

สมบัติ เสถียรภาพ และสภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเสริมเส้นใยเซลลูโลส



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES, STABILITY AND BIO-DEGRADABILITY OF CELLULOSE FIBER-  
REINFORCED SOY PROTEIN ISOLATE FILM

Miss Nanthaporn Phothiwutthikhun



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Food Technology

Department of Food Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	สมบัติ เสถียรภาพ และสภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์ม โพรตีนถั่วเหลืองสกัดเสริมเส้นใยเซลลูโลส
โดย	นางสาวนันท์พร โพธิ์ภูมิคุณ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(อาจารย์ ดร.ธีรนนท์ เจริญรสกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.ธนจันทร์ มหาวนิช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชื่นจิต ประกิจชัยวัฒนา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา สมพงษ์)

นันทพร โพธิ์วิเศษ : สมบัติ เสถียรภาพ และสภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเสริมเส้นใยเซลลูโลส (PROPERTIES, STABILITY AND BIO-DEGRADABILITY OF CELLULOSE FIBER- REINFORCED SOY PROTEIN ISOLATE FILM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.ธนจันทร์ มหาวณิช, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.เกียรติศักดิ์ ดวงมาลย์, 113 หน้า.

โปรตีนถั่วเหลืองเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นฟิล์มย่อยสลายได้ อย่างไรก็ตามฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองมีข้อจำกัดสำคัญในด้านความแข็งแรงเชิงกล การเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุต่างๆ เส้นใยเซลลูโลสเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงและสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จึงมีศักยภาพในการนำมาเสริมความแข็งแรงให้แก่ฟิล์มย่อยสลายได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเติมเส้นใยจากเซลลูโลสต่อสมบัติ เสถียรภาพ และสภาพสลายได้ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรชนิดของเส้นใยจากเซลลูโลสเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลส และไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส แปรขนาดอนุภาคของเส้นใยเป็น 2 ขนาด ได้แก่ 20 และ 50 ไมโครเมตร และแปรปริมาณเส้นใยเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ในด้านสมบัติเชิงกลพบว่าการเสริมเส้นใยส่งผลต่อความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่มีขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่าทำให้ฟิล์มมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ในขณะที่การยืดตัวถึงจุดขาด (elongation at break) ของทุกตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น การเสริมเส้นใยส่งผลให้ความโปร่งแสงของฟิล์มลดลง ในขณะที่สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapor permeability) และมุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ฟิล์มที่เติมเส้นใยมี  $L^*$  ลดลง ในขณะที่  $a^*$  และ  $b^*$  มีค่าสูงขึ้น มุมสีของทุกตัวอย่างมีค่าประมาณ 90 องศา ซึ่งเป็นมุมของสีเหลือง นอกจากนี้พบว่าความเข้มสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวและภาคตัดขวางพบว่าฟิล์มที่เสริมเส้นใยมีพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้นและเนื้อฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลง สำหรับด้านเสถียรภาพ พบว่าชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยมีผลต่อความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์ม โดยฟิล์มที่เติมเส้นใยขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่เติมเส้นใยขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร และฟิล์มที่เติมเซลลูโลสมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส จากการศึกษาพฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มที่ 25 องศาเซลเซียส พบว่าฟิล์มที่เสริมเส้นใยมีรูปแบบของเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ความต้านทานแรงดึงขาดมีค่าลดลงและการยืดตัวถึงจุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อวอเตอร์แอคทิวิตีมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มแต่ละตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับวอเตอร์แอคทิวิตีที่แตกต่างกัน สำหรับการสลายตัวด้วยความร้อน พบว่าตัวอย่างฟิล์มรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่คล้ายคลึงกัน โดยมีการสูญเสียน้ำหนักเป็น 3 ช่วง คือ การระเหยของน้ำ (ช่วงอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียส) การระเหยของกลีเซอรอล (ช่วงอุณหภูมิ 180-260 องศาเซลเซียส) และการสลายตัวของโปรตีนและเส้นใยจากเซลลูโลส (ช่วงอุณหภูมิ 300-320 องศาเซลเซียส) สำหรับสภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพในภาวะที่มีอากาศภายใต้ภาวะการหมักขยะที่ควบคุม พบว่าที่ระยะเวลาการหมัก 45 วัน ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% มีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 86.97 ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่มีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 85.43

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร  
สาขาวิชา เทคโนโลยีทางอาหาร  
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5572016823 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY

KEYWORDS: PROTEIN FILM / FIBER REINFORCEMENT / BIO-DEGRADABLE FILM

NANTHAPORN PHOTHIWUTTHIKHUN: PROPERTIES, STABILITY AND BIO-DEGRADABILITY OF CELLULOSE FIBER- REINFORCED SOY PROTEIN ISOLATE FILM. ADVISOR: THANACHAN MAHAWANICH, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. KIATTISAK DUANGMAL, Ph.D., 113 pp.

Soy protein is one of the biopolymers that can be used for fabricating bio-degradable film. Soy protein film, however, still has limitation in terms of mechanical strength. Fiber reinforcement is one technique that could be used to improve mechanical property of various materials. Being high in strength and bio-degradable, cellulosic fibers are thus good candidate for using as reinforcing agent in bio-degradable films. This research aimed to investigate the effect type, particle size, and content of cellulosic fibers on properties, stability and bio-degradability of soy protein isolate film. Two types of cellulosic fibers (cellulose and microcrystalline cellulose) were varied in terms of particle size (20 and 50  $\mu\text{m}$ ) and content (5, 10 and 15% by weight of protein). Regarding to mechanical properties, fiber reinforcement was found to pose an effect on tensile strength, especially for those samples reinforced with 20  $\mu\text{m}$  microcrystalline cellulose which exhibited significantly higher tensile strength than the control ( $p \leq 0.05$ ). In contrast, elongation at break was found to decrease with increasing fiber content. Fiber reinforcement was shown to induce a decrease in film transparency and an increase in water vapor permeability and contact angle between water droplet and the film surface. Fiber-containing films demonstrated decreasing  $L^*$  and increasing  $a^*$  and  $b^*$ . All samples possessed a hue angle of about  $90^\circ$ , representing yellow color. Chroma was found to increase with increasing fiber content. Pertaining to film morphology, the fiber-containing films possessed increasing surface roughness and reduced matrix homogeneity. For film stability, it was found that type and particle size of cellulosic fiber did affect water solubility. The films with 20  $\mu\text{m}$ -fiber were less soluble than those with 50  $\mu\text{m}$ -fiber. On the other hand, the cellulose-added films exhibited lower solubility than those added with microcrystalline cellulose. From the sorption behavior at 25  $^\circ\text{C}$ , all film samples demonstrated similar isotherm shape. In general, the film samples had decreasing tensile strength and increasing elongation at break with increasing water activity. Similar thermal degradation profiles were observed for the control and those with cellulosic fiber. Three regions of mass loss were revealed with water evaporation occurring in the temperature range of 80-120 C, volatilization of glycerol occurring in the temperature range of 180-260 C, and degradation of protein and cellulosic fiber occurring in the temperature range of 300-320 C. Bio-degradability as determined using aerobic bio-degradation under controlled composting condition unveiled that the film containing 20  $\mu\text{m}$ -microcrystalline cellulose at 15% concentration demonstrated 86.97% bio-degradation, which was similar in value to the control which demonstrated 85.43% bio-degradation.

Department: Food Technology

Field of Study: Food Technology

Academic Year: 2014

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความกรุณาจาก อาจารย์ ดร. ธนจันทร์ มหาวนิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ดวงมัลย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความเอาใจใส่ ดูแล กำลังใจ และช่วยเหลืออย่างใกล้ชิดตลอดเวลา ตั้งแต่ เริ่มงานวิจัยจนวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. วรางคณา สมพงษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชื่นจิต ประภิตชัยวัฒนา และ อาจารย์ ดร. ธีรนนท์ เจริญรสกุล ที่เสียสละเวลาอันมีค่าให้ความรู้ และชี้แนะแนวทางในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการศึกษา ระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรง เจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษก สมโภช

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อุบลรัตน์ สิริภัทราวรรณ ในความอนุเคราะห์ การใช้ตู้ควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. วาณี ชนเห็นชอบ ที่ให้คำแนะนำในการจัดเตรียมโครงร่างวิทยานิพนธ์และการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบพระคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในความ อนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวัดมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม รวมทั้งคุณภัทรินทร์ สีสลาภิวัฒน์ สำหรับคำแนะนำในการใช้เครื่องมือดังกล่าว

ขอขอบคุณพี่น้องและเพื่อนปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร สำหรับกำลังใจ และความช่วยเหลือตลอดงานวิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร สำหรับความช่วยเหลือ และการอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำงาน วิจัย

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (bio-degradable film).....	3
2.1.1 ชนิดของฟิล์มย่อยสลายได้.....	3
2.1.1.1 फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากโปรตีน.....	4
2.1.1.2 फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิแซ็กคาไรด์.....	4
2.1.1.3 फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลิพิด.....	4
2.1.1.4 फिल्मจากพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ธรรมชาติ.....	5
2.1.2 สภาพสลายได้ทางชีวภาพ (bio-degradability).....	7
2.2 โปรตีนถั่วเหลือง.....	7
2.2.1 การเกิดเป็นฟิล์มของโปรตีนถั่วเหลือง.....	8
2.2.2 สมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง.....	9
2.3 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีน.....	10
2.3.1 การบ่มด้วยความร้อน (heat curing).....	10
2.3.2 การฉายรังสี (radiation).....	12
2.3.3 การใช้สารเคมีเชื่อมข้าม (cross-linking agent).....	13

2.3.4 การใช้เอนไซม์ (enzymatic treatment).....	15
2.3.5 การผลิตเป็นฟิล์มประกอบ (composite film).....	16
2.3.6 การเสริมเส้นใย (fiber reinforcement).....	17
2.4 เซลลูโลสและอนุพันธ์ .....	18
2.4.1 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ.....	18
2.4.2 การย่อยสลาย (degradation).....	24
2.4.3 การใช้เส้นใยเซลลูโลสเพื่อเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุ (cellulose fiber reinforcement).....	25
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย .....	28
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	28
3.2 อุปกรณ์.....	29
3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย .....	30
3.3.1 การศึกษาผลของเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน ถั่วเหลืองสกัด.....	30
3.3.1.1 ความหนา.....	32
3.3.1.2 สมบัติเชิงกล .....	32
3.3.1.3 ความโปร่งแสง.....	33
3.3.1.4 ค่าสี.....	33
3.3.1.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ.....	34
3.3.1.6 มุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม.....	34
3.3.1.7 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์ม .....	35
3.3.2 การศึกษาผลของเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสต่อเสถียรภาพของฟิล์ม โปรตีนถั่วเหลืองสกัด .....	36
3.3.2.1 ความสามารถในการละลายน้ำ.....	36



3.3.2.2	พฤติกรรมการณ์การดูดความชื้นและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับวอเตอร์แอกทิวิตี....	37
3.3.2.3	การสลายตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition) .....	38
3.3.3	การศึกษาผลของการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยต่อสภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	38
3.3.4	การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	41
บทที่ 4	ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	42
4.1	ผลของเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด .....	42
4.1.1	ความหนา.....	42
4.1.2	สมบัติเชิงกล .....	44
4.1.2.1	ความต้านทานแรงดึงขาด .....	44
4.1.2.2	การยืดตัวถึงจุดขาด .....	48
4.1.3	ความโปร่งแสง.....	50
4.1.4	ค่าสี.....	51
4.1.5	สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ .....	55
4.1.6	มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม.....	57
4.1.7	ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์ม .....	60
4.2	ผลของเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อเสถียรภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	62
4.2.1	ความสามารถในการละลายน้ำ.....	63
4.2.2	พฤติกรรมการณ์การดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับวอเตอร์แอกทิวิตี.....	64
4.2.3	การสลายตัวด้วยความร้อน .....	72
4.3	ผลของการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยต่อสภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด .....	77

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	81
รายการอ้างอิง .....	84
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Product Specification).....	97
ภาคผนวก ข รูปตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	98
ภาคผนวก ค ข้อมูลผลการทดลอง .....	99
ภาคผนวก ง ข้อมูลการวิเคราะห์สภาพสลายได้ทางชีวภาพ.....	108
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	113



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 3. 1	37
ตารางที่ 4.1	53
ตารางที่ 4.2	54
ตารางที่ 4.3	68
ตารางที่ 4.4	70
ตารางที่ 4.5	76
ตารางที่ ก.1	97
ตารางที่ ค.1	99
ตารางที่ ค.2	100
ตารางที่ ค.3	101
ตารางที่ ค.4	102
ตารางที่ ค.5	103

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ค.6 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและ ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%...	104
ตารางที่ ค.7 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลส และไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%.....	105
ตารางที่ ค. 8 ความชื้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลิน เซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15% ที่ความชื้น สัมพัทธ์ต่างๆ.....	106
ตารางที่ ง.1 ลักษณะเฉพาะของหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการทดสอบสภาพสลายได้ทางชีวภาพ.....	108
ตารางที่ ง.2 ลักษณะเฉพาะของเซลลูโลส (positive control reference material) และ ตัวอย่างฟิล์ม .....	109
ตารางที่ ง.3 ร้อยละของสภาพสลายได้ทางชีวภาพของเซลลูโลส (positive control reference material) และฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง (ตัวอย่างควบคุม).....	110
ตารางที่ ง.4 ร้อยละของสภาพสลายได้ทางชีวภาพของเซลลูโลส (positive control reference material) และตัวอย่างฟิล์มเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15%.....	111
ตารางที่ ง.5 ร้อยละของสภาพสลายได้ทางชีวภาพโดยสรุป .....	112

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 วัฏจักรคาร์บอนของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	6
รูปที่ 2.2 Thiol-disulfide exchange .....	11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของผนังเซลล์ของพืช โดยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ปฐมภูมิ ร่วมกับคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ .....	19
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส .....	19
รูปที่ 2.5 เซลลูโลสไมโครไฟบริลประกอบด้วยส่วนที่เป็นอัญฐาน (A) และส่วนที่เป็นผลึก (B).....	20
รูปที่ 2.6 สายโซ่เซลลูโลส (1) เชื่อมต่อกันด้วยอันตรกิริยาทางเคมีต่างๆเกิดเป็นไมโครไฟบริล (2) ไมโครไฟบริลจำนวนมากรวมกันเป็นไฟบริล (3) และไฟบริลจำนวนมากรวมกันเป็น เส้นใยเซลลูโลส (4).....	21
รูปที่ 2.7 เส้นใยเซลลูโลส (a) ประกอบด้วยเซลลูโลสไฟบริล (b) แต่ละไฟบริลประกอบด้วย ไมโครไฟบริล (c) และแต่ละไมโครไฟบริลประกอบด้วยสายโซ่เซลลูโลส (d) เชื่อมต่อกันด้วยอันตรกิริยาทางเคมีต่างๆ .....	22
รูปที่ 2.8 พันธะไฮโดรเจน (เส้นประ) ที่เกิดภายในสายโซ่และระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลส .....	23
รูปที่ 2.9 การย่อยสลายโดยเอนไซม์ของเซลลูโลส .....	25
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เสริมด้วยเซลลูโลสหรือไมโคร คริสตัลลินเซลลูโลส .....	31
รูปที่ 3.2 แสดงมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม.....	35
รูปที่ 3.3 ระบบวิเคราะห์สภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	40
รูปที่ 3.4 ระบบการทดลองสภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ก) แผนภาพระบบการทดลอง (สำหรับ 1 ตัวอย่าง) โดย B คือ แบลงก์, C คือ เซลลูโลสซึ่งใช้เป็น positive control reference material, T คือ ตัวอย่างที่ทดสอบ และ S คือ scrubbing solution (sodium hydroxide) และ (ข) ระบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ .....	40

