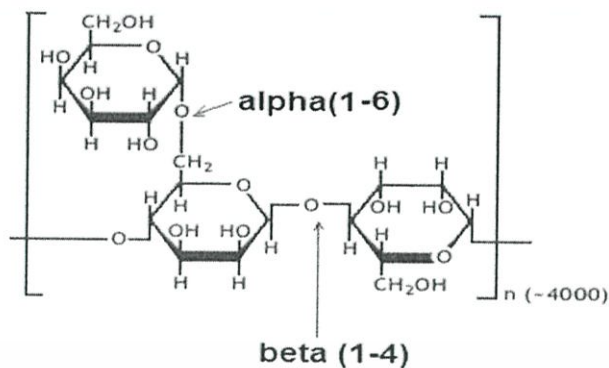
กัมการายาใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) เป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) มีลักษณะเป็นผง เช่น ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ทำให้เกิดความข้นหนืด (Thickening agent) และเป็นสารเพิ่มความคงตัว (Stabilizing agent) ให้กับ Whipping cream เนื่องจากมีสมบัติในการอุ้มน้ำที่ดี นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมยา ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesive) ใน Stoma seal หลังจากการผ่าตัด หรือนำมาใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้เป็นสารข้น (Thickener) ในสีย้อมผ้าพิมพ์

➤ กัวร์กัม (Guar gum)

กัวร์กัมได้จากเนื้อในเมล็ด (Endisperm) ของเมล็ดกัวร์ (Cyamopsis tetragonolobus) กัวร์กัมเป็น Polysaccharide ประเภท Heteropolysaccharide ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ galactomannan ซึ่งประกอบไปด้วยโมเลกุลของ Manose ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง เบตา-1,4 และมีกิ่งแขนงของ Galactose ซึ่งต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง แอลฟา-1,6 แสดงดังรูปที่ 2.18

กัวร์กัมละลายได้ในน้ำเย็นและน้ำร้อน แต่น้ำเย็นจะละลายได้ค่อนข้างยาก กัวร์กัมมีสมบัติเป็น Non-gelling แต่กระจายตัวและอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดเพิ่มความคงตัว สามารถเกิดอันตรกิริยากับ Xanthan gum ทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้กัวร์กัมผสมกับ Borate หรือ Glutaraldehyde จะได้ Rubber gels (สารที่มีความหนืดสูงมาก) ความหนืดของสารละลายกัวร์กัมจะขึ้นกับอุณหภูมิ ค่า pH เวลา ความเข้มข้น และขนาดของอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของกัวร์กัม [20]

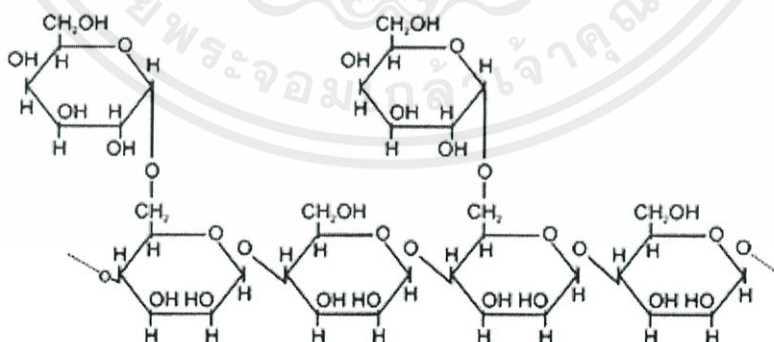
กัวร์กัมถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย เช่น

- สารที่ทำให้มีลชั้นคงตัว (Emulsifier)
- สารข้นหนืด (Thickening agent) ในอุตสาหกรรม อาหาร และเครื่องสำอาง
- ใช้เป็นสารเพิ่มความเสถียรในอาหาร เช่น ในไอศกรีม และพวกอาหารแช่แข็ง

➤ โลคัสปินกัม (Locust bean gum)

โลคัสปินกัม สกัดได้จากเนื้อในเมล็ด (Endisperm) ของต้น Carob (*Ceratonia siliqua*)

โลคัสปินกัมเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ประเภท Heteropolysaccharide โครงสร้างโมเลกุลของโลคัสปินกัมเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ยาว ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิดคือ น้ำตาล Mannose คือส่วนที่เป็นสายหลักสลับกับ Galactose ที่เป็นกิ่งแขนงสายหลักของ mannose ต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ชนิด เบตา-1,4 และมีกิ่งแขนงของ Galactose ต่อกันด้วยพันธะชนิดแอลฟา-1,6 โดยอัตราส่วนของ Mannose ต่อ Galactose เป็น 4:1 โครงสร้าง Locust bean gum แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 โครงสร้าง Locust bean gum [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

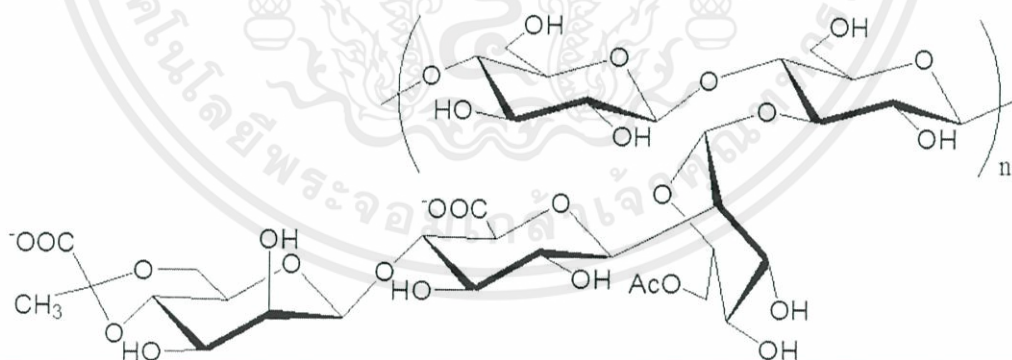
โลคัสบีนกัมไม่ละลายในน้ำเย็น และสามารถละลายได้ดีในน้ำร้อน จะได้สารละลายที่มีความหนืดสูงที่สุดเมื่อรับความร้อนสูงถึง 95 องศาเซลเซียส โลคัสบีนกัมไม่สามารถเกิดเจลได้ ต้องนำมาผสมกับแซนแทนกัม จึงจะทำให้เกิดเจล หรืออาจผสมรวมกับ Kappa-carrageenan จะช่วยเพิ่ม Gel strength และลดการเกิด Syneresis

2.2.1.3 กัมจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก (Microbial gums)

กัมที่มาจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก สารที่สกัดได้ คือ Dextrans ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 50,000-100,000 ได้จากการหมักกลูโคสด้วยแบคทีเรีย

➤ แซนแทนกัม (Xanthan gum)

แซนแทนกัมเป็นกัมที่ได้จากการหมักด้วยเชื้อแบคทีเรียบริสุทธิ์ คือ Xanthanomonas Campestris ซึ่งมักพบในกะหล่ำปี กะหล่ำดอก แซนแทนกัมเป็นพอลิแซคคาไรด์ประเภท Heteropolysaccharide ที่เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ของ β -D-glucose มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส (Cellulose) แต่ทุกๆ 2 โมเลกุลของกลูโคสเชื่อมโยงด้วยกิ่งของไตรแซคคาไรด์ที่เกิดจากน้ำตาล Mannose 2 โมเลกุล และกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) 1 โมเลกุล โมเลกุลของ Manose ที่อยู่ติดกับสายโซ่หลักมีเอสเทอร์ของกรดแอซิติคที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และ mannose ที่ตำแหน่งปลายของไตรแซคคาไรด์มีกรดไพรูวิก (Pyruvic acid) เชื่อมโยงอยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 4 และ 6 โครงสร้างโมเลกุลของแซนแทนกัม แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โครงสร้างโมเลกุลของแซนแทนกัม [20]

แซนแทนกัมละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน ถ้าเติมสารอิเล็กโทรไลต์เล็กน้อยจะทำให้มีการรักษาเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability) ดีขึ้น และมีความหนืดคงที่ในช่วงอุณหภูมิ -18 °C ถึง 80 °C และความหนืดคงที่ในช่วง pH 1-11 นอกจากนั้นสารละลายจะให้ความหนืดเป็น

แบบ Non-newtonian fluid โดยมีพฤติกรรมเป็นแบบ Shear thinning fluid แขนแทนกัมไม่เกิดเจล เนื่องจากโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา (Branching) แต่จะเกิดเจลได้เมื่อใช้ร่วมกับกัมบางชนิด เช่น Locust bean gum และ Guar gum เป็นต้น สารละลายแขนแทนกัมมีสมบัติเป็นซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) คือความหนืดของสารละลายจะลดลงเมื่อมีแรงเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งมีประโยชน์ต่อการใช้งานในอุตสาหกรรม โดยหลักๆ แล้ว จะใช้แขนแทนกัมเป็นสารเพิ่มความหนืด สารเพิ่มความคงตัว และทำให้อนุภาคแขวนลอยได้ดี การนำไปใช้ประโยชน์ เช่น

- เป็น thickening agent ทำให้อาหารมีความข้น ความหนืด (viscosity) และทนความร้อนได้สูง
- ทำให้อาหารคงรูป (stabilizer) นำรับประทาน และมีความมันวาว
- โดยมักใช้แขนแทนกัมผสมกับกัวร์กัม (guar gum) เพื่อเพิ่มความหนืด ดีกว่าใช้เดี่ยว
- ใช้ทดแทนไขมัน (fat replacer) ในอาหารแคลอรีต่ำ
- ใช้เป็นสารก่อโฟม (foaming agent)
- ป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็งในอาหารแช่เยือกแข็ง

2.3 ระบบเชื่อมโยง

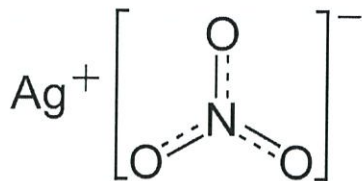
2.3.1 การเชื่อมโยงด้วยประจุ [26]

พอลิแซคคาไรด์ในกลุ่มกัมธรรมชาติหลายชนิดมีหมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) ซึ่งสามารถเชื่อมโยงทางประจุด้วยพันธะไอออนิกได้ โดยการใช้สารเชื่อมโยงแบบโมนอวาเลนต์ เช่น Ag^+ โดยมีการเกิดโคออร์ดิเนชันร่วม [12], ไดวาเลนต์ เช่น Cu^{2+} [7] และ Ca^{2+} [5] หรือแบบไตรวาเลนต์ เช่น Al^{3+} [27] และ Fe^{3+} [28]

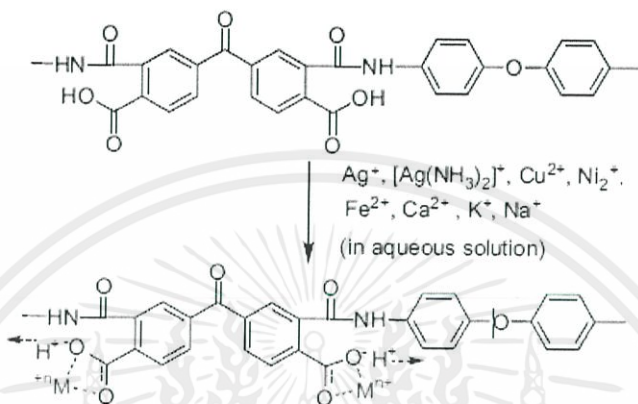
2.3.1.1 การเชื่อมโยงประจุแบบโมนอวาเลนต์

การเชื่อมโยงแบบโมนอวาเลนต์สามารถใช้ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate, AgNO_3) แสดงดังรูปที่ 2.21 เป็นสารก่อก้อนเชื่อมโยงได้ เนื่องจากมีงานวิจัยเกี่ยวกับการเติมซิลเวอร์ไอออนลงในพอลิเอมิกแอซิด (Poly(amic acid)) โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ได้เป็นซิลเวอร์คาร์บอกซิเลต แสดงดังรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



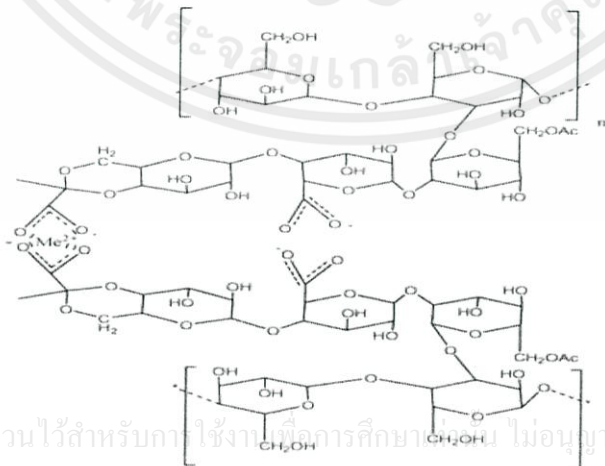
รูปที่ 2.21 สูตรโครงสร้างซิลเวอร์ไนเตรต [30]



รูปที่ 2.22 การแลกเปลี่ยนไอออนของพอลิเอมิกแอซิดกับโลหะไอออน [29]

2.3.1.2 การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์

การเชื่อมโยงประจุแบบไดวาเลนต์ที่ใช้แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2) เป็นสารเชื่อมโยง เนื่องจากแคลเซียมคลอไรด์เป็นสารละลายที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นพิษ จึงนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่ง D. Bergmann และคณะ [31] ได้เสนอแบบจำลองของการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างแซนแทนกัม และ Divalent cation เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} โดยจะเกิดขึ้นที่หมู่คาร์บอกซิเลตของไพรูเวต (Pyruvate unit) แสดงดังรูปที่ 2.23



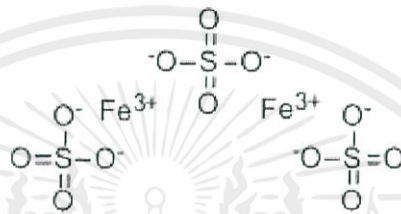
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.23 แบบจำลองการเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างแซนแทนกัม และ Divalent cation [31]

2.3.1.3 การเชื่อมโยงประจุแบบไตรวาเลนต์

เฟอร์ริกซัลเฟต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) สามารถใช้เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยงได้ โครงสร้างเฟอร์ริกซัลเฟตแสดงดังรูปที่ 2.24 งานวิจัยที่ผ่านมา T. Reddy และคณะ [28] ได้เตรียมเม็ดไฮโดรเจลจากโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลกัวร์กัม โดยมีโลหะไอออนต่างๆ เช่น Fe^{3+} , Al^{3+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} และ Cu^{2+} เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง แล้วศึกษาการปลดปล่อย Bovine serum albumin (BSA) ผลการทดลองพบว่าเม็ดเจลที่ใช้สารก่อพันธะเชื่อมโยงแบบไตรวาเลนต์ (Fe^{3+} และ Al^{3+}) มีความสามารถในการปลดปล่อยช้ากว่าเจลที่ใช้สารเชื่อมโยงแบบดิวาเลนต์ (Ba^{2+} , Ca^{2+} และ Cu^{2+})



รูปที่ 2.24 สูตรโครงสร้างเฟอร์ริกซัลเฟต [32]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Z. Shan และคณะ 2013 [33] ได้สังเคราะห์เม็ดไฮโดรเจลจากแคลเซียมอัลจินตและแซนแทนกัม โดยมีซิลิกาเป็นตัวช่วยเสริมแรง เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับโลหะจากแหล่งน้ำเสีย ซิลิกาจะทำปฏิกิริยาควบแน่นเข้าไปในโครงร่างตาข่ายของไฮโดรเจลผสมระหว่างแคลเซียมอัลจินตและแซนแทนกัม จากนั้นได้มีการทดสอบด้วยเทคนิค SEM พบว่าซิลิกาสามารถกระจายตัวในโครงสร้างเม็ดไฮโดรเจลที่ดี และมีการตรวจสอบการดูดซับโลหะ แสดงให้เห็นว่าเม็ดไฮโดรเจลนั้นสามารถดูดซับโลหะได้ดี

J.B. Xu และคณะ 2003 [34] เตรียมฟิล์มไฮโดรเจลที่ผสมระหว่างอัลจินตและคาร์ราจีแนน เพื่อใช้เป็นสารเคลือบ โดยมี Water Soluble Carbodiimide (WSC) เป็นสารเชื่อมโยง จากการทดลองได้มีการทดสอบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของฟิล์ม ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว และทดสอบด้วย SEM, X-ray diffraction และ FTIR Spectroscopy จากการทดสอบ พบว่าสถานะของฟิล์มที่สัดส่วนของคาร์ราจีแนนความเข้มข้น 20% และเชื่อมโยงด้วย WSC ที่มีความเข้มข้น 120 mM เป็นสารเคลือบได้ดีที่สุด

C.K. Kuo และคณะ 2001 [35] ได้ศึกษาอัตราการเกิดเจล และสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลที่ได้จากอัลจินต มีการเชื่อมโยงด้วย CaCl_2 และ CaCO_3 พบว่า CaCl_2 มีอัตราการเกิดเจลที่ควบคุมได้ยากไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากเกิดเจลเร็วทำให้เกิดการเชื่อมโยงไม่เท่ากัน ส่วน CaCO_3 มีการกระจายตัว

เอกสารนี้ ต่ำมากในน้ำบริสุทธิ์ ช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวสม่ำเสมอ ทำให้เจลที่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S. Mandal และคณะ 2010 [36] ได้สังเคราะห์ฟิล์มไฮโดรเจลจากพอลิอะซิลาไมด์กราฟท์ด้วยโซเดียมอัลจิเนต (PAAm-g-SAL) และโซเดียมอัลจิเนต (SAL) เชื่อมโยงด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่อุณหภูมิ 60 °C ผ่าน Ionotropic gelation process ทำการทดสอบการปลดปล่อยตัวยาใน Acidic solution (pH 1.2) และที่ PB solution (pH 6.8) จากการทดสอบ พบว่าอัตราส่วนของโคพอลิเมอร์ต่อโซเดียมอัลจิเนตเพิ่มขึ้น จะทำให้การปลดปล่อยของตัวยาลดลง

A.R. Dezfuli และคณะ 2012 [37] ได้สังเคราะห์แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เข้ากับผิวหนัง Metoprolol Tartrate (MT) โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตและแซนแทนกัม ซึ่งได้ศึกษา FTIR และ DSC เพื่อประเมินการทำงานร่วมกันระหว่างตัวยาและพอลิเมอร์ ทำการประเมินลักษณะทางกายภาพ ความหนา น้ำหนักที่แน่นอน ร้อยละการดูดซับความชื้น ความแข็งแรงดึง SEM analysis ปริมาณตัวยาที่แน่นอน พบว่าฟิล์มที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและเข้ากันได้ดีขึ้นเมื่อมีอัลจิเนตมากกว่า 30% ในสูตร เพราะอัลจิเนต มี α -L-gulonic acid ซึ่งเกิดปฏิกิริยากับแซนแทนกัมได้ดี ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลอง จากภาพ SEM แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวกัน จากการศึกษา FTIR และ DSC ยืนยันว่าไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวยาและพอลิเมอร์ จึงสรุปได้ว่า ฟิล์มสูตรที่พัฒนาแล้วมีศักยภาพที่ดีสำหรับการส่งตัวยาไปยังผิวหนังและช่วยรักษาระดับความเข้มข้นของพลาสมาไว้ได้

N. Rajesh และคณะ 2010 [38] ทำการเตรียม Transdermal films ที่มีการเติม Ketoprofen (KF) ลงไป โดยใช้โซเดียมอัลจิเนตและแซนแทนกัมที่มีสูตรแตกต่างกันโดยผสมผสานในอัตราส่วน 10:0, 8:2, 6:4, 4:6 และ 2:8 (%w/w) ทดลองโดยเคลือบฟิล์มยาลงบนตัวหนูแล้วคู่อตราการซึมผ่านของ KF ลงบนผิว เมื่อเทียบกับฟิล์มธรรมดา พบว่าใช้ได้ดีและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยยืนยันจาก FTIR และ DSC และจากผลการทดลองฟิล์มสูตร F3 (3% เมนทอล) มีประสิทธิภาพสูงที่สุด เพราะในการศึกษาเผยให้เห็นว่าร่างกายของสัตว์ทดลองมีการต่อต้านการอักเสบเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มธรรมดาที่ไม่มีเมนทอล

D. Bilaonovic และคณะ 2015 [39] ได้ศึกษาการเชื่อมโยงของแซนแทนกัมกับสารประกอบอื่นๆ ด้วยกลีเซอรอล พบว่าในสภาวะไม่มีน้ำหรือน้ำน้อย Hydroxyl group ของกลีเซอรอลจะทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของแซนแทนกัม ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันเกิดเป็น Glycerol crosslinked xanthan (GCX) ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการเชื่อมโยงนั้นจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการคลายสายโซ่ Double-helix ของแซนแทนกัม ทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันทั้งที่บริเวณโซ่หลักและโซ่กิ่ง จึงเกิดการเชื่อมโยงดีขึ้นและสามารถเชื่อมโยงกับกลีเซอรอลได้ ซึ่งมอนอเมอร์ของกลีเซอรอลและโอลิโกเมอร์จะเชื่อมโยงกับแซนแทนกัม เมื่อการเชื่อมโยงของมอนอเมอร์ของกลีเซอรอลและโอลิโกเมอร์มี Weight ratio น้อยกว่า 27.6 และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนระหว่างกลีเซอรอลและพอลิเมอร์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพและความทนทานต่อพลังงานที่ฟิล์มได้รับ

M.S. Kim และคณะ [8] สังเคราะห์ไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เชื่อมโยงด้วยเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เพื่อใช้เป็นตัวนำส่งโปรตีนอัลบูมิน (Albumin) โดยการใช

สารละลายของอัลจินตต่อคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน หยดลงในสารละลายเพอร์ริกคลอไรด์ จากการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวและการปลดปล่อยโปรตีนอัลบูมินที่สภาวะต่างๆ คือ pH 1.2, 4.5 และ 7.4 พบว่าเม็ดเจลที่เชื่อมโยงด้วยเพอร์ริกไอออนสามารถบวมตัวและปลดปล่อยอัลบูมินในสภาวะเบสได้ดีกว่าในสภาวะกรด เนื่องจากในสภาวะกรดจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จึงบวมตัวและปลดปล่อยอัลบูมินได้ไม่ดี

