

การเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย

Preparation of Hydrogel from Carboxymethylcellulose
and Fibroin from Thai Silk

พชกกาญจน์ จันทรีส่องแสง
HATHAIKARN JUNSONGSANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของทวศักรศึกษาทางหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

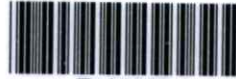
พ.ศ. ๒๕๕๕

KMITL-2012-SC-M-014-012

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย

**Preparation of Hydrogel from Carboxymethylcellulose
and Fibroin from Thai Silk**

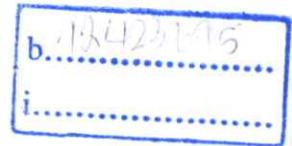


T122987

หทัยกาญจน์ จันทรส่องแสง

HATHAIKARN JUNSONGSANG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 122987
วัน,เดือน,ปี 10 ต.ค. 2555



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2555

KMITL-2012-SC-M-014-012

**Preparation of Hydrogel from Carboxymethylcellulose
and Fibroin from Thai Silk**

HATHAIKARN JUNSONGSANG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2012

KMITL-2012-SC-M-014-012

COPYRIGHT 2012

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอิน
จากไหมไทย

Preparation of Hydrogel from Carboxymethylcellulose
and Fibroin from Thai Silk

นักศึกษา

นางสาวทศยากาญจน์ จันทร์ส่องแสง

รหัสประจำตัว

52651201

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

เทคโนโลยีพอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์	วรมงคลชัย	
รศ.ดร.จุฑารัตน์	ปรัชญาวารากร	
ผศ.ดร.ชิตชนก	มีใจชื่อ	
รศ.ดร.มาลินี	ชัยศุกกิจสินธ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 30 เมษายน พ.ศ. 2555 เวลา 13.00 - 16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 316 ชั้น 3 อาคารปฏิบัติการใหม่

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.คณิน ธนะบริพัฒน์)
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 18 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 55

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และไฟโบรอินจากไหมไทย
นักศึกษา	นางสาวหทัยกาญจน์ จันทร์ส่องแสง
รหัสประจำตัว	52651201
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2555
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไฟโบรอินจากไหมไทย โดยใช้เอ็น, เอ็น-เมทิลินบิสอะคริลาไมด์เป็นสารก่อก้อนระเชื่อมโยง และใช้แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนปริมาณอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลต่ำกับไฟโบรอิน อัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลสูงกับไฟโบรอิน ปริมาณสารก่อก้อนระเชื่อมโยง และปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยาต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม ได้แก่ ลักษณะทางกายภาพ การดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ ค่าสัดส่วนเจล การดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายบัฟเฟอร์ การดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายเกลือ สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล

ผลการทดลองพบว่าภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกันฟิล์มผสมที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลสูงดูดซับน้ำได้ดีกว่าฟิล์มผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเพราะมีหมู่คาร์บอกซิเลตจำนวนมากขึ้น ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาอัตราส่วนระหว่าง 5% (w/v) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสน้ำหนักโมเลกุลสูงต่อ 2% (w/v) ไฟโบรอินที่ 20:10 (v/v) มาศึกษาการเพิ่มปริมาณสารก่อก้อนระเชื่อมโยงและสารริเริ่มปฏิกิริยาพบว่า สารก่อก้อนระเชื่อมโยงและสารริเริ่มปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นช่วยปรับปรุงความเสถียรของฟิล์ม แสดงว่าจำนวนพันธะเชื่อมโยงมากและความยาวของพอลิเมอร์เชื่อมขวางมีผลต่อรูปร่างที่เสถียรของฟิล์มหลังแช่น้ำ แต่การดูดซับน้ำที่สมดุลลดลง เนื่องจากพันธะเชื่อมโยงมากและลดขนาดช่องว่างที่จับโมเลกุลน้ำ ผลของไอออนประจุบวกที่มีต่อการดูดซับน้ำพบว่า $LiCl > NaCl > KCl > CaCl_2 > AlCl_3$ นั่นคือขนาดไอออนประจุบวกเล็กเกิดแรงดึงดูดกับหมู่ COO^- ได้น้อยกว่าประจุบวกขนาดใหญ่ สำหรับประจุบวกไอออนมากกว่าหนึ่งเกิดแรงดึงดูดเชิงซ้อนกับหมู่ COO^- จึงดูดน้ำได้ลดลง อิทธิพลความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย พบว่า ฟิล์มดูดซับน้ำที่สมดุลได้สูงสุดที่ pH 7 และดูดซับน้ำที่สมดุลต่ำสุดที่ pH 14 ฟิล์มไฮโดรเจลแสดงสมบัติเป็น pH-sensitive hydrogel และการผสมไฟโบรอินในฟิล์มช่วยให้สมบัติเชิงกล เช่น ค่าความทนแรงดึง การดึงยืด ณ จุดขาดสูงขึ้น แต่ modulus ของฟิล์มลดลง

Thesis Title	Preparation of Hydrogel from Carboxymethylcellulose and Fibroin from Thai Silk
Student	Hathaikarn Junsongsang
Student ID	52651201
Degree	Master of Science
Program	Polymer Technology
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Malinee Chaisupakitsin

ABSTRACT

The research focus on preparation of hydrogel from carboxymethylcellulose (CMC) and fibroin from Thai silk (SF). Hydrogel was prepared by using N, N-methylene-bis-acrylamide (BIS) as a crosslinking agent. Ammonium persulfate (APS) was used as an initiator. Investigation and comparison of various CMC_L/SF ratio, CMC_H/SF ratio, amount of crosslinking agent and initiator on properties of sheet such as physical property, %water uptake, %equilibrium swelling, %water retention, %gel fraction, %equilibrium swelling in buffer solutions, %equilibrium swelling in salt solutions, thermal property and mechanical property was study.

The experimental result found that under the same condition high molecular weight CMC absorbed water higher than low molecular weight CMC due to higher carboxylate group. In case of study on the effect of BIS and APS concentration, selected the ratio of $CMC_H:SF$ at 20:10 (v/v) as a model. The results showed that increasing the amount of BIS and APS improved stability of film. The number of crosslinking and the length of crosslinked network showed the influenced on the stability of film profile. On the other hand, the network absorption was decreased according to higher crosslink density and diminishment of network voids for holding water. Effect of cation on the water absorption found in the following order $LiCl > NaCl > KCl > CaCl_2 > AlCl_3$. These clearly shows that intermolecular interaction between the carboxylate group with small cation is lower than large cation. In addition, multivalent cations decrease the water absorption. The decrease was attributed to the complexing ability of COO^- that induced interchain complex formation. The influence of the pH of medium on the swelling profiles of hydrogels was studied. It was noticed that the water absorption of hydrogel at equilibrium is the highest at pH 7 and the lowest at pH 14. This hydrogel film shows pH sensitive hydrogel. Mixing silk fibroin in the CMC hydrogel improved tensile strength and elongation at break but modulus was decreased.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือ ความร่วมมือ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวารากร รศ.ดร. สมศักดิ์ วรรณกลชัย และ ผศ.ดร. จิตชนก มีใจซื่อ คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. กัญญา ดันติวิสุทธิกุล ที่ให้คำปรึกษาและความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจตลอดมา ตลอดจนเพื่อนๆ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีทุกท่านที่คอยช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้การดำเนินงานวิจัยนี้ดำเนินไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ยังมีบุคคลท่านอื่นๆ ที่มีส่วนให้ความช่วยเหลือที่ยังมิได้กล่าวถึงอีกมากมาย ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

หทัยกาญจน์ จันทร์ส่องแสง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไฮโดรเจล.....	3
2.1.1 ความหมายของไฮโดรเจล.....	3
2.1.2 พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล.....	4
2.1.3 พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล.....	4
2.1.4 ประเภทของไฮโดรเจล.....	5
2.1.5 ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล.....	7
2.1.6 การเตรียมไฮโดรเจล.....	8
2.1.7 กลไกและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล.....	9
2.1.8 สมบัติของไฮโดรเจลและการนำไปใช้งาน.....	10
2.2 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	11
2.2.1 สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้าง.....	11
2.2.2 การผลิตอนุพันธ์ของเซลลูโลส.....	12
2.2.3 สมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	12
2.2.4 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	13
2.2.5 สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6 การนำไปใช้ประโยชน์.....	13
2.3 โหม.....	15
2.3.1 โหมไฟโบรอิน.....	18
2.3.2 สมบัติของเส้นใยโหมไฟโบรอิน.....	24
2.3.3 การปรับปรุงเส้นใยโหมด้วยวิธีการทางเคมี.....	29
2.3.4 การนำโหมไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ.....	30
2.4 พอลิเมอร์ผสม.....	34
2.4.1 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสม.....	36
2.4.2 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถ ในการผสมเข้ากันได้.....	37
2.4.3 เคมีของพอลิเมอร์ผสม.....	37
2.4.4 สมบัติโดยทั่วไป.....	39
2.5 การดูดซับ.....	40
2.5.1 กระบวนการดูดซับ.....	40
2.5.2 ลักษณะการดูดซับ.....	41
2.5.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้าย โมเลกุล.....	42
2.5.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	43
2.6 กระบวนการหล่อขึ้นรูป.....	44
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน.....	48
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	48
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	49
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	49
3.3.1 การเตรียมเส้นใยโหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย.....	49
3.3.2 การเตรียมสารละลายโหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย.....	51
3.3.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับ สารละลายโหมไฟโบรอิน.....	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและ สารละลายไหมไฟโบรอิน.....	53
3.4 การทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม.....	55
3.4.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน.....	55
3.4.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ.....	56
3.4.3 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล.....	57
3.4.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน.....	57
3.5 สรุปแผนผังการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล.....	58
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	59
4.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 1-7.....	60
4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ สูตร 1-7.....	60
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	64
4.1.3 สมบัติการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น.....	68
4.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 8-14.....	74
4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ สูตร 8-14.....	74
4.2.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	75
4.2.3 สมบัติการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น.....	78
4.3 ศึกษาผลของปริมาณ BIS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 15-17.....	84
4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ สูตร 15-17.....	84
4.3.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	85
4.3.3 สมบัติการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเมื่อเพิ่มปริมาณ BIS.....	87
4.4 ศึกษาผลของปริมาณ APS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 18-20.....	92
4.4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ สูตร 18-20.....	92
4.4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR.....	93

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.3 สมบัติการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเมื่อเพิ่มปริมาณ APS.....	94
4.5 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 3, 7, 10 และ 14.....	99
4.6 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายเกลือ.....	101
4.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อน โดยใช้เทคนิค TGA.....	102
4.8 ศึกษาสมบัติเชิงกล.....	106
4.8.1 ค่าความแข็งแรงดึง.....	107
4.8.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด.....	108
4.8.3 ค่ามอดุลัสของยัง.....	109
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	110
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	111
เอกสารอ้างอิง.....	112
ภาคผนวก.....	117
ภาคผนวก ก.....	118
ภาคผนวก ข.....	131
ภาคผนวก ค.....	140
ภาคผนวก ง.....	142
ภาคผนวก จ.....	153
ประวัติผู้เขียน.....	159

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พอลิเมอร์จากธรรมชาติและพอลิเมอร์ธรรมชาติดัดแปร ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล.....	8
2.2 องค์ประกอบที่สำคัญในเส้นใยไหม.....	17
2.3 แสดงชื่อของกรดแอลฟาอะมิโนที่พบมากในธรรมชาติ มี 20 ชนิด.....	18
2.4 สูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนที่พบในไหม.....	19
2.5 สมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกาย.....	21
2.6 กรดอะมิโนในไฟโบรอินและเซรีซินของไหมไทยนางน้อย.....	24
3.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ตอนที่ 1.....	53
3.2 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ตอนที่ 2.....	54
3.3 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ตอนที่ 3.....	54
3.4 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม ตอนที่ 4.....	55
4.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล.....	59
4.2 รูปชิ้นงานก่อนและหลังแช่น้ำกลั่น สูตร 1-7.....	61
4.3 สรุปเลขคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำและสารละลายไหมไฟโบรอิน.....	66
4.4 รูปชิ้นงานก่อนและหลังแช่น้ำกลั่น สูตร 8-14.....	74
4.5 สรุปเลขคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง.....	76
4.6 รูปชิ้นงานก่อนและหลังแช่น้ำกลั่น สูตร 15-17 เปรียบเทียบกับ สูตร 11.....	84
4.7 สรุปเลขคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide).....	85
4.8 รูปชิ้นงานก่อนและหลังแช่น้ำกลั่น สูตร 18-20 เปรียบเทียบกับ สูตร 11.....	92
4.9 แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ.....	102
ข-1 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล.....	133
ข-2 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล.....	134
ข-3 แสดงค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล.....	135
ข-4 แสดงค่าของแข็งที่เหลือเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล.....	137
ข-5 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์.....	138

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข-6 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่งต่างชนิดกัน.....	138
ข-7 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเกลือที่มีประจุบวกต่างชนิดกัน.....	139
ค-1 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสภาวะต่างๆ.....	141

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลของสภาวะแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของไฮโดรเจล.....	3
2.2 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจล.....	3
2.3 แสดงการบวมน้ำของ Physical hydrogel.....	4
2.4 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจลชนิด Interpenetrating Polymer Network, IPN.....	6
2.5 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล.....	10
2.6 โครงสร้างของไฮโดรเจลคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส.....	11
2.7 วงจรชีวิตของไหม.....	16
2.8 โครงสร้างสามมิติของไหม.....	19
2.9 แสดงลักษณะ โครงสร้างของไหมไฟโบรอินชนิดแผ่นจิบ.....	20
2.10 แสดงภาพตัดขวางของเส้นไหมจากรังไหม Bombyx mori.....	25
2.11 โครงสร้างของเส้นใยไหมไหม.....	25
2.12 SEM เส้นไหมเลี้ยง ไหมดิบไม่มีการลอกทากไหม (เซรีซิน) ออก.....	26
2.13 SEM เส้นไหมที่มีการลอกทากไหม (เซรีซิน) ออก โดยสกัดเป็นเวลา 60 นาที.....	26
2.14 ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย โมเลกุลของสารดูดซับมายังสารดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	42
3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมเส้นใยไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย.....	50
3.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย.....	51
3.3 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง.....	52
3.4 แสดงขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	57
3.5 แสดงสรุปแผนผังการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล.....	58
4.1 แสดงปฏิกิริยาการเกิดพันธะเชื่อมโยงในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง CMC กับ SF.....	62
4.2 แบบจำลอง โครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง CMC กับ SF.....	64
4.3 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนัก โมเลกุลต่ำ.....	64
4.4 แสดง IR spectrum ของสารละลายไหมไฟโบรอิน.....	65
4.5 แสดง IR spectrum ของสูตร 1-5.....	67
4.6 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 1-5.....	68
4.7 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำสมมูล (%) ในน้ำกลั่น ณ จุดสมมูล ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 1-5.....	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟเปรียบเทียบการกักเก็บน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 1-5.....	70
4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเจล (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตรที่ 1-5.....	71
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ เปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล เทียบกับปริมาณ CMC_L	72
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำและเปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล.....	72
4.12 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนัก โมเลกุลสูง.....	76
4.13 แสดง IR spectrum ของสูตร 8-12.....	77
4.14 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12.....	78
4.15 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำสมดุล (%) ในน้ำกลั่น ณ จุดสมดุล ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12.....	79
4.16 กราฟเปรียบเทียบการกักเก็บน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12.....	80
4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเจล (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12.....	81
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ เปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล เทียบกับปริมาณ CMC_H	81
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำและเปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล.....	82
4.20 แสดง IR spectrum ของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide).....	85
4.21 แสดง IR spectrum ของสูตร 15-17.....	86
4.22 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 กับ สูตร 11.....	87
4.23 กราฟการดูดซับน้ำสมดุล (%) ในน้ำกลั่น ณ จุดสมดุล ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 เปรียบเทียบกับ สูตร 11.....	88
4.24 กราฟเปรียบเทียบการกักเก็บน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 กับ สูตร 11.....	89
4.25 กราฟเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเจล (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 กับ สูตร 11.....	90

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ เปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล เทียบกับปริมาณ BIS.....	90
4.27 แสดง IR spectrum ของสูตร 18-20.....	93
4.28 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 กับ สูตร 11.....	94
4.29 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำสมมูล (%) ในน้ำกลั่น ณ จุดสมมูล ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 กับ สูตร 11.....	95
4.30 กราฟเปรียบเทียบการกักเก็บน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 กับ สูตร 11.....	96
4.31 กราฟเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเจล (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 กับ สูตร 11.....	97
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ เปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล เทียบกับปริมาณ APS.....	97
4.33 กราฟการดูดซับน้ำสมมูล (%) ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 3, 7, 10 และ 14 ณ จุดสมมูล ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11.....	99
4.34 แบบจำลองของความเป็นกรด-ด่างต่อโครงสร้างการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล.....	100
4.35 กราฟดูดซับน้ำสมมูล (%) ในสารละลายเกลือของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11 (CMC:SF, 20:10).....	101
4.36 แสดงสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ.....	104
4.37 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ.....	107
4.38 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ.....	108
4.39 กราฟแสดงค่ามอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ.....	109
จ-1 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	143
จ-2 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง.....	143
จ-3 แสดง IR spectrum ของสารละลายไหมไฟโบรอิน.....	144
จ-4 แสดง IR spectrum ของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide) (BIS).....	144
จ-5 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 1 (CMC _L :SF, 5:25).....	145
จ-6 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 2 (CMC _L :SF, 10:20).....	145

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ง-7 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 3 (CMC _L :SF, 15:15).....	146
ง-8 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 4 (CMC _L :SF, 20:10).....	146
ง-9 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 5 (CMC _L :SF, 25:5).....	147
ง-10 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 8 (CMC _H :SF, 5:25).....	147
ง-11 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 9 (CMC _H :SF, 10:20).....	148
ง-12 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 10 (CMC _H :SF, 15:15).....	148
ง-13 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 11 (CMC _H :SF, 20:10).....	149
ง-14 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 12 (CMC _H :SF, 25: 5).....	149
ง-15 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 15 (BIS 0.4 g).....	150
ง-16 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 16 (BIS 0.6 g).....	150
ง-17 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 17 (BIS 0.8 g).....	151
ง-18 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 18 (APS 0.4 g).....	151
ง-19 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 19 (APS 0.6 g).....	152
ง-20 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 20 (APS 0.8 g).....	152
จ-1 เทอร์โมแกรม TGA ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ.....	154
จ-2 เทอร์โมแกรม TGA ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง.....	154
จ-3 เทอร์โมแกรม TGA ของสารละลายไหมไฟโบรอิน.....	155
จ-4 เทอร์โมแกรม TGA ของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide) (BIS).....	155
จ-5 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 4 (CMC _L :SF, 20:10).....	156
จ-6 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 8 (CMC _H :SF, 5:25).....	156
จ-7 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 10 (CMC _H :SF, 15:15).....	157
จ-8 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 11 (CMC _H :SF, 20:10).....	157
จ-9 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 17 (BIS 0.8 g).....	158
จ-10 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 20 (APS 0.8 g).....	158

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose, CMC) หรือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethylcellulose) เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสประเภทหนึ่ง เกิดจากการแปรรูปหรือปรับปรุงเซลลูโลสโดยการแทนที่โครงสร้างเดิมด้วยหมู่เมทิลและหมู่คาร์บอกซีเมทิล มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม ละลายน้ำได้ดีมีสมบัติเป็นสารเพิ่มความหนืดที่ช่วยในการยึดเกาะและเป็นสารคงสภาพ การใช้ประโยชน์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย อาทิ ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดในอุตสาหกรรมกรรมอาหาร เช่น ไอศกรีม ใช้เป็นสารเคลือบผิวแคปซูลยา หรือสารก่อให้เกิดการเป็นเจลทางการแพทย์และเภสัชกรรม

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะเรื่องขยะและของเสียซึ่งส่งผลกระทบต่อสถานะแวดล้อม และเมื่อไม่นานมานี้หลายๆ ประเทศรวมทั้งประเทศไทยได้มีข้อกำหนดทางด้านสิ่งแวดล้อม นโยบายและมาตรการต่างๆ ที่มุ่งลดปริมาณขยะ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ที่มีการผลิตขึ้นมาจากปิโตรเคมีภัณฑ์ เป็นวัสดุที่ยากต่อการย่อยสลาย และยังคงพบว่ามีขยะบางส่วนมาจากเศษเหลือทางการเกษตรที่เกษตรกรไม่ต้องการนำไปใช้ประโยชน์แล้ว จึงนำไปสู่การศึกษาวิจัยเพื่อนำวัสดุทางธรรมชาติที่หาได้ง่าย มีปริมาณมาก ราคาถูก และปลูกทดแทนได้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ไหมเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีการผลิตในประเทศไทย ซึ่งไหมจากตัวไหมจะผลิต โปรตีนไหมหลัก 2 ชนิด ออกมาจากต่อมในรูปของเหลว คือ ไฟโบรอินและเซรีซิน โดยไฟโบรอินมีจำนวน 2 เส้น คิดเป็นส่วนประกอบประมาณ 50-70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโปรตีนไหมทั้งหมด ส่วนที่เหลือจะเป็นเซรีซิน ปัจจุบันเส้นใยไฟโบรอินสามารถนำไปใช้ประโยชน์นอกเหนือจากการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า อุตสาหกรรมอาหาร หรือนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องสำอางชนิดต่างๆ เนื่องจากสมบัติทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบในโปรตีนไฟโบรอิน นอกจากนั้นไฟโบรอินที่ผ่านกระบวนการทำเป็นสารละลาย หรือทำให้อยู่ในรูปของสารไฟโบรอินที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น สามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นวัสดุทางการแพทย์ได้ อาทิเช่น ผิวน้ำเทียม คอนแทคเลนส์ วัสดุเพาะกระดูก วัสดุควบคุมการกระจายตัวของยา เป็นต้น ในปัจจุบันกระบวนการผลิตเส้นไหมจะมีส่วนที่ไม่สามารถทำเป็นเส้นด้ายซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า เศษไหม (Silk waste) ซึ่งเศษไหมดังกล่าวที่เกิดขึ้นมีปริมาณค่อนข้างมาก ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ และมีราคาต่ำ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และ โพรตีนไฟโบรอินจากไหมไทยมาเป็นองค์ประกอบในการเตรียมพอลิเมอร์โครงร่างแหกึ่งสอดคล้องไว้ในรูปของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล เนื่องจากสมบัติบางประการของวัสดุทั้งสอง คือ ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย สามารถดูดซึมน้ำและสารละลายบางอย่างได้เป็นอย่างดี เพื่อปรับปรุงสมบัติของแผ่นฟิล์ม เพิ่มทางเลือกและมูลค่าให้กับวัสดุทางด้านเภสัชกรรม รวมทั้งเป็นการนำโปรตีนที่ได้จากรังไหมไทยซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากในประเทศ มาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการเตรียมสารละลายไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย
2. เพื่อศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจากสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับสารละลายไหมไฟโบรอิน และปรับปรุงด้วยสารก่อก้อนระเชื่อมโยง
3. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. เตรียมสารละลายไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย
2. ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล คือ อัตราส่วนระหว่าง สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อสารละลายไหมไฟโบรอิน ปริมาณสารก่อก้อนระเชื่อมโยง และตัวริเริ่มปฏิกิริยา
3. ศึกษาปริมาณการดูดซึมน้ำ การดูดซึมน้ำที่สมดุล ที่แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถดูดซับได้ในน้ำกลั่น สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นกรด-ด่างต่างๆ และสารละลายเกลือ การกักเก็บน้ำและน้ำหนักของแข็งที่เหลือ
4. ศึกษาสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสถานะต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

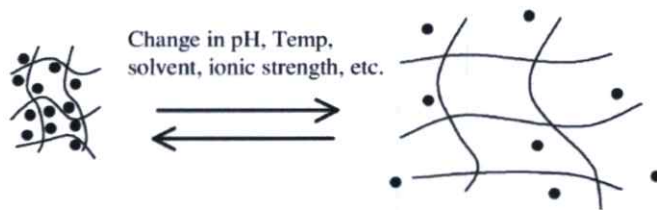
1. ได้ผลิตภัณฑ์จากพอลิเมอร์โครงร่างแหกึ่งสอดคล้องชนิดใหม่
2. ได้องค์ความรู้ในการเตรียมสารละลายไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยเพื่อนำไปพัฒนาเป็นวัสดุทางการแพทย์ต่อไป
3. สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทางการแพทย์ชนิดอื่นต่อไป
4. เพื่อเพิ่มทางเลือกและมูลค่าให้กับวัสดุทางการแพทย์ รวมทั้งเป็นการนำโปรตีนจากรังไหมไทยซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีมากในประเทศ มาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างคุ้มค่า
5. ได้พัฒนาศักยภาพของนักวิจัยให้เกิดทักษะในการวิจัยที่ดีมากขึ้น

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

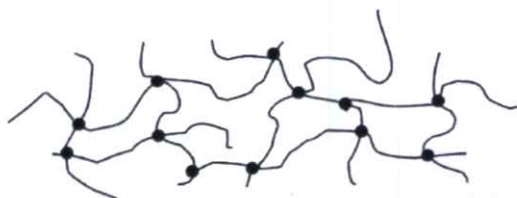
2.1 ไฮโดรเจล (Hydrogels)

2.1.1 ความหมายของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลเป็นสารในกลุ่มของพอลิเมอร์ที่มีคุณลักษณะพิเศษเมื่ออยู่ในน้ำที่มีปริมาณมากจะพองตัว และสามารถดึงดูน้ำเข้าไปในโครงสร้างที่มีการพองตัวได้ สารเหล่านี้จะไม่ละลายน้ำแต่จะคงสภาพที่เป็นโครงสร้างตาข่าย (Three dimensional network) ไว้ โดยส่วนมากไฮโดรเจลจะเป็นสารในกลุ่มพอลิเมอร์ที่มีหมู่ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) เกิดการเชื่อมขวางกันด้วยพันธะเคมีหรือพันธะอื่นๆ ไฮโดรเจลที่แห้งจะเรียกว่า ซีโรเจล (Xerogel) หรือ Dry gel ซึ่งในระหว่างการระเหยน้ำออกจากไฮโดรเจลลักษณะ โครงสร้างเจล (Gel structure) จะหดตัวลง หากมีน้ำออกจากไฮโดรเจลโดยที่ไม่รบกวนโครงสร้างของเจลจะได้ไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นรูพรุน (เกือบ 98% ของโครงสร้าง) ซึ่งไฮโดรเจลแห้งที่มีลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่า แอร์โรเจล (Aerogel) หรือ สปอน (Sponge) โดยปกติไฮโดรเจลจะสามารถดูดซับน้ำได้ 10-20% ของน้ำหนักไฮโดรเจลแห้ง [1] ไฮโดรเจลแห้งดูดซับน้ำได้มากกว่า 15% ของน้ำหนักไฮโดรเจลแห้ง จะเรียกว่าเป็น ซุปเปอร์แอบซอร์เบนต์ (Superabsorbent) [2] ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า Volume collapse หรือ Phase transition [1] ปัจจัยภายนอกที่มักกระตุ้น เช่น pH, อุณหภูมิ, Ionic strength, Electric field หรือความเข้มข้นยา [3] ดังโมเดลที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ผลของสภาวะแวดล้อมต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะของไฮโดรเจล [3]



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจล [4]

2.1.2 พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล [5]

พันธะทางเคมีของไฮโดรเจล สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. พันธะภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Intramolecular interaction) เนื่องจากการเชื่อมต่อกันของมอนอเมอร์ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอน (C) จึงทำให้มีพันธะ โคเวเลนต์เพื่อยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของคาร์บอน

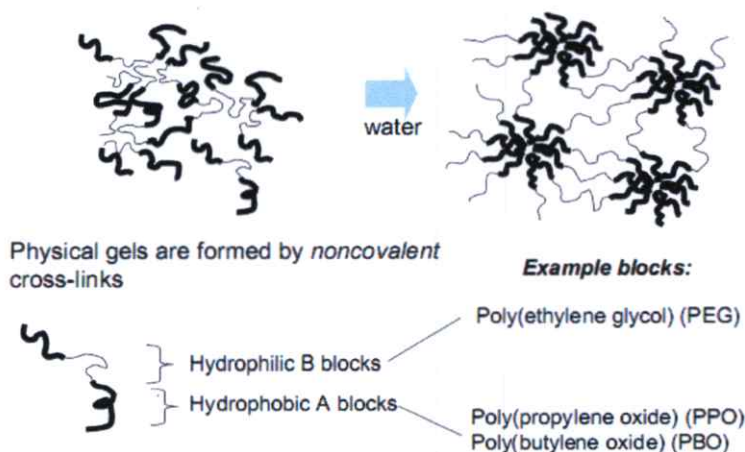
2. พันธะระหว่างโมเลกุล (Intermolecular interaction) สามารถแบ่งออกได้หลายแบบ เช่น พันธะไฮโดรเจน ที่เกิดจากการดึงดูดอะตอมไฮโดรเจน โดยอะตอมของธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (EN) สูง เช่น F, O, N, Cl เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแรงไดโพล-ไดโพล ที่เกิดจากการมีแรงยึดเหนี่ยวหรือมีแรงผลักรวมของโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งแรงนี้เป็นแรงที่อ่อนมากที่สุด

จากพันธะต่างๆ ข้างต้น จะเห็นว่าพันธะภายในโมเลกุลมีความแข็งแรงมากกว่าพันธะระหว่างโมเลกุล ดังนั้นการที่จะทำลายโครงสร้างของโมเลกุลพอลิเมอร์ ต้องใช้พลังงานที่สูงมาก

2.1.3 พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล [5]

พันธะเชื่อมโยงของไฮโดรเจล มี 2 ลักษณะ คือ

1. พันธะเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical crosslinked) โดยจะมีการทำให้เกิดเป็นโครงร่างแหสามมิติ ด้วยพันธะไฮโดรเจน หรือแรงทางไฟฟ้าสถิต โดยจะมีการอยู่ร่วมกันเป็นกลุ่มคล้ายปมของเชือก ไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถเตรียมได้จากเทคนิคที่เรียกว่า Freezing and thawing สมบัติของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะมีการหลอมเหลวที่อุณหภูมิไม่สูง ประมาณ 55°C และเรียกไฮโดรเจลที่มีพันธะเชื่อมโยงในลักษณะนี้ว่า Physical hydrogel หรือ Pseudogel



รูปที่ 2.3 แสดงการบวมตัวของ Physical hydrogel [4]

2. พันธะเชื่อมโยงทางเคมี (Chemical crosslinked) โดยจะมีการให้เกิดพันธะเชื่อมโยงที่เป็นพันธะโคเวเลนต์ หรือเป็นพันธะทางเคมีอื่นๆ โดยมีการใช้สารเชื่อมโยงเป็นสารเคมี เช่น สารประกอบพวกแอลดีไฮด์ และมีการใช้แสงหรือความร้อนในการเชื่อมโยง เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา ซึ่งการเชื่อมโยงโดยวิธีนี้ จะได้พันธะเชื่อมโยงเป็นพันธะโคเวเลนต์ชนิดคาร์บอน-คาร์บอน (C-C bond) ที่มีความแข็งแรงสูง

2.1.4 ประเภทของไฮโดรเจล

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งออกเป็นหลายชนิดขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ ดังต่อไปนี้

2.1.4.1 แบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ (Fabrication of hydrogels) [6]

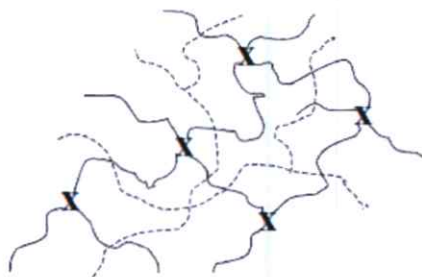
ไฮโดรเจลแบ่งตามลักษณะการสังเคราะห์ได้เป็น 4 แบบ คือ

1. ไฮโดรเจลแบบแผ่นฟิล์ม (Cast film) ไฮโดรเจลแบบนี้มักนำไปใช้เคลือบผิววัสดุต่างๆ โดยมีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) เพื่อป้องกันไม่ให้พอลิเมอร์ละลายในตัวกลางที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ หรือในบางกรณีหลังจากเคลือบลงบนผิววัสดุแล้วอาจจะทำการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะโคเวเลนต์ (Covalently crosslinked) โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ประกอบด้วยทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างไฮโดรเจลชนิดนี้ได้แก่ พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาครีเลต) (Poly(2-hydroxyethylmethacrylate), PHEMA) ไฮโดรไลซ์พอลิอะครีโลไนไทรล์ (hydrolyzed Polyacrylonitrile) และพอลิ(เมทิลเมทาครีเลต-โค-เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) (Poly(methyl methacrylate-co-N-vinyl-2-pyrrolidone)) [7] เป็นต้น

2. ไฮโดรเจลแบบโครงร่างตาข่าย (Crosslinked network) ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยฉีดสารผสมของมอนอเมอร์ (Monomer) ตัวริเริ่ม (Initiator) และตัวเชื่อมต่อ (Crosslinking agent) หรือในบางกรณีอาจจะผสม ตัวทำละลายลงไปด้วยเข้าไปในแม่พิมพ์ จากนั้นทำให้เกิดพอลิเมอร์เซชันในแม่พิมพ์นั้น ตัวอย่างเช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาครีเลต) พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาครีเลต-โค-เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) พอลิอะครีลาไมด์ (Polyacrylamide) และพอลิ(ไวนิลแอลกอฮอล์) (Poly(vinyl alcohol)) [6] เป็นต้น

3. ไฮโดรเจลแบบกราฟท์บนพื้นผิว (Surface grafted polymer) ไฮโดรเจลแบบนี้เตรียมโดยการนำพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำไปทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์อื่นที่ไม่ละลายน้ำ ไฮโดรเจลที่ได้ไม่ละลายน้ำ วิธีการนี้สามารถใช้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้ โดยนำไฮโดรเจลไปทำให้เกิดพันธะกับพอลิเมอร์ ที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น กราฟท์โคพอลิเมอร์ของซัลโฟนิลยูเรียพอลิเมอร์กับพอลิ(เอิน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) (Sulfonylurea polymer and poly(N-vinyl-2-pyrrolidone) graft copolymer) [8] และกราฟท์โคพอลิเมอร์ของเจลาติน (Gelatin) พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาครีเลต) และพอลิ(บิวทิลอะครีเลต) (Poly(butyl acrylate)) [9] เป็นต้น

4. ไฮโดรเจลแบบอินเตอร์พีเนเตรคดิงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Interpenetrating Polymer Network, IPN) ไฮโดรเจลชนิดนี้เป็นการแทรกพอลิเมอร์สองชนิดที่มีโครงสร้างเป็นแบบโครงร่างตาข่ายเข้าด้วยกัน โดยโครงร่างทั้งสองไม่สามารถแยกออกจากกันได้ และมีความแข็งแรงมาก วิธีนี้เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลให้ดีขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง ตัวอย่างเช่น พอลิ(ไวนิลแอลกอฮอล์)/พอลิ(อะครีลิกเอซิด) อินเตอร์พีเนเตรคดิงพอลิเมอร์เน็ตเวิร์ก (Poly(vinyl alcohol)/Poly(acrylic acid) IPN) [10] เป็นต้น โครงสร้างของไฮโดรเจลชนิดนี้ แสดงดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของไฮโดรเจลชนิด Interpenetrating Polymer Network, IPN [4]

2.1.4.2 แบ่งตามขนาดของรูพรุน [6]

ไฮโดรเจลสามารถแบ่งตามขนาดของรูพรุน ได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous hydrogel) เป็นไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ในตัวทำละลายที่ดี โดยมอนอเมอร์ ตัวเชื่อมต่อและพอลิเมอร์สามารถละลายในตัวทำละลายได้ เจลที่ได้มีลักษณะใส ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกว่า ไฮโดรเจลแบบเนื้อเดียว (Homogeneous hydrogel) รูพรุนมีขนาดเล็ก เช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอธิลเมธาครีเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน PHEMA/H₂O เท่ากับ 2/1 และพอลิ(เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) ที่เตรียมโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย [6] เป็นต้น

2. ไฮโดรเจลที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous hydrogel) ในขั้นตอนการสังเคราะห์ไฮโดรเจลชนิดนี้ พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นไม่ละลายในตัวทำละลายที่ใช้สำหรับพอลิเมอร์ไรเซชันและตกตะกอนออกมา ไฮโดรเจลที่ได้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีสีขาวขุ่น หรือเรียกได้ว่าเป็น ไฮโดรเจลแบบเนื้อผสม (Heterogeneous hydrogel) ตัวอย่างเช่น พอลิ(2-ไฮดรอกซีเอธิลเมธาครีเลต) ที่เตรียมโดยมีอัตราส่วน PHEMA/H₂O เท่ากับ 1.25/1 และพอลิ(เมธิลเมธาครีเลต-โค-เอ็น-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) ที่เตรียมโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย [7] เป็นต้น

2.1.4.3 แบ่งตามชนิดการเชื่อมโยงของโครงสร้าง [8, 11]

ไฮโดรเจลแบ่งตามการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ไฮโดรเจลทางเคมี (Chemical hydrogels) มีการเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโควาเลนต์ ซึ่งเป็นการเชื่อมโยงที่แข็งแรงมาก ในหนึ่งโมเลกุลของมอนอเมอร์แบบนี้มักจะมี

หมู่ฟังก์ชันหลายตำแหน่ง (Multifunctional molecule) ที่สามารถเกิดการเชื่อมต่อได้ ไฮโดรเจลที่ได้ จะเกิดขบวนการไม่ย้อนกลับทางความร้อน (Heat-irreversible) คือ ไม่สามารถทำให้หลอมได้อีก หากมีการให้ความร้อนจนถึงจุดที่พันธะแตกออกจะเกิดการสลายตัว สมบัติจะเปลี่ยนไปจากเดิม ไฮโดรเจลชนิดนี้อาจเรียกอีกอย่างว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมเซต เนื่องจากไฮโดรเจลประเภทนี้มีความคงทน ไม่หลอมเหลวและไม่ละลายในตัวทำละลาย ทำให้มีข้อจำกัดในการขึ้นรูป เช่น พอลิ (ไดเมทาคริลาไมด์-โค-เอทิลีน ไดเมทาคริเลต) (Poly(dimethacrylamide-co-ethylene dimethacrylate) และพอลิ(2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต) ที่มีการเชื่อมต่อระหว่าง โมเลกุลด้วยเอทิลีน ไกลคอล ไดเมทาคริเลต [12] เป็นต้น

2. ไฮโดรเจลทางกายภาพ (Physical hydrogels) การเชื่อมต่อระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะไฮโดรเจน แรงระหว่างประจุ หรืออันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic interaction) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะโคเวเลนต์ ไฮโดรเจลประเภทนี้มีการผันกลับทางความร้อนได้ (Heat-reversible) หรือเรียกว่า ไฮโดรเจลชนิดเทอร์โมพลาสติก สามารถหลอมตัวเมื่อให้ความร้อนและแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นตัวลง โดยที่การให้ความร้อนไม่มีผลกระทบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮโดรเจล นอกจากนี้ยังสามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิด ทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถผสมสารอื่นลงในไฮโดรเจลได้ เช่น สารเติมแต่ง สารต้านทานจุลินทรีย์ และยา เป็นต้น ตัวอย่างของไฮโดรเจลประเภทนี้ ได้แก่ พอลิ(อะคริลาไมด์-โค-เมทิลเมทาคริเลต-โค-ไวนิลเอมีน) (Poly(acrylamide-co-methyl methacrylate-co-vinyl amine)) [13] และพอลิ(เมทิลเมทาคริเลต-โค-เอีน-ไวนิล-2-ไพโรลิโดน) [7] เป็นต้น

2.1.5 ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล [14]

ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจลมีดังนี้

พอลิอะคริลาไมด์ (Polyacrylamide) ($-CH_2CHCONH_2-$) เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้เมื่อไฮโดรไลซิสหมู่ฟังก์ชันเอไมด์เป็นแอนไอออนิกคาร์บอกซิเลต อะคริลาไมด์สามารถสังเคราะห์เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงได้ง่าย (ประมาณ 10 million g/mol) จึงนิยมใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ดูดซับ นอกจากนี้ยังมีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ อาจมีอะคริลาไมด์ซึ่งเป็น โมโนเมอร์ที่มีความเป็นพิษตกค้างในผลิตภัณฑ์ได้

พอลิเอทิลีนออกไซด์ ($-CH_2CH_2O-$) มีการใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ดูดซับน้อย แม้ว่าจะมีราคาถูก เนื่องจากการเตรียมให้ได้พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงและคงที่ทำได้ยาก การสังเคราะห์ในสถานะก๊าซจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่ค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์จะสูง

พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (-CH₂CH(OH)-) เป็นพอลิเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ดูดซับอย่างกว้างขวาง เตรียมได้จากไวนิลอะซิเตตเป็นพอลิไวนิลอะซิเตต แล้วเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เมื่อเกิดปฏิกิริยากับสาร Croslinker เช่น พอลิคาร์บอกซิลิก เป็นการเชื่อมโยงแบบเอสเทอร์ เกิดโครงสร้างของพอลิเมอร์ดูดซับ เมื่อใช้มอนอเมอร์ที่อยู่ในรูปของไวนิลแอลกอฮอล์จะมีราคาแพง

พอลิอะคริโลไนไตรล (Acrylonitrile) (-CH₂CH(CN)-) ใช้กราฟกับแป้งแล้วไฮโดรไลซิส หมูไนไตรล์ที่มีอยู่ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นหมูคาร์บอกซิลและหมูคาร์บอกซาไมด์ (Carboxamide) การเชื่อมโยงเกิดจากพันธะไฮโดรเจนและเชื่อมโยงแบบกายภาพ ขั้นตอนในการเตรียมมีหลายขั้นตอนและต้องจัดการกับอะคริโลไนไตรล์ที่เหลือจากปฏิกิริยาอย่างดี เนื่องจากมีความเป็นพิษสูง ดังนั้นการใช้เทคนิคกราฟโคพอลิเมอร์ไรเซชันในการเตรียมไฮโดรเจลจึงนิยมใช้ อะคริลิกแอซิดกราฟกับแป้งมากกว่า

ตารางที่ 2.1 พอลิเมอร์จากธรรมชาติและพอลิเมอร์ธรรมชาติดัดแปรที่ใช้ในการสังเคราะห์ไฮโดรเจล [14]

ลักษณะของพอลิเมอร์	ตัวอย่างของวัสดุพอลิเมอร์
Anionic polymer	Hyaluronic acid, Alginate, Pectin, Carrageenan, Chondroitin sulfate, Dextran sulfate
Cationic polymer	Chitosan, Polylysine
Amphiphilic polymer	Collagen, Gelatin, Carboxymethyl chitin, Fibroin
Neutral polymer	Dextran, Agarose, Pullulan

2.1.6 การเตรียมไฮโดรเจล [5]

ไฮโดรเจลสามารถเตรียมได้จากสารละลายพอลิเมอร์ที่มีสมบัติการควบแน่น หรือสามารถละลายในน้ำได้ เกล็ดในแม่พิมพ์ โดยส่วนมากจะใช้เทคนิคการเทหล่อ (Casting process) ในการเตรียม จากนั้นทำการเชื่อมโยงไฮโดรเจล โดยใช้เทคนิคการฉายรังสี, ความร้อน, ริดักชัน-ออกซิเดชัน หรือ Nucleophilic attack ในวิธีการฉายรังสีต้องทำการฉายรังสีเสียก่อนแล้วค่อยนำไปอบให้แห้ง แต่ถ้าใช้สารเคมีในการเชื่อมโยง จะต้องนำสารละลายในแม่พิมพ์ไปอบให้แห้งเสียก่อน จึงค่อยทำการเชื่อมโยง ในปี 1968 มีการพอลิเมอร์ไรเซชันโดยใช้มอนอเมอร์ล้อมรอบผลึกเมตริกซ์ เช่น เกล็ด น้ำตาล และผลึกน้ำแข็ง ซึ่งเรียกว่า โพรเจน (Porogen) และเมื่อเอาผลึกเมตริกซ์ออก จะเกิดเป็นพอลิเมอร์เชื่อมโยงที่เป็นรู ไฮโดรเจลที่เป็นรูใช้ประโยชน์เป็นพื้นผิวบางในโครมาโตกราฟี และเป็นเนื้อเยื่อวิศวกรรมทางการแพทย์

2.1.7 กลไกและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล [2]

ไฮโดรเจลหรือสารซูปเปอร์แอบซอร์เบนต์เมื่อดูดซับน้ำเข้าภายในโครงสร้างแล้วจะพองตัวได้มาก ประสิทธิภาพในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลขึ้นอยู่กับ การแตกตัวของหมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้าง ปัจจัยที่มีผลในการดูดซับน้ำของพอลิเมอร์คือ แรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) การเคลื่อนที่ของ Counter-ion และความชอบ (Affinity) ของพอลิเมอร์อิเล็กโตรไลต์ (Polyelectrolyte) กับน้ำ และความยืดหยุ่นของโครงสร้างตาข่ายของพอลิเมอร์

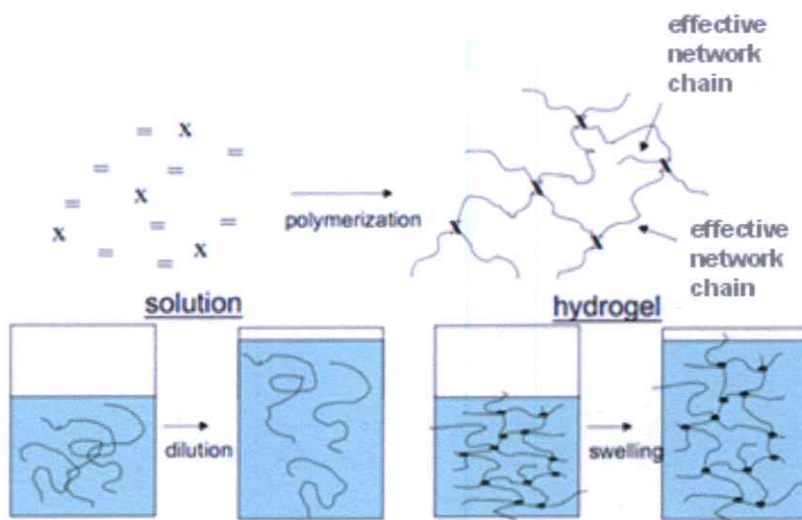
กลไกการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลแสดงดังรูปที่ 2.5 จากรูปเห็นว่ากลไกในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลเกิดได้หลายแบบ และความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรเจลก็เป็นผลโดยรวมจากกลไกต่างๆ เหล่านี้ ส่วนใหญ่ไฮโดรเจลเตรียมมาจากพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติเป็นสารพอลิอิเล็กโตรไลต์ คือ ประกอบด้วยหมู่ที่มีประจุบวกหรือลบอยู่ภายใน โมเลกุลจำนวนมาก ดังตัวอย่างในรูป 2.5 พอลิเมอร์ที่ใช้มีหมู่คาร์บอกซิล (COO^-) ซึ่งจะดึงคือน้ำเข้ามาได้ดี การดึงน้ำเข้ามาทำให้โครงสร้างภายในเกิดการพองตัว สายโซ่พอลิเมอร์มีการกระจายตัวมากขึ้น นอกจากนี้สายพอลิเมอร์อาจมีหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ที่มีคุณสมบัติชอบน้ำอยู่ด้วย การนำพาน้ำเข้ามาภายในโครงสร้างไฮโดรเจลด้วยหมู่ที่มีประจุ จะทำให้โอกาสที่หมู่ชอบน้ำอื่นๆ ที่มีอยู่จะเกิดพันธะกับน้ำ (เช่น พันธะไฮโดรเจน) ก็เพิ่มมากขึ้นด้วย

หมู่คาร์บอกซิเลตในพอลิเมอร์จะจับอยู่กับโซเดียมไอออนเพื่อให้มีสภาพประจุที่เป็นกลาง เมื่อพอลิเมอร์ดูดซับน้ำเข้าในโครงสร้างตาข่าย โมเลกุลของน้ำซึ่งมีค่า Dielectric constant สูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโซเดียมไอออนกับหมู่คาร์บอกซิเลต จะทำให้โซเดียมไอออนหลุดเป็นอิสระและกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างเจล ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก (Osmotic pressure) ภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจล แรงดันออสโมติกทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปสู่ภายในไฮโดรเจลเพื่อให้เกิดสภาพที่สมดุล เมื่อไฮโดรเจลอยู่ในสภาวะละลายเกลือ ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกภายในและภายนอกโครงสร้างไฮโดรเจลจะมีค่าลดลง ทำให้ปริมาณการดูดซับน้ำลดลง

อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการพองตัว คือ ระดับการเชื่อมโยงสายโซ่พอลิเมอร์บริเวณที่เกิดการเชื่อมโยงจะมีการยึดตัวที่จำกัด ทำให้สายพอลิเมอร์บริเวณนั้นแยกออกจากส่วนอื่นและมีลักษณะขดเป็นวง (Coiled polymer) มีความแข็งแรงและความไม่เป็นระเบียบ (Entropy) ของสายโซ่ลดลง ในขั้นตอนสุดท้ายของการดูดซับน้ำเป็นการเข้าสู่สภาวะสมดุลระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ที่มีการละลายได้ดี และแรงในการหดตัว (Retractive forces) เนื่องจากการเชื่อมโยง พบว่าโครงสร้างตาข่ายที่มีปริมาณการเชื่อมโยงสูง จะมีความหนาแน่นและเกิดแรงหดตัวมาก ทำให้ไฮโดรเจลมีระดับการพองตัวลดลงที่สภาวะสมดุล

จากกลไกการดูดซับน้ำสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของไฮโดรเจลได้ดังนี้ [15]

1. แรงดันออสโมติก ถ้าความเข้มข้นของสารละลายภายในไฮโดรเจลสูงกว่าสารละลายภายนอก จะทำให้เกิดแรงดันออสโมติก น้ำจากภายนอกจะแพร่เข้าไปในช่องว่างหรือรูพรุนของไฮโดรเจลได้ ถ้าแรงดันออสโมติกแตกต่างกันมากน้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปในไฮโดรเจลมาก ทำให้เกิดการพองตัวได้ดี
2. แรงกระทำระหว่างน้ำกับไฮโดรเจล ถ้าพอลิเมอร์นั้นมีโครงสร้างทางเคมีที่เหมาะสม จะสามารถเกิดแรงกระทำกับน้ำได้มาก เช่น เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนจะทำให้น้ำแพร่เข้าสู่ไฮโดรเจลได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
3. ช่องว่างระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าไฮโดรเจลมีช่องว่างหรือรูพรุนระหว่างสายโซ่มาก น้ำก็จะแพร่เข้าไปได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
4. ความยืดหยุ่นของสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้าสายโซ่มีความยืดหยุ่นสูง แรงต้านการแพร่ของน้ำเพื่อเข้าสู่สมดุลจะต่ำ ทำให้น้ำเข้าสู่ไฮโดรเจลได้มากเกิดการพองตัวได้ดี
5. ความหนาแน่นของการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ถ้ามีความหนาแน่นมากจะเป็นการเพิ่มแรงต้านทานในการขยายตัวของไฮโดรเจลทำให้เกิดการพองตัวได้ไม่ดี



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างและการบวมตัวของไฮโดรเจล [4]

2.1.8 สมบัติของไฮโดรเจลและการนำไปใช้งาน [5]

ไฮโดรเจลมีความสามารถในการดูดซับน้ำหรือสารละลายบางชนิด เช่น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และสารละลายทางชีวภาพ ได้มากกว่า 90% โดยเมื่อหลังจากดูดซับจะมีสมบัติเชิงกลที่ดี ไม่เกิดการละลายและสลายตัว และไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งสมบัตินี้จะมีความคล้ายคลึงกับอวัยวะบางอย่างของร่างกายมนุษย์ เช่น เส้นเอ็น กล้ามเนื้อ เซลล์ห่อหุ้มอวัยวะภายใน เป็นต้น และจากสมบัติการเข้ากันได้ดีกับสารชีวภาพ เช่น เลือด น้ำเหลือง เนื้อเยื่อ เซลล์ผิวหนัง จึงสามารถ

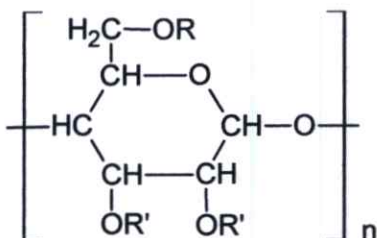
นำมาใช้ทำเลนส์สัมผัส ใช้ในการเคลือบอวัยวะเทียมเมื่อนำไปใช้ในร่างกายมนุษย์ สามารถใช้เป็นวัสดุปิดแผลที่รักษาหน้าแผลให้มีความเรียบ และไม่ทำลายเซลล์ผิวใหม่เมื่อลอกออก ไฮโดรเจลที่ใช้เป็นเนื้อเยื่อวิศวกรรมจะยอมให้เซลล์เจริญงอกเข้าไปข้างในและควบคุมการขยายตัวอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อสำหรับการส่งผ่านท่อขนาดไมโคร หรือท่อภายนอกที่ต้องการ และยังสามารถใช้งานด้านต่างๆที่ไฮโดรเจลมีความเหมาะสมและมีสมบัติที่ครอบคลุมการใช้งาน

2.2 การบอกรีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethylcellulose)

2.2.1 สมบัติทางเคมีและสูตรโครงสร้าง

อนุพันธ์ของเซลลูโลสที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม [16, 17] คือ โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หมายถึงเซลลูโลสที่ผ่านขบวนการทางเคมี ซึ่งสามารถกระจายตัวได้ในน้ำเป็นคอลลอยด์ แต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอื่น เช่น เอทานอล อีเทอร์ เป็นต้น

สารโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) หรือที่รู้จักกันในอีกหลายๆ ชื่อคือ NaCMC, Sodium CMC, CMC, CM cellulose, Cellulose gum, Carboxymethyl cellulose หรือ Sodium cellulose glycolate เป็นแอนไอออนิกเซลลูโลสอีเทอร์ที่ละลายน้ำ มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.6



เมื่อ R คือ H หรือ R' คือ CH_2COONa

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [18]

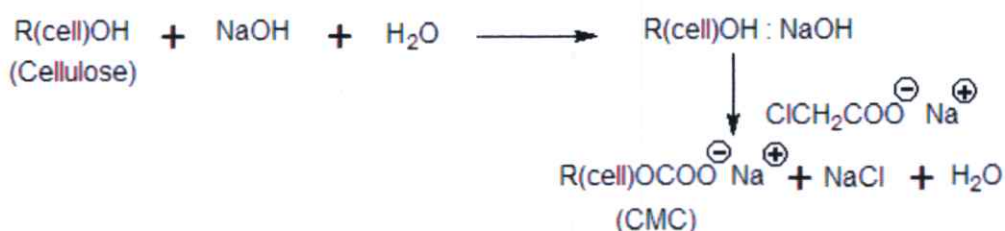
ค่าที่แสดงจำนวนกลุ่ม CH_2COONa ที่แทนที่ไฮโดรเจนต่อ 1 หน่วยนี้เรียกว่า องศาการแทนที่ (Degree of substitution) ดังนั้นมีค่าสูงสุดได้เท่ากับ 3 CMC แบ่งออกเป็นเกรดต่างๆ ตามการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งการแบ่งเกรดของ CMC ขึ้นอยู่กับ ค่าองศาการแทนที่ ความสม่ำเสมอของหมู่แทนที่ องศาการเกิดพอลิเมอร์ และองศาความบริสุทธิ์

CMC เป็นสารที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่เป็นอันตราย จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและยา สมบัติอื่นๆมีดังนี้ จุดความขึ้นคงตัวในช่วงความเป็นกรด - ค่า 2-10 น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 2,100 - 500,000 เมื่อละลายน้ำจะได้สารแขวนลอย มีลักษณะข้นเหลว ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายในตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เอทานอล หรือ อะซีโตน ความเป็นกรด-ค่า ประมาณ 6.5-8.0 เมื่อนำ CMC 1 ส่วนละลายน้ำ

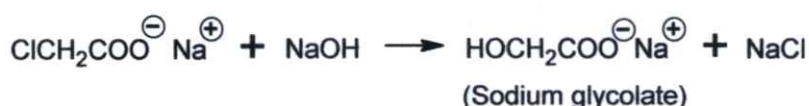
100 ส่วนจะได้สารละลายที่มีความหนืด 5-6,000 centipoise ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า average chain length of macromolecule (n) อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่าง สมบัติในการละลายขึ้นอยู่กับองค์การแทนที่ กล่าวคือ CMC ที่มีองค์การแทนที่ต่ำกว่า 0.1 จะไม่ละลายน้ำและไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ ถ้าค่านี้สูงกว่า 0.2 จะละลายน้ำแต่ยังคงไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

2.2.2 การผลิตอนุพันธ์ของเซลลูโลส (CMC) [19]

การผลิต CMC ในอุตสาหกรรมอาศัยปฏิกิริยา etherification ระหว่างเซลลูโลสในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับโซเดียมคลอโรอะซิเตต จากนั้นทำให้เป็นกลางด้วยกรด โดยมีโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไกลโคเลตเป็นผลจากปฏิกิริยาข้างเคียงต้องใช้เมทานอลหรืออะซีโตนสกัดแยกเกลือโซเดียมทั้งสองชนิดนี้เพื่อให้ได้ CMC ที่มีความบริสุทธิ์สูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้ [16]



และมีปฏิกิริยาข้างเคียงดังนี้



2.2.3 สมบัติหลักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1. เป็นสารละลายที่เพิ่มความหนืดและช่วยในการยึดเกาะ
2. ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ น้ำมัน และไขมัน สามารถละลายในสารละลายผสมระหว่างน้ำกับตัวทำละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ เช่น เอทานอล หรืออะซีโตน ได้สารละลายที่มีความหนืด
3. ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่มีอันตราย ไม่เป็นพิษ และไม่ระคายเคืองผิวหนัง
4. มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 6.5-8.0
5. ไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติแม้จะเก็บไว้เป็นเวลานาน

6. ทำหน้าที่เป็นสารคงสภาพ (Stabilizer) สารช่วยในการแขวนลอย (Suspending acid) สารเพิ่มความหนืด (Thickener) สารช่วยในการกระจายอนุภาค (Dispersing acid) และสารยึด (Binder) ได้ดี

7. มีความคงทนต่อสารเคมีและเชื้อจุลินทรีย์สูงกว่าสารธรรมชาติ
8. มีความสามารถในการดูดและเก็บน้ำได้ดี
9. ความหนืดลดลงเมื่อถูกแรงเฉือนและการกวนสารละลาย
10. เป็นสารเพิ่มเนื้อสำหรับอาหารและเครื่องคัมแคลอรี่ต่ำ

2.2.4 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

1. ความบริสุทธิ์ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (% โดยน้ำหนัก)	72-99.5%
2. ความชื้น (% โดยน้ำหนัก)	7-8%
3. อุณหภูมิที่ทำให้เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล (Brown temperature)	180-225
4. อุณหภูมิที่ทำให้เป็นถ่าน (Charring temperature)	210-250
5. ความหนาแน่น (Bulk density, กรัม/มิลลิลิตร)	0.65-0.75
6. บีโอดี (Biological Oxygen Demand, กรัม/มิลลิลิตร)	10,000-18,000

2.2.5 สมบัติการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

การประยุกต์ใช้ซีเอ็มซีส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปการละลายในน้ำ ดังนั้นขั้นตอนการละลายน้ำจึงถือว่าสำคัญที่สุด เนื่องจากซีเอ็มซีมีแนวโน้มจะจับตัวเป็นก้อนที่เรียกว่า Lump ในบางครั้งอาจละลายซีเอ็มซีโดยใช้ตัวทำละลายอื่นๆ เช่น เอทานอล แล้วเติมน้ำภายหลังเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิด Lump สำหรับส่วนผสมอื่นๆ ที่ต้องการผสมกับซีเอ็มซีให้ผสมกันขณะแห้งก่อนแล้วจึงละลายน้ำในการผสมแบบแห้งควรใช้ซีเอ็มซีน้อยกว่า 20 % โดยน้ำหนัก และการพ่นไอน้ำลงในภาชนะขณะละลายจะช่วยให้ซีเอ็มซีละลายได้ดีขึ้น

2.2.6 การนำไปใช้ประโยชน์

CMC เป็นสารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ [20] เนื่องจากละลายน้ำได้ มีความเป็นกลางคือไม่เป็นกรดค้าง ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ ถูกย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์จึงไม่สะสมในแหล่งน้ำมีค่า BOD ต่ำ จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำและพืชน้ำ