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.1 ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%.....	43
รูปที่ 4.2 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%.....	46
รูปที่ 4.3 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%.....	48
รูปที่ 4.4 ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%.....	51
รูปที่ 4.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%.....	55
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15% .....	59
รูปที่ 4.7 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%.....	60
รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15% ที่กำลังขยาย 40 เท่า.....	61
รูปที่ 4.9 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15% ที่กำลังขยาย 200 เท่า .....	62
รูปที่ 4.10 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15% .....	64

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.11 เส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของ (ก) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร (ข) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร (ค) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร และ (ง) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร.....	67
รูปที่ 4.12 กราฟ thermogravimetric analysis (TGA) ของ (ก) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร (ข) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร (ค) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร และ (ง) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร.....	74
รูปที่ 4.13 กราฟ derivative thermogravimetric analysis (DTG) ของ (ก) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร (ข) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร (ค) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร และ (ง) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร.....	75
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างฟิล์มที่ใช้ศึกษาสภาพสลายได้ทางชีวภาพ (ก) และ (ข) ตัวอย่างควบคุมก่อนและหลังบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1000 ไมโครเมตร (ค) และ (ง) ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% ก่อนและหลังบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1000 ไมโครเมตร.....	78
รูปที่ 4.15 ปริมาณสุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์สภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และเซลลูโลสซึ่งใช้เป็น positive control reference material.....	79
รูปที่ 4.16 ร้อยละของการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และเซลลูโลสซึ่งใช้เป็น positive control reference material.....	79
รูปที่ ข.1 ตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด.....	98

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันขยะบรรจุภัณฑ์นับเป็นขยะที่มีอัตราส่วนสูงประเภทหนึ่ง ตัวอย่างเช่นในปี ค.ศ. 2012 สหรัฐอเมริกามีขยะบรรจุภัณฑ์ถึง 30% ของขยะของแข็งจากชุมชน (municipal solid waste) ซึ่งมีปริมาณรวม 251 ล้านตัน (United States Environmental Protection Agency, 2012) สำหรับประเทศไทยแม้ว่าจะไม่มีการจำแนกเป็นขยะบรรจุภัณฑ์อย่างชัดเจน แต่สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร (2544) รายงานว่ากรุงเทพมหานครมีปริมาณขยะ 9,747.74 ตัน/วัน ในปริมาณนี้เป็นพลาสติก 22.4% กระดาษ 11.9% แก้ว 2.7% และโฟม 1.4%

จากความตระหนักในปัญหาการจัดการขยะ ในปัจจุบันจึงได้มีความพยายามในการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โพรตีนถั่วเหลืองเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพในการนำมาพัฒนาเป็นฟิล์มย่อยสลายได้ (Dangaran et al., 2009) ฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองมีสมบัติด้านการป้องกันการซึมผ่านของไอสารอินทรีย์ แก๊ส และน้ำมันค่อนข้างดี แต่มีข้อจำกัดสำคัญในด้านสมบัติเชิงกลและการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ ทำให้การนำฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองไปใช้ประโยชน์ยังมีค่อนข้างจำกัด (Wang et al., 2012) การเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใย (fiber reinforcement) เป็นวิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงให้วัสดุต่างๆ เช่น พลาสติก คอนกรีต ยาง รวมถึงฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีปริมาณมากที่สุดในธรรมชาติ เซลลูโลสเป็นเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง ไม่เป็นพิษ และสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จึงมีศักยภาพในการนำมาเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มย่อยสลายได้ เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรง (linear polymer) ของหน่วยย่อย D-glucopyranose เชื่อมต่อกันด้วย  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)-glycosidic linkage ซึ่งโครงสร้างแบบ  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) นี้ ทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างที่เป็นเส้นตรงและแข็งแรง แต่ละหน่วยย่อยกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ที่



สามารถเกิดอันตรกิริยา เช่น พันธะไฮโดรเจน (Azeredo et al., 2012; Huq et al., 2012) เส้นใยเซลลูโลสประกอบด้วยไมโครไฟบริลซึ่งมีโครงสร้าง 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) (Siqueira et al., 2010) การดัดแปรเซลลูโลส (cellulose modification) โดยใช้กรดกำจัดส่วนที่เป็นอสัณฐานจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยเฉพาะส่วนที่เป็นผลึกเรียกว่าไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสซึ่งยังคงเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แม้จะมีระดับการพอลิเมอไรเซชันลดลง (Haafiz et al., 2013; Thoorens et al., 2014)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิด ขนาดอนุภาค และปริมาณของเส้นใยจากเซลลูโลส (cellulosic fiber) ต่อสมบัติ เสถียรภาพ และสภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด



## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

#### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (bio-degradable film)

บรรจุภัณฑ์อาหารมีหน้าที่หลักในการปกป้องผลิตภัณฑ์อาหารจากอิทธิพลภายนอก ลดการเสื่อมเสียและยืดอายุการเก็บรักษาของอาหาร รวมถึงการรักษาคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร (Restuccia et al., 2010) ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา การพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารยังได้มีการคำนึงถึงการเพิ่มความสะดวกสบายแก่ผู้บริโภค ความต้องการของผู้บริโภคเฉพาะกลุ่ม รวมไปถึงประเด็นในด้านความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและการกำจัดขยะด้วย (Ahvenainen, 2003) ในปัจจุบันทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภคได้ตระหนักถึงปัญหาสิ่งแวดล้อมและความสำคัญของการจัดการขยะจึงหันมาให้ความสนใจในวัสดุบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้เพิ่มมากขึ้น (Carvalho and Grosso, 2004; Bourtoom and Chinnan, 2008; Zahedi et al., 2010)

##### 2.1.1 ชนิดของพลาสติกย่อยสลายได้

สำหรับพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงพอลิเมอร์จากธรรมชาติเท่านั้น ไม่ได้รวมถึงพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ (synthetic biodegradable polymer) โดยสำหรับพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ พอลิเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด โพรตีน และลิพิด และพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ธรรมชาติ ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด (polylactic acid, PLA) (Marsh and Bugusu, 2007; Khan et al., 2012)

### 2.1.1.1 फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากโปรตีน

ฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากโปรตีน สามารถผลิตได้จากโปรตีนจากพืช และสัตว์หลายชนิด เช่น โปรตีนนม โปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนถั่วลิสง โปรตีนข้าวสาลี โปรตีนไข่ คอลลาเจน เจลาติน และเคราติน (Dangaran et al., 2009; Zahedi et al., 2010) โดยโปรตีนแต่ละชนิดมีโครงสร้างและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แตกต่างกันไป การผลิตฟิล์มโปรตีนสามารถทำได้โดยการดัดแปรโครงสร้างโดยวิธีทางกายภาพและทางเคมี เช่น การให้ความร้อน การเติมกรดหรือด่าง การใช้รังสี การใช้ความดัน เป็นต้น (Krochta, 2002) สมบัติของฟิล์มโปรตีนโดยทั่วไป คือ มีความแข็งแรงปานกลาง ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน ไนโตรเจน และไอสารอินทรีย์ได้ดี แต่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ไม่ดี เนื่องจากโปรตีนโดยทั่วไปประกอบด้วยหมู่ที่ชอบน้ำจำนวนมาก (Dangara et al., 2009)

### 2.1.1.2 फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากพอลิแซ็กคาไรด์

พอลิแซ็กคาไรด์หลายชนิดสามารถนำมาผลิตเป็นฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้แก่ เซลลูโลสและอนุพันธ์สตาร์ชและอนุพันธ์ ฟลาวัวร์ ไคโทซาน รวมถึงกัมต่างๆ พอลิแซ็กคาไรด์แต่ละชนิดมีชนิดของมอนอเมอร์ จำนวนหน่วยย่อยมอนอเมอร์ การแตกกิ่ง และความมีขั้วที่แตกต่างกันไปฟิล์มจากพอลิแซ็กคาไรด์โดยทั่วไปป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำไม่ดีเนื่องจากประกอบด้วยหมู่ที่ชอบน้ำจำนวนมาก (Bourtoom, 2008)

### 2.1.1.3 फिल्मย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากลิพิด

ลิพิดมีสมบัติไม่ชอบน้ำจึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นวัสดุหุ้มในการผลิตบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารที่ต้องการป้องกันความชื้น แต่ฟิล์มที่ได้จะมีความหนาและเปราะจึงไม่นิยมใช้ลิพิดเพียงอย่างเดียวผลิตเป็นฟิล์มแต่จะนิยมใช้ลิพิดในรูปสารเคลือบ (coating) ซึ่งขึ้นรูปบนพื้นผิวของผลิตภัณฑ์มากกว่า นอกจากนี้ยังอาจผลิตในรูปฟิล์มประกอบ (composite film) ของลิพิด

ร่วมกับพอลิเมอร์อื่น เช่น โปรตีน สตาร์ชและเซลลูโลส โดยอาจผลิตเป็นฟิล์มอิมัลชัน (emulsion film) และฟิล์มสองชั้นหรือหลายชั้น (bilayer and multilayer film) (Bourtoom, 2008; Debeaufort and Voilley, 2009)

#### 2.1.1.4 ฟิล์มจากพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ธรรมชาติ

พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตฟิล์มมีหลายชนิด ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต และพอลิไกลคอลลิกแอซิด

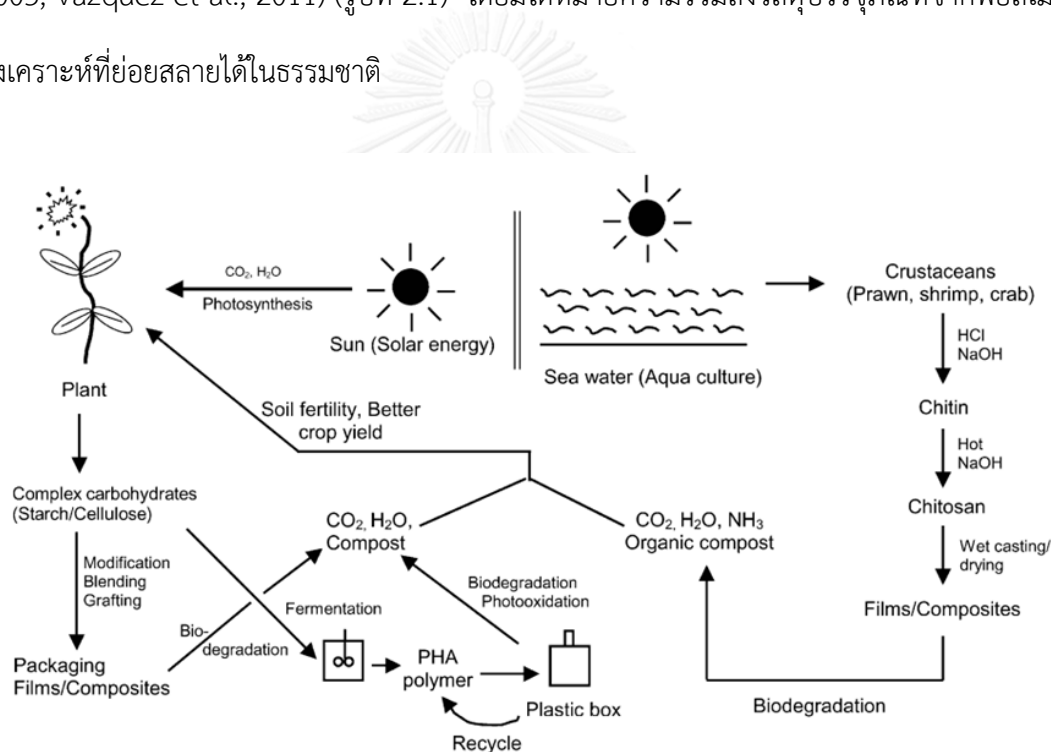
พอลิแลกติกแอซิดสังเคราะห์ได้จากกรดแลกติกที่ได้จากการหมักแป้งด้วยจุลินทรีย์ โดยสายพันธุ์ที่นิยมใช้ในการผลิตกรดแลกติกคือ Lactobacilli กรดแลกติกที่ได้จะนำมาผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้เป็นพอลิแลกติกแอซิด โดยพอลิแลกติกแอซิดสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีลักษณะโปร่งแสง และมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของต้นทุนการผลิตที่ยังสูงอยู่ (Rasal et al., 2010)

พอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอตสังเคราะห์โดยจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น *Alcaligenes eutrophus* และ *Bacillus subtilis* บางสายพันธุ์ โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์ PHA ในภาวะที่ขาดปัจจัยบางอย่างที่จำเป็นต่อการเจริญ เช่น ธาตุอาหารหลัก (macro element) ธาตุอาหารรอง (trace element) และออกซิเจน และในภาวะที่มีแหล่งคาร์บอนมากเกินไป (excess carbon source) โดย PHA ที่ผลิตขึ้นทำหน้าที่เป็นแหล่งคาร์บอนสำรองและพลังงานสำรองให้แก่จุลินทรีย์ PHA สามารถนำมาใช้ขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ และสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Shrivastav et al., 2011)

พอลิไกลคอลลิกแอซิดสังเคราะห์ได้จากไกลคอลลิกแอซิดโดยปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน (polycondensation) หรือพอลิเมอไรเซชันแบบวงเปิด (ring-opening polymerization) สามารถนำมาใช้ในการผลิตบรรจุภัณฑ์ที่มีสมบัติทนทานต่อตัวทำละลายอินทรีย์

และป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดี แต่สามารถย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Song et al., 2011)

อย่างไรก็ตาม สำหรับงานวิจัยนี้วัสดุบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จะหมายถึงความถึงวัสดุบรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์ชีวภาพตามธรรมชาติ (naturally occurring biopolymer) ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติเท่านั้น ซึ่งเมื่อย่อยสลายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกากชีวมวล (biomass residue) กลับสู่สิ่งแวดล้อมผ่านวัฏจักรคาร์บอน (carbon cycle) (Tharanathan, 2003; Vazquez et al., 2011) (รูปที่ 2.1) โดยมีได้หมายความรวมถึงวัสดุบรรจุภัณฑ์จากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ



รูปที่ 2.1 วัฏจักรคาร์บอนของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ที่มา: Tharanathan (2003)