ชาญวิทย์ ลิ้มโพลย์ และคณะ [6] ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิแซคคาไรด์ ได้แก่ อัลจินต (Alg) และกัวร์กัม (GG) โดยใช้โซเดียมเททระบอเรตเป็นสารเชื่อมโยง และเติมสารที่ช่วยยับยั้งแบคทีเรียคือ ซิลเวอร์ลงไป ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Alg:GG คือ 4:6 และ 6:4 รวมถึงความเข้มข้นที่แตกต่างกันของโซเดียมเททระบอเรต ซึ่งใช้เป็นสารเชื่อมโยง 3 ค่า คือ 0.2, 0.4 และ 0.6% โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นไฮโดรเจลที่เตรียมได้นำไปเติมซิลเวอร์ด้วยการแช่ในสารละลายซิลเวอร์ในเทรต และใช้โซเดียมบอโรไฮไดรด์เป็นตัวรีดิวซ์นำไฮโดรเจลที่ปรับปรุงสมบัติไปตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, XRF, TGA, ทดสอบการบวมตัว และทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย โดยเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบได้แก่ *Bacillus subtilis* และ *Escherichia coli* จากผลการวิจัยพบว่า การทดสอบการฆ่าเชื้อโดยวิธี Agar well diffusion สามารถต้านเชื้อจุลินทรีย์ชนิด *Bacillus subtilis* ได้ดีกว่า *Escherichia coli* โดยสูตรไฮโดรเจลที่ต้านเชื้อดีที่สุดคือ A4G6B0.6,20 (เวลา 20 นาทีที่เจลแช่สารละลายซิลเวอร์ในเทรต) จากการวิเคราะห์โดยเทคนิค XRD พบว่าเจลทุกสูตรมีซิลเวอร์และซิลเวอร์ออกไซด์อยู่ในโครงสร้าง จากการหาปริมาณซิลเวอร์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าไฮโดรเจลมีปริมาณซิลเวอร์อยู่ 12 ถึง 45% โดยน้ำหนัก โดยสูตรที่มีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุดคือ A6G4B0.4,20 และจากการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA พบว่าการสลายตัวของอัลจินตและกัวร์กัมอยู่ที่ 220-245 °C นอกจากนี้จากผลการศึกษาการบวมตัวในน้ำกลั่น พบว่าสูตร A6G4B0.6,20 และ A6G4B0.4,1 มีการบวมตัวสูงสุด โดยมีค่าการบวมตัวสูงสุดที่ 60% โดยน้ำหนัก และสูตรที่เหมาะสมในการใช้งานด้านการต้านเชื้อที่ระยะเวลานานคือ A6G4B0.4,20 เนื่องจากมีอัตราการแพร่ของซิลเวอร์ช้าที่สุด

M. George. และ Abraham, T.E. (2007) [5] ได้สังเคราะห์ไฮโดรเจลจากอัลจินตและกัวร์กัมที่มีความว่องไวต่อค่า pH ที่เปลี่ยนแปลง โดยใช้กลูตารอลดีไฮด์ความเข้มข้น 0.25, 0.3, 0.4 และ 0.5% โดยน้ำหนัก เป็นสารเชื่อมโยง ซึ่งจะเชื่อมโยงระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของสารตั้งต้นทั้งสองเข้าด้วยกัน ไฮโดรเจลที่ได้ถูกนำมาทำเป็นเม็ด โดยหยดสารละลายผสมของอัลจินตและกัวร์กัมลงในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เมื่อล้างและทำเม็ดไฮโดรเจลให้แห้งแล้วนำไปทดสอบการบวมตัวในสารละลายที่มี pH 1.2 และ 7.4 การบวมตัวของไฮโดรเจลขึ้นกับความเข้มข้นของกลูตารอลดีไฮด์ อัตราส่วนระหว่างอัลจินตต่อกัวร์กัม และค่า pH จากการศึกษา พบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยกลูตารอลดีไฮด์เข้มข้น 0.3% โดยน้ำหนัก มีการบวมตัวดีที่สุดทั้ง pH 1.2 และ 7.4 แต่อัตราส่วนระหว่างอัลจินตต่อกัวร์กัมที่บวมตัวดีที่สุดในแต่ละค่า pH ต่างกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากอัลจินตและแซนแทนกัม มากมาย มีเพียง A. R. Dezfali และคณะ 2012 [32] ที่มีการศึกษาฟิล์มไฮโดรเจลจากโซเดียมอัลจินตและแซนแทนกัม โดยใช้กลีเซอรอลเป็นสารตัวเติม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวและสมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้จากอัลจินตและแซนแทนกัม โดยมีการเชื่อมโยงด้วยประจุ โดยแบ่งออกเป็นสองระบบ คือ การเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และการเชื่อมโยงสองชั้นตอนโดยนำฟิล์มที่ทำการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วมาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต และศึกษาผลของระบบเชื่อมโยงที่มีต่อสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์มที่เตรียมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. อัลจิเนต (alginate, A) บริษัท รวมเคมี จำกัด เกรดอาหาร
2. แซนแทนกัม (Xanthan gum , X) บริษัท รวมเคมี จำกัด เกรดอาหาร
3. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เกรดวิเคราะห์ บริษัท เมอร์ค จำกัด
4. เพอร์ริกซัลเฟตโมโนไฮเดรต ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์ Loba chemie Co.,Ltd
5. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) เกรดวิเคราะห์
6. ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) เกรดวิเคราะห์
7. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) เกรดวิเคราะห์
8. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เกรดวิเคราะห์
9. กรดอะซิติก (CH_3COOH) เกรดวิเคราะห์
10. โซเดียมแอสซิเตด ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) เกรดวิเคราะห์
11. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) 37% เกรดวิเคราะห์ Carlo erba.,Ltd
12. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เกรดวิเคราะห์ Loba chemie Co.,Ltd
13. โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) เกรดวิเคราะห์

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. เครื่องปั่นกวนแบบแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน บริษัท IKA จำกัด รุ่น HS-7
2. ตู้อบบริษัท Fisher Scientific จำกัด รุ่น Isotemp
3. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument จำกัด รุ่น TC-254
4. เครื่องแก้ว
5. ไมโครมิเตอร์
6. โต๊ะปรับระดับ
7. จานเพาะเชื้อ
8. ตะแกรงลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

3.3.1 การเตรียมสารละลายอัลจินต ความเข้มข้น 1%

ชั่งอัลจินต 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 99 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2 การเตรียมสารละลายแซนแทนกัม ความเข้มข้น 1%

ชั่งแซนแทนกัม 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 99 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยปั่นกวนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.3 การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

1. ชั่งแคลเซียมคลอไรด์ 0.1470, 0.2940 และ 0.4410 กรัม
2. ละลายในน้ำกลั่น เติลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
3. จะได้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 0.01, 0.02 และ 0.03 โมลาร์ ตามลำดับ

3.3.4 การเตรียมสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

1. ชั่งเฟอร์ริกซัลเฟต 0.3999, 0.7998, 1.9994, 3.9988, 9.9970 และ 19.9940 กรัม
2. ละลายในน้ำกลั่น เติลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
3. จะได้สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ตามลำดับ

3.3.5 การเตรียมสารละลาย Simulated gastric fluid (pH 1.2)

1. ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% ปริมาตร 7 มิลลิลิตร
2. เติลงในโซเดียมคลอไรด์ 2 กรัม
3. เติลงในขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.3.6 การเตรียมสารละลายโซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ (pH 4)

1. ปิเปตสารละลายกรดอะซิติก ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 41 มิลลิลิตร
2. เติลงในสารละลายโซเดียมอะซิเตต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 9 มิลลิลิตร
3. เติลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.7 การเตรียมสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 7)

1. ชั่งโซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต 0.9231 กรัม
2. ชั่งไดโซเดียมฟอสเฟต 0.885 กรัม
3. ละลายในน้ำกลั่น เติงขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.3.8 การเตรียมสารละลายคาร์บอเนต-ไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ (pH 9.6)

1. ปิเปตสารละลายไดโซเดียมไบคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 137.5 มิลลิลิตร
2. เติงในสารละลายโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ปริมาตร 112.5 มิลลิลิตร
3. เติงในขวดวัดปริมาตร 1000 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

3.4 การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงชั้นตอนเดียว

1. ชั่งสารละลายอัลจินตและสารละลายแซนแทนกัม ตามตารางที่ 3.1
2. ปั่นกวนสารละลายให้เข้ากันเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
3. เติมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น และปริมาตร ดังตารางที่ 3.1 ลงในสารละลาย ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
4. เทสารละลายลงในจานเพาะเชื้อปริมาตร 50 กรัม แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อกำจัดฟอง
5. นำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของฟิล์มไฮโดรเจลระหว่างสารละลายอัลจินต (A) และสารละลาย แชนแทนกัม (X) ที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์

สูตร	องค์ประกอบ (g)		ความเข้มข้น CaCl ₂ (M)	ปริมาตร CaCl ₂ (ml)
	A	X		
A100X0-Ca000	100	0	0	0
A95X5-Ca000	95	5		
A90X10-Ca000	90	10		
A100X0-Ca120	100	0	0.01	20
A95X5-Ca120	95	5		
A90X10-Ca120	90	10		
A100X0-Ca210	100	0	0.02	10
A95X5-Ca210	95	5		
A90X10-Ca210	90	10		
A100X0-Ca215	100	0	0.02	15
A95X5-Ca215	95	5		
A90X10-Ca215	90	10		
A100X0-Ca220	100	0	0.02	20
A95X5-Ca220	95	5		
A90X10-Ca220	90	10		
A100X0-Ca310	100	0	0.03	10
A95X5-Ca310	95	5		
A90X10-Ca310	90	10		

โดยตัวอย่างสัญลักษณ์ของสูตรไฮโดรเจลแสดงดังนี้

- A100X0-Ca000 คือ สารละลายอัลจินต 100 กรัม ต่อสารละลายแชนแทนกัม 0 กรัม ไม่มีการเชื่อมโยง

- A95X5-Ca120 คือ สารละลายอัลจินต 95 กรัม ต่อสารละลายแชนแทนกัม 5 กรัม เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร

สำหรับไฮโดรเจลสูตรอื่นๆ ใช้สัญลักษณ์ในลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 ทดสอบพฤติกรรมกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น

1. นำฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากข้อ 3.4 ที่มีความหนา 60 ± 5 ไมครอน ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$

2. ชั่งน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจล (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

3. ห่อด้วยตะแกรงลวด และชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาน้ำหนักของตะแกรงลวด

4. แخذตะแกรงลวดที่มีฟิล์มไฮโดรเจลอยู่ในลงในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

5. นำขึ้นมาจากน้ำกลั่น แล้วซับให้แห้งด้วยกระดาษก่อนชั่งน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที

6. นำฟิล์มไฮโดรเจลไปอบให้แห้ง

3.4.2 ทดสอบพฤติกรรมกรรมการบวมตัวในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

1. เลือกสูตรฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 และมีพฤติกรรมกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นเข้าสู่ค่าคงที่ (ความหนา 60 ± 5 ไมครอน ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$) มาทำการทดสอบ

2. ชั่งน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจล (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)

3. จุ่มลงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

4. นำขึ้นมาจากสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ล้างสารตั้งต้นที่ตกค้าง โดยแช่ในน้ำกลั่น 10 วินาที แล้วซับให้แห้งด้วยกระดาษก่อนชั่งน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 15, 30, 45 วินาที, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 25, 30, 45 และ 60 นาที

5. นำฟิล์มไฮโดรเจลที่ล้างแล้วไปอบให้แห้ง

3.5 การเชื่อมโยงฟิล์มไฮโดรเจลแบบจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

1. เลือกสูตรฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากข้อ 3.4.1 และคงสภาพได้ในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต (ความหนา 60 ± 5 ไมครอน ตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$)

2. จุ่มลงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ เป็นเวลา 1 นาที (ความเข้มข้นและเวลาที่ฟิล์มไฮโดรเจลสามารถงอตัวอยู่ได้ จากข้อ 3.4.2)

3. นำฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้ไปล้างสารตั้งต้นที่ตกค้าง โดยแช่ในน้ำกลั่น 10 วินาที

4. นำฟิล์มไฮโดรเจลที่ล้างแล้วไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนฟิล์มแห้ง

3.6 การทดสอบ

3.6.1 การทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่นและสารละลายต่างๆ

1. ชั่งน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจลที่แห้ง จากข้อ 3.5 (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
2. แช่ฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น และสารละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ดังนี้
 - น้ำกลั่น
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 7
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6
3. นำฟิล์มขึ้นมาจากสารละลาย แล้วซับให้แห้งก่อนชั่งน้ำหนัก ที่เวลาต่างๆ ดังต่อไปนี้

-15, 30, 45 วินาที, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 นาที และ 24 ชั่วโมง

4. คำนวณหาจำนวนเท่าของการบวมตัว โดยใช้สูตร

$$\text{จำนวนเท่าของการบวมตัว} = \frac{\text{น้ำหนักของเจลที่บวมตัว} - \text{น้ำหนักของเจลแห้ง}}{\text{น้ำหนักของเจลแห้ง}}$$

5. แต่ละสูตรทำซ้ำ 3 ซ้ำงาน

3.6.2 การทดสอบหาปริมาณของแข็งคงเหลือ

1. ชั่งน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจล จากข้อ 3.5 (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
2. แช่ฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น และสารละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ดังนี้
 - น้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 - สารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3. นำฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้ไปอบให้แห้ง

4. ชั่งน้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือโดยใช้สูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ} = \frac{\text{น้ำหนักของฟิล์มไฮโดรเจลที่อบแห้ง} \times 100\%}{\text{น้ำหนักของฟิล์มไฮโดรเจลเริ่มต้น}}$$

6. แต่ละสูตรทำซ้ำ 3 ซ้ำงาน

3.6.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% (เก็บฟิล์มที่แห้งในเดซิเคเตอร์ที่มีซิลิกาเจล) และ 80% (เก็บฟิล์มในเดซิเคเตอร์ที่มีสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟตที่อิ่มตัว) ก่อนนำมาทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ตามมาตรฐาน ASTM D-882 [40] ที่มีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

ลักษณะชิ้นงาน	รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด	: 50×15 mm ²
อัตราเร็วในการดึง		: 50 mm/min
Load cell		: 100 N
ความยาวระยะจับชิ้นงาน (Gauge length)		: 30 mm
จำนวนชิ้นงาน		: 5 ชิ้นงาน



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด ค่ามอดุลัสของยัง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{ความแข็งแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load)} = \frac{F}{A}$$

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

(ที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียดในช่วง 1-3%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) จะ = $\frac{l-l_0}{l_0} \times 100$ ซึ่งมีการนำไปใช้

เมื่อ	F	=	แรงดึงยึดชิ้นงาน ณ จุดขาด
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง (mm^2)
	l	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานหลังทำการดึงชิ้นงานตัวอย่าง ณ จุดขาด
	l ₀	=	ระยะห่างระหว่างหัวจับชิ้นงานก่อนดึงชิ้นงาน (Gauge length) เท่ากับ 30 mm

จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (ANOVA) และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Tukey's Studentized Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติการด้านทานน้ำของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินเนต (Alginate , A) และแซนแทนกัม (Xanthan gum , X) โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง Alginate : Xanthan gum เท่ากับ 100:0, 95:5 และ 90:10 โดยน้ำหนัก เชื่อมโยงทางประจุด้วยโลหะไอออน โดยมีการเชื่อมโยง 2 ระบบ คือ 1) การเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวในขณะที่ขึ้นรูปฟิล์มด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 10, 15 และ 20 มิลลิลิตร และความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ 2) นำฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วมาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ นำฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้ไปศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ (pH = 1.2, 4, 7 และ 9.6) หาปริมาณของแข็งคงเหลือ (Solid remain) และทดสอบสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) สูตรฟิล์มไฮโดรเจลต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สูตรฟิล์มไฮโดรเจลที่ใช้ในการศึกษา

สูตร	องค์ประกอบ (g)		ความเข้มข้น CaCl ₂ (M)	ปริมาตร CaCl ₂ (ml)	ความเข้มข้น Fe ₂ (SO ₄) ₃
	A	X			
A100X0-Ca000	100	0	0	0	0
A95X5-Ca000	95	5			
A90X10-Ca000	90	10			
A100X0-Ca120	100	0	0.01	20	0
A95X5-Ca120	95	5			
A90X10-Ca120	90	10			
A100X0-Ca210	100	0	0.02	10	0
A95X5-Ca210	95	5			
A90X10-Ca210	90	10			
A100X0-Ca215	100	0	0.02	15	0
A95X5-Ca215	95	5			
A90X10-Ca215	90	10			

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

สูตร	องค์ประกอบ (g)		ความเข้มข้น CaCl ₂ (M)	ปริมาตร CaCl ₂ (ml)	ความเข้มข้น Fe ₂ (SO ₄) ₃
	A	X			
A100X0-Ca220	100	0	0.02	20	0
A95X5-Ca220	95	5			
A90X10-Ca220	90	10			
A100X0-Ca310	100	0	0.03	10	0
A95X5-Ca310	95	5			
A90X10-Ca310	90	10			
A100X0-Ca220Fe01	100	0	0.02	20	0.01
A95X5-Ca220Fe01	95	5			
A90X10-Ca220Fe01	90	10			
A100X0-Ca220Fe02	100	0	0.02	20	0.02
A95X5-Ca220Fe02	95	5			
A90X10-Ca220Fe02	90	10			
A100X0-Ca220Fe05	100	0	0.02	20	0.05
A95X5-Ca220Fe05	95	5			
A90X10-Ca220Fe05	90	10			
A100X0-Ca220Fe10	100	0	0.02	20	0.1
A95X5-Ca220Fe10	95	5			
A90X10-Ca220Fe10	90	10			
A100X0-Ca220Fe25	100	0	0.02	20	0.25
A95X5-Ca220Fe25	95	5			
A90X10-Ca220Fe25	90	10			
A100X0-Ca220Fe50	100	0	0.02	20	0.5
A95X5-Ca220Fe50	95	5			
A90X10-Ca220Fe50	90	10			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยง ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

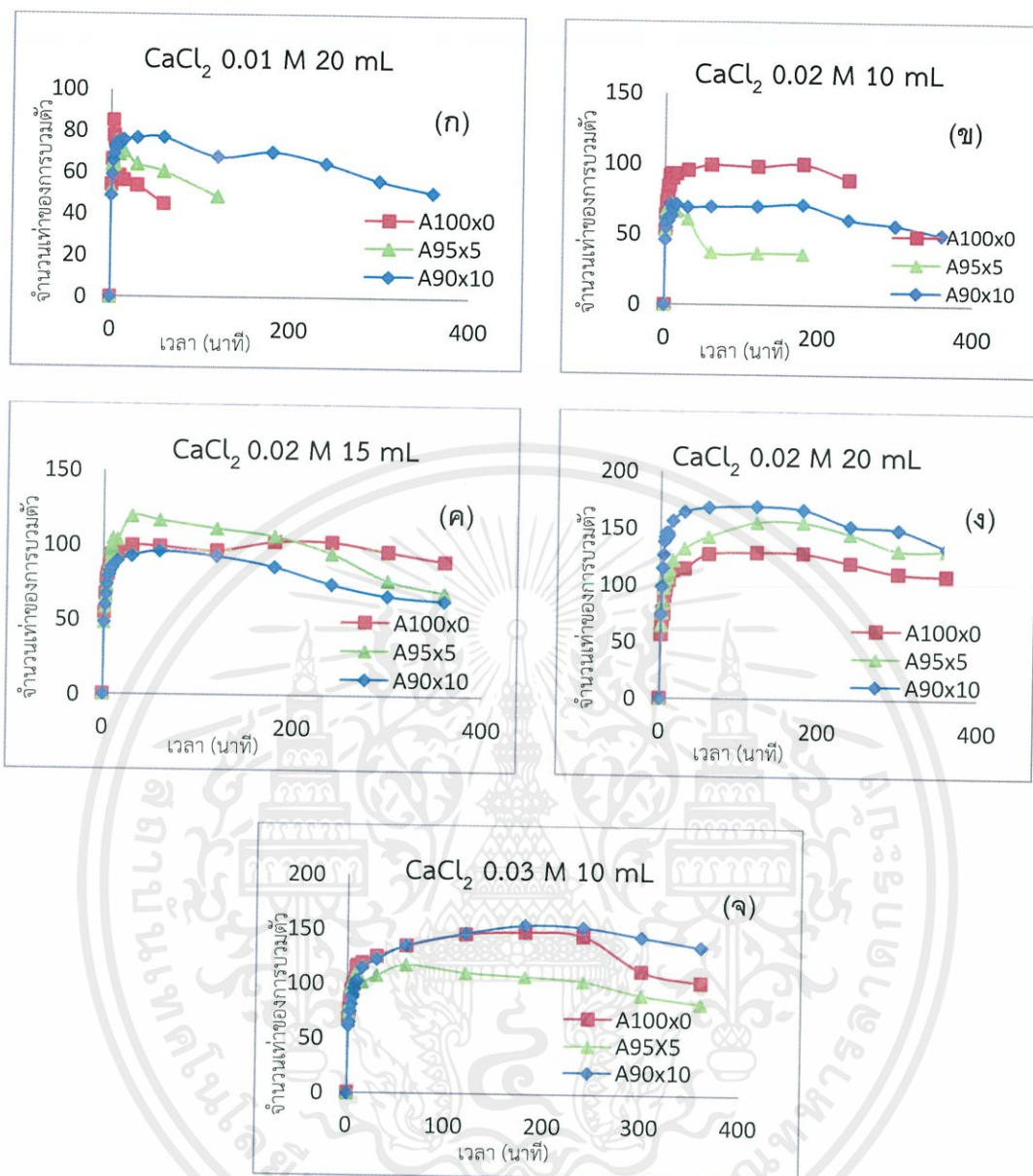
อัลจินตและแซนแทนกัมเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลซึ่งจัดเป็นพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ เมื่อนำมาสังเคราะห์จะมีลักษณะเป็นแบบอินเทอร์เพเนตรตติงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (IPN) ที่สายโซ่ของอัลจินตและแซนแทนกัมเกี่ยวพันกันอยู่และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในโครงสร้างที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันหรือเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี แต่มีความสามารถในการละลายแตกต่างกันซึ่งขึ้นกับน้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้น โดยอัลจินตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี ส่วนแซนแทนกัมละลายน้ำได้ยากแต่บวมตัวได้ดี เมื่อนำมาทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยฟิล์มยังไม่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต พบว่าฟิล์มที่เกิดการเสียสภาพตั้งแต่เวลา 15 วินาทีแรก โดยฟิล์มสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินตต่อแซนแทนกัมสูงจะมีค่าการบวมตัวสูงและเสียสภาพเร็วกว่าฟิล์มสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินตต่อแซนแทนกัมต่ำ เนื่องจากอัลจินตมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าแซนแทนกัมจึงละลายน้ำได้ง่ายกว่าแต่หลังจาก 15 วินาที น้ำที่เพิ่มมากขึ้นภายในฟิล์มจะเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ซึ่งยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างของทั้งอัลจินตและแซนแทนกัม ทำให้พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเกิดการละลายออกมา จึงไม่สามารถหาค่าการบวมตัวและปริมาณของแข็งคงเหลือได้