CMC ที่ผลิตจำหน่ายมีมากมายหลายชนิดคุณภาพ เช่น สำหรับอาหาร ยา เครื่องสำอาง อุตสาหกรรม ดังนั้นต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ เช่น CMC ที่ใช้ผสมในอาหาร ต้องมีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.5% และมีตะกั่ว สารหนู ในปริมาณต่ำมาก ความหนืดเป็นสมบัติสำคัญ

อีกประการหนึ่งที่ใช้มักคำนึงถึง คั้งนั้น CMC ที่จำหน่ายมีความหนืดในช่วงต่างๆกันคือ 10 - 6,000 Centipoise (ในสารละลาย 1%)

ตัวอย่างการใช้ CMC ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆมีดังนี้

- | | |
|------------------------|---|
| อุตสาหกรรมอาหาร | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารป้องกันการตกผลึกในไอศกรีม น้ำเชื่อม น้ำตาล ไอซิ่ง อาหารพวกที่ฉาบน้ำตาล - ใช้เป็นสารป้องกันการคอลลอยด์ในมายองเนส - ใช้เป็นสารช่วยในการแขวนลอยในผลิตภัณฑ์อาหารจำพวกนม น้ำผลไม้ - ใช้เป็นสารทำให้ข้นในน้ำสลัด เครื่องดื่ม อาหารสัตว์ - ใช้เป็นทำให้เป็นวุ้นในเยลลี่ขนมหวาน - ใช้เป็นสารทำให้ข้นฟูในไอศกรีม whipping cream |
| อุตสาหกรรมยา | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เคลือบเม็ดยาเพื่อให้คงตัว ใช้เป็นสารควบคุมการออกฤทธิ์ของยา เนื่องจาก CMC ไม่ละลายในสภาวะที่เป็นกรด เช่น ในกระเพาะอาหารแต่ละลายในสภาวะที่เป็นด่าง เช่น ในลำไส้ - ใช้เป็นสารทำให้คงตัวสำหรับยาที่มีส่วนผสมในลักษณะแขวนลอย |
| อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้น สารคงตัว สารช่วยการแขวนลอย สารก่อฟิล์ม ในผลิตภัณฑ์จำพวกครีม โลชั่น แชมพูยาล ยาสีฟัน |
| อุตสาหกรรมผงซักฟอก | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้ผสมในผงซักฟอกเพื่อป้องกันไม่ให้สิ่งสกปรกที่หลุดจากผ้ากลับติดบนเนื้อผ้า |
| อุตสาหกรรมกาว | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้นในกาวสูตรน้ำ |
| อุตสาหกรรมสีและวาร์นิช | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ข้นและสารช่วยการแขวนลอยของผงสี - ใช้เป็นสารก่อฟิล์มในวาร์นิช |
| อุตสาหกรรมโพลีเมอร์ | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารป้องกันการคอลลอยด์ และสารช่วยทำให้การแขวนลอยคงตัวในปฏิกิริยา vinylchloride polymerization |
| อุตสาหกรรมสิ่งทอ | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารทำให้ด้ายดิบมีความแข็งแรงทน เรียบ และมีน้ำหนัก - ใช้เป็นสารทำให้ข้นในสีพิมพ์ผ้า |
| อุตสาหกรรมกระดาษ | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นสารเคลือบกระดาษเพื่อให้การพิมพ์หมึกดีขึ้น ไม่ดูดซึมน้ำมัน |
| อุตสาหกรรมน้ำมัน | <ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นส่วนผสมในดินที่ใช้สำหรับหล่อลื่นหัวขุดเจาะน้ำมัน เนื่องจาก CMC อุ่นน้ำได้ในปริมาณสูง ทำให้การแขวนลอยของดินคงตัว |

- อุตสาหกรรมเซรามิก - ใช้เป็นสารช่วยการยึดหยุ่นในการทำผลิตภัณฑ์พอร์ซเลนที่ใช้
งานทางไฟฟ้า
- ใช้เป็นสารทำให้ขึ้น และสารช่วยในการแขวนลอยในส่วนผสม
ของดิน
- อุตสาหกรรมฆ่าแมลง - ใช้เป็นสารช่วยการแขวนลอยในยาฆ่าแมลงสูตรน้ำ

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะเห็นได้ว่า CMC เป็นสารที่มีประโยชน์มาก มีการใช้อย่าง
แพร่หลาย ทั้งนี้เพราะสมบัติเฉพาะตัวและความไม่เป็นพิษภัยต่อสิ่งมีชีวิต รวมทั้งสภาวะแวดล้อม
ของ CMC นั้นเอง

2.3 ไหม (Silks) [21-23]

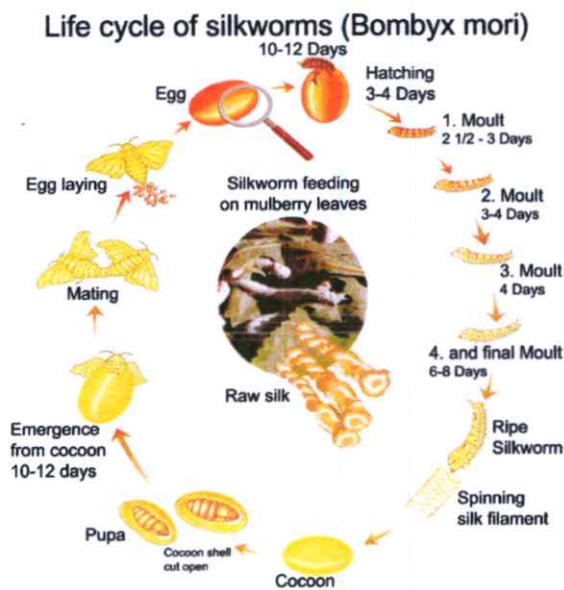
หนอนไหม (silkworm) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* อยู่ในวงศ์ Bombycidae หนอน
ไหมเป็นแมลงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบสมบูรณ์ (Completely metamorphosis insect) แบ่ง
ออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ ไข่ ตัวหนอน ดักแด้ และผีเสื้อ มีเพียงระยะตัวหนอนเท่านั้นที่กินอาหาร ซึ่ง
น่าจะนำสารชนิดต่างๆ จากใบหม่อนไปสร้างความเร็วดูเติบโต โดยผ่านการย่อยและการดูดซึมเป็น
ปริมาณ 1 ใน 3 ของสารอาหารทั้งหมด ครึ่งหนึ่งของโปรตีนที่ดูดซึมจากใบหม่อนจะถูกนำไปใช้
ผลิตเส้นไหม เมื่อถึงวัย 5 วันแรกต่อมไหม (Silk gland) จะหนักเพียง 6.36% ของน้ำหนักตัวไหม
เมื่อไหมสุกก่อนเข้าทำรัง ต่อมไหมจะหนักถึง 41.97% จะเห็นว่าปลายวัยที่ 5 สารอาหารโดยเฉพาะ
โปรตีนเกือบทั้งหมดถูกเปลี่ยนไปเป็นสารที่ใช้ชักใยทำรังหรือเส้นไหมนั่นเอง และเป็นเส้นใยที่มี
คุณค่ามหาศาลหาที่เปรียบมิได้ ไหมเป็น “ราชินีแห่งเส้นใย” ที่ได้มาจากโปรตีนที่หนอนไหมขับ
ออกมาเพื่อป้องกันตัวเองขณะเป็นดักแด้ เส้นใยที่ได้มีความยาวต่อเนื่อง (Filaments) เส้นใยไหม
เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้จากโปรตีนเช่นเดียวกับเส้นใยขนสัตว์ เส้นไหมเกิดจากการพันออกตัว
หนอนไหม การสังเคราะห์โปรตีนในเส้นไหมทำได้ในเซลล์ของต่อมไหม ที่อยู่ในตัวหนอนไหม
สารไหมเหลว (Liquid silk) สามารถขับออกมาจากต่อมไหมส่วนท้าย (Posterior silk gland)
หลังจากนั้นจะส่งสารไหมเหลวไปที่ต่อมไหมส่วนกลาง (Middle silk gland) ในระหว่างที่อยู่ใน
ต่อมไหมส่วนกลาง สารไหมเหลวจะมีการเปลี่ยนรูปกลายเป็นเจลาติน (Gelatin) ที่มีความแข็งแรง
ขึ้น ในต่อมไหมส่วนกลางยังมีต่อมที่สามารถสร้างโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเป็นกาวในการ
เคลือบเจลาตินที่ได้ เรียกโปรตีนชนิดนี้ว่า เซริซิน (Sericin) หลังจากนั้นเจลาตินจะมีความเหนียว
และแข็งขึ้น โดยอาศัยการส่ายหัวไปมาของตัวหนอนไหม อาการเคลื่อนไหวจะเกิดขึ้นที่บริเวณต่อม
ไหมส่วนหน้า เรียกเจลาตินที่มีความเหนียวขั้นนี้ว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) หลังจากที่มีการรวมกัน
ของไฟโบรอิน 2 เส้นและมีการเชื่อมติดกันด้วยกาวไหมเซริซิน จะมีการผ่านรูขนาดเล็ก (Orifice of
spinneret) ออกมาจากตัวของหนอนไหม และได้เป็นเส้นใยที่ใช้ในการทำเครื่องนุ่งห่มหรือสิ่งทอ
ต่างๆ สามารถจำแนกไหมออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้คือ

1. ไหมเลี้ยง (Mulberry silk)

เป็นหนอนไหมที่มนุษย์เพาะเลี้ยงโดยให้อาหาร คือ ใบหม่อน (Mulberry leaves) สดๆ ซึ่งไหมชนิดนี้มีสีค่อนข้างขาวและหลังการลอกกาวจะมีความมันเงาเพิ่มขึ้น

2 ไหมป่า (Wild silk)

เป็นไหมที่มนุษย์ไม่ได้เพาะเลี้ยง โดยปกติ ไหมทาชาร์ (Tussah silk) มีแหล่งกำเนิดอยู่ที่จีนและอินเดีย เลี้ยงด้วยใบโอ๊ค ซึ่งไหมป่าจะให้เส้นใยที่มีสีน้ำตาล หยาบและไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเส้นใยจากไหมเลี้ยง



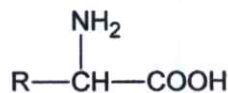
รูปที่ 2.7 วงจรชีวิตของไหม [24]

ไหมไทยถือว่าเป็นไหมเลี้ยงซึ่งเป็นตัวอ่อนของผีเสื้อกลางคืนชนิดหนึ่งเป็นแมลงในอันดับเลพิโดอปเทอรา มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bombyx mori* มีชื่อสามัญว่า silkworm อยู่ในวงศ์ Bombycidae เป็นพันธุ์ไหมที่มีคุณภาพดีที่สุดในยามเลี้ยงกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ปัจจุบันการเลี้ยงไหมและการผลิตไหมได้รับการส่งเสริมให้ทำเป็นระบบอุตสาหกรรมแบบ Sericulture ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาจากประเทศญี่ปุ่นแต่มีลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากเส้นใยมีสีเหลืองและค่อนข้างหยาบ ไหมไทยมีส่วนประกอบที่เป็นกาวไหมปริมาณมากถึง 38% มากกว่าไหมเลี้ยงชนิดอื่นๆ ซึ่งปกติมีกาวไหมเพียง 20-25% เท่านั้น ทำให้เส้นใยไหมไทยมีลักษณะเฉพาะตัวเมื่อทอผ้าไหมจัดเป็นเส้นใยที่หยาบ สวยงาม มีเอกลักษณ์เป็นของตัวเอง ซึ่งเส้นใยอื่นไม่สามารถเทียบได้ มีสมบัติเฉพาะที่เหมาะสมแก่การทำเป็นเสื้อผ้า เพราะให้ความสบายความสวยงามดูมีค่าและมีความทนทานที่แข็งแกร่งที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติทั้งหมด

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบที่สำคัญในเส้นใยไหม [22]

องค์ประกอบที่สำคัญ	ปริมาณในเส้นใย (เปอร์เซ็นต์)
กาวไหมหรือเซรีซิน	22-25
ไหมหรือไฟโบรอิน	62.5-67
น้ำ	10-11
เกลือและอื่นๆ	1-1.5

เส้นใยไหมมีปริมาณของซัลเฟอร์จำนวนเล็กน้อยมาก เป็นสารชีวโมเลกุลที่มีมวลโมเลกุลสูง โปรตีนทุกชนิดประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) และกำมะถัน (S) แต่โปรตีนบางชนิดมีธาตุฟอสฟอรัส (P) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) เพิ่มเข้ามา เส้นไหมเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่าโปรตีน (Protein) สามารถถูกแยกออกจากโปรตีนได้โดยการไฮโดรไลซิสด้วยกรด กรดอะมิโนที่พบในโปรตีนมีทั้งหมด 20 ชนิด ดังตารางที่ 2.3 โดยแต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายโซ่ยาว เรียกว่า โซ่พอลิเพปไทด์ ต่อกันอยู่ในลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีการแตกกิ่ง พันธะโควาเลนต์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโนมีชื่อว่า พันธะเพปไทด์ ซึ่งพันธะนี้เป็นพันธะเอไมด์ที่เกิดการสูญเสียน้ำจากหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดอะมิโนตัวหนึ่งกับหมู่แอลฟาอะมิโนของกรดอะมิโนที่อยู่ถัดไป โมเลกุลของโปรตีนอาจประกอบด้วยโซ่พอลิเพปไทด์เพียงโซ่เดียวหรือมากกว่าก็ได้ โดยมีความยาวที่แตกต่างกันออกไป โดยมีกรดอะมิโนตั้งแต่ประมาณ 40 ถึงมากกว่า 4,000 หน่วย ซึ่งโปรตีนแต่ละชนิดมีส่วนประกอบทางเคมี มวลโมเลกุล และการเรียงลำดับของกรดอะมิโนที่จำเพาะ โดยกรดอะมิโนมีสูตรโมเลกุลทั่วไป คือ



ภายในโมเลกุลของกรดแอลฟาอะมิโน จะมีหมู่อะมิโนต่ออยู่ที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนของกรดคาร์บอกซิลิก (กรดอะมิโนทุกตัวมีแอลฟาคาร์บอน ยกเว้นไกลซีน) แต่เนื่องจากเอมีนเป็นเบสและคาร์บอกซิลิกเป็นกรดจึงเกิดการส่งผ่านโปรตอนจากกรดให้เบส ซึ่งสูตรโมเลกุลของกรดอะมิโนจึงเขียนอยู่ในรูปที่แตกตัวเป็นไอออน หรือรูปที่มีประจุสองขั้วได้ ดังนี้



เส้นไหมเป็นเส้นใยที่เป็นสารประกอบประเภทพอลิเอไมด์ (Polyamide) เกิดจากการมีหน่วยของโมเลกุลขนาดเล็กที่เรียกว่า กรดอะมิโน (Amino acid) มาต่อกันเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ด้วยพันธะเพปไทด์

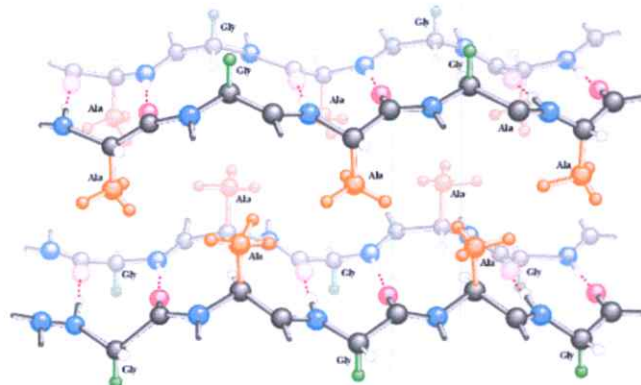
ตารางที่ 2.3 แสดงชื่อของกรดแอลฟาอะมิโนที่พบมากในธรรมชาติ มี 20 ชนิด [25]

กรดแอลฟาอะมิโน	ชื่อย่อ
ไกลซีน (Glycine)	Gly
อะลานีน (Alanine)	Ala
วาลีน (Valine)	Val
ลิวซีน (Leucine)	Leu
ไอโซลิวซีน (Isoleucine)	Ile
เซรีน (Serine)	Ser
ทรีโอนีน (Threonine)	Thr
กรดแอสพาร์ติก (Aspartic acid)	Asp
แอสพาราจีน (Asparagine)	Asn
ซีลเตอิน (Cysteine)	Cys
เมธิโอนีน (Methionine)	Met
กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	Glu
กลูตามีน (Glutamine)	Gln
ไลซีน (Lysine)	Lys
อาร์จินีน (Arginine)	Arg
ฮิสติดีน (Histidine)	His
ฟีนิลอะลานีน (Phenylalanine)	Phe
ไทโรซีน (Tyrosine)	Tyr
ทริพโตเฟน (Tryptophan)	Try
โพรลีน (Proline)	Pro

2.3.1 ไหมไฟโบรอิน (Silk Fibroin) [21-23, 25-27]


โปรตีนเส้นใยมีองค์ประกอบหลักทางเคมี คือ โปรตีนที่เรียกว่า ไฟโบรอิน (Fibroin) เป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ (ประมาณ 78% ของน้ำหนักไหมดิบ) ประกอบด้วยกรดอะมิโนประมาณ 15 ชนิด กรดอะมิโนหลักๆ ที่พบในเส้นใย ได้แก่ ไกลซีน (Glycine, 40%) อะลานีน (Alanine, 29%)

และเซรีน (Serine, 12%) แต่ละชนิดมีโครงสร้างต่างกันที่หมู่ R (โซ่ข้าง) ดังแสดงในตารางที่ 2.4 กรดอะมิโนเหล่านี้ต่อกันเป็นสายยาวที่เรียกว่า โซ่พอลิเพปไทด์เป็นเส้นยาวขนานกับแกนในลักษณะเป็นเส้นใยหรือเป็นแผ่น มีความแข็ง เหนียวและอาจยืดหยุ่นได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และมีโครงสร้างปฐมภูมิที่ซ้ำกัน คือ $(\text{Gly-Ala-Gly-Ala-Gly-Ser})_n$

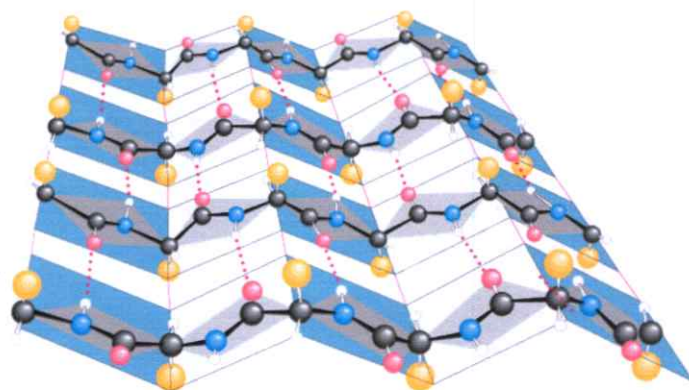


รูปที่ 2.8 โครงสร้างสามมิติของไหม [28]

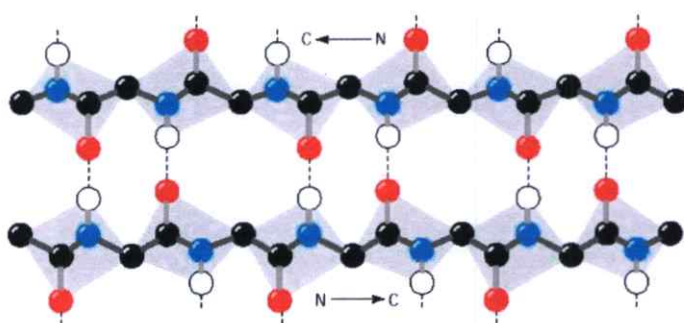
ตารางที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของกรดอะมิโนที่พบในไหม [23]

	R (โซ่ข้าง)	ชื่อ	สัญลักษณ์
กรดอะมิโนที่เป็นกลาง	—H	ไกลซีน (Glycine)	Gly, G
	—CH ₃	อะลานีน (Alanine)	Ala, A
กรดอะมิโนที่โซ่ข้างมีหมู่ OH	—CH ₂ OH	เซรีน (Serine)	Ser, S
	—CH ₂ — 	ไทโรซีน (Tyrosine)	Tyr, Y
กรดอะมิโนที่เป็นกรด	—CH ₂ CH ₂ COOH	กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	Glu, Q
กรดอะมิโนที่เป็นเบส	—(CH ₂) ₄ NH ₂	ไลซีน (Lysine)	Lys, K

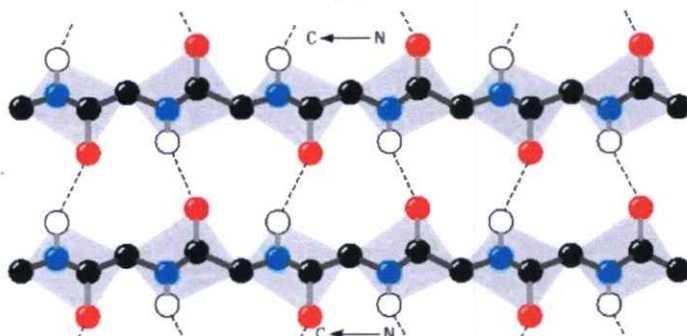
โปรตีนทั้งหลายในธรรมชาติประกอบด้วยสายพอลิเพปไทด์ที่มีโครงสร้างทุติยภูมิ โดยปกติในไฟโบรอินของไหมมักพบโครงสร้างชนิดแผ่นจิบนี้ ซึ่ง β -พลิทเทคซิทมีด้วยกัน 2 โครงสร้าง (รูปที่ 2.9 (ก)) คือ β -พลิทเทคซิทที่สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไปยัง C ที่อยู่ตรงข้ามกัน เรียกว่า แอนติพาราเลล β -พลิทเทคซิท (Antiparallel pleated sheet structure) (รูปที่ 2.9 (ข)) และ β -พลิทเทคซิทที่สายเพปไทด์ทั้งสองมีทิศทางจากปลายฝั่ง N ไปยัง C เหมือนกัน เรียกว่า พาราเลล β -ซิท (Parallel pleated sheet structure) (รูปที่ 2.9 (ค)) ไฟโบรอินของไหมส่วนใหญ่เป็นโครงสร้างแผ่นจิบแบบแอนติพาราเลล



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะ โครงสร้างของไหมไฟโบรอินชนิดแผ่นพับ [27, 29]

(ก) ลักษณะ โครงสร้างแบบเบต้า (β -plated sheet)

(ข) ลักษณะ โครงสร้างแผ่นพับแบบแอนติพาราเลล

(Antiparallel pleated sheet structure)

(ค) พาราเลล (Parallel pleated sheet structure)

การคำนวณน้ำหนักโมเลกุลของไฟโบรอินทำได้ยาก ทั้งนี้เนื่องจากไฟโบรอินไม่ละลายในสารละลายทั่วไปแต่ละลายในสารละลายบางชนิดเท่านั้น เช่น Cupric-ethylenediamine หรือในสารละลายเข้มข้น Lithium iodide หรือ Thiocyanate จากการใช้สารละลายเหล่านี้ร่วมกับการใช้หลักการของการตกตะกอนใน Ultracentrifuge สามารถคำนวณน้ำหนักได้ประมาณ 84,000 กรัม/

โมล แต่ถ้าคำนวณจากการอาศัยการวัดสมบัติทางความหนืดจะได้น้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50,000 กรัม/โมล หรือมีผู้ใช้การคำนวณโดยอาศัยการวิเคราะห์จาก Terminal amino acid พบว่าน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงระหว่าง 80,000 – 100,000 กรัม/โมล

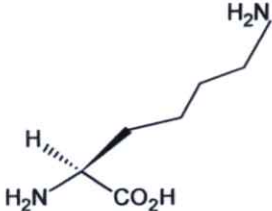
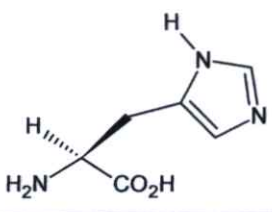
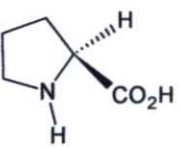
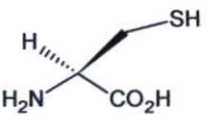
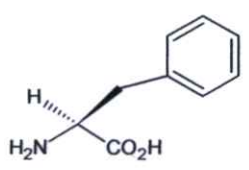
ตารางที่ 2.5 สมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกาย [25]

ชนิดกรดอะมิโน ในผงไหม	โครงสร้าง	หน้าที่และสมบัติ
Glycine# (Gly, G)		- ควบคุมระดับคลอเรสเตอรอล - ป้องกันและรักษาความดันโลหิตสูง - ช่วยเสริมสร้างการทำงานของตับ
Alanine# (Ala, A)		- เป็นแหล่งพลังงานสำคัญต่อเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ สมอง และระบบ - ผลิต Antibodies ที่ช่วยให้ระบบภูมิคุ้มกันดีขึ้น
Serine# (Ser, S)		- เป็นแหล่งในการสะสมน้ำตาล กลูโคสในตับ และกล้ามเนื้อ จึงช่วยส่งเสริมระบบการทำงานของอินซูลิน (Insulin) เป็นการลดน้ำตาลในเลือดซึ่งช่วยในการเผาผลาญไขมันที่สะสมในร่างกาย
Aspartic acid* (Asp, D)		- ช่วยขับไล่อากาศเจ็บ และสารพิษแอมโมเนียออกจากร่างกาย - ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการเหนื่อยอ่อน
Valine* (Val, V)		- ช่วยให้จิตใจกระปรี้กระเปร่า - ประสานการทำงานของกล้ามเนื้อ
Tryptophan* (Trp, W)		- สนับสนุนการผลิตเม็ดเลือดแดง - ป้องกันและช่วยลดอันตรายที่จะเกิดกับเส้นโลหิตแดง และการชักกระตุกของหัวใจ

ตารางที่ 2.5 สมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกาย (ต่อ)

ชนิดกรดอะมิโน ในผงไหม	โครงสร้าง	หน้าที่และสมบัติ
Threonine* (Thr, T)		<ul style="list-style-type: none"> - ป้องกันการเกิดไขมันในตับ - ช่วยย่อยและช่วยระบบการทำงานของร่างกาย
Tyrosine (Tyr, Y)		<ul style="list-style-type: none"> - ช่วยในการส่งผ่านเส้นประสาทไปยังสมอง อีกทั้งมีผลดีต่อระบบประสาท - ช่วยความจำ - กระตุ้นการเต้นของหัวใจ
Glutamic acid (Glu, E)		<ul style="list-style-type: none"> - ช่วยลดแอมโมเนียในเลือดซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับโปรตีนในสมองและระบบการทำงานของน้ำตาล - ช่วยควบคุมโรคสุรา (Alcoholism)
Isoleucine* (Ile, I)		<ul style="list-style-type: none"> - กระตุ้นการทำงานของสมองส่วนบน
Leucine* (Leu, L)		<ul style="list-style-type: none"> - ลดน้ำตาลในเลือด - ช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น
Arginine (Arg, R)		<ul style="list-style-type: none"> - เสริมสร้างภูมิคุ้มกันต่อเชื้อแบคทีเรียไวรัสและเซลล์เนื้องอก - ช่วยให้แผลหายเร็วขึ้น - ช่วยเสริมสร้างตับ
Methionine* (Met, M)		<ul style="list-style-type: none"> - เป็นแหล่งที่ให้สารกำมะถันซึ่งป้องกันการเกิดโรคเกี่ยวกับผม ผิวหนังและเล็บ - ช่วยลดระดับคอเลสเตอรอล โดยการผลิตเลซิตินในตับ

ตารางที่ 2.5 สมบัติและหน้าที่สำคัญของกรดอะมิโนในผงไหมที่มีต่อร่างกาย (ต่อ)

ชนิดกรดอะมิโน ในผงไหม	โครงสร้าง	หน้าที่และสมบัติ
Lysine* (Lys, K)		<ul style="list-style-type: none"> - ต่อต้านริเริ่ม ภูสวัค โดยจะช่วยให้เกิดความสมดุลของธาตุอาหาร และการไปลดการเจริญของไวรัส - การขาด Lysine มีผลทำให้เหนื่อยง่าย ยับยั้งการเติบโต ผมหร่วง โรคโลหิตจาง และเกิดปัญหาต่อระบบสืบพันธุ์
Histidin (His, H)		<ul style="list-style-type: none"> - พบมากในเม็ดเลือดแดง ใช้ในการรักษารูมาตอย โรคข้ออักเสบ อาการผื่นคัน โรคผื่นคัน แผลพุพอง และโรคโลหิตจาง
Proline (Pro, P)		<ul style="list-style-type: none"> - รักษาความดันโลหิต - มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของข้อและเอ็น - ช่วยบำรุงรักษากล้ามเนื้อหัวใจ
Cystine (Cys, C)		<ul style="list-style-type: none"> - ทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) และเพิ่มความแข็งแรงให้ร่างกายต่อต้านรังสี และมลพิษ - ช่วยในการสังเคราะห์โปรตีน
Phenylalanine* (Phe, F)		<ul style="list-style-type: none"> - มีผลต่อระบบเส้นประสาท

หมายเหตุ *กรดอะมิโนที่มีความจำเป็น (Essential amino acid)

#กรดอะมิโนในไหมที่พบมาก และมีความสำคัญต่อร่างกายมากที่สุด (3 ชนิด)

สำหรับกรดอะมิโนที่มีอยู่ในไหมไทยนางน้อยแสดงในตารางที่ 2.6 ดังนี้

ตารางที่ 2.6 กรดอะมิโนในไฟโบรอินและเซรีซินของไหมไทยนางน้อย [30]

กรดอะมิโน	ไฟโบรอิน g/kg	เซรีซิน g/kg
Cysteic acid	1.03	7.76
Aspartic acid (Asp)	7.32	102.76
Methionine (Met)	0.37	1.28
Threonine (Thr)	3.47	47.84
Serine (Ser)	29.89	141.48
Glutamic acid (Glu)	5.16	36.09
Glycine (Gly)	65.95	51.65
Alanine (Ala)	56.42	22.42
Valine (Val)	6.26	18.66
Isolesine (Ile)	1.68	5.01
Leusine (Leu)	1.58	8.81
Tyreonine (Tyr)	19.40	19.45
Phenylalanine (Phe)	2.71	3.93
Lysine (Lys)	1.58	21.29
Histidin (His)	0.86	10.76
Arginine (Arg)	2.29	26.23
Proline (Pro)	0.00	4.75

2.3.2 สมบัติของเส้นไหมไฟโบรอิน (Properties of Silks Fribroin) [21-23, 26]

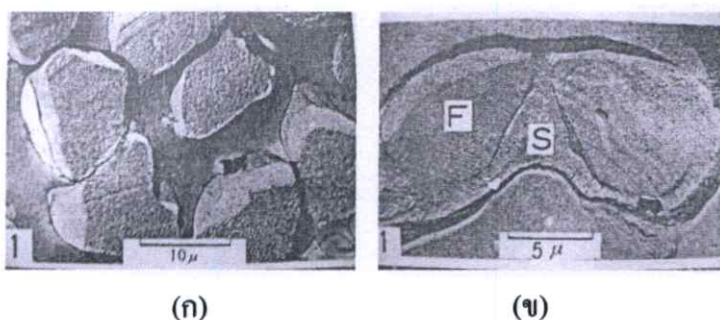
สมบัติของเส้นไหมจะส่งผลโดยตรงต่อสมบัติการใช้งานเฉพาะด้านของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นต้องเข้าใจเลือกใช้เส้นไหมให้เหมาะสมกับงาน โดยทั่วไปสมบัติของเส้นไหมถูกกำหนดจากปัจจัยต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาออกได้เป็นสองส่วนคือสมบัติกายภาพและสมบัติทางเคมี

2.3.2.1 สมบัติทางกายภาพของไหมไฟโบรอิน

1. ลักษณะที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์และรูปร่าง

ไหมเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่องตลอดเส้นมีความยาวประมาณ 900-1700 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 9-11 ไมครอน สีของเส้นไหมดิบจะมีสีเหลืองถึงสีครีมเส้นไหมที่นำมาใช้ทอผ้านั้นเกิดจากการฟั่นของเหลวที่มีความหนืดจากต่อมขนาดใหญ่สองต่อมภายในตัวหนอนไหมที่โตเต็มวัย

โดยส่วนที่เป็นของเหลวหนืด คือ ไฟโบรอินจะถูกเคลือบด้วยโปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เซรีซินซึ่งเป็นกาวไหมที่ที่ทำให้เส้นใย 2 เส้นติดกันเมื่อโปรตีนทั้งสองชนิดสัมผัสกับอากาศจะเกิดการแข็งตัวทำให้เส้นใยยึดติดกันกลายเป็นเส้นใยยาวต่อเนื่อง และเมื่อดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นรอยแตกตามความยาวของเส้นใยด้านตัดขวางจะมีลักษณะรีส่วนนอกของเส้นใยเป็นกาวไหมที่หุ้มไฟโบรอินคล้ายรูปสามเหลี่ยมเรียงคู่กันดังแสดงให้เห็นในภาพตัดขวางและภาพตัดตามยาวของเส้นใยทั้งสองชนิด (รูปที่ 2.10 (ก) และรูปที่ 2.10 (ข)) และสำหรับเส้นใยไหมป่าจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวทำให้ดูคล้ายลินินและเส้นใยจะมีความหยابกระด้าง ไม่เรียบค่อนข้างจะไม่มันเงาเมื่อเทียบกับเส้นใยไหมบอมบิกซ์โมริ

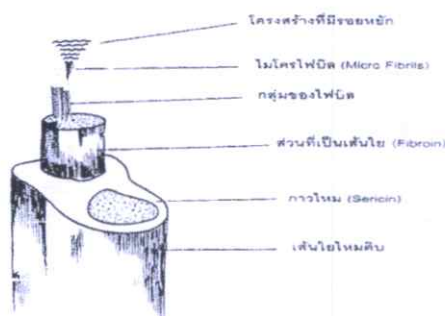


รูปที่ 2.10 แสดงภาพตัดขวางของเส้นไหมจากรังไหม *Bombyx mori* [31]

(ก) ใยไฟโบรอิน

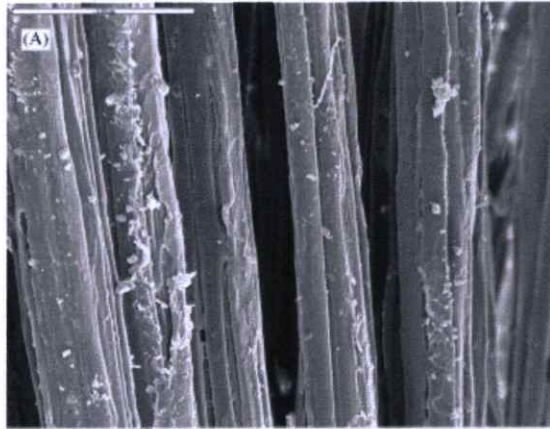
(ข) F: ใยไฟโบรอิน (Fibroin), S: กาวเซรีซิน (Sericin)

ซึ่งหลังจากการลอกกาวไหมแล้วเส้นใยขาวที่เป็นลักษณะสามเหลี่ยมปลายมนทั้งสองเส้นจะแยกตัวออกมาทำให้เส้นใยมีรูปร่างต่างจากเส้นใยไหมดิบ คือมีความละเอียดกว่าและเส้นใยมีความมันเงาสูงกว่า โดยรายละเอียดของโครงสร้างของเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.11

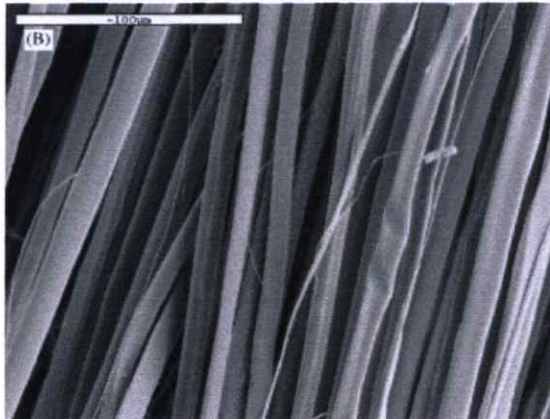


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของเส้นใยไหมไหม [23]

จากการศึกษาพื้นผิวของเส้นใยไหมด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าชั้นนอกสุดของเส้นใยมีปริมาณกาวไหมมากที่สุด ทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีลักษณะเป็นคลื่นปกคลุมตามความยาวของเส้นใยดังแสดงในรูปที่ 2.12 และสำหรับไหมที่ลอกกาวแล้วจะมีพื้นผิวด่อนข้างเรียบสม่ำเสมอมากกว่าเส้นใยไหมดิบ ที่ผ่านการลอกกาว รูปที่ 2.13 ไฟบริลเหล่านี้เกิดการพันเกลียวกันเรียงตัวกันมีลักษณะคล้ายโครงร่างตาข่าย ทำให้เห็นเป็นเหมือนท่อไปตามแนวยาวของเส้นใยแสดงให้เห็นถึงระบบธรรมชาติที่มีความละเอียดสูงซึ่งไม่พบในเส้นใยชนิดอื่นทำให้เส้นใยมีความเงางามและสีน้ำตาลสวยงาม



รูปที่ 2.12 SEM เส้นไหมเลี้ยง ไหมดิบ ไม่มีการลอกกาวไหม (เซรีซิน) ออก [32]



รูปที่ 2.13 SEM เส้นไหมที่มีการลอกกาวไหม (เซรีซิน) ออก โดยสกัดเป็นเวลา 60 นาที [32]

2. ความแข็งแรง ไหมมีความแข็งแรงสูงที่สุดในบรรดาเส้นใยธรรมชาติทั้งหมดด้วยที่ผิวของไหมเรียบมันจึงช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการขัดถู สามารถออกแบบผ้าไหมให้มีโครงสร้างเบา บาง และคงทนเนื่องจากความละเอียดของเส้นใย ไหมมีค่าความทนแรงดึง \approx จุดขาดอยู่ที่ 3.5-5.0 gram/denier ในขณะที่แห้งและจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเปียก (ประมาณ 15-25%)

3. ความยืดหยุ่น ไหมเป็นเส้นใยที่มีความยืดหยุ่นดีเปลี่ยนแปลงได้บางตามชนิดของพันธุ์ และยืดได้ถึง 20% ของความยาวเดิม ไหมมีความยืดหยุ่นไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับขนสัตว์เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของไหมไม่มีพันธะมาจับเชื่อมด้านข้างเป็นโครงข่าย ดังนั้นเมื่อถูกยืดจึงไม่สามารถหดกลับคืนสภาพเดิมได้
4. การคืนตัวจากแรงอัด ไหมทนทานต่อการยืดหดได้ดี เมื่อทำการซักผ้าจะหดแต่เมื่อคึ่งและรีดก็จะกลับรูปเดิม ไม่เกิดการยับย่นได้ง่าย
5. การดูดซับความชื้น ไหมสามารถดูดซับความชื้นได้ดีในภาวะมาตรฐานสามารถดูดซับความชื้นได้ถึง 11% ทำให้รับสีย้อมและสีพิมพ์ได้ดีและเมื่อนำมาใช้สวมใส่ จะรู้สึกสบายไม่ระคายเคืองผิวเนื่องจากผ้าไหมเป็นตัวนำความร้อนไม่ดีจึงรักษาความอบอุ่นได้นานเหมาะในการนำไปทำเป็นผ้าพันคอ ชุดสูท เป็นต้น
6. ความร้อน ไหมสามารถทนความร้อนได้ประมาณ 340°F (170°C) ในช่วงสั้นๆ หลังจากนั้นจะเกิดการสลายตัวแต่ดีกว่าขนสัตว์ เมื่อโค่นรังสีอัลตราไวโอเลตนานๆ จะมีค่าความแข็งแรงและการยืดตัวลดลง
7. ความถ่วงจำเพาะ ไหมมีค่าความถ่วงจำเพาะระหว่าง 1.32-1.33 มีการทิ้งตัวดี แต่เมื่อเพิ่มน้ำหนักไหมจะมีค่าประมาณ 1.60

2.3.2.2 สมบัติทางเคมีของไหมไฟโบรอิน

เนื่องจากการใช้งานของผ้าไหมมีโอกาที่จะสัมผัสกับสารเคมี อุณหภูมิ แสงแดดและสภาวะแวดล้อมต่างๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมสภาพหรือสมบัติของไหมเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงมีการศึกษาสมบัติทางเคมีเพื่อนำไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม ดังนี้

1. กรดและด่าง สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิเพปไทด์ในเส้นใย ค่าความเป็นกรดเป็นด่างระหว่าง 4-8 จะทำให้เกิดเส้นใยเสียหายน้อยมาก กรดจะทำให้พันธะเพปไทด์ขาดออกจากกัน กรดซัลฟูริกและกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นละลายเส้นใยได้ กรดไนตริกทำให้เส้นใยเหลือง ในขณะที่กรดเจือจางจะไม่ทำลายเส้นใย ด่างจะตัดปลายของพันธะเพปไทด์ออกก่อน โดยด่างโซดาไฟเข้มข้นจะละลายเส้นใยทันทีส่วนด่างอ่อนเช่น สบู่ บอเรียซ์ หรือแอมโมเนีย จะละลายแก้วไหมถ้าต้มเดือดนาน ๆ อาจละลายใยได้

2. สารออกซิไดส์และสารรีดิวซ์ เส้นใยไม่ทนทานต่อสารออกซิไดส์ ดังนั้นเวลาฟอกเส้นใยจะต้องระวังการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้สำหรับฟอกไหม การฟอกนี้ไม่ทำลายพันธะเพปไทด์ (Peptide) แต่ในบางครั้งก็ตัดส่วนของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเพปไทด์ ทำให้เส้นไหมมีความเหนียว และยืดต่ำลงเล็กน้อย แต่เส้นใยจะทนต่อสารรีดิวซ์ได้ดี เช่น โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์
3. ส่วนผสมของเกลือคลอไรด์ ไหมถูกทำลายด้วยสารที่มีส่วนผสมของเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ ได้แก่ เหนือ น้ำยาดับกลิ่นและน้ำเกลือทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหนื่อจะทำให้ผ้าไหมติดคราบ ดังนั้นการใช้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ต้องสัมผัสผิวภายหลังการใช้งานทุกครั้งจะต้องทำความสะอาด
4. สารละลายอินทรีย์ ส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ใหม่มักใช้การซักแห้งอยู่เสมอ เนื่องจากโครงสร้างของเส้นด้ายไหมหรือสีที่ใช้ย้อมทำให้ไหมสามารถทนสารละลายอินทรีย์ทุกชนิด
5. สารซักฟอก ไหมทนต่อสารซักฟอกคล้ายขนสัตว์แต่ถูกทำลายได้ด้วยสารซักฟอกประเภท ออกซิไดส์ เช่น พวกที่มีโซเดียมไฮโปคลอไรท์ผสมอยู่เพราะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงควรใช้สารซักฟอกประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์หรือ โซเดียมเปอร์บอเรตจะไม่เกิดผลเสียต่อไหม
6. แสงแดดและความร้อน เมื่อถูกเป็นเวลานานๆ จะทำให้ความแข็งแรงของเส้นใยลดลงและเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเนื่องจากทำให้โปรตีนเกิดการสลายตัวเร็วขึ้น
7. การย้อมสี ไหมมีความสามารถในการรับสีย้อมได้ดีมากสามารถย้อมได้ด้วยสีที่เป็นแอซิด สีเบสิกหรือ สีวอต สีมอร์แคนท์ เมื่อเปรียบเทียบกับขนสัตว์จะได้สีที่เข้มกว่าและย้อมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าด้วย

2.3.2.3 สมบัติทางชีวภาพของไหมไฟโบรอิน

ไหมเกิดราได้ยาก นอกจากจะถูกทิ้งไว้ในสภาวะที่ค่อนข้างชื้นเป็นเวลานานหรืออาจมีแมลงมากัดกินได้

2.3.2.4 สมบัติในการติดไฟของไหมไฟโบรอิน

ไหมเมื่อติดไฟจะถูกไหม้ช้าๆ เมื่อนำออกจากแหล่งให้ความร้อนเปลวไฟจะดับเอง

2.3.2.5 สมบัติในการเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนของไหมไฟเบอร์อิน

ไหมเป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนไม่ดี มีการใช้งานไหมกันอย่างกว้างขวางด้วยไหมมีสมบัติเด่นหลายประการ นอกจากการใช้งานผ้าไหมเป็น 100% แล้วยังมีการนำไหมไปผสมกับเส้นใยชนิดอื่น ได้ด้วย เช่น ไหมผสมฝ้าย ไหมผสมลินิน หรือไหมผสมขนสัตว์ เป็นต้น

2.3.3 การปรับปรุงเส้นใยไหมด้วยวิธีการทางเคมี (Chemical Treatment of Silks) [29, 33-35]

ไหมดิบที่ได้จากรังไหมในแต่ละรังมีความแข็งแรงกระด้างและให้สัมผัสที่ไม่ดีเนื่องจากเส้นใยไหมดิบมีองค์ประกอบของกาวไหมและสารอื่นๆเคลือบอยู่ ดังนั้นก่อนนำไหมไปใช้งานจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติของเส้นใยก่อนนำไปทำผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องผ่านกระบวนการลอกกาวไหมและการตกแต่งสำเร็จ เช่น การตกแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติทางความร้อน การตกแต่งเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการใช้งาน เป็นต้น

การลอกกาว (Degumming)

การลอกกาว หมายถึง การลอกเซรีซินออก 100% แต่บางครั้งมีการลอกกาวเพียง 30%, 50%, 70% ทั้งนี้ ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์เส้นใยไหมเมื่อสาวออกจากรังเป็นเส้นใยกระด้างแข็ง เพราะมีกาวหุ้ม ฟอกออกได้ด้วยสบู่จะได้ใยที่นุ่มเป็นมันทำให้น้ำหนักไหมลดไปประมาณ 25% เส้นไหมมีสีขาวขุ่นและเพื่อเพิ่มความสามารถในการย้อมสีเส้นใยจะต้องมีการฟอกขาวเพื่อกำจัดสีธรรมชาติออกไปด้วย การลอกกาวออกจากเส้นใยไหมดิบเป็นการลอกกาวเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกออกจากเส้นใยเพื่อให้เส้นใยมีความมันเงามากขึ้นมีวิธีใช้อยู่ทั่วไปดังนี้

1. การลอกกาวด้วยโซดาไฟ (Degumming)

สารละลายโซดาที่ใช้ในการลอกกาวเส้นใยที่นิยมใช้ คือ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และ โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 2-9 ชั่วโมงจากนั้นล้างด้วยน้ำอุ่น $40-50^\circ\text{C}$ และน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายครั้งวิธีนี้สามารถลอกกาวได้สม่าเสมอแต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ สารเคมีที่ใช้มีความเป็นด่างสูงทำให้เส้นใยมีสมบัติเชิงกลลดลง

2. การลอกกาวด้วยสบู่

การลอกกาวไหมด้วยสบู่เริ่มจากแช่เส้นใยไหมดิบที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วเค็มสบู่ 15-20% โดยน้ำหนักของเส้น (30-50 เท่าของน้ำหนักไหมดิบ) และต้มต่อเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงทำให้ได้เส้นไหมที่เงางามเรียบสวย ข้อเสียของวิธีนี้คือ ถ้าใช้น้ำกระด้างจะทำให้เกิดโคลสบู่

ที่เกิดจากแคดไอออนในน้ำ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียมและเหล็ก ทำให้เส้นใยที่ได้มีการลอกกาว่าที่ไม่สม่ำเสมอและมีสีหมองคล้ำ

3. การลอกกาว่าด้วยเอนไซม์

เอนไซม์ที่ใช้ในการลอกกาว่าได้ คือ เอนไซม์โปรตีเอส (Protease Enzyme) ชนิดต่างที่มีค่า pH 9.0-10.5 ที่อุณหภูมิ 40-65°C เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงแล้วล้างน้ำอุ่น 40-50°C และน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆ ครั้ง เอนไซม์สามารถลอกกาว่าได้อย่างสม่ำเสมอแต่ข้อเสีย คือเอนไซม์ที่ใช้มีราคาแพงและมีกลิ่นรุนแรง

4. การลอกกาว่าด้วยกรด

การนำเส้นใยไปต้มในสารละลายที่เป็นกรดแต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากปัญหาในการควบคุมคุณภาพของไหมที่ลอกกาว่า

5. การลอกกาว่าด้วยไตรเอทิลอะมีน

เส้นใยที่ผ่านการลอกกาว่าด้วยวิธีนี้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเส้นใยที่ผ่านการลอกกาว่าด้วยสบู่

6. การลอกกาว่าด้วยสบู่-โซดา

การลอกกาว่าด้วยสบู่ผสมโซดาจะใช้สบู่ 8-15 % ของน้ำหนักเส้นใยและ โซเดียมคาร์บอเนต 5-8% ของน้ำหนักเส้นใย ใช้อัตราส่วนของวัสดุต่อของเหลวเป็น 1:5 ที่อุณหภูมิ 90°C ใช้เวลา 2-3 ชั่วโมงหลังจากนั้นนำเส้นใยมาล้างด้วยสารละลาย โซเดียมคาร์บอเนตหรือ โซเดียม ไบคาร์บอเนตที่เป็นค่าอ่อนกว่าที่อุณหภูมิ 40- 50°C ตามด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้องหลายๆครั้ง วิธีนี้จัดว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดวิธีหนึ่งทำให้ได้เส้นใยที่ขาวและมีความสม่ำเสมอในการลอกกาว่ามากขึ้นและช่วยลดข้อเสียในการลอกกาว่าด้วยสบู่จากการใช้สารลดแรงตึงผิวและสารลดความกระด้าง

2.3.4 การนำไหมไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ [36]

รังไหมและเส้นไหมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายอย่างเช่นเดียวกับหนอนไหมและดักแด้ ได้แก่

1. **สิ่งทอ** ไหมเป็นสิ่งทอที่ล้ำค่ามากกว่าสิ่งทออื่นๆ จนได้รับสมญานามว่า “ราชินีแห่งเส้นใย” แม้ไหมจะมีข้อเสียคือ ยืดหยุ่นได้น้อย ยับง่ายซักยาก แต่ข้อเสียเหล่านี้ก็ได้กำจัดหรือทำให้ลดน้อยลงไป โดยการใส่สารเคมีหลายชนิดในกระบวนการผลิตเพื่อทำให้ผ้าไหมซักง่ายขึ้น ลดการยับ

และลดการทำให้ผ้าเหลืองลงได้ ยังมีการพัฒนาเส้นไหมดิบให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น โดยการตีเกลียวเส้นไหม ในทิศทางกลับกันและถี่ขึ้น ใช้เส้นใยที่มีขนาดใหญ่ เส้นใยชนิดนี้จะมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ดี กำจัดข้อเสียด่างๆ ออกได้ด้วยความเป็นเส้นใยที่ได้จากสัตว์ ไหมจึงได้เปรียบเหนือกว่าฝ้าย ไหมมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในการระบายอากาศ ดูดซับความร้อน ทำให้ร่างกายสบายมีการดูดซับน้ำและระบายความชื้น ได้ดีสามารถดูดซับน้ำได้มากกว่าฝ้าย 1.5 เท่า แต่ระบายความชื้นได้เร็วกว่า 50% และดูดซับความร้อนไว้ที่เนื้อผ้าได้ สูงกว่า 13-21% ปกติอุณหภูมิของร่างกายบริเวณเด้านม และต้นขาประมาณ 33.3-34.2°C การสวมใส่ชุดผ้าไหมจะทำให้อุณหภูมิของร่างกายบริเวณดังกล่าวลดลงเหลือ 31-33°C ดังนั้นจึงทำให้ผู้สวมใส่รู้สึกอบอุ่นในฤดูหนาวแต่จะเย็นสบายในฤดูร้อน ไม่เหนียวเหนอะหนะเวลาสวมใส่ผ้าไหม ด้วยเหตุผลดังกล่าว ประเทศญี่ปุ่นที่มีอากาศร้อนและอากาศหนาวในช่วง 1 ปี จึงพัฒนาชุดชั้นในที่ทำด้วยเส้นใยไหมจึงดูความสนใจได้มากกว่าเส้นใยสังเคราะห์อื่น ๆ นอกจากนี้จะใช้ผ้าไหมเป็นเครื่องนุ่งห่มแล้ว ยังเป็นผ้าปูที่นอน ผ้าห่มชุดเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ ในอดีตถุงน่องสตรี ทำจากไหมเพียงอย่างเดียว ภายหลังใยสังเคราะห์ในล่อนเข้ามาทดแทนไหมได้เกือบสมบูรณ์ เนื่องจากมีความเหนียวและทนทานยืดหยุ่นดีและราคาถูก แต่ไหมยังดีกว่าในล่อนอยู่มากในด้านการสัมผัสการดูดซับความร้อนและระบายอากาศ จึงได้มีการพัฒนาเส้นไหมผสม (Hybrid Silk) เพื่อรวมคุณสมบัติที่ดีของเส้นใยทั้ง 2 ชนิดไว้ด้วยกัน

2. เครื่องสำอาง “Silk Fibroin” เป็นเลิศแห่งมอยซ์เจอไรเซอร์ที่สามารถให้ความชุ่มชื้นสูงถึง 300 เท่าของน้ำหนักเป็นโปรตีนสกัดจากไหมที่ผสมเป็นหนึ่งเดียวกับผิวหนัง ด้วยกระบวนการทางชีวเคมีคู่เคียงกับธรรมชาติผิวหนังเป็นสรรพคุณของไหม ที่บริษัทเครื่องสำอางแห่งหนึ่งที่ผลิตครีมบำรุงความชื้นผิวจากโปรตีนไหมกล่าวถึง ไหมนอกจากจะครองความเป็นเลิศในเรื่องของเส้นใยแล้วยังเป็นวัสดุที่มีคุณค่าเมื่อนำเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาพัฒนา เนื่องจากเส้นใยไหม ส่วนใหญ่ (90%) เป็นโปรตีนที่มีความใกล้เคียงกับโปรตีนที่พบในร่างกายมนุษย์ซึ่งยากยิ่งที่สารสังเคราะห์อื่นใดจะทำได้เสมอเหมือน โปรตีนจากเส้นไหมประกอบด้วย Fibroin และ Sericin แต่เซรีซิน จะถูกความร้อนชะล้างออกไปเมื่อต้มรังในการสาวไหมเพราะเป็นกาวเหนียว มีเพียงไฟโบรอินที่ใช้ทำเป็นเส้นใย ดังนั้น งานวิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การใช้ประโยชน์จากไฟโบรอิน เมื่อ 60 ปีก่อน บริษัทเครื่องสำอางแห่งหนึ่งในประเทศญี่ปุ่น ได้นำไฟโบรอินมาหลอมให้อยู่ในรูปของสารละลายก่อนที่จะทำเป็นผงและครีม ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง อันดับแรกที่ทำจากไหมโดยใช้เป็นเครื่องแต่งหน้าให้กับผู้แสดงละครคาบูกิ ที่จำเป็นต้องพอกหน้าด้วยเครื่องสำอางอย่างมาก ทำให้ผู้แสดงรู้สึกสบายผิวมากขึ้น เมื่อต้องแสดงกลางแจ้งก็สามารถป้องกันอันตรายจากแสงอุลตราไวโอเลต (UV Light) และที่สำคัญเครื่องสำอางชนิดนี้เข้ากับผิวหนังได้ดีกว่าชนิดอื่น ต่อมาบริษัทได้ผลิต Silk Polymer ที่ทำจากเซรีซิน เพื่อใช้ในวงการเสริมสวยโดยมีสรรพคุณในการป้องกันเส้นผมเสีย ในขณะที่ตกแต่งหรือเปลี่ยนทรงผม ปัจจุบันครีมรองพื้น ครีมแต่งหน้า และครีมทำความสะอาด จะมี

โปรตีนจากไหมเป็นส่วนผสม ญี่ปุ่นเป็นประเทศเดียวที่มีการใช้ไหมทำเครื่องสำอางถึงปีละ 5-6 ดัน และเป็นที่น่ายินดีที่มีบริษัทของไทยได้ผลิตเครื่องสำอาง สบู่เหลว แชมพูและน้ำยาซักผ้าไหมที่มีโปรตีนจากเส้นใยไหมเป็นส่วนผสมออกจำหน่ายแล้ว

3. การแพทย์ เป็นที่ทราบกันว่าไหมใช้เป็นเส้นด้ายในการเย็บแผลผ่าตัด นอกจากเหนียวและทนต่อการเข้าทำลายของเชื้อจุลินทรีย์แล้ว ยังเข้ากับเนื้อเยื่อมนุษย์ได้ดี คุณสมบัติของไหมเหล่านี้จึงเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์อย่างมากในการที่จะหลอมเส้นไหมแล้วทำให้เป็นแผ่นหรือเป็นหลอดก่อนที่จะเป็นผิวหนังเทียม ต่อเส้นเลือดเทียม คอนแทกเลนส์ แม้ว่าอุปกรณ์เหล่านี้จะทำได้ด้วยพลาสติก แต่ก็ถูกต่อต้านจากร่างกายสูง ได้มีความพยายามที่จะผลิตสารดูดซับ (Absorbent Polymers) และเปปไทด์ไหม (Silk Peptides) ที่จะใช้ทางการแพทย์และสารอาหารจากสารละลายไฟโบรอิน เมื่อเร็ว ๆ นี้ พบว่ากรดอะมิโนที่พบในไฟโบรอินคือ Glycine จะช่วยให้คอเลสเตอรอลและระดับน้ำตาลในเลือดต่ำ และ Alanine จะช่วยดับทำงาน เช่น ช่วยให้อาการเมื่อดังกลับสู่ภาวะปกติได้เร็วขึ้น ขณะเดียวกัน Serine จะกระตุ้นทำงานของสมองในผู้สูงอายุไฟโบรอินจากไหมยังมีศักยภาพในการพัฒนาเป็น Biosensors เพื่อตรวจจับ Antibodies ซึ่งใช้ในการวินิจฉัยโรคมะเร็งและโรคเอดส์ได้ ไหม ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากขึ้นเรื่อยๆ จนได้รับการขนานนามอีกอย่างหนึ่งว่า “เส้นใยสุขภาพ (Health Fiber)”

4. สารป้องกันกำจัดแมลง ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้มีการสกัดสารจากเชื้อ *Bacillus Thuringiensis* ที่แยกได้จากหนอนไหม นำไปใช้เป็นสารกำจัดแมลง (Microbial Insecticide) เชื้อรา (Filamentous Fungi) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อหนอนไหม พบว่าสามารถทำลายด้วงหนวดยาว จึงมีการผลิตเชื้อราชนิดนี้จากหนอนไหม เพื่อใช้กำจัดด้วงเจาะลำต้น นอกจากนี้ยังมีการใช้ฮอร์โมนบางชนิดจากหนอนไหมควบคุมการเจริญเติบโตของแมลง ใช้หนอนไหมเป็นอาหารของจุลินทรีย์หลาย ๆ ชนิดที่สามารถใช้กำจัดแมลงได้ การปลูกเชื้อไวรัสที่เจือจางในหนอนไหมสามารถใช้เป็นวัคซีนป้องกันโรคของสัตว์ได้ ตลอดจนมีการศึกษาการเลี้ยงเชื้อไวรัส และจุลินทรีย์ ที่สามารถนำมาผลิตเป็นยารักษาโรคและสารที่มีประโยชน์ต่างๆ ใช้หนอนไหมเป็นอาหารของไส้เดือนฝอยในการขยายพันธุ์เพื่อใช้กำจัดแมลงศัตรูพืชบางชนิด

5. สบู่และเทียนไข ไขจากดักแด้ไหมสามารถนำมาผลิตเป็นสบู่และเทียนไขที่มีคุณภาพสูง ญี่ปุ่นและอิตาลีเป็นประเทศที่ผลิตสบู่และเทียนไขคุณภาพสูงจากไขดักแด้ไหมมากเป็นอันดับ 1 และ 2 ไขมันที่สกัดได้เมื่อนำไปผ่านกระบวนการเพิ่มไฮโดรเจน (Hydrogenation) จะได้ไขสีขาว (White Oil) คือ Stearic Acid $(\text{CH}_3)(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่และเทียนไขคุณภาพสูงและมีการนำไปทำผงซักฟอก ไฟโบรอินจากไหม ใช้เป็นส่วนผสมในการ

ผลิตผงซักฟอกที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถเคลื่อนย้ายสิ่งสกปรกได้ดี เพราะมีส่วนช่วย กระตุ้นปฏิกิริยาทางเคมี

6. ดอกไม้ รั้วไหมที่ผ่ารังเอาดักแด้ออกแล้ว สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นดอกไม้ได้หลากหลายชนิด เช่น ดอกทิวลิป ดอกบัว ดอกเฟื่องฟ้า ดอกทานตะวัน ดอกเยอบีร่า ดอกกุหลาบ หรือประดิษฐ์เป็นรูปสัตว์ต่างๆ เช่น นก หนู ฯลฯ ใช้ประดับในอาคาร ในรถยนต์ นอกจากนี้จะสวยงามแล้วยัง สะดุดตาแก่ผู้พบเห็นทั่วไปอีกด้วย