### 2.1.2 สภาพสลายได้ทางชีวภาพ (bio-degradability)

สภาพสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์คือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของพอลิเมอร์โดยสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งจุลินทรีย์ ในภาวะที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง รวมทั้งแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจน ผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่ใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจนโดยได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ มีเทน และกากชีวมวล (Andrady, 2007; Leja and Lewandowicz, 2010; Avérous and Pollet, 2012) สภาพสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ ได้แก่ โครงสร้างของพอลิเมอร์ (เช่น ความเสถียรของหมู่หน้าที่ความไวต่อปฏิกิริยา และความชอบน้ำ) และสมบัติทางกายภาพ (เช่น น้ำหนักโมเลกุล ความเป็นรูพรุน และความเป็นผลึก) (Leja and Lewandowicz, 2010)

Su et al. (2010) ศึกษาผลของการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) และกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate film) จากการวิเคราะห์สภาพสลายได้ทางชีวภาพ พบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีร้อยละการย่อยสลายเทียบเท่ากับโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ผู้วิจัยเสนอว่าการขึ้นรูปเป็นฟิล์มไม่มีผลต่อการย่อยสลายของโปรตีนถั่วเหลืองโดยจุลินทรีย์ ในขณะที่การเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ทำให้สภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองลดต่ำลงซึ่งผู้วิจัยเสนอว่าการเกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงของเนื้อฟิล์ม รวมถึงการเกิดพันธะไฮโดรเจนในเนื้อฟิล์มส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์

### 2.2 โปรตีนถั่วเหลือง

เมล็ดถั่วเหลืองประกอบด้วยโปรตีน 38-42% ไตรกลีเซอไรด์ 16-20% และคาร์โบไฮเดรต 33% โดยน้ำหนักแห้ง (Avérous and Pollet, 2012) เมล็ดถั่วเหลืองไม่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบ โดยคาร์โบไฮเดรตในเมล็ดถั่วเหลือง ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ซูโครส ออลิโกแซ็กคาไรด์

(แอฟฟิโนส และสตาซีโอส) และน้ำตาลอื่นๆ (อะราบิโนส กลูโคส และเวอร์บาสโคส) ในปริมาณเล็กน้อย (Wijeratne, 1993a)

โปรตีนถั่วเหลืองเป็นโกลบูลาร์โปรตีน (globular protein) สามารถจำแนกได้เป็น 4 ส่วน (fraction) ตามอัตราการตกตะกอน (sedimentation rate) ได้แก่ 2s, 7s, 11s และ 15s ซึ่งโปรตีนแต่ละส่วนมีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน โปรตีนหลักหรือโปรตีนที่มีปริมาณมากที่สุดในถั่วเหลือง ได้แก่ 7s globulin หรือเบตา-คอนไกลซินิน ( $\beta$ -conglycinin) และ 11s globulin หรือไกลซินิน (glycinin) โดยมีปริมาณประมาณ 18.5 และ 51% ของโปรตีนถั่วเหลืองตามลำดับ (Murphy and Resurreccion, 1984) โปรตีนในเมล็ดถั่วเหลืองจัดว่าเป็นโปรตีนคุณภาพดี สามารถทดแทนโปรตีนจากสัตว์ได้เนื่องจากมีกรดอะมิโนจำเป็น (essential amino acid) ทั้งชนิดและปริมาณที่สมดุลกว่าโปรตีนจากพืชชนิดอื่น โดยมีไลซีนในปริมาณสูง แต่มีกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (sulfur-containing amino acid) ได้แก่ เมไทโอนีนและซิสเทอีนในปริมาณต่ำ (Lusas and Riaz, 1995; Liu, 1999; Di Pasquale, 2007)

ผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองมีปริมาณโปรตีนที่แตกต่างกันไป เช่น แป้งถั่วเหลือง (soy flour) มีโปรตีน 50-59% โปรตีนถั่วเหลืองเข้มข้น (soy protein concentrate) มีโปรตีน 65-72% และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด (soy protein isolate) มีโปรตีนมากกว่า 90% ขึ้นไป โปรตีนถั่วเหลืองมีสมบัติเชิงหน้าที่หลากหลาย ได้แก่ การเกิดเจล การเกิดโฟม การเป็นอิมัลซิไฟเออร์ รวมถึงการเกิดเป็นฟิล์ม (Park et al., 2002; Dangaran et al., 2009)

### 2.2.1 การเกิดเป็นฟิล์มของโปรตีนถั่วเหลือง

โปรตีนถั่วเหลืองมีจุดไอโซอิเล็กทริกอยู่ในช่วงค่าความเป็นกรดต่าง 4.2-4.6 (Wijeratne, 1993b) เมื่อค่าความเป็นกรดต่างห่างออกไปจากจุดไอโซอิเล็กทริก โปรตีนถั่วเหลืองจะละลายได้เพิ่มขึ้น การเตรียมสารละลายฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง (film-forming solution) จึงมักเตรียม

โดยใช้สารละลายที่เป็นต่าง เนื่องจากแม้ว่าโปรตีนถั่วเหลืองจะสามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด แต่จะเสถียรสภาพธรรมชาติอย่างรวดเร็วที่ค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 2 (Wijeratne, 1993b)

ไกลซีนินและเบตา-คอนไกลซีนินซึ่งเป็นโปรตีนหลักในถั่วเหลืองมีโครงสร้างถึงระดับจตุรภูมิ (quaternary structure) ในการเตรียมสารละลายฟิล์มจะมีการให้ความร้อนเพื่อให้โปรตีนเกิดการเสถียรสภาพธรรมชาติบางส่วน (partial denaturation) โดยโปรตีนจะเกิดการคลายตัว (unfolding) หมู่ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำและหมู่ซัลไฟไฮดริลซึ่งแต่เดิมอยู่ด้านในของโครงสร้างจะปรากฏออกมาที่ด้านนอก เมื่อสารละลายฟิล์มแห้งลงโมเลกุลโปรตีนจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่เคมี ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างของฟิล์มได้ (Park et al., 2002; Cho and Rhee, 2004; Lodha and Netravali, 2005; Dangaran et al., 2009; Kokoszka et al., 2010; Lacroix and Vu, 2014)

อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนที่มีบทบาทในการเกิดโครงสร้างของฟิล์มโปรตีน ได้แก่ พันธะไดซัลไฟด์ พันธะไฮโดรเจน อันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก และแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) การเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลโปรตีนที่มากเกินไปอาจทำให้ฟิล์มมีความเปราะ ไม่ยืดหยุ่น การเติมพลาสติกไซเซอร์จะช่วยเพิ่มระยะระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ และลดความแข็งแรงของอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์จึงทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นมากขึ้น (Wihodo and Moraru, 2013)

## 2.2.2 สมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง

ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีสมบัติในการป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ไม่ดัดนัก เนื่องจากโปรตีนมีหมู่เคมีที่มีสมบัติชอบน้ำอยู่ในปริมาณมากประกอบกับในกระบวนการผลิตฟิล์มมักมีการเติมพลาสติกไซเซอร์ที่มีสมบัติชอบน้ำ (Rhim et al., 2000)



Gennadios et al. (1993) รายงานว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene, LDPE) ฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapor permeability) สูงกว่า นอกจากนี้ฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองยังมีความต้านทานแรงดึงขาด (tensile strength) และการยืดตัวถึงจุดขาด (elongation at break) ต่ำกว่าฟิล์มจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ จากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้ฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองยังไม่มีนำมาใช้แพร่หลายนัก

### 2.3 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพรตีน

ความแข็งแรงเชิงกลนับเป็นสมบัติสำคัญของวัสดุบรรจุภัณฑ์เช่นเดียวกับฟิล์มโพรตีน โดยทั่วไป ฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองมีความแข็งแรงเชิงกลต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มพลาสติก อย่างไรก็ตามได้มีการใช้เทคนิคต่างๆ เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโพรตีนดังนี้

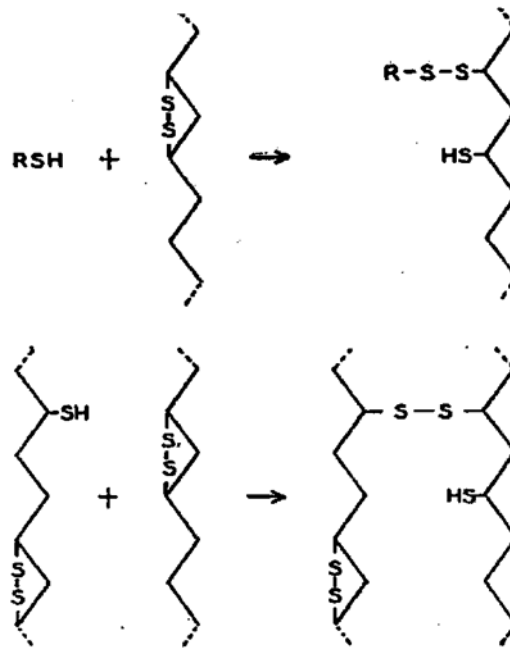
#### 2.3.1 การบ่มด้วยความร้อน (heat curing)

การบ่มสารละลายฟิล์มหรือแผ่นฟิล์มด้วยความร้อนสามารถปรับปรุงความแข็งแรงเชิงกลของฟิล์มโพรตีนได้ โดยความร้อนช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาสulphydryl-disulfide exchange (Jensen, 1959) ซึ่งทำให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์เชื่อมข้ามระหว่างสายพอลิเพปไทด์ (รูปที่ 2.2)

Gennadios et al. (1996) ศึกษาผลของการบ่มฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 80 และ 95 องศาเซลเซียส แปรระยะเวลาการบ่มเป็น 2, 6, 14 และ 24 ชั่วโมง พบว่าฟิล์มที่บ่มด้วยความร้อนมีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้บ่มด้วยความร้อน ในขณะที่การยืดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลง ผู้วิจัยอธิบายว่าความร้อนสามารถช่วยเร่งการเชื่อมข้ามของโพรตีน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ความร้อนในภาวะที่เป็นต่าง

เช่นเดียวกับ Kim et al. (2002) ที่ศึกษาผลของการบ่มฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองด้วยความร้อนโดยแปรอุณหภูมิเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 60, 72.5 และ 85 องศาเซลเซียสพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์ม โดยฟิล์มที่บ่มที่ 85 องศาเซลเซียส มีความต้านทานแรงดึงขาด

สูงสุดเท่ากับ 12.55 เมกะพาสคาล ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมที่ไม่ผ่านการบ่มด้วยความร้อนมีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 5.96 เมกะพาสคาล อย่างไรก็ตามพบว่า การยืดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการบ่มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.2 Thiol-disulfide exchange

ที่มา: Jensen (1959)

Perez-Gago and Krochta (2001) ศึกษาผลของการบ่มสารละลายฟิล์มเวียโปรตีนด้วยความร้อน แปรอุณหภูมิการบ่มเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส และแปรระยะเวลาการบ่มเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 5, 10, 15 และ 20 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการบ่มสารละลายฟิล์มเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาดและยังกัมมอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น โดยผู้วิจัยเสนอว่าการบ่มสารละลายฟิล์มที่อุณหภูมิสูงสามารถเร่งให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ และมีความแข็งแรงมากกว่าอันตรกิริยาอื่นๆ ที่เกิดระหว่างโปรตีน เช่น พันธะไฮโดรเจน และอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิกจึงส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น

### 2.3.2 การฉายรังสี (radiation)

Fujimori (1965) เสนอว่าการดออะมิโนที่มีสายข้างแอรโรมาติกสามารถดูดกลืนรังสี เช่น รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีแกมมา ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีนได้

Gennadios et al. (1998) ศึกษาผลของการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด แปรปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 6 ระดับ ได้แก่ 13.0, 25.9, 38.9, 51.8, 77.8 และ 103.7 จูล/ตารางเมตร พบว่าเมื่อปริมาณรังสีดูดกลืนเพิ่มมากขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่นฟิล์มที่ฉายรังสีที่ปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับ 103.7 จูล/ตารางเมตร มีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 6.1 เมกะพาสคาลสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ฉายรังสีซึ่งมีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 3.7 เมกะพาสคาลอย่างไรก็ตามผู้วิจัยรายงานว่าฟิล์มที่ฉายรังสีมีการยืดตัวถึงจุดขาดลดลง

Rhim et al. (1999) ศึกษาผลของรังสีอัลตราไวโอเล็ตต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน 4 ชนิด ได้แก่ กลูเตนจากข้าวสาลี (wheat gluten) ซีนจากข้าวโพด (corn zein) อัลบูมินจากไข่ (egg albumin) และโซเดียมเคซีเนต (sodium caseinate) ใช้ปริมาณรังสีดูดกลืนเท่ากับ 51.8 จูล/ตารางเมตร พบว่าฟิล์มกลูเตน ฟิล์มซีน และฟิล์มอัลบูมิน มีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ฉายรังสี 67, 20 และ 70% ตามลำดับ ผู้วิจัยเสนอว่าการเพิ่มขึ้นของความต้านทานแรงดึงขาดเป็นผลจากการเชื่อมข้ามของโปรตีนภายในโครงสร้างฟิล์มอย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์มโซเดียมเคซีเนตที่ฉายรังสีมีความต้านทานแรงดึงขาดไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) ผู้วิจัยเสนอว่าชนิดของโปรตีนและปริมาณรังสีดูดกลืนมีผลต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีน โดยรังสีอาจทำให้เกิดการเชื่อมข้ามหรืออาจทำให้เกิดการแตกสลาย (degradation) ของโมเลกุลโปรตีน ซึ่งในกรณีของฟิล์มโซเดียมเคซีเนต ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าอาจเกิดการเชื่อมข้ามและการแตกสลายของโมเลกุลโปรตีนขึ้นในเวลาเดียวกัน

Lee et al. (2005) ศึกษาสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่ฉายรังสีแกมมา โดยแปรปริมาณรังสีดูดกลืนเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 4, 16, 32 และ 50 กิโลเกรย์พบว่าเมื่อปริมาณรังสีดูดกลืนเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ฟิล์มที่ฉายรังสีมีการยืดตัวถึงจุดขาดลดลงจากตัวอย่างควบคุม โดยตัวอย่างควบคุมที่ไม่ฉายรังสีมีการยืดตัวถึงจุดขาดเท่ากับ 249% ในขณะที่ฟิล์มที่ฉายรังสีในปริมาณ 50 กิโลเกรย์มีการยืดตัวถึงจุดขาดเท่ากับ 164%

### 2.3.3 การใช้สารเคมีเชื่อมข้าม (cross-linking agent)

สารเคมีที่นิยมใช้ในการเชื่อมข้ามโปรตีน ได้แก่ แอลดีไฮด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเช่น ฟอรัมาลดีไฮด์ กลูทาราลดีไฮด์ และไกลออกซัล (glyoxal) โดยฟอรัมาลดีไฮด์สามารถทำให้เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนกับไทโรซีน หรือระหว่างหน่วยย่อยไลซีนสองหน่วย ในขณะที่กลูทาราลดีไฮด์และไกลออกซัลทำให้เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างหน่วยย่อยไลซีนสองหน่วย (Marquié et al., 1997; Marquié, 2001) ผลของการเชื่อมข้ามจะทำให้ฟิล์มโปรตีนมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น และความสามารถในการละลายน้ำที่ลดลง (Orliac et al., 2002)