4.2 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลแบบเชื่อมโยงขั้นตอนเดียว

4.2.1 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมฟิล์มในขณะขึ้นรูปที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 10, 15 และ 20 มิลลิลิตร และความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ภายใต้อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ฟิล์มที่เตรียมได้นำมาศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

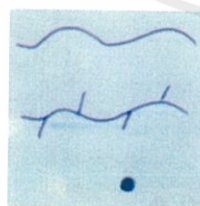


รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ; (ก) CaCl_2 0.01 M ปริมาตร 20 mL (ข) CaCl_2 0.02 M ปริมาตร 10 mL (ค) CaCl_2 0.02 M ปริมาตร 15 mL (ง) CaCl_2 0.02 M ปริมาตร 20 mL และ (จ) CaCl_2 0.03 M ปริมาตร 10 mL

รูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบพฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นของฟิล์มไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในอัตราส่วนความเข้มข้นและปริมาณที่ต่างกัน ซึ่งการเชื่อมโยงที่ไม่ต่างกันทำให้เกิดขึ้นทำให้โครงสร้างของฟิล์มไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้สามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้าง เนื่องจากสารตั้งต้นถูกเชื่อมโยงเข้าไว้ด้วยกันทำให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายไม่ให้ละลายออกไปกับน้ำ โดยพบว่าที่

สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร (AX-Ca120) ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (AX-Ca210) และความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 15 มิลลิลิตร (AX-Ca215) พฤติกรรมการบวมตัวเข้าสู่ค่าสมดุลแล้วค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งแสดงถึงการเสถียรภาพของฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงและทำให้พอลิเมอร์ละลายออกไป ซึ่งพบพฤติกรรมดังกล่าวในทั้ง 3 สูตรของฟิล์มไฮโดรเจลคือ A100X0, A95X5 และ A90X10

จากโครงสร้างของอัลจินเตและแซนแทนกัม ที่มีหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) และมีหมู่ไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) โดยสามารถเกิดการเชื่อมโยงกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และเกิดพันธะไอออนิกกับสารละลายโลหะไอออนชนิดต่างๆ ได้ การเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นทั้งสองแบบนี้ทำให้โครงสร้างของไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย แสดงดังรูปที่ 4.2 โครงสร้างดังกล่าวช่วยให้ไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างได้เพราะสารตั้งต้นถูกเชื่อมโยงไว้ด้วยกันไม่ให้ละลายออกไปกับน้ำหรือสารละลายต่างๆ แต่การเชื่อมโยงดังกล่าวสามารถเกิดการผ่นกลับได้ คือเมื่อน้ำแทรกเข้าไปในโครงสร้างทำให้พันธะถูกทำลาย พอลิเมอร์จึงเกิดการละลายออก เป็นผลทำให้ไฮโดรเจลเกิดการเสถียรภาพ



สายโซ่ของอัลจินเต

สายโซ่ของแซนแทนกัม

แคลเซียมไอออน

รูปที่ 4.2 การเชื่อมโยงโครงสร้างของอัลจินเตและแซนแทนกัมด้วยโลหะไอออน (Ca^{2+})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเสถียรภาพของฟิล์มไฮโดรเจลเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีการละลายออกของสารตั้งต้นที่มากกว่าการดูดซับน้ำไว้ในโครงสร้างของฟิล์ม โมเลกุลของน้ำเข้าล้อมรอบสายโซ่โมเลกุลของสารตั้งต้นมากขึ้น ทำให้ระยะห่างของหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิเลตกับแคลเซียมไอออนห่างจากกัน จนกระทั่งพันธะไฮโดรเจนและพันธะไอออนิกระหว่างสายโซ่ของสารตั้งต้นถูกทำลายลง ทำให้แคลเซียมไอออนบางส่วนหลุดออกมาจากโครงสร้างไฮโดรเจล เป็นผลทำให้ค่าการบวมตัวลดลงและฟิล์มเริ่มเกิดการเสถียรภาพ

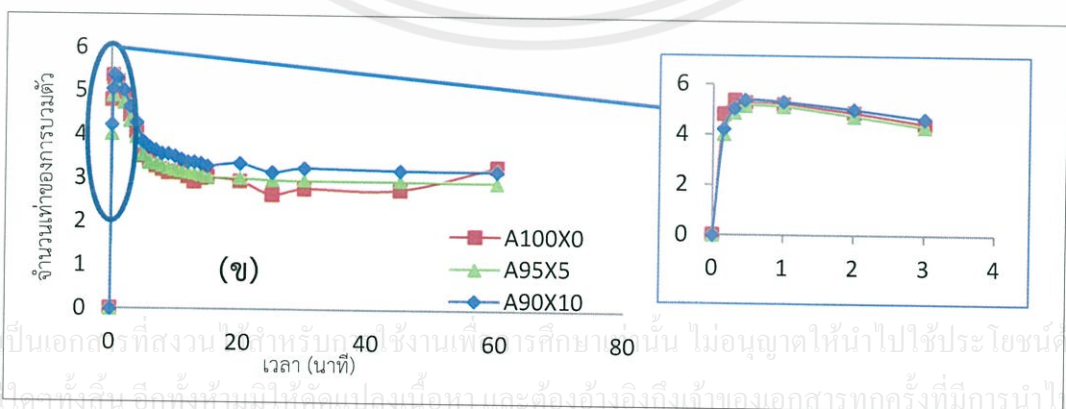
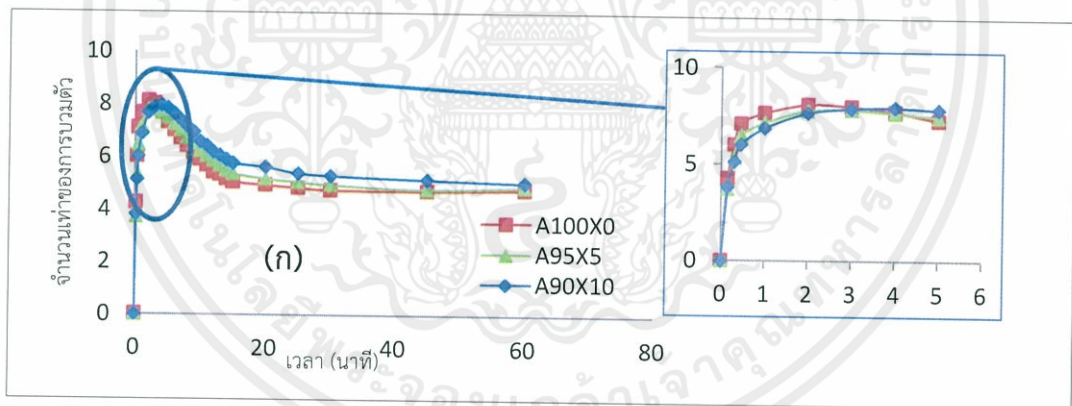
จากรูปที่ 4.1 เมื่อความเข้มข้นและปริมาณของสารเชื่อมโยงมากขึ้น (AX-Ca220 และ AX-Ca310) ฟิล์มสามารถบวมตัวได้เพิ่มขึ้นจึงเข้าสู่ค่าสูงสุดและคงที่ตลอดการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) จนครบเวลา 6 ชั่วโมง เนื่องจากแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีความเข้มข้นและปริมาณมากพอที่จะเกิดการเชื่อมโยงทางประจุกับหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจินตและแทนแทนกัมที่มากเพียงพอ เมื่อฟิล์มไฮโดรเจลดูดซับน้ำ พันธะเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้เนื้อฟิล์มไม่ละลายออก ดังนั้นจากพฤติกรรมการบวมตัวดังกล่าว ความเข้มข้นและปริมาณที่เหมาะสมในการเชื่อมโยงของฟิล์มทั้ง 3 สูตร คือ AX-Ca220 และ AX-Ca310 โดยงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยเลือกใช้ในการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร (AX-Ca220) เนื่องจากมีปริมาณของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สูงกว่าสามารถเกิดการกระจายตัวในสารตั้งต้นได้ดี ทำให้มีประสิทธิภาพการเชื่อมโยงฟิล์มสูงขึ้น ส่วนการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร (AX-Ca310) มีปริมาณของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์น้อยจึงมีโอกาสเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอได้มาก ทำให้ประสิทธิภาพการเชื่อมโยงด้อยกว่า ซึ่งจะส่งผลถึงสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจล โดยในหัวข้อต่อไปนี้จะนำฟิล์มสูตร A100X0-Ca220, A95X5-Ca220 และ สูตร A90X10-Ca220 มาพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำโดยนำมาทำการเชื่อมโยง 2 ระบบ

4.2.2 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

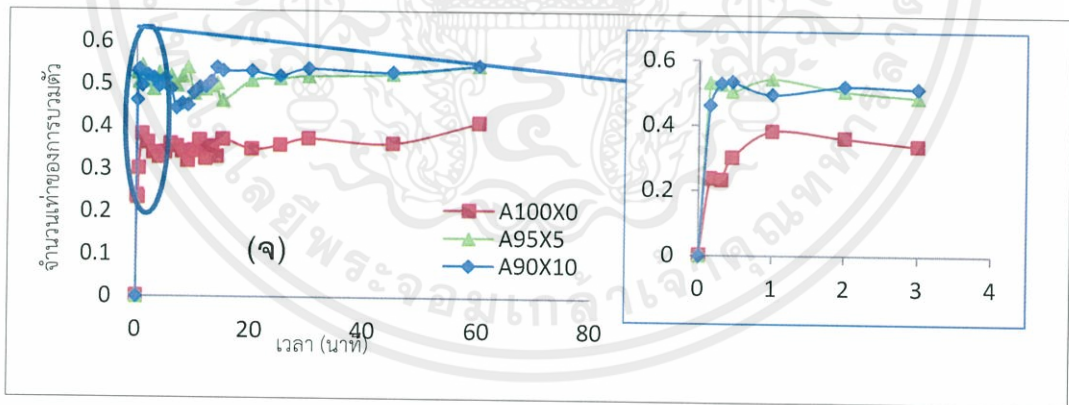
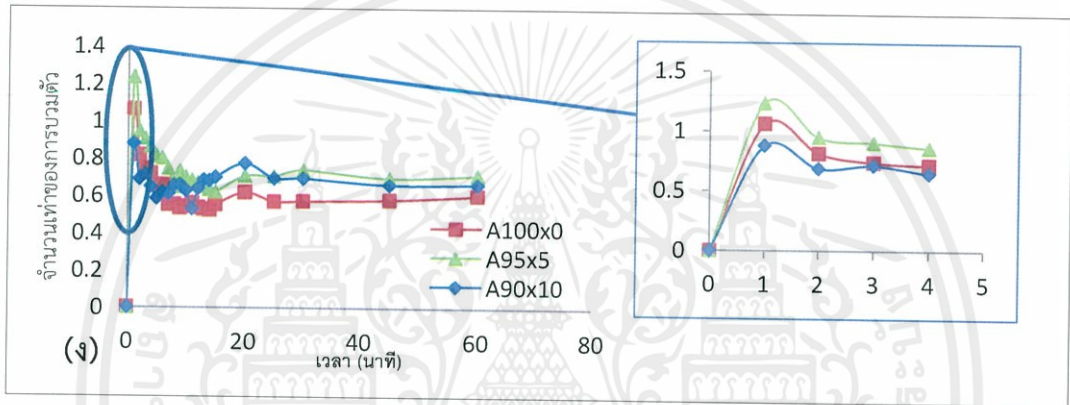
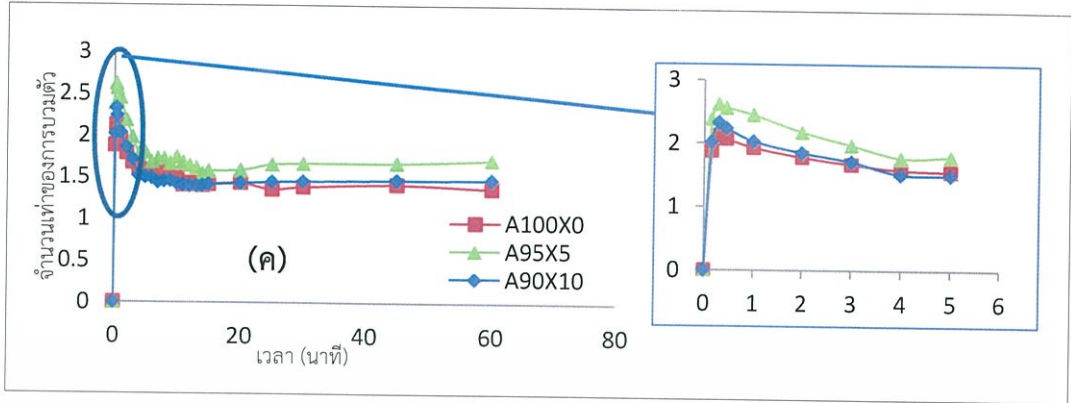
เนื่องจากข้อจำกัดด้านการกระจายตัวและการทำปฏิกิริยาของสารเชื่อมโยงทำให้ไม่สามารถใช้ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่สูงกว่า 0.03 โมลาร์ได้ เพราะการเชื่อมโยงที่รวดเร็วของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ทำให้ไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มที่สม่ำเสมอได้ และการใช้สารเชื่อมโยงสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเติมลงในเนื้อพอลิเมอร์ก่อนการขึ้นรูปก็เช่นเดียวกับกรณีของการใช้สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ไม่สามารถขึ้นรูปได้เช่นกัน เนื่องจากเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นไตรวาเลนต์มีการเชื่อมโยงทางประจุได้ 3 พันธะ ซึ่งการเชื่อมโยงจะหนาแน่นและแข็งแรงกว่าการใช้แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งเป็นไดวาเลนต์ ทำให้ความแข็งแรงของฟิล์มไฮโดรเจลจากข้อ 4.2.1 ไม่เพียงพอจึงต้องมีการพัฒนาฟิล์มไฮโดรเจลเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำที่สูงขึ้น จึงได้ศึกษา

การเตรียมฟิล์มโดยนำฟิล์มไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร แล้วมาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ โดยในเบื้องต้นเป็นการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลสูตร A100X0-Ca220, A95X5-Ca220 และ สูตร A90X10-Ca220 ในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มฟิล์มลงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

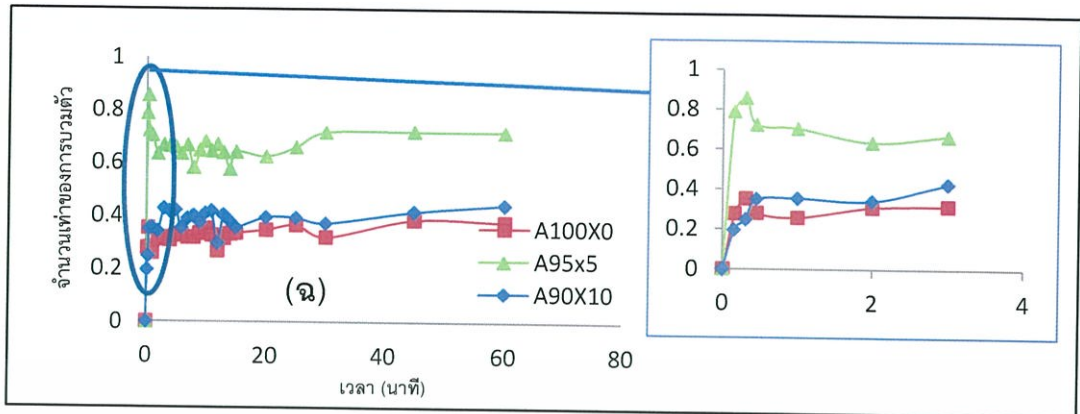
จากรูปที่ 4.3 (ก)-(ค) แสดงถึงค่าการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ใช้เป็นสารเชื่อมโยง เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการจุ่มฟิล์มไฮโดรเจล พบว่าที่เวลาประมาณ 1 นาทีฟิล์มไฮโดรเจลมีค่าการบวมตัวในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตทุกความเข้มข้นสูงสุด กล่าวคือฟิล์มไฮโดรเจลสามารถดูดซับสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตได้มากที่สุด และถ้าให้เวลาในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตมากกว่า 1 นาที พบว่าค่าการบวมตัวลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งแสดงถึงฟิล์มเกิดการละลายบางส่วน เพื่อป้องกันไม่ให้ฟิล์มเสียหายในขณะที่เชื่อมโยงแบบจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้นต่างๆ และเพื่อควบคุมระยะเวลาสัมผัสของฟิล์มกับสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตให้มีระยะเวลาเท่ากัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เวลา 1 นาที ในการจุ่มฟิล์มไฮโดรเจลสูตร A100X0-Ca220, A95X5-Ca220 และ สูตร A90X10-Ca220 ในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตทุกความเข้มข้น เพื่อเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยงภายในเนื้อฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและขอแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



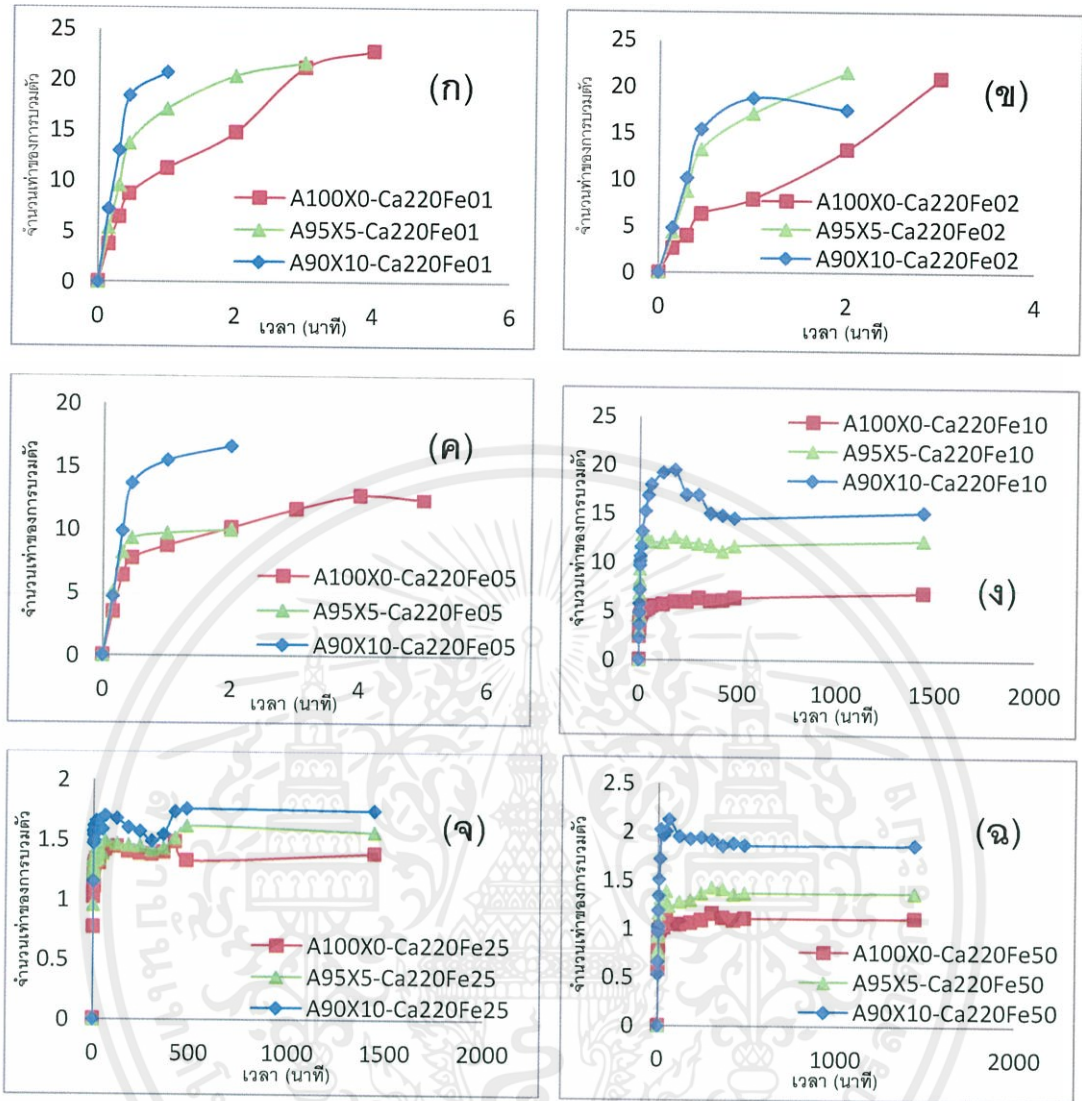
รูปที่ 4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ; (ก) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.01 M (ข) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.02 M (ค) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.05 M (ง) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.1 M (จ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.5 M

4.3 การทดสอบ

4.3.1 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินต (A) และแซนแทนกัม (X) ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ A:X และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น เปรียบเทียบการเชื่อมโยงฟิล์มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.01 M (ข) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.02 M (ค) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.05 M (ง) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.1 M (จ) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.5 M

จากรูปที่ 4.4 (ก)-(ฉ) เป็นการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างอัลจินเตตต่อแซนแทนกัม และความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเท่ากัน พบว่าสูตร A100X0-Ca220 มีค่าการบวมตัวน้อยกว่าสูตร A95X5-Ca220 และสูตร A90X10-Ca220 เนื่องจากในโครงสร้างโมเลกุลของอัลจินเตตมีปริมาณหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) (1 หมู่ต่อ 1 หน่วยซ้ำ) บนสายโซ่โมเลกุลมากกว่าบนสายโซ่ของแซนแทนกัม (ประมาณ 2 หมู่ต่อ 5 หน่วยซ้ำ) ทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตกับโลหะไอออน (Ca^{2+} , Fe^{3+}) ได้มากกว่าสูตรที่มีปริมาณอัลจินเตตน้อย เป็นผลให้เมื่อปริมาณของอัลจินเตตลดลงความหนาแน่นการเชื่อมโยงจะลดลง เมื่อการเชื่อมโยง