7. อาหารมนุษย์ มนุษย์รู้จักบริโภคดักแด้จากหนอนไหมมาตั้งแต่เมื่อไรไม่ปรากฏ แต่ชาวไทยที่เคยเลี้ยงไหม หรือสาวไหม ล้วนแล้วแต่รู้จักการบริโภคดักแด้ที่อยู่ในรังไหมเป็นอย่างดี เมื่อต้มรังไหมและสาวไหมจนหมดเส้นใย ก็มักจะลอกเปลือกรังชั้นในนำดักแด้ที่สุกแล้วมาบริโภค หรือนำไปต้วกี๋อร่อยไปอีกแบบหนึ่งหรือนำไปปรุงอาหารชนิดอื่นก็ได้ เช่น ทอดกับไข่ผัดใบกะเพรา ตลาดในภาคอีสานจะมีดักแด้ไหมขายตามฤดูกาลเฉลี่ยราคา กิโลกรัมละ 40-80 บาท ชาวญี่ปุ่นก็บริโภคดักแด้ไหมที่ปรุงแล้วเช่นเดียวกับชาวจีน เกาหลี อินเดีย และพม่า แล้วยังมีจำหน่ายในซูเปอร์มาร์เก็ตบางแห่งอีกด้วย มีบริษัทอุตสาหกรรมการเกษตรของไทยได้ส่งออกผลิตภัณฑ์ “ดักแด้กระป๋อง” ไปจำหน่ายยังประเทศเกาหลี เนื่องจากมีความต้องการสูง เพราะดักแด้ไหมมี โปรตีนและเกลือแร่หลายชนิด มีคุณค่าทางอาหารสูงกว่าปลาและสัตว์ต่างๆ ยังอุดมไปด้วยวิตามินบี 1 และ บี 2 ดักแด้แห้งจะมีโปรตีนสูงถึง 48.98%

8. อาหารสัตว์ ดักแด้ไหมสดหรือดักแด้ไหมแห้ง สามารถนำไปเลี้ยงปลาและสัตว์อื่น ได้อีกหลายชนิดเช่น สัตว์ปีก และปศุสัตว์ กำลังมีการมองหาแหล่ง โปรตีนใหม่ๆ ทดแทนการใช้ปลาป่นที่ นับวันจะหายากและมีราคาแพงขึ้นทุกขณะ ดักแด้ไหมป่นเป็นทางเลือกหนึ่งของการนำไปใช้ ทดแทนปลาป่น ดักแด้ไหมที่สกัดไขมันแล้วจะเป็นแหล่ง โปรตีนที่มีคุณภาพสูง กากดักแด้ไหม (Cake) ที่เหลือจากการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการทำสบู่และเทียนไขแล้ว สามารถนำไปเป็นอาหารของปลาและสัตว์ปีกได้ มูลไหมจะมีไนโตรเจนเหลืออยู่ประมาณ 3.06% สามารถ ที่นำไปเป็นอาหารเสริมของปลาร่วมกับเศษใบหม่อนที่เหลือจากการเลี้ยงไหมได้ ปัจจุบันยังไม่มี ข้อมูลมากนัก คาดว่าจะได้รับข่าวดีในการใช้ดักแด้ไหมไปเลี้ยงสัตว์ในเร็ววันนี้

9. ทดแทนนุ่น ฟูไหมชั้นนอกไม่สามารถจะนำไปสาวเป็นเส้นได้ เดิมจะมีการลอกฟูไหมชั้นนอกทิ้ง ไปก่อนนำรัง ไปต้มเพื่อสาวเป็นเส้นไหมต่อไป หรือรังไหมเสียที่ไม่สามารถเข้า เครื่องสาวไหมได้ จะนำไปต้มแล้วดึงเส้นใยไหมออกมาเป็นแผ่น โดยสถาบันวิจัยหม่อนไหมเซินเจียง (Zhenjiang Dongfang Silkworm Egg Development Company of Sericultural Research

Institute of the Chinese Academy of Agricultural Sciences) ได้คิดค้นการใช้ประโยชน์จากใยไหม ด้วยการผลิต “Floss Silk Waddes Quilt” ผลิตภัณฑ์เหล่านี้บริษัทเอกชนในประเทศไทยก็มีการผลิตออกจำหน่ายแล้ว รวมทั้งเครื่องนอนต่าง ๆ เช่น ผ้าห่ม หมอนข้าง และหมอน เป็นต้น นับว่าเศษวัสดุเหลือใช้จากรังไหมได้ถูกพัฒนานำมาใช้ประโยชน์อีกอย่างหนึ่งแล้ว

นอกจากนั้น นักวิทยาศาสตร์ยังคงศึกษาต่อไปในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ คือ เส้นไหมที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอไม่ได้แล้ว ไปบดเป็นผงไหม เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมและผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- วัสดุที่ให้ความรู้สึกที่ดีในการสัมผัส โดยการใช้ผงไหมผสมสีแล้วฉีกพ่นบนวัสดุ เพื่อให้เกิดความนุ่มมือและดูดซับความชื้น ไม่เหนียวเหนอะหนะ เช่น ปากกา

- ฟิล์ม เคลือบรักษาความสดในอุตสาหกรรมประมง โดยเปรียบเทียบกับสารต่าง ๆ เช่น สารพอลิเมอร์ ฝ้าย ป่าน ปอ กระดาษเคลือบไข (Oil Paper) และสารละลายเกลือ 1% พบว่าการเคลือบด้วยฟิล์มไหมรักษาความสดของกุ้งสดได้นานถึง 9 วัน ดีกว่าวัสดุอื่น และดีกว่าน้ำแข็งที่รักษาความสดไว้ได้เพียง 7 วัน

- ถ้าไม่ทำเป็นผง ก็จะนำไปฟอกให้เกิดความอ่อนนุ่ม เพื่อนำไปทำเป็นสำลี ผ้าเช็ดเลนส์ และกระดาษ แผ่นทำความสะอาดผิวหนัง เช่น การชำระล้างเครื่องสำอาง เหล่านี้เป็นต้น

สำหรับประเทศไทย การปลูกหม่อนเลี้ยงไหมยังมุ่งเน้นอยู่ที่อุตสาหกรรมสิ่งทอไม่ว่าจะเป็นระดับครัวเรือนหรือระดับอุตสาหกรรมขนาดเล็กและขนาดใหญ่ เกษตรกรจะผลิตรังไหมหรือสาวเป็นเส้นไหม ขายให้กับโรงสาวไหม หรือพ่อค้าคนกลาง เพื่อนำไปขายให้กับโรงงานทอผ้าต่อไป แม้ว่าจะมีการศึกษาและพัฒนาการใช้ประโยชน์จากส่วนต่าง ๆ ของดินหม่อน หรือหนอนไหม รังไหม ดักแด้ไหม เส้นไหมอยู่บ้าง แต่ก็อยู่ในวงจำกัด และอยู่ในระยะเริ่มต้น การดำเนินงานศึกษา ค้นคว้า วิจัยและพัฒนาประโยชน์จากหม่อนและไหมนั้น จำเป็นต้องใช้นักวิทยาศาสตร์หลายสาขาวิชาร่วมทำงานไปพร้อมๆกัน เพื่อทราบข้อมูลและพัฒนาไปได้อย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับต่างประเทศ โดยเฉพาะประเทศญี่ปุ่น ที่มุ่งเน้นการวิจัยและพัฒนาหม่อนและไหม เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ ให้มากขึ้น เช่น ด้านการแพทย์ ด้านเสริมความงาม ฯลฯ เพื่อเพิ่มคุณค่าของหม่อนและไหมให้สูงขึ้นมากกว่าการนำไปทอเป็นผ้าไหมเพียงอย่างเดียว

2.4 พอลิเมอร์ผสม (Polymer Blend) [37]

การทำพอลิเมอร์ผสมเป็นวิธีการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ที่นิยมใช้กันมาก โดยการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิด ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของไหล ได้แก่ สารละลาย (Solution) หรือสารหลอมเหลว (Molten) มาผสมให้อยู่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน (Blending) ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) ซึ่งมีสมบัติที่ดีของพอลิเมอร์แต่ละชนิดมารวมกัน แต่การผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ต่างชนิดกันนั้น โดยธรรมชาติเป็นไปได้ยาก ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมที่ได้จึงไม่เป็นสารละลายของแข็งที่

แท้จริง และพบว่าเมื่ออยู่ในสถานะของแข็งพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งจะกระจายอยู่ในเนื้อหรือเมทริกซ์ที่ต่อเนื่อง (Continuous matrix) ของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ทั้งนี้การกระจายตัวดังกล่าวต้องเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ มิฉะนั้นจะทำให้เกิดเป็นข้อบกพร่อง (Defects) ของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมต่ำกว่าของพอลิเมอร์ บริสุทธิ์ได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาถึงสภาพเข้ากันได้ (Compatibility) ของพอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันซึ่งบางชนิดสามารถเข้ากันได้ดี บางชนิดไม่สามารถเข้ากันได้เนื่องจาก โครงสร้างสายโซ่ต่างกันจึงไม่สามารถกระจายตัวอย่างอิสระเกิดการแยกชั้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยทางพลังงาน (Energy factor) ที่ทำให้พอลิเมอร์ 2 ชนิดเข้ากันไม่ได้ นั่นคือพลังงานที่ใช้ในการผสมผสานโมเลกุลหรือสายโซ่ของพอลิเมอร์ เช่น การดูดกลืนพลังงานความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิดต่างกัน

1. กลไกสภาพเข้ากันได้ (Compatibility mechanism)

พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะให้สมบัติที่ค่อนข้างต่ำโดยเฉพาะสมบัติเชิงกล ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสที่ต่ำและความเค้นสะสม (Stress concentration) จากคิสเพอร์สในเมทริกซ์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ในการผสมจึงนิยมใช้สารช่วยผสมหรือการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในระหว่างการผสม (In-situ chemical reaction) เพื่อปรับปรุงแรงดึงดูดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมเพื่อให้ได้โครงสร้างฐานวิทยาศาสตร์และสมบัติของพอลิเมอร์ผสมที่เหมาะสม

2. วิธีการผสมเพื่อความเข้ากันได้ (Method of compatibilization)

เทคนิคที่ใช้ในการผสมเพื่อความเข้ากันได้ และทำให้ได้พอลิเมอร์ผสมที่มีสมบัติตามต้องการนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี โดยแต่ละวิธีอาจมีความเกี่ยวข้องกัน ดังนั้นการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากต้นทุนเป็นสำคัญ เทคนิคเหล่านี้คือ

2.1 การพิจารณาสภาพผสมเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic miscibility)

ความสามารถในการเข้ากันได้ทางเทอร์โมไดนามิกส์ เป็นหลักการที่ได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตทางการค้า โดยหลักการดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างเอนทัลปีและเอนโทรปีของการผสมที่มีต่อพลังงานเสรีของการผสม (Free energy of mixing) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสมสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

โดยที่

$$\Delta G = \text{การเปลี่ยนแปลงพลังงานเสรีของการผสม}$$

$$\Delta H = \text{การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีของการผสม}$$

$$\Delta S = \text{การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีของการผสม}$$

$$T = \text{อุณหภูมิ (K)}$$

2.2 การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ (Addition of block or graft copolymer)

การเติมบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ากันได้ บล็อกโคพอลิเมอร์จะได้รับความนิยมมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยเฉพาะบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกของพอลิเมอร์ที่เหมือนกันกับพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน โดยโคพอลิเมอร์ที่ใช้ต้องมีโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลที่เหมาะสมที่จะไปอยู่ระหว่างเฟสของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

โครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของโคพอลิเมอร์จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการเป็นสารช่วยผสม จากการตรวจสอบประสิทธิภาพของสารช่วยผสม โดยการทดสอบสมบัติความทนแรงดึงสามารถสรุปผล ได้ดังนี้

1. บล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่ากราฟต์โคพอลิเมอร์
2. ไคบล็อกโคพอลิเมอร์มีประสิทธิภาพมากกว่าไครบล็อกโคพอลิเมอร์
3. ไครบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวลดหลั่นลงมามีประสิทธิภาพสูงกว่าไคบล็อกโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยบล็อกที่มีความยาวเท่ากัน

2.3 การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันหรือส่วนที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา

(Addition of functional/ Reactive polymer)

การเติมพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเพื่อทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม บ่อยครั้งเป็นการนำพอลิเมอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะทำการผสมมาดัดแปรให้มีหมู่ฟังก์ชัน หรือส่วนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวต้องสามารถเกิดปฏิกิริยา หรือมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจนกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองได้ กระบวนการดัดแปรพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันสามารถทำได้ในเครื่องปฏิกรณ์หรือ โดยผ่านกระบวนการอัดรีด ตัวอย่างเช่น การผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนตกับพอลิเอสเทอร์ แม้ว่าในบางครั้งการผสมแบบไม่ต่อเนื่องสามารถนำมาใช้กับการผสมแบบ Reactive blending ได้ แต่การใช้กระบวนการแบบต่อเนื่อง เช่น การอัดรีดแบบ สกรูเดี่ยว (Single-screw extruder) และการอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะกระบวนการดังกล่าวสามารถควบคุมอุณหภูมิ และสิ่งที่ไม่ต้องการจากการดำเนิน ไปของปฏิกิริยาได้ดีกว่า

2.4.1 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาในการผสม อาจมีได้ดังนี้

1. เกิดกราฟต์หรือบล็อกโคพอลิเมอร์ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีในพอลิเมอร์ ซึ่งอาจกระตุ้นได้โดยการเติมตัวริเริ่ม (Initiator) ในระหว่างการผสม
2. เกิดบล็อกโคพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยน (Interchange reaction) ที่สายโซ่โมเลกุลหลักของพอลิเมอร์แต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดกับพอลิเมอร์ชนิดควบแน่น

3. เกิดการขาดและรวมกันใหม่ของแต่ละ โมเลกุล เพื่อสร้างบล็อกหรือกราฟต์โคพอลิเมอร์ โดยกระบวนการดังกล่าวจะเกิดภายใต้ภาวะที่แรงเฉือนสูง
4. ส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

2.4.2 ความสามารถในการละลายเข้ากันได้และความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Miscibility and Compatibility)

ความสามารถในการละลายเข้ากันได้ (Miscibility) ในระดับ โมเลกุลจัดเป็นมโนทัศน์ทางทฤษฎีเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้เกิดระบบวัฏจักรเดี่ยวเนื้อเดียว (Homogeneous single-phase system) มีสมบัติอยู่ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด และโดยทั่วไปจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ พอลิเมอร์ผสมจัดเป็นสิ่งที่มิใช่ประโยชน์ในทางการค้า โดยเฉพาะเมื่อองค์ประกอบมีส่วนเกี่ยวข้องกับความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุล (Molecular miscibility) ได้แก่ น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ความเป็นผลึกมีค่าเท่ากับศูนย์ ความมีขั้วคล้ายกัน และพันธะไฮโดรเจนร่วมกัน

ความสามารถในการผสมเข้ากันได้ (Compatibility) จัดเป็นสมบัติในทางปฏิบัติอย่างหนึ่งของพอลิเมอร์ผสมบางชนิดซึ่งละลายได้ในระดับ โมเลกุลและมีประโยชน์ในทางการค้า อย่างไรก็ตามระบบพอลิเมอร์ผสมส่วนใหญ่ในทางการค้าเป็นระบบที่ละลายกันไม่ได้ (Immiscible) ในระดับโมเลกุล และแยกออกเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multi-phase system) ในขณะที่ระบบหลายวัฏภาคนี้ นานขึ้นจะมีแรงยึดเกาะระหว่างผิวมากขึ้น (Strong interfacial adhesion) ทำให้สามารถรวมสมบัติที่ดีที่สุดของแต่ละวัฏภาค และเกิดเป็นความสมดุลของสมบัติทั้งหมดที่ไม่สามารถเข้ากันได้ จากสมบัติของพอลิเมอร์บริสุทธิ์โดยลำพัง ยิ่งไปกว่านั้นระบบชั้นนำหลายๆ ระบบมีการปรับปรุงระบบผสมร่วมที่สำคัญ (Major synergistic improvement) มากกว่า 1 สมบัติ

2.4.3 เคมีของพอลิเมอร์ผสม

ระบบพอลิเมอร์แบบหลายวัฏภาคอาจเกิดขึ้นได้หลายวิธี ดังนี้

พอลิเมอร์ผลึก (Crystalline polymer) ในทางปฏิบัติไม่มีผลึก 100 เปอร์เซ็นต์ แต่จะเป็นระบบ 2 วัฏภาค คือ ผลึก (Crystalline) และอสัณฐาน (Amorphous) โดยในแต่ละวัฏภาคมีส่วนทำให้เกิดการกระจายตัวของสมบัติทั้งหมด ในบางวิธีสมบัติที่ได้เหมาะกับมโนทัศน์ทั่วไปของระบบพอลิเมอร์แบบหลายวัฏภาคแต่อาจยังไม่มีความรู้พื้นฐานเพียงพอที่จะรวมเข้าในหัวข้อปัจจุบันได้

พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เกิดจากการผสมพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ในขณะที่ระบบบางชนิดอาจเหมาะสมกับความต้องการทางเทอร์โมไดนามิกส์เพื่อให้เกิดความสามารถในการละลายเข้ากันได้ของโมเลกุลที่สมบูรณ์ แต่โดยส่วนมากจัดเป็นการละลายได้บางส่วนหรือไม่ละลาย

เลข และแยกวัฏภาคออกเป็น 2 หรือมากกว่า 2 วัฏภาค ด้วยเหตุนี้คำว่าพอลิเมอร์ผสมและระบบหลายวัฏภาคจึงนิยมใช้แทนระบบนี้

พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกและต่อกิ่ง (Block and Graft copolymer) ประกอบด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ไม่เหมือนกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งไม่สามารถละลายเข้ากันได้ ถ้าพอลิเมอร์ถูกทำให้แยกออกจากกันหรือแม้แต่การเกิดพันธะโคเวเลนต์เป็น โมเลกุลเดี่ยวก็ตาม จะมีแนวโน้มแยกออกจากกันเป็นแต่ละวัฏภาค (Individual phases) ทำให้เกิดโครงสร้างเป็นแบบหลายวัฏภาคได้ ยิ่งไปกว่านั้นเทคนิคส่วนมากที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อกและต่อกิ่งรวมทั้งพอลิเมอร์เดี่ยวแต่ละตัว ไม่ประสบความสำเร็จ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดพอลิเมอร์ผสมแบบหลายวัฏภาค ในตอนเริ่มต้นนักเคมีพอลิเมอร์คิดว่าสิ่งนี้ไม่เป็นที่ต้องการจึงทำให้เกิดพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก หรือต่อกิ่ง 100 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาจึงทราบว่า การพัฒนาทางการค้าที่จะสำเร็จได้ดีที่สุด คือการพัฒนาผลผลิตกันซ์ที่เกิดจากการผสมระหว่างพอลิเมอร์เดี่ยว 2 ชนิด ให้เกิดเป็นพอลิเมอร์ร่วมแบบบล็อก หรือต่อกิ่งที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงระหว่างวัฏภาคที่แยกออกจากกัน

ไอโอโนเมอร์ (Ionomer) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยสัดส่วนของกลุ่มไอออนิกที่มีประจุ (Charged ionic groups) อยู่เล็กน้อยในพอลิเมอร์ที่มีสัดส่วนอยู่มาก โดยมีพันธะเป็นแบบโคเวเลนต์ และมีความเป็นขั้วต่ำมาก ในที่นี้ประกอบด้วยโครงสร้าง 2 โครงสร้างที่ไม่เหมือนกันและพยายามแยกออกเป็นแต่ละวัฏภาคอย่างดีที่สุด เนื่องจากกลุ่มไอออนิกมีอยู่น้อย โดยทั่วไปจะเกิดเป็นวัฏภาคเล็กๆ ที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete microphases) ในขณะที่พอลิเมอร์โคเวเลนต์ (Covalent polymer) ที่มีอยู่มากเกิดเป็นวัฏภาคเมตริกซ์ต่อเนื่อง (Continuous matrix phase) ระบบนี้จึงจัดเป็นระบบหลายวัฏภาค (Multiphase system) เช่นกัน ไอโอโนเมอร์นี้มีความคล้ายคลึงกันกับชนิดอื่นๆ แต่ยังอยู่ในระหว่างการศึกษารายละเอียดเพื่อจัดรวมเข้ากับทฤษฎีที่มีอยู่

โครงร่างแหพอลิเมอร์สามมิติ (Interpenetrating Polymer Network, (IPN)) เกิดขึ้นอย่างเหมาะสมโดย

1. เริ่มจากการพอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์ A ไปเป็นพอลิเมอร์ A
2. จากนั้นทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Crosslinking) เล็กน้อย
3. ทำให้บวม (Swelling) ด้วยของเหลวมอนอเมอร์ B หรือ โอลิโกเมอร์ B
4. พอลิเมอไรซ์มอนอเมอร์ B ไปเป็นพอลิเมอร์ B
5. สุดท้ายเชื่อมโยงพอลิเมอร์ B

การทำเช่นนี้ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ถักกันอยู่อย่างหนาแน่น (Tightly interwoven) บนโครงสร้างที่มีขนาดเล็กมาก และทำให้เกิดโครงสร้างที่มีความเสถียรภาพอย่างถาวร ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดวิธีการที่ซับซ้อนในการควบคุมการผลิต โครงสร้างแบบหลายวัฏภาค

2.4.4 สมบัติโดยทั่วไป

สมบัติกับอัตราส่วนระหว่าง A และ B เมื่อพอลิเมอร์ A และ B นำมาผสมกันในอัตราส่วน จาก 100/0 ถึง 0/100 และเขียนกราฟระหว่างสมบัติกับอัตราส่วน A/B อาจสังเกตพฤติกรรมได้เป็น ลักษณะใดลักษณะหนึ่ง ดังนี้

แบบที่ 1 ละลายเข้ากันได้ (Miscible)

ถ้าพอลิเมอร์ละลายซึ่งกันและกัน ได้อย่างสมบูรณ์ในระดับ โมเลกุล และเกิดเป็นวัฏภาคเนื้อ เดียว โดยทั่วไปสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในพอลิเมอร์ผสมทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้น โค้งที่สม่ำเสมอ (Simple monotonic curve) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับหน่วยที่ใช้ในการวัดหรือการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ เส้น โค้งแบบนี้อาจใช้ได้ ในทางทฤษฎีเพื่อให้คำจำกัดความเป็นระบบเนื้อเดียว (Homogeneous system) หรืออย่างน้อยเพื่อ จำกัดพฤติกรรมแบบเนื้อเดียว (Homogeneous behavior) ในทางปฏิบัติมีประโยชน์สำหรับนักผลิต สารประกอบที่ต้องการผลิตสเปกตรัมสมดุลของสมบัติที่ได้ (Spectrum of balance of properties) อย่างง่าย ๆ จากพอลิเมอร์ธรรมดา 2 ชนิด พบว่าระบบพอลิเมอร์ผสมในทางการค้าที่สำคัญหลาย ชนิดแสดงพฤติกรรมเช่นนี้

พฤติกรรมแบบเนื้อเดี่ยวนี้อาจจะสังเกตได้แม้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสองไม่ละลายซึ่งกันและกัน ในระดับโมเลกุล โดยสามารถอธิบายด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ

1. สมบัติต่างๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างที่สำคัญ และไม่ว่องไวต่อโครงสร้างในระดับ ไมโคร (Fine-detail microstructure) ดังนั้นการทดสอบอย่างง่าย ๆ เพื่อที่จะเห็นการแยกของวัฏภาค เล็กๆ จึงทำไม่ได้ผล โดยการทดสอบด้วยอัตราที่ต่ำ (Conventional low-rate tests) เช่น มอคูลัส และการทดสอบการเบี่ยงเบนทางความร้อน (HDT) เป็นวิธีที่ใช้กันสำหรับพฤติกรรมแบบนี้ ในขณะที่ อาจทำให้การวิเคราะห์ในทางทฤษฎีเกิดความผิดพลาดแต่ก็เป็นที่ยอมรับใช้กันสำหรับนักผลิต สารประกอบ และการประยุกต์ใช้ทางพอลิเมอร์ผสม

2. การไหลของหลอมเหลวที่อัตราความเร็วสูงจะเป็นแบบทิศทางเดียว โดยเฉพาะใน การอัดรีด (Extrusion) จะทำให้เกิด โครงสร้างแบบลามลลา ซึ่งพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายสองชนิดเกิด เป็นอนุกรมสลับกัน อยู่ในโครงสร้างของวัฏภาคต่อเนื่อง จากนั้นเป็นการทดสอบตามแนวแกน (Axial tests) เช่น สมบัติแรงดึง ที่ใช้วัดสมบัติเฉลี่ยที่คำนวณจากพื้นที่ภาคตัดขวางสัมพัทธ์ของวัฏ ภาคทั้งสองในส่วนผสม ซึ่งจุดนี้เป็นส่วนที่ทำให้เกิดข้อผิดพลาดในทางทฤษฎีได้ แต่สมบัติที่ได้ อาจจะมีประโยชน์ในทางปฏิบัติสำหรับผลิตภัณฑ์เฉพาะงาน

แบบที่ 2 การผสมเข้ากันได้แบบกึ่งหนึ่ง (Semi-compatible)

เมื่อพอลิเมอร์สองชนิดผสมกันแล้วไม่ละลายเข้ากันและแยกออกเป็นวัฏภาคเมตริกซ์ แบบต่อเนื่อง และควบคุมสมบัติทั้งหมดไว้ในขณะที่พอลิเมอร์รองจะเกิดเป็น โดเมนกระจายตัว (Dispersed domain) และกระทำหน้าที่เหมือนเป็นสารเติมซึ่งมีผลเพียงส่วนน้อยต่อสมบัติที่ได้ ด้วย

เหตุนี้อัตราส่วนระหว่าง A และ B ที่สูงจะมีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์ A และอัตราส่วนระหว่าง B และ A ที่สูงจะมีสมบัติคล้ายกับพอลิเมอร์ B และแน่นอนเมื่ออัตราส่วนระหว่าง A และ B เท่ากันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนกลับของวัฏภาค (Phase inversion) ด้วยการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นระบบ 2 วัฏภาค (Two-phase system)

2.5 การดูดซับ (Adsorption) [38]

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) และไคโตซาน กระบวนการนี้ใช้กำจัดโลหะหนักได้จนเหลือถึงระดับที่ยอมรับให้มีได้

2.5.1 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำคืดและน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในก๊าซหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดย โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Absorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Absorbent) คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสภายใน นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆ ของตัวดูดซับ เช่น โครงสร้าง การจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมทำให้สามารถแยก โมเลกุลที่เราต้องการออกมา โดยให้ถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นเมื่อดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว สามารถนำมาไล่เอา โมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับสารกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บี โอ ดี ซี โอ ดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพดีและระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือต้องการพื้นที่น้อย

2.5.2 ลักษณะการดูดซับ

การดูดซับแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)
2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงวันเดอร์วาล์ว (Van Der Waal's force) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของแรง 2 ชนิด คือแรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้นซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่บนชั้นโมเลกุลก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของการดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงนี้มีค่าน้อยการหลุดออกของสารถูกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดซับทางเคมีนั้น จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับกลายเป็นสารเคมีประกอบใหม่ขึ้น ซึ่งเมื่อเกิดแล้วจะคงอยู่ในรูปร่างนั้นแตกต่างจากการดูดซับแบบกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) และ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) แต่การดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับได้ (reversible) เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำ โดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์และแอกติเวตเตดซิลิกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามข้อเสีย คือจับ โมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก
2. ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

2.5.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecular transfer)

1) กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวน้ำสารดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งใน โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่ง โมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่พื้นผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นแรงต้านทานจากปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นสิ่งที่ต้องคำนึง

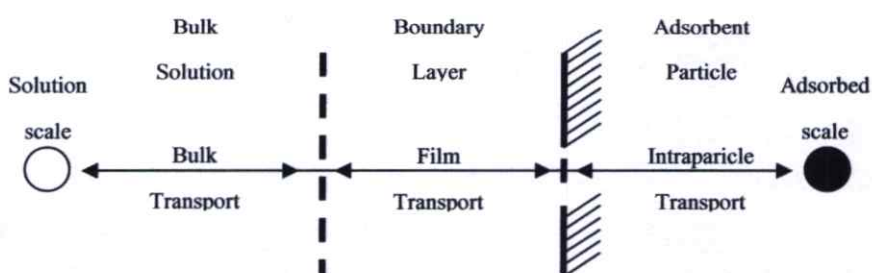
2) อัตราการเคลื่อนย้าย โมเลกุล (Rate of molecular transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้าย โมเลกุลซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายมี 3 ขั้นตอน คือ

1. การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวน้ำของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวน้ำของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของ โมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้ จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย โมเลกุลของสารดูดซับมายังสารดูดซับ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดซับมายังสารดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ ถ้าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.5.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

1. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and surface area)

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับและพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2. ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Adsorbate characteristics)

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

3. อัตราเร็วของการปั่นกวน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรงซึ่งขึ้นอยู่กับ การปั่นกวนของระบบ ถ้าน้ำการปั่นกวนค่าฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาและ เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีการปั่นกวนสูงทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

4. เวลาสัมผัส (Contact time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช่จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับ

ชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการ ก่อนที่จะนำไปใช้จริง

5. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกซิลไอออน สามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของ ไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

2.6 กระบวนการหล่อขึ้นรูป (casting) [39]

การหล่อ (casting) จัดเป็นกระบวนการขึ้นรูปชนิดหนึ่ง โดยการนำของไหลหรือสารละลาย ที่เป็นมอนอเมอร์เหลวในแม่พิมพ์เปิด (open mold) ซึ่งเป็นที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหรือการ บ่ม (Curing) การหล่ออาจจะทำให้อยู่ในรูปของแผ่นฟิล์ม หรือแผ่นชีสก็ได้ โดยการเทเรซินที่เป็น ของเหลวให้ไหลผ่านสายพานหรือทำให้เกิดการตกตะกอนในภาชนะที่มีสารเคมีอยู่ (chemical bath) เป็นต้น

การหล่อแตกต่างจากเทคนิคอื่นๆ ดังนี้คือ

1. โดยทั่วไปไม่ต้องอาศัยความดัน แต่ถ้าขึ้นงานซับซ้อนและมีเป็นจำนวนมากก็จำเป็นต้อง อาศัยความดัน และเรียกวิธีการนั้นว่า การหล่อแบบใช้ความดัน (pressure casting)
2. วัสดุตั้งต้นจะใช้เป็นของเหลวมากกว่าจะใช้เป็นเม็ดหรือผงเหมือนที่ใช้กันอยู่ทั่วไปใน การอัดแบบขึ้นรูปอื่นๆ
3. โดยทั่วไปนิยมใช้มอนอเมอร์มากกว่าพอลิเมอร์

มีการหล่อหลายแบบที่ไม่จำกัดอยู่ตามข้อจำกัดข้างต้น แต่มีชื่อเรียกเป็นการหล่อเหมือนกัน เช่น การหล่อแบบชนิดอัดขึ้นรูป (extrusion casting) วิธีการนี้เป็นการอัดรีดเรซินไปบนผิวของ ลูกกลิ้งขั้วมันที่มีน้ำหล่อเย็นเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ การหล่อแบบหมุนเหวี่ยง (centrifugal casting) นิยมใช้กับพลาสติกเสริมแรง (reinforced plastics) วิธีนี้ทำได้โดยนำเรซินและเส้นใยไฟเบอร์กลาส ชนิดตัด (chopped fibrous glass) มาวางลงในแผ่นเหล็กหมุนกลวง (hollow mandrel) ซึ่งวางอยู่ตรง กลางเพื่อยึดตัวงาน แผ่นเหล็กหมุนนี้จะหมุนเข้าไปในเตาอบ ทำให้เรซินกระจายอย่างสม่ำเสมอเข้า ไปยังพื้นผิวด้านในของส่วนที่กลวง โดยอาศัยแรงที่เกิดขึ้นเกิดการบ่มตัวได้ผลิตภัณฑ์กลวงสำเร็จ เป็นชิ้นงานต่อไป

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญญา วงศ์พานิช และคณะ[40] ศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมระหว่างไฟโบรอินจากไหมและ carboxymethyl chitin (CM-chitin) ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยใช้เทคนิคการหล่อสารละลายโดยใช้น้ำเป็นสารละลายร่วม นำฟิล์มผสมมาศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของสารละลายเมทานอลที่มีต่อโครงสร้าง β -sheet ของไฟโบรอินจากไหม ซึ่งการผสมเข้ากันได้ของฟิล์มผสมทั้งก่อนและหลังผ่านเมทานอลสามารถตรวจวิเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเคมี ทางชีววิทยา คุณสมบัติทางความร้อนและโครงสร้างผลึกโดยใช้เทคนิค FTIR spectroscopy, SEM, DSC และ XRD ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าฟิล์มผสมระหว่างไฟโบรอินจากไหมและ CM-chitin เป็นการผสมแบบกึ่งผสม โดยมีเพียงส่วนอสัณฐานเท่านั้นที่สามารถผสมเข้ากันได้ และช่วยทำให้ CM-chitin สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ สามารถช่วยเพิ่มการบวมตัวของไฟโบรอินจากไหม

Biman B. Manda และคณะ [41] ศึกษาเกี่ยวกับการทำไฮโดรเจลแบบกึ่งเชื่อมโยงโดยใช้ไหมไฟโบรอินและpolyacrylamide สำหรับควบคุมคุณสมบัติการส่งผ่านของยา ไฮโดรเจลสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้อัตราส่วนของไหมไฟโบรอินและpolyacrylamide ในปริมาณต่างๆ โดยใช้ N,N'-methylenebisacrylamide เป็นสารเชื่อมโยง เมื่อตรวจวิเคราะห์ได้โดยเทคนิค FTIR พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของ β -sheet ของไหมไฟโบรอินในไฮโดรเจลและเมื่อตรวจวิเคราะห์ผิวหน้าด้วยเทคนิค SEM พบว่ามีรูพรุนขนาด microporous ขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด คือ 50 ± 11 ไมโครเมตร ซึ่งคุณสมบัติการรวมตัว การสลายตัว สัดส่วนของเหลว สมดุลของน้ำและจุลศาสตร์การรวมตัวสามารถหาค่าได้ มีค่าความแข็งแรงกดอัดเท่ากับ 241.9 ± 5.5 kPa จะพบในเจลที่มีความแข็งแรงมากจากการตรวจวิเคราะห์โดยวิธี MTT พบว่าความสามารถในการเข้ากันซึ่งไม่ทำให้เกิดผลร้ายต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตกับไฮโดรเจลและ การส่งผ่านยา สามารถศึกษาได้โดยใช้สารประกอบสองตัวอย่างเช่น Trypan blue dye และ FITC-inulin ซึ่งสามารถส่งผ่านยาได้ในโครงสร้างของไฮโดรเจล

ปิยพร ลิมวรรณุสรณ์ [2] เตรียมวัสดุคูดซึบน้ำที่ยืดหยุ่นที่สลายตัวได้ทางชีวภาพ โดยการต่อกิ่งเจลแป้งมันสำปะหลังกับกรดอะคริลิก/อะคริลาไมด์ โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และกรดแอสคอร์บิกเป็นสารริเริ่ม (initiator) ปฏิกิริยาการเกิดรีด็อกซ์ พาราเมเตอร์สำคัญที่ศึกษาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถคูดซึบน้ำได้สูง ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างแป้งต่อมอนอเมอร์ (กรดอะคริลิกและอะคริลาไมด์) อัตราส่วนของกรดอะคริลิก ความเข้มข้นของสารริเริ่ม และสารเชื่อมโยง (N, N'-methylenebisacrylamide, BIS) พบว่าแป้งที่ต่อกิ่งด้วยมอนอเมอร์ทั้งสองชนิดโดยใช้อัตราส่วนแป้งต่อมอนอเมอร์เท่ากับ 3:4 สัดส่วนของอะคริลิกเท่ากับ 1:1 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 5% กรดแอสคอร์บิก 0.5% โดยน้ำหนักของมอนอเมอร์ทั้งหมด ให้ค่าคูดซึบน้ำสูงสุดเท่ากับ 312 g water/ g dry polymer โดยมีค่าสูงกว่าการต่อกิ่งโดยใช้มอนอเมอร์เพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ยังพบว่า

ระบบที่ปรับให้สภาพเป็นกลางหลังการเกิดปฏิกิริยาให้ผลิตภัณฑ์ที่ดูดซับน้ำดีกว่าระบบที่ปรับสภาพเป็นกลางก่อนการเกิดปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อส่องด้วย SEM พบว่าโครงสร้างมีรูพรุนจำนวนมาก

Freddi G. และคณะ [42] ศึกษาเกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของฟิล์มผสมโดยใช้โพรตีนไหมไฟโบรอินและ Polyacrylamide (PAAm) จากกราฟ DSC แสดงให้เห็นการ Overlap การเปลี่ยนแปลงลักษณะเฉพาะทางความร้อนของพอลิเมอร์แต่ละชนิด พบพิกัดแสดงสมบัติการคายความร้อนที่อุณหภูมิ 218 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นพิกัดของผลึก β -sheet ในไหมไฟโบรอิน และอุณหภูมิจะลดลงเล็กน้อย จากเทคนิค TMA เป็นตัวชี้บอกความสามารถในการทนความร้อนสูงสุดของฟิล์มผสม ถึงแม้ว่ามีปริมาณ PAAm ต่ำ (น้อยกว่าหรือเท่ากับ 25%) ก็ยังปรากฏการสลายตัวที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (สูงกว่า SF ฟิล์ม 100 องศา) และพิกัดของมอดูลัสสูญเสียของไหมไฟโบรอินอยู่ที่ 193 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิของฟิล์มผสม PAAm จะทำหน้าที่ในการกระตุ้นให้สายโซ่โมเลกุลของไฟโบรอินให้เกิดการเคลื่อนไหว ทำให้บริเวณการยืดของหมู่ NH (NH-stretching) เปลี่ยนแปลงไป สามารถตรวจพบได้โดยเทคนิค FTIR ซึ่งเป็นผลมาจากการรบกวนพันธะไฮโดรเจนของไหมไฟโบรอินและการเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นใหม่ด้วย PAAm ผลการทดลองพบว่าความแข็งแรงและ elongation at break ของฟิล์มผสมเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ PAAm 20-25% และเมื่อตรวจสอบด้วย SEM พบว่าฟิล์มผสมมีโครงสร้างแบบ sea-island

บุญยชา บัณฑิตกุล [43] ได้ทำการศึกษาการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล และเนื้อเยื่อโครงสร้าง (Scaffold) จากโพรตีนไฟโบรอินของเส้นไหมไทยจากอำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี ทำการสกัดโพรตีนเซรีซินออกด้วยน้ำร้อน จากนั้นทำการไดอะไลซิส สารละลายไหมที่ได้แยกเป็น 2 ส่วน ทำการปรับปรุงฟิล์มโดยการใช้สารละลายผสมอะซิโตน ไกลเซอร์ราลดีไฮด์ และกลูตาราลดีไฮด์ที่เวลาต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ ค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจล สมบัติเชิงกล การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติทางความร้อน พบว่าฟิล์มไหมไฟโบรอินที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายผสมต่างๆ ให้ค่าการดูดซึมน้ำที่น้อยกว่าฟิล์มไหมไฟโบรอินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง เนื่องจากเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างหมู่อะมิโนของโพรตีนจากเส้นไหมไฟโบรอินทำปฏิกิริยากับหมู่คาร์บอนิลของไกลเซอร์ราลดีไฮด์และกลูตาราลดีไฮด์ แต่ในกรณีของสารละลายผสมอะซิโตนกับน้ำ แม้ว่าไม่เกิดพันธะเชื่อมโยง แต่หมู่อะมิโนของโพรตีนจากเส้นไหมไฟโบรอินก็ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนิลของ อะซิโตนได้ เป็นการลดหมู่ที่ชอบน้ำของเส้นไหมไฟโบรอินลง ทำให้การดูดซึมน้ำลดลงด้วย ค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลสูง โดยเรียงลำดับดังนี้ Glutaraldehyde > Glyceraldehyde > Acetone ค่าความทนแรงดึงยืดที่สูงกว่าฟิล์มไหมไฟโบรอินที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง และฟิล์มไหมไฟโบรอินทุกชนิดให้พิกัด FTIR ที่คล้ายกันคือไม่พบเลขคลื่นที่ 1509-1514

cm^{-1} (Amide II) ซึ่งเป็นการดูดกลืนของ N-H bending และ C-N Stretching แต่มีพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นที่ $783\text{-}849\text{ cm}^{-1}$ ขึ้นมาแทน ซึ่งเป็นพีคพันธะคู่ และพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่น $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็น O-H Stretching กว้างขึ้น แสดงว่ามีการขจัดน้ำออกไป

A. Pourjavadi และคณะ [44] ศึกษาการเตรียมวัสดุดูดซับน้ำยิ่งยวดจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและโซเดียมอัลจิเนต ซึ่งได้ทำการเตรียมโดยใช้เอ็น, เอ็น-เมทิลินบิสอะคริลาไมด์ (MBA) เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง และใช้แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา ทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของการแปรปริมาณอัตราส่วนระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและโซเดียมอัลจิเนต อุณหภูมิในการผสม ปริมาณของ BIS และ APS ต่อสมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มที่สามารถดูดซับได้ในน้ำกลั่น และสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีความเป็นกรดต่างๆ นอกจากนี้ยังศึกษาปริมาณน้ำสมดุลของแผ่นฟิล์มที่สามารถดูดซับได้ในสารละลายเกลือ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ ชนิดประจุบวกของสารละลายเกลือ และชนิดสารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่ง จากการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่แผ่นฟิล์มสามารถดูดซับได้ในน้ำกลั่นมีค่ามากขึ้นเมื่อมีปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากขึ้น และแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้มีการตอบสนองในสารละลายบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน แนวโน้มของปริมาณน้ำสมดุลที่แผ่นฟิล์มสามารถดูดซับได้ในสารละลายเกลือเป็นดังนี้ $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Fe}^{3+}$ และปริมาณน้ำสมดุลที่แผ่นฟิล์มสามารถดูดซับได้ในสารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่ง เป็นดังนี้ $\text{LiCl} > \text{NaCl} > \text{KCl}$ ตามลำดับ

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารเคมี(เกรดวิเคราะห์)ที่ใช้ในการทดลอง

1. ริงไทม์ไทยสายพันธุ์นางน้อย
2. คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โซเดียม น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (Carboxymethylcellulose Sodium salt) loss on drying (110 °C) \leq 15%, pH 5.5-8.5, (DS = 0.6-0.95) ของบริษัท Fluka
3. คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส โซเดียม น้ำหนักโมเลกุลสูง (Carboxymethylcellulose Sodium salt) 90000 (DS = 0.7) ของบริษัท ACROS ORGANICS
4. โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate, NaHCO_3) ของบริษัท CARLO MW = 84 g/mol
5. เอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ของบริษัท Merck MW = 46.07 g/mol
6. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride, CaCl_2) ของบริษัท CARLO MW = 111 g/mol
7. น้ำกลั่น
8. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$) ของบริษัท UNIVA MW = 228 g/mol เตรียมให้มีความเข้มข้น 0.1 M
9. เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (N, N-methylene-bis-acrylamide) ของบริษัท CARLO MW = 154.17 g/mol
10. กลีเซอรอล (Glycerol) ของบริษัท UNIVAR MW = 92.09 g/mol
11. เฟอริกคลอไรด์ (Iron (III) chloride, FeCl_3) ของบริษัท UNILAB MW = 162.21 g/mol
12. ลิเทียมคลอไรด์ (Lithium chloride dried, LiCl) ของบริษัท UNILAB MW = 42.40 g/mol
13. โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride, KCl) ของบริษัท Ajax MW = 74.55 g/mol
14. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ของบริษัท UNIVAR MW = 58.44 g/mol

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

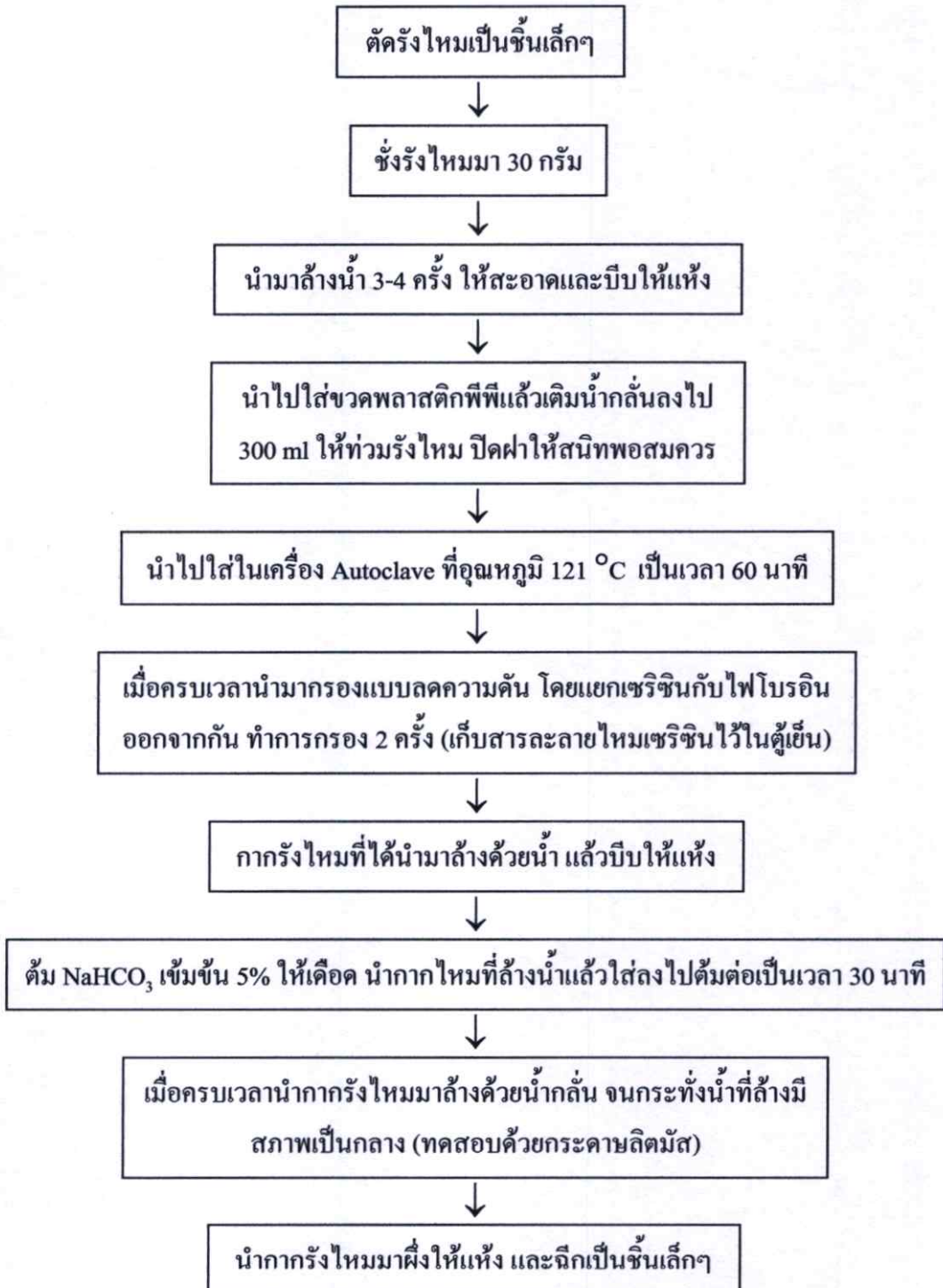
1. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทสโกปี (Fourier Transform Spectroscopy, FTIR) ของบริษัท Perkin Elmer LTd.
2. เครื่องเทอร์มัลกราวิเมตริก (Thermal gravimetric analysis, TGA) ของบริษัท Perkin Elmer รุ่น PYRIS 1 TGA
3. เครื่อง Autoclave (หม้อนึ่งไอน้ำ) ของบริษัท Hirayama Manufacturing Corporation รุ่น HA-300MII
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งของบริษัท Scientific Promotion Co.Ltd. รุ่น BP 221 S
5. ตู้อบ
6. ถุงเซลลูโลส (Snakeskin pleated dialysis tubing) 3500 MWCO ของบริษัท Thermo Scientific
7. แท่นให้ความร้อน (Heater)
8. แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
9. เข็ยอกพลาสติก
10. ตั๋วหนีบ
11. เทอร์โมมิเตอร์
12. ตะแกรงลวด 200 mesh

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมเส้นใยไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย

โดยการต้มเส้นไหมด้วยน้ำร้อนโดยใช้เครื่อง Autoclave ที่ 121°C เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำเส้นไหมที่ได้ไปต้มต่อโดยใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 5% (w/v) โดยมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.1

กระบวนการเตรียมเส้นใยไหมไฟโบรอิน

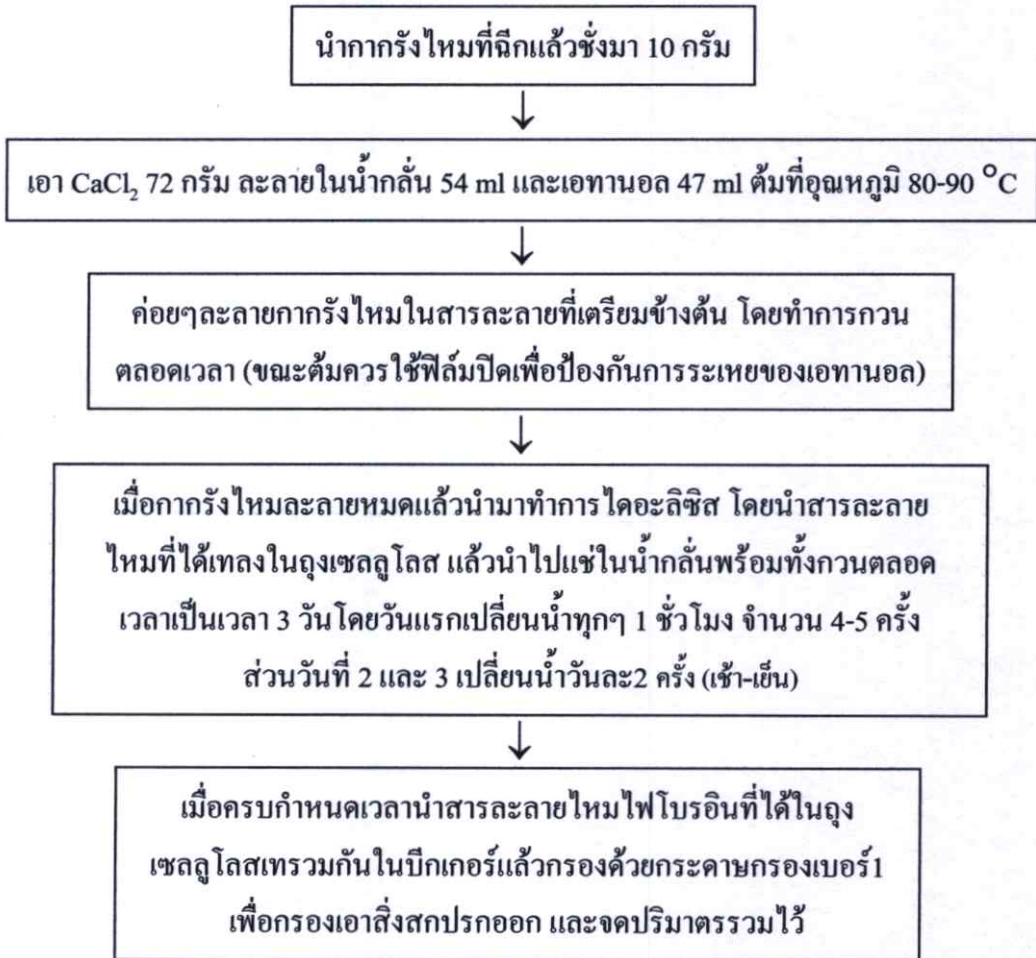


รูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมเส้นใยไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย

3.3.2 การเตรียมสารละลายไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย

โดยการนำจากรังไหมที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ชั่งมาจำนวน 10 กรัม แล้วนำไปต้มในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จนกระทั่งจากรังไหมละลายจนหมด จากนั้นนำสารละลายไหมที่ได้ไปทำการ Dialysis โดยมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.2

กระบวนการเตรียมสารละลายไหมไฟโบรอิน



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการเตรียมสารละลายไหมไฟโบรอินจากรังไหมไทยนางน้อย

การคำนวณหาปริมาณของไหมในสารละลายน้ำไหมหลังการไดอะลิซิส

ตวงสารละลายไหมมา 5 มิลลิลิตร แล้วนำไปอบแห้งได้ปริมาณของเนื้อไหมออกมา หลังจากการอบแล้ว 0.12 กรัม

ในสารละลาย 5 มิลลิลิตร มีเนื้อไหมอยู่ 0.12 กรัม

ฉะนั้น ในสารละลาย 300 มิลลิลิตร มีเนื้อไหมอยู่ $(300 \times 0.12) / 5 = 7.20$ กรัม

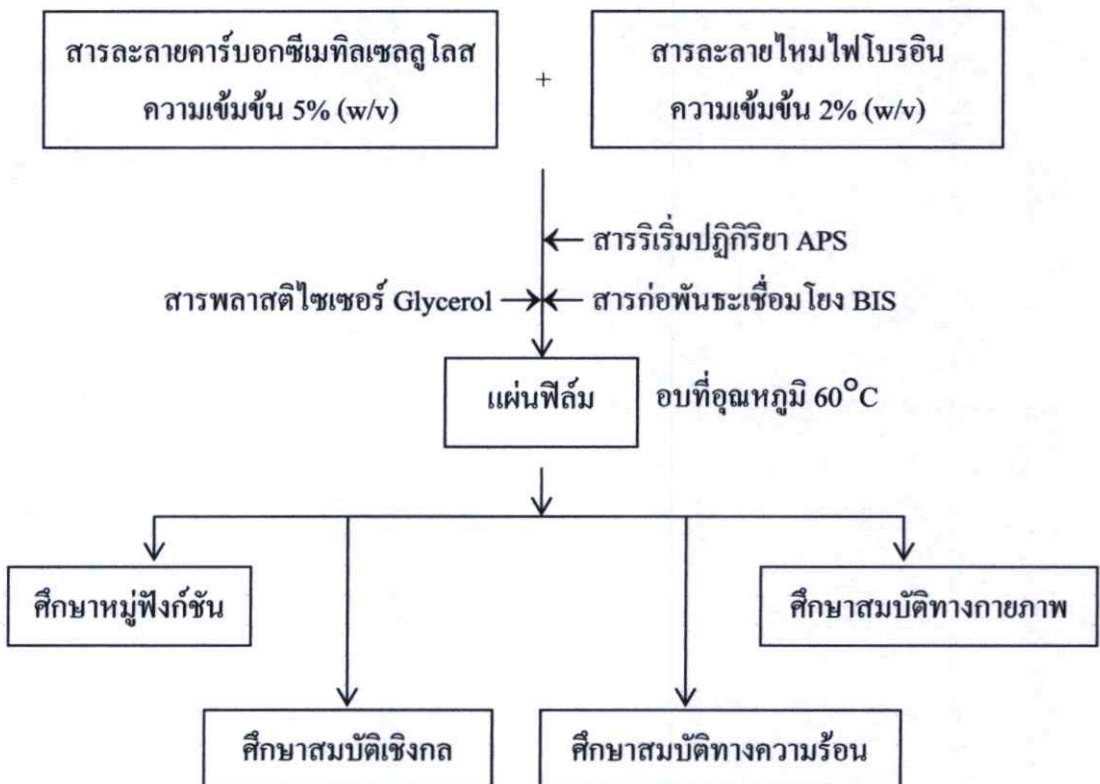
นั่นคือ ชั่งไหมก่อนไคอะลิจิส 10 กรัม เมื่อทำไคอะลิจิสแล้วได้ไหม 7.20 กรัม

ในสารละลายน้ำไหม 25 มิลลิลิตร มีเนื้อไหมอยู่ $(0.12 \times 25) / 5 = 0.60$ กรัม

ดังนั้น สารละลายไหมไฟโบรอินมีความเข้มข้น $= (0.60 \times 100) / 25 = 2.40 \approx 2\%$

3.3.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับสารละลายไหมไฟโบรอิน

นำสารละลายไหมไฟโบรอินที่ผ่านการทำ Dialysis 3 วัน มาผสมกับสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสตามสูตรต่างๆ โดยใช้เอ็น, เอ็น-เมทิลินบิสอะคริลาไมด์ (BIS) เป็นสารก่อพันธะเชื่อมโยง แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (APS) เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา และกลีเซอรอลเป็นสารพลาสติกไซเซอร์ นำสารละลายที่ได้เทใส่ในจานเพาะเชื้อ จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C จะได้ชิ้นงานเป็นแผ่นฟิล์มสีเหลืองอ่อน โดยมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.3



หมายเหตุ APS = Ammonium persulfate

BIS = N, N'-methylene- bis-(acrylamide)

รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังขั้นตอนการทดลอง

3.3.4 การเตรียมแผ่นฟิล์มจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและสารละลายไหมไฟโบรอิน

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม

1. นำส่วนผสมต่างๆ มาผสมกันตามลำดับดังตารางที่ 3.1 และทำการปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 3.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

สูตรที่	CMC_L 5% (w/v) (ml)	SF 2% (w/v) (ml)	BIS (g)	APS (g)	Glycerol (ml)
1	5	25	0.2	0.2	1
2	10	20	0.2	0.2	1
3	15	15	0.2	0.2	1
4	20	10	0.2	0.2	1
5	25	5	0.2	0.2	1
6	30	0	0.2	0.2	1
7	0	30	0.2	0.2	1

หมายเหตุ CMC_L = Carboxymethylcellulose (Low molecular weight)

SF = Silk Fibroin

BIS = N, N'-methylene- bis-(acrylamide)

APS = Ammonium persulfate

2. นำไปขึ้นรูปโดยการเทหล่อเป็นแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม

1. นำส่วนผสมต่างๆ มาผสมกันตามลำดับดังตารางที่ 3.2 และทำการปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 °C

ตารางที่ 3.2 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

สูตรที่	CMC _H 5% (w/v) (ml)	SF 2% (w/v) (ml)	BIS (g)	APS (g)	Glycerol (ml)
8	5	25	0.2	0.2	1
9	10	20	0.2	0.2	1
10	15	15	0.2	0.2	1
11	20	10	0.2	0.2	1
12	25	5	0.2	0.2	1
13	30	0	0.2	0.2	1
14	20	10	0.2	0.2	-

หมายเหตุ CMC_H = Carboxymethylcellulose (High molecular weight)

2. นำไปขึ้นรูปโดยการเทหล่อเป็นแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณ BIS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม

1. นำส่วนผสมต่างๆ มาผสมกันตามลำดับดังตารางที่ 3.3 และทำการปั่นจนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 °C

ตารางที่ 3.3 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

สูตรที่	CMC _H 5% (w/v) (ml)	SF 2% (w/v) (ml)	BIS (g)	APS (g)	Glycerol (ml)
15	20	10	0.4	0.2	1
16	20	10	0.6	0.2	1
17	20	10	0.8	0.2	1

2. นำไปขึ้นรูปโดยการเทหล่อเป็นแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของปริมาณ APS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม

1. นำส่วนผสมต่างๆ มาผสมกันตามลำดับดังตารางที่ 3.4 และทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80°C

ตารางที่ 3.4 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์ม

สูตรที่	CMC _H 5% (w/v) (ml)	SF 2% (w/v) (ml)	BIS (g)	APS (g)	Glycerol (ml)
18	20	10	0.2	0.4	1
19	20	10	0.2	0.6	1
20	20	10	0.2	0.8	1

2. นำไปขึ้นรูปโดยการเทหล่อเป็นแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3.4 การทดสอบสมบัติของแผ่นฟิล์ม

3.4.1 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน

นำตัวอย่างที่เตรียมได้มาทำการตรวจวิเคราะห์โดยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี ในช่วงควายาวคลื่น $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมชิ้นตัวอย่างโดยบดผสมระหว่างไฮโดรเจลที่เตรียมได้ประมาณ 0.01 มิลลิกรัมกับ โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ประมาณ 1 มิลลิกรัม

2. นำไฮโดรเจลกับโพแทสเซียมโบรไมด์ที่บดได้มาทำให้เป็นแผ่นบาง โดยใช้เครื่องอัดแผ่น ที่ความดัน 10 บาร์ เป็นเวลา 2 นาที