Park et al. (2000) ศึกษาผลของกลูทาราลดีไฮด์ต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง โดยแปรปริมาณกลูทาราลดีไฮด์เป็น 4 ระดับ ได้แก่ 0.1, 0.2, 0.3 และ 0.4% พบว่าฟิล์มที่เติมกลูทาราลดีไฮด์มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมซึ่งไม่เติมกลูทาราลดีไฮด์ และเมื่อปริมาณกลูทาราลดีไฮด์เพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

Carvalho and Grosso (2004) ศึกษาผลของฟอรัมาลดีไฮด์และไกลออกซัลต่อสมบัติของฟิล์มเจลาติน พบว่าการเติมฟอรัมาลดีไฮด์ช่วยให้ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ไกลออกซัลไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์ม นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมแอลดีไฮด์ทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อการยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์ม

Rhim et al. (1998) ศึกษาผลของการเติมไดแอลดีไฮด์สตาร์ชต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดไดแอลดีไฮด์สตาร์ช ผลิตโดยปฏิกิริยาการแตกออกแบบออกซิไดส์ (oxidative cleavage) ที่ตำแหน่งพันธะที่เชื่อมระหว่างคาร์บอนอะตอมที่ 2 และ 3 ของหน่วยย่อยกลูโคสจึงมีหมู่คาร์บอนอิสระที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้จำนวน 2 หมู่ต่อหนึ่งหน่วยย่อย ไดแอลดีไฮด์สตาร์ชจึงสามารถทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมข้ามได้ ในงานวิจัยนี้แปรปริมาณไดแอลดีไฮด์สตาร์ชเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 5, 10, 15 และ 20% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดพบว่าความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มที่เติมไดแอลดีไฮด์สตาร์ช 5 และ 10% มีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมไดแอลดีไฮด์สตาร์ชอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) อย่างไรก็ตามความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มที่เติมไดแอลดีไฮด์สตาร์ช 15 และ 20% มีค่าไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ( $p > 0.05$ ) ผู้วิจัยอธิบายว่าไดแอลดีไฮด์สตาร์ชทำให้เกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีน ฟิล์มโปรตีนจึงมีความแข็งแรงขึ้น แต่การเติมไดแอลดีไฮด์สตาร์ชในปริมาณสูง (>10%) แม้จะมีผลเชื่อมข้ามโปรตีนแต่ก็อาจทำให้โครงสร้างที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มจึงไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ในขณะที่การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มที่เติมไดแอลดีไฮด์สตาร์ชทุกตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ( $p > 0.05$ )

แม้ว่าแอลดีไฮด์จะเป็นสารเชื่อมข้ามโปรตีนที่มีประสิทธิภาพ แต่เป็นที่ตระหนักกันดีถึงความเป็นพิษของแอลดีไฮด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแอลดีไฮด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์ ซึ่งหน่วยงานระหว่างประเทศด้านการวิจัยโรคมะเร็ง (International Agency for Research on Cancer, IARC) รายงานว่ามีฤทธิ์เป็นสารก่อมะเร็ง (Patnaik, 2007) จึงมีการศึกษาการใช้สารอื่นที่มีความปลอดภัยสูงกว่า เช่น สารประกอบฟีนอลิกที่พบในพืชตามธรรมชาติเพื่อเป็นสารเชื่อมข้ามโปรตีน

Ou et al. (2005) ศึกษาผลของกรดเพรูลิกต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรปริมาณของกรดเพรูลิกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ 50, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัม/สารละลายฟิล์ม 100 กรัม พบว่ากรดเพรูลิก 100 มิลลิกรัม/สารละลายฟิล์ม 100 กรัม เป็นความเข้มข้นที่

เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ฟิล์มที่มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดสูง ในขณะที่มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำ

Nuthong, Benjakul and Prodpran (2009) ศึกษาการใช้กรดพีนอลิกเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มจากพลาสมาโปรตีนของสุกร (porcine plasma protein film) แปรความเข้มข้นของกรดพีนอลิกในช่วง 1-3% โดยน้ำหนักของโปรตีน พบว่าฟิล์มที่เติมกรดแทนนิกกรดแคฟเฟอิกและกรดเพรูลิกเข้มข้น 3% มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม 123.3, 194.3 และ 19.5% ตามลำดับ และมีการยึดตัวถึงจุดขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม 71.1, 86.3 และ 10.2% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์มที่เติมกรดพีนอลิกมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงกว่าตัวอย่างควบคุม

### 2.3.4 การใช้เอนไซม์ (enzymatic treatment)

การใช้เอนไซม์เป็นวิธีทางชีวเคมีที่สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนได้ โดยใช้เอนไซม์ที่เร่งการเกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างหมู่เคมีของโมเลกุลโปรตีน เช่น แทรนส์กลูตามิเนส และเพอร์ออกซิเดส

แทรนส์กลูตามิเนส (EC 2.3.2.13) เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย้ายหมู่ระหว่างหมู่เอซิลของแกมมา-คาร์บอกซีเอมิตของกลูตามีนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้หมู่เอซิล (acyl donor) ไปยังหมู่อะมิโนปฐมภูมิ หรือเอพซิลอน-อะมิโนของไลซีนซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับหมู่เอซิล (acyl acceptor) เกิดเป็น  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamyl)lysineisopeptide bond และทำให้เกิดการเชื่อมข้ามของโปรตีน การเชื่อมข้ามนั้นนอกจากจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มแล้ว ยังทำให้ความสามารถในการละลายน้ำและสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มมีค่าลดลงด้วย (Park et al., 2002; Tang et al., 2005; Dangaran et al., 2009)

Tang et al. (2005) ศึกษาผลของแทรนส์กลูตามิเนสต่อสมบัติฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง สกัดพบว่าการเติมแทรนส์กลูตามิเนสเข้มข้น 4 หน่วย/กรัมของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทำให้ฟิล์มมี

ความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) สำหรับการยึดตัวถึงจุดขาด พบว่าฟิล์มที่เติมทรานส์กลูทามิเนสมีการยึดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม นอกจากนี้ยังพบว่า การเติมทรานส์กลูทามิเนสทำให้โปรตีนมีน้ำหนักโมเลกุลสูงมีปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามีการเชื่อมข้ามของโปรตีนเกิดขึ้น

เพอร์ออกซิเดส (EC 1.11.1.7) เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไทโรซีน ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นได-ไทโรซีน ไตร-ไทโรซีน และเตตระ-ไทโรซีน มีรายงานว่าเพอร์ออกซิเดสนั้นไม่มีผลต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนสำหรับสมบัติเชิงกล เพอร์ออกซิเดสอาจทำให้ความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ เพราะนอกจากจะเร่งการเชื่อมข้ามของโปรตีนแล้ว เพอร์ออกซิเดสยังอาจทำให้เกิดการแตกสลายของโปรตีนบางส่วนด้วย (Park et al., 2002; Wihodo and Moraru, 2013)

Stuchell and Krochta (1994) ศึกษาผลของเพอร์ออกซิเดสจากฮอร์สแรดิชต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่าการเติมเพอร์ออกซิเดสในอัตราส่วนของเอนไซม์ต่อโปรตีนเท่ากับ 1:1000 ทำให้ฟิล์มมีค่า Young's modulus เพิ่มขึ้น ในขณะที่ความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลง

### 2.3.5 การผลิตเป็นฟิล์มประกอบ (composite film)

ฟิล์มประกอบคือฟิล์มที่ผลิตจากพอลิเมอร์ธรรมชาติหรือพอลิเมอร์สังเคราะห์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปเพื่อพัฒนาสมบัติของฟิล์มให้ดีขึ้นโดยอาศัยสมบัติที่เป็นที่ต้องการของพอลิเมอร์แต่ละชนิด (Bourtoom, 2008)

Cao et al. (2007) ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองโดยผลิตเป็นฟิล์มประกอบร่วมกับเจลาติน เนื่องจากเจลาตินเป็นโปรตีนเส้นใย (fibrous protein) ที่มีสมบัติเด่นคือมีสมบัติเชิงกลที่ดี แปรอัตราส่วนของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดต่อเจลาตินเป็น 10:0, 8:2, 6:4, 2:8 และ

0:10 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของเจลาตินเพิ่มขึ้น फिल्मที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาด การยืดตัวถึงจุดขาด และยังคงมอดูลัสเพิ่มขึ้น

Wang et al. (2014) ศึกษาการผลิตฟิล์มประกอบของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและอนุพันธ์คาร์บอกซีเมทิลของกลูโคแมนแนนจากบุก (carboxymethyl konjacglucomannan) พบว่า फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองสกัดมีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดเท่ากับ 4.8 เมกะพาสคาล และ 1.7% ตามลำดับ และเมื่อปริมาณคาร์บอกซีเมทิลกลูโคแมนแนนเพิ่มขึ้น फिल्मประกอบที่ได้มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดเพิ่มขึ้นโดย फिल्मที่เติมคาร์บอกซีเมทิลกลูโคแมนแนนในปริมาณ 80% มีความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 27.3 เมกะพาสคาล และ 11.85% ตามลำดับ ผู้วิจัยเสนอว่าสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นนอกจากจะเป็นผลจากสมบัติของคาร์บอกซีเมทิลกลูโคแมนแนนเองแล้ว ยังอาจเป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและคาร์บอกซีเมทิลกลูโคแมนแนนอีกด้วย

### 2.3.6 การเสริมเส้นใย (fiber reinforcement)

การเสริมเส้นใยเป็นอีกวิธีหนึ่งที่มีการนำมาใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงให้วัสดุต่างๆ เช่น พลาสติก คอนกรีต ยาง รวมถึงฟิล์ม ทั้งฟิล์มพลาสติกและฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Plackett, 2011; Pollanen et al., 2013) โดยวัสดุประกอบ (composite material) ที่ได้ประกอบด้วยเส้นใยที่มีความแข็งแรงและมอดูลัสสูงกระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุหรือเกิดอันตรกิริยากับเนื้อวัสดุ โดยมีหน้าสัมผัส (interface) ระหว่างสองวัสดุอย่างชัดเจน โดยทั้งเส้นใยและเนื้อวัสดุยังคงรักษาลักษณะสมบัติทั้งทางเคมีและกายภาพไว้ได้ แต่ในขณะเดียวกันก็ให้สมบัติที่ไม่สามารถได้จากการใช้องค์ประกอบแต่ละชนิดแต่เพียงอย่างเดียว (Mallick, 1993)

เส้นใยที่นำมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของฟิล์มจากพอลิเมอร์ธรรมชาติอาจเป็นเส้นใยจากธรรมชาติหรือเส้นใยสังเคราะห์ เช่น พอลิโอเลฟิน (polyolefin) เส้นใยคาร์บอน (carbon



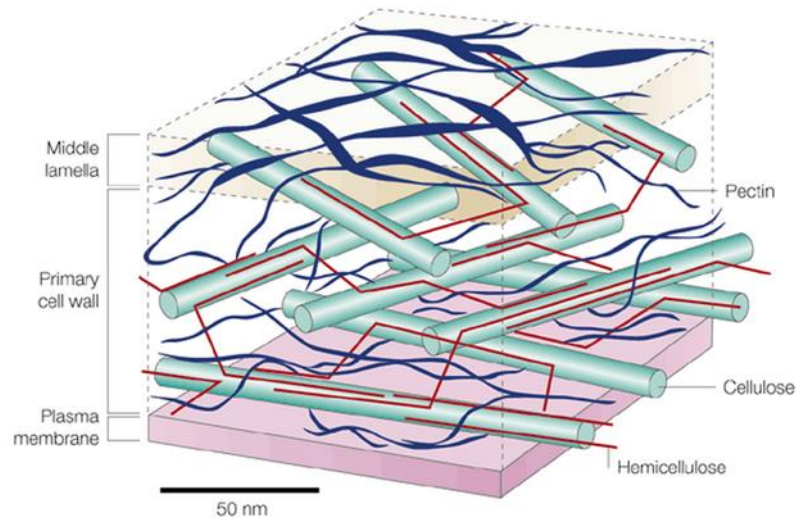
fiber) เส้นใยแก้ว (glass fiber) เส้นใยเซลลูโลสและเส้นใยอะรามิด (aramid fiber) (Borges et al., 2004; Teaca et al., 2013; Korpela et al., 2014)

เซลลูโลสรวมทั้งเซลลูโลสที่ดัดแปรทั้งทางเคมีและกายภาพเป็นเส้นใยที่นิยมใช้ในการเสริมความแข็งแรงของฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ข้อดีของเส้นใยเซลลูโลสคือเป็นเส้นใยธรรมชาติ ราคาไม่แพง ไม่มีพิษ ให้ความแข็งแรงสูงรวมทั้งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Azeredo et al., 2012; Huq et al., 2012) อย่างไรก็ตามการเสริมเส้นใยเซลลูโลสมิชอบจำกัดคือ เซลลูโลสสามารถดูดความชื้นได้ดี อาจทำให้ฟิล์มเกิดการบวมหรือพอง แต่สามารถป้องกันได้ด้วยการเก็บรักษาในภาวะที่เหมาะสม (Jiang and Zhang, 2013) สำหรับโครงสร้าง สมบัติ และการใช้เส้นใยเซลลูโลสเพื่อเสริมความแข็งแรงแก้วสตุจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อ 2.4

## 2.4 เซลลูโลสและอนุพันธ์

### 2.4.1 โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ

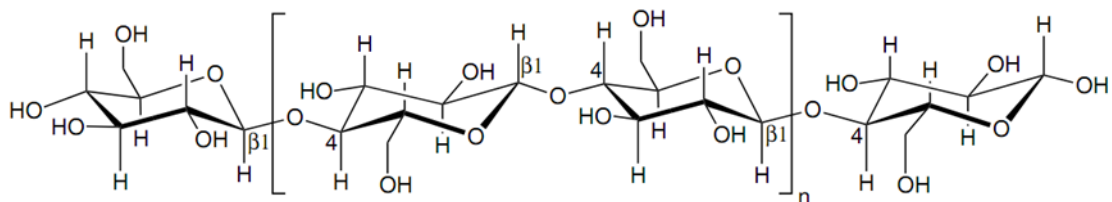
เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีปริมาณมากที่สุดในธรรมชาติ พบมากในพืชโดยเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ของพืชชั้นสูงซึ่งเซลลูโลสอยู่รวมกับเฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพกติน และอื่นๆ (Bledzki and Gassan, 1999; Siqueira et al., 2010) (รูปที่ 2.3) นอกเหนือจากพืช สิ่งมีชีวิตอื่นที่สามารถสร้างเซลลูโลสได้ ได้แก่ สาหร่ายสีเขียววราและแบคทีเรียบางชนิด (เช่น *Acetobacter xylinum*) สำหรับสัตว์มีเพียงชนิดเดียวที่สร้างเซลลูโลสได้ ได้แก่ สัตว์ทะเลในชั้นไฟลัม (subphylum) Tunicata (ชื่อเดิมคือชั้นไฟลัม Urochordata) ได้แก่ เพรียงลอย เพรียงสาย และ เพรียงหัวหอม (Belgacem and Gandini, 2011)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของผนังเซลล์ของพืช โดยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ปฐมภูมิร่วมกับคาร์โบไฮเดรตพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