ของโครงสร้างลดลง ทำให้ค่าการบวมตัวสูงขึ้น และเมื่อโมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปในโครงสร้างได้มากพอ พันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้างจะเกิดการผ่นกลับ ส่งผลให้เจลเริ่มเกิดการเสียสภาพ

เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต พบว่าค่าการบวมตัวในน้ำกลั่นของฟิล์มไฮโดรเจลมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพอร์ริกซัลเฟตมากขึ้น กล่าวคือ เมื่อใช้สารละลายเพอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ มีค่าการบวมตัวสูงสุดอยู่ประมาณ 20 เท่า แต่เมื่อใช้สารละลายเพอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ค่าการบวมตัวจะอยู่ประมาณ 1-2 เท่า เนื่องจากสารละลายเพอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นต่ำๆ ทำให้การเชื่อมโยงในฟิล์มไฮโดรเจลต่ำหรือความหนาแน่นการเชื่อมโยงน้อยจึงยึดโมเลกุลของสารตั้งต้นได้ไม่ดี ทำให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างได้ง่าย ค่าการบวมตัวจึงสูงฟิล์มเกิดการเสียสภาพได้ง่าย และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพอร์ริกซัลเฟตเพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย น้ำจึงแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างได้ยาก ทำให้ฟิล์มเกิดการบวมตัวได้ยากขึ้น โดยพบว่าฟิล์มสูตรที่จุ่มสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01, 0.02 และ 0.05 โมลาร์ ฟิล์มเกิดการเสียสภาพภายในเวลารวดเร็วจึงบันทึกค่าการบวมตัวได้เพียงไม่เกิน 5 นาที ในขณะที่ฟิล์มสูตรที่จุ่มสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ ฟิล์มมีความทนทาน เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง

เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเพอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นต่างๆ หลังแช่น้ำกลั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้ง พบว่าฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเพอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.01, 0.02 และ 0.05 โมลาร์ ไม่มีของแข็งคงเหลือ เนื่องจากฟิล์มเสียสภาพก่อนเวลา 24 ชั่วโมง ทั้งนี้เป็นเพราะยังไม่มีแรงยึดเหนี่ยวของสายโซ่มากพอเมื่อน้ำแทรกเข้าไปในโมเลกุลของพอลิเมอร์ในปริมาณมากพอ จึงทำให้ฟิล์มละลายออกมาและเสียสภาพได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อฟิล์มไฮโดรเจลมีความเข้มข้นของสารละลายเพอร์ริกซัลเฟตเพิ่มมากขึ้น คือ 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ พบว่าฟิล์มที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าอยู่ในช่วง 84.8-94.6% สรุปตารางที่ 4.2 นั่นคือเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพอร์ริกซัลเฟตเพิ่มขึ้น เกิดการเชื่อมโยงมากพอจึงช่วยให้ฟิล์มคงทนต่อน้ำทำให้พอลิเมอร์เกิดการละลายออกได้น้อยและช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

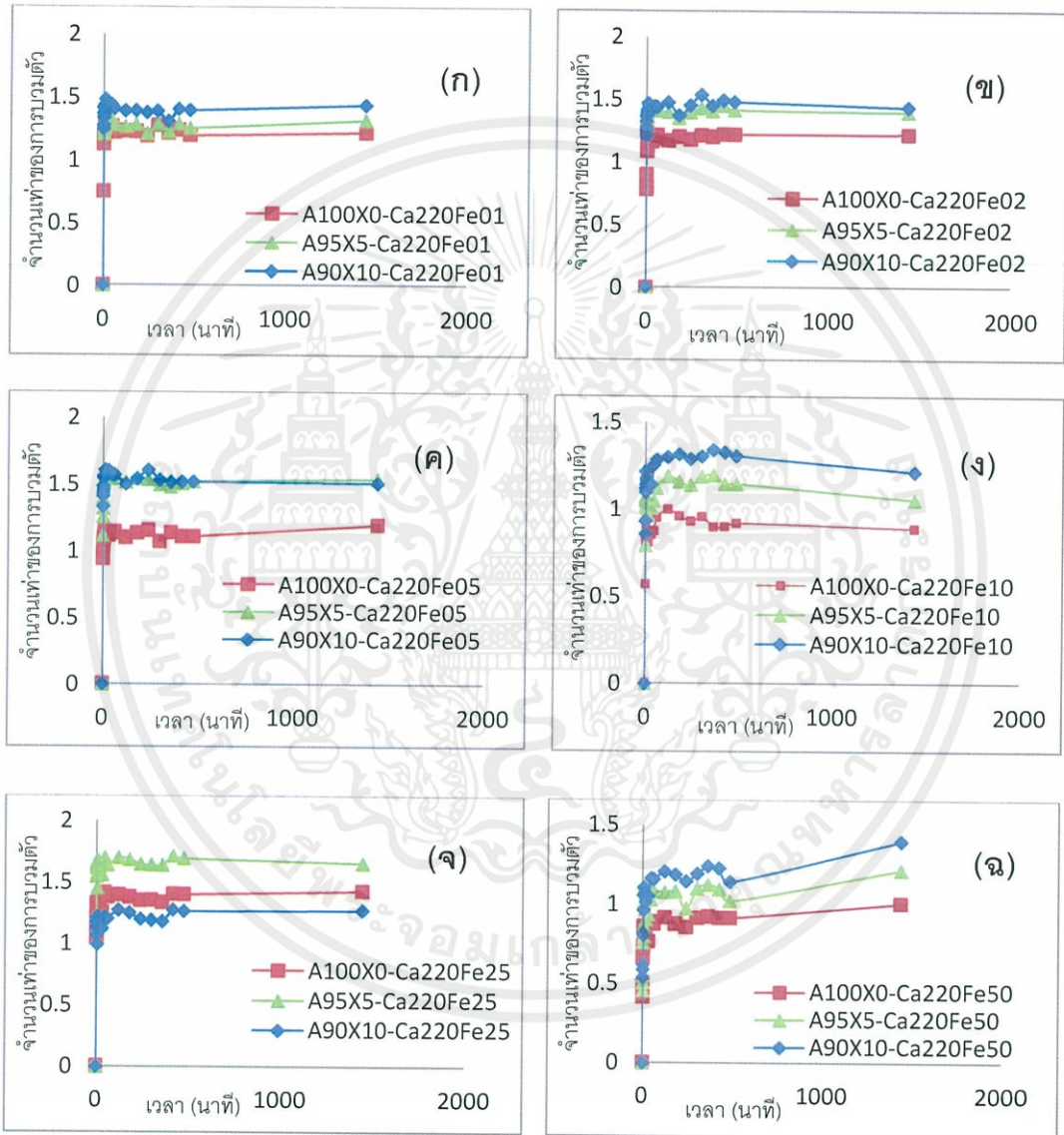
ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์ของแข็งของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

สูตร	ของแข็ง (%)
A100x0-Ca220Fe10	87.4
A95x5-Ca220Fe10	88.9
A90x10-Ca220Fe10	84.8
A100x0-Ca220Fe25	94.5
A95x0-Ca220Fe25	94.6
A90x10-Ca220Fe25	92.3
A100x0-Ca220Fe50	92.0
A95x5-Ca220Fe50	96.3
A90x10-Ca220Fe50	93.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินต (A) และแซนแทนกัม (X) ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ A:X และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 เปรียบเทียบการเชื่อมโยงฟิล์มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) Fe₂(SO₄)₃ 0.01 M เอกสารนี้ (ข) Fe₂(SO₄)₃ 0.02 M (ค) Fe₂(SO₄)₃ 0.05 M (ง) Fe₂(SO₄)₃ 0.1 M (จ) Fe₂(SO₄)₃ 0.25 M และ (ฉ) Fe₂(SO₄)₃ 0.5 M ไม่ว่าการใช้ฟิล์มที่มีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 (ก)-(จ) แสดงผลการศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจล สูตร A100X0-Ca220, A95X5-Ca220 และสูตร A90X10-Ca220 โดยเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นต่างกัน ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 พบว่าการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลทุกสูตรมีค่าการบวมตัวต่ำกว่าในน้ำกลั่นอย่างมาก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 1.5 เท่า โดยสูตรที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตมาก ความหนาแน่นการเชื่อมโยงมากขึ้นทำให้ฟิล์มเกิดการบวมตัวน้อย และเกิดการเสียสภาพข้าง ในทางกลับกันสูตรที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จะมีค่าการบวมตัวสูงกว่า เนื่องจากมีความหนาแน่นการเชื่อมโยงน้อยจึงยืดโยงโมเลกุลของสารตั้งต้นได้ต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินตต่อแซนแทนกัมที่เปลี่ยนแปลง พบว่าค่าการบวมตัวของสูตร A100X0 < A95X5 < A90X10 แสดงถึงประสิทธิภาพการเชื่อมโยงของ Fe^{3+} ในอัลจินตสูงกว่าในแซนแทนกัม เนื่องจากปริมาณหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) ต่อหน่วยซ้ำของอัลจินตมีมากกว่าในแซนแทนกัม และเมื่อพิจารณาเสถียรภาพในการบวมตัว พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลทุกสูตรสามารถบวมตัวและคงสภาพได้อย่างน้อย 24 ชั่วโมง ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อฟิล์มไฮโดรเจลบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 (สภาวะกรด) โปรตอน (H^+) สามารถเข้าจับกับหมู่คาร์บอกซิเลต (COO^-) ที่อยู่บนสายโซ่ของอัลจินตและแซนแทนกัม ทำให้สารทั้งสองมีโครงสร้างที่อยู่ในรูปของกรดซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ละลายน้ำจึงไม่เอื้อต่อการบวมตัวของเจลทำให้เจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง ดังนั้นการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 จึงมีค่าต่ำกว่าที่สภาวะเป็นกลางและเบสอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่เหลือของฟิล์มไฮโดรเจลหลังแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้ง พบว่าฟิล์มที่ได้มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งที่เหลือไม่แตกต่างกันมากและมีค่าสูงอยู่ในช่วง 77.4-96.1% แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต และอัตราส่วนของอัลจินตต่อแซนแทนกัมที่เปลี่ยนแปลง แสดงถึงสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตสามารถเชื่อมโยงโมเลกุลของอัลจินตและแซนแทนกัม และมีเสถียรภาพที่ดีในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ส่งผลให้ฟิล์มมีความคงทนไม่เสียรูปร่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

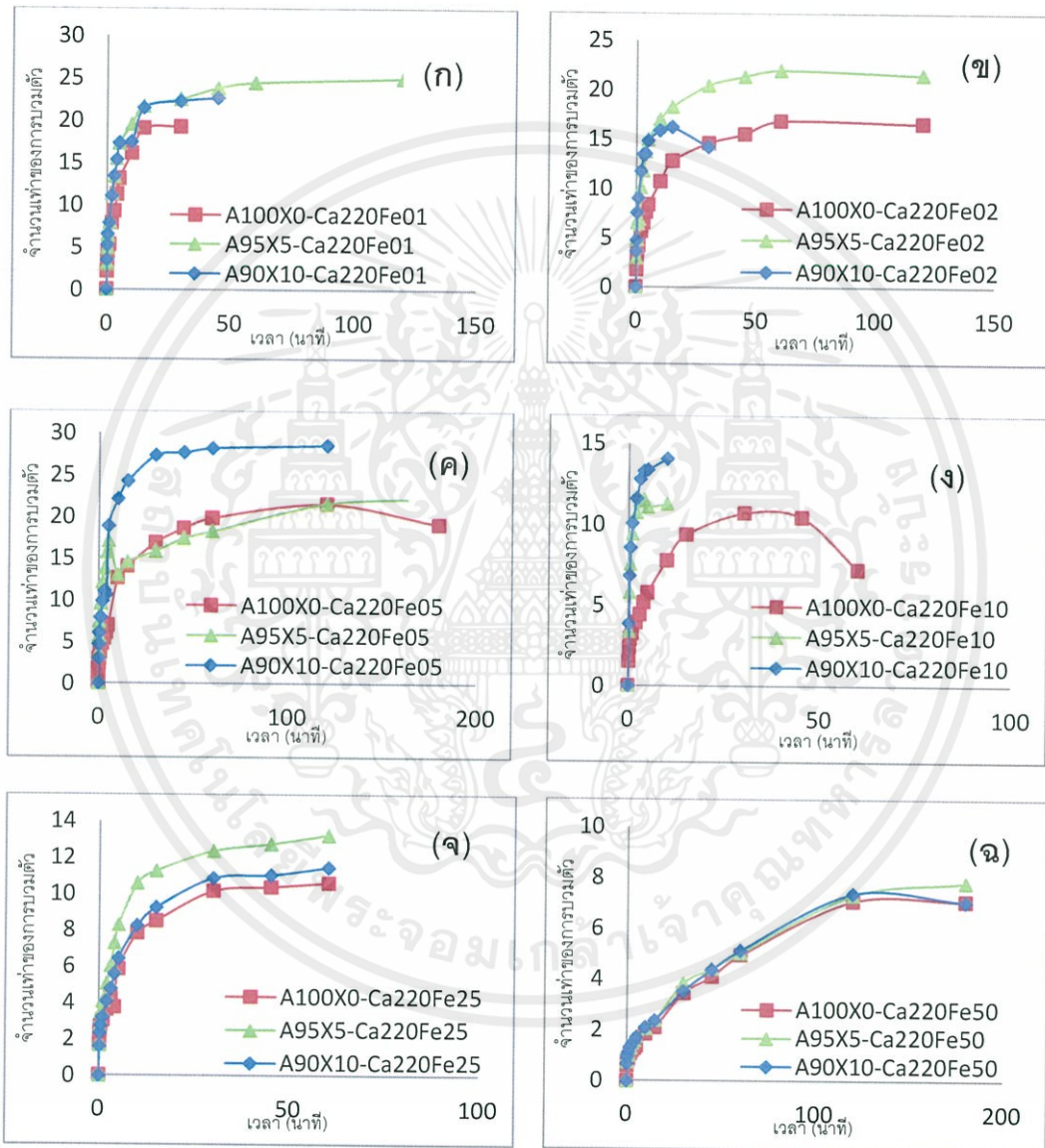
ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

สูตร	ของแข็งคงเหลือ (%)
A100X0-Ca220Fe01	80.7
A95X5-Ca220Fe01	77.4
A90X10-Ca220Fe01	80.6
A100X0-Ca220Fe02	83.5
A95X5-Ca220Fe02	82.7
A90X10-Ca220Fe02	84.2
A100X0-Ca220Fe05	83.7
A95X5-Ca220Fe05	92.4
A90X10-Ca220Fe05	80.6
A100X0-Ca220Fe10	85.3
A95X5-Ca220Fe10	78.9
A90X10-Ca220Fe10	82.3
A100X0-Ca220Fe25	89.5
A95X0-Ca220Fe25	79.1
A90X10-Ca220Fe25	96.1
A100X0-Ca220Fe50	83.3
A95X5-Ca220Fe50	87.7
A90X10-Ca220Fe50	88.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินเนต (A) และแซนแทนกัม (X) ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ A:X และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 เปรียบเทียบการ

เชื่อมโยงฟิล์มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) Fe₂(SO₄)₃ 0.01 M (ข) Fe₂(SO₄)₃ 0.02 M (ค) Fe₂(SO₄)₃ 0.05 M (ง) Fe₂(SO₄)₃ 0.1 M (จ) Fe₂(SO₄)₃ 0.25 M และ (ฉ) Fe₂(SO₄)₃ 0.5 M

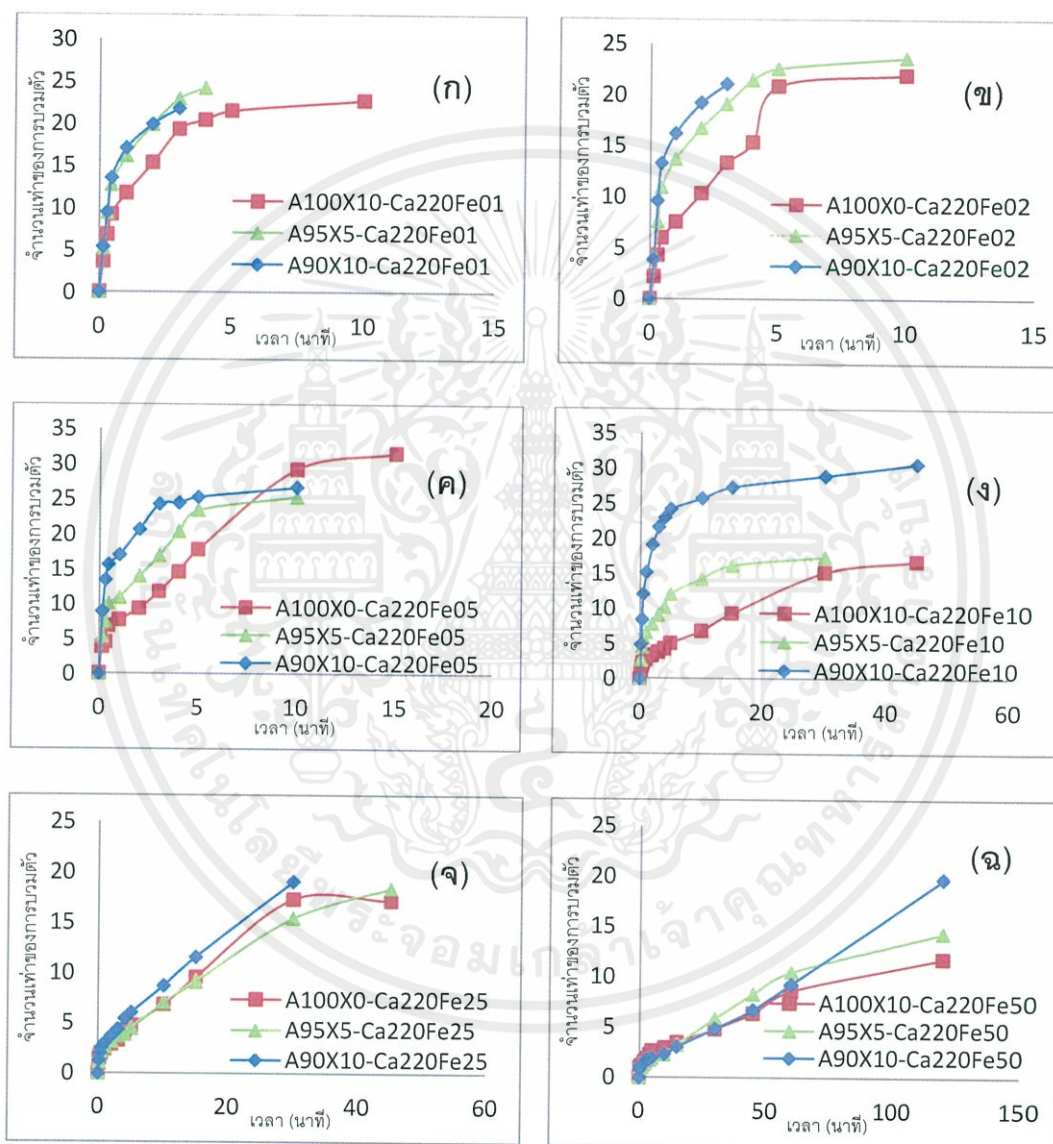
จากรูปที่ 4.6 (ก)-(ฉ) เป็นการทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจล สูตร A100X0-Ca220, A95X5-Ca220 และสูตร A90X10-Ca220 เมื่อเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นต่างกันในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 พบว่าฟิล์มสูตรที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด และฟิล์มสูตรที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ มีค่าการบวมตัวสูง ซึ่งเหตุผลเช่นเดียวกับพฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 นั่นคือเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตมาก ความหนาแน่นการเชื่อมโยงจะมากขึ้น ทำให้มีค่าการบวมตัวต่ำ และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตลดลง ความหนาแน่นการเชื่อมโยงจะน้อยลงและยึดโมเลกุลของสารตั้งต้นได้ไม่ดี ทำให้สารตั้งต้นและสารเชื่อมโยงละลายออก ค่าการบวมตัวจึงสูงขึ้นและฟิล์มเกิดการเสียหาย

เมื่อพิจารณาความสามารถในการคงสภาพของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลสูตร A100X0-Ca220Fe50, A95X5-Ca220Fe50 และสูตร A90X10-Ca220Fe50 สามารถคงสภาพในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 ได้นานที่สุดเป็นเวลา 180 นาที โดยมีเสถียรภาพต่ำกว่าในสภาวะสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 มาก เนื่องจากในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 มีโซเดียมไอออน (Na^+) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเมื่อนำฟิล์มไปทดสอบการบวมตัว Na^+ ซึ่งเป็นโมโนวาเลนต์จะเข้าไปแทนที่ Ca^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) ทำให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงและความแข็งแรงลดลง จึงยึดโมเลกุลของสารตั้งต้นได้ไม่ดี ส่งผลให้น้ำแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างได้ง่าย ทำให้ค่าการบวมตัวสูงฟิล์มจึงเกิดการเสียหายได้ง่าย เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ พบว่าไม่มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ เนื่องจากฟิล์มทุกสูตรเสียหายก่อนเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลจากแอ็กจิเนต (A) และแซนแทนกัม (X) ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลจากแอ็กจิเนต (A) และแซนแทนกัม (X) ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ A:X และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 เปรียบเทียบการ

เชื่อมโยงฟิล์มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.01 M (ข)

$Fe_2(SO_4)_3$ 0.02 M (ค) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.05 M (ง) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.1 M (จ) $Fe_2(SO_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ)