3. นำแผ่นตัวอย่างที่ได้มาวางลงบนแผ่นแม่เหล็กและประกบด้วยแผ่นแม่เหล็กอีกแผ่นเพื่อ ยึดแผ่นตัวอย่างไว้

4. จากนั้นนำมาใส่ในเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) โดยทำการสแกนเครื่องด้วยฟิล์มพอลิสไตรีน (Polystyrene) สแกนเป็นจำนวน 6 ครั้ง เพื่อตรวจว่าเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (FTIR) สามารถตรวจวัดได้ตามมาตรฐานหรือไม่จากนั้น จึงทำการวัดตัวอย่าง ซึ่งทำการวัดในช่วง $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$

5. ทำซ้ำจนครบทุกสูตร

3.4.2 การตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ

ทดสอบการดูดซึมน้ำ (%Water uptake) การดูดซึมน้ำที่สมดุล (%Equilibrium swelling) การกักเก็บน้ำ (%Water retention) และของแข็งที่เหลือจากการแช่น้ำ (%Gel fraction) [45]

1. ตัดตัวอย่างแต่ละสูตรที่เตรียมได้ ให้มีขนาด 2x2 เซนติเมตร
2. ชั่งน้ำหนักของตะแกรงลวดเปล่าขนาด 200 mesh (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) และบันทึกผล
3. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างไฮโดรเจล (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) และบันทึกผล
4. นำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นแช่น้ำต่อจนครบ 72 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานสามารถดูดซึมน้ำได้จนถึงค่าที่อิ่มตัวสูงสุด แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณการดูดซึมน้ำที่สมดุล ทดสอบการกักเก็บน้ำโดยนำชิ้นงานที่บวมตัวสูงสุดวางในตู้อบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง
5. คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ และเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำ

$$\% \text{ การดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักฟิล์มแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\% \text{ การดูดซึมน้ำที่สมดุล} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำที่สมดุล} - \text{น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักฟิล์มแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\% \text{ การเก็บน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักที่เหลือหลังจากวางไว้ในตู้อบที่อุณหภูมิห้อง}}{\text{น้ำหนักบวมตัวมากที่สุด}} \times 100 \quad (3.3)$$

6. นำชิ้นงานที่ชั่งน้ำหนักแล้วทุกสูตร วางให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง คำนวณหาน้ำหนักของแข็งที่เหลือ

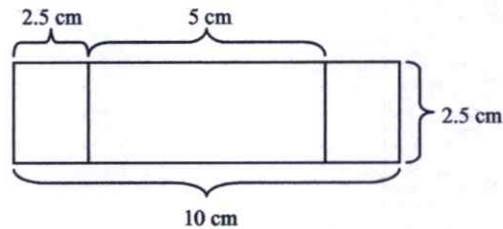
$$\% \text{ ของแข็งที่เหลือ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำและอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักฟิล์มแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100 \quad (3.4)$$

7. ทำซ้ำจนครบทุกสูตร แต่ละสูตรใช้ 3 ตัวอย่าง
8. ทำการทดลองการดูดซึมน้ำในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 3, 7, 10 และ 14 และสารละลายเกลือชนิดต่างๆ (AlCl_3 , CaCl_2 , NaCl , KCl , LiCl) แต่ละสูตรใช้ 3 ตัวอย่าง

3.4.3 การตรวจสอบสมบัติเชิงกล [46]

สมบัติทางด้านการดึง (Tensile properties) ได้แก่ การทนแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด โดยทำการตัดชิ้นงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 2.5×10 cm ทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง ใช้ชิ้นงานทดสอบตัวอย่างละ 8 ชิ้น (ASTM D882) สภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

Load cell 100 N Test speed 5 mm/min Gauge length 5 cm



รูปที่ 3.4 แสดงขนาดชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล

3.4.4 การตรวจสอบสมบัติทางความร้อน

Thermal gravimetric analyzer (TGA)

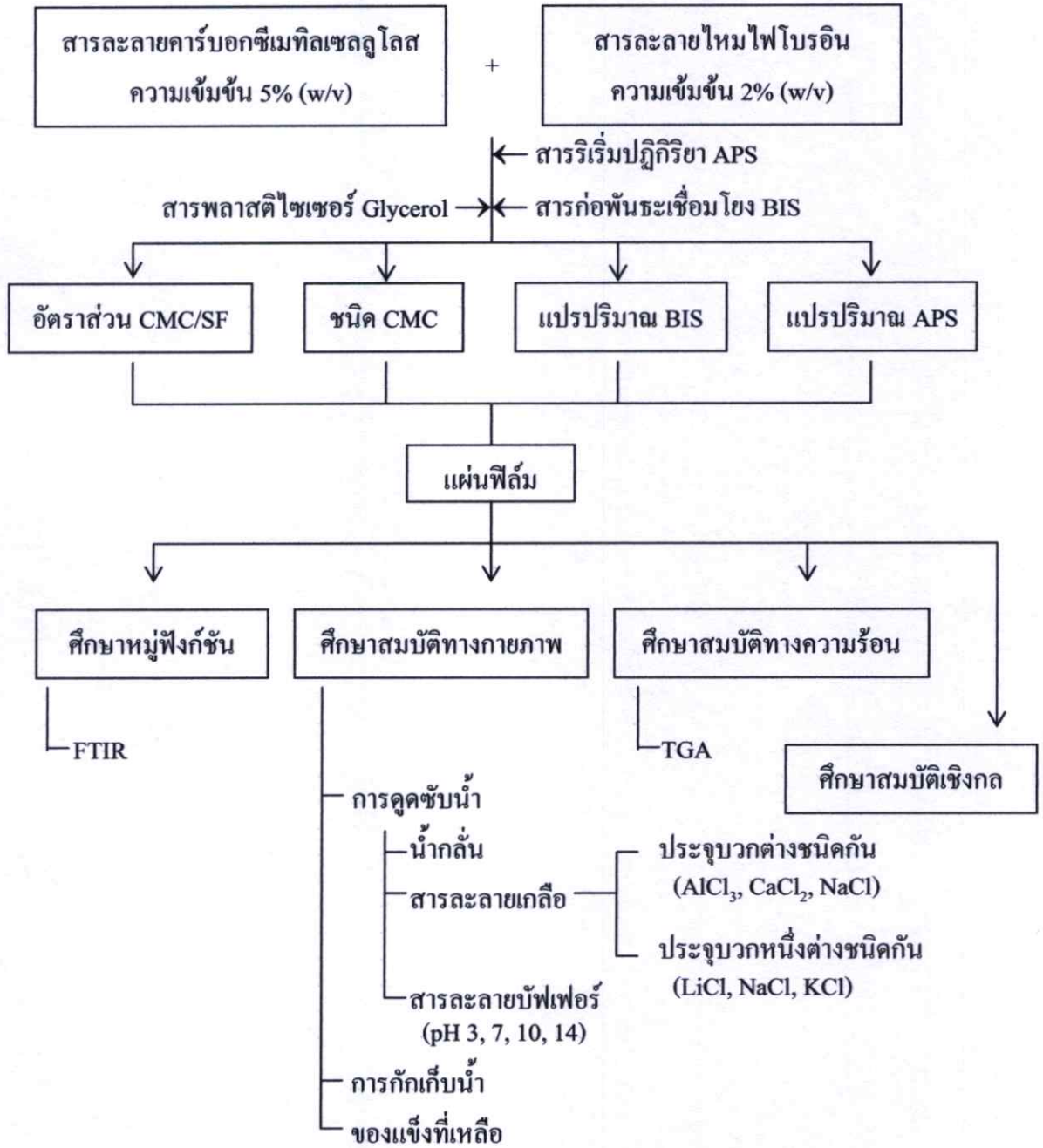
ใช้ TGA วิเคราะห์ความสามารถทนความร้อนของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลและวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสาร ข้อมูลที่ได้บอกองค์ประกอบที่มีในตัวอย่าง และใช้ตรวจสอบการเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ โดยนำชิ้นงานมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ สภาวะการทดสอบเป็นดังนี้

Heating rate $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ช่วงอุณหภูมิ $50\text{-}700^{\circ}\text{C}$ ภายใต้สภาวะก๊าซไนโตรเจน

มีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเตรียมตัวอย่างโดยให้น้ำหนักของตัวอย่างไม่เกิน 20 มิลลิกรัม
2. ทำการเทียบมาตรฐาน (Calibrate) เครื่องเทอร์มัลกราวิเมทรี (TGA) โดยใช้ถ้วยเปล่า
3. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ใส่ลงในถ้วย
4. ทำการวิเคราะห์ตั้งแต่อุณหภูมิ 50°C จนถึงอุณหภูมิ 700°C โดยทำการ Hold ไว้ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 15 นาที ให้ความร้อนเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 10°C ต่อนาที และให้อัตราการเย็นตัวเป็น 20°C ต่อนาที
5. เมื่อครบกำหนดเวลาแล้วจะได้กราฟการสลายตัวออกมาและทำกราฟอนุพันธ์
6. ทำซ้ำจนครบทุกสูตร

3.5 สรุปแผนผังการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล



รูปที่ 3.5 แสดงสรุปแผนผังการเตรียมแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

บทที่ 4

ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบสมบัติของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้จากสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ผสมกับสารละลายไหมไฟโบรอิน (SF) ซึ่งผลการทดลองแปรตามอัตราส่วนระหว่าง CMC ต่อ SF ชนิดน้ำหนัก โมเลกุลของ CMC ปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยง N, N'-methylene- bis-(acrylamide) (BIS) และตัวริเริ่มปฏิกิริยา Ammonium persulfate (APS) โดยสมบัติที่ทำการทดสอบ ได้แก่ การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน สมบัติการดูดซับน้ำ การกักเก็บน้ำ ส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์ม สมบัติทางความร้อน และสมบัติเชิงกล

ซึ่งสามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ตอน ดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม สูตร 1-7

ตอนที่ 2 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม สูตร 8-14

ตอนที่ 3 ศึกษาผลของปริมาณ BIS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม สูตร 15-17

ตอนที่ 4 ศึกษาผลของปริมาณ APS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์ม สูตร 18-20

โดยส่วนประกอบของแต่ละสูตรแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตรที่	CMC_L 5% (w/v) (ml)	CMC_H 5% (w/v) (ml)	SF 2% (w/v) (ml)	BIS (g)	APS (g)	Glycerol (ml)
1	5	-	25	0.2	0.2	1
2	10	-	20	0.2	0.2	1
3	15	-	15	0.2	0.2	1
4	20	-	10	0.2	0.2	1
5	25	-	5	0.2	0.2	1
6	30	-	-	0.2	0.2	1
7	-	-	30	0.2	0.2	1
8	-	5	25	0.2	0.2	1
9	-	10	20	0.2	0.2	1
10	-	15	15	0.2	0.2	1

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ผสมในการขึ้นรูปแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตรที่	CMC _L 5% (w/v) (ml)	CMC _H 5% (w/v) (ml)	SF 2% (w/v) (ml)	BIS (g)	APS (g)	Glycerol (ml)
11	-	20	10	0.2	0.2	1
12	-	25	5	0.2	0.2	1
13	-	30	-	0.2	0.2	1
14	-	20	10	0.2	0.2	-
15	-	20	10	0.4	0.2	1
16	-	20	10	0.6	0.2	1
17	-	20	10	0.8	0.2	1
18	-	20	10	0.2	0.4	1
19	-	20	10	0.2	0.6	1
20	-	20	10	0.2	0.8	1

หมายเหตุ CMC = Carboxymethylcellulose

- CMC_L = คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

- CMC_H = คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง

SF = Silk Fibroin

BIS = N, N'-methylene- bis-(acrylamide)

APS = Ammonium persulfate





นำส่วนผสมต่างๆ ตามระบุไว้ในแต่ละสูตรมาผสมกัน และทำการปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 80 °C จากนั้นขึ้นรูปโดยการเทหล่อเป็นแผ่นฟิล์ม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

4.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 1-7

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ

การใช้ปริมาณของ CMC_L/SF ที่แตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานที่ปรากฏอย่างมาก โดยทำให้ลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏของชิ้นงานต่างกัน ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รูปชิ้นงานก่อนและหลังแช่น้ำกลั่น สูตร 1-7

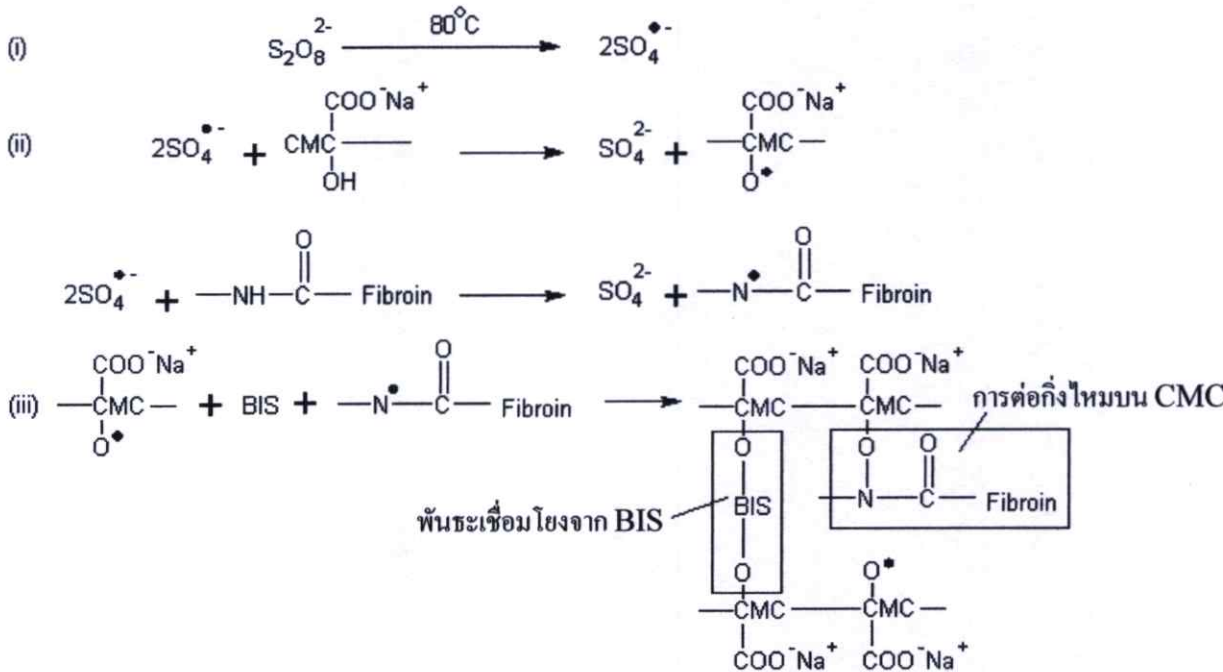
สูตร	รูปก่อนแช่น้ำ	รูปหลังแช่น้ำ	ลักษณะชิ้นงานหลังแช่น้ำ
1			ชิ้นงานบวมตัวเล็กน้อย ไม่เกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
2			ชิ้นงานบวมตัวเล็กน้อย ไม่เกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
3			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเล็กน้อยเมื่อจุ่มแช่น้ำ
4			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเล็กน้อยเมื่อจุ่มแช่น้ำ
5			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
6		×	ชิ้นงานละลายได้หมดเมื่อจุ่มแช่น้ำ
7		×	ชิ้นงานละลายได้หมดเมื่อจุ่มแช่น้ำ

จากตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพก่อนและหลังแช่น้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมได้ สูตร 1-7 พบว่า แผ่นฟิล์ม CMC_L (สูตร 6) และแผ่นฟิล์ม SF (สูตร 7) ที่มีสารก่อพันธะเชื่อมโยงและสารริเริ่มปฏิกิริยาละลายน้ำได้หมดภายในเวลา 6 ชั่วโมง

สำหรับแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมจากการผสม 5% (w/v) CMC_L กับ 2% (w/v) SF ในอัตราส่วนต่างๆ 5:25, 10:20, 15:15, 20:10 และ 25:15 โดยปริมาตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่

4.1 เมื่อนำมาแช่ในน้ำกลั่น ภายใต้สภาวะทดลองเช่นเดียวกันกับ สูตร 6 และ สูตร 7 พบว่าแผ่นฟิล์มผสมไม่ละลายน้ำและมีรูปร่างคล้ายก่อนการแช่น้ำ ยกเว้น สูตร 5 อาจเนื่องมาจาก CMC เป็นอนุพันธ์พอลิแซคคาไรด์ที่มีหมู่ชอบน้ำ ได้แก่ -OH และ COO^-Na^+ ส่วน SF เป็นโปรตีนที่มีหมู่ -CONH ในสายโซ่หลัก และมี -OH, -COOH อยู่ในกรดอะมิโนต่างๆ เมื่อผสมกันสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่มีขั้วในลักษณะ Hybrid polymer network [47] NH_2 ของ SF และ COO^- ของ CMC ทำให้สายโซ่อยู่ใกล้กัน เมื่อเติมสารก่อพันธะเชื่อมโยงจึงเกิดการเชื่อมโยงได้ ช่วยให้แผ่นฟิล์มไม่ละลายน้ำ เมื่อปริมาณ CMC_L ในแผ่นฟิล์มผสมเพิ่มขึ้นจาก 5 ml เป็น 20 ml (สูตร 1-4) เท่ากับเป็นการเพิ่มปริมาณหมู่ COO^-Na^+ ซึ่งเป็นหมู่ที่ชอบน้ำ ทำให้สามารถดูดน้ำได้ดีขึ้น ผลการทดลองคล้ายกับ A.K. Bajpai และคณะ [48, 49]

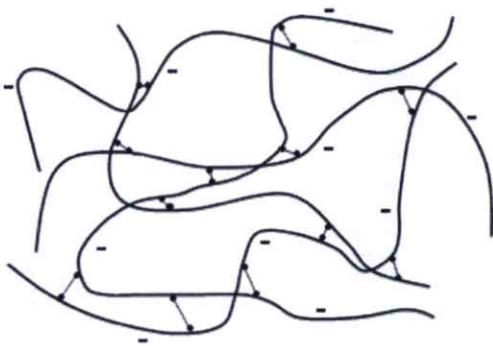
เมื่อแผ่นฟิล์มผสมมีปริมาณ CMC_L เพิ่มเป็น 25 ml ซึ่งงานที่ได้หลังจากการแช่น้ำเกิดการม้วนงอ เนื่องจากการแพร่ของน้ำสู่ไฮโดรเจล โดยได้รับอิทธิพลจากธรรมชาติของโครงสร้างทางเคมี การเพิ่มขึ้นของหมู่ชอบน้ำ ($-\text{COO}^-\text{Na}^+$) นอกจากช่วยดึงดูน้ำที่เป็น free water ได้ดีแล้ว ยังทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ของ CMC_L เคลื่อนไหวและผ่อนคลาย (mobility and relaxation) ได้มากกว่า SF จึงทำให้เกิดการม้วนงอเมื่อมีปริมาณ CMC_L เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 แสดงปฏิกิริยาเคมีการเกิดพันธะเชื่อมโยงในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง CMC กับ SF

รูปแบบโครงสร้างการเชื่อมโยงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สามารถเกิดได้หลายรูปแบบแสดงในรูปที่ 4.2 ได้แก่ (ก) การเชื่อมโยงกันเองระหว่างสายโซ่ CMC ซึ่งเกิดแรงกระทำโดยตรง

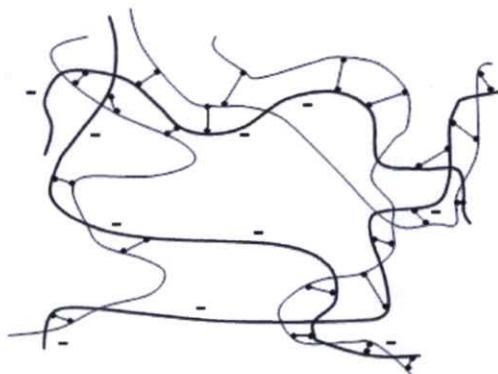
ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการรวมตัวและการเกี่ยวพันกันของสายโซ่พอลิเมอร์ (ข) การเชื่อมโยงแบบไฮบริด (Hybrid Polymer Network) เป็นการเชื่อมโยงของโครงสร้างแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเติมพอลิเมอร์ชนิดอื่น (SF) เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์ม (ค) การเชื่อมโยงแบบกึ่งโครงร่างตาข่าย (Semi-IPN Network) เป็นการเชื่อมโยงที่สายโซ่พอลิเมอร์หลัก (CMC) เกิดการเชื่อมโยงด้วยสารก่อพันธะเชื่อมโยง และมีการสอดแทรกพอลิเมอร์อื่น (SF) เพื่อให้เกิดการเกี่ยวพันกันในลักษณะโครงร่างตาข่าย และ (ง) การเชื่อมโยงด้วยพันธะไอออนิก เป็นการเชื่อมโยงที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างไอออนบวก และไอออนลบภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์ม [47]



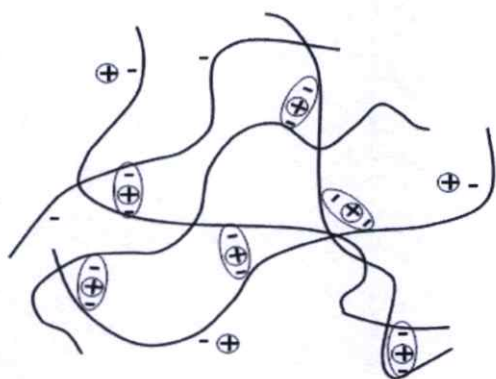
(ก) แบบจำลองลักษณะโครงสร้างการเชื่อมโยงแบบเชื่อมโยงกันเองระหว่างสายโซ่ CMC



(ข) แบบจำลองลักษณะโครงสร้างการเชื่อมโยงแบบ Hybrid polymer network



(ค) แบบจำลองลักษณะโครงสร้างการเชื่อมโยงแบบ Semi-interpenetrating network



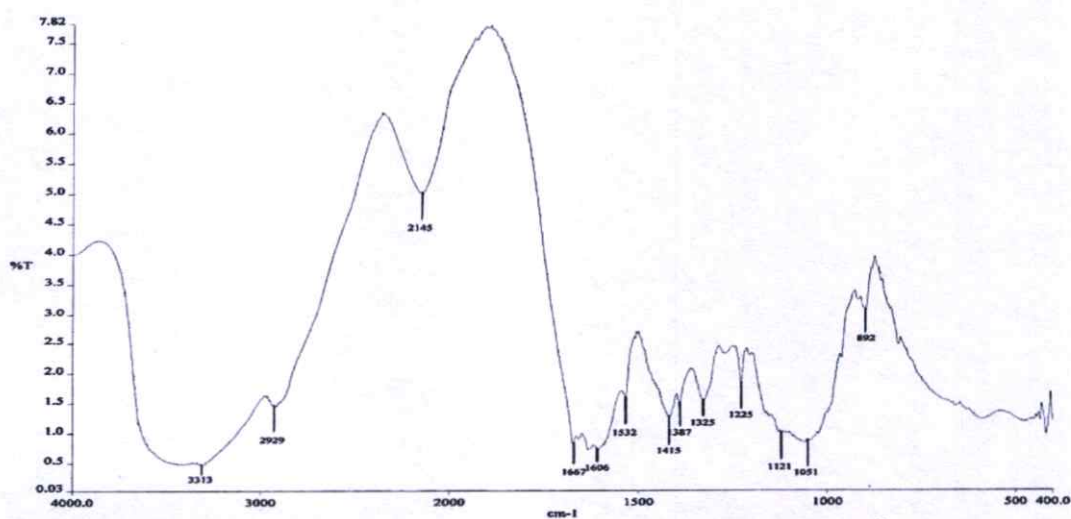
(ง) แบบจำลองลักษณะโครงสร้างการ
เชื่อมโยงด้วยพันธะไอออนิก

—•—, การเชื่อมโยงด้วยพันธะโคเวเลนต์; —, ขั้วลบของ CMC; —, CMC; —, SF;
⊕, การเชื่อมโยงด้วยพันธะไอออนิก; ○, แรงกระทำไอออนิก)

รูปที่ 4.2 แบบจำลองโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง CMC กับ SF

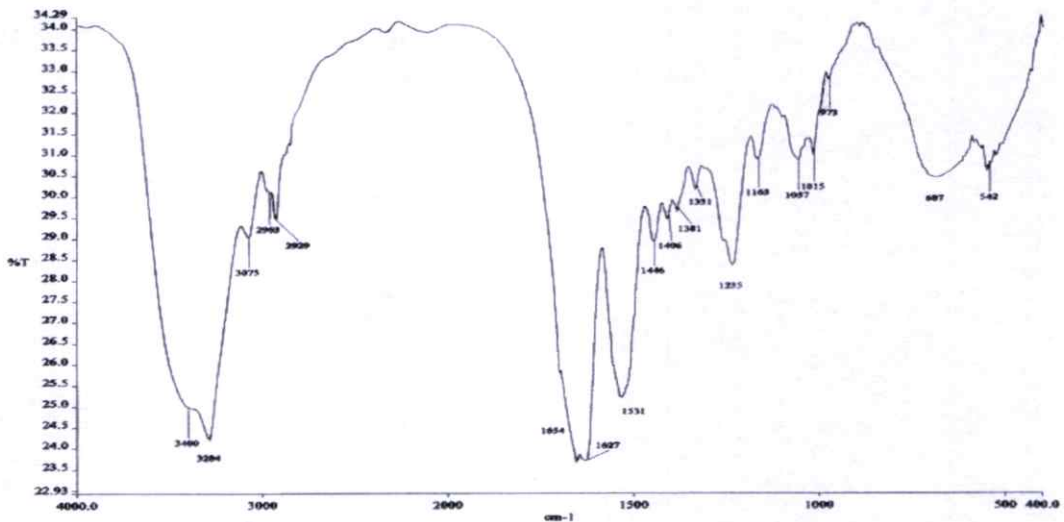
4.1.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันหลักของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (CMC_L) และสารละลายไหมไฟโบรอิน (SF) เปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF ที่แตกต่างกันในแต่ละสูตรว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของ CMC_L และ SF เพื่อให้ได้อินฟราเรดสเปกตรัมมาใช้ในการเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF ที่แตกต่างกัน อินฟราเรดสเปกตรัมของ CMC_L และ SF แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ

จากรูปที่ 4.3 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (CMC_L) โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm⁻¹ พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3313 และ 2929 cm⁻¹ คือ O-H stretching ของคาร์บอกซิลิก (Carboxylic) และ C-H stretching ตามลำดับ ที่เลขคลื่นประมาณ 1606 cm⁻¹ คือ C=O ของคาร์บอกซิลิก และที่เลขคลื่นประมาณ 1121 cm⁻¹ คือ C-O stretching ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้พบอยู่ในโครงสร้างของ CMC_L [50]

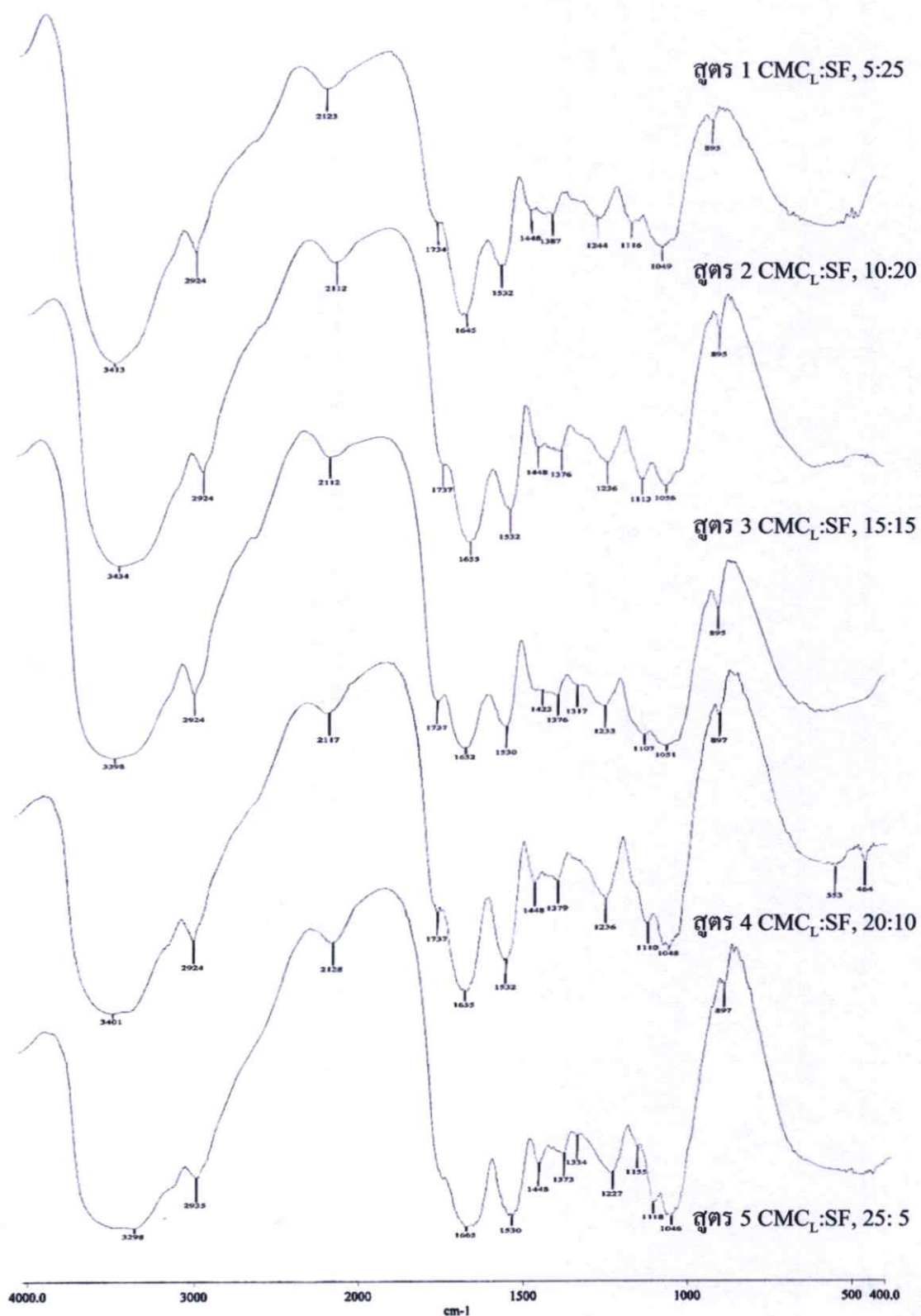


รูปที่ 4.4 แสดง IR spectrum ของสารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์

จากรูปที่ 4.4 แสดง IR spectrum ของสารละลายโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm⁻¹ พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3440 cm⁻¹ คือ N-H Stretching ของเอมีน (amine) หรือเอไมด์ (amide) ที่เลขคลื่นประมาณ 2929 cm⁻¹ คือ C-H Stretching และที่เลขคลื่นประมาณ 1654, 1531 และ 1446 cm⁻¹ คือ C=O ของ I, II และ III amide ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าโพลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นสารประเภทโปรตีน โดยมีกรดอะมิโนเป็นองค์ประกอบหลัก [50]

ตารางที่ 4.3 สรุปเลขคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิด น้ำหนักโมเลกุลต่ำและสารละลายโหมไฟโบรอิน ที่ปรากฏในรูปที่ 4.3, 4.4

เลขคลื่น (cm^{-1})	ช่วงการดูดกลืน
2900-3600	O-H stretching
3300-3500	N-H Stretching
2800-3000	C-H Aliphatic stretching
1600-1700	C=O stretching
1650-1680	C=O stretching (Amide I)
1000-1200	C-O stretching
1509-1541	C=O stretching (Amide II)
1220-1350	C=O stretching (Amide III)
1020-1250	C-N stretching



รูปที่ 4.5 แสดง IR spectrum ของสูตร 1-5

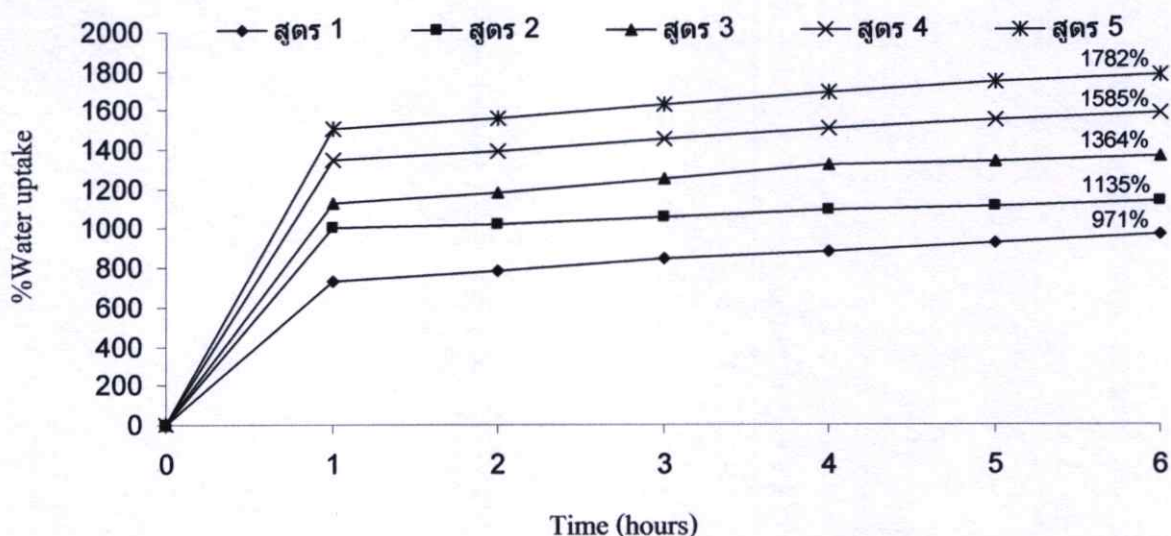
จากรูปที่ 4.5 เปรียบเทียบ IR spectrum ของสูตร 1-5 ซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF ในอัตราส่วน 5:25, 10:20, 15:15, 20:10 และ 25:5 โดยปริมาตร

ตามลำดับ โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ พบว่าสูตร 1-5 ปรากฏพีค IR spectrum ที่คล้ายกัน ซึ่งประกอบไปด้วยพีคของ CMC_L และ SF อยู่ภายในโครงสร้าง โดยสูตร 5 พีค C-O stretching ของ CMC จะมีความเข้มและความคมมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของ CMC มากขึ้น และพีคที่บริเวณเลขคลื่น $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ จะมีความกว้างและความคมลดลงเนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันระหว่าง N-H Stretching ของ ไหมไฟโบรอินกับ O-H stretching ของ CMC ที่เพิ่มขึ้น

4.1.3 สมบัติการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

4.1.3.1 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

ตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาด 2×2 เซนติเมตร นำตะแกรงลวดเปล่า และชิ้นงาน ไปล้างเพื่อให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (water uptake) ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.6



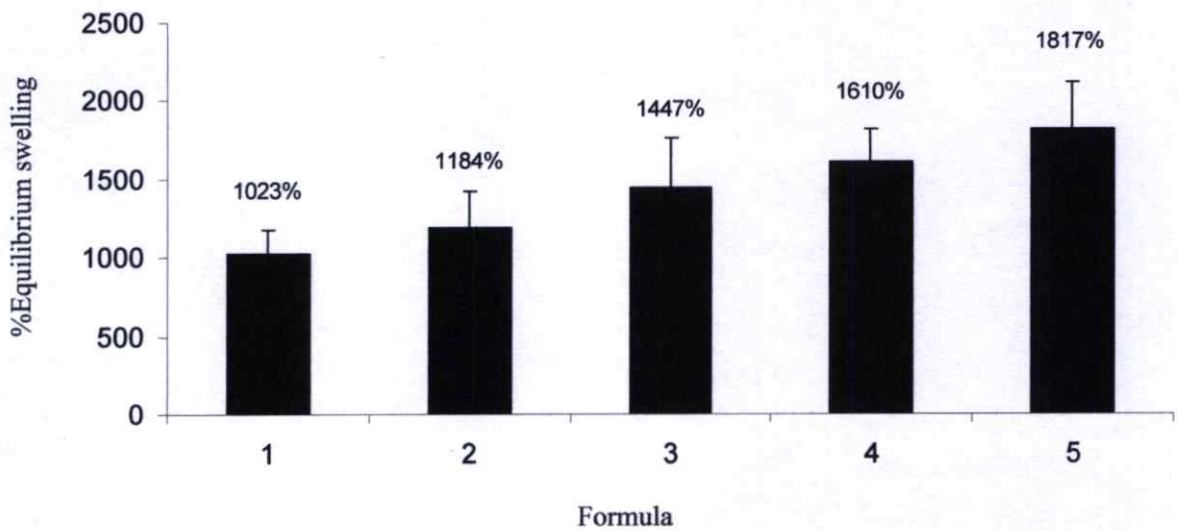
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 1-5

สูตร 1-5 เป็นแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลซึ่งเตรียมจาก CMC_L ความเข้มข้น 5% (w/v) ผสมกับ SF ความเข้มข้น 2% (w/v) ในอัตราส่วน 5:25, 10:20, 15:15, 20:10 และ 25:5 โดยปริมาตร ตามลำดับ จากรูปที่ 4.6 พบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เชื่อมโยงด้วย BIS สามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นใน 1 ชั่วโมงแรก และเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป โดยการดูดซับน้ำเป็นไปในทิศทางเดียวกันและเมื่อปริมาณของ CMC_L เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การดูดซับ

น้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงที่สุดมีค่าการดูดซับน้ำเท่ากับ 1781.49 % ซึ่งพบในสูตร 5 เนื่องจาก CMC_L ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิล (-COO) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่มีสมบัติชอบน้ำ สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำกับออกซิเจนของหมู่คาร์บอกซิลที่มีอยู่ในแผ่นฟิล์ม สายโซ่พอลิเมอร์ CMC ขยายตัวห่างออกจากกันเพราะประจุลบผลักกัน [48] ส่วน SF ที่ผสมในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถดูดน้ำได้น้อยกว่า CMC ดังนั้น CMC จะทำให้โครงสร้างตาข่ายของไฮโดรเจลไม่แข็งแรง (Loose network) [48]

4.1.3.2 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จุดสมดุลเป็นจุดที่แสดงความสามารถสูงสุดในการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม ในการหาจุดสมดุลดังกล่าวทำได้โดยแช่ชิ้นงานขนาด 2x2 cm ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้จนถึงค่าที่อิ่มตัวสูงสุด แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนักคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุล (Equilibrium swelling) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6

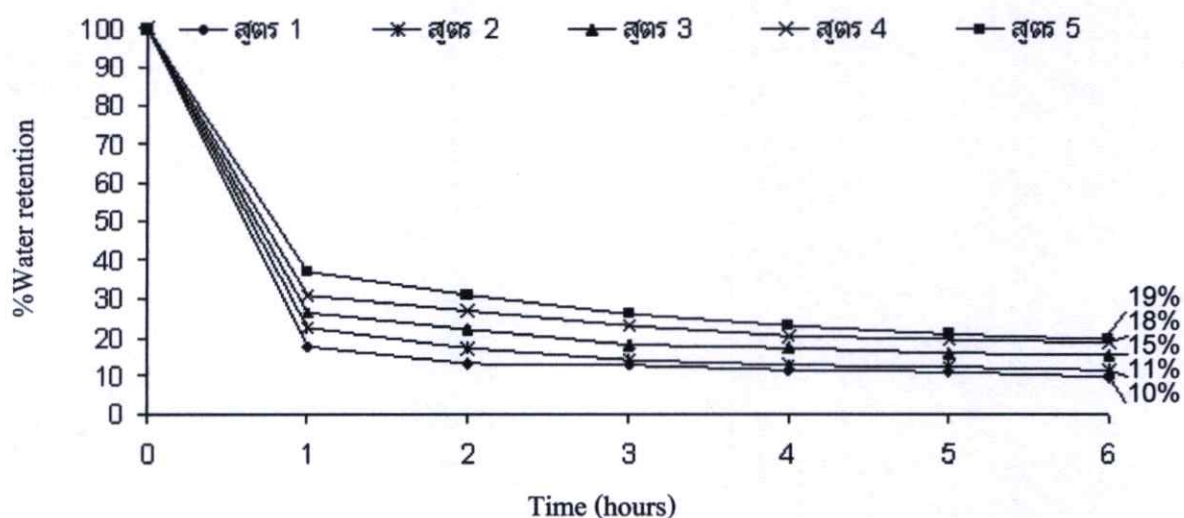


รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำสมดุล (%) ในน้ำกลั่น ณ จุดสมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 1-5

จากรูปที่ 4.7 เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 1-5 ซึ่งมีการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง 5% (w/v) CMC_L ต่อ 2% (w/v) SF และมีการเชื่อมโยงด้วย BIS มาทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเชื่อมโยง BIS สามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว เหตุผลเช่นเดียวกับกับข้อ 4.1.3.1 โดยแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 1 สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้ 1023% สูตร 2 สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้ 1184% สูตร 3 สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้ 1447% สูตร 4 สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้ 1610% และสูตร 5 สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้ 1817%

4.1.3.3 สมบัติการกักเก็บน้ำของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

นำชิ้นงานที่บวมตัวสูงสุดมาอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (สมมติให้เป็นอุณหภูมิร่างกาย) โดยทำการบันทึกน้ำหนักก่อนอบไว้ แล้วชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำหนักที่ชั่งได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่หายไป นั่นคือความสามารถในการเก็บความชื้นของชิ้นงานเมื่อนำมาใช้บนร่างกาย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบการกักเก็บน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 1-5

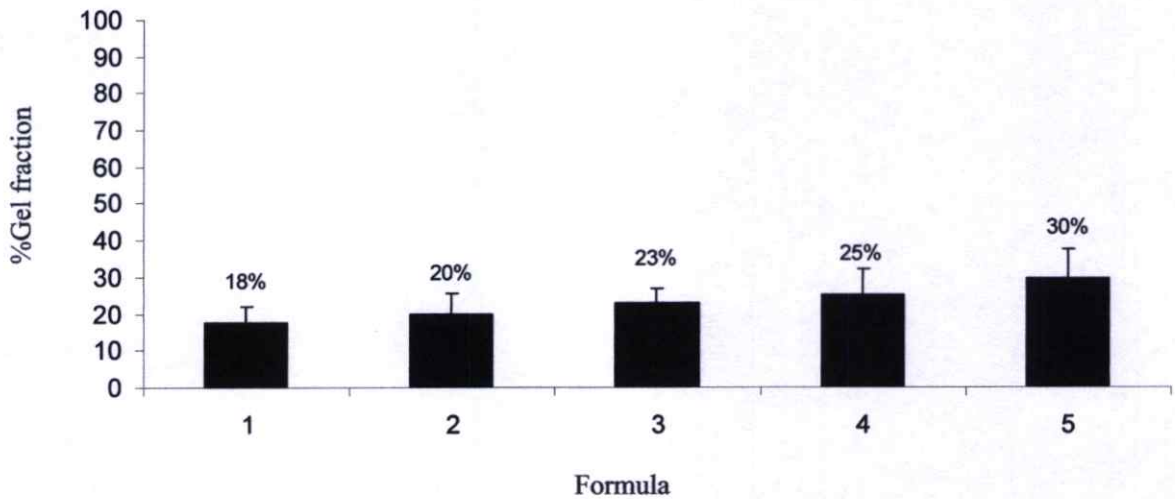
ลักษณะน้ำที่แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถดูดซับไว้อาจแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ Free water ซึ่งอยู่บริเวณผิวนอกของไฮโดรเจลเป็นส่วนระเหยง่ายที่สุด Interfacial water เป็นน้ำที่แทรกอยู่ในโมเลกุลของไฮโดรเจล และ Bound water เป็นน้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรเจลซึ่งระเหยได้ยากที่สุด [51]

เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 1-5 ซึ่งแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้มีการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง 5% (w/v) CMC_L ต่อ 2% (w/v) SF มาทดสอบปริมาณการกักเก็บน้ำ จากรูปที่ 4.8 พบว่าน้ำจะระเหยออกจากแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลทุกสูตรอย่างรวดเร็วใน 1 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นค่อยๆ ลดลงจนค่อนข้างคงที่ แสดงว่าน้ำที่เป็น Free water ในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันและระเหยออกจากแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลภายใน 1 ชั่วโมงแรก เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่กักเก็บในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ สามารถเรียงลำดับดังนี้ สูตร 5 (19%) > สูตร 4 (18%) > สูตร 3 (15%) > สูตร 2 (11%) > สูตร 1 (10%) ตามลำดับ น้ำที่เหลืออยู่ในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลควรจะเป็นน้ำที่เก็บอยู่ในช่องว่างระหว่างโครงร่างตาข่าย (Interfacial water) และน้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจน (Bound water) กับหมู่คาร์บอกซิล (-COO) ของ CMC และหมู่เอไมด์ของ SF เมื่อปริมาณหมู่ชอบ

น้ำเพิ่มขึ้น ปริมาณ Bound water จะเพิ่มขึ้นด้วย จึงทำให้สูตร 5 มีน้ำที่เหลืออยู่มากกว่าสูตรอื่นๆ เล็กน้อย

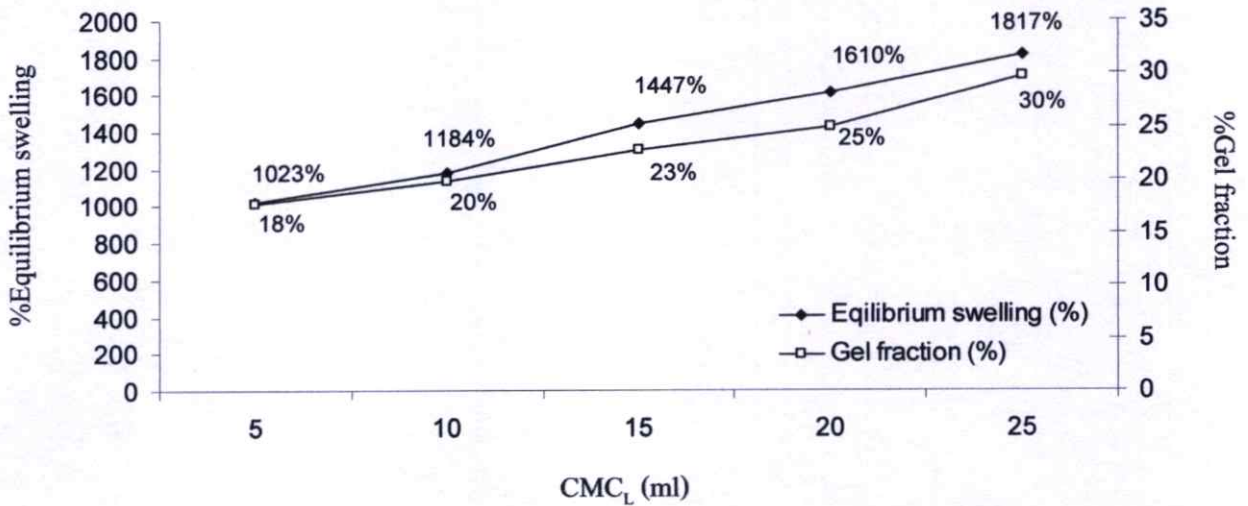
4.1.3.4 เปอร์เซนต์ค่าสัดส่วนเจล

ค่าสัดส่วนเจลแสดงถึง โมเลกุลที่ไม่ละลายน้ำเพราะเกิดการเชื่อมโยง ส่วนที่ไม่ละลายสูง น้ำจะเกิดพันธะเชื่อมโยงมาก

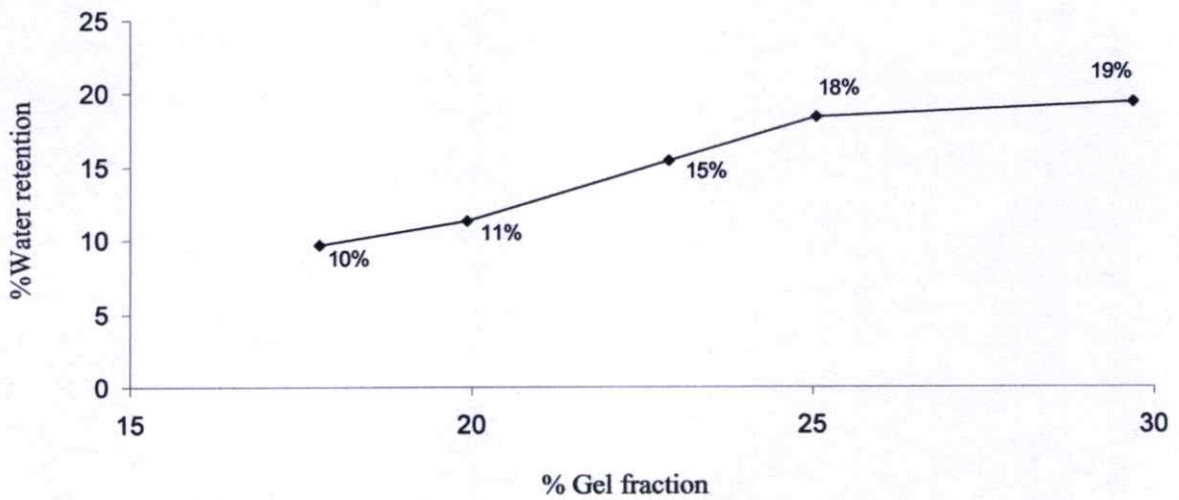


รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเจล (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตรที่ 1-5

จากรูปที่ 4.9 แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 1-5 ซึ่งแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้มีการเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง 5% (w/v) CMC_L ต่อ 2% (w/v) SF ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.1 นำมาแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้สารเคมีที่ไม่เกิดพันธะละลายออก จากนั้นจึงนำมาวางให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของ CMC_L เพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สูตร 5 (30%) > สูตร 4 (25%) > สูตร 3 (23%) > สูตร 2 (20%) > สูตร 1 (18%) ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบ CMC_L กับ SF แล้ว CMC_L น่าจะเกิดพันธะเชื่อมโยงได้ดีกว่า พิจารณาจากรูปที่ 4.10 พบว่า ปริมาณ CMC มีผลต่อการดูดซับน้ำ และสัดส่วนที่ไม่ละลายน้ำ โดยปริมาณ CMC_L มาก ค่าสัดส่วนเจลมีค่ามากขึ้น การดูดซับน้ำก็มากขึ้นด้วย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ CMC_L และลดปริมาณ SF ลงในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมในขณะที่สารก่อพันธะเชื่อมโยงมีปริมาณเท่ากันทุกสูตร ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่าง CMC_L มากขึ้น เปอร์เซนต์ส่วนที่ไม่ละลายจึงเพิ่มขึ้น และ SF ถูกกักเก็บอยู่ระหว่างสายโซ่ CMC ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงภายในโครงสร้าง



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ
เปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล เทียบกับปริมาณ CMC_L



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำ
และเปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล อธิบายได้ว่า CMC ที่เกิดพันธะเชื่อมไฮโดรเจนหมู่ $-COO^-$ และ $-OH$ ที่สามารถเกิด Bound water กับน้ำ ยังมีปริมาณ CMC มาก หมู่ $-COO^-$ ก็จะมีมาก การกักเก็บน้ำจึงดีขึ้น

ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 1-5 ที่เตรียมจากการผสม 5% (w/v) CMC_L กับ 2% (w/v) SF ในอัตราส่วนต่างๆ คือ 5:25, 10:20, 15:15, 20:10 และ 25:5 โดยปริมาตร ตามลำดับ พบว่าจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ เมื่อมีปริมาณ CMC_L เพิ่มขึ้นจะทำให้ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อดูดซับน้ำ แผ่นฟิล์ม CMC_L

(สูตร 6) และแผ่นฟิล์ม SF (สูตร 7) ที่มีสารก่อพันธะเชื่อมโยงและสารริเริ่มปฏิกิริยาละลายน้ำได้หมดภายในเวลา 6 ชั่วโมง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเมื่อปริมาณ CMC_L เพิ่มขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของพีคที่บริเวณเลขคลื่น $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นของ C-O stretching จะมีความเข้มและความคมมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของ CMC_L มากขึ้น ซึ่งหมายความว่า CMC_L สามารถเข้าไปเชื่อมโยงภายในโครงสร้างแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมากขึ้น และจะปรากฏพีคที่เลขคลื่นประมาณ $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ กว้างและความคมลดลง เนื่องจากการซ้อนทับกันระหว่าง N-H Stretching ของ โหมไฟโบรอินกับ O-H stretching ของ CMC_L ที่เพิ่มขึ้น

ผลการดูดซับน้ำพบว่าเมื่อปริมาณ CMC_L เพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก CMC_L ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิล (-COO) และหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลน้ำได้ จึงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์ CMC ขยายตัวห่างออกจากกัน เพราะประจุลบผลักกันน้ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปได้มาก

ผลการดูดซับน้ำที่สมดุลมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการดูดซับน้ำซึ่งสูตร 5 มีอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF เท่ากับ 25:5 โดยปริมาตร มีปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลสูงสุด เท่ากับ 1817%

ผลการกักเก็บน้ำพบว่าสูตร 5 มีอัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF เท่ากับ 25:5 โดยปริมาตรสามารถกักเก็บน้ำได้มากกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณ CMC_L มาก จึงมีปริมาณหมู่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำที่ระเหยได้ยาก (Bound water) ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิล (-COO) ของ CMC มากขึ้น


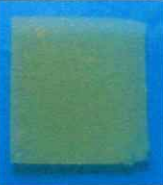








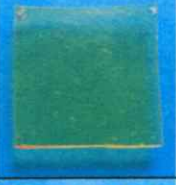


ผลของค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของ CMC_L เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณ CMC_L มาก ทำให้สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่าง CMC_L กับสารก่อพันธะเชื่อมโยงมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ส่วนที่ไม่ละลายจึงเพิ่มขึ้น

4.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 8-14

4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ

การใช้ปริมาณของ CMC_H/SF ที่แตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของชิ้นงานที่ปรากฏอย่างมาก โดยทำให้ลักษณะทางกายภาพที่ปรากฏของชิ้นงานต่างกัน ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 รูปชิ้นงานก่อนและหลังแช่น้ำกลั่น สูตร 8-14

สูตร	รูปก่อนแช่น้ำ	รูปหลังแช่น้ำ	ลักษณะชิ้นงานหลังแช่น้ำ
8			ชิ้นงานบวมตัวเล็กน้อย ไม่เกิดการม้วนตัว เมื่อจุ่มแช่น้ำ
9			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเล็กน้อยเมื่อจุ่มแช่น้ำ
10			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
11			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
12			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
13		×	ชิ้นงานละลายได้หมดเมื่อจุ่มแช่น้ำ
14			ชิ้นงานบวมตัวและมีลักษณะเสียรูป ไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นได้เมื่อจุ่มแช่น้ำ

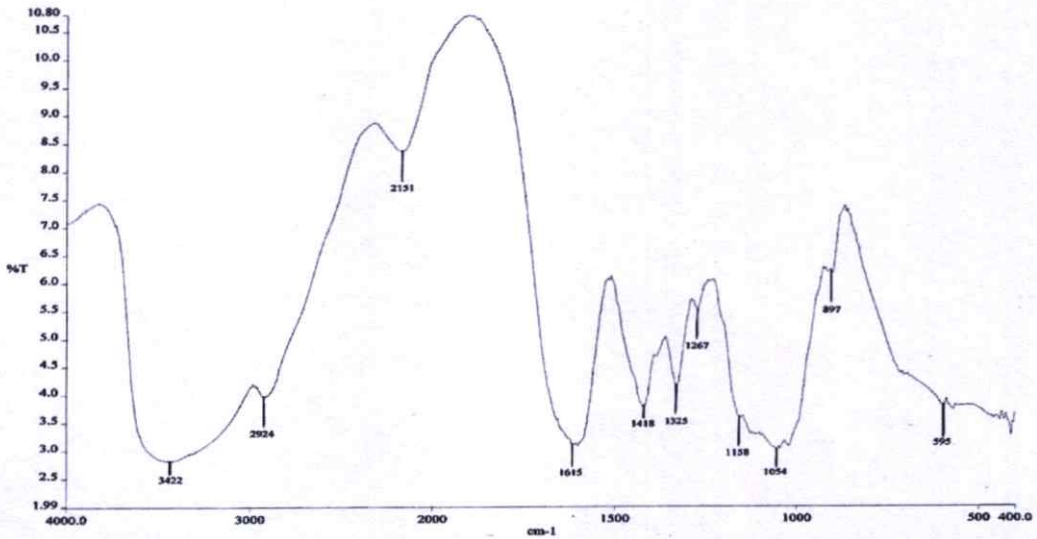
จากตารางที่ 4.4 แสดงภาพของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมจากสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (CMC_H) พบว่าแม้สัดส่วนของ $CMC_H : SF$ จะเท่ากับเมื่อใช้ CMC_L แต่ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลหลังแช่น้ำต่างกัน เช่นในสูตร 8 $CMC_H : SF$ เท่ากับ 5 : 25 (w/v) หลังแช่น้ำฟิล์มมีสีเหลืองอ่อน และบุนกว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลก่อนแช่น้ำ ในแผ่นฟิล์ม CMC_H (สูตร 13) ที่มีสารก่อพันธะเชื่อมโยงและสารริเริ่มปฏิกิริยาสามารถละลายน้ำได้หมดภายในเวลา 6 ชั่วโมง

สำหรับแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 9-12 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นฟิล์มทุกสูตรพบว่า มีวุ้นเมื่อมีปริมาณ CMC_H เพิ่มขึ้น จาก 10 เป็น 25 ml อธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณ CMC ซึ่งเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte) มีหมู่ $-COO^-$ อยู่ เท่ากับเป็นการเพิ่มแรงผลัก (Repulsion force) ให้เกิดขึ้นภายในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล ทำให้มีปริมาณอิทธิพลของสายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้อย่างรวดเร็ว [52] เมื่อเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ใช้ CMC_L กับ CMC_H ที่มีส่วนผสม SF เท่ากัน พบว่าแผ่นฟิล์มที่ใช้ CMC_H มีการม้วนตัวหลังแช่น้ำได้ง่ายกว่าแผ่นฟิล์มที่ใช้ CMC_L ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ใช้ $CMC_L : SF$ เท่ากับ 25 : 5 โดยปริมาตร จึงจะสามารถเกิดการม้วนตัว แต่แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ใช้ $CMC_H : SF$ เริ่มม้วนตัวตั้งแต่ $CMC_H : SF$ เท่ากับ 15 : 15 โดยปริมาตร อธิบายได้ว่าเนื่องจาก CMC_H มีสายโซ่โมเลกุลยาวนั้นคือมีหมู่ $-COO^-$ มากด้วย เท่ากับเป็นการเพิ่มแรงผลักของประจุทำให้แผ่นฟิล์มมีปริมาณอิทธิพลของสายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้อย่างอิสระจึงเกิดการม้วนงอตัวได้ง่าย และแม้ว่าอัตราส่วนของ CMC_H ในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจะต่ำแต่ยังมีหมู่ชอบน้ำอยู่มาก [52] จึงสามารถดูดซับน้ำเข้าไปในแผ่นฟิล์มได้อย่างรวดเร็ว และเมื่อเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มหลังแช่น้ำของสูตร 11 กับสูตร 14 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง $CMC_H : SF$ เท่ากับ 20 : 10 โดยปริมาตร แต่สูตร 11 มีกลีเซอรอล สูตร 14 ไม่มีกลีเซอรอล พบว่าชิ้นงานหลังแช่น้ำกลับของสูตร 14 เกิดการเสียรูปไม่เป็นแผ่น อธิบายได้ว่า กลีเซอรอลช่วยให้ CMC_H และ SF ผสมเข้ากันได้ดี ทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงแบบสุ่มกระจายทั่วทั้งแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล ทำให้แผ่นฟิล์มยังคงรูปอยู่ได้ กรณีไม่มีกลีเซอรอลการเชื่อมโยงอาจเกิดบางตำแหน่ง เมื่อนำแผ่นฟิล์มมาแช่น้ำส่วนที่ไม่เกิดการเชื่อมโยงจะละลายน้ำทำให้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเกิดการเสียสภาพ

4.2.2 ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันหลักของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (CMC_H) เปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF ที่แตกต่างกันในแต่ละสูตรว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง เพื่อให้ได้อินฟราเรดสเปกตรัมมาใช้

ในการเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มที่ใช้สารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูงในการผสมขึ้นรูป ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF ที่แตกต่างกัน อินฟราเรดสเปกตรัมของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง แสดงดังรูปที่ 4.12