ที่มา: Smith (2001)

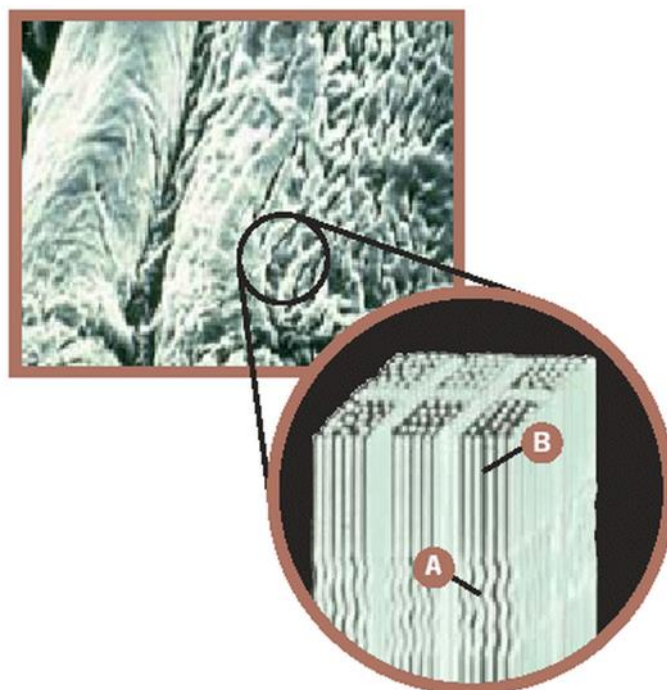
เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายตรง ประเภทโฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) ด้วยโครงสร้างเช่นนี้จึงทำให้โมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงและแข็งแรง (Bledzki and Gassan, 1999; Huq et al., 2012) โครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของโมเลกุลเซลลูโลส

ที่มา: Belgacem and Gandini (2011)

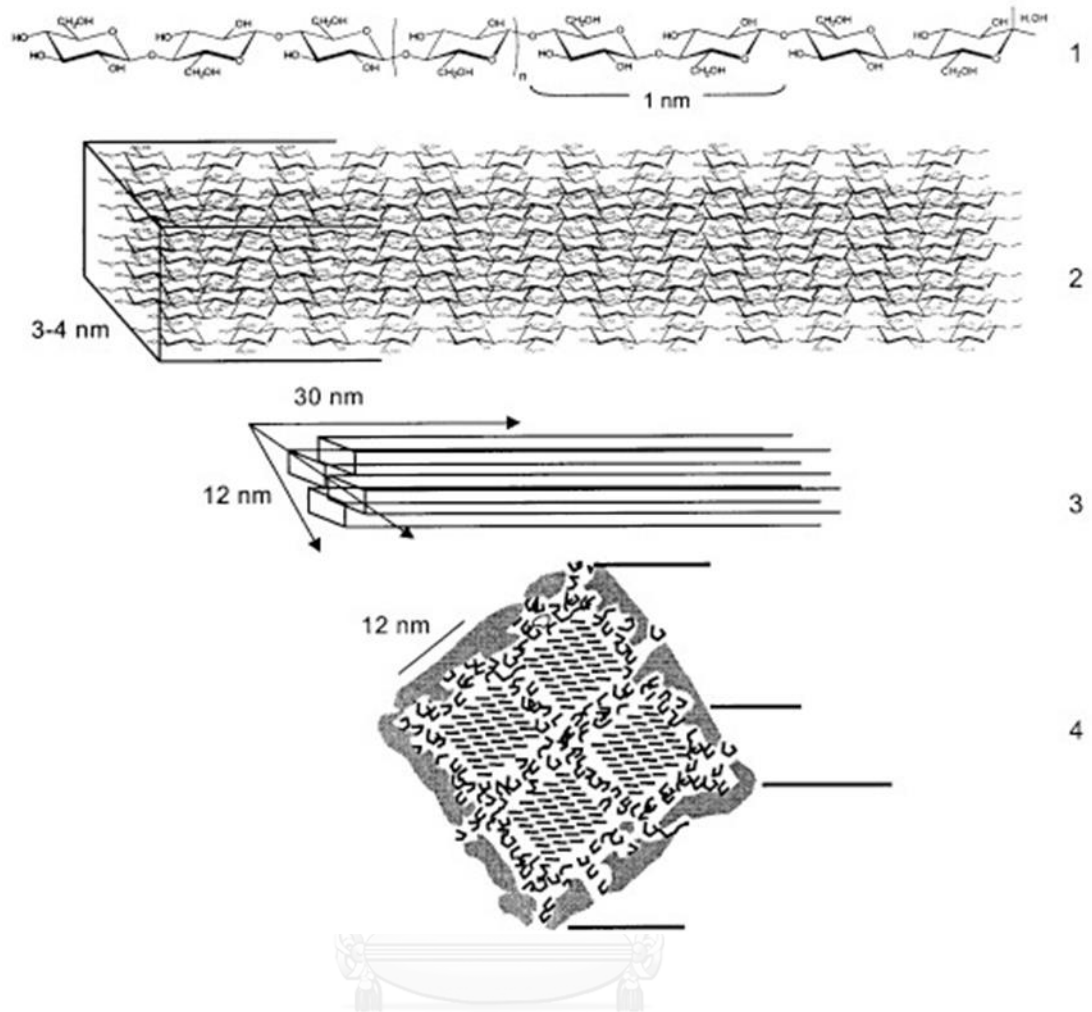
ในผนังเซลล์ของพืชโมเลกุลเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วยอันตรกิริยาทางเคมีต่างๆ เป็นไมโครไฟบริล (microfibril) ที่มีขนาดประมาณ 3-4 นาโนเมตร ไมโครไฟบริลประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนที่เป็นผลึก (crystalline region) (Siqueira et al., 2010) (รูปที่ 2.5) ไมโครไฟบริลจำนวนมากรวมกันเป็นไฟบริล (fibril) (รูปที่ 2.6) และไฟบริลจำนวนมากประกอบกันเป็นเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fiber) (รูปที่ 2.7)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

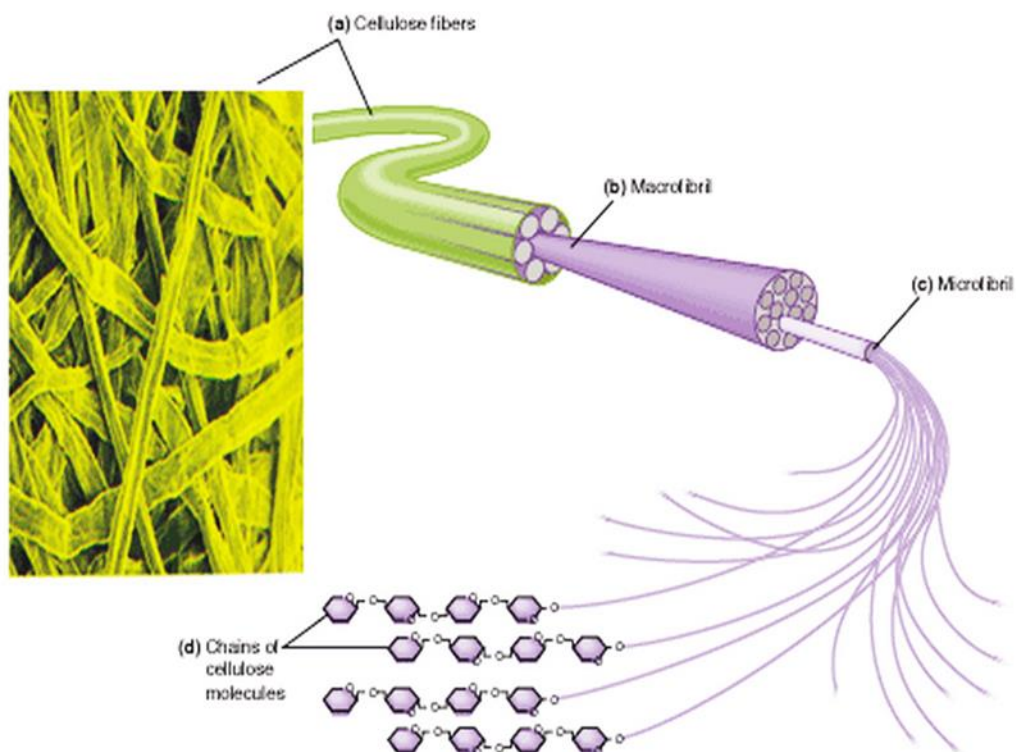
รูปที่ 2.5 เซลลูโลสไมโครไฟบริลประกอบด้วยส่วนที่เป็นอสัณฐาน (A) และส่วนที่เป็นผลึก (B)

ที่มา: FMC Corporation (2014)



รูปที่ 2.6 สายโซ่เซลลูโลส (1) เชื่อมต่อกันด้วยอันตรกิริยาทางเคมีต่างๆเกิดเป็นไมโครไฟบริล (2) ไมโครไฟบริลจำนวนมากรวมกันเป็นไฟบริล (3) และไฟบริลจำนวนมากรวมกันเป็นเส้นใยเซลลูโลส (4)

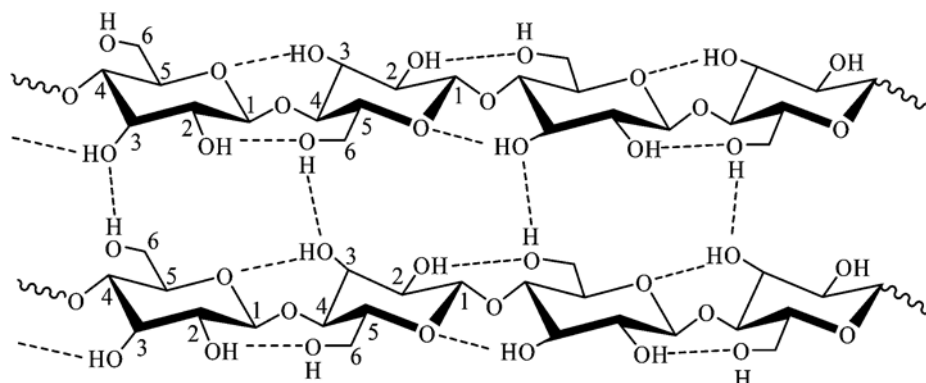
ที่มา: Ramos (2003)



รูปที่ 2.7 เส้นใยเซลลูโลส (a) ประกอบด้วยเซลลูโลสไฟบริล (b) แต่ละไฟบริลประกอบด้วย ไมโครไฟบริล (c) และแต่ละไมโครไฟบริลประกอบด้วยสายโซ่เซลลูโลส (d) เชื่อมต่อกันด้วย อันตรกิริยาทางเคมีต่างๆ

ที่มา: Jones and Bartlett Publishers (2014)

เซลลูโลสมีสมบัติชอบน้ำเนื่องจากประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก อย่างไรก็ตามเซลลูโลสไม่ละลายน้ำเนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลของหน่วยย่อยกลูโคสในเซลลูโลสเชื่อมต่อกันด้วย อันตรกิริยาทางเคมีต่างๆ เช่น พันธะไฮโดรเจน (รูปที่ 2.8) เซลลูโลสมีระดับการเกิดพอลิเมอไรเซชัน แตกต่างกันไปขึ้นกับแหล่งที่มา (Elsakhawy and Hassan, 2007; Belgacem and Gandini, 2011)



รูปที่ 2.8 พันธะไฮโดรเจน (เส้นประ) ที่เกิดภายในสายโซ่และระหว่างสายโซ่ของเซลลูโลส

ที่มา: Lu, Xu and Wang (2014)

เซลลูโลสสามารถเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดี โดยแต่ละหน่วยย่อยกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ จึงมีการนำเซลลูโลสมาดัดแปรทั้งโดยวิธีทางกายภาพและทางเคมี เพื่อให้ได้สมบัติตามที่ต้องการ

สำหรับไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส (microcrystalline cellulose) ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเซลลูโลสที่ดัดแปรโดยวิธีทางกายภาพ ตามที่กล่าวแล้วว่าเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่เป็นอสัณฐาน ในการผลิตไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสจะใช้กรดกำจัดส่วนที่เป็นอสัณฐาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แม้จะมีระดับการพอลิเมอไรเซชันลดลง มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและประกอบด้วยเฉพาะส่วนที่เป็นผลึก (Haafiz et al., 2013; Thoorens et al., 2014)

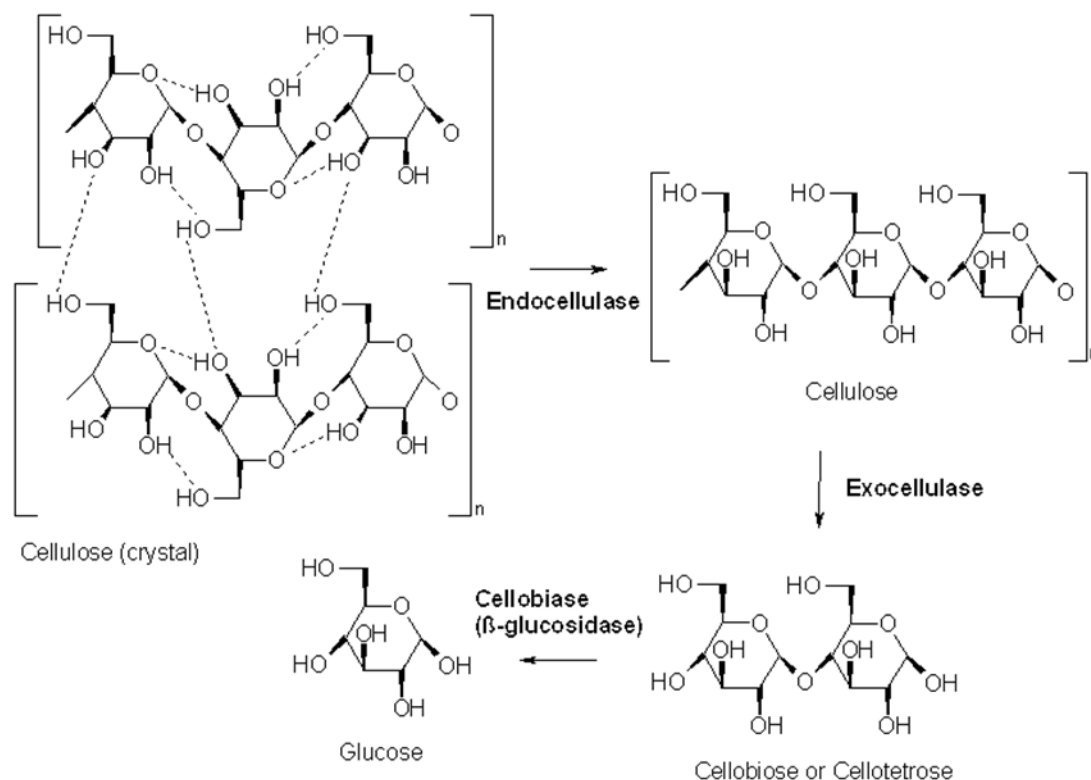
ไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีสมบัติชอบน้ำแต่ไม่ละลายน้ำเช่นเดียวกับเซลลูโลส มีความเหนียวทางเคมี มีความแข็งแรงเชิงกลสูง และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง และยา เนื่องจากมีสมบัติเชิงหน้าที่ที่หลากหลาย ได้แก่ ให้ความคงตัวให้ความข้น ควบคุมสมบัติการไหล ให้ความชุ่ม และเป็นแหล่งของเส้นใย (Elsakhawy and Hassan, 2007; Dong et al., 2013; Haafiz et al., 2013; Thoorens et al., 2014)