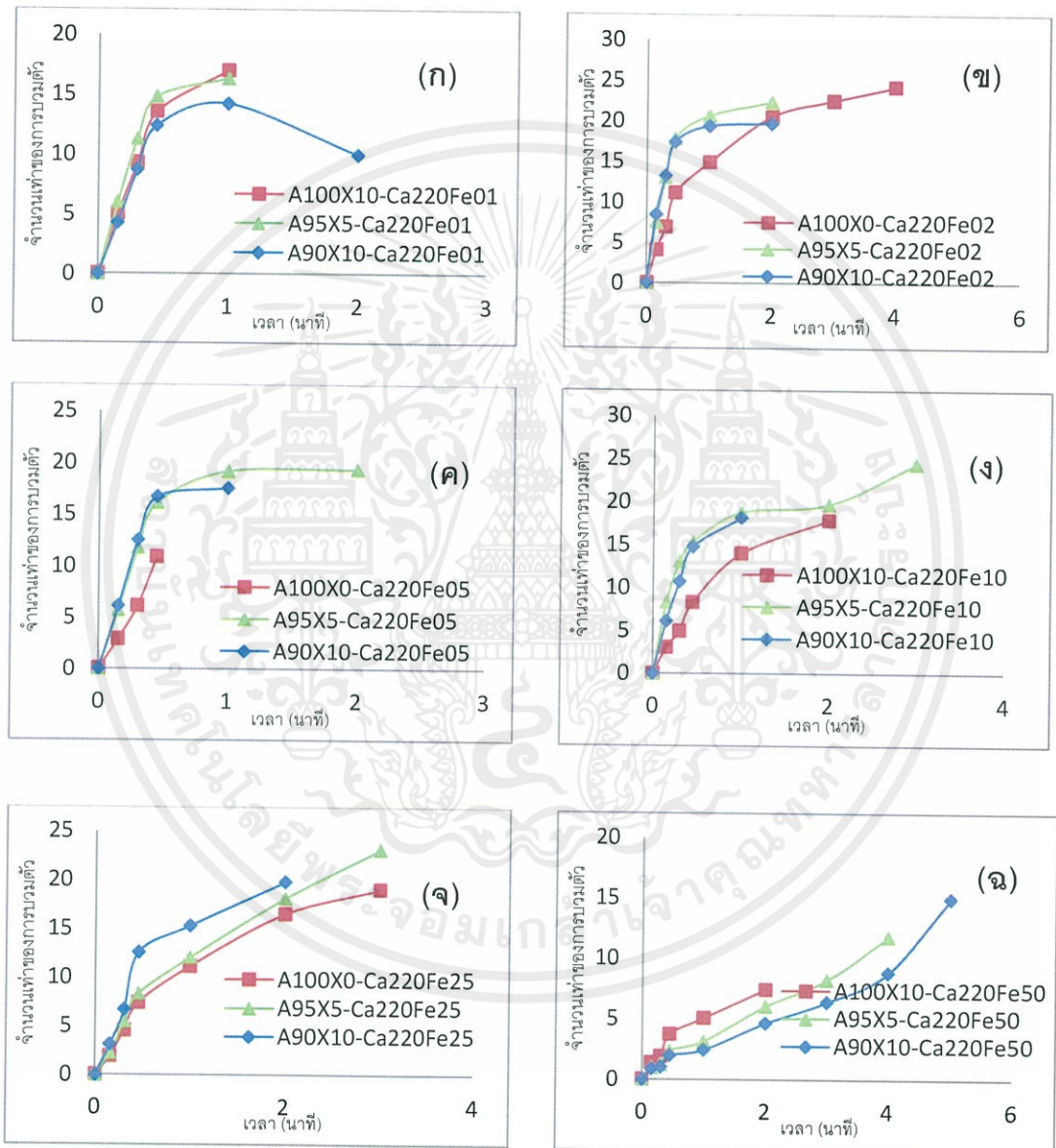
$Fe_2(SO_4)_3$ 0.5 M

จากรูปที่ 4.7 (ก)-(ฉ) เป็นการทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลสูตร A100X0-Ca220, A95X5-Ca220 และสูตร A90X10-Ca220 โดยเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้นต่างกัน พบว่าสูตร A100X0-Ca220Fe50, A95X5-Ca220Fe50 และสูตร A90X10-Ca220Fe50 มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด ซึ่งเหตุผลเช่นเดียวกับการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 และ pH 4 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตมากขึ้น ความหนาแน่นการเชื่อมโยงก็จะมากขึ้น ส่งผลให้การละลายออกของฟิล์มนั้นช้าลง แต่เมื่อพิจารณาเวลาที่ฟิล์มยังคงสภาพในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 นั้น พบว่าฟิล์มสามารถคงสภาพได้นานสูงสุดเพียง 120 นาที เนื่องจากในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 มีโซเดียมไอออน (Na^+) เป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนประจุกับ Ca^{2+} และ Fe^{3+} ที่ตำแหน่งคาร์บอกซิเลต (COO^-) ได้และที่สภาวะ pH 7 สมดุลระหว่างกรดคาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) และ คาร์บอกซิเลต (COO^-) จะอยู่ในรูปของ COO^- มากกว่าที่สภาวะ pH 4 ดังนั้นโอกาสของการแลกเปลี่ยนประจุจึงเกิดขึ้นได้มากกว่า ทำให้จุดเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลลดลง ส่งผลให้ฟิล์มมีค่าการบวมตัวมากและเกิดการเสียหายได้เร็วกว่าในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 และเมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ พบว่าฟิล์มทุกสูตรไม่มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือเช่นกัน เนื่องจากฟิล์มละลายออกและเสียหายก่อนเวลา 24 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลจากอัลจินต (A) และแซนแทนกัม (X) ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ A:X และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 เปรียบเทียบการ

เชื่อมโยงฟิล์มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ; (ก) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.01 M (ข) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.02 M (ค) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.05 M (ง) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.1 M (จ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.25 M และ (ฉ) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0.5 M

จากรูปที่ 4.8 (ก)-(ฉ) เป็นการทดสอบพฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจล สูตร A100X0-Ca220, A95X5-Ca220 และสูตร A90X10-Ca220 โดยเชื่อมโยงในสารละลายเฟอร์ริก-ซัลเฟตความเข้มข้นต่างกันในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) พบว่าสูตร A100X0-Ca220Fe50, A95X5-Ca220Fe50 และสูตร A90X10-Ca220Fe50 มีค่าการบวมตัวน้อยที่สุด แต่เวลาคงสภาพในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ได้นานที่สุดเพียง 4 นาที ซึ่งมีเหตุผลเช่นเดียวกับการบวมตัวในสภาวะอื่นๆ คือเมื่อปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริก-ซัลเฟตมากขึ้น ความหนาแน่นการเชื่อมโยงก็จะมากขึ้นส่งผลให้การละลายออกของฟิล์มนั้นช้าลง อย่างไรก็ตามการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 มีค่าการบวมตัวสูงและละลายได้ง่ายกว่าสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 และ pH 7 เนื่องจากสมดุลของกรดคาร์บอกซิลิกกับคาร์บอกซิเลตเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของ COO^- มากขึ้น ทำให้ปริมาณของโซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งอยู่ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 เข้าไปแลกเปลี่ยนไอออนกับ Ca^{2+} และ Fe^{3+} ได้มากขึ้น ส่งผลให้จุดเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลลดลง ฟิล์มจึงเกิดการเสียสภาพอย่างรวดเร็ว เมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือ พบว่าฟิล์มทุกสูตรไม่มีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือเช่นกัน เนื่องจากฟิล์มละลายออกและเสียสภาพก่อนเวลา 24 ชั่วโมง

4.4 สมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล

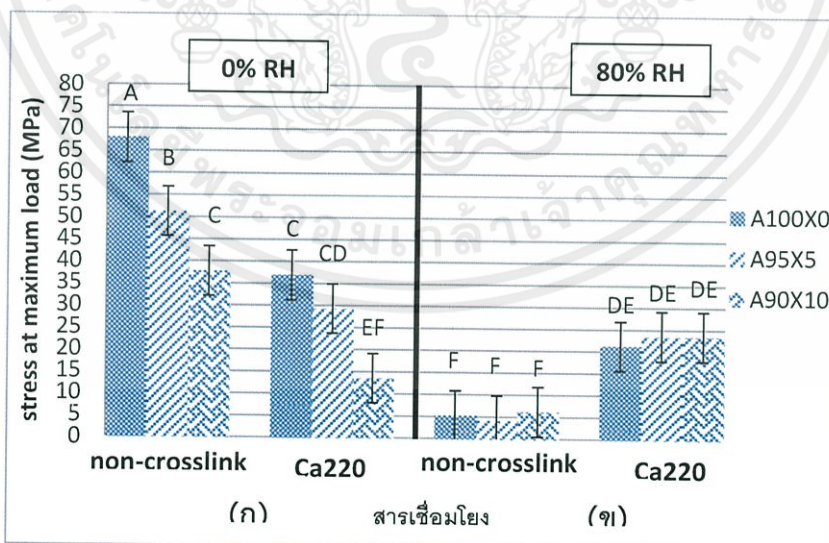
การทดสอบสมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง สูตรที่มีการเชื่อมโยงขั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และสูตรที่มีการเชื่อมโยงสองขั้นตอนโดยการนำฟิล์มไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วมาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยทดสอบใน 2 สภาวะคือ ความชื้นสัมพัทธ์ 0% และความชื้นสัมพัทธ์ 80% มีผลการทดสอบดังนี้

ฟิล์มสูตรเชื่อมโยงขั้นตอนเดียว : สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0%

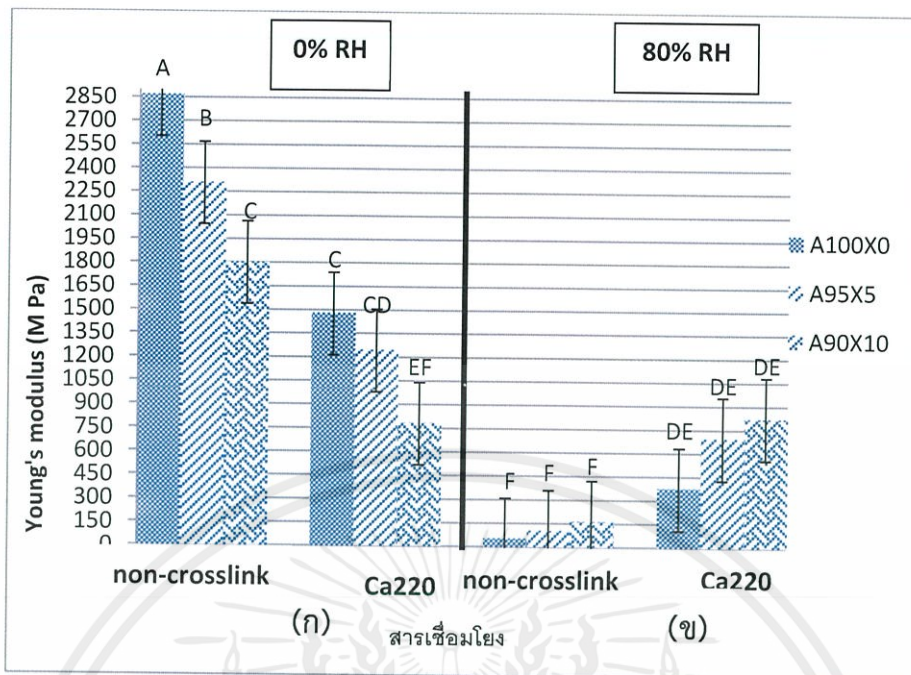
จากการทดสอบสมบัติเชิงกล เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) และมอดุลัสของยัง (Young's modulus) พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยง สูตร A100X0 มีความแข็งแรงสูงที่สุด รองลงมาคือสูตร A95X5 และสูตร A90X10 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มที่มีการผสมระหว่างอัลจินเตและแซนแทนกัมนั้นอาจจะเข้ากันได้ไม่ดีพอ เกิดจุดบกพร่องบริเวณรอยต่อระหว่างสาร 2 ชนิด อีกประการหนึ่งคือ แซนแทนกัมซึ่งเป็นโมเลกุลสายโซ่กิ่งอาจเข้าไปเกี่ยวพันกับสายโซ่อัลจินเตซึ่งเป็นโมเลกุลเชิงเส้น ทำให้การจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบของอัลจินเตด้อยลง ทั้ง 2 กรณีทำให้ความแข็งแรงลดลงและเมื่อให้แรงกับฟิล์มจึงเกิดการฉีกขาดได้

ง่าย และเมื่อเปรียบเทียบฟิล์มไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยงกับฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Ca220) พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยงกลับมีความแข็งแรงสูงกว่าฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงขั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎี (แสดงดังรูปที่ 4.9 (ก) และ 4.10 (ก)) เนื่องจากเมื่อผสมสารเชื่อมโยงสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในไฮโดรเจล ทำให้เกิดการเชื่อมโยงในแต่ละตำแหน่งแบบสุ่ม และฟิล์มเกิดการหดตัวเนื่องจากการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ ซึ่งการเชื่อมโยงเหล่านี้จะไปขัดขวางการจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างของอัลจินต ส่งผลให้พันธะไฮโดรเจนลดลงและทำให้ฟิล์มมีค่าความแข็งแรงลดลง นอกจากนี้ฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงขั้นตอนเดียวยังมีแนวโน้มค่าความแข็งแรงลดลง เมื่ออัตราส่วนของแซนแทนกัมในเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในโครงสร้างของอัลจินตมีหมู่คาร์บอกซิเลต (COO⁻) ในปริมาณที่มากกว่าโครงสร้างของแซนแทนกัมมาก เมื่อลดปริมาณของอัลจินตลงและแทนที่ด้วยแซนแทนกัม จึงทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงลดลง ดังนั้นค่าความแข็งแรงจึงลดลงตามไปด้วย

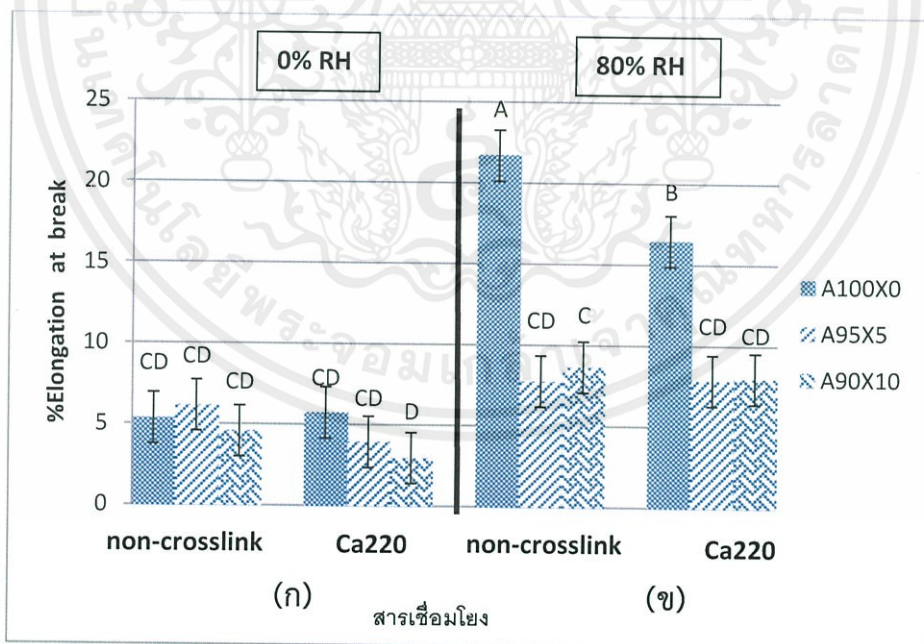
จากการทดสอบสมบัติเชิงกล เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) พบว่าฟิล์มไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยงและที่มีการเชื่อมโยงขั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาตามอัตราส่วนอัลจินตต่อแซนแทนกัม พบว่าสูตร A100X0, A95X5 และสูตร A90X10 ทั้งที่ไม่มีการเชื่อมโยงและเชื่อมโยงขั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ค่าการดึงยืดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากฟิล์มมีความแข็งแรงเปราะมาก ทำให้การเชื่อมโยงไม่ส่งผลต่อค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด แสดงดังรูปที่ 4.11 (ก)



รูปที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด (Stress at maximum load) ของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง และ Ca220 ; (ก) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ (ข) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% ใช้



รูปที่ 4.10 ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่ไม่เชื่อมโยง และ Ca220 ; (ก) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ (ข) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%



รูปที่ 4.11 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของฟิล์มไฮโดรเจลสูตรที่ไม่เชื่อมโยง และ Ca220 ; (ก) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% และ (ข) ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มสูตรเชื่อมโยงชั้นตอนเดียว : สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% กับสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%

จากการทดสอบสมบัติเชิงกล เมื่อพิจารณาความแข็งแรงดึงสูงสุด และมอดุลัสของยัง ทั้งฟิล์มที่ไม่มีการเชื่อมโยงและมีการเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% มีค่าความแข็งแรงสูงกว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% (แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10) เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกในโครงสร้างไฮโดรเจล ซึ่งน้ำทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ทำให้โมเลกุลของไฮโดรเจลเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย เมื่อได้รับแรงจึงทำให้เกิดการเลื่อนหลุดได้ง่าย และเมื่อพิจารณาสูตรฟิล์มที่มีสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% เท่ากัน พบว่าฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ จะมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าฟิล์มที่ไม่มีการเชื่อมโยง (แสดงดังรูปที่ 4.9 (ข) และ 4.10 (ข)) เนื่องจากสูตรฟิล์มที่มีการเชื่อมโยงจะมีแคลเซียมไอออนเข้าไปเชื่อมโยงทำให้เกิดโครงร่างตาข่าย โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของไฮโดรเจลได้ยากกว่าทำให้มีค่าความแข็งแรงสูง

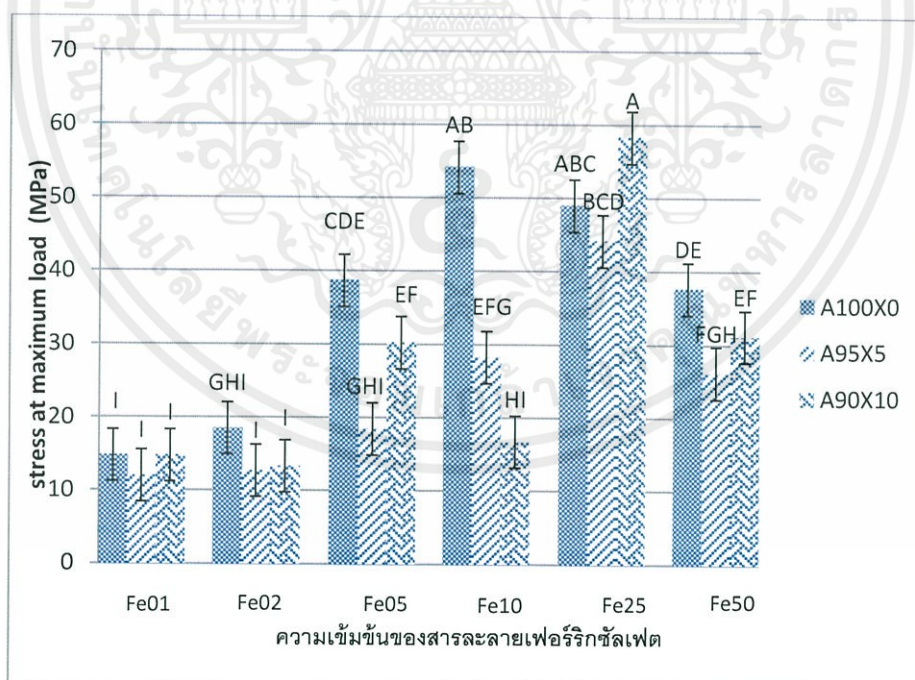
จากรูปที่ 4.11 เมื่อพิจารณาร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ทั้งฟิล์มที่ไม่มีการเชื่อมโยง และมีการเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ พบว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% มีค่าร้อยละการดึงยืดสูงกว่าที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกในโครงสร้างทำให้เกิดการยืดได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% เท่ากัน พบว่าสูตรที่มีการเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีค่าร้อยละการดึงยืดต่ำกว่าสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง เนื่องจากสูตรที่ทำการเชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์มีการเชื่อมขวางของสายโซ่ น้ำเข้าไปแทรกในโครงสร้างไฮโดรเจลได้ยาก ทำให้ค่าร้อยละการดึงยืดลดลง และเมื่อพิจารณาสูตร A100X0, A95X5 และสูตร A90X10 พบว่าสูตรที่มีการผสมระหว่างอัลจินตและแซนแทนกัม จะมีค่าร้อยละการดึงยืดน้อยกว่าสูตรที่มีอัลจินตเพียงอย่างเดียว เนื่องจากในการผสมอัลจินตและแซนแทนกัมอาจจะผสมได้ไม่ดีทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างอัลจินตและแซนแทนกัม ทำให้เป็นจุดบกพร่องในโครงสร้างของฟิล์ม เมื่อทำการให้แรงจึงเกิดการฉีกขาดได้ง่าย

ฟิล์มสูตรเชื่อมโยง 2 ชั้นตอน : สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%

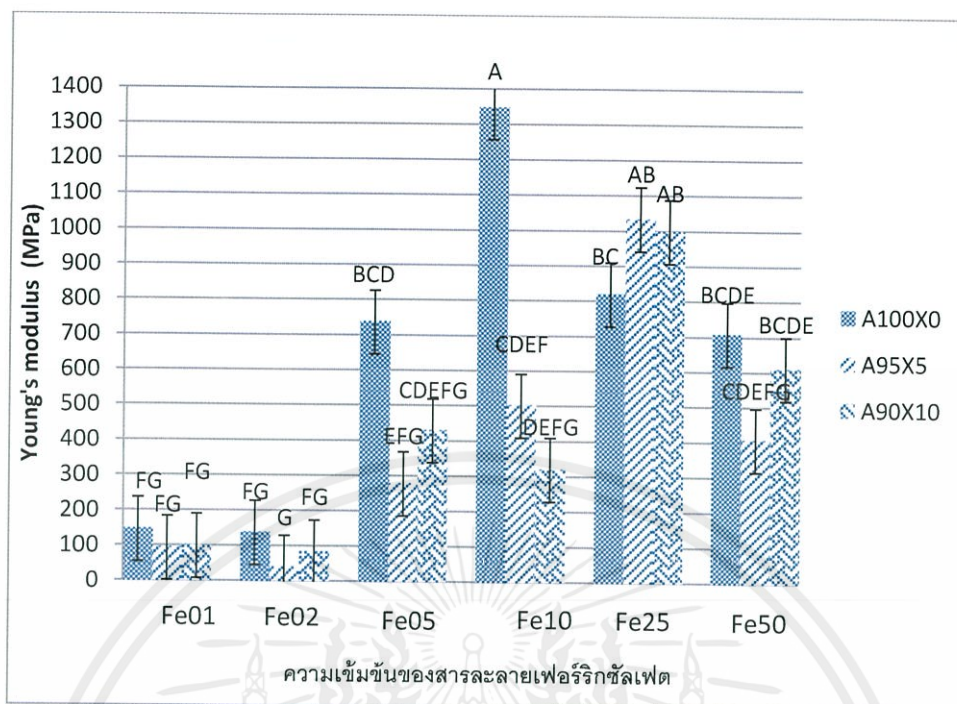
เมื่อพิจารณาความแข็งแรงดึงสูงสุด (รูปที่ 4.12) และมอดุลัสของยัง (รูปที่ 4.13) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วไปจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต พบว่าฟิล์มที่จุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่ำๆ (0.01-0.02 โมลาร์) จะมีค่าความแข็งแรงต่ำกว่าสูตรที่ไม่ได้จุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต เนื่องจากขณะจุ่มสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตอาจทำให้แคลเซียมไอออนที่เชื่อมโยงอยู่ในไฮโดรเจลเกิดการละลายออกมาในขณะที่ปริมาณของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตที่เข้าไปในโครงสร้างต่ำจึงทำให้ปริมาณการเชื่อมโยงลดลง พอลิเมอร์ส่วนที่ไม่เชื่อมโยง