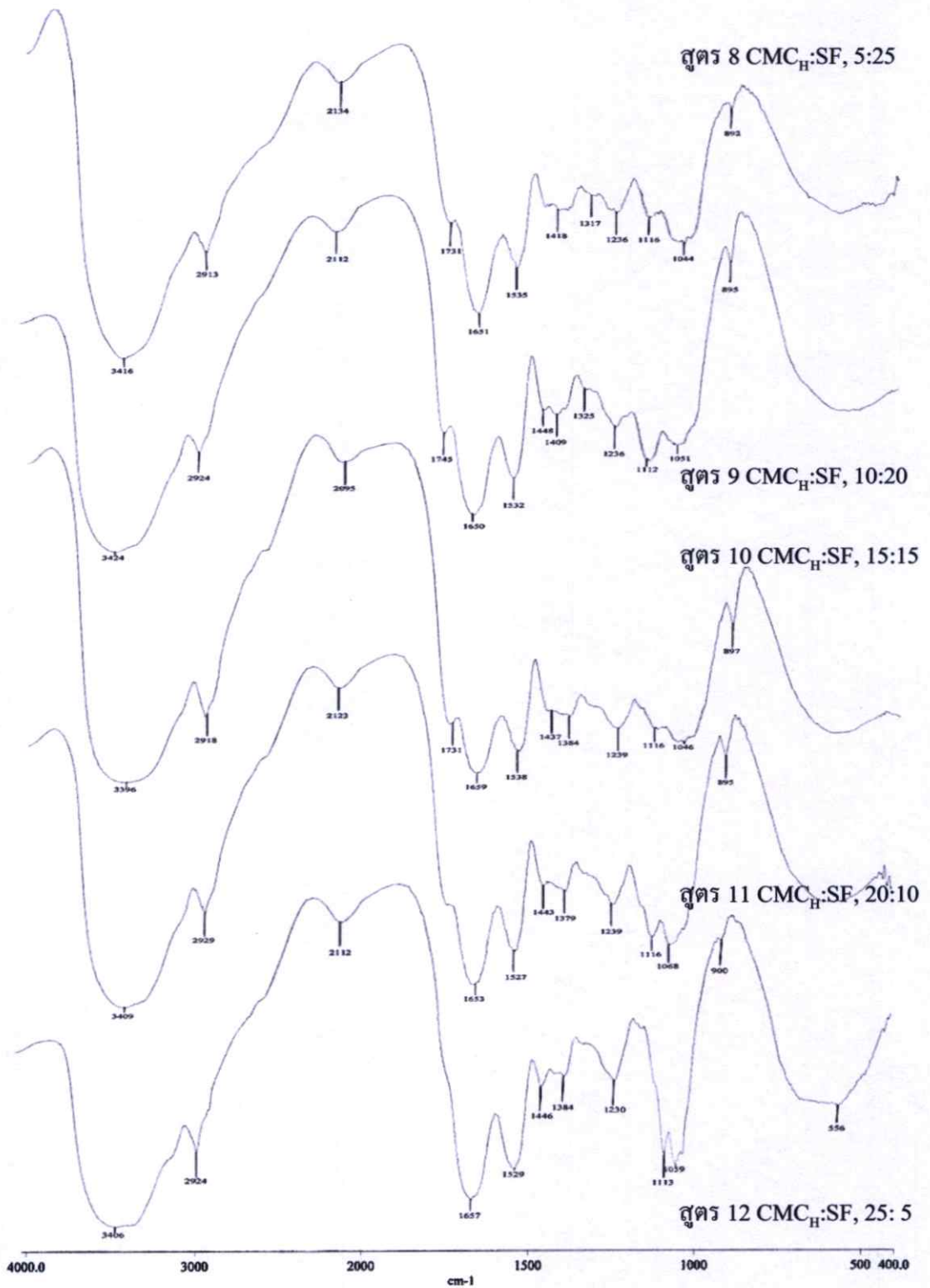


รูปที่ 4.12 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง

จากรูปที่ 4.12 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (CMC_H) โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm⁻¹ พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3422 และ 2924 cm⁻¹ คือ O-H stretching ของคาร์บอกซิลิก (Carboxylic) และ C-H stretching ตามลำดับ ที่เลขคลื่นประมาณ 1615 cm⁻¹ คือ C=O ของคาร์บอกซิลิก และที่เลขคลื่นประมาณ 1054 cm⁻¹ คือ C-O stretching ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้พบอยู่ใน โครงสร้างของ CMC_H [50]

ตารางที่ 4.5 สรุปเลขคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง ที่ปรากฏในรูปที่ 4.12

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	ช่วงการดูดกลืน
3200-3500	O-H stretching
2800-3000	C-H stretching
1600-1630	C=O
1000-1160	C-O stretching



รูปที่ 4.13 แสดง IR spectrum ของสตูร 8-12

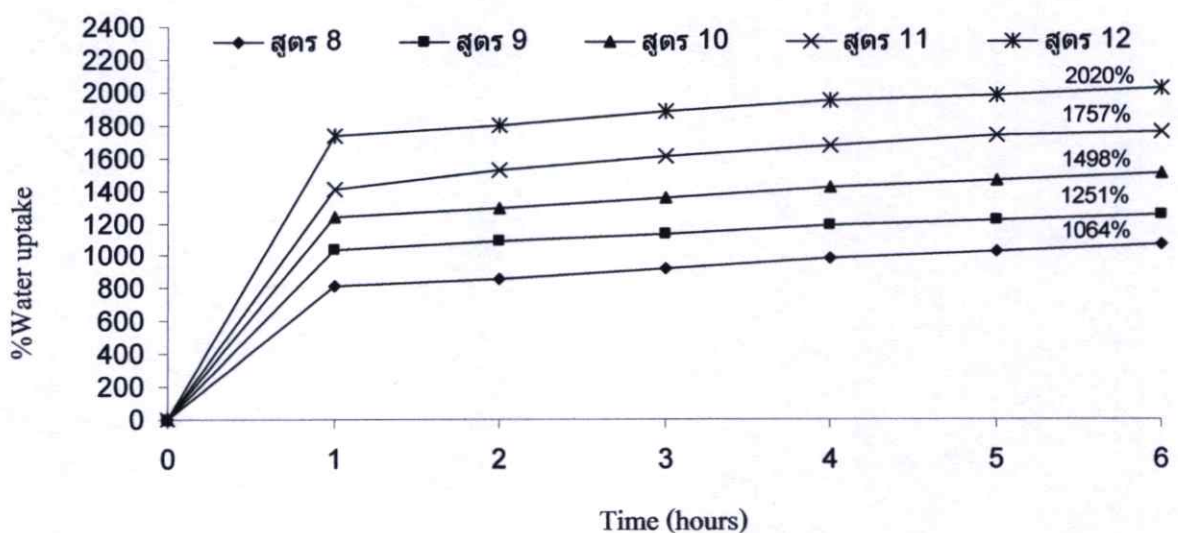
จากรูปที่ 4.13 เปรียบเทียบ IR spectrum ของสตูร 8-12 ซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF ในอัตราส่วน 5:25, 10:20, 15:15, 20:10 และ 25:5 โดยปริมาตร ตามลำดับ โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm⁻¹ พบว่าปรากฏพีก C-O stretching

ของ CMC มากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของ CMC มากขึ้น และพีคที่บริเวณเลขคลื่นประมาณ 3300-3500 cm^{-1} จะมีความกว้างและความคมลดลงเนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันระหว่าง N-H Stretching ของ ไหมไฟโบรอินกับ O-H stretching ของ CMC ที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 4.1.2

4.2.3 สมบัติการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

4.2.3.1 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

ตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาด 2x2 เซนติเมตร นำตะแกรงลวดเปล่า และชิ้นงานไปซังเพื่อให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง ชั่วโมง เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (water uptake) ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.14



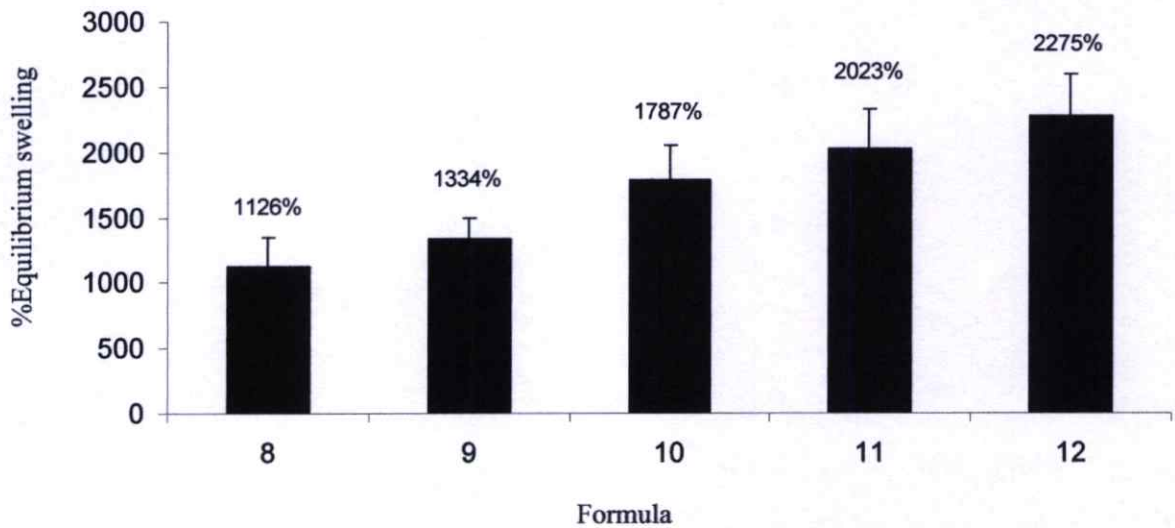
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12

สูตร 8-12 เป็นแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลซึ่งเตรียมจาก CMC_H ความเข้มข้น 5% (w/v) ผสมกับ SF ความเข้มข้น 2% (w/v) ในอัตราส่วน 5:25, 10:20, 15:15, 20:10 และ 25:5 โดยปริมาตร ตามลำดับจากรูปที่ 4.14 พบว่า CMC_H ที่เชื่อมโยงด้วย BIS สามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงที่สุด เท่ากับ 2020% ซึ่งพบในสูตร 12 เนื่องจาก CMC_H ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COO}^-$) และไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) ซึ่งมีสมบัติที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) จึงสามารถดูดซับน้ำได้ดี แต่เมื่อแช่น้ำเป็นเวลานานจะเกิดการเสียรูป แผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 1 ชั่วโมงแรก และเริ่มเข้าสู่ภาวะสมดุลเมื่อเวลา

ผ่านไป โดยการดูดซับน้ำเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อปริมาณของ CMC_H เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ประจุลบของหมู่คาร์บอกซิเลต ($-COO^-$) เกิดการผลักกันสายโซ่มีการขยายตัวมากขึ้น [52] ดังนั้นน้ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปได้มาก เมื่อเปรียบเทียบผลการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมจาก CMC_L (รูปที่ 4.6) กับ CMC_H (รูปที่ 4.14) พบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมจาก CMC_H ในทุกสูตรสามารถดูดน้ำได้สูงกว่า

4.2.3.2 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จุดสมดุลเป็นจุดที่แสดงความสามารถสูงสุดในการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม ในการหาจุดสมดุลดังกล่าวทำได้โดยแช่ชิ้นงานขนาด 2×2 cm ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้จนถึงค่าที่อิ่มตัวสูงสุด แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนักคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุล (Equilibrium swelling) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15

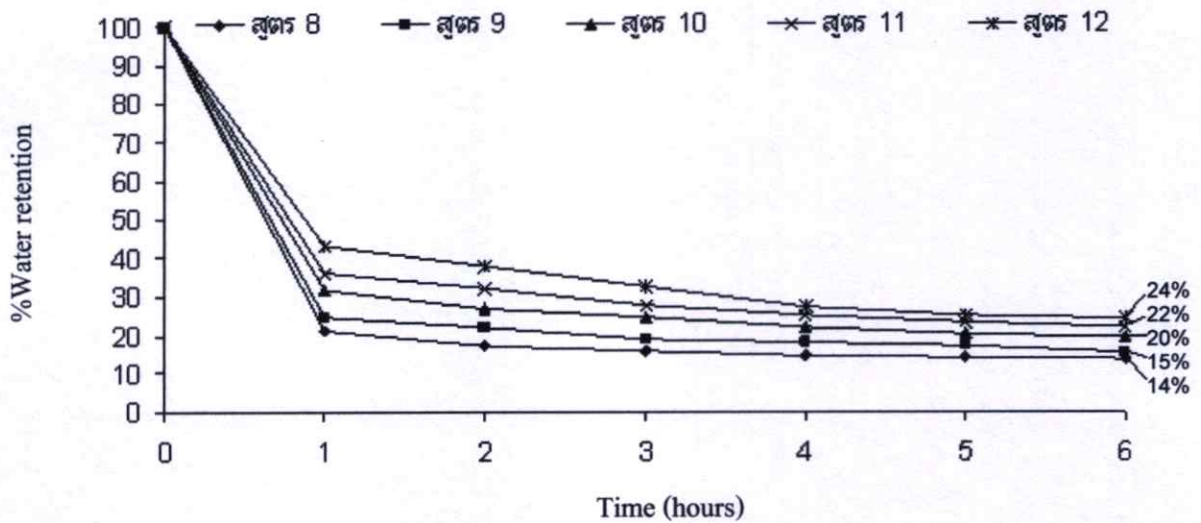


รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำสมดุล (%) ในน้ำกลั่น ณ จุดสมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12

จากรูปที่ 4.15 เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง 5% (w/v) CMC_H ต่อ 2% (w/v) SF และ CMC_H ที่ได้มีการเชื่อมโยงด้วย BIS มาทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่า CMC_H ที่ได้มีการเชื่อมโยงด้วย BIS สามารถดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็วจนกระทั่งสามารถละลายได้หมด เนื่องจาก CMC_H ประกอบไปด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) ซึ่งมีสมบัติที่ชอบน้ำ จึงสามารถดูดซับน้ำได้ดี และเมื่อมีปริมาณของ CMC_H เพิ่มมากขึ้นจะทำให้การดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเหตุผลเช่นเดียวกันกับข้อ 4.2.3.1 โดยสามารถเรียงลำดับค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลได้ดังนี้ สูตร 12 (2275%) > สูตร 11 (2023%) > สูตร 10 (1787%) > สูตร 9 (1334%) > สูตร 8 (1126%)

4.2.3.3 สมบัติการกักเก็บน้ำของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

นำชิ้นงานที่บวมตัวสูงสุดมาอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (สมมุติให้เป็นอุณหภูมิร่างกาย) โดยทำการบันทึกน้ำหนักก่อนอบไว้ แล้วชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำหนักที่ชั่งได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่หายไป นั่นคือความสามารถในการเก็บความชื้นของชิ้นงานเมื่อนำมาใช้บนร่างกาย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16

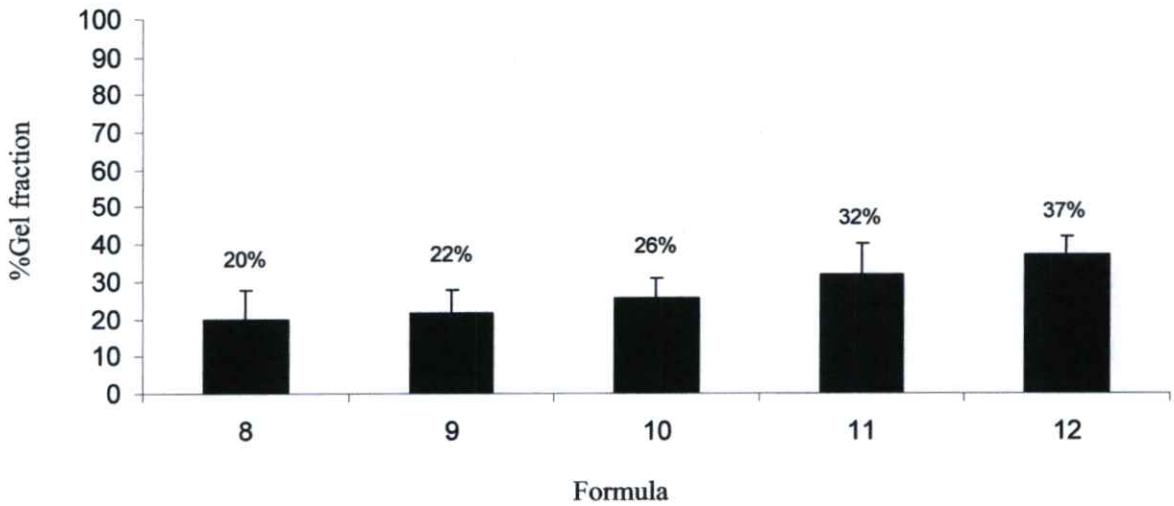


รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบการกักเก็บน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12

เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 8-12 ซึ่งแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง 5% (w/v) CMC_H ต่อ 2% (w/v) SF มาทดสอบปริมาณการกักเก็บน้ำ จากรูปที่ 4.16 พบว่าน้ำจะระเหยออกจากแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลทุกสูตรอย่างรวดเร็วใน 1 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นค่าจะค่อยๆ ลดลงจนคงที่ แสดงว่าน้ำที่เป็น Free water ในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สูตร 12 (24 %) > สูตร 11 (22 %) > สูตร 10 (20 %) > สูตร 9 (15 %) > สูตร 8 (14 %) อธิบายได้เช่นเดียวกับกรณี CMC_L หัวข้อ 4.1.3.3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง CMC_L กับ CMC_H พบว่า CMC_H มีการกักเก็บน้ำได้มากกว่า CMC_L เมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมง แสดงว่าปริมาณน้ำแบบ Bound water มีมากกว่า และสัมพันธ์กับปริมาณหมู่ -COO⁻ และ -OH ที่เพิ่มขึ้นเมื่อสายโซ่พอลิเมอร์ยาวขึ้น

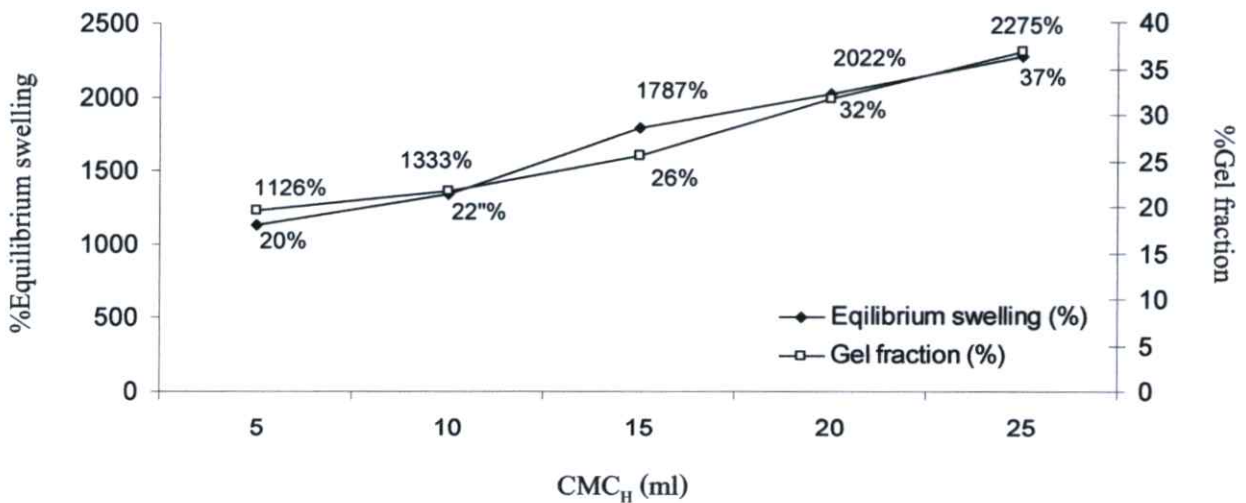
4.2.3.4 เปอร์เซนต์ค่าสัดส่วนเจล

ค่าสัดส่วนเจลแสดงถึงโมเลกุลที่ไม่ละลายน้ำเพราะเกิดการเชื่อมโยง ส่วนที่ไม่ละลายสูงน่าจะเกิดพันธะเชื่อมโยงมาก

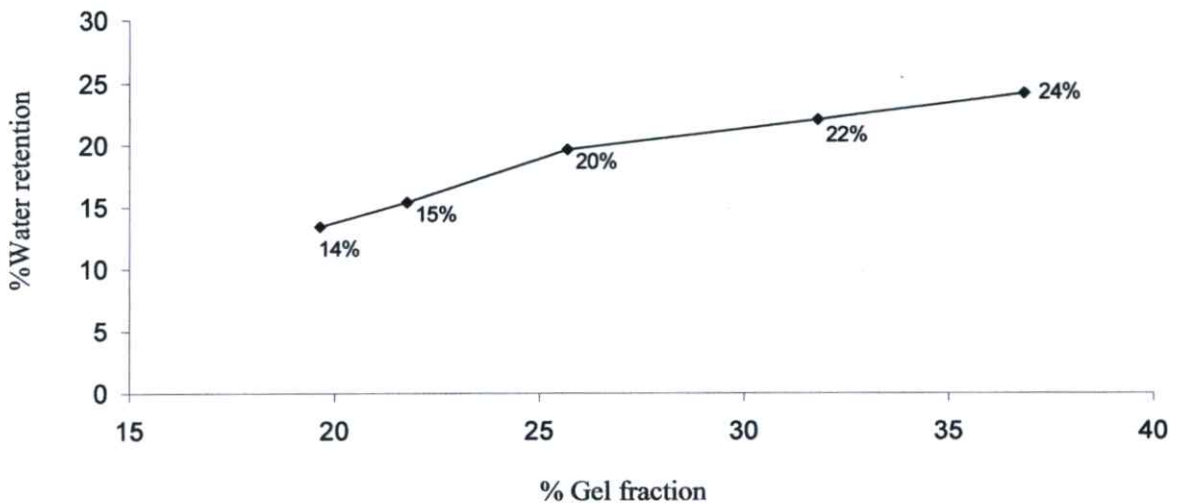


รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเจล (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 8-12

จากรูปที่ 4.17 แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 8-12 ซึ่งแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง 5% (w/v) CMC_H ต่อ 2% (w/v) SF ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 4.1 นำมาแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารเคมีที่ไม่เกิดพันธะละลายออก จากนั้นจึงนำมาวางให้แห้ง พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณของ CMC_H เพิ่มขึ้น โดยค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลสามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สูตร 12 (37%) > สูตร 11 (32%) > สูตร 10 (26%) > สูตร 9 (22%) > สูตร 8 (20%) ผลการทดลองเป็นไปทำนองเดียวกับเมื่อใช้ CMC_L กับ SF ในอัตราส่วนเดียวกัน



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ
เปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล เทียบกับปริมาณ CMC_H



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำ และเปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล

จากรูปที่ 4.18 พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าสูงขึ้น และปริมาณสัดส่วนเจลมีค่าสูงขึ้นด้วย แสดงว่าพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เกิดภายใน CMC และจากรูปที่ 4.19 พบว่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำสูงขึ้นตามเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจล อธิบายได้ว่า CMC ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงมีหมู่ $-COO^-$ และ $-OH$ ที่สามารถเกิด Bound water กับน้ำ ยิ่ง CMC มีปริมาณ หมู่ $-COO^-$ ก็จะมากด้วย การกักเก็บน้ำจึงดีขึ้น

ผลการศึกษาอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 8-12 ที่เตรียมจากการผสม 5% (w/v) CMC_H กับ 2% (w/v) SF ในอัตราส่วนต่างๆ คือ 5:25, 10:20, 15:15, 20:10 และ 25:5 โดยปริมาตร ตามลำดับ พบว่าจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ เมื่อมีปริมาณ CMC_H เพิ่มขึ้นจะทำให้ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อดูดซับน้ำ แผ่นฟิล์ม CMC_H (สูตร 13) ที่มีสารก่อพันธะเชื่อมโยงและสารริเริ่มปฏิกิริยาละลายน้ำได้หมดภายในเวลา 6 ชั่วโมง และแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 14 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง $CMC_H : SF$ เท่ากับ 20 : 10 โดยปริมาตร ไม่มีการเติมกลีเซอรอล พบว่าชิ้นงานเสีรูปร่างไม่สามารถคงรูปเป็นแผ่นได้เมื่อดูดซับน้ำ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเมื่อปริมาณ CMC_H เพิ่มขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของพีคที่บริเวณเลขคลื่น $1000-1200\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นของ C-O stretching จะมีความเข้มและความคมมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของ CMC_H มากขึ้น อธิบายได้ว่า CMC_H สามารถเข้าไปเชื่อมโยงภายในโครงสร้างแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมากขึ้น และจะปรากฏพีคที่เลขคลื่นปริมาณ $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ กว้างและความคมลดลง เนื่องจากการซ้อนทับกันระหว่าง N-H Stretching ของ ไหมไฟโบรอินกับ O-H stretching ของ CMC_H ที่เพิ่มขึ้น

ผลการดูดซับน้ำพบว่าเมื่อปริมาณ CMC_H เพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับน้ำมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณ CMC_H เพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) มากขึ้นสายโซ่พอลิเมอร์ CMC เกิดการผลัดกันและขยายตัวมากขึ้นน้ำจึงสามารถแทรกตัวเข้าไปได้มาก

ผลการดูดซับน้ำที่สมดุลมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการดูดซับน้ำซึ่งสูตร 12 มีอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF เท่ากับ 25:5 โดยปริมาตร มีปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลสูงสุด เท่ากับ 2275%

ผลการกักเก็บน้ำพบว่าสูตร 12 มีอัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF เท่ากับ 25:5 โดยปริมาตร สามารถกักเก็บน้ำได้มากกว่าสูตรอื่นๆ เนื่องจากมีปริมาณ CMC_H มาก จึงมีปริมาณหมู่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณน้ำที่ระเหยได้ยาก (Bound water) ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) ของ CMC มากขึ้น

ผลของค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของ CMC_H เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณ CMC_H มาก ทำให้สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่าง CMC_H กับสารก่อพันธะเชื่อมโยงได้มากขึ้น ส่วนที่ไม่ละลายจึงเพิ่มขึ้น









เมื่อเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ใช้ CMC_L กับ CMC_H ที่มีส่วนผสม SF เท่ากัน พบว่าแผ่นฟิล์มที่ใช้ CMC_H มีการม้วนตัวหลังแช่น้ำได้ง่ายกว่า เนื่องจาก CMC_H มีสายโซ่โมเลกุลยาวกว่า นั่นคือมีหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) มากกว่า เท่ากับเป็นการเพิ่มแรงผลัด ทำให้มีปริมาตรอิสระมาก สายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้อย่างอิสระ น้ำจึงสามารถเข้าไปแทรกตัวเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ $-COO^-$ ของ CMC อยู่ภายในโครงสร้าง และหมู่ $-COO^-$ สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่าง CMC_H กับสารก่อพันธะเชื่อมโยงได้มากกว่า จึงทำให้การดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลมีค่าสูงกว่า

4.3 ศึกษาผลของปริมาณ BIS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 15-17

จากการวิจัยในตอนต้นที่ 2 พบว่าการใช้ CMC_H ทำให้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้มีวงอตัวเมื่อนำมาแช่น้ำ ในการวิจัยตอนที่ 3 นี้จึงศึกษาการเพิ่มปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยง (BIS) จาก 0.2 g เป็น 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ โดยใช้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลอัตราส่วน $CMC_H : SF$ เท่ากับ 20 : 10 โดยปริมาตร ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.6

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ

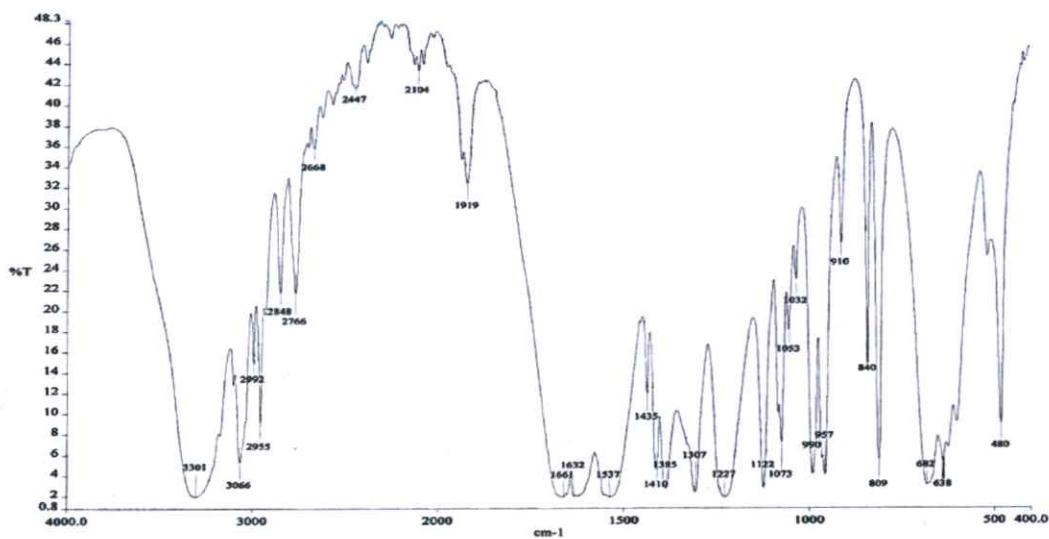
ตารางที่ 4.6 รูปชิ้นงานก่อนและหลังแช่น้ำกลั่น สูตร 15-17 เปรียบเทียบกับ สูตร 11

สูตร	รูปก่อนแช่น้ำ	รูปหลังแช่น้ำ	ลักษณะชิ้นงานหลังแช่น้ำ
11			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
15			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
16			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเล็กน้อยเมื่อจุ่มแช่น้ำ
17			ชิ้นงานบวมตัวเล็กน้อย ไม่เกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ

การใช้ปริมาณของ N, N'-methylene-bis-(acrylamide) (BIS) ที่แตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานที่ปรากฏอย่างมาก โดยทำให้ลักษณะการม้วนงอที่ปรากฏหลังแช่น้ำของชิ้นงานต่างกัน โดยชิ้นงานที่มีปริมาณ BIS 0.8 g (สูตร 18) เกิดการม้วนงอตัวน้อยที่สุด อธิบายได้ว่า มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ทำให้กระจายของพันธะเชื่อมโยงดีขึ้น จึงช่วยรักษารูปร่างของชิ้นงานให้คงสภาพอยู่ได้

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide) ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร โดยทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของ BIS เพื่อให้ได้อินฟราเรดสเปกตรัมมาใช้ในการเปรียบเทียบกับอินฟราเรดสเปกตรัมของแผ่นฟิล์มในสูตรต่างๆ อินฟราเรดสเปกตรัมของ BIS แสดงดังรูปที่ 4.19

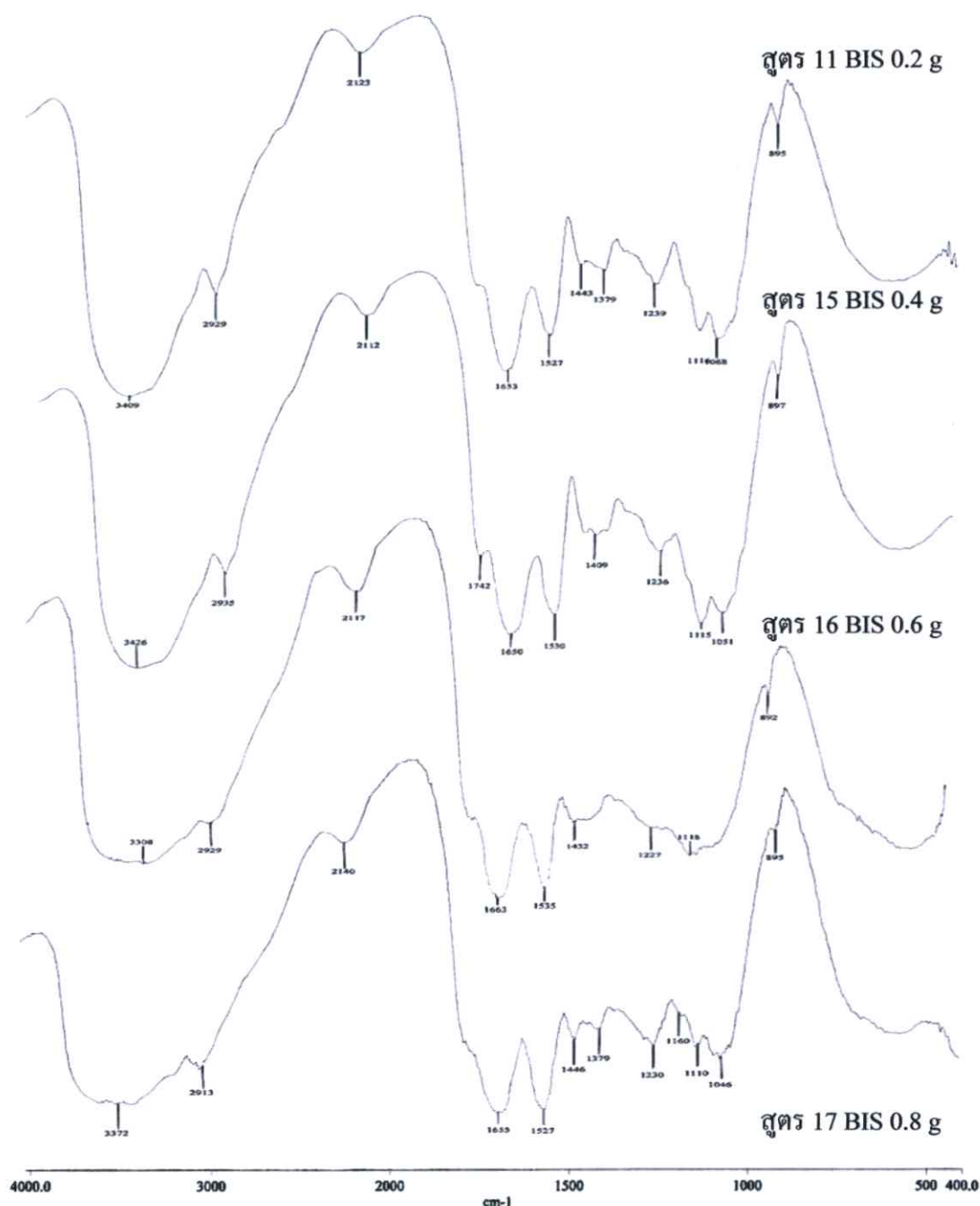


รูปที่ 4. 20 แสดง IR spectrum ของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide)

จากรูปที่ 4.20 แสดง IR spectrum ของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide) (BIS) โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ 3301 cm^{-1} คือ N-H stretching ของเอไมด์ (Amide) ที่เลขคลื่นประมาณ 1661 และ 1632 cm^{-1} คือ C=O ของเอไมด์และ C=C ตามลำดับ และที่เลขคลื่นประมาณ 1537 cm^{-1} คือ N-H bending ของเอไมด์ ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้พบอยู่ในโครงสร้างของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide)

ตารางที่ 4.7 สรุปเลขคลื่นที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide) ที่ปรากฏในรูปที่ 4.20

เลขคลื่น (cm^{-1})	ช่วงการดูดกลืน
3300-3400	N-H stretching
1620-1670	C=O (Amide)
1600-1660	C=C
1537	N-H bending
1030-1130	C-O
1000-1230	C-N stretching



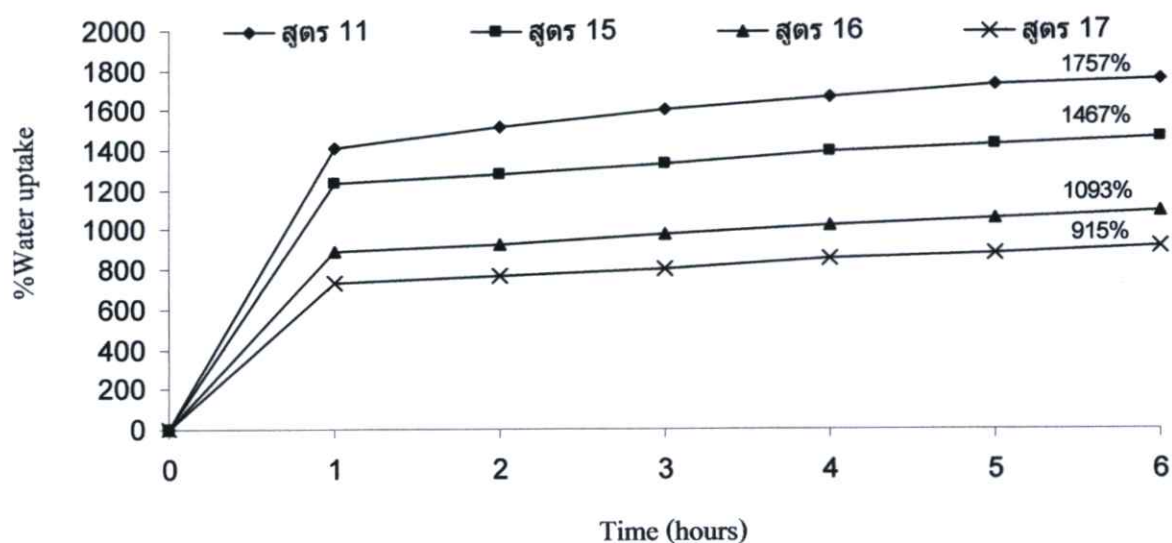
รูปที่ 4.21 แสดง IR spectra ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีปริมาณสารก่อกันระเชื่อมโยง (BIS) ต่างกัน สูตร 15-17 เทียบกับสูตร 11

จากรูปที่ 4.21 เปรียบเทียบ IR spectrum ของสูตร 15-17 กับ สูตร 11 (BIS 0.2 g) ซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารก่อกันระเชื่อมโยง N, N'-methylene- bis-(acrylamide) (BIS) 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง 400-4000 cm^{-1} พบว่าพีก N-H bending ของ BIS ที่เลขคลื่นประมาณ 1537 cm^{-1} มีการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณ BIS ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า BIS สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับแผ่นฟิล์มผสมได้มากขึ้น

4.3.3 สมบัติการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเมื่อเพิ่มปริมาณ BIS

4.3.3.1 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

ตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาด 2x2 เซนติเมตร นำตะแกรงลวดเปล่า และชิ้นงาน ไปซั่งเพื่อให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง ชั่วโมง เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (water uptake) ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.22

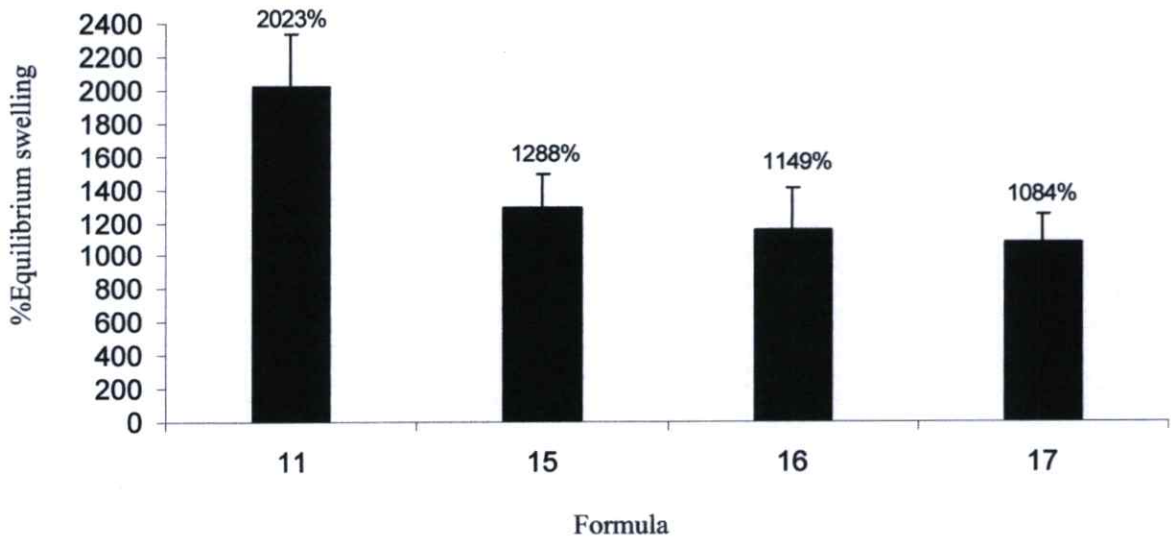


รูปที่ 4.22 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 กับ สูตร 11

จากรูปที่ 4.22 พบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นใน 1 ชั่วโมงแรกอย่างรวดเร็ว โดยสูตร 15 (BIS 0.4 g) ดูดซับน้ำได้เท่ากับ 1467 % สูตร 16 (BIS 0.6 g) มีค่าเท่ากับ 1093 % และสูตร 17 (BIS 0.8 g) มีค่าเท่ากับ 915 % แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของสูตร 11 (BIS 0.2 g) ซึ่งดูดซับน้ำได้เท่ากับ 1757 % พบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือสูตร 15 รองลงมาคือสูตร 16 และสุดท้ายคือสูตร 17 อธิบายได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของสารก่อกวนระเชื่อมโยง (BIS) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณสารก่อกวนระเชื่อมโยงมากจะเป็นการเพิ่มจำนวนของจุดเชื่อมโยง ทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงช่องว่างระหว่างจุดเชื่อมโยงแคบลง ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างได้น้อยลง ดังนั้นแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจึงบวมตัวได้น้อย และมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง

4.3.3.2 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จุดสมดุลเป็นจุดที่แสดงความสามารถสูงสุดในการดูดซึมน้ำของแผ่นฟิล์ม ในการหาจุดสมดุลดังกล่าวทำได้โดยแช่ชิ้นงานขนาด 2x2 cm ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้จนถึงค่าที่อิ่มตัวสูงสุด แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนัก กำหนดหาปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุล (Equilibrium swelling) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.22

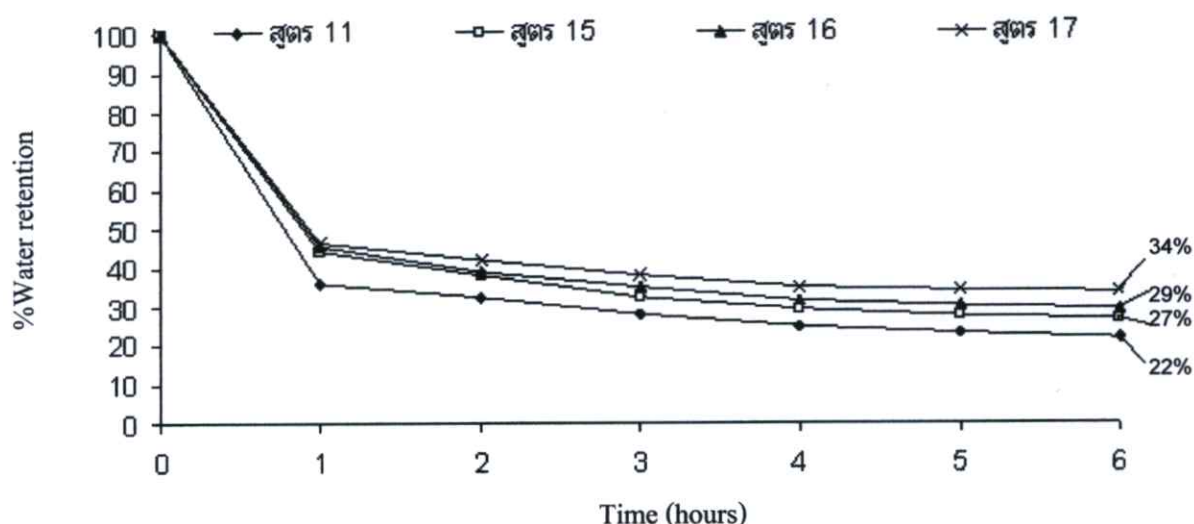


รูปที่ 4.23 กราฟการดูดซับน้ำสมดุล (%) ในน้ำกลั่น ณ จุดสมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 เปรียบเทียบกับ สูตร 11

จากรูปที่ 4.23 เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 15-17 ซึ่งมีปริมาณ BIS แตกต่างกันมาทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลของสูตร 11 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลมีค่าลดลง เมื่อมีปริมาณ BIS เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเหตุผลเช่นเดียวกับข้อ 4.3.3.1 ที่กล่าวมาข้างต้น แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลสูงที่สุดคือ สูตร 11 (BIS 0.2 g) สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้เท่ากับ 2023 % และแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลต่ำที่สุดคือ สูตร 17 (BIS 0.8 g) สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้เท่ากับ 1084 %

4.3.3.3 สมบัติการกักเก็บน้ำของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

นำชิ้นงานที่บวมตัวสูงสุดมาอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (สมมุติให้เป็นอุณหภูมิร่างกาย) โดยทำการบันทึกน้ำหนักก่อนอบไว้ แล้วชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำหนักที่ชั่งได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่หายไป นั่นคือความสามารถในการเก็บความชื้นของชิ้นงานเมื่อนำมาใช้บนร่างกาย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.23

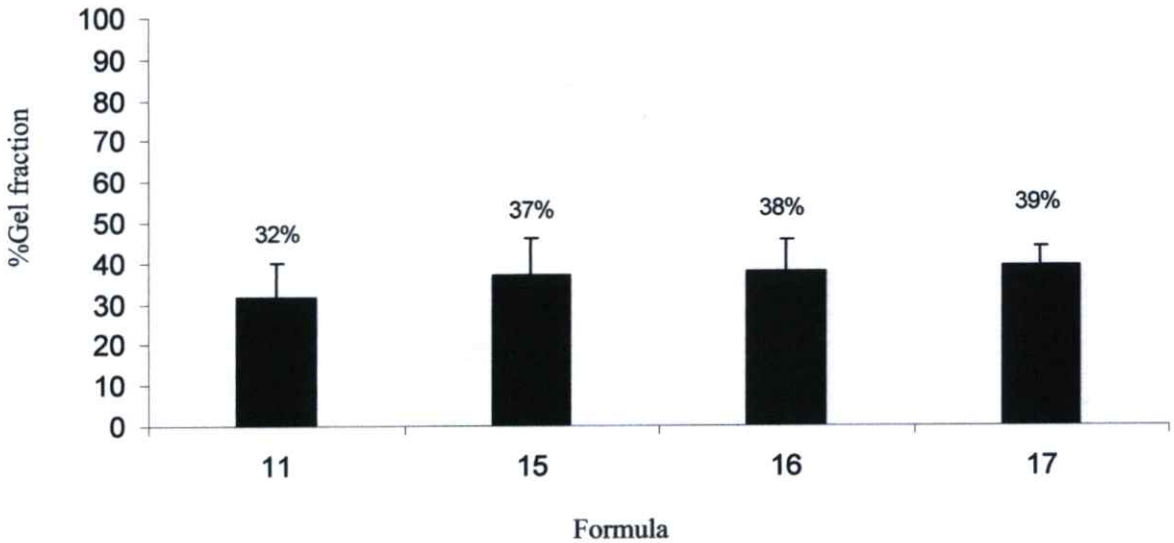


รูปที่ 4.24 กราฟเปรียบเทียบการกักเก็บน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 กับ สูตร 11

จากรูปที่ 4.24 เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 15-17 ซึ่งมีปริมาณ BIS แตกต่างกันคือ 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำของสูตร 11 (BIS 0.2 g) พบว่าน้ำหนักของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่น้ำระเหยออกไปจากแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในเวลา 6 ชั่วโมง แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำดีที่สุดมีน้ำเหลืออยู่ 34 % คือสูตร 17 (BIS 0.8 g) และแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการลดลงของน้ำมากที่สุดคือสูตร 11 (BIS 0.2 g) ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำเท่ากับ 22 % แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารก่อกวนระเชื่อมโยงทำให้การระเหยของน้ำออกจากแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้ช้าลง เนื่องจากการกีดขวางของโครงสร้างที่มีการเชื่อมโยงอย่างหนาแน่นทำให้น้ำที่ติดอยู่กับหมู่มีซิว (Bound water) ที่แทรกตัวอยู่ภายใน โครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลระเหยออกไปได้ยาก

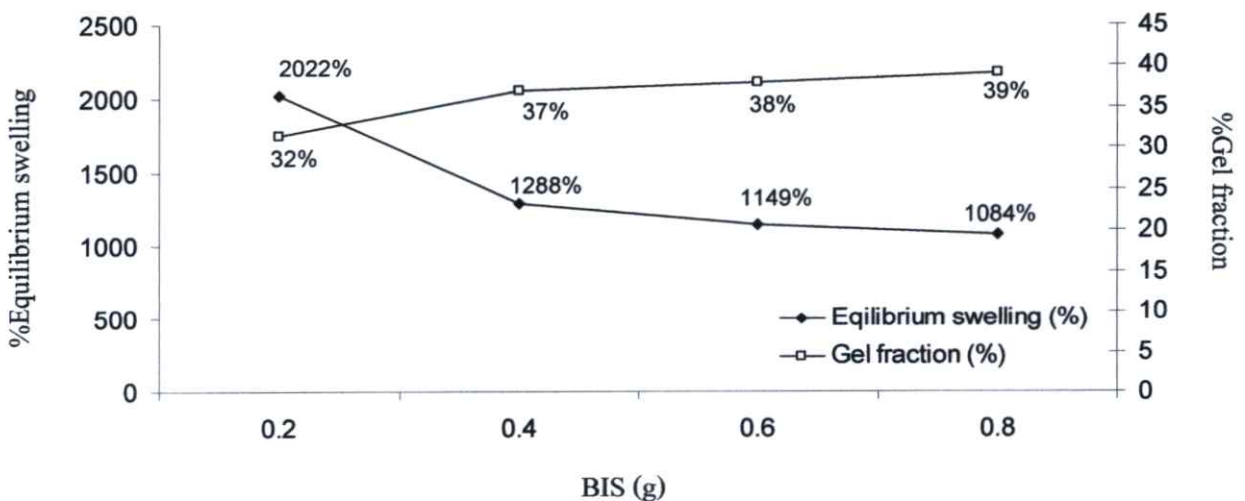
4.3.3.4 เปอร์เซนต์ค่าสัดส่วนเจล

ค่าสัดส่วนเจลแสดงถึงโมเลกุลที่ไม่ละลายน้ำเพราะเกิดการเชื่อมโยง โดยส่วนที่ไม่ละลายสูงน่าจะเป็นพันธะเชื่อมโยงได้มาก



รูปที่ 4.25 กราฟเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเจล (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 กับ สูตร 11

เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 ซึ่งมีปริมาณ BIS แตกต่างกันคือ 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ มาแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารเคมีที่ไม่เกิดพันธะละลายออก จากนั้นจึงนำมาวางให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนัก จากรูปที่ 4.25 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 15-17 เปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11 (BIS 0.2 g) สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สูตร 17 (39 %) > สูตร 16 (38 %) > สูตร 15 (37 %) > สูตร 11 (32 %) แสดงว่าค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณ BIS มากขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยงมากจะทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้น และโครงสร้างเกิดเป็นโครงร่าง 3 มิติ แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจึงมีความแข็งแรง การดูดซับน้ำลดลง ปริมาณของแข็งส่วนที่ไม่ละลายน้ำจึงมีปริมาณมาก [53, 54]



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ
เปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล เทียบกับปริมาณ BIS

จากรูปที่ 4.26 พบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถจุน้ำได้สูงสุด เมื่อสารก่อพันธะเชื่อมโยง (BIS) มีค่าเท่ากับ 0.2 g แต่มีค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลดน้อยที่สุด อธิบายได้ว่า เมื่อมีปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยงน้อย แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลก็จะมีพันธะเชื่อมโยงน้อย โครงร่างตาข่ายอยู่กันอย่างหลวมๆ จึงส่งผลให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้ง่ายขึ้น [53]

ผลการศึกษาปริมาณ BIS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 15-17 ซึ่งมีการเพิ่มปริมาณสารก่อพันธะเชื่อมโยง (BIS) จาก 0.2 g เป็น 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ โดยใช้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมจากการผสม 5% (w/v) CMC_H กับ 2% (w/v) SF ในอัตราส่วน CMC_H : SF เท่ากับ 20 : 10 โดยปริมาตร พบว่าจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ เมื่อมีปริมาณ BIS เพิ่มขึ้นจะทำให้ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวลดลงเมื่อดูดซับน้ำ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเมื่อปริมาณ BIS เพิ่มขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของพีคที่บริเวณเลขคลื่น 3300-3400 cm⁻¹ ซึ่งเป็นของ N-H stretching กว้างขึ้น อธิบายได้ว่า BIS สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาเชื่อมโยงภายในโครงสร้างแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้มากขึ้น

ผลการดูดซับน้ำพบว่าเมื่อปริมาณ BIS เพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากจำนวนของจุดเชื่อมโยงมากขึ้น ทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูงช่องว่างระหว่างจุดเชื่อมโยงแคบลง โมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปภายในโครงสร้างได้น้อยลง

ผลการดูดซับน้ำที่สมดุลมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการดูดซับน้ำซึ่งสูตร 11 มีปริมาณ BIS 0.2 g มีปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลสูงสุด เท่ากับ 2023% และสูตร 17 มีปริมาณ BIS 0.8 g มีปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลต่ำสุด เท่ากับ 1084%

ผลการกักเก็บน้ำพบว่าสูตร 17 มีปริมาณ BIS 0.8 g สามารถกักเก็บน้ำได้ดีที่สุด เนื่องจากมีการกีดขวางของการเชื่อมโยงอย่างหนาแน่น ทำให้น้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนกับไฮโดรเจล (Bound water) ที่แทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลระเหยออกไปได้ยาก









ผลของค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลดพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลดของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของ BIS เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง ทำให้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมีความแข็งแรง การดูดซับน้ำลดลง ส่วนที่ไม่ละลายจึงเพิ่มขึ้น

4.4 ศึกษาผลของปริมาณ APS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 18-20

ปฏิกิริยาการต่อกิ่งพอลิเมอร์ (Grafted polymer) และปฏิกิริยาเชื่อมขวางพอลิเมอร์ (Crosslinked polymer) ที่เริ่มต้นด้วยอนุมูลอิสระนั้น ความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยาส่งผลกระทบต่อหน้าหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางระหว่างสายโซ่หลัก ในการทดลองนี้ศึกษาการเพิ่มปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา Ammonium persulfate (APS) จาก 0.2 g เป็น 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ โดยใช้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลอัตราส่วน $CMC_H : SF$ เท่ากับ 20 : 10 โดยปริมาตร ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8

4.4.1 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ

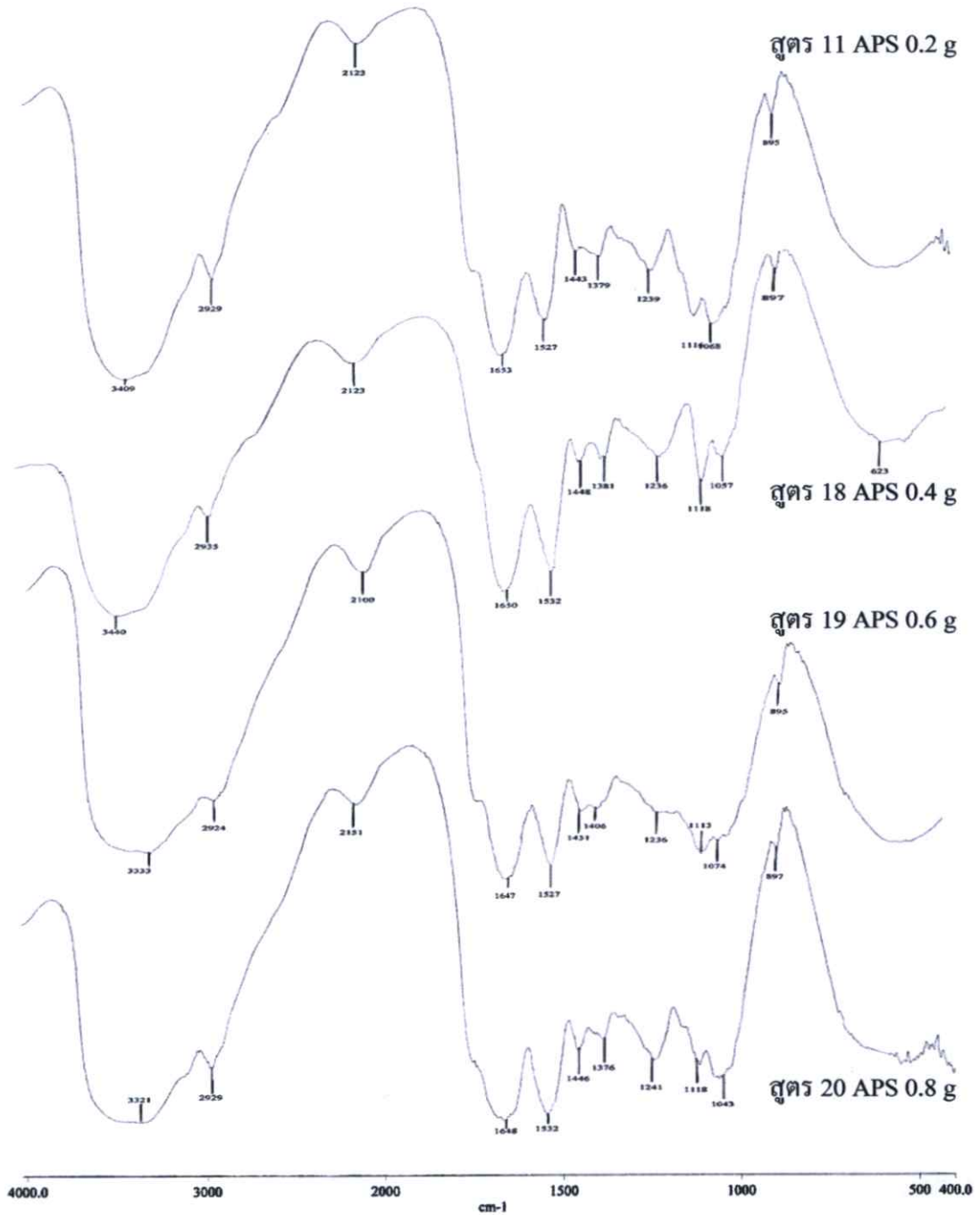
ตารางที่ 4.8 รูปชิ้นงานก่อนและหลังแช่น้ำกลั่น สูตร 18-20 เปรียบเทียบกับ สูตร 11

สูตร	รูปก่อนแช่น้ำ	รูปหลังแช่น้ำ	ลักษณะชิ้นงานหลังแช่น้ำ
11			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
18			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ
19			ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวเล็กน้อยเมื่อจุ่มแช่น้ำ
20			ชิ้นงานบวมตัวเล็กน้อย ไม่เกิดการม้วนตัวเมื่อจุ่มแช่น้ำ

การใช้ปริมาณของ Ammonium persulfate (APS) ที่แตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงานที่ปรากฏอย่างมาก โดยทำให้ลักษณะการม้วนงอที่ปรากฏหลังแช่น้ำของชิ้นงานต่างกัน โดยชิ้นงานที่มีปริมาณ APS 0.8 g (สูตร 20) เกิดการม้วนงอตัวน้อยที่สุด อธิบายได้ว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถเกิดการกระจายของพันธะเชื่อมโยงได้ดีขึ้น เนื่องจากมีจำนวนอนุมูลอิสระมากทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง จึงรักษารูปร่างของชิ้นงานให้คงสภาพอยู่ได้

4.4.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) เพื่อวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ Ammonium persulfate (APS) ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไร แสดงดังรูปที่ 4.27



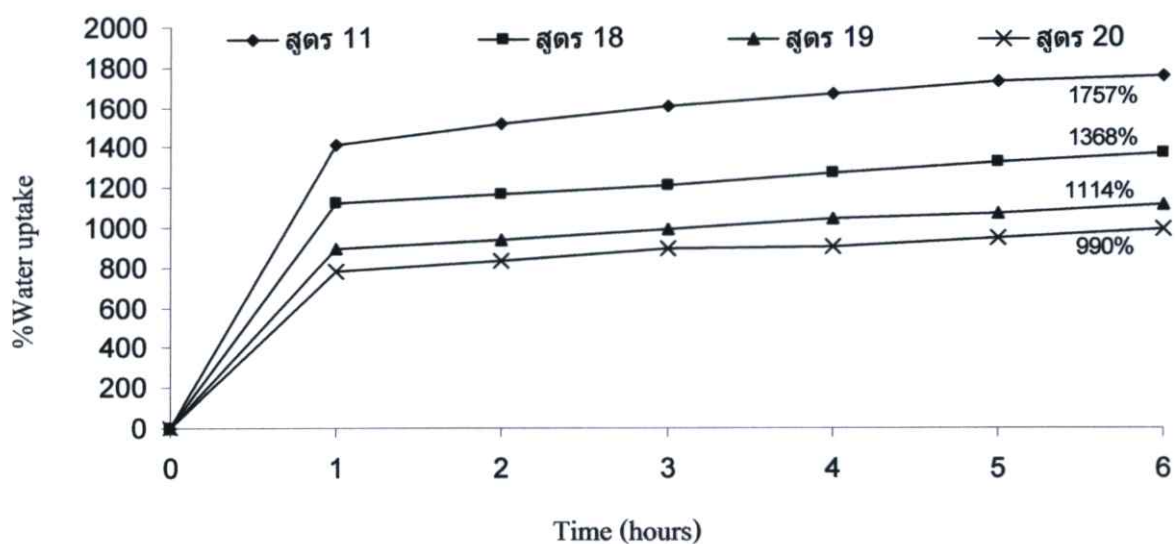
รูปที่ 4.27 แสดง IR spectra ของฟิล์มไฮโดรเจลที่มีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา (APS) ต่างกัน สูตร 18-20 เทียบกับสูตร 11