#### 2.4.2 การย่อยสลาย (degradation)

การย่อยสลายเชิงชีววิทยาของเซลลูโลสมักเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เร่งโดยเอนไซม์ (enzymatic hydrolysis) เซลลูเลสเป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่สร้างโดยรา แบคทีเรียและโพรโตซัวทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสโดยสามารถไฮโดรไลส์พันธะไกลโคซิดิกชนิด  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) เอนไซม์ส่วนใหญ่ตัดพันธะไกลโคซิดิกแบบสุ่มส่วนที่เป็นผลึกของเซลลูโลสค่อนข้างทนทานต่อการย่อยสลายโดยเอนไซม์เนื่องจากเอนไซม์จะผ่านเข้าไปในโครงสร้างที่เป็นระเบียบ (ordered structure) ได้ยากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับส่วนที่เป็นอสัณฐาน

ในกระบวนการย่อยสลายของเซลลูโลส เอนโด-เซลลูเลส (endo-cellulase) จะทำลายอันตรกิริยาที่เป็นน็อน-โควาเลนต์ในโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสได้ผลิตภัณฑ์เป็นสายโซ่เซลลูโลสเดี่ยวๆ จากนั้นเอกโซ-เซลลูเลส (exo-cellulase) จะตัดสายโซ่เซลลูโลสครั้งละ 2 หรือ 4 หน่วยจากด้านปลายได้เป็นไดแซ็กคาไรด์ (เซลโลไบโอส) หรือเตตระแซ็กคาไรด์ (เซลโลเทโทรส) จากนั้นเบตา-กลูโคซิเดส ( $\beta$ -glucosidase) จะทำหน้าที่ไฮโดรไลส์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำงานของเอกโซ-เซลลูเลสให้เป็นมอนอแซ็กคาไรด์ (กลูโคส) (Cavanito, 2011) รูปที่ 2.9 แสดงการย่อยสลายโดยเอนไซม์ของเซลลูโลส

เซลลูโลสยังสามารถย่อยสลายได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยกรด (acid hydrolysis) โดยจะไฮโดรไลส์พันธะ  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) แบบสุ่ม หากไฮโดรไลซิสเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกลูโคส นอกจากนี้เซลลูโลสสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยหมู่เคมีที่ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายคือหมู่ไฮดรอกซิลโดยเกิดออกซิเดชันแบบสุ่ม



รูปที่ 2.9 การย่อยสลายโดยเอนไซม์ของเซลลูโลส

ที่มา: Wikimedia Foundation (2014)

### 2.4.3 การใช้เส้นใยเซลลูโลสเพื่อเสริมความแข็งแรงให้แก่วัสดุ (cellulose fiber reinforcement)

เนื่องจากความแข็งแรงของเส้นใยเซลลูโลส จึงมีการนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุต่างๆ รวมถึงฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

Borges et al. (2004) ศึกษาผลของการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลสโดยแปรปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในช่วง 0-30% โดยน้ำหนักของสารละลายฟิล์มนอกจากนี้ผู้วิจัยยังศึกษาผลของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มพบว่าความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า



ฟิล์มที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีค่าความต้านทานแรงดึงขาดและการยึดตัวถึงจุดขาดสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เกิดอันตรกิริยาที่มีความเข้มข้นของไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเท่ากัน

Azeredo et al. (2012) ศึกษาการใช้เส้นใยเซลลูโลสเพื่อเสริมความแข็งแรงของฟิล์มจากแอลจินेटและอะเชโรลาเพียวเร (acerola puree) เส้นใยเซลลูโลสที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่เส้นใยจากเมล็ดฝ้าย (Ct-CW) และเส้นใยจากกาบมะพร้าวที่ผ่านการพอกสีหนึ่งชั้นตอนและหลายชั้นตอน (CcO-CW และCcM-CW ตามลำดับ) พบว่าการเติมเส้นใยเซลลูโลสทำให้ฟิล์มมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ฟิล์มที่เติม CcO-CW เข้มข้น 15 กรัม/100 กรัม มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุดโดยมีค่าสูงกว่าฟิล์มควบคุมที่ไม่เติมเส้นใยเซลลูโลส 48.2% อย่างไรก็ตามการเติมเส้นใยเซลลูโลสมีผลให้การยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดต่ำลงโดยฟิล์มที่เติม CcO-CW เข้มข้น 15 กรัม/100 กรัมมีการยึดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าฟิล์มควบคุมที่ไม่เติมเส้นใยเซลลูโลส 35.5% นอกจากนี้ผู้วิจัยยังรายงานว่า การเติมเส้นใยเซลลูโลสช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มได้ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับรายงานก่อนหน้านี้โดย Saxema and Ragauskas (2009) ซึ่งพบว่าการเติมเส้นใยเซลลูโลสช่วยลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor transmission rate) ของฟิล์มไซแลน

นอกจากนี้ยังมีการใช้เส้นใยเพื่อเสริมความแข็งแรงของวัสดุอื่นๆเช่น Bras et al. (2010) ศึกษาการเติมเส้นใยเซลลูโลสจากขานอ้อยลงในยางธรรมชาติ (natural rubber) โดยแปรปริมาณเส้นใยเซลลูโลสตั้งแต่ 0-10% พบว่าการเติมเส้นใยเซลลูโลสทำให้ความต้านทานแรงดึงขาดและยังกัมมอดูลัสของฟิล์มจากยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสสูงกว่า 7.5% การเติมเส้นใยเซลลูโลสในปริมาณต่ำ (0.25 และ 5%) มีผลให้การดูดความชื้นของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณของเส้นใยเซลลูโลสสูงกว่า 5% ฟิล์มที่ได้มีการดูดความชื้นลดลงและยังพบว่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกันกับการดูดความชื้นโดย

สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณเซลลูโลสเท่ากับ 7.5% หลังจากนั้นจึงมีค่าลดต่ำลงนอกจากนี้ยังพบว่า การเติมเส้นใยเซลลูโลสไม่มีผลต่ออุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ของฟิล์ม แต่การเติมเส้นใยเซลลูโลสมีผลให้อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature) ของการสลายตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition) มีค่าลดต่ำลง (265 องศาเซลเซียส) เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมเส้นใยเซลลูโลส (380 องศาเซลเซียส) อย่างไรก็ตามผู้วิจัยรายงานว่าฟิล์มที่เติมและไม่เติมเส้นใยเซลลูโลสมีรูปแบบของการสลายตัวด้วยความร้อนที่คล้ายคลึงกัน นอกจากนี้ผู้วิจัยยังศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของตัวอย่าง โดยการฝังดินพบว่าฟิล์มที่เติมเส้นใยเซลลูโลสมีการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่เติมเส้นใยเซลลูโลส



## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

โพรตีนถั่วเหลืองสกัด (บริษัท ไมท์ดี อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนล จำกัด, กรุงเทพฯ) (ภาคผนวก ก.1)

Cellulose, Sigmacell™, 20 µm, AR grade (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA)

Cellulose, Sigmacell™, 50 µm, AR grade (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA)

Glycerol, AR grade (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)

Lithium chloride, AR grade (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)

Magnesium chloride hexahydrate, QRëC™, AR grade (Quality Reagent Chemical, Pulau Pinang, Malaysia)

Magnesium nitrate hexahydrate, QRëC™, AR grade (Quality Reagent Chemical, Pulau Pinang, Malaysia)

Microcrystalline cellulose, 20 µm particle size, AR grade (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA)

Microcrystalline cellulose, Avicel® PH-101, 50 µm particle size, AR grade (Sigma Aldrich, St. Louis, MO, USA)

Potassium acetate, AR grade (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)

Potassium carbonate, QRëC™, AR grade (Quality Reagent Chemical, Pulau Pinang, Malaysia)

Potassium chloride, AR grade (VWR International, Poole, England)

Potassium iodide, AR grade (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)

Potassium nitrate, QRĒC™, AR grade (Quality Reagent Chemical, Pulau Pinang, Malaysia)

Tris-(hydroxymethyl)-methylamine, AR grade (Ajax Finechem, New South Wales, Australia)

### 3.2 อุปกรณ์

Chroma meter, model CR-400 (Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan)

Contact angle measuring instrument, model OCA15EC (DataPhysics Instrument, Filderstadt, Germany)

Digital thickness gauge, model 7301 (Mitutoyo, Tokyo, Japan)

Homogenizer, model X10/25 (Ystral, Ballrechten-Dottingen, Germany)

Laboratory hot air oven, model ED (Binder, Tuttlinger, Germany)

Platform shaker, model INNOVA 2050 (New Brunswick Scientific, Edison, NJ, USA)

Scanning electron microscope, model JSM-5410LV (JEOL, Tokyo, Japan)

Shaking water bath, model 1083 (GFL, Burgwedel, Germany)

Simultaneous thermogravimetric analyzer-differential scanning calorimeter, model STA409 F3 (Netzsch, Selb, Germany)

Stereomicroscope, model SMZ1000 (Nikon, Tokyo, Japan)

Ultrasonic bath, model 136H (Fisher Scientific, Schwerte, Germany)

Universal materials testing machine, Instron® , model 5565 (Instron, Norwood, MA)

UV/Vis spectrophotometer, model V-530 (Jasco, Easton, MD)

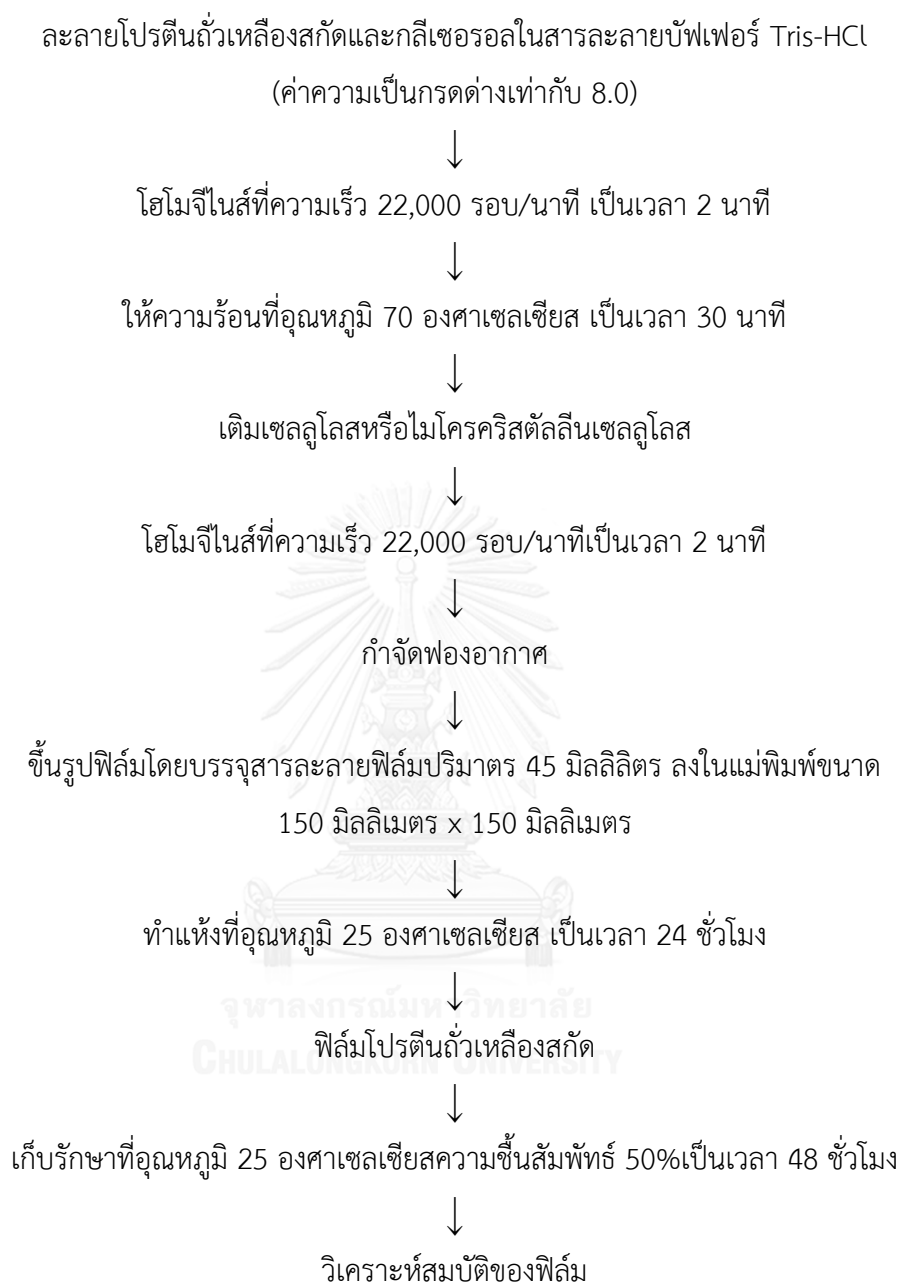
### 3.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การศึกษาผลของเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

การวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมเส้นใยจากเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรชนิดของเส้นใยเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส แปรขนาดอนุภาคของเส้นใยเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 20 และ 50 ไมโครเมตร และแปรปริมาณของเส้นใยเป็น 3 ระดับได้แก่ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

การเตรียมฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดทำโดยตัดแปลงจากวิธีของ Jiang et al. (2007) (รูปที่ 3.1) เตรียมสารละลายโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเข้มข้น 5% โดยน้ำหนักในสารละลายบัฟเฟอร์ Tris-HCl เข้มข้น 0.05 โมลาร์ (ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 8.0) ใช้กลีเซอรอลเข้มข้น 50% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเป็นพลาสติกไซเซอร์ผสมให้เข้ากัน นำสารละลายมาโฮโมจีไนส์โดยใช้ homogenizer (รุ่น X10/25, Ystral, Ballrechten-Dottingen, Germany) ที่ความเร็ว 22,000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 2 นาทีจากนั้นนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (รุ่น 1083, GFL, Burgwedel, Germany) ที่ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงเติมเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส แล้วนำสารละลายฟิล์มมาโฮโมจีไนส์อีกครั้งที่ความเร็ว 22,000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 2 นาทีก่อนนำมากำจัดฟองอากาศโดยใช้อ่างอัลตราโซนิก (รุ่น 136H, Fisher Scientific, Schwerte, Germany) เป็นเวลา 10 นาที

การขึ้นรูปฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ทำโดยปิเปตสารละลายฟิล์มปริมาตร 45 มิลลิลิตร บรรจุลงในแม่พิมพ์อะคริลิกขนาด 150 มิลลิเมตร x 150 มิลลิเมตร และทำแห้งที่อุณหภูมิ  $27 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นลอกแผ่นฟิล์มออก และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  $27 \pm 2$  องศาเซลเซียสความชื้นสัมพัทธ์ 50% เป็นเวลา 48 ชั่วโมงก่อนนำมาวิเคราะห์สมบัติต่อไป