หรือมีการเชื่อมโยงต่ำจึงเกิดการละลายออกมา แต่เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเพิ่มขึ้น ทำให้เฟอร์ริกไอออนเข้าไปขัดขวางการละลายออกพอลิเมอร์ทำให้ค่าความแข็งแรงสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งสูตรที่ทำให้มีค่าความแข็งแรงสูงที่สุดคือ สูตรที่มีความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต 0.25 โมลาร์ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตเป็น 0.5 โมลาร์ กลับทำให้ค่าความแข็งแรงลดลง ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มมีการเชื่อมโยงมากเกินไปทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นลดลงและเกิดจุดบกพร่องภายในฟิล์ม เมื่อโมเลกุลน้ำเข้าไปในโครงสร้างจึงเกิดการปริแตกขึ้น และเมื่อพิจารณาตามอัตราส่วนของอัลจินตและแซนแทนกัม พบว่าสูตร A95X5 และสูตร A90X10 มีค่าความแข็งแรงดิ่งน้อยกว่า สูตร A100X0 เนื่องจากฟิล์มมีส่วนผสมของสององค์ประกอบ ส่วนโครงสร้างของแซนแทนกัมมีปริมาณหมู่คาร์บอกซิเลต (COO⁻) น้อยกว่าในโครงสร้างของอัลจินต จึงมีผลให้ความหนาแน่นการเชื่อมโยงลดลง ทำให้ค่าความแข็งแรงดิ่งลดลง

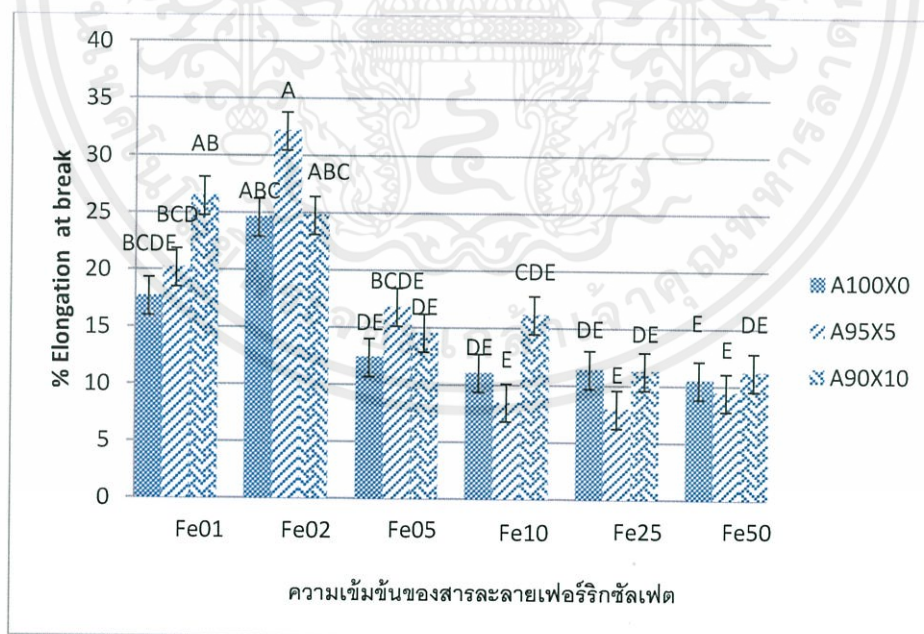
เมื่อพิจารณาค่าร้อยละการดิ่งยัด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.14) พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตต่ำ จะทำให้ฟิล์มเกิดการดิ่งยัดได้ง่าย และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตมากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดิ่งยัดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง เมื่อน้ำเข้าไปในโครงสร้างการเคลื่อนที่ของโมเลกุลมีความยืดหยุ่นน้อยลงและฟิล์มจะเกิดการปริแตกได้ง่าย



รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงดิ่งสูงสุด (Stress at maximum load) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมขวางด้วยสารเชื่อมขวาง ไอโอสาร์บิกวาม เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ใช่วิธีปฏิบัติจริงในสถานการณ์จริง ไม่ควรนำข้อมูลนี้ไปใช้โดยไม่ปรึกษาผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 4.13 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองขั้นตอน ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%



รูปที่ 4.14 ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยงสองขั้นตอน ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลระหว่างอัลจิเนต (Alginate, A) และแซนแทนกัม (Xanthan gum, X) โดยใช้อัตราส่วนระหว่าง A:X เท่ากับ 100:0, 95:5 และ 90:10 โดยน้ำหนัก มีการเชื่อมโยงทางประจุด้วยโลหะไอออน โดยมีการเชื่อมโยง 2 ระบบ คือ 1.) การเชื่อมโยงชั้นตอนเดียวในขณะที่ขึ้นรูปฟิล์มด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ปริมาตร 10, 15 และ 20 มิลลิลิตร และความเข้มข้น 0.03 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ 2.) นำฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วมาจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ โดยศึกษาพฤติกรรมบวมตัวในน้ำกลั่นและสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ (pH 1.2, 4, 7 และ 9.6) ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) หาเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือหลังการบวมตัวที่เวลา 24 ชั่วโมง และศึกษาสมบัติเชิงกล ได้ผลการทดลองดังนี้

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมบวมตัวในน้ำกลั่นของฟิล์มไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงชั้นตอนเดียวด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในอัตราส่วนความเข้มข้น และปริมาณที่ต่างกัน พบว่าสูตรที่สามารถบวมตัวและคงรูปอยู่ได้ดี คือ สูตร AX-Ca220 เนื่องจากมีการเชื่อมโยงมากพอที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงทางประจุกับหมู่คาร์บอกซิเลตของอัลจิเนตและแซนแทนกัม

เมื่อทดสอบพฤติกรรมบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการเชื่อมโยงฟิล์มไฮโดรเจลด้วยการจุ่ม พบว่า ฟิล์มทุกความเข้มข้นสามารถบวมตัวสูงสุด ที่เวลา 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) พบว่า

-ฟิล์มไฮโดรเจลที่ไม่มีการเชื่อมโยงทุกสูตรเสียสภาพภายใน 15 วินาที โดยสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินเตตต่อแซนแทนกัมสูง จะมีค่าการบวมตัวสูงกว่าสูตรที่มีอัตราส่วนของอัลจินเตตต่อแซนแทนกัมต่ำและเสียสภาพช้ากว่า

-ฟิล์มที่เชื่อมโยงทางประจุในขณะขึ้นรูปฟิล์มด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์สูตร AX-Ca220 พบว่าค่าการบวมตัวและเวลาในการบวมตัวสูงสุดสูงกว่าฟิล์มที่ไม่มีการเชื่อมโยงและมีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะฟิล์มสูตร A100X0-Ca220

-ฟิล์มที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์แล้วมาเชื่อมโยงแบบจุ่มด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต พบว่าฟิล์มที่จุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.02 และ 0.05 โมลาร์ เนื้อฟิล์มเกิดการละลายออก ทำให้บวมตัวได้ไม่นาน เกิดการเสียสภาพ และมีค่าเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือต่ำ

-ฟิล์มที่จุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1, 0.25 และ 0.5 โมลาร์ พบว่าฟิล์มทุกสูตรสามารถบวมตัวและไม่ละลายออกมา โดยเฉพาะสูตรที่ใช้อัตราส่วนของอัลจินเตตต่อแซนแทนกัมสูง และความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงสูง จะสามารถบวมตัวได้นาน และยังคงสภาพอยู่ได้โดยไม่เกิดการละลายออกของเนื้อฟิล์ม

พฤติกรรมการบวมตัวและเปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือของฟิล์มไฮโดรเจลในสภาวะสารละลายบัฟเฟอร์ต่างๆ (pH 1.2, 4, 7 และ 9.6) ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

- พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 พบว่าฟิล์มทุกสูตรสามารถคงสภาพอยู่ได้โดยมีค่าการบวมตัวในช่วง 1 ถึง 1.5 เท่า

- พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4, 7 และ 9.6 พบว่าฟิล์มมีค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นและเกิดการเสียสภาพอย่างรวดเร็ว เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล พบว่าฟิล์มที่ผสมสารเชื่อมโยงในขณะขึ้นรูปด้วยสารละลาย แคลเซียมคลอไรด์มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดใกล้เคียงกันทุกสูตร แต่จะมีค่าต่ำกว่าฟิล์มที่เชื่อมโยงแบบจุ่มในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต โดยฟิล์มที่เชื่อมโยงแบบจุ่มจะมีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% สูตรที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง และในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% สูตรที่มีค่าความแข็งแรงดึงสูงสุด คือสูตร AX-Ca220Fe25 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่ามอดูลัสของยัง ส่วนฟิล์มที่มีค่าร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0% สูตรที่มีค่าสูงที่สุด คือสูตรที่ไม่มีการเชื่อมโยง และในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80% สูตรที่มีค่าสูงที่สุด คือสูตร AX-Ca220Fe02

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ปรับปรุงหมู่ฟังก์ชันของอัลจินตและแซนแทนกัมให้มีสมบัติการต้านทานน้ำและความยืดหยุ่นของฟิล์มให้เพิ่มสูงขึ้น
- นำฟิล์มไปบรรจุสารเพื่อศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อย
- ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวและพฤติกรรมการปลดปล่อยสารในสภาวะจำลองระบบในร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิยะวรรณ ภูสินแก่น. 2013. “พอลิเมอร์ธรรมชาติและพอลิเมอร์สังเคราะห์”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://krukoongchemistry.wordpress.com>.
- [2] S. Nagashima, S. Ando, T. Tsukamoto, H. Ohshima and K.Makino. 1998. “Preparation of monodisperse poly(acrylamide-co-acrylic acid) hydrogel microspheres by a membrane emulsification technique and their size-dependent surface properties”. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 11, 47-56.
- [3] National Metal and Material Technology Center (MTEC). 2007. “เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/plastic_envi.html.
- [4] R. Pereira, A. Carvalho, D. C. Vaz, M. H. Gil, A. Mendes, P. Bartolo. 2013. “Development of novel alginate based hydrogel films for wound healing applications.” *International Journal of Biological Macromolecules*. 52, 221-230.
- [5] M. George and T. E. Abraham. 2007. “pH sensitive alginate-guar gum hydrogel for the controlled delivery of protein drugs”. *International Journal of Pharmaceutics*. 335, 123-129.
- [6] ชาญวิทย์ ลิ้มไพบูลย์, ปิยะธิดา หะสิทธิ์พงษ์ และภูจิต จันทาวุฒิ. 2554. “การศึกษาสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียของไฮโดรเจลจากอัลจิเนตและกัวร์กัมปรับปรุงด้วยซิลเวอร์”. โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, คณะวิทยาศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] ปิยามา เจริญพานิช, วชิราภรณ์ สวัสดิ์รักษา และวัชรี ศรีทวีสินทรัพย์. 2554. “การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจากพอลิไวนิลอัลกอฮอล์กับแซนแทนกัม”. โครงการงานพิเศษสาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] M. S. Kim, S. J. Park, B. K. Gu and C. Kim. 2012. “Inocally crosslinked alginate-carboxymethyl cellulose beads for the delivery of protein therapeutics”. *Applied Surface Science*. 262, 28-33.
- [9] E. H. Schacht. 2004. “Polymer chemistry and hydrogel system”. *Journal of Physics: Conference*. 3, 22-28.
- [10] ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2012. “ไฮโดรเจล (Hydrogel) เจลมหัศจรรย์”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://www.nanotec.or.th/nanotec_th/view/index.php?c_id=96.
- [11] B. D. Ratner. 1981. “Biomedical Application of Hydrogel; Review and Critical Appraisal. In D. F. Williams”. *Biocompatibility of Clinical Implant Material*. vol II Boca Raton: CRC Press, Inc., 145-152.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] K. Cordula and J. Kast. 2010. "Optimization of Formaldehyde Cross-Linking for Protein Interaction Analysis of Non-Tagged Integrin 1. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*". Article ID 927585, 13.
- [13] Patent No.: US 6,930,196 B2. Aug, 2005.
- [14] P. Petrini, S. Fare, A. Piva, M. and C. Tanzi. 2003. "Design, Synthesis and Properties of Polyurethane Hydrogels for Tissue Engineering". *Materials in Medicine*. 14, 683-686.
- [15] J. M. Guent. 1992. "Introduction In Thermoreversible Gelation of Polymers and Biopolymer". London : Academic Press, 1-4.
- [16] Y. Liu, M. B. Huglin and R. Mao. 1996. "Characteristics of copolymerisations involving dimethacrylamide and swelling behavior of the copolymers in water". *Polymer*. 37, 5068-5075.
- [17] M. V. Seflon and Y. Yamamoto. 1996. "Hofmann degradation of acrylamind copolymer : Sythesis of amine function thermoplastic hydrogel". *Journal of Applied Polymer Science*. 61, 351-358.
- [18] พิสิทธ์ราชมงคล. 2004. "มหัศจรรย์แห่งไฮโดรเจล". [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : http://www.neutron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=1965.
- [19] ภัทราวุธ มนต์วิเศษ. 2553. "เอกสารการสอนวิชา ไบโอบอลิเมอร์". สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] ดุษฎี อุดภาพ. 2554. "Carbohydrate Technology". [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/subject.html>.
- [21] Wikipedia. 2013. "molecular structure of agar". [online] Available: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agar_structure.png
- [22] RCS Advancing the Chemical Sciences. "The chemistry behind Gaviscon". [online] Available: www.rsc.org/learn-chemistry/resources/chemistry-in-your-cupboard/gaviscon/3
- [23] Department of Chemistry & Biomolecular science. "Responsive alginate hydrogel" [online] Available: http://people.clarkson.edu/~amelman/alginate_hydrogels.html
- [24] Belitz and Grosch. 1987. "Polysaccharide". [online] Available: <http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning50/FT320/026.htm>
- [25] Chemipan "Locust bean gum" [online] Available: <http://www.chemipan.com/home/index.php/635.html>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [26] K. C. Song, S. M. Lee, T. S. Park and B. S. Lee. 2009. "Preparation of colloidal silver nanoparticles by chemical reduction method". Korean Journal Chemical Engineering. 26, 153-155.
- [27] M. Sabyasachi, R. Somdipta, M. Ranjit, R. Somasree and S. Biswanath. 2011. "Al³⁺ ion crosslinked and acetalated gellan hydrogel network beads for prolonged release of glipizide". Carbohydrate Polymer. 85, 164-172.
- [28] T. Reddy and S. Tammishetti. 2002. "Gastric resistant microbeads of metal ion cross-linked carboxymethyl guar gum for oral drug delivery". Journal of Microencapsulation. 19, 311-318.
- [29] Q. Shengli, W. Zhanpeng, W. Dezhen. Y. Wantai and J. Riguang. 2009. "The chemistry involved in the loading of silver(I) into poly(amic acid) via ion exchange: A metal-ion-induced crosslinking behavior". Polymer. 50, 845-854.
- [30] Wikipedia. 2013. "Silver nitrate". [online] Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Silver_nitrate.
- [31] D. Bergmann, G. Furth and C. Mayer. 2008. "Binding of bivalent cations by xanthan in aqueous solution". International Journal of Biological Macromolecules. 43, 245-251.
- [32] Chemicalbook. 2013. "Ferric sulfate". [online] Available: http://www.chemicalbook.com/ProductChemicalPropertiesCB3491672_EN.htm
- [33] S. Zang, F. Xu, Y. Wang, W. Zhang, X. Peng and F. Pepe. 2013. "Silica modified calcium alginate-xanthan gum hybrid bead composites for the removal and recovery of Pb (II) from aqueous solution". Chemical Engineering Journal. 234, 33-42.
- [34] J. B. Xu, J. P. Bartley, and R. A. Johnson. 2003. "Preparation and characterization of alginate-carrageenan hydrogel film crosslinked using a water-soluble carbodiimide (WSC)". Journal of Membrane science. 218, 131-146.
- [35] C. K. Kuo and P. X. Ma. 2001. "Ionically crosslinked alginate hydrogels as scaffolds for tissue engineering : Part 1 structure, gelation rate and mechanical properties". Biomaterial. 22, 511-521.
- [36] S. Mandal, S. K. Basu. 2010. "Ca²⁺ ion cross-linked interpenetrating network matrix tablets of polyacrylamide-grafted-sodium alginate and sodium hydrochloride". Carbohydrate Polymer. 82, 867-873.
- [37] A. R. Dezfuli, A. A. S., M. Manjunath, G. N. S. and S. T.. 2012. "Development and evaluation of transdermal films loaded with antihypertensive drug". Int J. Pharm Bio Sci. 31, 559-569.
- [38] R. N., D. V. Gowda and S. C. N.. 2010. "Formulation and evaluation of biopolymer based Transdermal drug delivery". International journal of pharmacy and Pharmaceutical science. 2.

- [39] D. Bilanovic, J. Starosvetsky and R. H. Armon. 2015. "Cross-linking xanthan and other compounds with glycerol". Food Hydrocolloids. 44, 129-135.
- [40] ASTM D 882 Committee on standard. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1998".



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจล AX ที่ยังไม่มีสารเชื่อมโยงในน้ำกลั่น
อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ก1 ไม่มีสารเชื่อมโยง

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca000	A95X5 -Ca000	A90X10 -Ca000
0	0	0	0
1	45.6693	49.5231	49.1589
2	52.9502	58.5318	53.7041
3	49.2970	61.0059	49.2977
4	47.3229	51.9061	46.1025
5	43.0331	46.9508	40.2734
6	36.9420	39.3024	36.3891
7	33.8781	38.0724	34.7777
8	32.7565	35.3336	40.0808
9	31.0045	34.9576	33.6044
10	30.0803	34.7223	33.2943

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ของฟิล์มไฮโดรเจล AX ที่ความเข้มข้นและปริมาตรของสารเชื่อมโยงต่างกัน

ตารางที่ ก2 เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์ ความเข้มข้น 0.01 M ปริมาตร 20 mL

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca120	A95X5 -Ca120	A90X10 -Ca120
0	0	0	0
1	54.0934	51.3677	48.8039
2	66.2462	63.6895	58.9026
3	84.9542	65.9248	65.7785
4	77.8402	64.4682	68.8994
5	76.0242	72.1215	72.3052
6	73.7911	71.4117	72.1754
7	71.5361	74.9707	73.6575
8	70.5594	73.7747	74.5354
9	68.6464	70.7393	74.1048
10	58.3820	68.6815	73.1065
15	56.1516	70.2425	75.6427
30	53.7564	64.0199	76.7363
60	44.9642	60.4857	76.9901

ตารางที่ ก3 เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์ ความเข้มข้น 0.02 M ปริมาตร 10 mL

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca210	A95X5 -Ca210	A90X10 -Ca210
0	0	0	0
1	53.1623	53.2740	46.0961
2	64.3640	63.6105	54.7405
3	73.1340	68.3025	58.4453
4	77.7665	66.0627	60.4226
5	83.8403	67.6860	59.7035
6	85.2627	71.0768	62.1883
7	91.6755	68.3319	61.9137
8	93.0999	70.3154	71.0662
9	92.7433	71.6800	63.4957
10	90.1206	70.7745	67.6558
15	92.9825	66.1294	71.1074
30	95.6409	60.6196	69.1730
60	99.4653	37.3350	69.5789
120	98.3043	36.6486	69.8438
180	100.1333	36.3740	71.0826

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก4 เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์ ความเข้มข้น 0.02 M ปริมาตร 15 mL

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca215	A95X5 -Ca215	A90X10 -Ca215
0	0	0	0
1	54.3897	47.9281	48.0964
2	67.1057	58.3843	59.7898
3	76.9997	66.2101	66.9712
4	79.8472	72.4198	73.5511
5	81.1289	84.0763	78.7724
6	85.6312	88.2859	80.0666
7	88.4465	97.6151	82.5228
8	92.8989	94.3096	84.9236
9	93.5258	99.2523	85.1418
10	93.6927	104.5591	85.1436
15	94.0177	103.4113	89.1814
30	99.4785	119.3085	92.6204
60	99.0759	116.7598	96.0102
120	96.4538	111.3491	92.7736
180	102.3977	106.2230	85.7986
240	102.4130	94.9321	74.3361
300	96.2397	77.0906	66.7423
360	89.8556	69.2275	63.6876

ตารางที่ ก5 เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียม-คลอไรด์ ความเข้มข้น 0.02 M ปริมาตร 20 mL

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220	A95X5 -Ca220	A90X10 -Ca220
0	0	0	0
1	56.2573	64.4841	73.9645
2	67.7751	75.5048	98.6488
3	76.5017	84.2847	114.7082
4	74.3282	97.5343	126.5274
5	90.2169	102.6793	138.2555
6	95.3912	108.6741	141.9128
7	100.2169	106.7219	145.7921
8	105.6779	108.6428	141.5246
9	105.7029	111.7489	145.9945
10	104.3468	114.6502	143.7774
15	112.7817	121.7306	156.6449
30	114.5146	131.9864	164.5607
60	127.3074	142.7555	168.3653
120	129.0029	155.3532	169.3874
180	128.2957	155.4666	166.7132
240	119.8326	145.3826	152.4943
300	110.8734	131.1702	149.4622
360	109.0381	131.3934	133.4959

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก6 เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.03 M ปริมาตร 10 mL

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca310	A95X5 -Ca310	A90X10 -Ca310
0	0	0	0
1	68.1266	74.3959	61.6153
2	76.6853	81.5154	65.1302
3	86.5749	96.7517	74.9632
4	93.4687	96.6945	81.3391
5	95.0075	101.7593	87.6857
6	98.8158	102.8959	90.0427
7	99.5278	105.5748	95.5112
8	104.1190	108.8449	99.8493
9	114.8371	105.8351	102.7744
10	116.2211	104.3946	102.3600
15	119.1284	101.8273	115.0529
30	125.2096	107.7876	122.5271
60	134.9152	117.6028	135.4789
120	145.8399	110.8571	146.8868
180	148.2585	107.6848	154.6605
240	144.9551	103.6927	153.1895
300	113.0242	91.4444	144.5177
360	103.1358	84.1376	135.8594