จากรูปที่ 4.27 เปรียบเทียบ IR spectrum ของสูตร 18-20 กับ สูตร 11 (APS 0.2 g) ซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารก่ออนุมูลอิสระ Ammonium persulfate (APS) 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ โดยพิจารณาที่เลขคลื่นในช่วง $400-4000\text{ cm}^{-1}$ พบว่าปรากฏพีคที่เลขคลื่นประมาณ 1532 cm^{-1} มีการดูดกลืนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ APS ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณ APS มากจะเป็นการเพิ่มจำนวนของอนุมูลอิสระ ทำให้แผ่นฟิล์มผสมสามารถทำปฏิกิริยากับสารก่อพันธะเชื่อมโยง BIS ได้มากขึ้น จึงปรากฏพีค N-H bending ของ BIS มากขึ้น

4.4.3 สมบัติการดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเมื่อเพิ่มปริมาณ APS

4.4.3.1 สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

ตัดชิ้นงานตัวอย่างขนาด 2×2 เซนติเมตร นำตะแกรงลวดเปล่า และชิ้นงานไปซังเพื่อให้ทราบน้ำหนักที่แน่นอน จากนั้นนำไปแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้อง จดน้ำหนักที่เพิ่มทุกๆ 1 ชั่วโมง จนครบ 6 ชั่วโมง ชั่วโมง เพื่อทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ (water uptake) ได้ผลการทดลองตามรูปที่ 4.28



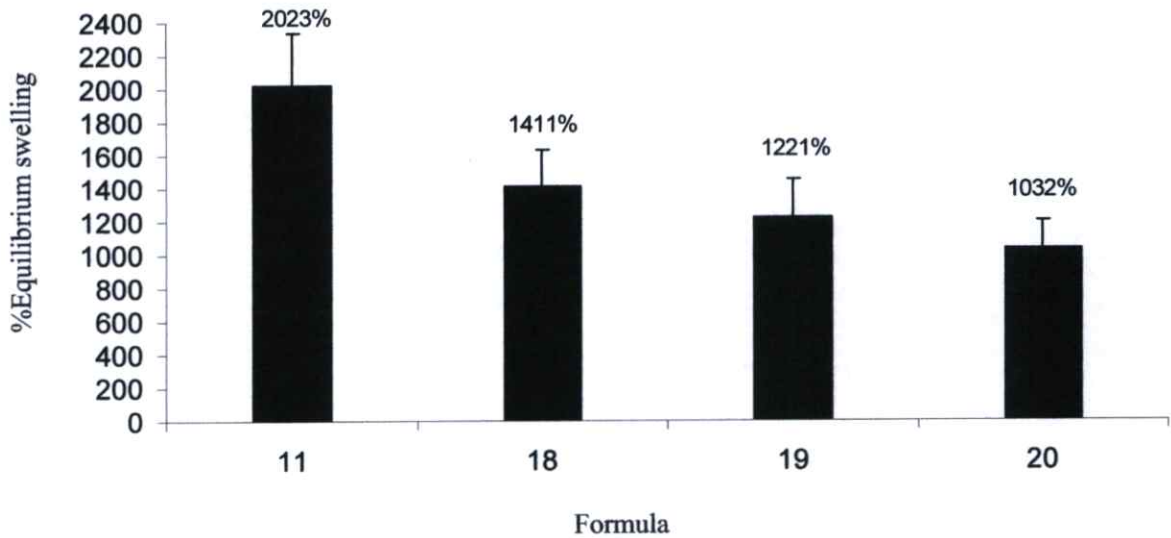
รูปที่ 4.28 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 กับ สูตร 11

จากรูปที่ 4.28 พบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำเพิ่มขึ้นใน 1 ชั่วโมงแรก โดยสูตร 18 (APS 0.4 g) ดูดซับน้ำได้เท่ากับ 1368 % สูตร 19 (APS 0.6 g) มีค่าเท่ากับ 1114 % และสูตร 20 (APS 0.8 g) มีค่าเท่ากับ 990 % และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของสูตร 11 (APS 0.2 g) ซึ่งดูดซับน้ำได้เท่ากับ 1757 % แสดงว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำมีค่าลดลง เมื่อปริมาณของตัวริเริ่มปฏิกิริยา (APS) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณตัวริเริ่ม

ปฏิริยามากจะเป็นการเพิ่มจำนวนของอนุพลอิสระที่เกิดจากการสลายตัวของ ตัวริเริ่มปฏิริยา (APS) ทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงภายใน โครงสร้างสูง พอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ CMC สั้นลง ทำให้ช่องว่างภายใน โครงตาข่ายร่างแหเล็กกลง [52, 53] ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเข้าไปภายใน โครงสร้างได้น้อยลง ดังนั้นแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจลจึงมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำลดลง

4.4.3.2 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง

จุดสมดุลเป็นจุดที่แสดงความสามารถสูงสุดในการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์ม ในการหาจุดสมดุลดังกล่าวทำได้โดยแช่ชิ้นงานขนาด 2x2 cm ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานสามารถดูดซับน้ำได้จนถึงค่าที่อิ่มตัวสูงสุด แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาชั่งน้ำหนัก คำนวณหาปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุล (Equilibrium swelling) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.29

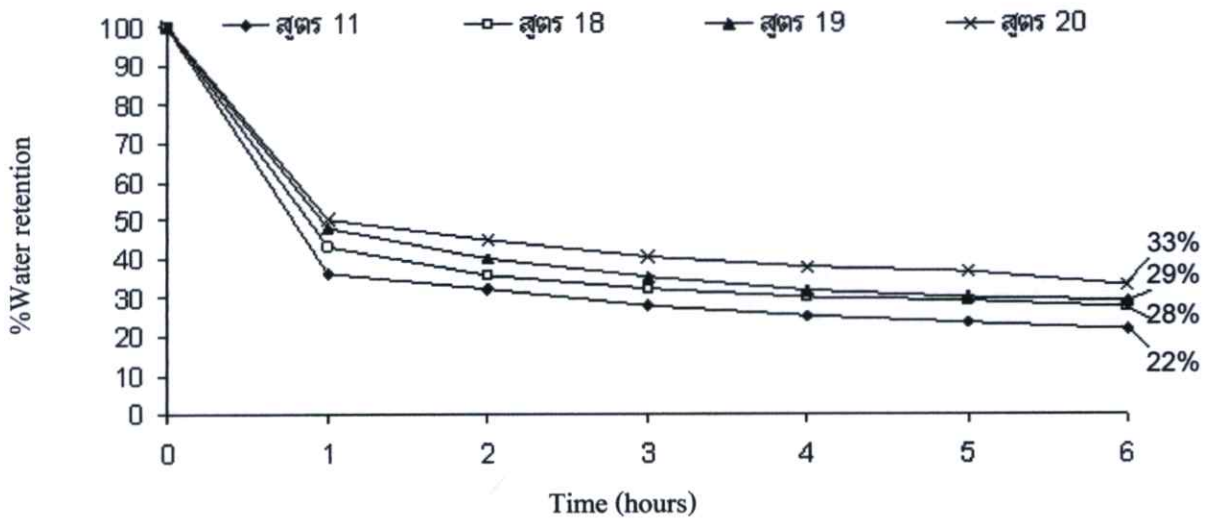


รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับน้ำสมดุล (%) ในน้ำกลั่น ณ จุดสมดุลของแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจล สูตร 18-20 กับ สูตร 11

จากรูปที่ 4.29 เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 18-20 ซึ่งมีปริมาณ APS แตกต่างกันมาทดสอบปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลเป็นเวลา 72 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลของสูตร 11 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลมีค่าลดลง เมื่อมีปริมาณของ APS เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากเหตุผลเช่นเดียวกันกับข้อ 4.4.3.1 ที่กล่าวมาข้างต้น โดยแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลสูงที่สุดคือ สูตร 11 (APS 0.2 g) สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้เท่ากับ 2023 % และแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่สมดุลต่ำที่สุดคือ สูตร 20 (APS 0.8 g) สามารถดูดซับน้ำที่สมดุลได้เท่ากับ 1032 %

4.4.3.3 สมบัติการกักเก็บน้ำของแผ่นฟิล์มในน้ำกลั่น

นำชิ้นงานที่บวมตัวสูงสุดมาอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (สมมุติให้เป็นอุณหภูมิร่างกาย) โดยทำการบันทึกน้ำหนักก่อนอบไว้ แล้วชั่งน้ำหนักที่ลดลงทุกๆ 1 ชั่วโมงจนครบ 6 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำหนักที่ชั่งได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของน้ำที่หายไป นั่นคือความสามารถในการเก็บความชื้นของชิ้นงานเมื่อนำมาใช้บนร่างกาย ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.30

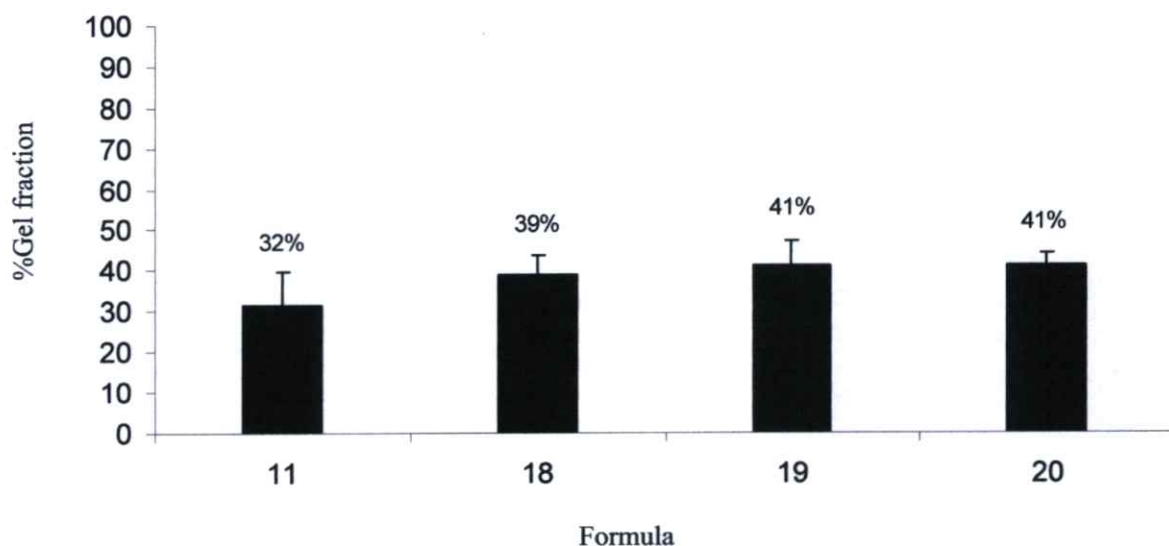


รูปที่ 4.30 กราฟเปรียบเทียบการกักเก็บน้ำ (%) ในน้ำกลั่นเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 กับ สูตร 11

จากรูปที่ 4.30 เมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 18-20 ซึ่งมีปริมาณ APS แตกต่างกันคือ 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำของสูตร 11 (APS 0.2 g) พบว่าน้ำหนักของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่น้ำระเหยออกไปจากแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในเวลา 6 ชั่วโมง แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำดีที่สุดยังมีน้ำเหลืออยู่ 33 % คือสูตร 20 และแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีการลดลงของน้ำมากที่สุดคือสูตร 11 ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การกักเก็บน้ำเท่ากับ 22 % แสดงว่าการเพิ่มปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยาทำให้การระเหยของน้ำออกจากแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้ช้าลง เนื่องจากโครงสร้างที่มีการเชื่อมโยงอย่างหนาแน่น ทำให้น้ำที่แทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างระเหยออกไปจากโครงสร้างได้ยาก

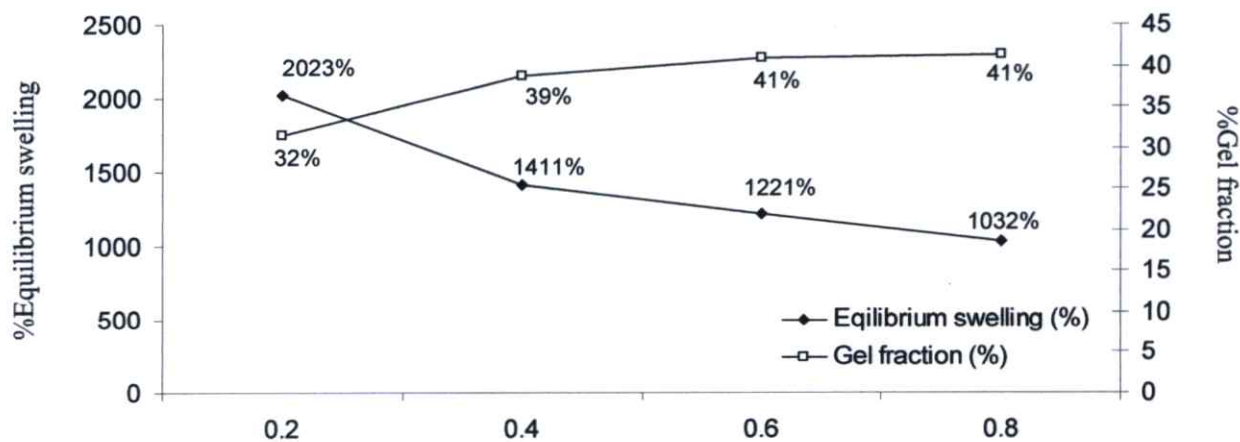
4.4.3.4 เปอร์เซนต์ค่าสัดส่วนเจล

ค่าสัดส่วนเจลแสดงถึงโมเลกุลที่ไม่ละลายน้ำเพราะเกิดการเชื่อมโยง ส่วนที่ไม่ละลายสูงน่าจะทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงมาก



รูปที่ 4.31 กราฟเปรียบเทียบค่าสัดส่วนเจล (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 กับ สูตร 11

เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 ซึ่งมีปริมาณของ APS แตกต่างกันคือ 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ มาแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้สารเคมีที่ไม่เกิดพันธะละลายออก จากนั้นจึงนำมาวางให้แห้ง จากรูปที่ 4.31 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 18-20 เปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11 (APS 0.2 g) สามารถเรียงลำดับได้ดังนี้ สูตร 20 (41 %) > สูตร 19 (41 %) > สูตร 18 (39 %) > สูตร 11 (32 %) แสดงว่าค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณ APS มากขึ้น เนื่องจากการมีปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยามากทำให้เกิดพันธะเชื่อมโยงได้มาก ส่งผลให้มีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงสูง แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจึงมีความแข็งแรง และมีปริมาณของแข็งส่วนที่ไม่ละลายน้ำมาก



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ
เปอร์เซ็นต์ค่าสัดส่วนเจล เทียบกับปริมาณ APS

จากรูปที่ 4.32 พบว่าลักษณะของเส้นกราฟคล้ายกับรูปที่ 4.24 อธิบายได้ว่า เมื่อมีปริมาณ APS มาก เช่น 0.8 g จะเกิดการสลายตัวให้อนุมูลอิสระมาก เร่งให้เกิดปฏิกิริยาสิ้นสุด (Termination reaction) เร็วขึ้น นั่นคือ เกิดการเชื่อม โยงมาก และสายโซ่พอลิเมอร์ที่เชื่อมขวางสั้น ส่งผลให้น้ำแทรกซึมเข้าไปในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้ยาก [53]

ผลการศึกษาปริมาณ APS ที่มีต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มสูตร 18-20 ซึ่งมีการเพิ่มปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยา (APS) จาก 0.2 g เป็น 0.4, 0.6 และ 0.8 g ตามลำดับ โดยใช้แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมจากการผสม 5% (w/v) CMC_H กับ 2% (w/v) SF ในอัตราส่วน CMC_H : SF เท่ากับ 20 : 10 โดยปริมาตร พบว่าจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของชิ้นงานที่ปรากฏ เมื่อมีปริมาณ APS เพิ่มขึ้นจะทำให้ชิ้นงานบวมตัวและเกิดการม้วนตัวลดลงเมื่อดูดซับน้ำ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเมื่อปริมาณ APS เพิ่มขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงของพีคของ N-H bending ของ BIS เข้มและชัดเจนมากขึ้น อธิบายได้ว่า APS เข้าไปเพิ่มจำนวนอนุมูลอิสระทำให้แผ่นฟิล์มเกิดปฏิกิริยาเชื่อม โยงกับ BIS ได้มากขึ้น

ผลการดูดซับน้ำพบว่าเมื่อปริมาณ APS เพิ่มขึ้นจะทำให้การดูดซับน้ำมีค่าลดลง เนื่องจากมีจำนวนอนุมูลอิสระมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มจุดของการเชื่อม โยงทำให้มีความหนาแน่นของการเชื่อม โยงสูงช่องว่างภายในโครงสร้างเล็กลง โมเลกุลของน้ำจึงเข้าไปภายในโครงสร้างได้น้อยลง

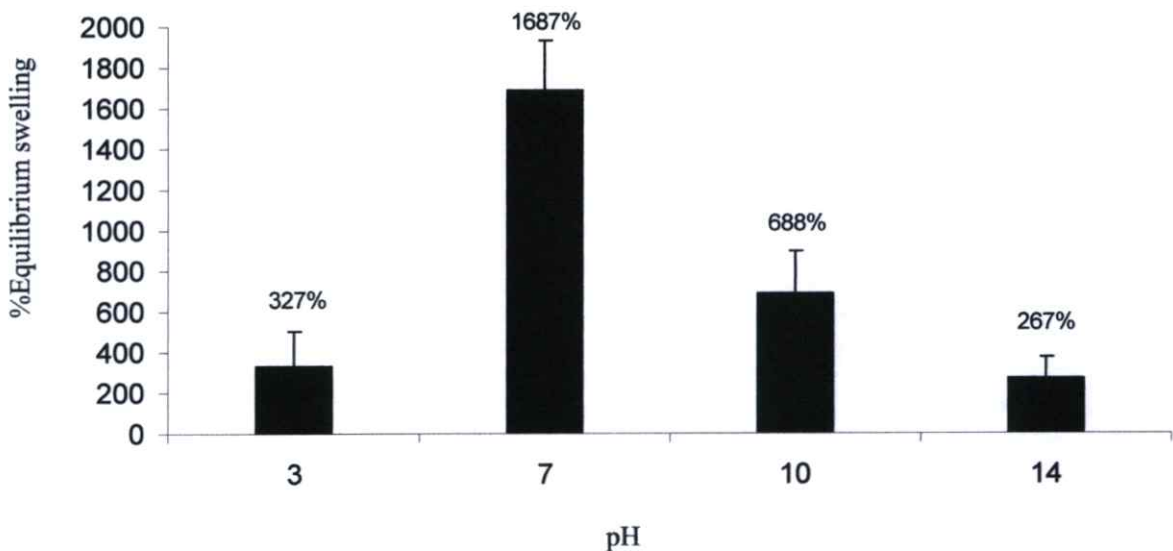
ผลการดูดซับน้ำที่สมดุลมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการดูดซับน้ำซึ่งสูตร 11 มีปริมาณ APS 0.2 g มีปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลสูงสุด เท่ากับ 2023% และสูตร 20 มีปริมาณ APS 0.8 g มีปริมาณการดูดซับน้ำที่สมดุลต่ำสุด เท่ากับ 1032%

ผลการกักเก็บน้ำพบว่าสูตร 20 มีปริมาณ APS 0.8 g สามารถกักเก็บน้ำได้ดีที่สุด เนื่องจากมีการกีดขวางของการเชื่อม โยงอย่างหนาแน่น ทำให้น้ำที่แทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลระเหยออกไปได้ยาก

ผลของค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์สัดส่วนเจลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของ APS เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีจำนวนจุดเชื่อม โยงมากทำให้ความหนาแน่นของการเชื่อม โยงสูง แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลจึงมีความแข็งแรงและมีส่วนที่ไม่ละลายเพิ่มขึ้น

4.5 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 3, 7, 10 และ 14

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุล (72 ชั่วโมง) ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 3, 7, 10 และ 14 ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้จาก 5% (w/v) CMC ผสมกับ 2% (w/v) SF ซึ่งงานที่ทำขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้ เช่น ใช้ในการนำพาเข้าสู่ร่างกาย โดยเป็นไฮโดรเจลชนิด Polyanionic ซึ่งจะบวมตัวน้อยใน pH ที่เป็นกรดเหมาะสำหรับนำพาเพื่อปลดปล่อยใน Intestinal tract เนื่องจาก pH ที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดไอออนในเซชันของหมู่ COOH จึงใช้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH ใกล้เคียงกับระบบทางเดินอาหาร เช่น น้ำย่อยมี pH 1-2, ลำไส้เล็กมี pH 7.5-8.6 โดยทำการศึกษาแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11 อัตราส่วน $CMC_H : SF$ เท่ากับ 20 : 10 โดยปริมาตรได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.33

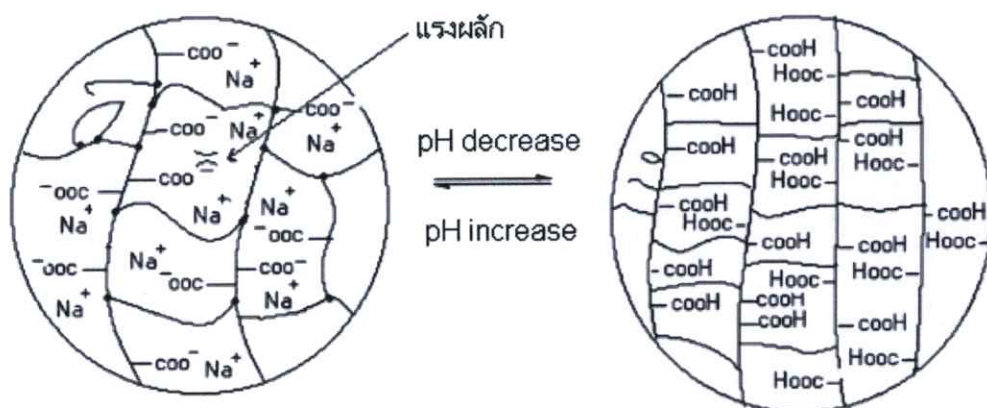


รูปที่ 4.33 กราฟการดูดซับน้ำที่สมดุล (%) ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH 3, 7, 10 และ 14 ณ จุดสมดุล ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11

จากรูปที่ 4.33 เมื่อนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลแช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ pH 3 แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้น้อย เพราะในสภาวะกรดหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) ของ CMC อยู่ในสภาพ ($-COOH$) จะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง $-OH$ และ $-COOH$ มากขึ้น เป็น Physical crosslink มากขึ้น [62] การดูดน้ำจึงลดลง ส่วนในสภาวะด่างที่สารละลายบัฟเฟอร์ pH 10 หมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) จะแตกตัวให้โปรตรอนเกิดเป็นหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) และเกิดแรงผลักไฟฟ้าสถิตของหมู่ ($-COO^-$) เป็นผลให้เกิดการพองตัวมากขึ้น โมเลกุลของน้ำจึงสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้มาก แต่ภายใต้สภาวะที่สารละลายบัฟเฟอร์มีความเป็นด่างสูง เช่น สารละลายบัฟเฟอร์ pH 14 แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเกิด Deswelling ก็คือดูดซับน้ำน้อยกว่าที่ pH 10

เนื่องจากประจุบวกมี Na^+ ที่มาจากค้างอยู่จำนวนมากในสารละลายบัฟเฟอร์เกิดการบดบังของหมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COO}^-$) [52, 53] ซึ่งส่งผลต่อแรงผลักระหว่างประจุลบลดลง จึงทำให้การพองตัวมีค่าลดลง นั่นคือแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถดูดซับน้ำได้ลดลง

การดูดซับน้ำสูงสุดของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง 5% (w/v) CMC ผสมกับ 2% (w/v) SF อัตราส่วน $\text{CMC}_H : \text{SF}$ เท่ากับ 20 : 10 โดยปริมาตร พบว่าอยู่ที่ pH 7 ที่จุดนี้มีหมู่ $-\text{COOH}$ อยู่ในสภาพ ($-\text{COO}^-$) เกิดการผลักรันของประจุลบ น้ำแทรกเข้าไปในไฮโดรเจลได้ง่าย ผลต่างแรงดันออสโมติกระหว่างสารละลายภายในโครงตาข่ายของพอลิเมอร์อยู่ในสมดุล [53] การผสมพอลิเมอร์ที่มีความชอบน้ำต่างไปจาก CMC เช่น SF ซึ่งจัดเป็นพอลิเมอร์ชอบน้ำ (Hydrophilic polymer) เนื่องจากมีหมู่ $-\text{NH}_2$, $-\text{COOH}$ และ $-\text{NH}-\text{C}(=\text{O})-$ จะช่วยเสริมความสามารถในการดูดน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล แต่จะขัดขวางการเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่าง CMC กันเอง และเกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่าง CMC กับ SF ขึ้น [47] ผลการทดลองเรื่องนี้แสดงว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง CMC กับ SF มีสมบัติเป็น pH-sensitive hydrogel เช่นเดียวกับ Polyanionic hydrogel อื่นๆ [47, 53, 54]



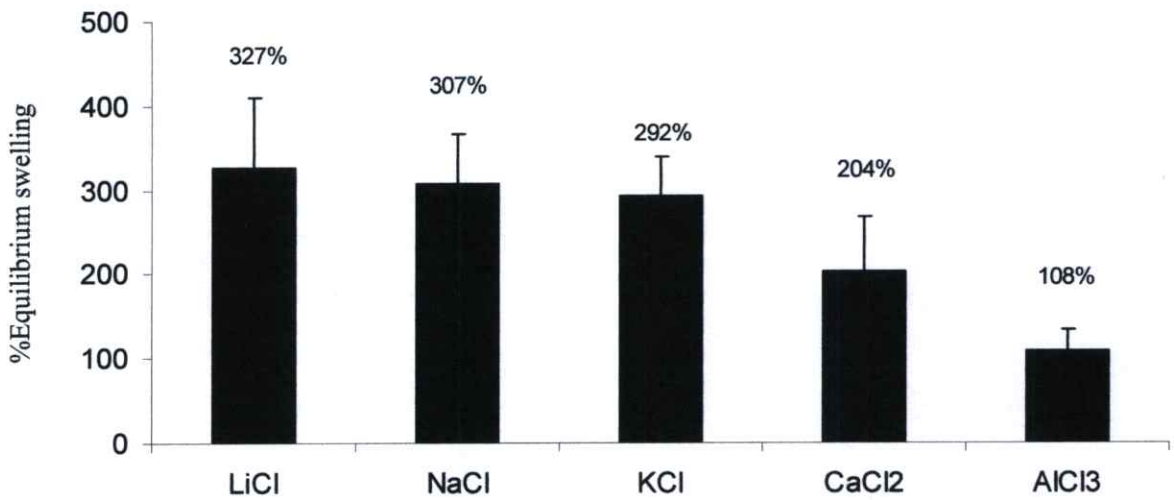
รูปที่ 4.34 แบบจำลองผลของความเป็นกรด-ด่างต่อโครงสร้างการดูดซับน้ำของไฮโดรเจล

จากรูปที่ 4.34 สามารถอธิบายผลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้ว่า ที่สารละลายบัฟเฟอร์มีความเป็นกรด (pH ลดลง) เช่นที่ pH 3 หมู่คาร์บอกซิล ($-\text{COO}^-$) จะมีการรับโปรตรอนไว้อยู่ในสภาพ ($-\text{COOH}$) ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกันเอง หมู่มีขั้วที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำจึงลดลงทำให้สามารถดูดซับน้ำได้น้อย และเมื่อสารละลายบัฟเฟอร์มีความเป็นด่าง (pH เพิ่มขึ้น) เช่น ที่ pH 10 ซึ่งเป็นช่วงเบสอ่อนหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) จะแตกตัวให้โปรตรอนเกิดเป็นหมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COO}^-$) และเกิดแรงผลักรันไฟฟ้าสถิตของ ($-\text{COO}^-$) เป็นผลให้เกิดโครงสร้างมีการพองตัวมากขึ้นน้ำจึงเข้าสู่โครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลได้มาก แต่ที่ความเป็นด่าง สูง เช่น pH 14 ซึ่งเป็นช่วงเบสแก่ ไอออนของโลหะ (Na^+) ที่มี

อยู่เป็นจำนวนมากในสารละลายบัฟเฟอร์นั้นจะเกิดการบดบังบริเวณที่เป็น ($-\text{COO}^-$) ทำให้ความสามารถในการดึงคู่น้ำลดลง

4.6 สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายเกลือ

ในหัวข้อนี้ศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลในสารละลายเกลือของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ได้จาก CMC ผสมกับ SF เนื่องจากชิ้นงานที่ทำขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ได้ เช่น ใช้เป็นปลอกแคปซูลยา จึงเลือกใช้สารละลายเกลือที่มีสภาวะใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมาทดสอบ โดยศึกษาแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11 (CMC:SF, 20:10) แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ สารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่ง ได้แก่ LiCl, NaCl, KCl และสารละลายเกลือที่มีประจุบวกมากกว่าหนึ่ง ได้แก่ CaCl_2 , AlCl_3 ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.35



รูปที่ 4.35 กราฟดูดซับน้ำสมดุล (%) ในสารละลายเกลือของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล สูตร 11 (CMC:SF, 20:10)

จากรูปที่ 4.35 พบว่าแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมีปริมาณการดูดซับน้ำสมดุลในสารละลายเกลือ LiCl ได้สูงสุด ลำดับความสามารถในการดูดซับน้ำเรียงดังนี้ $\text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Al}^{3+}$ เนื่องจาก (i) Li^+ มีขนาดอนุภาคของประจุบวกเล็กที่สุด ซึ่งอนุภาคของประจุบวกที่มีขนาดเล็กจะสามารถดึงคู่น้ำได้เป็นอย่างดี (ii) แรงกระทำภายในโมเลกุลระหว่างหมู่ $-\text{COO}^-$ กับไอออนประจุบวกที่มีขนาดเล็ก เช่น Li^+ และ Na^+ น้อยกว่าที่เกิดขึ้นกับไอออนประจุบวกที่มีขนาดใหญ่ เช่น K^+ และ Ca^{2+} ทำให้ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Charge screening effect” ไม่สมบูรณ์ โมเลกุลของน้ำแทรกเข้าไปในแผ่นฟิล์มได้ [53] กรณีที่ประจุบวกมากกว่าหนึ่ง (Multivalent cations) เช่น Ca^{2+} และ

Al^{3+} การดูดซับน้ำลดลง อธิบายได้ว่าหมู่ $-COO^-$ สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงทางกายภาพ (Ionic crosslinking) กับ ไอออนประจุบวกได้ดี เป็นการเพิ่มความหนาแน่นของพันธะเชื่อมโยง ช่องว่างระหว่างโครงร่างตาข่ายแคบลง ส่งผลให้น้ำแทรกตัวเข้าไปได้ยาก การดูดน้ำจึงลดลง

4.7 การศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

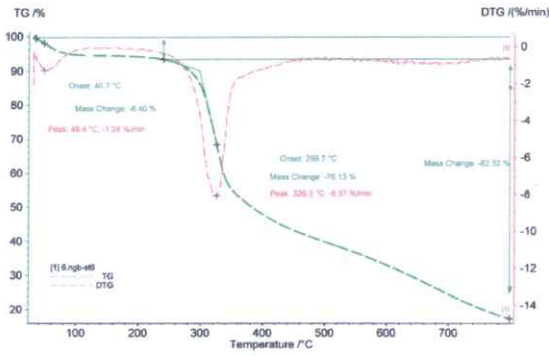
การวิเคราะห์ทางความร้อนของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง 5% (w/v) CMC กับ 2% (w/v) SF ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric Analysis , TGA) ที่อัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}C/นาท$ ภายใต้อุณหภูมิในโครเจน อุณหภูมิ $50-700^{\circ}C$ ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนโดยพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมสูตรต่างๆ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

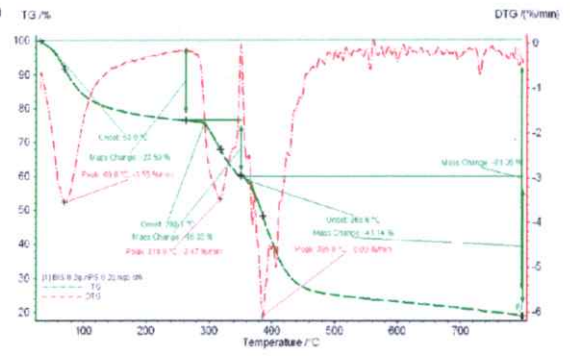
สูตร	T_{o1} ($^{\circ}C$)	T_{o2} ($^{\circ}C$)	T_{o3} ($^{\circ}C$)	T_{d1} ($^{\circ}C$)	T_{d2} ($^{\circ}C$)	T_{d3} ($^{\circ}C$)
SF	-	-	299	-	-	326
BIS	-	293	367	-	318	386
CMC _L	235	271	-	243	283	-
CMC _H	245	275	-	247	285	-
CMC _L :SF, 20:10 (4)	160	274	-	186	297	-
CMC _H :SF, 5:25 (8)	171	251	306	203	265	323
CMC _H :SF, 15:15 (10)	167	263	306	189	277	323
CMC _H :SF, 20:10 (11)	172	278	-	193	299	-
BIS 0.8 g (17)	166	290	-	183	309	-
APS 0.8 g (20)	151	288	-	161	307	-

T_o = Onset Temperature (อุณหภูมิที่เริ่มสลายตัว)

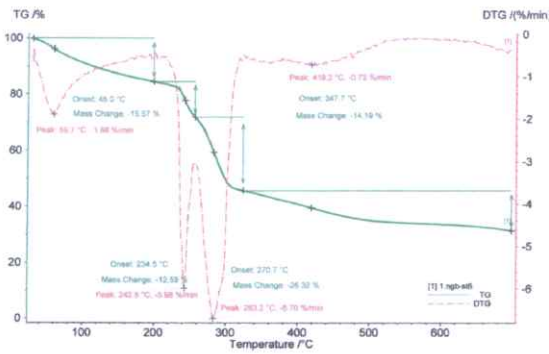
T_d = Decomposition Temperature (อุณหภูมิสลายตัว)



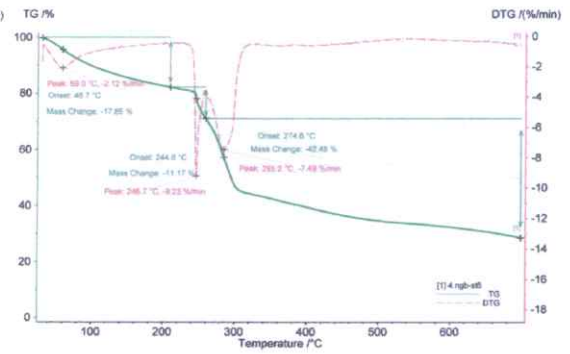
(ก) SF



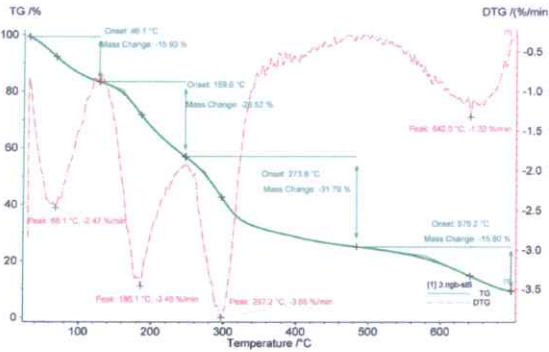
(จ) BIS



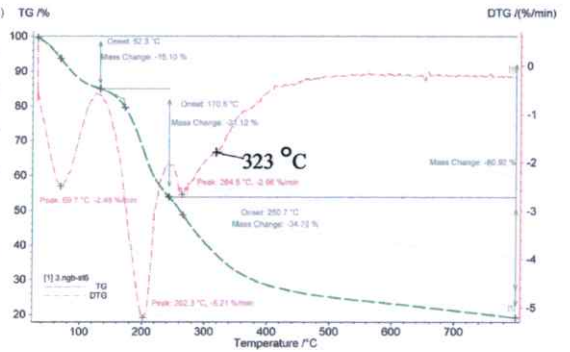
(ค) CMC_L



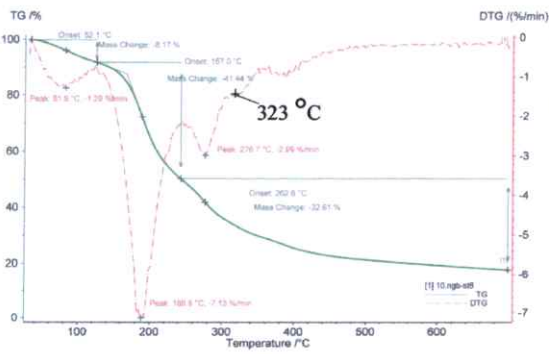
(ง) CMC_H



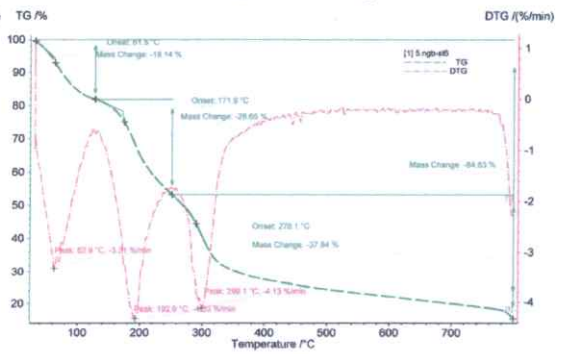
(ฉ) CMC_L:SF, 20:10 สูตร 4



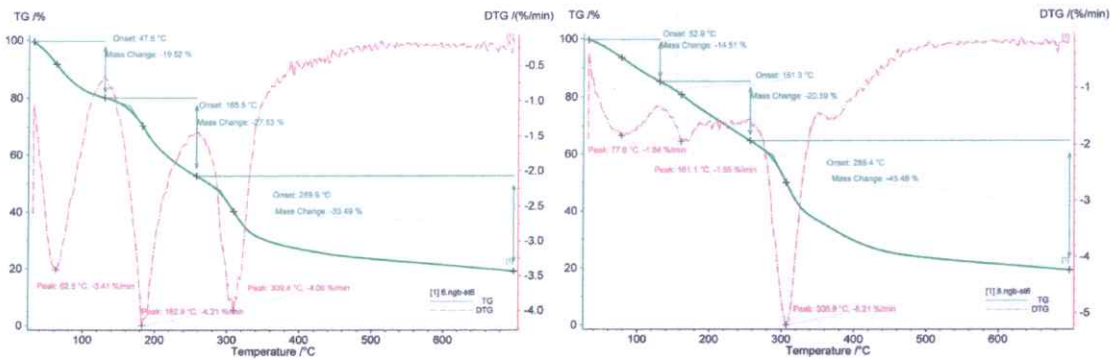
(ฉ) CMC_H:SF, 5:25 สูตร 8



(ช) CMC_H:SF, 15:15 สูตร 10



(ช) CMC_H:SF, 20:10 สูตร 11



(ฉ) BIS 0.8 g สูตร 17

(ญ) APS 0.8 g สูตร 20

รูปที่ 4.36 แสดงสมบัติทางความร้อนของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.36 (ก) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของไหมไฟโบรอิน (SF) พบว่ามีอุณหภูมิในการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 326 °C

จากรูปที่ 4.36 (ข) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของ N, N'-methylene-bis-(acrylamide); BIS พบว่ามีอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ขั้น คือที่อุณหภูมิประมาณ 318 และ 386 °C ตามลำดับ

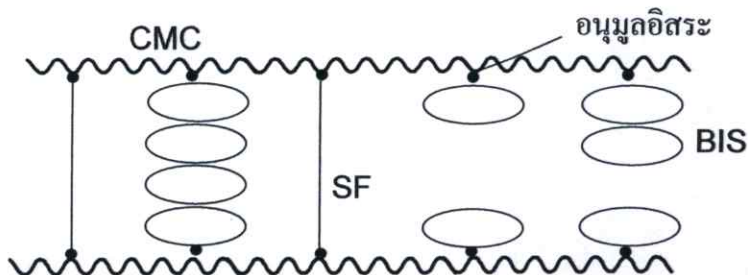
จากรูปที่ 4.36 (ค) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (CMC_L) พบว่ามีอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ขั้น คือที่อุณหภูมิประมาณ 243 และ 283 °C ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.36 (ง) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (CMC_H) พบว่ามีอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ขั้น คือที่อุณหภูมิประมาณ 247 และ 285 °C ตามลำดับ

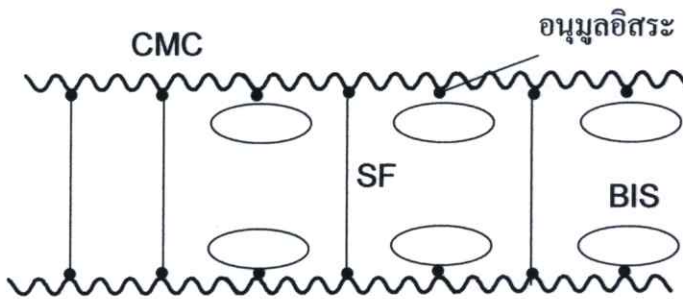
จากรูปที่ 4.36 (จ) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มผสมที่อัตราส่วน 5% (w/v) CMC_L : 2% (w/v) SF; 20:10 สูตร 4 ขั้นแรกที่อุณหภูมิประมาณ 186 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่ CMC_L ที่เกิดพันธะเชื่อม โยงบางส่วนกับสารก่อพันธะเชื่อม โยง BIS และการสลายตัวบางส่วนของสายโซ่ CMC_L ที่เกิดการต่อกิ่งกับ SF ส่วนการสลายตัวในขั้นที่สองที่อุณหภูมิประมาณ 297 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่ CMC_L ที่เกิดพันธะเชื่อม โยงกับสารก่อพันธะเชื่อม โยง BIS อย่างหนาแน่น และการต่อกิ่งของสายโซ่ CMC_L กับไหมไฟโบรอิน

จากรูปที่ 4.36 (ฉ), (ช) และ (ซ) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มผสมที่อัตราส่วน 5% (w/v) CMC_H : 2% (w/v) SF; 5:25 สูตร 8, 15:15 สูตร 10 และ 20:10 สูตร 11 ตามลำดับ พบว่ามีอุณหภูมิในการสลายตัวขั้นแรกที่มีอุณหภูมิประมาณ 203, 189 และ 193 °C ตามลำดับ การสลายตัวในขั้นแรกอาจจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงบางส่วนกับสารก่อพันธะเชื่อมโยง BIS และการสลายตัวบางส่วนของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดการต่อกิ่งกับ SF อุณหภูมิที่ต่างกันเล็กน้อยแสดงถึงจำนวนพันธะเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้น ส่วนการสลายตัวในขั้นที่สองที่มีอุณหภูมิประมาณ 265, 277 และ 299 °C ตามลำดับ อาจจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงกับสารก่อพันธะเชื่อมโยง BIS อย่างหนาแน่น และการต่อกิ่งของสายโซ่ CMC_H กับไหมไฟโบรอิน ซึ่งพบว่าความสูงของพีคมากขึ้นตามปริมาณอัตราส่วนของ CMC_H ที่เพิ่มขึ้น และในสูตร 8 และ 10 พบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวในขั้นที่สามที่มีอุณหภูมิประมาณ 323 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของไหมไฟโบรอินที่มีอยู่ภายในโครงสร้างแผ่นฟิล์ม

จากรูปที่ 4.36 (ณ) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มผสมที่มีปริมาณ BIS 0.8 g พบว่ามีอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ขั้น คือที่มีอุณหภูมิประมาณ 183 และ 309 °C ตามลำดับ ที่มีอุณหภูมิ 183 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงบางส่วนกับสารก่อพันธะเชื่อมโยง BIS และการสลายตัวบางส่วนของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดการต่อกิ่งกับ SF ส่วนที่มีอุณหภูมิการสลายตัว 309 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงกับสารก่อพันธะเชื่อมโยง BIS อย่างหนาแน่น และการต่อกิ่งของสายโซ่ CMC_H กับไหมไฟโบรอิน เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.12 (ซ) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มผสมที่อัตราส่วน 5% (w/v) CMC_H : 2% (w/v) SF, 20:10 สูตร 11 ซึ่งมีปริมาณ BIS 0.2 g พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของฟิล์มผสมสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณ BIS เพิ่มมากขึ้น เป็นผลมาจากการที่สายโซ่ CMC สามารถเกิดพันธะเชื่อมโยงด้วย BIS เพิ่มมากขึ้น รวมทั้งสายโซ่ BIS ที่อาจมีการเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว เนื่องจากมีปริมาณสารเชื่อมโยง BIS มากทำให้เกิดการแย่งชิงเพื่อที่จะเกิดพันธะเชื่อมโยงกับสายโซ่ CMC ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันเองกลายเป็นสายโซ่ยาวดั่งรูป ซึ่งแสดงถึงปริมาณการเชื่อมโยงที่หนาแน่นขึ้น



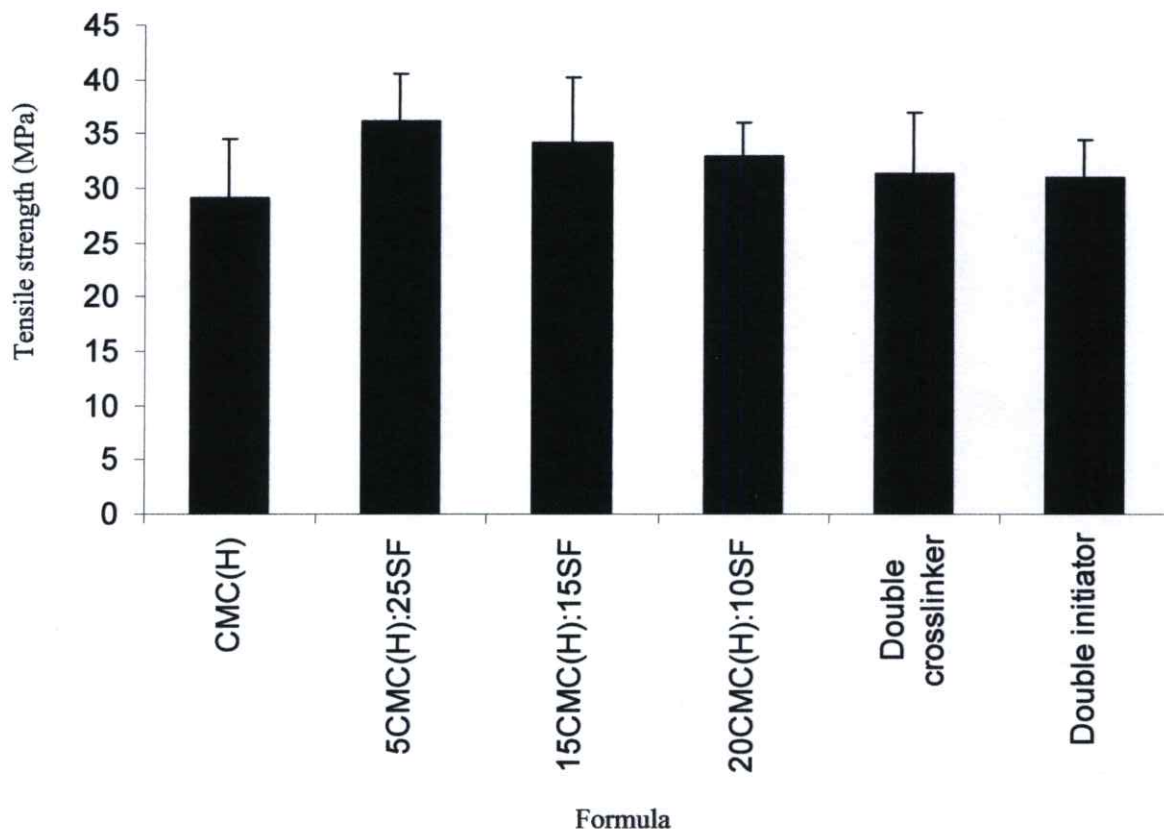
จากรูปที่ 4.36 (ญ) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มผสมที่มีปริมาณ APS 0.8 g พบว่ามีอุณหภูมิในการสลายตัว 2 ชั้น คือที่อุณหภูมิประมาณ 161 และ 307 °C ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 161 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงบางส่วน BIS และการสลายตัวบางส่วนของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดการต่อกิ่งกับ SF ส่วนที่อุณหภูมิการสลายตัว 307 °C อาจจะเป็นการสลายตัวของสายโซ่ CMC_H ที่เกิดพันธะเชื่อมโยงบ่างอย่างหนาแน่น และการต่อกิ่งของสายโซ่ CMC_H กับ ไหมไฟโบรอิ เมื่อเทียบกับรูปที่ 4.12 (ซ) เทอร์โมแกรม TGA แสดงอุณหภูมิการสลายตัวของฟิล์มผสมที่มีปริมาณ APS 0.2 g สูตร 11 พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวของฟิล์มผสมสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณสารริเริ่มอนุมูลอิสระ APS เพิ่มมากขึ้น เป็นผลมาจากการที่สายโซ่ CMC มีปริมาณอนุมูลอิสระมากขึ้น ทำให้ตำแหน่งการเชื่อมขวางมากขึ้นเกิดพันธะเชื่อมโยงบ่างอย่างหนาแน่น สารก่อกพันธะเชื่อมโยงบ่าง BIS สามารถเข้าไปก่อกพันธะเชื่อมโยงบ่างได้มากขึ้นในลักษณะสายโซ่สั้นๆ เนื่องจากมีจำนวนอนุมูลอิสระมากจึงไม่เกิดการแย่งชิงเพื่อที่จะเกิดพันธะเชื่อมโยงบ่างกับสายโซ่ CMC ทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวต่ำกว่ากรณีที่ใช้ BIS เพิ่มขึ้นเล็กน้อย



4.8 ศึกษาสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ (Universal testing machine)

ในการศึกษานี้เลือกศึกษาเฉพาะแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เตรียมจาก CMC_H ผสมกับ SF ที่อัตราส่วนต่างๆ และแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่เพิ่มปริมาณสารก่อกพันธะเชื่อมโยงบ่าง สารริเริ่มอนุมูลอิสระ ค่าความทนแรงดึง การยืด ฉูดขาด และมอดูลัสของยัง สามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของแผ่นฟิล์มกับโครงสร้างทางเคมี

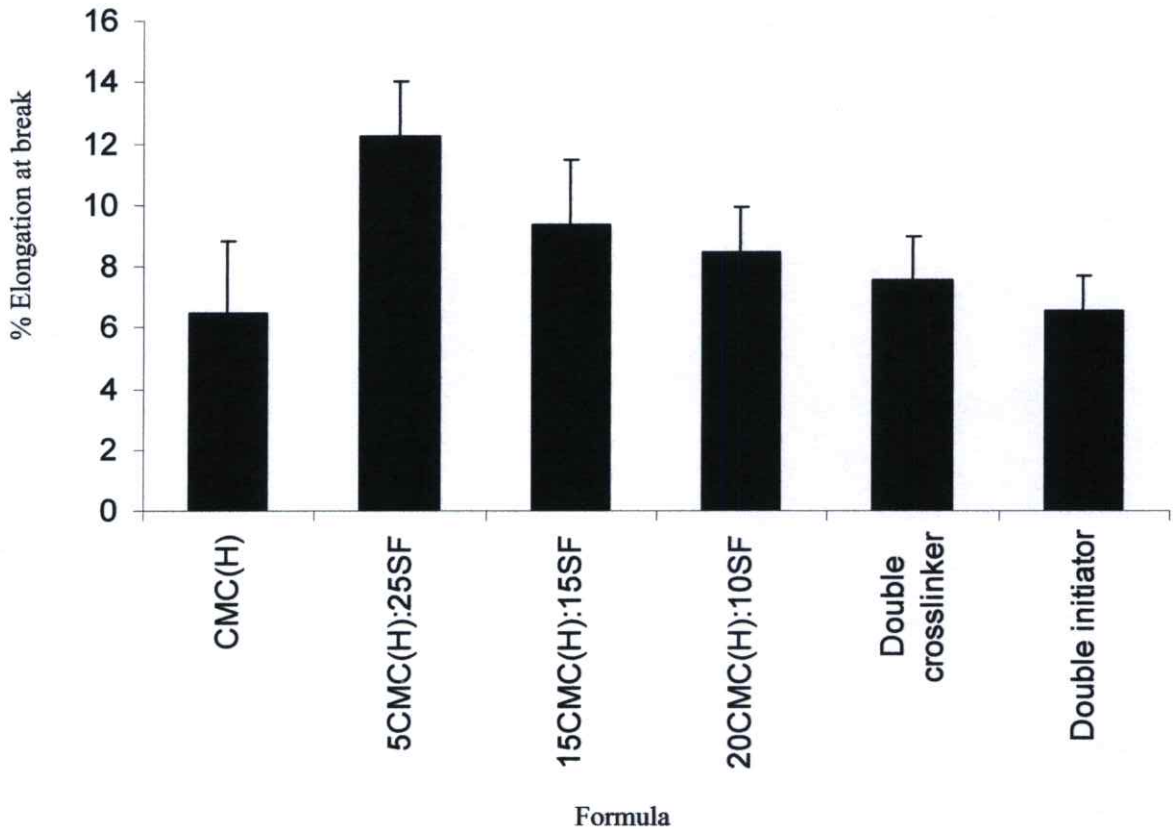
4.8.1 ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength)



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.37 แสดงค่าความแข็งแรงดึงของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 13 (CMC(H)), สูตร 8 (5CMC(H):25SF), สูตร 10 (15CMC(H):15SF), สูตร 11 (20CMC(H):10SF), สูตร 15 (Double crosslinker BIS 0.4 g) และสูตร 18 (Double initiator APS 0.4 g) พบว่า CMC_H เกิดพันธะเชื่อมโยงกับ BIS มีค่าความแข็งแรงดึงประมาณ 29 MPa แต่เมื่อผสมไหมไฟโบรอินแล้วช่วยให้ความแข็งแรงดึงสูงขึ้น และลดลงตามปริมาณ SF ที่ลดลง แสดงว่าน่าจะมีการเชื่อมโยง CMCH-BIS-SF SF ที่เติมลงไปกระจายตัวอยู่ภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล ทำให้โครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมีการรับและกระจายแรงที่ดี ค่าความแข็งแรงดึงจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่ไม่มีการผสมสารละลายไหมไฟโบรอิน ส่วนค่าความแข็งแรงดึงเมื่อมีปริมาณของสารก่อพันธะเชื่อมโยงและสารริเริ่มอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้นพบว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง

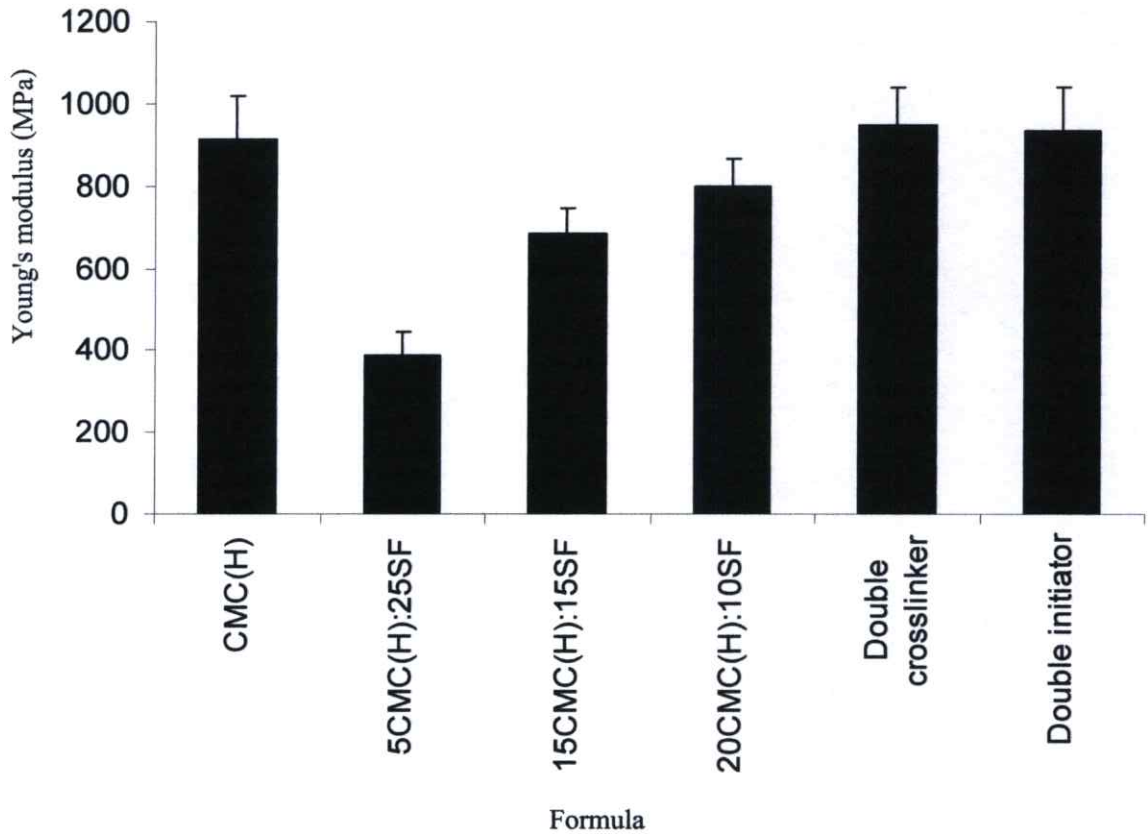
4.8.2 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break)



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.38 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 13 (CMC(H)), สูตร 8 (5CMC(H):25SF), สูตร 10 (15CMC(H):15SF), สูตร 11 (20CMC(H):10SF), สูตร 15 (Double crosslinker BIS 0.4 g) และสูตร 18 (Double initiator APS 0.4 g) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของสารละลายไหมไฟโบรอินมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แสดงว่าสารละลายไหมไฟโบรอินที่ผสมลงไปแผ่นฟิล์มทำหน้าที่คล้ายพลาสติกไซเซอร์ช่วยให้โครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลมีความยืดหยุ่นมากขึ้น โดยการไปแทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเมื่อมีปริมาณของสารก่อก้อนระเชื่อมโยงและสารริเริ่มอนุมูลอิสระเพิ่มมากขึ้นพบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของสารก่อก้อนระเชื่อมโยงและสารริเริ่มอนุมูลอิสระเป็นการเพิ่มปริมาณของการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล ทำให้โครงสร้างเกิดการเกี่ยวพันกันในลักษณะสามมิติมากขึ้น สายโซ่พอลิเมอร์ CMC และ SF ยึดตัวได้ยาก ความยืดหยุ่นจึงลดลง

4.8.3 ค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus)



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงค่ามอดุลัสของยัง ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตรต่างๆ

จากรูปที่ 4.39 แสดงค่ามอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 13 (CMC(H)), สูตร 8 (5CMC(H):25SF), สูตร 10 (15CMC(H):15SF), สูตร 11 (20CMC(H):10SF), สูตร 15 (Double crosslinker BIS 0.4 g) และสูตร 18 (Double initiator APS 0.4 g) พบว่าเมื่ออัตราส่วนของสารละลายไหมไฟโบรอินมีค่าเพิ่มขึ้น ค่ามอดุลัสของยังมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการผสมสารละลายไหมไฟโบรอินลงไปทำให้ลดความหนาแน่นของการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของ CMC โดยสารละลายไหมไฟโบรอินจะไปแทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างของโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล ส่วนค่ามอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเมื่อมีปริมาณของสารก่อก้อนเชื่อมโยงและสารตั้งต้นเพิ่มมากขึ้นพบว่าค่ามอดุลัสของยังมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของสารก่อก้อนเชื่อมโยงและสารริเริ่มอนุมูลอิสระเป็นการเพิ่มปริมาณของการเชื่อมโยงภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล โดยการเชื่อมโยงด้วยสารก่อก้อนเชื่อมโยง (BIS) ทำให้เกิดเป็นพันธะเคมีซึ่งมีความแข็งแรงภายในโครงสร้างของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล แข็งแรงมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติของฟิล์มไฮโดรเจลผสมเตรียมจากสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) กับสารละลายน้ำไหมไฟโบรอิน โดยใช้ BIS เป็นสารก่อก้อนระเชื่อมโยง และ APS เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสมีหมู่คาร์บอกซิเลต (-COO) ซึ่งเป็นหมู่ชอบน้ำอยู่ในโครงสร้าง จึงนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุคูดซับน้ำแบบยิ่งยวด สำหรับไหมไฟโบรอิน (Silk fibroin, SF) จาก *Bombyx mori* เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีโครงสร้างช่วยให้สมบัติกายภาพพิเศษและเข้ากันได้ดีกับวัสดุชีวภาพ มีรายงานวิจัยพบว่าเป็นวัสดุชีวภาพที่มีประโยชน์ด้านวิศวกรรมชีวการแพทย์ ดังนั้นการนำ CMC มาผสมกับ SF เพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีความเข้ากันได้กับผิวหนังและสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุชีวการแพทย์ได้ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนระหว่าง CMC_L/SF, อัตราส่วนระหว่าง CMC_H/SF, ปริมาณสารก่อก้อนระเชื่อมโยง N, N'-methylene-bis-(acrylamide) (BIS) และปริมาณสารริเริ่มปฏิกิริยา Ammonium persulfate (APS) ผลการทดลองสรุปได้ดังนี้

1. แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลเกิดการม้วนงอตัวได้ง่ายเมื่อมีปริมาณ CMC มาก แต่การม้วนงอตัวลดลง เมื่อมีปริมาณสารก่อก้อนระเชื่อมโยง BIS และสารก่อก้อนอนุมูลอิสระ APS เพิ่มขึ้น
2. แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถคูดซับน้ำได้สูงสุดเมื่อมีปริมาณ CMC มาก ส่วนปริมาณของแข็งที่เหลือ (ค่าสัดส่วนเจล) พบว่ามีความสัมพันธ์กับการกักเก็บน้ำ ซึ่งมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ เมื่อค่าสัดส่วนเจลเพิ่มขึ้น ค่ากักเก็บน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้น
3. แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมระหว่าง CMC กับ SF มีสมบัติเป็น pH-sensitive hydrogel เพราะการคูดซับน้ำได้มากขึ้นกับ pH ของสารละลายที่แผ่นฟิล์มแช่อยู่
4. เมื่อแช่แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเกลือ พบว่าการคูดซับน้ำขึ้นกับชนิดของไอออนประจุบวก โดยไอออนที่มีขนาดเล็กและไอออนที่มีประจุบวกน้อยสามารถคูดซับน้ำได้สูง
5. แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่มีอัตราส่วนของ SF มาก (CMC น้อย) จะมีค่าความทนแรงดึงการดึงยืด ϵ จุดขาดเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดุลัสลดลง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณ BIS และ APS พบว่าค่าความทนแรงดึงและการดึงยืด ϵ จุดขาดลดลง แต่ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น

6. แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลผสมจากสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 5% (w/v) ผสมกับ สารละลายไหมไฟโบรอิน 2% (w/v) ที่ดีที่สุดคือสูตร 11 ซึ่งมีปริมาณสารละลายคาร์บอกซีเมทิล เซลลูโลส 20 ml, สารละลายไหมไฟโบรอิน 10 ml, BIS 0.2 g, APS 0.2 g และกลีเซอรอล 1 ml เนื่องจากมีสมบัติการดูดซับน้ำ การกักเก็บน้ำที่ดีเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป อาจจะเป็น ทางด้านการแพทย์ หรือการเกษตร เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการเตรียม SF โดยกระบวนการ Dialysis ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ และเหมาะสม หากมีความชื้นมากเกินไปอาจทำให้ SF เสื่อมสภาพและเกิดการตกตะกอน

2. ระยะเวลาในการผสม SF กับ CMC ไม่ควรจะนานเกินไป เพราะจะทำให้ SF เกิดการเสี ยสภาพเนื่องจากความร้อน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของ SF ในแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล และต้องม ีการควบคุมความหนาของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลให้มีความหนาที่เท่ากันทุกตำแหน่ง เพราะการ กระจายตัวของ SF และความหนามีผลต่อสมบัติของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลโดยตรง

3. ในขั้นตอนการเตรียมแผ่นฟิล์ม โดยการใช้เทคนิคการเทหล่อ (Casting) แล้วนำไปอบให้ แห้งไม่ควรใช้อุณหภูมิในการอบแห้งที่สูงเกินไป เพราะจะทำให้แผ่นฟิล์มเกิดการเสียมัธยส ายเนื่องจากความร้อนและเกิดการเปลี่ยนสี

4. ในการทดสอบค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (%Water uptake) และกักเก็บน้ำ (%Water retention) ต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่และเท่ากันตลอดระยะเวลาในการทดสอบ รวมถึงการเข้ดน้ำออกจากแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะต้องแน่ใจว่าเข้ดน้ำออกได้หมด เพราะปริมาณน้ำที่ ผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลกระทบต่อทดสอบที่ผิดพลาดได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมลักษณ์ คงเมือง. “การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีพอลิเมอร์เพื่อพัฒนาตัวรับยาเครื่องสำอางและผลิตภัณฑ์สุขภาพ.” คณะเภสัชศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2546.
- [2] ปิยพร ลิมวรรณุสรณ์. “การเตรียมซูเปอร์แอบซอร์เบนต์ที่สลายตัวได้ทางชีวภาพของแป้งมันสำปะหลัง-อะคริลาไมด์/โพแทสเซียมอะคริเลต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [3] M.E. Byrne, K. Park, and N.A. Peppas. “Molecular imprinting with hydrogels.” *Advanced Drug Delivery Reviews.*, Vol. 54, 2002. pp. 149-161.
- [4] P.J.Flory. “Hydrogel Biomaterials: Structure and Physical Chemistry.” [lecture]. England: Cornell University. 2003.
- [5] ภาณุพงศ์ ภูทะวัง. “การศึกษาผลของชนิดเซรีซินต่างๆที่มีต่อสมบัติฟิล์มไฮโดรเจลพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [6] B.D. Ratner. “Biomedical Application of Hydrogels ; Review and Critical Appraisal.” *Biocompatibility of Clinical Implant Materials.*, vol 2, 1981. pp. 145-152.
- [7] Y. Liu, M.B. Huglin, and T.P. Davis. “Preparation and Characterisation of Some Linear Copolymers as Precursors to Thermoplastic Hydrogels.” *Eur. Polym. J.*, vol. 30, 1994. pp. 457-463.
- [8] H. Park, K. Park. “Hydrogels in Bioapplications.” *Hydrogels and Biodegradable Polymers for Bioapplications.*, 1996. pp. 2-10
- [9] P. R. Babu, I.P. Sastry, C. Rose, and N.M. Rao. “Hydrogels based on Gelatin Poly(hydroxyethyl methacrylate) and Poly(butyl acrylate) Graft Copolymer Impregnated with Fibrin.” *Journal of applied polymer science.*, vol. 65, 1997. pp. 555-560.
- [10] L.F. Gudeman, N.A. Peppas. “Preparation and Characterisation of pH-sensitive, Interpenetrating Network of Poly(vinyl alcohol) and Poly(acrylic acid).” *Journal of applied polymer science.*, vol. 55, 1995. pp. 919-928.
- [11] J.M. Guenet. “Introduction in Thermoreversible Gelation of Polymers and Biopolymers.” London : Academic Press., 1992. pp. 1.