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เสริมด้วยเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส

ที่มา: ดัดแปลงจาก Jiang et al. (2007)

### 3.3.1.1 ความหนา

ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 30 มิลลิเมตร x 120 มิลลิเมตร วัดความหนา โดยใช้เครื่องมือวัดความหนาแบบดิจิตอล (รุ่น 7301, Mitutoyo, Tokyo, Japan) วัดความหนาขึ้นละ 15 จุด นับเป็น 1 ซ้ำ

### 3.3.1.2 สมบัติเชิงกล

วิเคราะห์สมบัติด้านแรงดึง (tensile property) ด้วย Instron® universal materials testing machine (รุ่น 5565, Instron, Norwood, MA) ที่ติดตั้งด้วย load cell ขนาด 5 กิโลกรัม การวิเคราะห์สมบัติเชิงกลของฟิล์มทำโดยตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 30 มิลลิเมตร x 120 มิลลิเมตร ติดตั้งตัวอย่างฟิล์มเข้ากับหัววัด pneumatic side-action grips (Instron, Norwood, MA) โดยยึดจับตัวอย่างฟิล์มด้านที่มีความยาว 30 มิลลิเมตรทั้ง 2 ด้าน กำหนดระยะห่างของส่วนยึดจับเท่ากับ 50 มิลลิเมตรดึงตัวอย่างด้วยความเร็ว 5.0 มิลลิเมตร/วินาที โดยส่วนยึดจับด้านหนึ่งจะเคลื่อนที่ออกจากส่วนยึดจับอีกด้านหนึ่งในแนวตั้งจนกระทั่งตัวอย่างฟิล์มขาดออก บันทึกแรงที่ใช้ในการดึงตัวอย่างให้ขาดออก (หน่วยเป็นกรัม-แรง) และระยะทางที่สามารถดึงตัวอย่างออกได้มากที่สุด (หน่วยเป็นมิลลิเมตร) คำนวณความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดโดยใช้สมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับทดสอบตัวอย่างละ 6 ซ้ำ นับเป็น 1 ซ้ำ

$$\text{ความต้านทานแรงดึงขาด (เมกะพาสคาล)} = [F \times 0.009807 \times 10^6] / w d \quad (3.1)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ในการดึงขึ้นตัวอย่างให้ขาดออกจากกัน (กรัม-แรง)

w คือ ความกว้างของชิ้นตัวอย่าง (เมตร)

d คือ ความหนาของชิ้นตัวอย่าง (เมตร)

$$\text{การยืดตัวถึงจุดขาด (\%)} = L_f \times 100/L_i \quad (3.2)$$

เมื่อ  $L_f$  คือ ระยะทางที่สามารถดึงขึ้นตัวอย่างให้ยืดออกมาได้มากที่สุดก่อนที่จะขาดออกจากกัน (มิลลิเมตร)

$L_i$  คือ ความยาวของชิ้นตัวอย่างระหว่างส่วนยึดจับก่อนดึง (มิลลิเมตร)

### 3.3.1.3 ความโปร่งแสง

ความโปร่งแสงของตัวอย่างฟิล์มแสดงในรูปของร้อยละของแสงส่องผ่าน (% transmittance) วัดโดยตัดแปลงจากวิธีของ Tang et al. (2005) โดยตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 10 มิลลิเมตร x 40 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดพอดีกับด้านที่แสงส่องผ่านของคิวเว็ตต์ติดตั้งฟิล์มลงบนผิวด้านในของคิวเว็ตต์ วัดร้อยละของแสงส่องผ่านที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV/Vis spectrophotometer (รุ่น V-350, Jasco, Easton, MD) โดยใช้คิวเว็ตต์เปล่าเป็นแบล็ก กำหนดให้ร้อยละของแสงส่องผ่านของแบล็กมีค่าเท่ากับ 100

### 3.3.1.4 ค่าสี

ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 30 มิลลิเมตร x 120 มิลลิเมตร วัดค่าสีในระบบ CIELAB โดยใช้ chroma meter (รุ่น CR-400, Konica Minolta Sensing, Osaka, Japan) ใช้แหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมมอง 10 องศาโดยวัด 5 จุดสำหรับตัวอย่างฟิล์มแต่ละชิ้น นับเป็น 1 ซ้ำ คำนวณมุมสี (hue angle) และความอิ่มตัวสี (chroma) โดยใช้สมการที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

$$\text{มุมสี (องศา)} = \arctan (b^*/a^*) \quad (3.3)$$

$$\text{ความอิ่มตัวสี} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (3.4)$$



### 3.3.1.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

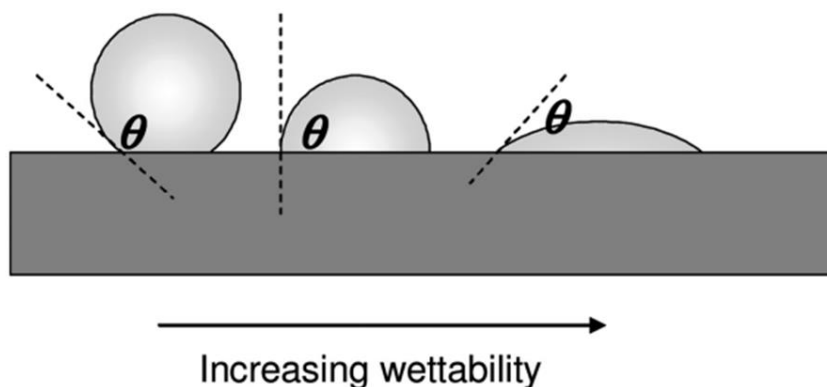
วิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM E96-95 (ASTM, 1999) เตรียมโดยบรรจุซิลิกาเจลที่อบแห้งแล้วปริมาณ 20 กรัมลงในขวดแก้วที่ใช้ทดสอบ ทาซิลิโคนกรีสบริเวณปากขวด ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 60 มิลลิเมตร x 60 มิลลิเมตร ติดตั้งลงบนปากขวดซึ่งให้ตั้งแล้วรัดให้แน่นด้วยยางวงแหวน บันทึกน้ำหนักเป็นน้ำหนักเริ่มต้น นำขวดทดสอบไปเก็บไว้ในภาชนะปิดสนิทที่บรรจุน้ำกลั่นไว้ ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส บันทึกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา คำนวณสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำโดยใช้สมการที่ 3.5 วิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ชิ้น นับเป็น 1 ซ้ำ

$$\text{สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ} = W d/A t (P_2-P_1) \quad (3.5)$$

เมื่อ	W	คือ น้ำหนักของขวดทดสอบเริ่มต้น (กรัม)
	d	คือ ความหนาของแผ่นฟิล์ม (เมตร)
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นฟิล์มที่ไอน้ำผ่านได้ (ตารางเมตร)
	t	คือ ระยะเวลาที่น้ำหนักของขวดทดสอบคงที่ (ชั่วโมง)
	$P_2-P_1$	คือความแตกต่างของความดันไอน้ำระหว่างสองด้านของแผ่นฟิล์ม (พาสคาล)

### 3.3.1.6 มุมสัมผัส (contact angle) ระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม

วัดมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโดยใช้ contact angle measuring instrument (รุ่น OCA15EC, DataPhysics, Filderstadt, Germany) โดยนำฟิล์มตัวอย่างขนาด 20 มิลลิเมตร x 50 มิลลิเมตรวางบนแท่นสำหรับวางตัวอย่าง โดยให้ด้านที่สัมผัสกับอากาศในขณะทำแห้งอยู่ด้านบน หยดน้ำกลั่นปริมาตร 4 ไมโครลิตรลงบนผิวหน้าของฟิล์มบันทึกภาพและวัดค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม โดยวัดตัวอย่างละ 3 ชิ้น นับเป็น 1 ซ้ำ



รูปที่ 3.2 แสดงมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม

ที่มา: Forch (2009)

### 3.3.1.7 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์ม

ศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วย stereomicroscope (รุ่น SMZ1000, Nikon, Tokyo, Japan) โดยใช้เลนส์ใกล้ตา (eyepiece lens) รุ่น C-W10XA/22 (Nikon, Tokyo, Japan) และเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) รุ่น Plan Apo 1X WD-70 (Nikon, Tokyo, Japan) ศึกษาที่กำลังขยาย 40 เท่าบันทึกภาพด้วยโปรแกรม ACT-1 digital camera DXM1200F for microscope (Nikon, Tokyo, Japan)

สำหรับลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, รุ่น JSM-5410LV, JEOL, Tokyo, Japan) เตรียมตัวอย่างโดยนำตัวอย่างฟิล์มมาลดความชื้นโดยเก็บในโถดูดความชื้นที่บรรจุซิลิกาเจลเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นจึงนำมาแช่เยือกแข็งโดยแช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วจึงหักตัวอย่างติดตั้งตัวอย่างฟิล์มลงบนแท่งทองเหลืองสำหรับวิเคราะห์ โดยใช้เทปกาวช่วยยึดตัวอย่างฟิล์มกับแท่งทองเหลือง จากนั้นจึงนำไปฉาบด้วยทองก่อนนำไปศึกษาลักษณะภาคตัดขวางที่กำลังขยาย 200 เท่า

### 3.3.2 การศึกษาผลของเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อเสถียรภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

การวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อเสถียรภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดโดยนำตัวอย่างฟิล์มที่ผลิตในข้อ 3.3.1 มาวิเคราะห์สมบัติดังต่อไปนี้

#### 3.3.2.1 ความสามารถในการละลายน้ำ

วิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำโดยดัดแปลงจากวิธีของ Perez-Gago and Krochta (2001) ตัดตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาด 20 มิลลิเมตร x 20 มิลลิเมตรนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ บันทึกเป็นน้ำหนักตัวอย่างฟิล์มเริ่มต้น จากนั้นบรรจุตัวอย่างฟิล์มลงในหลอดทดลองขนาด 50 มิลลิลิตรเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วย platform shaker (รุ่น INNOVA 2050, New Brunswick Scientific, Edison, NJ) ที่ความเร็ว 250 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมากรองด้วยระบบสุญญากาศผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 4 ที่อบแห้งและทราบน้ำหนักกระดาษกรองพร้อมกับสิ่งที่ค้างบนกระดาษกรองไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อห้กน้ำหนักกระดาษกรองออกแล้ว บันทึกน้ำหนักสิ่งที่ค้างบนกระดาษกรองเป็นน้ำหนักตัวอย่างฟิล์มหลังอบ คำนวณความสามารถในการละลายน้ำโดยใช้สมการที่ 3.6 วัดตัวอย่างละ 3 ซึ่ นับเป็น 1 ซ้ำ

$$\text{ความสามารถในการละลายน้ำ} = (W_i - W_f) \times 100 / W_i \quad (3.6)$$

เมื่อ  $W_i$  คือ น้ำหนักตัวอย่างฟิล์มเริ่มต้น (กรัม)

$W_f$  คือ น้ำหนักของตัวอย่างฟิล์มหลังอบ (กรัม)

### 3.3.2.2 พฤติกรรมการดูดความชื้นและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับวอเตอร์แอกทิวิตี

สร้างเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้น (moisture sorption isotherm) ของตัวอย่างฟิล์มที่อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียสโดยตัดฟิล์มให้มีขนาด 30 มิลลิเมตร x 120 มิลลิเมตร จำนวน 7 ชิ้น นำตัวอย่างฟิล์มไปทำให้อยู่ในสมดุล (equilibrated) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆเป็นเวลา 7 วันสำหรับภาวะความชื้นสัมพัทธ์คงที่ทำได้โดยใช้สารละลายเกลืออิ่มตัวชนิดต่างๆ (ตารางที่ 3.1) หลังจากที่ตัวอย่างฟิล์มอยู่ในสมดุลไอน้ำและสมดุลอุณหภูมิกับบรรยากาศโดยรอบในภาชนะปรับสมดุล (equilibration chamber) แล้วนำตัวอย่างฟิล์ม 1 ชิ้นมาวิเคราะห์ความชื้นตามวิธีของ AOAC (2000) โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ และนำตัวอย่างฟิล์มที่เหลือมาวิเคราะห์สมบัติด้านแรงดึงของตัวอย่างฟิล์มตามวิธีในข้อ 3.3.1.2

ตารางที่ 3. 1 ความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

สารละลายเกลืออิ่มตัว	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
ลิเทียมคลอไรด์	11.3
โพแทสเซียมแอสซิเทต	22.5
แมกนีเซียมคลอไรด์	32.8
โพแทสเซียมคาร์บอเนต	43.2
แมกนีเซียมไนเตรต	52.9
โพแทสเซียมไอโอไดด์	68.9
โพแทสเซียมคลอไรด์	84.3
โพแทสเซียมไนเตรต	93.6

ที่มา: ดัดแปลงจาก Rockland (1960)

### 3.3.2.3 การสลายตัวด้วยความร้อน (thermal decomposition)

วิเคราะห์การสลายตัวของตัวอย่างเนื่องจากความร้อนโดยใช้ simultaneous thermogravimetric analyzer-differential scanning calorimeter (รุ่น STA409 F3, Netzsch, Selb, Germany) นำตัวอย่าง 20 มิลลิกรัม บรรจุลงในภาตตัวอย่างอะลูมิเนียม (aluminum pan) นำภาตตัวอย่างและภาตเปล่าที่ใช้เป็นภาตอ้างอิง (reference pan) บรรจุลงในช่องใส่ตัวอย่าง (sample carrier) เพิ่มอุณหภูมิจาก 25 ถึง 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการคงที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที ภายใต้บรรยากาศที่อิมตัวอย่างไนโตรเจน ติดตามการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ (thermogravimetric analysis, TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ (derivative thermogravimetric analysis, DTG)

### 3.3.3 การศึกษาผลของการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยต่อสภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัด

คัดเลือกตัวอย่างฟิล์มที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดในช่วง 3.3.1 มาวิเคราะห์สภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพในภาวะที่มีอากาศ (aerobic bio-degradation) ภายใต้ภาวะการหมักขยะที่ควบคุม (controlled composting condition) ตามวิธีมาตรฐาน ISO 14855-1 (ISO., 2005) เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

สำหรับการทดสอบทำโดยบดตัวอย่างฟิล์มจนมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1000 ไมโครเมตร นำตัวอย่างฟิล์ม 30 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ผสมกับดิน 180 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งมีหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการทดสอบ (ภาคผนวก ง.1) นำไปบรรจุในถังปฏิกรณ์ (reactor) (รูปที่ 3.2) โดยควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง 50-55% ปริมาณออกซิเจนให้สูงกว่า 6% อุณหภูมิ  $58 \pm 2$  องศาเซลเซียส ภายใต้ภาวะที่ไม่มีแสงผ่านอากาศที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide-free air) เข้าในถังปฏิกรณ์ติดตามปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นระยะเวลา 45 วันโดยระบบการ