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

พฤติกรรมการบวมตัวของฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต
ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ข1 พฤติกรรมการบวมตัวใน
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น
0.01 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220	A95X5 -Ca220	A90X10 -Ca220
0	0	0	0
0.15	4.2297	3.7089	3.7903
0.30	5.9891	5.3275	5.1156
0.45	7.0764	6.4514	5.9963
1	7.6320	7.1290	6.8592
2	8.0914	7.7694	7.6525
3	7.9915	7.8229	7.8805
4	7.7153	7.6636	7.9379
5	7.2782	7.4664	7.8236
6	6.9771	7.2157	7.6171
7	6.6799	6.9713	7.3759
8	6.3951	6.7144	7.1430
9	6.1269	6.4693	6.9200
10	5.8835	6.2090	6.5558
11	5.6623	6.0220	6.4043
12	5.3972	5.8321	6.1682
13	5.3266	5.6582	6.0416
14	5.1456	5.4625	5.8741
15	5.0353	5.3491	5.7439
20	4.9225	5.1601	5.6059
25	4.8204	5.0489	5.3736
30	4.7390	4.9409	5.2853
45	4.7216	4.7819	5.1482
60	4.7801	4.8872	5.0428

ตารางที่ ข2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.02 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220	A95X5 -Ca220	A90X10 -Ca220
0	0	0	0
0.15	4.7813	4.0123	4.2185
0.30	5.3381	4.8686	5.0376
0.45	5.2523	5.1464	5.3733
1	5.1950	5.1141	5.3066
2	4.8597	4.7398	5.0101
3	4.423	4.3222	4.6370
4	4.0410	3.9512	4.2739
5	3.4887	3.5214	3.8358
6	3.3873	3.3642	3.7105
7	3.2650	3.3289	3.6422
8	3.1892	3.2695	3.5697
9	3.1121	3.2226	3.5639
10	3.1413	3.1790	3.5089
11	3.1094	3.1530	3.4372
12	3.0285	3.1212	3.3718
13	2.9071	3.1020	3.3758
14	2.9926	3.0699	3.3413
15	3.0280	3.0308	3.2887
20	2.9253	3.0066	3.3494
25	2.6155	2.9730	3.1522
30	2.7568	2.9554	3.2487
45	2.7455	2.9519	3.2097
60	3.2893	2.9369	3.1953

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับ กรุณาอย่าเผยแพร่ข้อมูลใดๆ ไปยังบุคคลภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.05 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220	A95X5 -Ca220	A90X10 -Ca220
0	0	0	0
0.15	1.8807	2.3814	2.0170
0.30	2.1242	2.6166	2.3259
0.45	2.0708	2.5599	2.2358
1	1.9314	2.4464	2.0288
2	1.7864	2.1797	1.8500
3	1.6749	1.9739	1.7137
4	1.5908	1.7740	1.5149
5	1.5630	1.7937	1.5034
6	1.5403	1.6852	1.4920
7	1.5383	1.7212	1.4412
8	1.5347	1.7199	1.4543
9	1.5422	1.6658	1.4578
10	1.4845	1.7367	1.4245
11	1.4113	1.6708	1.4056
12	1.4278	1.6375	1.3995
13	1.4144	1.6148	1.3967
14	1.4055	1.5434	1.4004
15	1.4172	1.5765	1.4157
20	1.4347	1.5883	1.4331
25	1.3592	1.6566	1.4476
30	1.3882	1.6699	1.4556
45	1.4214	1.6737	1.4686
60	1.3743	1.7141	1.4763

ตารางที่ ข4 พฤติกรรมการบวมตัวใน
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220	A95X5 -Ca220	A90X10 -Ca220
0	0	0	0
0.15	1.4881	1.1687	0.9675
0.30	1.3140	1.0929	0.8970
0.45	1.1276	0.9917	0.8278
1	1.0137	0.9101	0.8221
2	0.9310	0.9306	0.6823
3	0.9109	0.8227	0.6660
4	0.8982	0.7764	0.6365
5	0.8584	0.7474	0.6426
6	0.8591	0.7166	0.6345
7	0.8366	0.7229	0.6058
8	0.8478	0.6372	0.5798
9	0.8436	0.6852	0.5872
10	0.6064	0.6975	0.5851
11	0.7350	0.6666	0.5593
12	0.7156	0.6718	0.5475
13	0.7481	0.6358	0.5556
14	0.7345	0.6274	0.5744
15	0.7428	0.6673	0.5680
20	0.7857	0.6675	0.5747
25	0.7953	0.7032	0.6297
30	0.7565	0.7074	0.5417
45	0.8381	0.7651	0.6403
60	0.8121	0.8197	0.6226

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข5 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.25 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220	A95X5 -Ca220	A90X10 -Ca220
0	0	0	0
0.15	0.2359	0.5307	0.4613
0.30	0.2308	0.5255	0.5284
0.45	0.2998	0.5037	0.5025
1	0.3317	0.5082	0.4949
2	0.3606	0.5056	0.5200
3	0.3357	0.4872	0.5134
4	0.3264	0.5254	0.4946
5	0.3318	0.5187	0.5125
6	0.3519	0.5188	0.4313
7	0.3520	0.4962	0.4434
8	0.3404	0.5179	0.4542
9	0.3179	0.5397	0.4506
10	0.3421	0.4775	0.4794
11	0.3671	0.4919	0.4922
12	0.3236	0.4883	0.4933
13	0.3521	0.4949	0.5064
14	0.3289	0.5025	0.6109
15	0.3690	0.4621	0.4982
20	0.3467	0.5091	0.5312
25	0.3564	0.5145	0.5205
30	0.3721	0.5200	0.5376
45	0.3621	0.5253	0.5302
60	0.4111	0.5461	0.5470

ตารางที่ ข6 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.5 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220	A95X5 -Ca220	A90X10 -Ca220
0	0	0	0
0.15	0.2769	0.7882	0.1955
0.30	0.3531	0.8556	0.2479
0.45	0.2797	0.7216	0.3490
1	0.2586	0.7043	0.3544
2	0.3097	0.6347	0.3413
3	0.3176	0.6686	0.4273
4	0.3074	0.6647	0.4167
5	0.3255	0.6607	0.4219
6	0.3269	0.6357	0.3546
7	0.3183	0.6668	0.3897
8	0.3174	0.5813	0.4010
9	0.3334	0.6481	0.3749
10	0.3519	0.6818	0.4091
11	0.3260	0.6458	0.4181
12	0.2665	0.6709	0.2966
13	0.3150	0.6388	0.4037
14	0.3322	0.5761	0.3787
15	0.3360	0.6425	0.3558
20	0.3477	0.6249	0.3954
25	0.3661	0.6613	0.3944
30	0.3198	0.7180	0.3728
45	0.3866	0.7214	0.4177
60	0.3788	0.7198	0.4433

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)
ที่ความเข้มข้น และปริมาตรสารเชื่อมโยงที่ต่างกัน

ตารางที่ ค1 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น
ที่ไม่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe00	A95X5 -Ca220 Fe00	A90X10 -Ca220 Fe00
0	0	0	0
0.15	4.7415	5.5406	4.3910
0.30	9.1856	10.4777	8.0796
0.45	14.7387	14.8291	12.4386
1	19.6869	17.2444	15.9180
2	26.4831	21.5861	20.2013
3	35.1111		

ตารางที่ ค2 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น
ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต
ความเข้มข้น 0.01 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe01	A95X5 -Ca220 Fe01	A90X10 -Ca220 Fe01
0	0	0	0
0.15	3.7059	5.3312	7.1684
0.30	6.3931	9.5535	12.9764
0.45	8.6861	13.7032	18.3981
1	11.2378	17.1195	20.7282
2	14.7992	20.3976	
3	21.2520	21.7025	
4	22.8717		

ตารางที่ ค3 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น
ที่มีเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต
ความเข้มข้น 0.02 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0- Ca220 Fe02	A95X5- Ca220 Fe02	A90X10- Ca220 Fe02
0	0	0	0
0.15	2.6276	4.2925	4.8104
0.30	3.9791	8.7575	10.1396
0.45	6.3362	13.2525	15.4028
1	7.9344	17.1201	18.8040
2	13.2641	21.5990	17.5183
3	20.9860		

ตารางที่ ค4 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น
ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต
ความเข้มข้น 0.05 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0- Ca220 Fe05	A95X5- Ca220 Fe05	A90X10- Ca220 Fe05
0	0	0	0
0.15	3.4314	5.0788	4.6474
0.30	6.3189	8.1434	9.8331
0.45	7.6876	9.2881	13.6183
1	8.6940	9.6791	15.4410
2	10.1211	9.9456	16.5845
3	11.5875		
4	12.7011		

ตารางที่ ค5 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น
ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต
ความเข้มข้น 0.1 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0- Ca220 Fe10	A95X5- Ca220 Fe10	A90X10- Ca220 Fe10
0	0	0	0
0.15	2.3802	2.8426	2.2198
0.30	3.0958	4.4531	3.5731
0.45	3.5624	5.2411	4.8198
1	3.7912	6.7786	5.7108
2	4.0239	8.0838	7.1486
3	4.2298	9.2716	9.6445
4	4.4447	10.2837	10.0084
5	4.5118	10.8905	10.5976
10	4.7102	11.9790	11.5544
15	4.9480	12.8016	13.1300
30	5.0907	12.5417	15.1929
45	5.2401	12.1624	16.8183
60	5.4579	12.0846	17.9251
120	5.6480	12.0065	19.1495
180	5.9540	12.5757	19.4367
240	5.9527	12.0779	16.8702
300	6.3183	11.9005	16.8823
360	6.0060	11.6928	14.9471
420	6.0575	11.1092	14.7642
480	6.3425	11.6543	14.4684
24 hr	6.8967	12.2354	15.1342

ตารางที่ ค6 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น
ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต
ความเข้มข้น 0.25 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0- Ca220 Fe25	A95X5- Ca220 Fe25	A90X10- Ca220 Fe25
0	0	0	0
0.15	0.7670	0.9527	1.1456
0.30	1.0170	1.3338	1.5663
0.45	1.0552	1.2306	1.4648
1	1.1369	1.2552	1.5561
2	1.1741	1.2714	1.5284
3	1.2660	1.3572	1.6109
4	1.2830	1.3194	1.5377
5	1.1062	1.1905	1.4876
10	1.3048	1.3351	1.5946
15	1.3374	1.4282	1.6491
30	1.2996	1.3365	1.6494
45	1.3976	1.3797	1.5835
60	1.4168	1.4889	1.6927
120	1.4396	1.4616	1.6725
180	1.3987	1.4515	1.5975
240	1.3822	1.4443	1.5643
300	1.3761	1.4138	1.4854
360	1.3936	1.4301	1.5407
420	1.4817	1.5110	1.7312
480	1.3228	1.6133	1.7546
24 hr	1.3850	1.5618	1.7410

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค7 พฤติกรรมการบวมตัวในน้ำกลั่น ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต
ความเข้มข้น 0.5 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0- Ca220Fe50	A95X5- Ca220Fe50	A90X10- Ca220Fe50
0	0	0	0
0.15	0.5755	0.6925	0.5310
0.30	0.6993	0.7749	0.6572
0.45	0.7395	0.9213	0.9673
1	0.7515	0.9482	1.0121
2	0.7324	0.7504	1.0273
3	0.8541	1.0639	1.1850
4	0.9777	1.1592	1.3383
5	0.9777	1.2332	1.5047
10	0.9775	1.2343	1.7155
15	1.0228	1.3146	2.0213
30	1.0093	1.2501	1.9593
45	1.1030	1.3833	2.0012
60	1.0468	1.2310	2.1227
120	1.0417	1.2775	1.9476
180	1.0585	1.2966	1.9221
240	1.0854	1.3653	1.9373
300	1.1558	1.4244	1.9148
360	1.1127	1.4092	1.8543
420	1.0855	1.3516	1.8782
480	1.1042	1.3660	1.8589
24 hr	1.1104	1.3700	1.8632

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 อุณหภูมิห้อง (25±2 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ง1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่ไม่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe00	A95X5 -Ca220 Fe00	A90X10 -Ca220 Fe00
0	0	0	0
0.15	2.2596	2.6504	2.9381
0.30	2.4710	2.7392	2.7979
0.45	2.3528	2.5299	2.6708
1	2.2893	2.4992	2.6009
2	2.1608	2.3681	2.5444
3	2.0048	2.2400	2.3970
4	2.0124	2.2304	2.3902
5	2.0205	2.2172	2.4205
10	2.0115	2.2132	2.4346
15	1.9747	2.1763	2.8671
30	1.8512	2.1259	2.2168
45	1.8994	2.1734	2.3309
60	1.8575	2.0104	2.2658
120	1.9803	2.0674	2.3701
180	2.0512	2.0739	2.2428
240	2.0160	2.0503	2.3524
300	2.0559	2.0450	2.3217
360	2.0353	2.0306	2.3147
420	2.0206	2.0177	2.2684
480	1.9756	2.0173	2.2755
24 hr	1.9699	2.0043	2.3108

ตารางที่ ง2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟตความเข้มข้น 0.01 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe01	A95X5 -Ca220 Fe01	A90X10 -Ca220 Fe01
0	0	0	0
0.15	0.7459	1.2049	1.2409
0.30	1.1366	1.3162	1.3656
0.45	1.1737	1.2639	1.4111
1	1.1211	1.2401	1.2694
2	1.1821	1.2878	1.3313
3	1.2198	1.2642	1.3560
4	1.2252	1.2944	1.4049
5	1.2826	1.3095	1.4308
10	1.2747	1.3234	1.4787
15	1.2130	1.2744	1.4427
30	1.2602	1.2782	1.4308
45	1.2629	1.3183	1.4367
60	1.2173	1.2742	1.4051
120	1.2274	1.2603	1.3861
180	1.2207	1.2793	1.3874
240	1.1872	1.2071	1.3722
300	1.2702	1.2829	1.3846
360	1.2081	1.2219	1.3046
420	1.2369	1.2853	1.4035
480	1.1938	1.2513	1.3919
24 hr	1.2166	1.3145	1.4349

ตารางที่ ๓3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.02 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 FeO2	A95X5 -Ca220 FeO2	A90X10 -Ca220 FeO2
0	0	0	0
0.15	0.7949	1.3867	1.2016
0.30	0.7819	1.3398	1.2750
0.45	0.8983	1.3522	1.3202
1	0.7998	1.3099	1.2508
2	1.2628	1.4063	1.3635
3	1.0867	1.3922	1.3710
4	1.1028	1.4025	1.3923
5	1.1363	1.4143	1.4123
10	1.1663	1.4440	1.4671
15	1.1651	1.4301	1.4430
30	1.1627	1.4090	1.4200
45	1.1824	1.4257	1.4418
60	1.2123	1.4069	1.4365
120	1.1697	1.3967	1.4747
180	1.2020	1.3481	1.3682
240	1.1788	1.3955	1.4511
300	1.2146	1.4310	1.5360
360	1.2019	1.4062	1.4495
420	1.2204	1.4506	1.4917
480	1.2192	1.4126	1.4788
24 hr	1.2215	1.3994	1.4370

ตารางที่ ๓4 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.05 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 FeO5	A95X5 -Ca220 FeO5	A90X10 -Ca220 FeO5
0	0	0	0
0.15	0.9608	1.1104	1.3290
0.30	0.9762	1.2509	1.4061
0.45	0.9488	1.3140	1.4332
1	0.9373	1.3954	1.4806
2	1.0327	1.4521	1.4534
3	1.0783	1.5126	1.5562
4	1.0795	1.5078	1.5422
5	1.1039	1.5152	1.5597
10	1.1422	1.5608	1.5994
15	1.1197	1.5999	1.5868
30	1.1109	1.5840	1.5966
45	1.1269	1.5375	1.5601
60	1.1382	1.5700	1.5647
120	1.0962	1.5119	1.4970
180	1.1296	1.5407	1.5369
240	1.1504	1.5319	1.6013
300	1.0660	1.4945	1.5275
360	1.1325	1.4783	1.5128
420	1.1040	1.5035	1.5161
480	1.1038	1.5176	1.5146
24 hr	1.1916	1.5349	1.5052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๖5 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe10	A95X5 -Ca220 Fe10	A90X10 -Ca220 Fe10
0	0	0	0
0.15	0.5682	0.7887	0.8564
0.30	0.7880	0.9612	0.9295
0.45	0.8300	1.0463	1.1157
1	0.8487	1.0676	1.2137
2	0.9075	1.0189	1.0946
3	0.9721	1.0616	1.1402
4	0.8402	1.0507	1.1742
5	0.8357	1.0075	1.1616
10	0.8261	0.9604	1.1313
15	0.8069	1.0055	1.1395
30	0.8496	1.0049	1.1387
45	0.8726	1.0477	1.2507
60	0.9487	1.1204	1.2797
120	0.9957	1.1874	1.2964
180	0.9583	1.1572	1.3122
240	0.9293	1.1371	1.2857
300	0.9542	1.1848	1.3011
360	0.8965	1.1934	1.3389
420	0.8979	1.1407	1.3250
480	0.9183	1.1425	1.3036
24 hr	0.8896	1.0524	1.2132

ตารางที่ ๖6 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.25 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe25	A95X5 -Ca220 Fe25	A90X10 -Ca220 Fe25
0	0	0	0
0.15	0.8901	1.5437	1.0652
0.30	1.1286	1.6178	1.1340
0.45	1.2065	1.6426	1.1709
1	1.3040	1.6632	1.2087
2	1.3233	1.6230	1.174
3	1.2226	1.5703	1.1212
4	1.0647	1.4465	0.9890
5	1.3200	1.6127	1.1688
10	1.3156	1.6725	1.2149
15	1.3134	1.6250	1.1827
30	1.2476	1.5560	1.1167
45	1.4083	1.6963	1.2145
60	1.3746	1.6369	1.2006
120	1.3931	1.6977	1.2707
180	1.3742	1.6808	1.2473
240	1.3463	1.6437	1.1965
300	1.3507	1.6398	1.1878
360	1.3319	1.6355	1.1775
420	1.4003	1.7127	1.2719
480	1.3967	1.6911	1.2623
24 hr	1.4236	1.6526	1.2688

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗7 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.5 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe50	A95X5 -Ca220 Fe50	A90X10 -Ca220 Fe50
0	0	0	0
0.15	0.4129	0.4547	0.6168
0.30	0.4848	0.5048	0.5370
0.45	0.4184	0.5451	0.5874
1	0.6635	0.7533	0.8137
2	0.7200	0.7911	1.3190
3	0.7415	0.8573	0.9598
4	0.8574	1.0024	1.0525
5	0.8523	1.0114	1.1009
10	0.8570	0.9618	1.0666
15	0.7799	0.8997	1.0118
30	0.7624	0.9313	1.0490
45	0.8877	1.0271	1.1591
60	0.8743	1.0808	1.1543
120	0.9124	1.0737	1.2022
180	0.8736	1.0770	1.1831
240	0.8527	0.9713	1.0531
300	0.9102	1.0971	1.1902
360	0.9212	1.1209	1.2380
420	0.9102	1.0927	1.2243
480	0.8297	1.0185	1.1395
24 hr	1.0043	1.2152	1.3953

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

พฤติกรรมกรบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 อุณหภูมิห้อง
(25 ± 2 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ จ1 พฤติกรรมกรบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 4 ที่ไม่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe00	A95X5 -Ca220 Fe00	A90X10 -Ca220 Fe00
0	0	0	0
0.15	6.3390	8.1309	9.1815
0.30	10.0367	13.0794	14.2679
0.45	12.7880	16.8575	18.1027
1	14.9425	19.6973	20.9094
2	17.3980	22.5816	23.1161
3	18.9723	24.2016	24.3249
4	20.3145	25.4163	25.8435
5	21.4732	26.1129	27.2936
10	23.3532	25.9562	28.3296
15	24.1952	25.7357	29.4166
30	24.5287		
45	24.1805		

ตารางที่ จ2 พฤติกรรมกรบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 4 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe01	A95X5 -Ca220 Fe01	A90X10 -Ca220 Fe01
0	0	0	0
0.15	2.1419	3.0324	3.5042
0.30	3.4264	4.9411	5.2205
0.45	4.3868	6.3973	6.5222
1	5.3204	7.8838	7.8552
2	7.8639	11.3003	11.0172
3	9.2471	13.3152	13.3611
4	11.2142	15.4000	15.3059
5	13.0663	17.2647	17.2664
10	16.1107	19.4664	17.3975
15	19.0318	21.6215	21.4327
30	19.2304	22.4696	22.2527
45	20.7810		
60	20.4027		
120	21.9361		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 4 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.02 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe02	A95X5 -Ca220 Fe02	A90X10 -Ca220 Fe02
0	0	0	0
0.15	1.7429	2.9984	3.6305
0.30	2.7788	4.8549	4.7011
0.45	3.6596	6.4772	7.5316
1	4.2103	6.9099	8.9887
2	5.6563	10.0492	11.6997
3	6.5480	11.7373	13.3892
4	7.6272	13.6830	13.4632
5	8.3497	14.9147	14.7755
10	10.7142	16.9550	15.8450
15	12.7763	18.2426	16.1775
30	14.6110	20.4259	14.1822
45	15.5329	21.3379	
60	16.8621	21.9505	
120	16.6303	21.5158	

ตารางที่ จ4 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 4 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.05 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe050	A95X5 -Ca220 Fe050	A90X10 -Ca220 Fe050
0	0	0	0
0.15	1.6803	3.4985	2.9068
0.30	2.3580	5.6489	4.6005
0.45	2.9278	7.3394	5.9620
1	3.6614	9.5573	7.8335
2	4.7261	12.1211	9.7938
3	5.3470	13.7384	11.0118
4	6.0653	15.6675	10.5973
5	6.8991	17.0334	18.8030
10	12.5702	12.9409	22.0235
15	13.9805	14.5279	24.1610
30	16.8149	15.8169	27.2926
45	18.5447	17.3737	27.6417
60	19.7709	18.2099	28.1659
120	21.4775	21.5256	28.5209
180	19.0691	22.2317	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ5 พฤติกรรมการบวมตัวใน
สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe10	A95X5 -Ca220 Fe10	A90X10 -Ca220 Fe10
0	0	0	0
0.15	1.5366	3.4000	3.8183
0.30	2.3725	5.7738	6.8013
0.45	2.9172	7.5028	8.5280
1	3.2299	9.3819	10.0467
2	3.9161	10.6886	11.5638
3	4.4029	11.4291	12.7690
4	5.13995	11.5091	13.2699
5	5.7595	11.0518	13.3597
10	7.7529	11.2382	14.0468
15	9.3525		
30	10.6918		
45	10.4300		
60	7.2057		