- [12] Y. Liu, M.B. Huglin and R. Mao. "Characteristics of Copolymerisations involving Dimethacrylamide and Swelling Behaviour of the Copolymers in Water." *Polymer*, vol. 37, 1996. pp. 5069-5075.
- [13] M.V. Sefton, Yamamoto, Y. Hofmann "Degradation of Acrylamide Copolymer: Synthesis of Amine Functional Thermoplastic Hydrogel." *Journal of applied polymer science.*, vol. 61, 1996. pp. 351-358.
- [14] A.S. Hoffman. "Hydrogels for biomedical applications." *Advanced Drug Delivery Reviews.*, vol. 43, no. 1, 2002. pp. 3-12.
- [15] รุ่งลาวัลย์ สมสุนันท์. "การสังเคราะห์และการหาลักษณะเฉพาะของไฮโดรเจลที่มีพอลิอะคริลาไมด์เป็นองค์ประกอบสำหรับทดแทนผิวหนังแบบชั่วคราว." *วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.* 2544.
- [16] ยุภัณฑ์ มิลเลอร์. "โซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส." *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, ปีที่ 45, ฉบับที่ 143, มกราคม 2540. หน้า 15-46.
- [17] สำนักมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม "มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชั้นคุณภาพอาหาร." มอก. 1491-2541, หน้า 1-8.
- [18] สะอึ้ง จักภูศิลา. "การศึกษาวิเคราะห์เซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส (CMC)." *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 2540.
- [19] มานี เหลืองชนะอนันต์. "ปรากฏการณ์ซีเอ็มซี (Sodium carboxymethyl cellulose)." *TTIS Textile Digest*, ปีที่ 2, ฉบับที่ 13, พฤษภาคม 2537. หน้า 24-25.
- [20] มนตรี รัตนวิจิตร. "การประยุกต์ใช้ซีเอ็มซีในอุตสาหกรรมต่างๆ." *TTIS Textile Digest*, ปีที่ 2, ฉบับที่ 14, มิถุนายน 2537. หน้า 22-23.
- [21] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. *วิทยาศาสตร์เส้นใย*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.
- [22] อภิชาติ สนธิสมบัติ. *กระบวนการเคมีสิ่งทอ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล. 2543.
- [23] มณฑา จันทร์เกตุเล็ก. *วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมเศรษฐศาสตร์แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2541.
- [24] <http://www.wallstreetreportonline.com/KBLB/technicalbg.htm>
- [25] นवलจันทร์ โชคทวีทรัพย์, นิภาพรรณ โสถถิยานนท์ และศิริเนตร ประดับวงศ์. "การเตรียมฟิล์มไฮโดรเจลจาก PVA/Sericin โดยวิธีการฉายรังสี และการปรับสภาพทางความร้อน." *โครงการานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.* 2545.

- [26] ชนิดา พงษ์ถิมาพันธ์. **เคมีอินทรีย์เบื้องต้น**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2542.
- [27] <http://www.schoolscience.co.uk/content/5/chemistry/proteins/Protch3pg3.html>.
- [28] <http://www.moac.go.th/buider/mu/indek>
- [29] ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. **เคมีพอลิเมอร์พื้นฐาน**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเคียนส์โตร์. 2527.
- [30] มาลินี ชัยศุกกิจสินธุ์, กัญญา ดันตวิทธิกุล. “โปรตีนเซรีซินจากไหมไทย.” รายงานการวิจัย ฉบับสมบูรณ์, 2548.
- [31] มินะกาวะ โมโตอิ. **วิทยาการไหม เล่ม 1**. กรุงเทพฯ : คณะกรรมการส่งเสริมสินค้าไหมไทย กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม. 2530.
- [32] G.H. Altman, F. Diaz, C. Jakuba, T. Calabro, R.L. Horan, J. Chen, H. Lu, J. Richmond and D.L. Kaplan. “Silk-based biomaterials.” *Biomaterial.*, vol. 24, 2003. pp. 401-416.
- [33] ลลิตา บุญโฉม. “สมบัติทางกายภาพและการย่อยสลายของเส้นไหมที่ทำการต่อกิ่งกับไวนิลมอนอเมอร์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2527.
- [34] T. Arai, H. Ishikawa, G. Freddi, S. Winkler and M. Tsukada. “Chemical Modification of *Bombyx Mori* Using Isocyanates.” *Jurnal of Applied Polymer Science.*, vol. 79, 2001. pp. 1756 – 1763.
- [35] http://en.wikipedia.org/wiki/Tissue_engineerig
- [36] <http://www.moac.go.th>
- [37] สมจิตต์ ตั้งชัยวัฒนา. “พอลิเมอร์ผสม.” โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม. 2548
- [38] ณีฎฐา ศรีสุภาพ, นiramัย บุญเนียม และสุธิดา สายงแท้. “การศึกษาการดูดซับโครเมียม (VI) โดยใช้ไคโตซานที่ปรับปรุงด้วยพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และไคโตซานที่เคลือบด้วยอะลูมินา.” โครงการพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [39] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. **เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพฯ : บู้คเน็ค. 2548.
- [40] P. Wongpanit, Y. Tabata And R. Rujirawanit. “Miscibility and Biodegradability of Silk Fibroin/Carboxymethyl Chitin Blen Films.” *Macromolecule bioscience.*, vol. 12, 2007. pp. 1258-1271.
- [41] Biman B. Mandal, Sonia Kapoor And Subhas C. Kunda. “Silk fibroin/polyacrylamide semi-interpenetration network hydrogels for controlled drug release.” *Biomaterial.*, vol. 30, 2009. pp. 2826-2836.

- [42] G. Freddi, M. Tsukada And S. Beretta. "Structure and physical properties of silk fibroin/polyacrylamide blend films." *Journal of applied polymer science.*, vol. 71, 1999. pp. 1563-1571.
- [43] ปุณยชา บัณฑิตกุล. "การคัดแปลงโปรตีนไฟโบรอินจากเส้นไหมไทยเพื่อใช้ทำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลและเนื้อเยื่อโครงสร้าง." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.* 2550.
- [44] A. Pourjavadi, Sh. Barzegar, G.R. Mahdavinia. "MBA-crosslinked Na-Alg/CMC as a smart full-polysaccharide superabsorbent hydrogels." *Carbohydrate Polymers.*, vol. 66, 2006. pp. 386-395.
- [45] พดาร์ตน์ นิลเจียรนัย, ชินานาฏ วิทยาประภากร, โรเบิร์ต มอลลอย และคณารัฐ ฅ ลำปาง. "การออกแบบและสังเคราะห์แผ่นไฮโดรเจลสำหรับใช้ในทางการแพทย์เพื่อเป็นวัสดุปิดแผล." *Chiang Mai Journal of Science.* ฉบับที่ 34, ตุลาคม 2550. หน้า 183-189.
- [46] S. Eamchan, N. Molloy and T. Siri Wittayakorn. "Synthesis and properties of some synthetic hydrogels for potential use as temporary skin substitutes in wound dressing." *Journal of applied polymer science.*, 1997. pp. 57-63.
- [47] J. Berger, M. Reist, J.M. Mayer, O. Felt, N.A. Peppas, R. Gurny. "Structure and interactions in covalently and ionically crosslinked chitosan hydrogels for biomedical applications." *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics.*, vol. 57, 2004. pp.19-34.
- [48] A.K. Bajpai, Anjali Giri. "Swelling dynamics of a macromolecular hydrophilic network and evaluation of its potential for controlled release of agrochemicals." *Reactive & Function Polymers.*, vol. 53, 2002. pp. 125-141.
- [49] A.K. Bajpai, Anjali Giri. "Water sorption behaviour of highly swelling (carboxymethylcellulose-g-polyacrylamide) hydrogels and release of potassium nitrate as agrochemical." *Carbohydrate Polymers.*, vol. 53, 2003. pp. 271-279.
- [50] F. Scheinman. "An Introduction to Spectroscopic Methods for the Identification of Organic Compounds." *Pergamon, Elmsford.*, vol.1, 1970. pp.165-191.
- [51] A. Pourjavadi, M. S Amini-Fazl, M. Ayyari. "Optimization of synthetic conditions CMC-g-poly (acrylic acid)/Celite composite superabsorbent by Taguchi method and determination of its absorbency under load." *eXPRESS Polymer Letters.*, vol. 1, no. 8, 2007. pp. 488-494.

- [52] A.K. Bajpai, Abhilasha Mishra. "Carboxymethyl cellulose (CMC) based semi-IPNs as carriers for controlled release of ciprofloxacin: an in vitro dynamic study." *J mater Sci: Mater Med.*, vol. 19, 2008. pp. 2121-2130.
- [53] A. Pourjavadi, H. Ghasemzadeh, F. Mojahedi. "Swelling Properties of CMC-g-Poly (AAm-co-AMPS) Superabsorbent Hydrogel." *Journal of Applied Polymer Science.*, vol. 113, 2009. pp. 3442-3449.
- [54] W. Wang, A. Wang. "Nanocomposite of carboxymethyl cellulose and attapulgite as a novel pH-sensitive superabsorbent: Synthesis, characterization and properties." *Carbohydrate Polymers.*, vol. 82, 2010. pp. 83-91.
- [55] http://en.wikipedia.org/wiki/Ammonium_persulfate
- [56] <http://sci-toys.com/scichem/jqp052/14471.html>
- [57] <http://www.answers.com/topic/sodium-bicarbonate>
- [58] จีรนนท์ วรเชษฐ์, พนิดา อติพรวิรัช และอัจฉรา วงศ์ชนะโสภณ. "การปรับปรุงไฟโบรอินของไหมไทยนางน้อยด้วย 2-Hydroxyl methacrylate และ Poly(vinyl alcohol)." *โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.* 2551.
- [59] <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=94>
- [60] <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=2454>
- [61] http://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_chloride
- [62] <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=1356>
- [63] <http://msds.pcd.go.th/searchName.asp?vID=1568>

ภาคผนวก

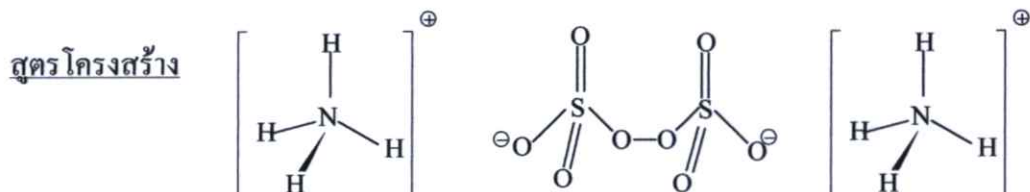
ภาคผนวก ก

สารเคมี

ภาคผนวก ก

Ammonium persulfate (APS) [54]

ชื่อเคมี Ammonium persulfate

สูตรโมเลกุล $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ **คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Properties)**

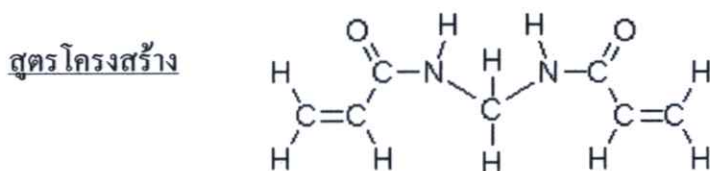
สถานะ	ผลึกหรือผงสีขาว
สี	ขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	228.18 g/mol
จุดเดือด	120 °C (393 K) (Decomposes)
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	1.982 g/cm ³
ความสามารถในการละลายน้ำที่ (กรัม/100 มล.)	80 g/100 ml (25 °C)
ความเสถียร	เสถียร

อันตรายจากสารเคมี

เป็นอันตรายหากกลืนกิน ทำให้ระคายเคืองและลุกติดไฟได้ เป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรง เมื่อสัมผัสกับวัตถุอื่นอาจทำให้ลุกติดไฟได้ เก็บไว้ในที่ห่างจากความร้อน ประกายไฟ หรือเปลวไฟ หลีกเลี่ยงการสัมผัส ดวงตา ผิวหนัง เสื้อผ้า เก็บในภาชนะปิดสนิท ใช้ในสถานที่ที่มีการระบายอากาศเพียงพอ ในกรณีเกิดอัคคีภัยใช้น้ำดับเพลิง ถังพื้นที่หกรั่วไหลด้วยน้ำ

N, N'-methylenebisacrylamide (BIS) [55]

ชื่อเคมี N, N'-methylenebisacrylamide

สูตรโมเลกุล $\text{C}_7\text{H}_{10}\text{O}_2\text{N}_2$ 

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

Purity	>99.0%
A290 (2%,water)	<0.4
Conductivity (2%, water)	<10 mmho
Acrylic Acid	<0.001%

อันตรายต่อสุขภาพและอนามัย(Health Effect)

สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสทางผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคือง
สัมผัสสูดดม	การสัมผัสสูดดม จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา
สัมผัสทางหายใจ	จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจและเยื่อจมูก

การเก็บรักษา

เก็บที่อุณหภูมิ -4 °C ในที่มืด ปิดฝาให้สนิทเพื่อป้องกันความชื้น

ข้อควรระวังการใช้งาน

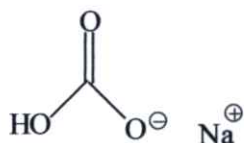
หากกลืนหรือกินอาจเป็นอันตรายถึงตายได้ หลีกเลี่ยงการสูดดม การสัมผัสกับตา ผิวหนัง หรือเสื้อผ้า หลังการใช้งานควรล้างมือให้สะอาด และควรอ่านคู่มือการใช้งานก่อน

Sodium Hydrogen Carbonate (NaHCO₃) [56]

ชื่อเคมี Sodium Hydrogen Carbonate

สูตรโมเลกุล NaHCO₃

สูตรโครงสร้าง

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	ผลึก
สี	ขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	84.01
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	122 °C
ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1)	2.16 g/cm ³
ความเป็นกรด-ด่าง(pH)	8.2 ที่ 20 °C
ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่นๆ	อุณหภูมิสลายตัว >50 °C

อันตรายต่อสุขภาพและอนามัย(Health Effect)

สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสทางผิวหนังจะทำให้เกิดการระคายเคือง
สัมผัสสูดดม	การสัมผัสสูดดม จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา
สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจและเยื่อจมูก
สัมผัสสูดดม	กาสัมผัสสูดดมจะก่อให้เกิดการระคายเคือง

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

ความคงตัวทางเคมี	สารนี้มีความเสถียร
สารที่เข้ากันไม่ได้	กรด, แอมโมเนีย, ฟอสเฟต, monobasic
สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว	คาร์บอน ไดออกไซด์ และคาร์บอน
อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์	ไม่เกิดขึ้น

การเก็บรักษา

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บที่อุณหภูมิห้อง
- เก็บในที่แห้งและเย็น

มาตรการปฐมพยาบาล (First Aid)

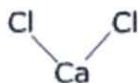
เมื่อเข้าตา	ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที กระพริบตาขึ้น-ลง นำส่งไปพบแพทย์
เมื่อสัมผัสสูดดมผิวหนัง	ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำหรือสบู่ปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมกับถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่เปื้อนออก ก่อน นำส่งไปพบแพทย์
เมื่อสูดดมเข้าไป	ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ทันที
เมื่อกลิ้งกินเข้าไป	อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน ถ้าผู้ป่วยยังมีสติอยู่ให้บ้วน ปากด้วยน้ำ ให้ดื่มน้ำ 2-4 แก้ว นำส่งไปพบแพทย์ทันที

Calcium chloride (CaCl₂) [57]

ชื่อทางเคมี Calcium chloride

สูตร โมเลกุล CaCl₂

สูตร โครงสร้าง



คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	เม็คของแข็ง
สี	ขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	110.98
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	722 °C
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	2.15 g/cm ³
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	8-9 ที่ 20 °C

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	สารเป็นเม็คไม่เป็นอันตรายเมื่อหายใจเข้าไป
การสัมผัสถูกตา	ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะทำให้เกิดการระคายเคืองตาจากส่วนประกอบซึ่งเป็นคลอไรด์ ทำให้ตาแดง และปวดตาได้
สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสกับสารที่เป็นของแข็งต่อผิวหนังที่แห้ง จะทำให้เกิดการระคายเคืองเล็กน้อย แต่ถ้าหากสัมผัสกับสารละลายเข้มข้น หรือของแข็งสัมผัสกับผิวหนังที่ชื้นจะทำให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง และอาจเกิดผิวหนังไหม้ได้
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนหรือกินเข้าไป สารนี้เป็นสารที่มีความเป็นพิษต่ำ แต่การกินหรือกลืนเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อเมือกในจมูกรุนแรง

การเก็บรักษา

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บในที่ที่แห้งและเย็นและมีการระบายอากาศในพื้นที่ดี
- เคลือบคลอไรด์ที่ชื้นหรือสารละลายที่เข้มข้น
- สามารถกักความร้อนเหล็กได้
- เคลือบคลอไรด์จะถูกขั้บนำจากบรรยากาศและเปลี่ยนรูปเป็นสารละลายได้

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป	ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ผู้ป่วยหยุดหายใจ ให้ช่วยผายปอด และถ้ามีอาการหายใจขัดให้ทำการให้ออกซิเจน ช่วยนำส่งแพทย์
-------------	---

กินหรือกลืนเข้าไป	ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ให้นำไปพบแพทย์ให้กระตุ้นทำให้อาเจียนทันทีโดยบุคลากรทางการแพทย์
สัมผัสผิวหนัง	ถ้าสัมผัสผิวหนังให้ฉีดล้างผิวหนังด้วยน้ำและสบู่ปริมาณมากๆ อย่างน้อย 15 นาที ถ้าสัมผัสตาให้ฉีดล้างตาโดยทันทีด้วยน้ำปริมาณมากๆ อย่างน้อย 15 นาที พร้อมทั้งกระพริบตาถ้าขณะล้างด้วยน้ำให้นำส่งไปพบแพทย์ทันที


ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำหรือดินสารนี้ไม่เกิดสลายตัวด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

Ethanol [57]

ชื่อทางเคมี Ethyl Alcohol

สูตรโมเลกุล C_2H_5OH

สูตรโครงสร้าง 

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี
กลิ่น	เฉพาะตัว
น้ำหนักโมเลกุล	46.07
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	-114 °C
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	0.789 g/cm ³

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจและเยื่อจมูก วิงเวียนศีรษะ
สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคือง อักเสบ ผื่นแดง
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนหรือกินเข้าไป ทำให้เกิดการระคายเคือง วิงเวียน เชื่องซึม
การสัมผัสตา	จะก่อให้เกิดการระคายเคือง ปวดตาความคงตัว และการ เกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)
ความคงตัวทางเคมี	สารนี้มีความเสถียร

การเก็บรักษา

- เก็บในภาชนะที่บรรจุที่ปิดฝาปิดสนิทและแห้ง
- เก็บห่างจากแหล่งจุดติดไฟ

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป	ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด นำไปส่งพบแพทย์
กินหรือกลืนเข้าไป	ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป นำส่งไปพบแพทย์ทันที
สัมผัสผิวหนัง	ถ้าสัมผัสผิวหนัง ล้างผิวหนังด้วยน้ำทันที
สัมผัสตา	ถ้าสัมผัสตาให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

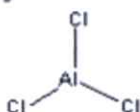
สารนี้จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศหากมีการใช้และจัดการกับสารอย่าง เหมาะสม

Aluminium chloride (AlCl₃) [58]

<u>ชื่อเคมี</u>	Aluminium chloride
<u>ชื่ออื่นๆ</u>	Aluminum trichloride, Anhydrous aluminum chloride, Chlorure daluminium Anhydre, Anhydrous

สูตรโมเลกุล AlCl₃

สูตรโครงสร้าง

การใช้ประโยชน์ (Uses)

สารนี้ใช้เป็นตัวเร่งมีฤทธิ์เป็นกรดในการผลิตสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ รวมทั้งเรซิน ของไฮโดรคาร์บอน, เอทิลเบนซีน, โททาเนียมออกไซด์, ใช้ในการผลิตยา ผงซักฟอกที่มีฤทธิ์เป็นด่าง, เอทิลคลอไรด์, สารเคมีทางการเกษตร, ยางบิลทิล, พลาสติก, สารหล่อลื่น, สารเพิ่มความหอมและเครื่องสำอาง และใช้เป็นตัวเร่งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม, ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในการผลิตอลูมิเนียม, ใช้เป็นสารตัวกลางทางเคมีสำหรับสารประกอบอลูมิเนียม, ใช้ในการผลิตอลูมิเนียมโบโรไฮไดรด์ และลิเทียมอลูมิเนียมไฮไดรด์

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	ของแข็ง
สี	ขาว
กลิ่น	ฉุน
น้ำหนักโมเลกุล	133.34
จุดเดือด	180.2 °C
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	192.5 °C
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	2.44 g/cm ³

ข้อมูลทางกายภาพและเคมีอื่นๆ

ละลายในแอลกอฮอล์, ตัวทำละลายที่สามารถละลายคลอไรด์ได้ เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ และคลอโรฟอร์ม

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไป ผงฝุ่นของสารนี้จะทำปฏิกิริยาความชื้นในทางเดินหายใจ และอากาศภายในห้องทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนคลอไรด์ กรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีฤทธิ์กัดกร่อน และทำให้ระคายเคืองจมูกและลำคอ, เจ็บคอ, หายใจติดขัด
สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสถูกผิวหนัง สารนี้ทำปฏิกิริยากับความชื้นบนผิวหนัง หรือความชื้นในอากาศเกิดกรดไฮโดรคลอริก และความร้อน ทำให้ผิวหนังระคายเคือง และสารนี้สามารถดูดซึมผ่านผิวหนังได้ ความรุนแรงขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สัมผัส
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนหรือกินสารนี้เข้าไป สารนี้ทำปฏิกิริยากับความชื้นในปาก และลำคอ เกิดกรดไฮโดรคลอริกที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เจ็บคอ, ไหม้ปาก, คลื่นไส้, อาเจียน, ปวดท้อง และ ท้องร่วง
สัมผัสถูกตา	การสัมผัสถูกตา สารนี้จะทำปฏิกิริยากับความชื้นในตา เกิดกรดไฮโดรคลอริก และความร้อน ทำให้ระคายเคืองซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สัมผัส, ทำให้ตาได้รับบาดเจ็บ และอาจจะตาบอดได้

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

Sodium chloride (NaCl) [59]ชื่อเคมี

Sodium chloride

ชื่ออื่นๆ

Salt; NaCl, Table salt, Saline solution, Stat trak plus, Common salt, Sea Salt, Rock salt, Halite, Saline, Dendritis, White crystal

สูตรโมเลกุล

NaCl

สูตรโครงสร้าง

Na—Cl

การใช้ประโยชน์ (Uses)

ควบคุมฝุ่น, ป้องกันการแข็ง, ทำให้น้ำแข็งละลาย, เป็นส่วนผสมของคอนกรีต

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	ผลึก , ของแข็ง
สี	ขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	58.44
จุดเดือด	1465 °C
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	~ 800 °C
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	2.16 g/cm ³

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองจมูก และ คอ, ปอด
สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสถูกผิวหนังทำให้ระคายเคือง การสัมผัสเป็นเวลานานทำให้ปวดแสบปวดร้อนและไหม้
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนกินเข้าไปทำให้ระคายเคืองกระเพาะอาหาร และลำไส้ ทำให้คลื่นไส้และอาเจียน
สัมผัสถูกตา	การสัมผัสถูกตา ทำให้เกิดการระคายเคือง ต่อตา ตาแดง เจ็บตา

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในที่เย็น, แห้ง และมีการระบายอากาศเพียงพอ
- เก็บสารไว้ในลักษณะเปียก และมีความชื้น
- หลีกเลี่ยงการหายใจเข้าไป การสัมผัสถูกตา ผิวหนังและเสื้อผ้า

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

Lithium chloride (LiCl) [60]

ชื่อเคมี Lithium chloride

สูตรโมเลกุล LiCl

สูตรโครงสร้าง Li—Cl

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	เป็นของแข็ง
สี	ขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	42.394
จุดเดือด	1382 °C
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	605 °C

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไป จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อจมูก คอ และทางเดินหายใจ มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน
สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดการระคายเคืองเป็นผื่นแดง และทำให้ผิวหนังแสบไหม้
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนหรือกินเข้าไป จะก่อให้เกิดอันตราย เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง
สัมผัสถูกตา	การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิดการระคายเคือง ปวดแสบปวดร้อน น้ำตาไหล ตาแดง และตาบวมได้

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บในภาชนะบรรจุที่เย็น แห้ง และมีการระบายอากาศได้ดี
- หลีกเลี่ยงการหายใจเข้าไป การสัมผัสถูกตา ผิวหนังและเสื้อผ้า

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

Potassium chloride [61]ชื่อเคมี

Potassium chloride

ชื่ออื่นๆ

Potassium monochloride, Potash muriate, Enseal kcl, Chloropotassuril, Kalcorid, Kalitabs, Potavescent, Rekawan, SLOW-K, SPAN-K, Repone k, Chlorovescent

สูตรโมเลกุล

KCl

สูตรโครงสร้าง

K—Cl

การใช้ประโยชน์ (Uses)

ใช้ในการผลิตแบตเตอรี่ ใช้ในการหล่อโลหะผสมทองแดง เป็นสารป้องกันการกัดกร่อน

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	เป็นของแข็ง, เม็ดเล็ก ๆ
สี	ขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	74.56
จุดเดือด	1413 °C
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	772 °C
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	1.198 g/cm ³

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	การหายใจเข้าไป จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อ จมูก คอ และทางเดินหายใจ มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน
สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดการระคายเคือง เป็นผื่นแดง และทำให้ผิวหนังสเปาไหม้
กินหรือกลืนเข้าไป	การกลืนหรือกินเข้าไป จะก่อให้เกิดอันตราย เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และท้องร่วง
สัมผัสถูกตา	การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิดการระคายเคือง ปวด แสบปวดร้อน น้ำตาไหล ตาแดง และตาบวมได้

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่เย็นแห้ง และมีการระบายอากาศได้ดี

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการอย่างเหมาะสม

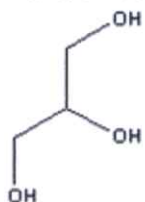
Glycerol [62]

ชื่อเคมี Glycerol

ชื่ออื่นๆ Glycerol, D-glycerol, L-glycerol , Glyceritol, Glycyl alcohol, Trihydroxypropane, Glycerin mist, Polyhydric alcohols, Propanetriol

สูตรโมเลกุล $C_3H_5(OH)_3$

สูตรโครงสร้าง

การใช้ประโยชน์ (Uses)

ใช้เป็นตัวถ่ายเทความร้อน, ใช้วัดจุดเดือด

คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี (Physical and Chemical Properties)

สถานะ	ของเหลว
สี	ใสคล้ายน้ำมัน
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น
น้ำหนักโมเลกุล	92.09
จุดเดือด	290 °C
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง	18 °C
ความถ่วงจำเพาะ (น้ำ=1)	1.26 g/cm ³

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ	เนื่องจากไอระเหยมีความดันต่ำการสูดดมไอระเหยที่อุณหภูมิห้องจะไม่เกิดขึ้น การสูดดมละออง/ไอของสารนี้เข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ
สัมผัสทางผิวหนัง	การสัมผัสถูกผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคือง

กินหรือกลืนเข้าไป

การกลืนหรือกินเข้าไป มีความเป็นพิษต่ำ อาจจะทำให้คลื่นไส้ ปวดศีรษะ ท้องร่วง

สัมผัสสูดดม

การสัมผัสสูดดมจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
- เก็บโดยมีการป้องกันความเสียหายทางกายภาพ
- เก็บห่างจาก สารที่เข้ากันไม่ได้
- ภาชนะบรรจุของสารที่เป็นถังเปล่า แต่มีกากสารเคมีตกค้างอยู่ เช่น ไอร์อะเฮยของเหลว อาจเป็นอันตรายได้
- ให้สังเกตคำเตือนและข้อควรระวังทั้งหมดที่ให้ไว้สำหรับสารนี้

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- สารนี้สามารถถูกย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย
- เมื่อรั่วไหลลงสู่แหล่งน้ำ สารนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำในระดับต่ำ
- จะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม เหมาะสม

ภาคผนวก ข

**การดูดซับน้ำ การดูดซับน้ำที่สมดุล การกักเก็บน้ำ
และส่วนที่ไม่ละลายของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล**

ภาคผนวก ข

ศึกษาถึงปริมาณน้ำที่แผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสามารถทำการดูดซึมน้ำ กักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีน้ำอยู่ในตอนแรก และของแข็งที่เหลือหลังจากการแช่น้ำ

$$\% \text{ การดูดซึมน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักหลังแช่น้ำ} - \text{น้ำหนักแห้งก่อนแช่น้ำ}}{\text{น้ำหนักฟิล์มแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100$$

$$\% \text{ การกักเก็บน้ำ} = \frac{\text{น้ำหนักที่เหลือหลังจากอบแห้ง}}{\text{น้ำหนักบวมตัวมากที่สุด}} \times 100$$

$$\% \text{ ของแข็งที่เหลือ} = \frac{\text{หลังแช่น้ำและอบแห้งวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง}}{\text{น้ำหนักฟิล์มแห้งก่อนแช่น้ำ}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ

สำหรับชิ้นงานที่เตรียมจากสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสความเข้มข้น 5%(w/v) 20 ml ผสมกับสารละลายไหมไฟโบรอินความเข้มข้น 2% (w/v) 10 ml, BIS 0.2 g, APS 0.2 g และกลีเซอรอล 1 ml นำไปแช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน

$$\text{โดย น้ำหนักของแผ่นฟิล์มแห้งก่อนแช่น้ำ} = 0.0258 \text{ g}$$

$$\text{น้ำหนักของแผ่นฟิล์มหลังแช่น้ำ} = 0.3893 \text{ g}$$

$$\text{จะได้ } \% \text{ การดูดซึมน้ำ} = \frac{(0.3893 - 0.0258)}{0.0258} \times 100 = 1408.92\%$$

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการแช่น้ำไปอบที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน

$$\text{โดย น้ำหนักของแผ่นฟิล์มหลังจากอบแห้ง} = 0.1981 \text{ g}$$

$$\text{น้ำหนักของแผ่นฟิล์มบวมตัวมากที่สุดหลังแช่น้ำ} = 0.5476 \text{ g}$$

$$\text{จะได้ } \% \text{ การกักเก็บน้ำ} = \frac{0.1981}{0.5476} \times 100 = 36.18\%$$

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านการอบแห้งวางไว้แห้งที่อุณหภูมิห้อง แล้วชั่งน้ำหนักของชิ้นงาน

$$\text{โดย น้ำหนักของแผ่นฟิล์มหลังแช่น้ำและอบแห้งวางไว้ที่อุณหภูมิห้อง} = 0.0082 \text{ g}$$

$$\text{น้ำหนักของแผ่นฟิล์มแห้งก่อนแช่น้ำ} = 0.0258 \text{ g}$$

$$\text{จะได้ } \% \text{ ของแข็งที่เหลือ} = \frac{0.0082}{0.0258} \times 100 = 31.78\%$$

สมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น

จากการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น โดยทำการทดลองเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และแต่ละสูตรทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ ข-1 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตร	ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่แช่ในน้ำกลั่น					
	เวลาในการทดสอบ (ชั่วโมง)					
	1	2	3	4	5	6
1	730.85±175.36	780.85±227.64	842.82±191.18	883.78±164.88	925.80±249.12	971.28±170.81
2	1003.09±162.18	1024.38±178.01	1052.91±221.91	1095.24±193.86	1113.67±210.05	1134.60±182.07
3	1127.73±218.89	1179.94±169.96	1249.26±190.61	1325.37±240.87	1341.59±184.75	1363.72±198.10
4	1350.47±245.58	1392.72±184.30	1450.24±243.85	1507.75±197.52	1546.71±204.68	1584.98±186.26
5	1502.99±208.56	1556.72±153.78	1628.96±238.12	1692.24±169.65	1742.99±187.80	1781.49±252.00
6	12501.12 ±2059.80	13972.50 ±1567.25	14760.02 ±1868.44	15303.20 ±2047.62	15874.16 ±1957.38	16832.11 ±1375.15
7	842.86±172.51	892.13±231.02	947.32±194.36	975.37±235.94	983.37±270.54	994.51±243.86
8	814.93±307.92	860.70±272.73	920.65±250.09	981.84±248.99	1021.39±192.42	1063.68±198.68
9	1032.07±171.92	1088.05±306.38	1135.66±265.60	1185.46±163.65	1217.53±245.25	1251.20±255.52
10	1239.64±185.73	1285.23±236.45	1348.71±316.64	1412.44±221.11	1454.15±172.69	1497.67±152.47
11	1408.92±239.05	1518.99±163.51	1606.59±	1665.89±197.02	1728.68±258.33	1756.98±320.61
12	1730.44±321.23	1798.07±295.23	1880.68±266.35	1940.10±183.98	1979.95±196.40	2020.05±308.71
13	14121.31 ±766.65	15321.74 ±1287.96	15993.02 ±943.67	16533.21 ±951.85	16772.61 ±875.88	17059.32 ±1252.67
14	-	-	-	-	-	-
15	1236.03±251.49	1277.37±149.86	1332.80±152.24	1388.38±253.85	1424.94±139.89	1466.74±240.78
16	889.86±241.14	927.38±224.09	974.65±165.50	1023.94±155.54	1055.78±146.79	1092.50±251.48
17	735.13±164.32	764.71±147.13	803.60±178.85	858.99±167.33	885.29±237.75	914.54±152.40
18	1119.11±267.04	1170.08±240.90	1209.42±304.87	1274.79±193.09	1320.50±285.75	1368.14±278.82

ตารางที่ ข-1 (ต่อ) แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตร	ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่แช่ในน้ำกลั่น					
	เวลาในการทดสอบ (ชั่วโมง)					
	1	2	3	4	5	6
19	895.42±213.93	936.03±210.09	987.34±212.58	1039.96±304.89	1074.24±166.14	1114.41±160.1
20	782.77±157.63	830.03±160.17	894.26±243.83	904.70±237.94	944.91±257.02	989.56±271.4

หมายเหตุ สูตร 14 ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้

สมบัติการดูดซึมน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น

จากการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น โดยทำการทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และแต่ละสูตรทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ ข-2 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตร	ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง
1	1023.14 ± 151.54
2	1184.42 ± 236.34
3	1447.20 ± 319.59
4	1610.33 ± 203.35
5	1817.02 ± 299.37
6	-
7	-
8	1125.87 ± 218.49
9	1333.47 ± 154.58
10	1787.05 ± 267.53
11	2022.48 ± 309.70
12	2274.88 ± 313.01

ตารางที่ ข-2 (ต่อ) แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตร	ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่แช่ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 72 ชั่วโมง
13	-
14	-
15	1518.71 ± 205.62
16	1149.29 ± 257.96
17	1083.66 ± 167.88
18	1411.08 ± 216.64
19	1220.74 ± 235.11
20	1031.59 ± 164.57

หมายเหตุ สูตร 6, 7 และ 13 ชิ้นงานสามารถละลายได้หมด

สูตร 14 ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้

สมบัติการกักเก็บน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น

จากการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการกักเก็บน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น โดยนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลไปอบที่อุณหภูมิ 37 °C ทำการชั่งน้ำหนักทุกๆ 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และแต่ละสูตรทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ ข-3 แสดงค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตร	ค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่อบแห้ง					
	เวลาในการทดสอบ (ชั่วโมง)					
	1	2	3	4	5	6
1	17.78±2.31	13.22±2.83	12.61±3.25	11.55±3.08	10.94±3.16	9.73±4.24
2	22.32±3.52	17.31±4.05	13.93±3.40	12.65±3.32	12.15±2.04	11.32±2.87
3	26.43±2.33	21.93±3.74	18.23±2.53	17.35±4.15	15.82±3.37	15.42±3.45

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) แสดงค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตร	ค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่อบแห้ง					
	เวลาในการทดสอบ (ชั่วโมง)					
	1	2	3	4	5	6
4	30.73±2.24	26.89±2.28	22.78±3.79	20.17±2.52	19.26±4.13	18.34±3.98
5	36.86±2.39	30.80±3.99	25.97±2.47	22.84±3.80	20.62±3.55	19.38±4.03
6	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	21.35±2.03	17.01±3.54	15.89±2.83	14.73±3.52	14.04±2.74	13.47±4.20
9	24.82±3.42	21.98±4.03	19.05±2.72	17.84±3.80	17.00±2.95	15.34±2.41
10	31.60±3.56	27.09±2.33	24.48±2.63	21.86±3.08	20.36±2.65	19.59±2.93
11	36.18±3.99	32.27±3.72	27.90±2.75	25.22±2.71	23.39±2.54	22.01±2.80
12	43.24±3.87	37.78±3.06	32.71±2.84	27.24±4.53	25.11±2.96	24.09±2.61
13	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-
15	44.33±2.63	37.96±3.82	32.60±3.38	29.49±4.17	27.51±2.85	26.56±2.59
16	45.49±3.24	39.23±4.21	35.20±3.95	31.73±2.47	30.09±2.80	29.26±2.72
17	46.63±3.51	41.98±2.77	38.14±2.80	35.04±3.16	34.28±3.25	33.71±2.65
18	43.34±2.73	35.91±3.51	32.48±3.65	30.30±2.83	29.26±2.45	27.61±3.08
19	47.98±2.84	40.27±3.12	35.20±2.99	31.73±3.46	30.09±3.20	29.26±2.79
20	50.25±3.11	44.79±2.50	40.68±2.73	37.79±2.95	36.53±3.02	33.27±3.54

หมายเหตุ สูตร 6, 7 และ 13 ขึ้นงานสามารถละลายได้หมด

สูตร 14 ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้

ค่าของแข็งที่เหลือของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น

จากการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาค่าของแข็งที่เหลือของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในน้ำกลั่น โดยนำแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลวางให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง และแต่ละสูตรทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ ข-4 แสดงค่าของแข็งที่เหลือเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

สูตร	ค่าของแข็งที่เหลือเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่วางให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 72 ชั่วโมง
1	17.77 ± 4.12
2	19.93 ± 5.52
3	22.88 ± 3.97
4	25.05 ± 7.08
5	29.70 ± 7.57
6	-
7	-
8	19.64 ± 8.08
9	21.76 ± 5.85
10	25.67 ± 5.04
11	31.78 ± 8.37
12	36.83 ± 4.97
13	-
14	-
15	36.95 ± 9.08
16	37.93 ± 7.47
17	39.05 ± 4.82
18	38.78 ± 5.00
19	40.83 ± 6.17
20	41.25 ± 2.98

หมายเหตุ สูตร 6, 7 และ 13 ชิ้นงานสามารถละลายได้หมด

สูตร 14 ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้

สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 3, 7, 10 และ 14

จากการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 11 ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 3, 7, 10 และ 14 โดยทำการทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และแต่ละสูตรทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ ข-5 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายบัฟเฟอร์

pH	ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่แช่ในสารละลายบัฟเฟอร์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
3	326.66 ± 180.29
7	1686.88 ± 244.58
10	688.20 ± 205.03
14	267.09 ± 102.52

สมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเกลือ

จากการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติการดูดซับน้ำที่สมดุลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 11 ในสารละลายเกลือ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กรณี คือ สารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่งต่างชนิดกัน (LiCl, NaCl, KCl) ที่ความเข้มข้น 0.2 mol/l และสารละลายเกลือที่มีประจุบวกต่างชนิดกัน (NaCl, CaCl₂, AlCl₃) ที่ความเข้มข้น 0.2 mol/l ทำการทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมง และแต่ละสูตรทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ ข-6 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่งต่างชนิดกัน

เกลือ	ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่แช่ในสารละลายเกลือที่มีประจุบวกหนึ่งต่างชนิดกัน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
LiCl	326.99 ± 82.92
NaCl	306.65 ± 59.51
KCl	292.24 ± 46.28

ตารางที่ ข-7 แสดงค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสารละลายเกลือที่มีประจุบวกต่างชนิดกัน

เกลือ	ค่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่สมดุลเฉลี่ย (%) ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลที่แช่ในสารละลายเกลือที่มีประจุบวกต่างชนิดกัน เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
AlCl_3	108.31 ± 25.80
CaCl_2	203.69 ± 64.02
NaCl	306.65 ± 59.51

ภาคผนวก ค

**ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์
(Universal testing machine)**

ภาคผนวก ก

สมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และค่ามอดุลัสของยังของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลในสถานะต่างๆ

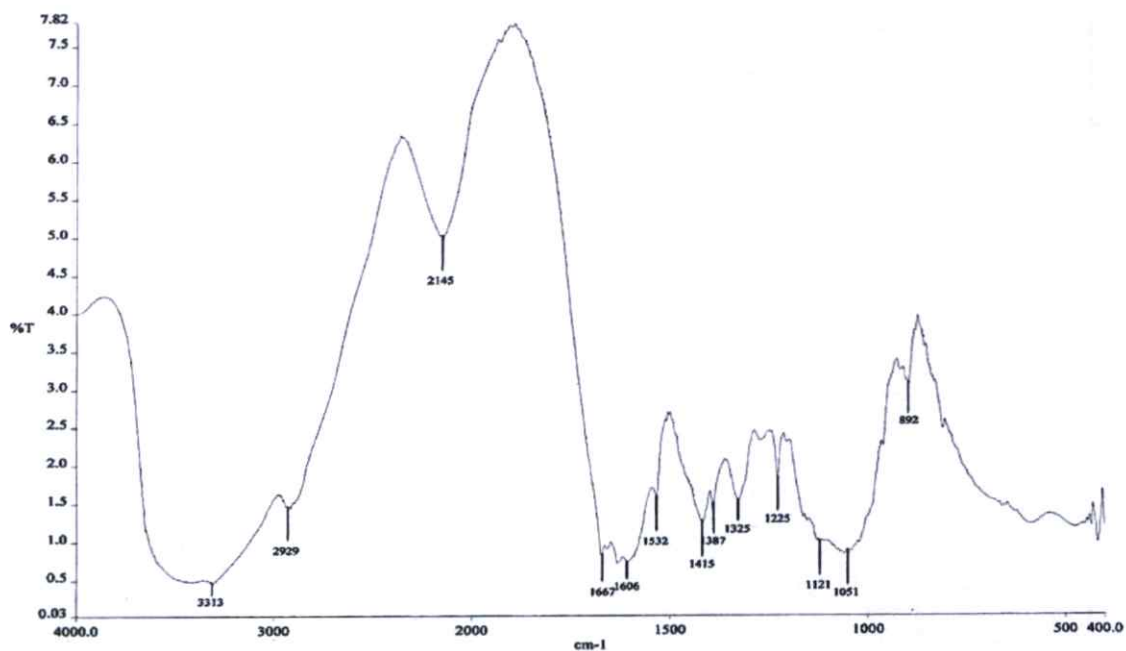
สูตร	Tensile strength (MPa)	% Elongation at break	Young's modulus (MPa)
8	36.15±4.32	12.24±1.79	386.75±58.43
9	35.72±5.45	10.63±1.73	480.94±65.49
10	34.24±5.97	9.37±2.11	683.25±62.26
11	32.93±3.10	8.48±1.42	796.47±70.36
12	31.15±4.37	7.97±1.76	876.53±83.41
13	29.14±4.54	6.48±2.01	915.50±76.30
15	31.19±5.66	7.58±1.35	945.39±93.19
18	30.96±3.42	6.53±1.12	930.71±105.51

ภาคผนวก ง

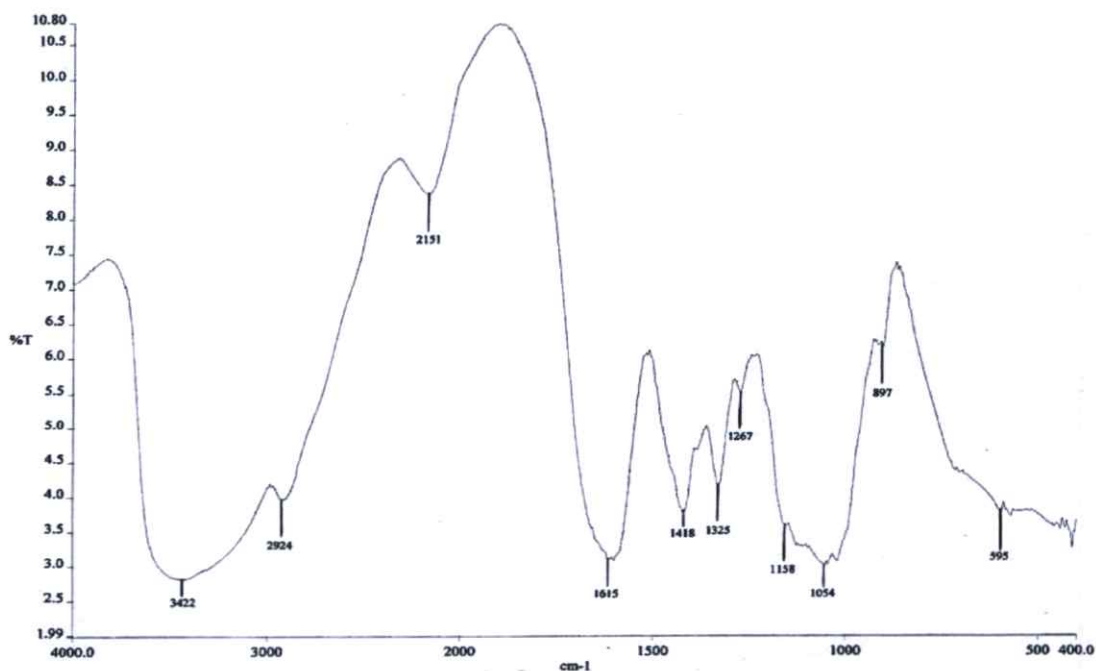
อินฟราเรดสเปกโตรเมทรี FTIR

ภาคผนวก ง

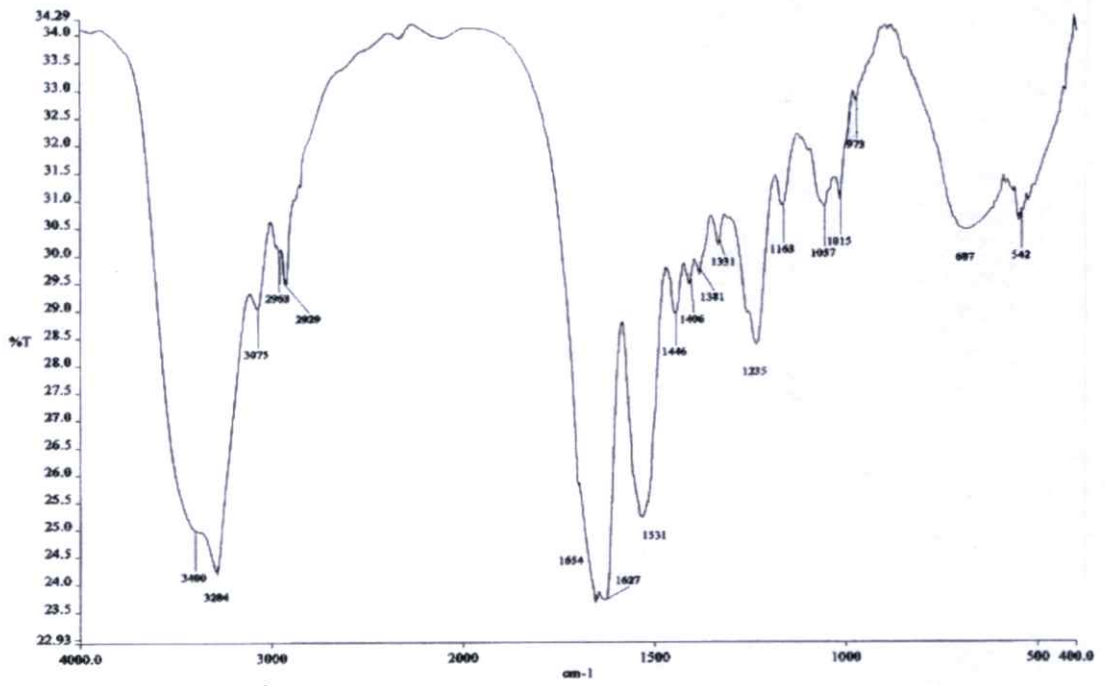
IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจล



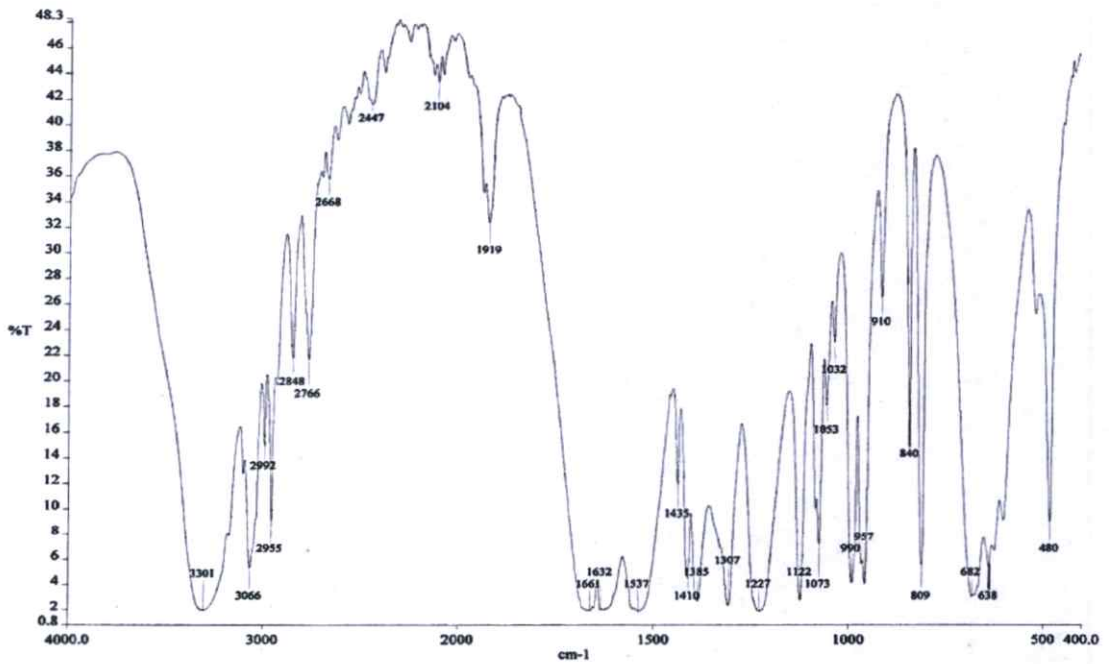
รูปที่ ง-1 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำ



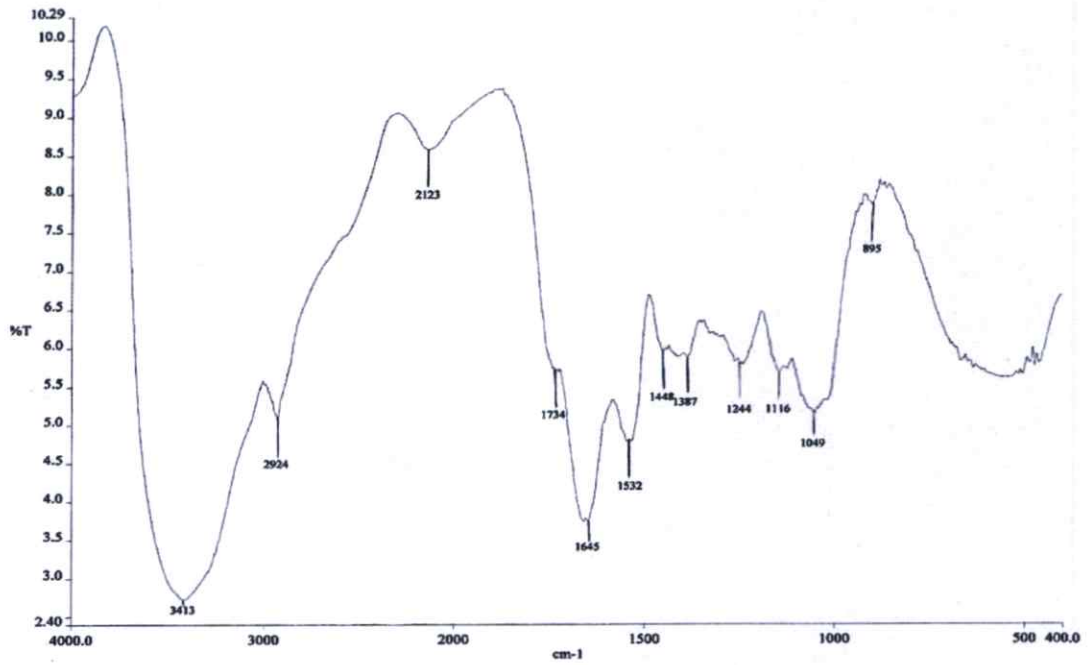
รูปที่ ง-2 แสดง IR spectrum ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง



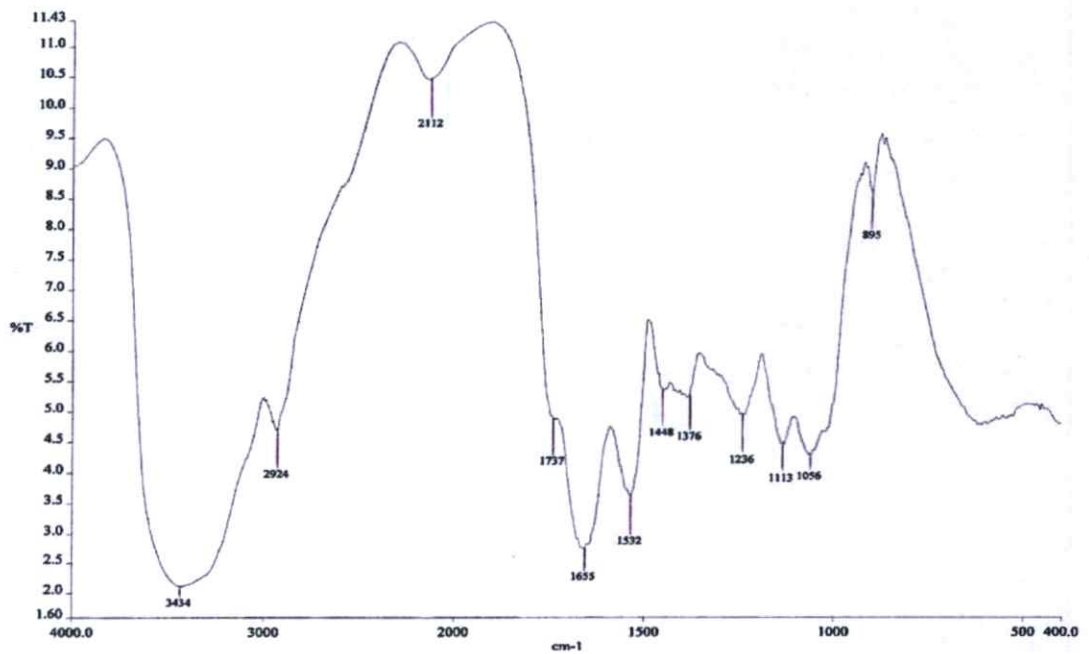
รูปที่ ง-3 แสดง IR spectrum ของสารละลายไหมไฟโบรอิน



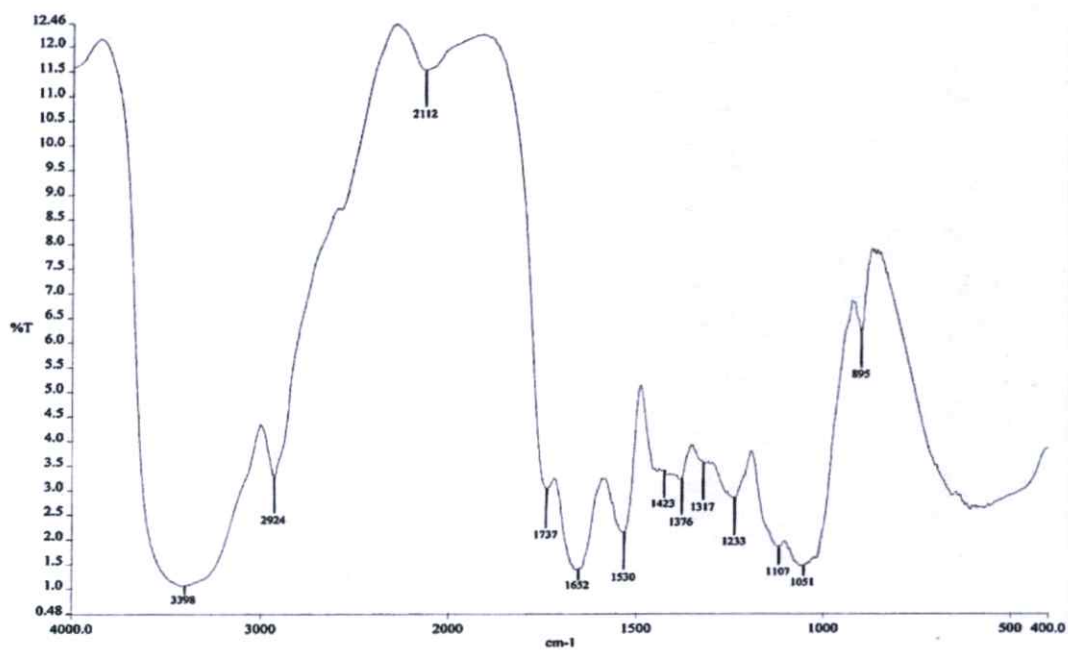
รูปที่ ง-4 แสดง IR spectrum ของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide) (BIS)



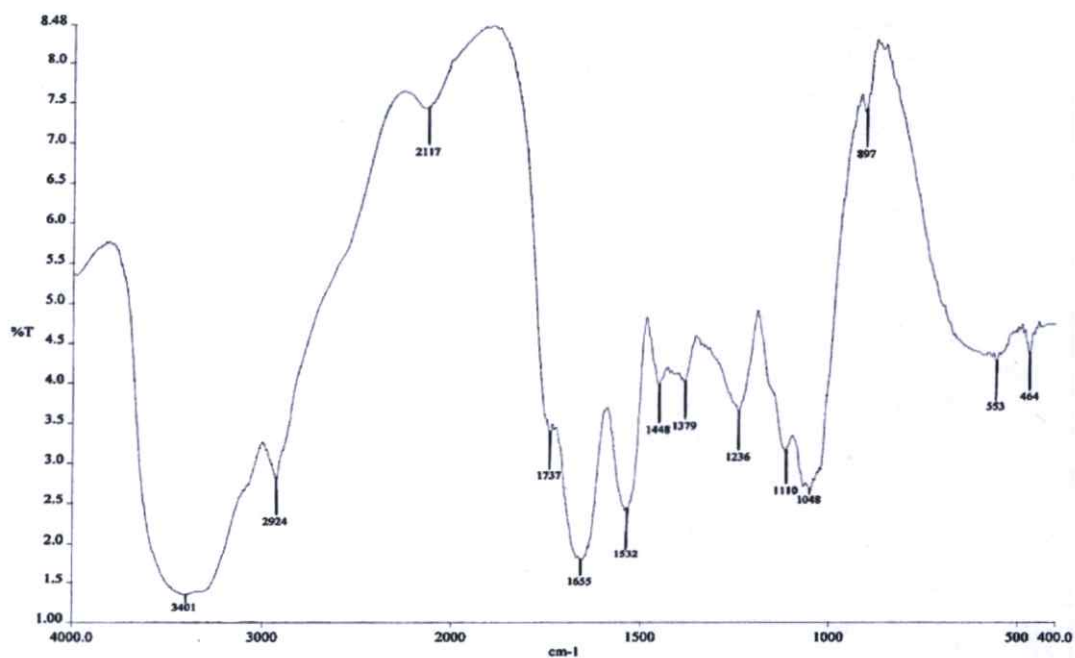
รูปที่ ง-5 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจลสูตร 1 ($\text{CMC}_L:\text{SF}$, 5:25)



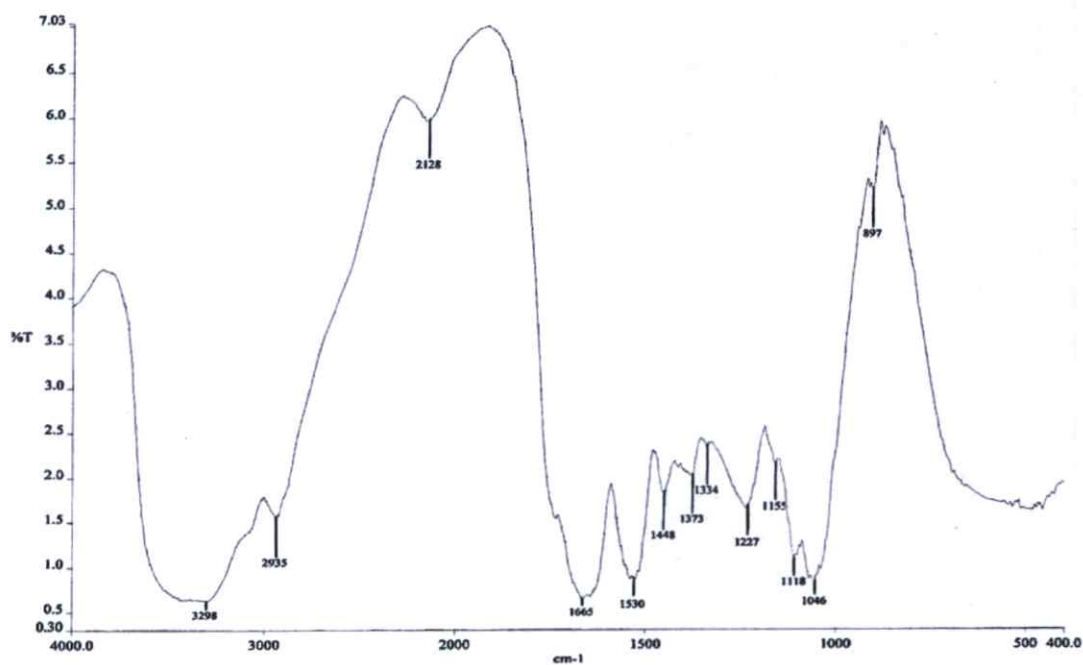
รูปที่ ง-6 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์ม ไฮโดรเจลสูตร 2 ($\text{CMC}_L:\text{SF}$, 10:20)



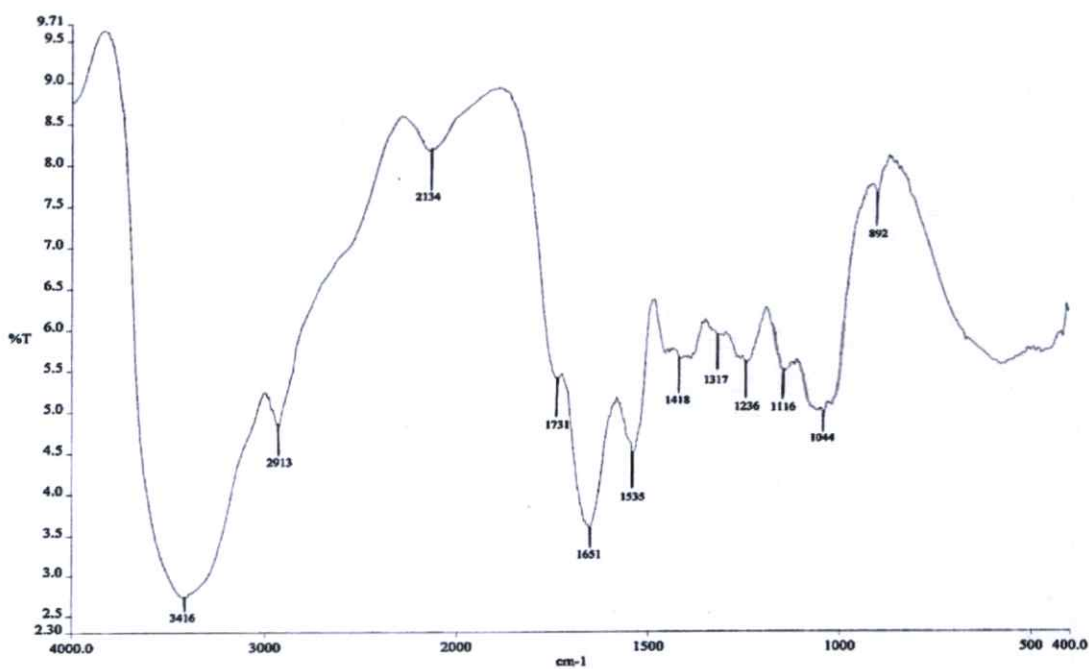
รูปที่ ง-7 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร3 (CMC_L:SF, 15:15)



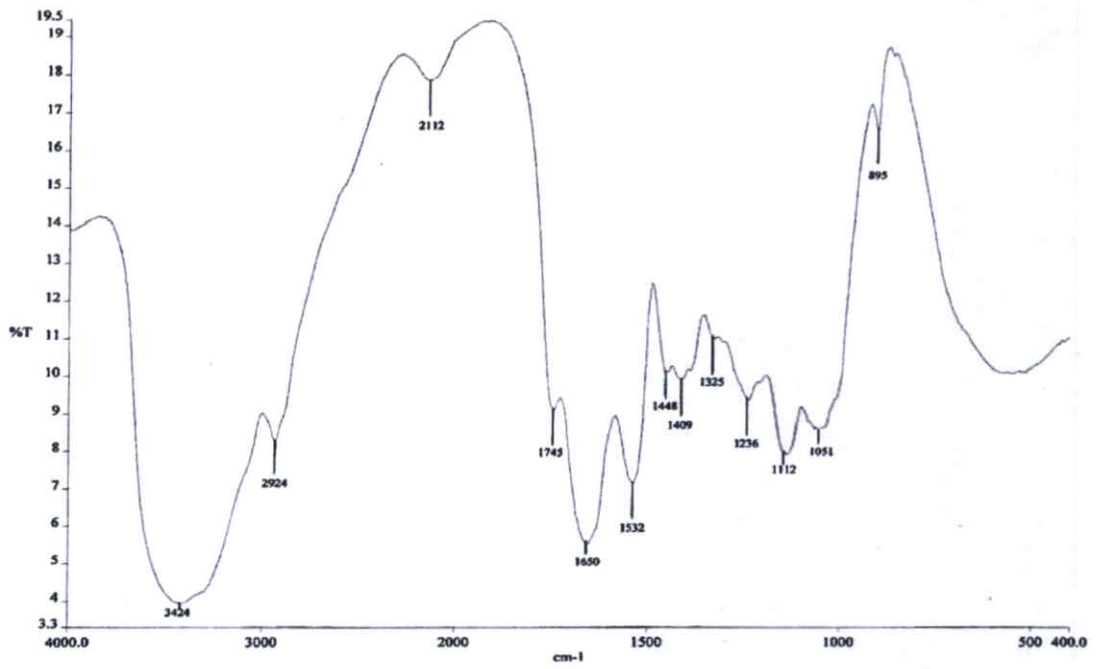
รูปที่ ง-8 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร4 (CMC_L:SF, 20:10)



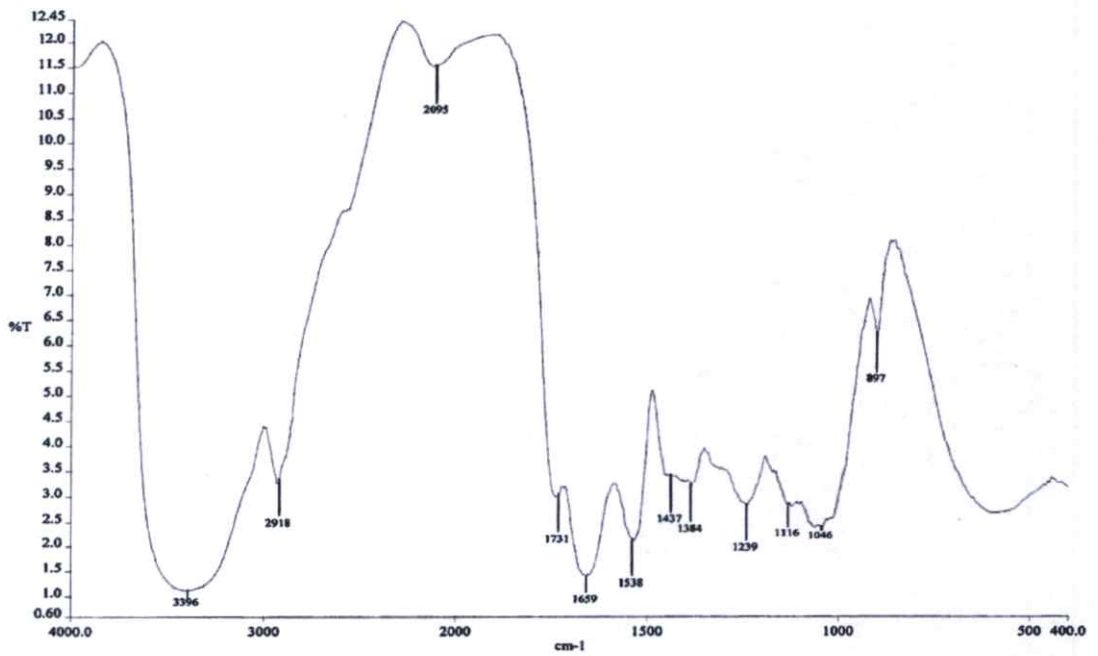
รูปที่ ง-9 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 5 (CMC_L:SF, 25:5)



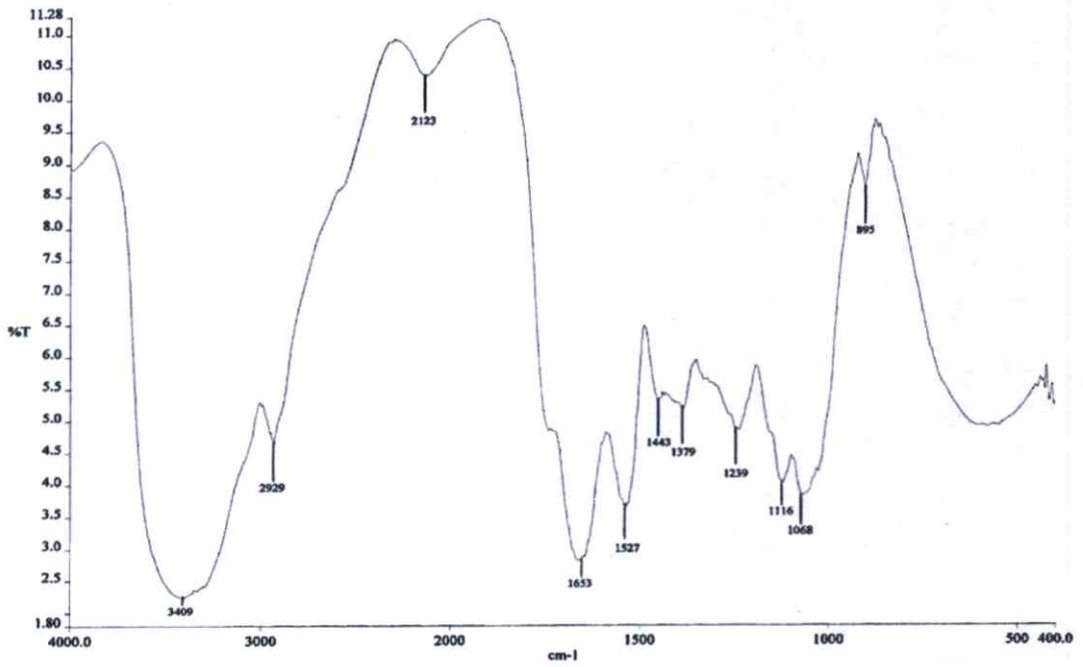
รูปที่ ง-10 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 8 (CMC_H:SF, 5:25)



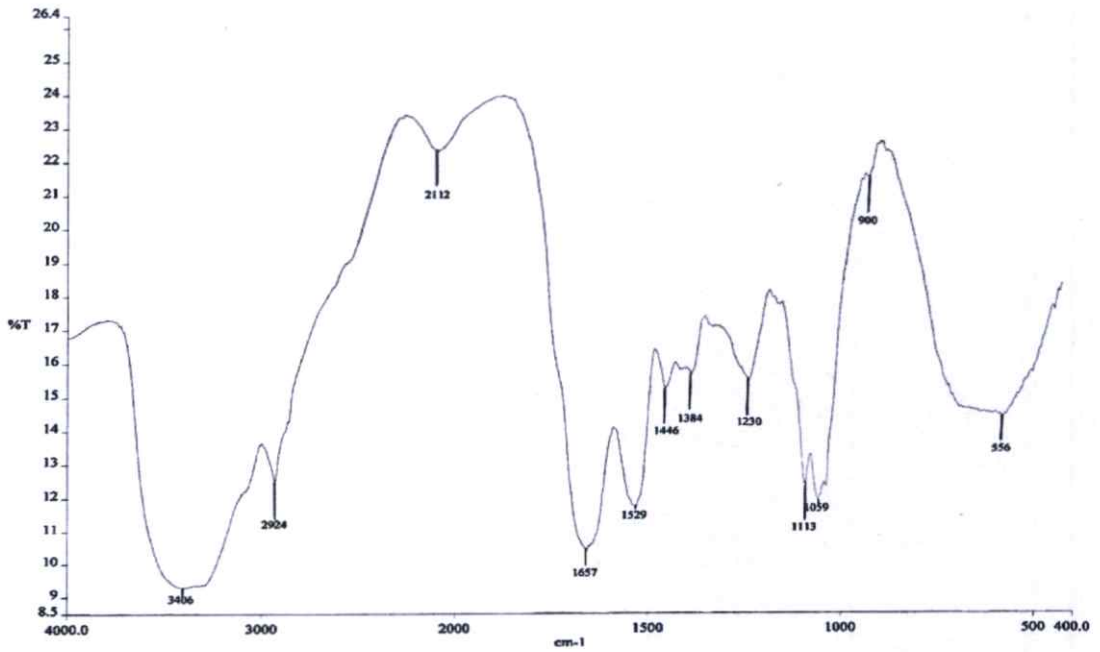
รูปที่ ง-11 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 9 (CMC_H-SF, 10:20)



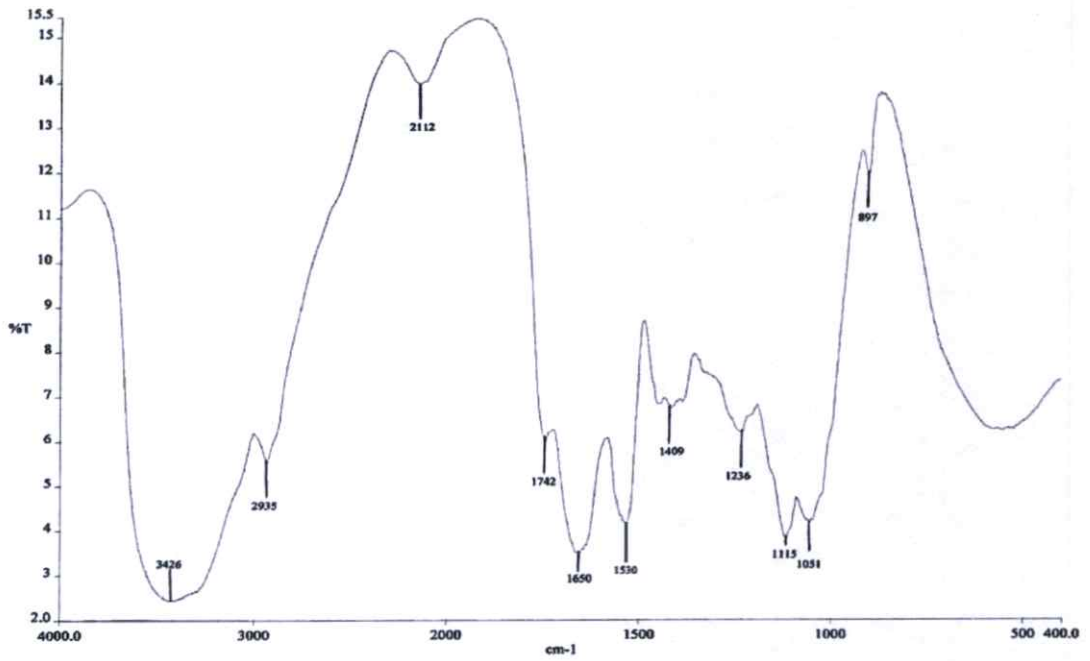
รูปที่ ง-12 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 10 (CMC_H-SF, 15:15)



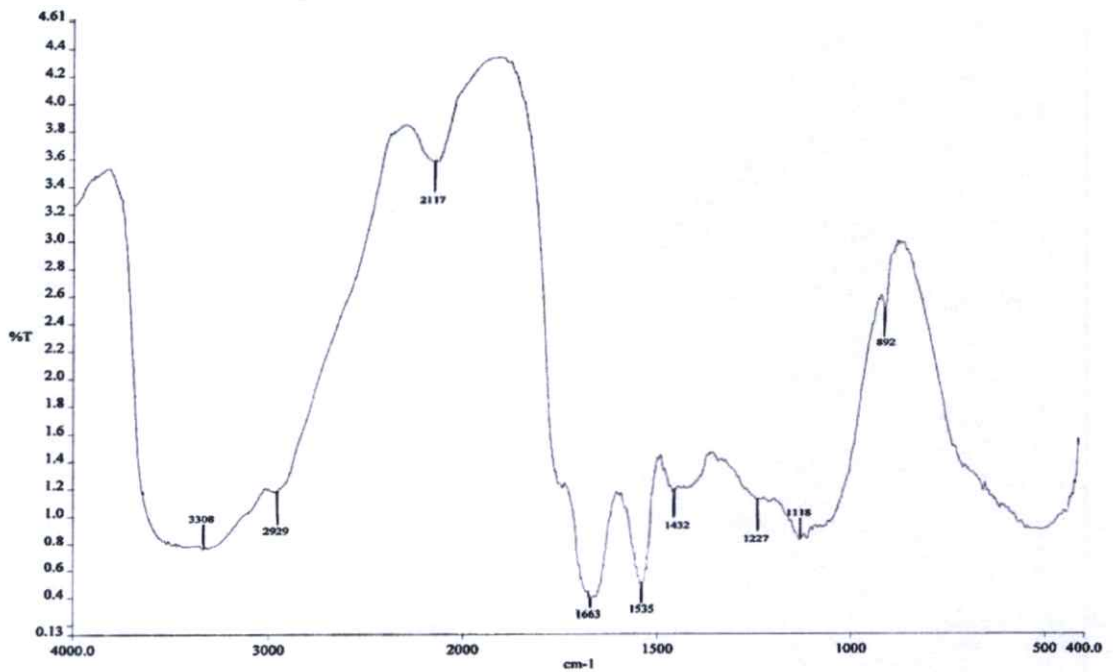
รูปที่ ง-13 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 11 ($\text{CMC}_H:\text{SF}$, 20:10)



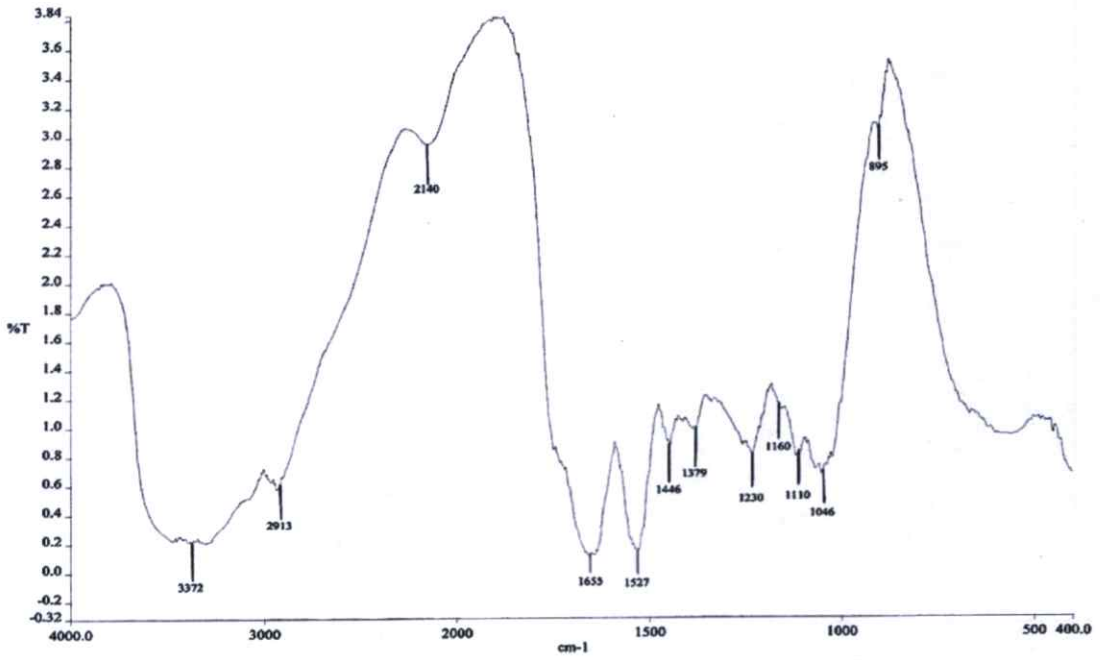
รูปที่ ง-14 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 12 ($\text{CMC}_H:\text{SF}$, 25: 5)



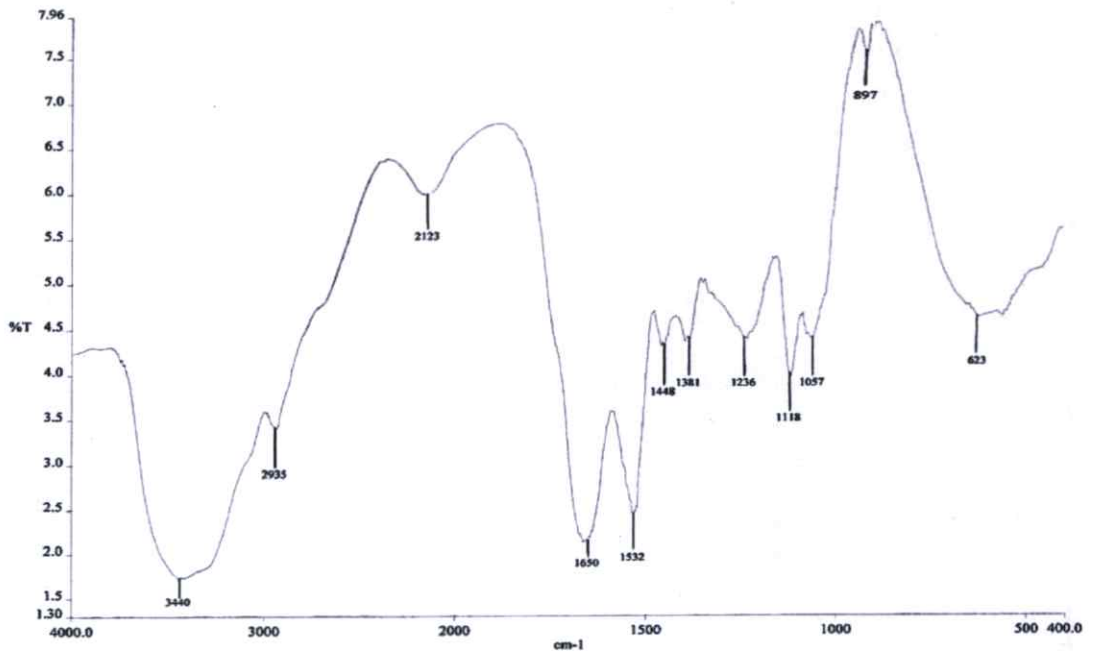
รูปที่ ง-15 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 15 (BIS 0.4 g)



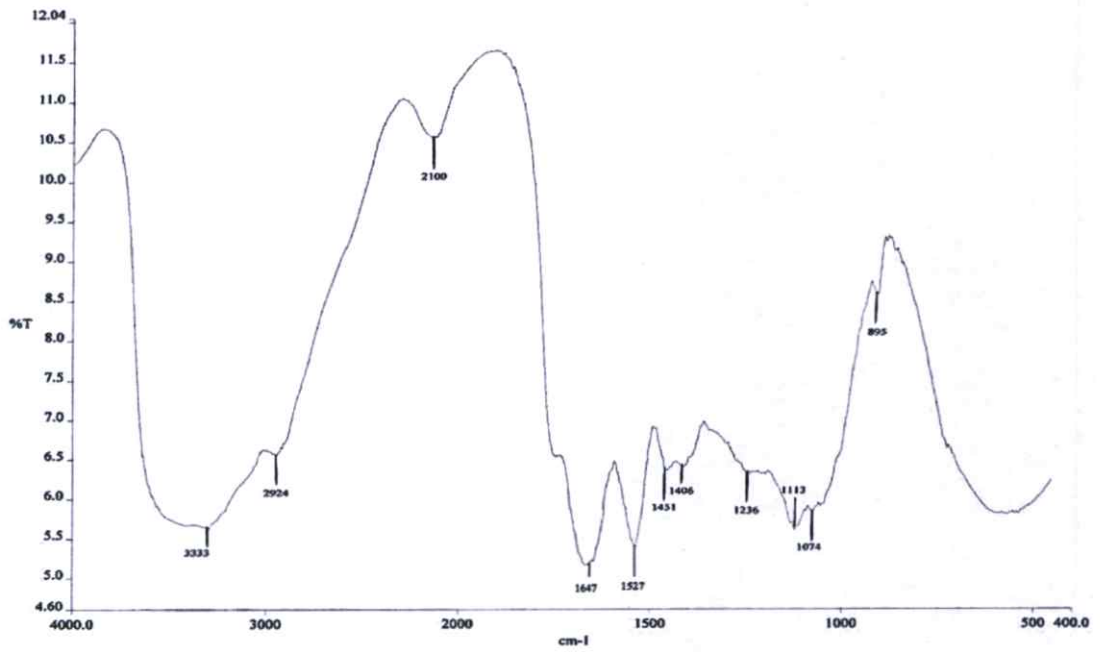
รูปที่ ง-16 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 16 (BIS 0.6 g)



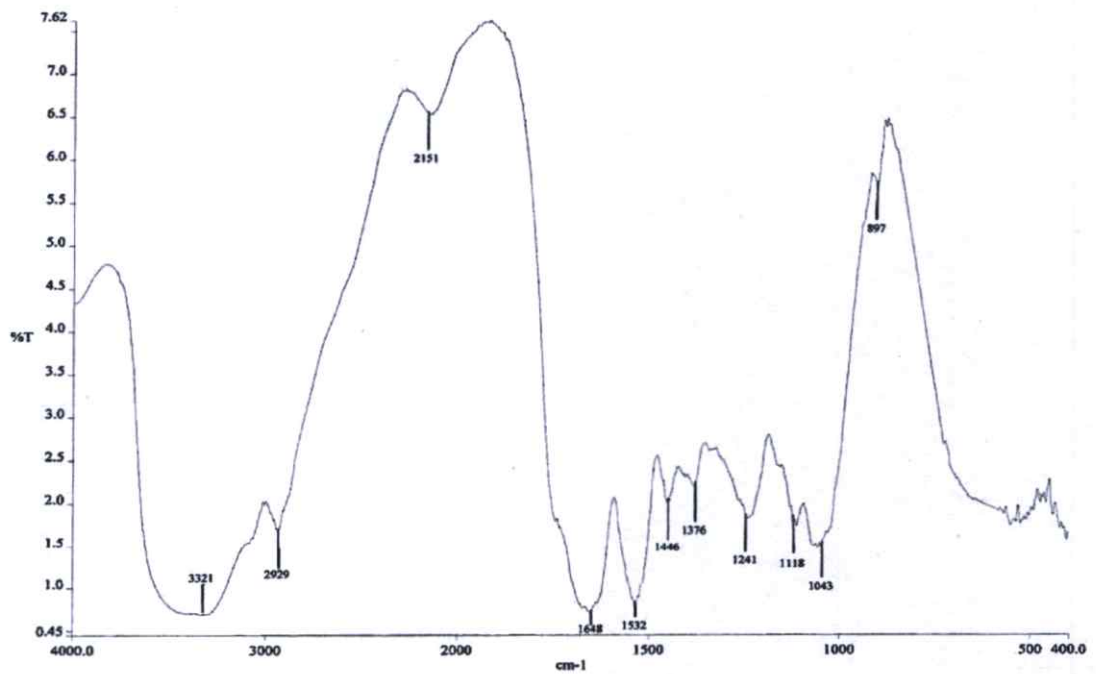
รูปที่ ง-17 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 17 (BIS 0.8 g)



รูปที่ ง-18 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 18 (APS 0.4 g)



รูปที่ ง-19 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 19 (APS 0.6 g)

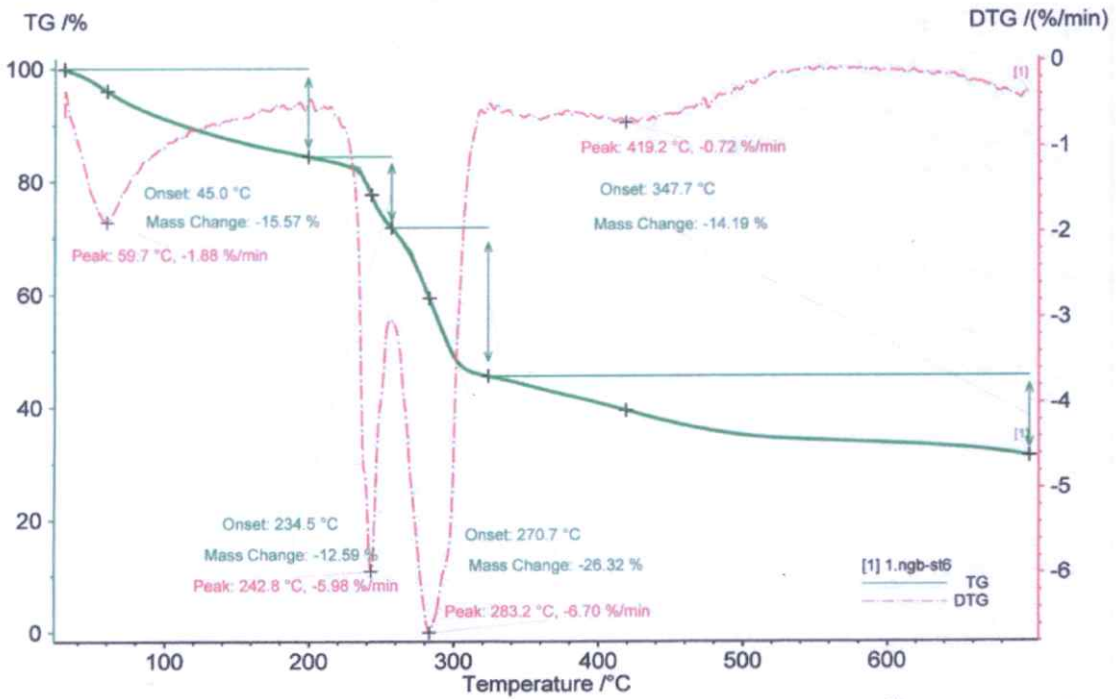


รูปที่ ง-20 แสดง IR spectra ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 20 (APS 0.8 g)

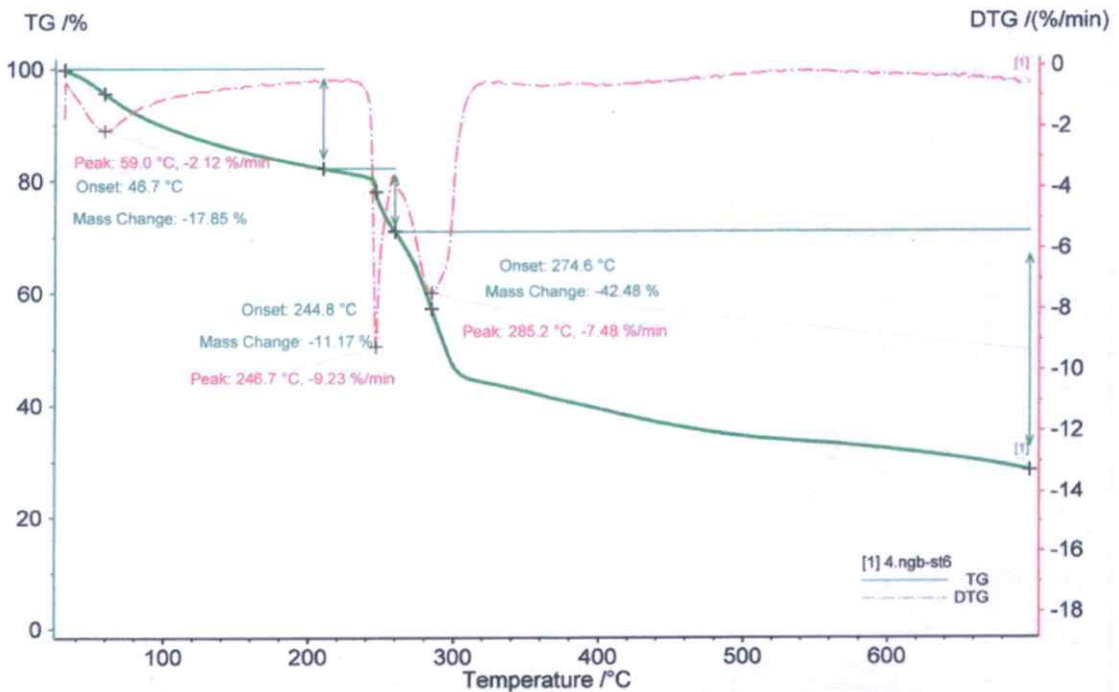
ภาคผนวก จ

ผลเทอร์โมแกรม TGA

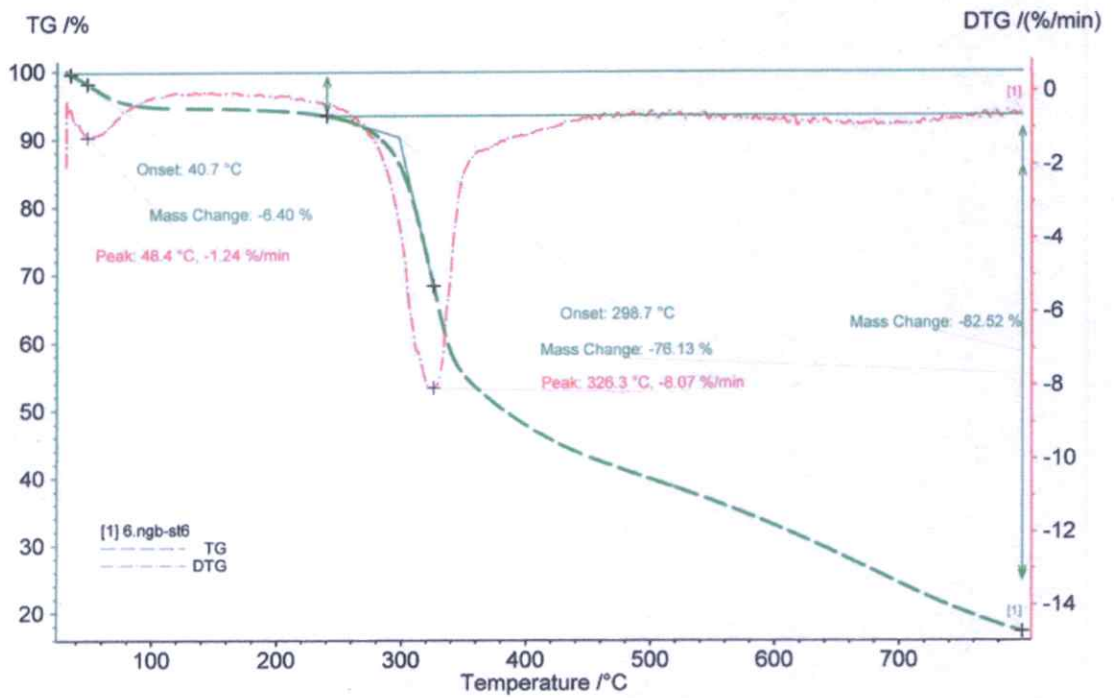
ภาคผนวก จ



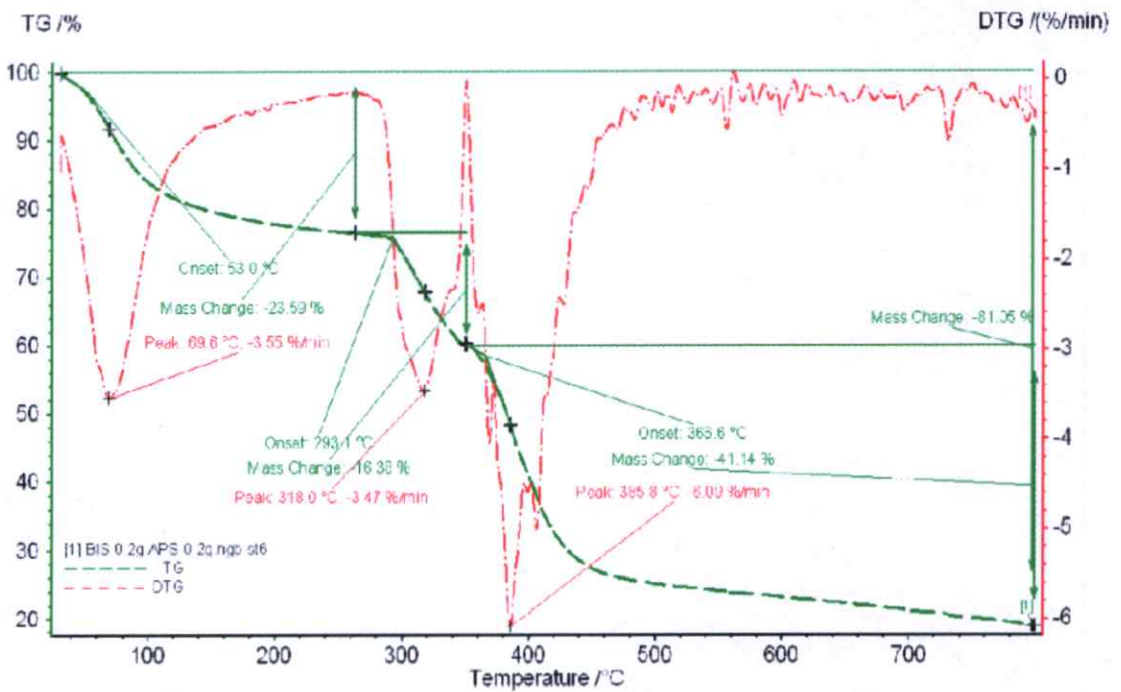
รูปที่ จ-1 เทอร์โมแกรม TGA ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยง BIS



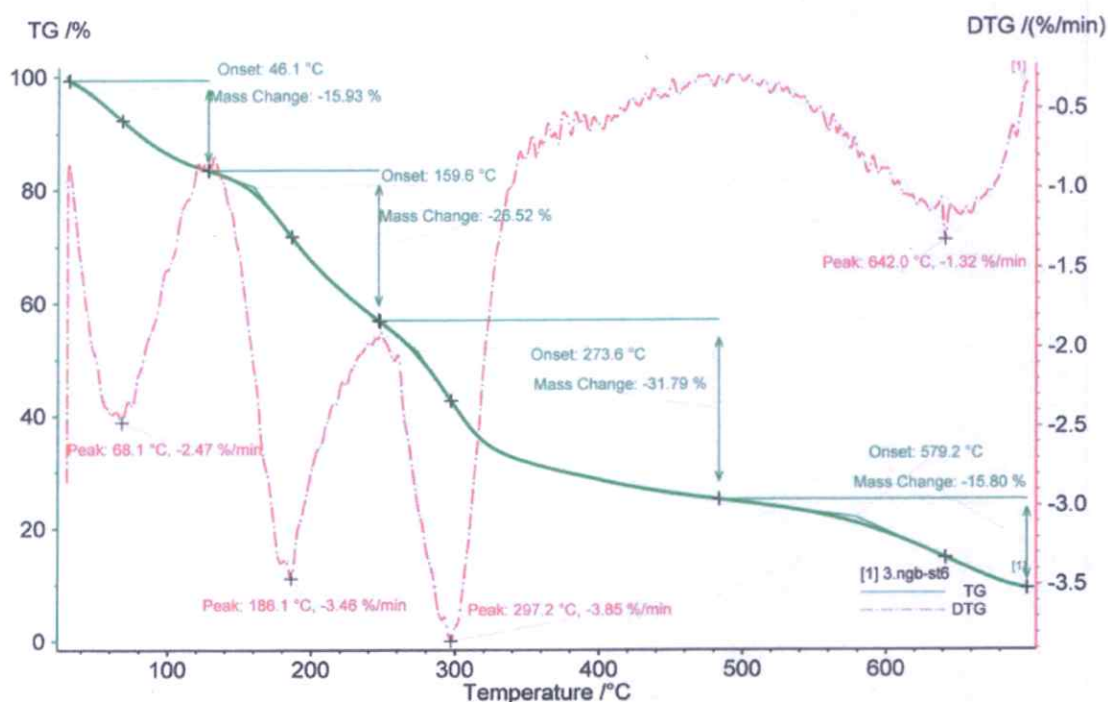
รูปที่ จ-2 เทอร์โมแกรม TGA ของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูงที่มีการเชื่อมโยงด้วยสารเชื่อมโยง BIS



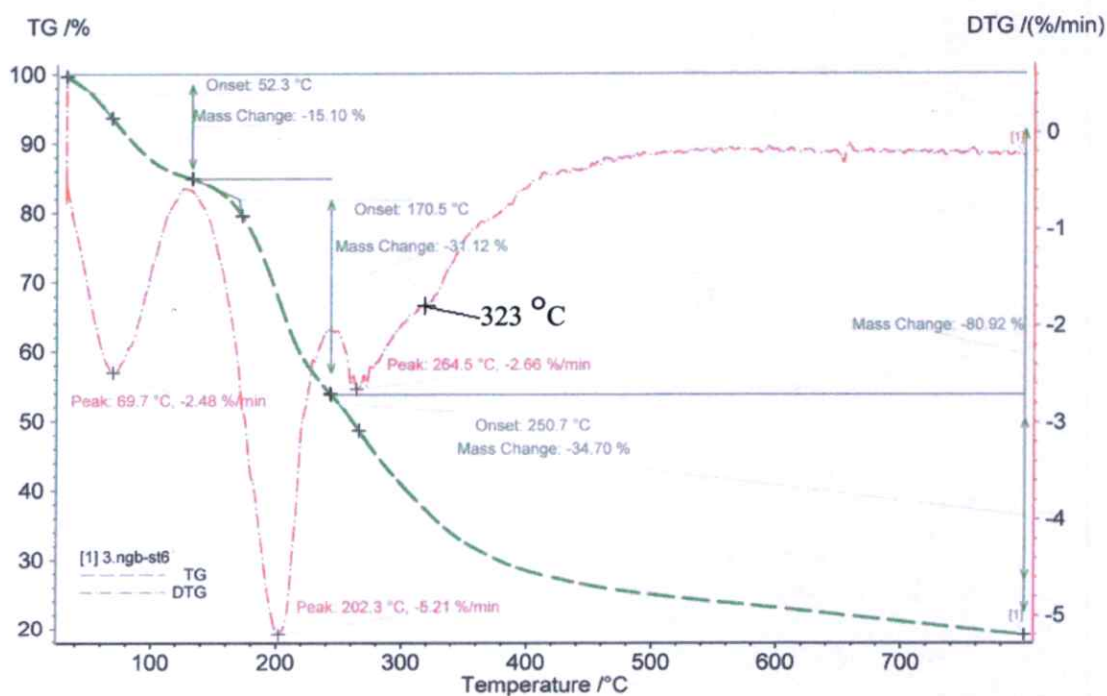
รูปที่ จ-3 เทอร์โมแกรม TGA ของสารละลายไหมไฟโบรอิน



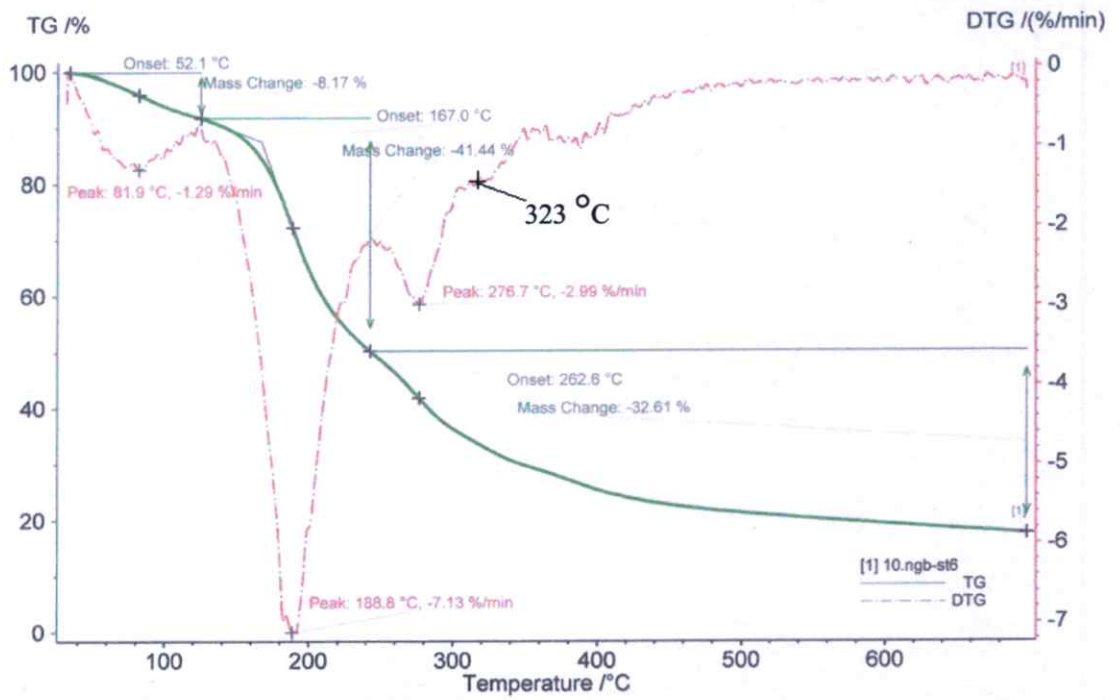
รูปที่ จ-4 เทอร์โมแกรม TGA ของ N, N'-methylene- bis-(acrylamide) (BIS)



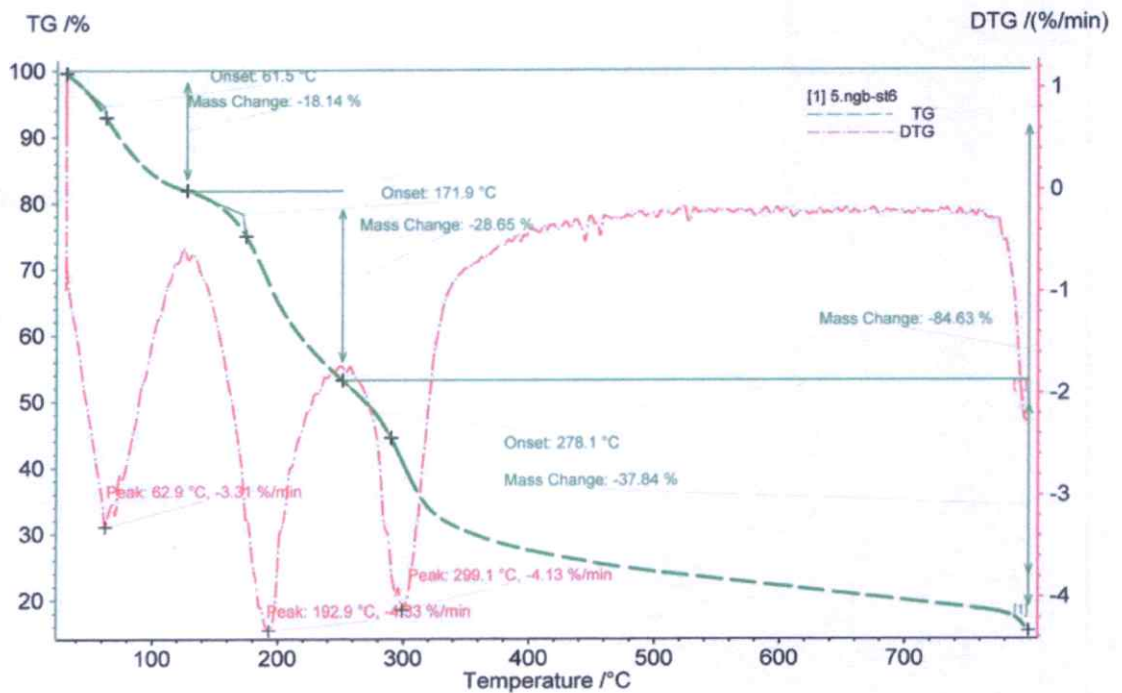
รูปที่ จ-5 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 4 (CMC_L:SF, 20:10)



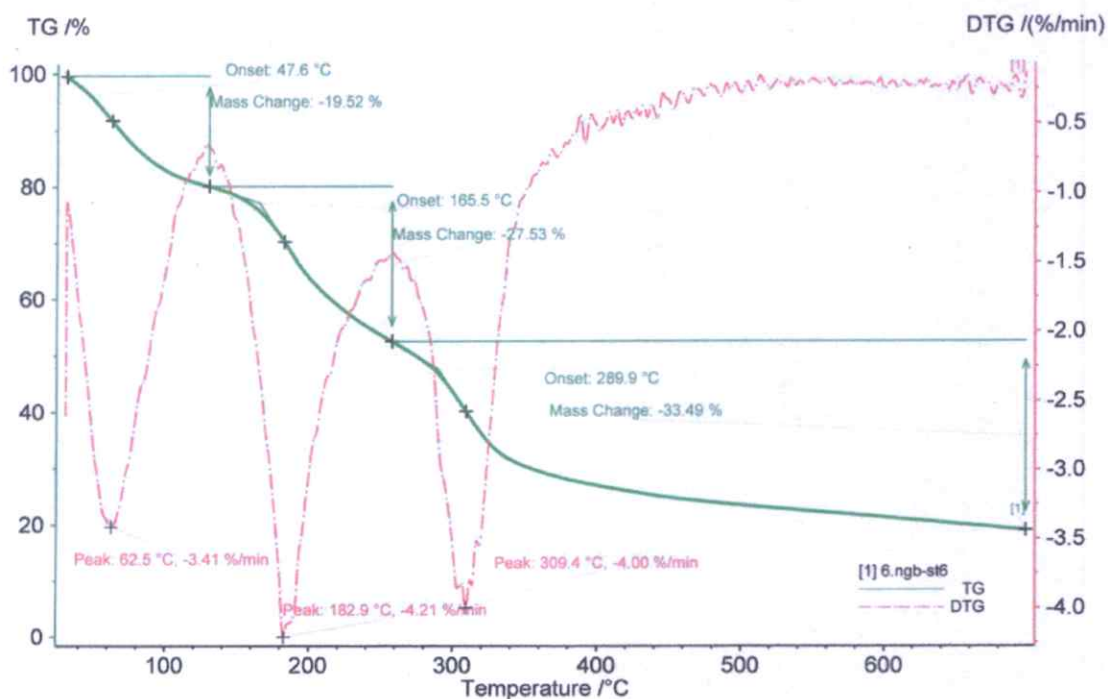
รูปที่ จ-6 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 8 (CMC_H:SF, 5:25)



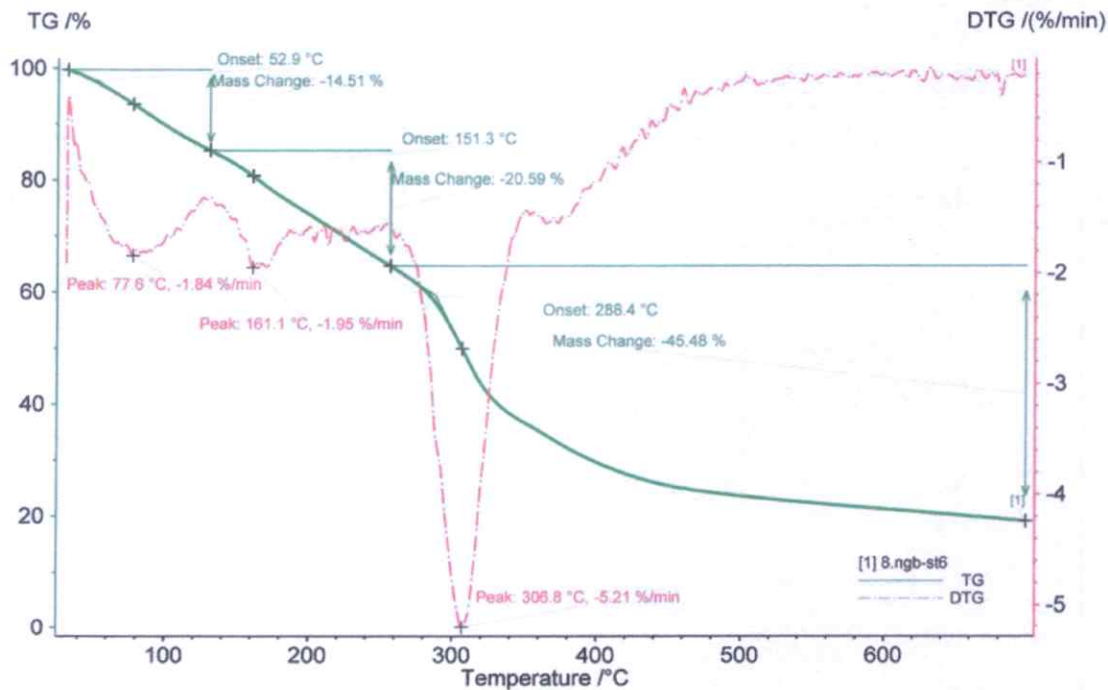
รูปที่ จ-7 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 10 (CMC_H-SF, 15:15)



รูปที่ จ-8 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 11 (CMC_H-SF, 20:10)



รูปที่ จ-9 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 17 (BIS 0.8 g)



รูปที่ จ-10 เทอร์โมแกรม TGA ของแผ่นฟิล์มไฮโดรเจลสูตร 20 (APS 0.8 g)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	หทัยกาญจน์ จันทร์ส่องแสง
วันเกิด	15 สิงหาคม 2530
สถานที่เกิด	อ. เมือง จ. ตรัง
การศึกษา	- ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนบูรณะรำลึก ตรัง พ.ศ. 2541-2547 - ระดับปริญญาตรี (วท.บ.วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ พ.ศ. 2548-2551 - ระดับปริญญาโท (วท.ม.เทคโนโลยีพอลิเมอร์) ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2552-2554