ตารางที่ จ6 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 4 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.25 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe25	A95X5 -Ca220 Fe25	A90X10 -Ca220 Fe25
0	0	0	0
0.15	1.7362	1.6781	1.6294
0.30	2.4251	2.6893	2.3380
0.45	2.7115	3.4423	2.7539
1	3.0162	4.1007	3.2229
2	3.6046	5.0608	4.1001
3	4.2464	6.0520	4.7728
4	3.7365	7.3049	5.5735
5	5.8381	8.2999	6.4497
10	7.8214	10.5923	8.2462
15	8.4870	11.2764	9.2428
30	10.1366	12.3630	10.8722
45	10.3516	12.7544	11.0405
60	10.5869	13.2362	11.4612

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ7 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.5 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe50	A95X5 -Ca220 Fe50	A90X10 -Ca220 Fe50
0	0	0	0
0.15	0.5916	0.7545	0.6809
0.30	0.7745	0.9726	0.9159
0.45	0.7572	1.0366	0.9948
1	0.8652	1.1008	1.1313
2	1.0586	1.2814	1.3317
3	1.1912	1.4785	1.4547
4	1.2627	1.5654	1.5402
5	1.3575	1.7387	1.6977
10	1.8345	2.0582	2.0982
15	2.0916	2.3751	2.3825
30	3.4297	3.8448	3.5332
45	4.0942	4.4159	4.3776
60	4.9352	5.0391	5.1377
120	7.0804	7.3260	7.3892
180	7.0738	7.8192	7.0605

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 อุณหภูมิห้อง
(25 ± 2 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ฉ1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 7 ที่ไม่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe00	A95X5 -Ca220 Fe00	A90X10 -Ca220 Fe00
0	0	0	0
0.15	5.6029	6.7458	7.2094
0.30	12.0033	13.2543	13.8334
0.45	15.8238	16.7211	18.4201
1	19.5518	19.5261	21.6941
2	22.7790	23.5525	23.7595
3	22.4648	24.7899	25.3208
4	21.5198		

ตารางที่ ฉ2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 7 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe01	A95X5 -Ca220 Fe01	A90X10 -Ca220 Fe01
0	0	0	0
0.15	3.6150	5.1616	5.3227
0.30	6.7772	9.3786	9.4528
0.45	9.2089	12.6927	13.4905
1	11.7240	16.1148	17.0286
2	15.3086	19.8557	19.8962
3	19.2894	22.9070	21.7395
4	20.4064	24.1821	
5	21.4953		
10	22.7159		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 7 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.02 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe02	A95X5 -Ca220 Fe02	A90X10 -Ca220 Fe02
0	0	0	0
0.15	2.1759	4.2260	3.8351
0.30	4.2955	7.5136	9.6005
0.45	5.9671	10.9265	13.2535
1	7.5477	13.6775	16.2054
2	10.3453	16.7347	19.2037
3	13.3427	19.0906	21.0507
4	15.3642	21.4475	
5	20.8701	22.5555	
10	21.9836	23.6301	

ตารางที่ ๓4 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 4 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.05 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe05	A95X5 -Ca220 Fe05	A90X10 -Ca220 Fe05
0	0	0	0
0.15	3.8041	5.3209	8.8741
0.30	4.5061	7.4396	13.3836
0.45	6.8109	10.0172	15.5560
1	7.6730	10.8844	16.9455
2	9.2830	13.9497	20.6196
3	11.7016	16.8785	24.2101
4	14.5228	20.3761	24.4146
5	17.7397	23.3899	25.2421
10	29.1617	25.2770	26.6252
15	31.4729		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑5 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 7 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe10	A95X5 -Ca220 Fe10	A90X10 -Ca220 Fe10
0	0	0	0
0.15	1.0538	2.6331	4.8082
0.30	1.7230	4.5125	8.3557
0.45	2.2154	5.8469	12.0370
1	2.6503	6.5892	15.0979
2	3.2890	7.7666	19.0400
3	3.7489	9.0228	21.5908
4	4.2306	10.1598	22.9564
5	5.0245	12.0655	24.2068
10	6.8009	14.2421	25.7116
15	9.2935	16.1487	27.3186
30	15.1995	17.3884	28.9503
45	16.7586	17.7843	30.6601

ตารางที่ ๑6 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 7 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.25 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe25	A95X5 -Ca220 Fe25	A90X10 -Ca220 Fe25
0	0	0	0
0.15	1.4157	1.0585	1.3130
0.30	1.6808	1.7348	1.9961
0.45	2.0186	2.1370	2.5593
1	2.3374	2.5441	2.9826
2	2.8395	3.1010	3.7150
3	3.2535	3.6593	4.4015
4	4.1792	3.8934	5.4433
5	4.7133	4.4521	6.0409
10	6.8169	6.9907	8.7447
15	9.5202	9.1386	11.5857
30	17.2681	15.4505	19.0568
45	17.1471	18.4141	19.2479

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗7 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 7 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.5 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0	A95X5	A90X10
	-Ca220 Fe50	-Ca220 Fe50	-Ca220 Fe50
0	0	0	0
0.15	0.8498	0.7935	0.8117
0.30	0.9323	0.9864	1.0376
0.45	1.0380	1.3489	1.1278
1	1.1859	1.0350	1.1945
2	1.5124	1.3603	1.4878
3	1.8508	1.8143	1.8190
4	2.2138	1.7447	1.8147
5	2.5959	1.9487	1.9526
10	2.9377	2.3315	2.3592
15	3.4815	3.2724	3.0739
30	4.8091	5.9103	4.8811
45	6.3670	8.3493	6.7618
60	8.6055	10.5453	9.3358
120	11.8033	14.3934	19.7231

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

พฤติกรรมกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ ข1 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่ไม่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe00	A95X5 -Ca220 Fe00	A90X10 -Ca220 Fe00
0	0	0	0
0.15	6.4499	6.4571	6.1690
0.30	10.9620	10.6513	9.5147
0.45	13.8341	13.0774	13.0403
1	15.9431	14.3597	15.0985
2	17.7259	17.0254	15.5661
3	18.4478	18.4419	

ตารางที่ ข2 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.01 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe01	A95X5 -Ca220 Fe01	A90X10 -Ca220 Fe01
0	0	0	0
0.15	5.0002	5.9731	4.2506
0.30	9.2757	11.2622	8.6806
0.45	13.5270	14.7692	12.3607
1	16.9963	16.3000	14.1991
2	17.0081	16.4590	9.9452

ตารางที่ ข3 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.02 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe02	A95X5 -Ca220 Fe02	A90X10 -Ca220 Fe02
0	0	0	0
0.15	4.0618	7.4654	8.4157
0.30	6.9006	12.9451	13.1916
0.45	11.0932	17.7762	17.3714
1	14.8872	20.5687	19.3150
2	20.5464	22.2604	19.6229
3	22.5117		
4	24.2140		

ตารางที่ ข4 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.05 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาที)	A100X0 -Ca220 Fe05	A95X5 -Ca220 Fe05	A90X10 -Ca220 Fe05
0	0	0	0
0.15	2.8652	5.6560	6.0642
0.30	6.0635	11.7362	12.4736
0.45	10.8421	16.0783	16.6576
1	11.5903	19.1242	17.4858
2	14.0498	19.3312	

ตารางที่ ข5 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.1 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe10	A95X5 -Ca220 Fe10	A90X10 -Ca220 Fe10
0	0	0	0
0.15	3.0119	8.2475	6.0665
0.30	4.9120	13.0083	10.6457
0.45	8.2420	15.2986	14.7107
1	13.9677	18.7172	18.0701
2	17.8111	19.6432	
3		24.3818	

ตารางที่ ข6 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลาย
บัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่มีการเชื่อมโยงด้วย
สารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.25 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe25	A95X5 -Ca220 Fe25	A90X10 -Ca220 Fe25
0	0	0	0
0.15	1.8748	2.2134	3.1273
0.30	4.5089	5.4342	6.6868
0.45	7.3601	8.3260	12.5539
1	11.0972	12.0519	15.2945
2	16.4700	18.1112	19.7946
3	18.9963	23.1323	

ตารางที่ ข7 พฤติกรรมการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 9.6 ที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารละลาย
เฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้น 0.5 M

การบวมตัว (เท่า)			
เวลา (นาท)	A100X0 -Ca220 Fe50	A95X5 -Ca220 Fe50	A90X10 -Ca220 Fe50
0	0	0	0
0.15	1.3610	0.9747	0.8652
0.30	1.8846	1.2124	1.0186
0.45	3.7298	2.3989	1.9827
1	5.0543	3.1638	2.4498
2	7.4204	6.0684	4.6578
3	8.5482	8.2643	6.4212
4	10.9481	11.8083	8.8448
5	13.6729	12.9056	14.9550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ค่าของแข็งคงเหลือของฟิล์มสูตรต่างๆ

ตารางที่ ข1 เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือหลังการบวมตัวในสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต ความเข้มข้นต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส)

สูตร	ของแข็งคงเหลือ (%)
A100x0-Ca220Fe01	109.1625
A95x5-Ca220Fe01	98.1633
A90x10-Ca220Fe01	99.8204
A100x0-Ca220Fe02	111.7347
A95x5- Ca220Fe02	96.6720
A90x10- Ca220Fe02	106.6281
A100x0-Ca220Fe05	105.7245
A95x5- Ca220Fe05	103.9872
A90x10- Ca220Fe05	107.7724
A100x0-Ca215Fe10	107.9538
A95x5- Ca215Fe10	105.1203
A90x10- Ca215Fe10	110.0501
A100x0-Ca220Fe10	101.9349
A95x5- Ca220Fe10	105.3808
A90x10- Ca220Fe10	119.0019
A100x0-Ca310Fe10	93.8472
A95x5-Ca310Fe10	107.7778
A90x10-Ca310Fe10	111.7503
A100x0-Ca220Fe25	97.9999
A95x0-Ca220Fe25	103.6029
A90x10-Ca220Fe25	102.3531
A100x0-Ca220Fe50	93.4751
A95x5-Ca220Fe50	105.6454
A90x10-Ca220Fe50	119.5531

ตารางที่ ข2 เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือหลังการบวมตัวในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และสารละลายเฟอร์ริกซัลเฟต

สูตร	ของแข็งคงเหลือ (%)
A100x0-Ca220Fe01	-
A95x5-Ca220Fe01	-
A90x10-Ca220Fe01	-
A100x0-Ca220Fe02	-
A95x5- Ca220Fe02	-
A90x10-Ca220Fe02	-
A100x0-Ca220Fe05	-
A95x5- Ca220Fe05	-
A90x10-Ca220Fe05	-
A100x0-Ca220Fe10	87.4041
A95x5- Ca220Fe10	88.9230
A90x10- Ca220Fe10	84.7523
A100x0-Ca220Fe25	94.4799
A95x0-Ca220Fe25	94.5526
A90x10-Ca220Fe25	92.2992
A100x0-Ca220Fe50	92.0276
A95x5-Ca220Fe50	96.3070
A90x10-Ca220Fe50	93.0880

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข3 เปอร์เซ็นต์ของแข็งคงเหลือหลังการบวมตัวในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 1.2 ที่อุณหภูมิห้อง (25 ± 2 องศาเซลเซียส) ที่เชื่อมโยงด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ และสารละลายเพอร์ริกซัลเฟต

สูตร	ของแข็งคงเหลือ (%)
A100x0-Ca220Fe01	80.7147
A95x5-Ca220Fe01	77.4082
A90x10-Ca220Fe01	80.6082
A100x0-Ca220Fe02	83.5082
A95x5- Ca220Fe02	82.7322
A90x10- Ca220Fe02	84.2337
A100x0-Ca220Fe05	83.6531
A95x5- Ca220Fe05	92.4108
A90x10- Ca220Fe05	80.6263
A100x0-Ca220Fe10	85.327
A95x5- Ca220Fe10	78.9709
A90x10- Ca220Fe10	82.3035
A100x0-Ca220Fe25	89.4999
A95x0-Ca220Fe25	79.1119
A90x10-Ca220Fe25	96.0685
A100x0-Ca220Fe50	83.2763
A95x5-Ca220Fe50	87.7041
A90x10-Ca220Fe50	88.6581

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฅ

สมบัติเชิงกลของฟิล์มไฮโดรเจล

ตารางที่ ฅ1 แสดงค่าความแข็งแรงตึงสูงสุด มอดุลัสของยัง และร้อยละการตึงยืด ฅ จุดขาด ของฟิล์มสูตรเชื่อมโยงชั้นตอนเดียว : สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 0%

สูตร	ชั้นที่	stress at maximum load	\bar{x}	young's modulus	\bar{x}	% Elongation	\bar{x}
A100X0-Ca000	1	66.8663		2401.7430		6.4000	
	2	71.5229		3807.7150		3.0000	
	3	65.2107	67.8884	2129.8840	2874.1131	6.9700	5.4080
	4	68.2823		3135.7890		5.0700	
	5	67.5598		2895.4343		5.6000	
A95X5-Ca000	1	43.6236		3152.0620		9.8000	
	2	51.1276		2390.5150		5.7700	
	3	47.6617	51.2552	1231.2790	2308.8276	6.1000	6.1540
	4	58.0116		2455.9310		5.7000	
	5	55.8512		2314.3510		3.4000	
A90X10-Ca000	1	35.9942		835.7458		5.2700	
	2	35.7991		1433.9780		2.7700	
	3	36.3119	37.82712	2670.7680	1833.1333	5.6300	4.6380
	4	42.8814		2265.7720		4.6300	
	5	38.1490		1959.4029		4.8900	
A100X0-Ca220	1	31.2935		1810.4680		5.0000	
	2	26.3798		994.5060		4.2700	
	3	53.0877	37.9515	1634.7010	1362.4093	7.9300	5.7880
	4	48.5576		1293.4415		6.4000	
	5	30.4391		1078.9302		5.3400	
A95X5-Ca220	1	23.7628		941.1620		3.8300	
	2	24.3535		1264.3540		3.3000	
	3	39.8338	29.3167	1531.4090	1260.7759	4.7000	3.8660
	4	26.9038		1342.6590		3.5000	
	5	28.0589		1224.2956		4.0000	
A90X10-Ca220	1	10.5427		592.1593		2.8300	
	2	14.0793		958.4267		2.4300	
	3	16.0333	13.1545	798.5632	721.3521	3.6000	2.8520
	4	13.0583		649.2091		2.8700	
	5	12.0591		608.4023		2.5300	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฅ2 แสดงค่าความแข็งแรงตึงสูงสุด มอดุลัสของยัง และร้อยละการตึงยืด ณ จุดขาดของฟิล์มสูตรเชื่อมโยง 2 ชั้นตอน : สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 80%

สูตร	ชั้นที่	stress at maximum load	\bar{x}	young's modulus	\bar{x}	% Elongation	\bar{x}
A100X0 -Ca000Fe00	1	4.7929		50.8030		20.6700	21.7080
	2	5.5089		91.2920		22.3300	
	3	6.3491	5.2492	40.9754	51.5878	23.1300	
	4	4.9839		31.3865		22.1000	
	5	4.6110		43.4822		20.3100	
A95X5 -Ca000Fe00	1	3.7775		116.7777		7.2000	7.8820
	2	5.4180		92.3323		8.6300	
	3	3.2045	4.8630	99.5421	115.727	7.4300	
	4	5.0847		104.3925		8.7000	
	5	6.8302		165.5904		7.4500	
A90X10 -Ca000Fe00	1	6.6939		138.3259		9.6000	7.7533
	2	5.9600		79.3562		7.0300	
	3	5.0244	4.1334	199.7204	102.8841	11.6300	
	4	5.8957		99.4880		8.0300	
	5	7.2071		295.0447		6.9900	
A100X0 -Ca220Fe00	1	16.6303		269.8611		18.9300	16.4700
	2	22.8583		386.3461		19.3800	
	3	19.2940	21.2379	272.0107	375.1985	19.3700	
	4	20.2648		376.8901		13.1700	
	5	27.1419		570.8845		11.5000	
A95X5 -Ca220Fe00	1	29.1280		482.0933		11.2700	7.9660
	2	16.9810		773.5082		6.1000	
	3	15.7897	23.4687	787.8564	822.4524	6.5900	
	4	24.6767		554.9871		7.6300	
	5	30.8781		875.0218		7.6300	
A90X10 -Ca220Fe00	1	23.1075		1042.8330		6.5700	7.8440
	2	24.4447		570.6983		4.4300	
	3	21.9399	23.4686	701.8566	694.6936	8.1700	
	4	25.6100		1035.4880		11.5300	
	5	22.2411		761.3863		9.1300	
A100X0 -Ca220Fe01	1	12.7375		81.5539		19.3300	18.2212
	2	24.6781		199.1771		18.9000	
	3	8.1983	14.2623	92.3525	116.8854	13.4300	
	4	13.6783		116.6870		19.2000	
	5	12.0194		94.6565		20.2460	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓2 (ต่อ)

สูตร	ชั้นที่	stress at maximum load	\bar{x}	young's modulus	\bar{x}	% Elongation	\bar{x}
A95X5 -Ca220Fe01	1	9.2817		67.0070		15.9000	
	2	14.1126		82.4383		22.0300	
	3	9.2182	14.8231	133.6059	147.4426	24.9700	17.7150
	4	12.2732		67.9664		23.7000	
	5	15.2526		122.2651		14.6300	
A90X10 -Ca220Fe01	1	13.6214		88.4188		25.3000	
	2	19.4875		147.8694		26.4700	
	3	9.1447	14.8165	74.2621	100.3764	22.1000	26.5060
	4	15.8751		63.0460		31.9300	
	5	15.9537		128.2855		26.7300	
A100X0 -Ca220Fe02	1	21.5808		82.9952		37.6700	
	2	13.8297		116.5402		21.0000	
	3	20.5547	17.4849	191.4811	127.5098	22.6700	24.6860
	4	18.1143		163.0096		17.2700	
	5	13.3450		83.5227		24.8200	
A95X5 -Ca220Fe02	1	19.5486		41.2539		28.0300	
	2	9.3857		35.2279		43.6700	
	3	12.9055	18.5199	43.7651	138.5065	34.0000	24.6525
	4	11.4223		38.1712		25.3700	
	5	10.4332		38.4809		29.9000	
A90X10 -Ca220Fe02	1	13.3438		65.5549		24.1000	
	2	13.0330		73.0423		30.6700	
	3	13.7971	12.7391	146.2255	39.3798	16.3300	32.1940
	4	12.7700		68.3950		25.6700	
	5	13.7810		64.3956		27.3300	
A100X0 -Ca220Fe05	1	42.0399		671.4976		41.8900	
	2	34.2274		485.7620		12.7700	
	3	39.2482	38.7571	940.5290	737.7352	13.4700	12.4120
	4	34.0929		723.6480		9.5300	
	5	44.1770		867.2392		11.4000	
A95X5 -Ca220Fe05	1	17.3639		195.2651		17.4700	
	2	20.0304		323.3226		18.6000	
	3	20.3743	18.4503	358.8640	228.2887	14.6700	16.6420
	4	16.0327		236.5030		16.6300	
	5	18.4512		270.4887		15.8400	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับหน่วยงานที่ออกหรือเก็บเงินค่าบำรุงรักษา ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓2 (ต่อ)

สูตร	ชั้นที่	stress at maximum load	\bar{x}	young's modulus	\bar{x}	% Elongation	\bar{x}
A90X10 -Ca220Fe05	1	31.1264		471.4141		15.6700	
	2	27.4250		215.2916		12.700	
	3	31.8678	30.2654	558.8083	429.8860	11.9300	14.5740
	4	25.0155		296.1889		13.6000	
	5	35.8921		607.7268		18.9700	
A100X0 -Ca220Fe10	1	50.9496		1667.4320		9.0000	
	2	55.1144		1444.7730		12.1000	
	3	56.0334	54.2220	1395.2570	1347.9314	11.0000	11.0740
	4	56.8112		1064.8720		11.5700	
	5	52.2013		1167.3230		11.7000	
A95X5 -Ca220Fe10	1	25.5383		604.6155		9.0700	
	2	23.5037		416.6184		9.4700	
	3	36.3967	28.2822	609.4135	501.9057	7.4000	8.4925
	4	27.6902		376.9753		8.0300	
	5	28.2823		501.9057		8.4900	
A90X10 -Ca220Fe10	1	18.2458		115.6136		25.6700	
	2	12.1968		204.4733		14.6300	
	3	19.5074	16.7181	795.9711	320.6341	10.0000	16.1740
	4	13.5373		162.5919		19.1000	
	5	20.1032		324.5208		11.4700	
A100X0 -Ca220Fe25	1	42.2593		595.4033		8.6000	
	2	45.7913		646.111		11.8000	
	3	56.2843	49.0231	960.4808	820.3775	12.8300	11.4320
	4	55.5854		571.6224		8.4300	
	5	45.1949		1328.2700		15.5000	
A95X5 -Ca220Fe25	1	46.2346		937.9429		9.2300	
	2	40.1054		665.1420		8.8300	
	3	38.2900	43.4103	1160.1310	1032.6147	7.1000	7.9120
	4	52.2111		1369.6430		6.7000	
	5	40.2103		1030.2147		7.7000	
A90X10 -Ca220Fe25	1	50.5977		773.2806		11.3000	
	2	67.0841		775.2013		14.2700	
	3	57.2569	58.3419	1337.0870	998.3017	10.3000	11.3000
	4	63.8413		1300.8170		10.2300	
	5	52.9293		805.1225		10.4000	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฌ2 (ต่อ)

สูตร	ชั้นที่	stress at maximum load	\bar{x}	young's modulus	\bar{x}	% Elongation	\bar{x}
A100X0 -Ca220Fe50	1	43.9832	37.6829	1094.7280	707.7909	10.3000	10.5200
	2	40.7429		736.1630		9.0000	
	3	28.6826		622.1184		16.1700	
	4	42.7008		488.1694		9.7000	
	5	32.3047		597.7755		7.4300	
A95X5-Ca220Fe50	1	23.6465	26.1766	388.2279	408.0701	8.4000	9.4680
	2	30.2216		281.1362		9.7700	
	3	20.2557		538.3516		5.3300	
	4	29.3911		392.6777		13.9700	
	5	27.3680		439.9569		9.8700	
A90X10 -Ca220Fe50	1	29.0934	31.1593	540.7223	610.7603	11.7700	11.2280
	2	26.9999		868.1729		8.1000	
	3	33.5921		482.8045		13.5000	
	4	32.4669		764.7968		11.7000	
	5	33.6440		397.3052		11.0700	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้