ทดลองแสดงดังรูปที่ 3.3 คำนวณร้อยละการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (%bio-degradation) จากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการที่ 3.7

$$\% \text{Bio-degradation} = ([\text{CO}_2]_{\text{sample}} - [\text{CO}_2]_{\text{blank}}) \times 100 / [\text{CO}_2]_{\text{Th}} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $[\text{CO}_2]_{\text{blank}}$  คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากแบลнк (กรัม/ถังปฏิกรณ์)

$[\text{CO}_2]_{\text{sample}}$  คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากตัวอย่าง (กรัม/ถังปฏิกรณ์)

$[\text{CO}_2]_{\text{Th}}$  คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี (theoretical amount of carbon dioxide) (กรัม/ถังปฏิกรณ์)

หมายเหตุ แบลнкทำโดยผ่านอากาศที่ปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในถังปฏิกรณ์ที่มีดินและหัวเชื้อจุลินทรีย์ และวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น

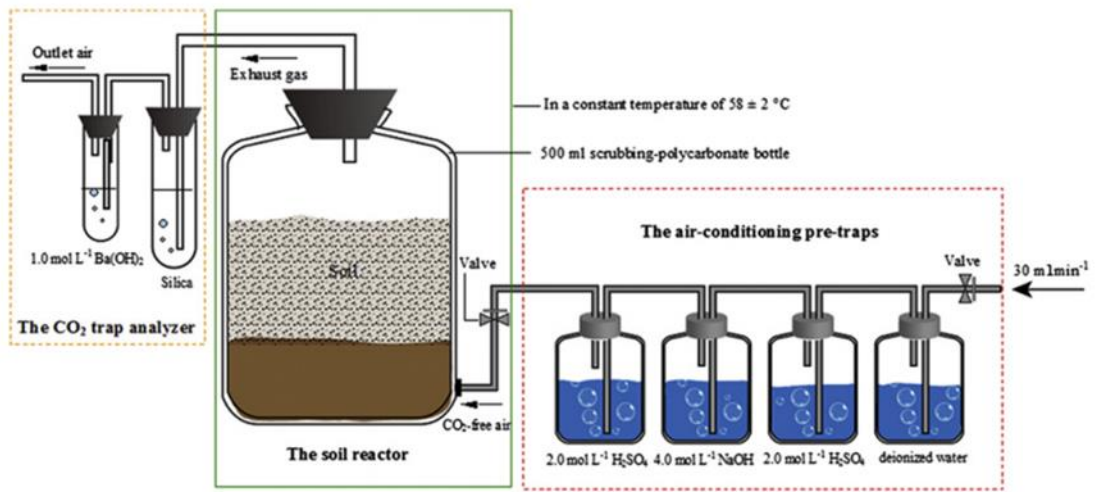
โดยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีคำนวณโดยใช้สมการที่ 3.8

$$[\text{CO}_2]_{\text{Th}} = (\text{TOC} \times W)(44/12)/100 \quad (3.8)$$

เมื่อ TOC คือ ร้อยละของคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (total organic carbon) ของตัวอย่าง

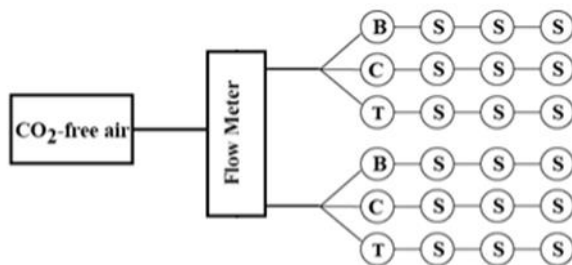
W คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัมของตัวอย่างแห้ง)

44 และ 12 คือ มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ และมวลอะตอมของคาร์บอนตามลำดับ



รูปที่ 3.3 ระบบวิเคราะห์สภาวะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ที่มา: Su et al. (2010)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 ระบบการทดลองสภาวะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ก) แผนภาพระบบการทดลอง (สำหรับ 1 ตัวอย่าง) โดย B คือ แบลงก์, C คือ เซลลูโลสซึ่งใช้เป็น positive control reference material, T คือ ตัวอย่างที่ทดสอบ และ S คือ scrubbing solution (sodium hydroxide) และ (ข) ระบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ที่มา: Leejarkpai (2014)

### 3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

สำหรับการทดลองข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's new multiple range test (Cochran and Cox, 1957) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และสำหรับการทดลองข้อ 3.3.3 ทดลอง 2 ซ้ำ





## บทที่ 4

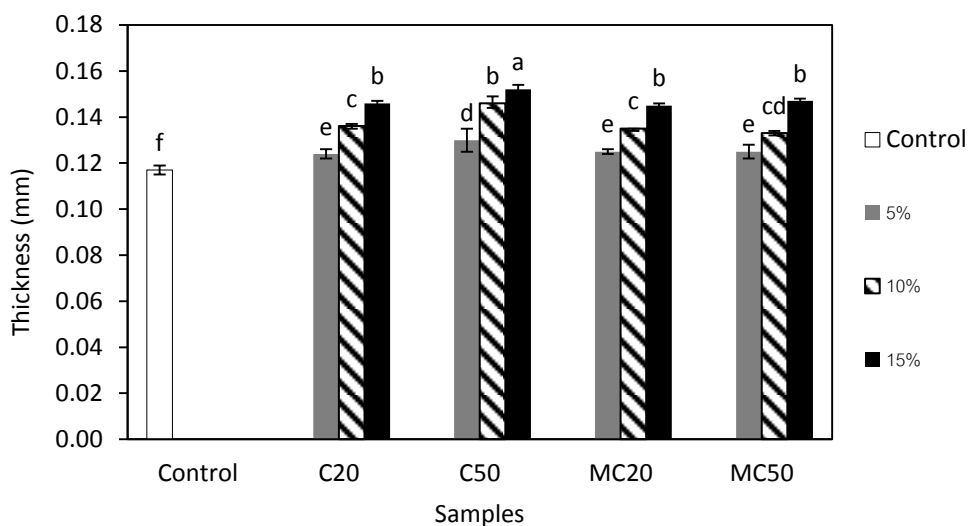
### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลของเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

การวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของเส้นใยจากเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรชนิดของเส้นใยเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลส (C) และไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส (MC) แปรขนาดอนุภาคของเส้นใยเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 20 และ 50 ไมโครเมตร และแปรปริมาณของเส้นใยเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยรหัสตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ฟิล์มที่เติมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร (C20) ฟิล์มที่เติมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร (C50) ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร (MC20) และฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร (MC50)

##### 4.1.1 ความหนา

รูปที่ 4.1 แสดงความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมความแข็งแรงด้วยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ฟิล์มที่เสริมเส้นใยทุกตัวอย่างมีความหนามากกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยทั่วไปพบว่าชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยไม่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม ยกเว้นฟิล์มที่เติมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตรซึ่งมีความหนามากกว่าตัวอย่างอื่นเล็กน้อย สำหรับปริมาณเส้นใยที่เติมพบว่าผลต่อความหนาของฟิล์มอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยความหนามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น Cuq et al. (1997) เสนอว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนา คือ ปริมาณของแข็งในสารละลายฟิล์ม ดังนั้นการเสริมเส้นใยในปริมาณมากขึ้นจึงทำให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.1 ความหนาของฟิล์มโพรพีนไถ้วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ผลที่ได้จากการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. (2014) ซึ่งศึกษาสมบัติของฟิล์มโพรพีนไถ้วเหลืองสกัดเสริมเส้นใยเซลลูโลสจากรำข้าวสาลีและพบว่าฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน Sirviö et al. (2014) รายงานว่าฟิล์มแอลจินेटที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสมีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

Reddy and Rhim (2014) พัฒนาฟิล์มเอการ์ (agar) ที่เสริมความแข็งแรงด้วยนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสจากเยื่อปอสา (paper-mulberry pulp nanocrystalline cellulose) โดยแปรปริมาณเส้นใยเป็น 1, 3, 5 และ 10% พบว่าฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) เมื่อปริมาณนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสเพิ่มขึ้น โดยผู้วิจัยเสนอว่าความหนาที่เพิ่มขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากตัวอย่างฟิล์มมีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ Moura et al. (2011) พัฒนาฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสซึ่งถูกทำให้มีอนุภาคเล็กลงด้วยเทคโนโลยีไมโครฟลูอิดิกส์ (microfluidics) พบว่าการเสริมเส้นใยเซลลูโลสทำให้ฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น

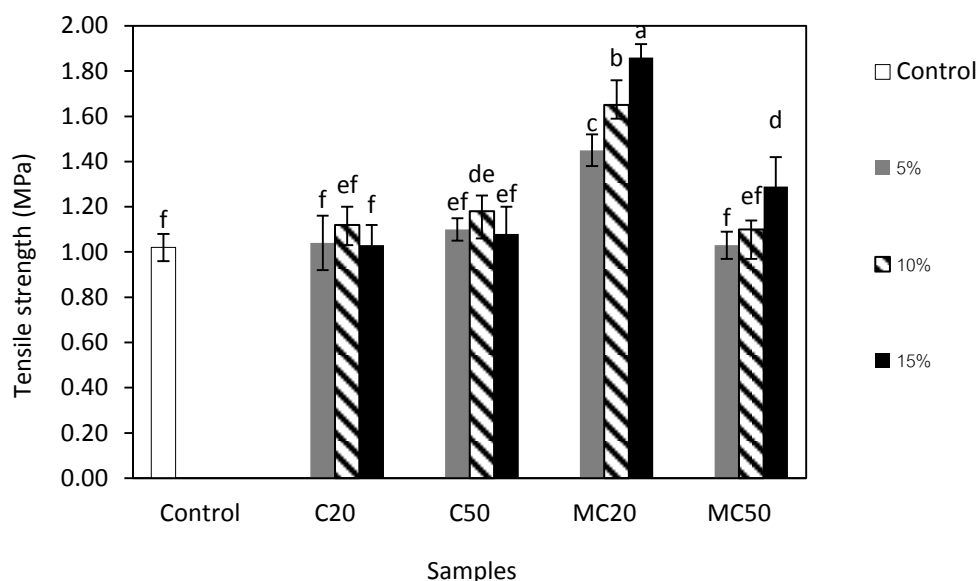
#### 4.1.2 สมบัติเชิงกล

##### 4.1.2.1 ความต้านทานแรงดึงขาด

ความต้านทานแรงดึงขาด คือ ความเครียด (stress) ที่เกิดขึ้นในขณะที่ดึงปลายด้านใดด้านหนึ่งของฟิล์มจนแผ่นฟิล์มนั้นขาดออก รูปที่ 4.2 แสดงความต้านทานแรงดึงขาดของตัวอย่างฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส จากการทดลองพบว่าตัวอย่างควบคุมซึ่งไม่เสริมเส้นใยมีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 1.02 เมกะพาสคาล โดยทั่วไปพบว่าการเติมเซลลูโลสไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงขาดอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) อย่างไรก็ตามการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้ความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่ามีค่าความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p<0.05$ ) โดยเมื่อปริมาณของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาดมีค่าเพิ่มขึ้น ตัวอย่างที่เติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตรปริมาณ 15% โดยน้ำหนักของโพรตีนมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 1.86 เมกะพาสคาล ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมถึง 82.35% การที่ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลส อาจเป็นผลมาจากความแข็งแรงของไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเอง เนื่องจากไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสประกอบด้วยเฉพาะส่วนที่เป็นผลึกซึ่งมีความแข็งแรงสูง ในขณะที่เซลลูโลสประกอบด้วยทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึก และเมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างขนาดอนุภาคของเส้นใยเซลลูโลส พบว่าตัวอย่างที่เติมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ที่ระดับปริมาณเส้นใยเท่ากัน มีความต้านทานแรงดึงขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p>0.05$ ) แต่เมื่อเปรียบเทียบการเติมไมโครคริสตัลลีน

เซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ที่ระดับปริมาณเส้นใยเท่ากัน พบว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาด 20 ไมโครเมตร มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าสามารถกระจายตัวในเนื้อฟิล์มได้ดีกว่า และเกิดการรวมกลุ่มของอนุภาคน้อยกว่าไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสที่มีขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร จึงทำให้ฟิล์มมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า โดยลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มจะแสดงต่อไปในหัวข้อที่ 4.1.7

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Azeredo et al. (2012) ซึ่งศึกษาการใช้เส้นใยเซลลูโลสเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับฟิล์มประกอบจากแอลจินตและอะเซโรลาเพียวเร โดยเส้นใยที่ใช้ ได้แก่ เส้นใยจากเมล็ดฝ้าย (Ct-CW) และเส้นใยจากกาบมะพร้าวที่ผ่านการพอกสีหนึ่งชั้นตอนและหลายชั้นตอน (CcO-CW และ CcM-CW ตามลำดับ) แปรปริมาณเส้นใยเป็น 5, 10 และ 15 กรัม/100 กรัมของน้ำหนักแห้ง ในงานวิจัยนี้พบว่าการเติมเส้นใยเซลลูโลสทำให้ฟิล์มมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) อย่างไรก็ตามชนิดของเส้นใยไม่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงขาด โดยฟิล์มที่เติม CcO-CW เข้มข้น 15 กรัม/100 กรัม มีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 6.10 เมกะพาสคาล ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมเส้นใยเซลลูโลส 48.2% ผู้วิจัยอธิบายว่าความต้านทานแรงดึงขาดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากความแข็งแรงตามธรรมชาติของเส้นใยเซลลูโลสเอง รวมทั้งเซลลูโลสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่เคมีที่เป็นองค์ประกอบของแอลจินตและใยอาหารในอะเซโรลาเพียวเรส่งผลให้ตัวอย่างฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.2 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

นอกจากนี้ Khan et al. (2012) ศึกษาผลของการเสริมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการป้องกันการซึมผ่าน (barrier property) ของฟิล์มไคโตซาน โดยแปรปริมาณของนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสเป็น 1, 3, 5 และ 10% โดยน้ำหนักของไคโตซาน พบว่าการเติมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสมีผลต่อความต้านทานแรงดึงขาดอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยฟิล์มที่เติมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสปริมาณ 5% มีความต้านทานแรงดึงขาดสูงสุด โดยมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุม 25.3% อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเป็น 10% ความต้านทานแรงดึงขาดมีแนวโน้มลดลง ผู้วิจัยเสนอว่าความต้านทานแรงดึงขาดที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างไคโตซานกับนาโนคริสตัลลินเซลลูโลส รวมทั้งความแข็งแรงตามธรรมชาติของนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสเอง และความต้านทานแรงดึงขาดที่ลดลงเมื่อปริมาณของนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสสูงกว่า 5% เนื่องมาจากนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสเกิดการรวมตัวกันเอง

Huq et al. (2012) ศึกษาฟิล์มแอลจินेटที่เสริมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลส โดยแปรปริมาณนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสเป็น 1, 3, 5 และ 8% พบว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสมีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 57 เมกะพาสคาลการเติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้ฟิล์มมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยฟิล์มที่เติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลส 5% มีความต้านทานแรงดึงขาดเพิ่มขึ้น 37% จากตัวอย่างควบคุมผู้วิจัยอธิบายว่าการที่นาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสและแอลจินेटมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายกันจึงทำให้เกิดอันตรกิริยากันได้ดี ส่งผลให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น

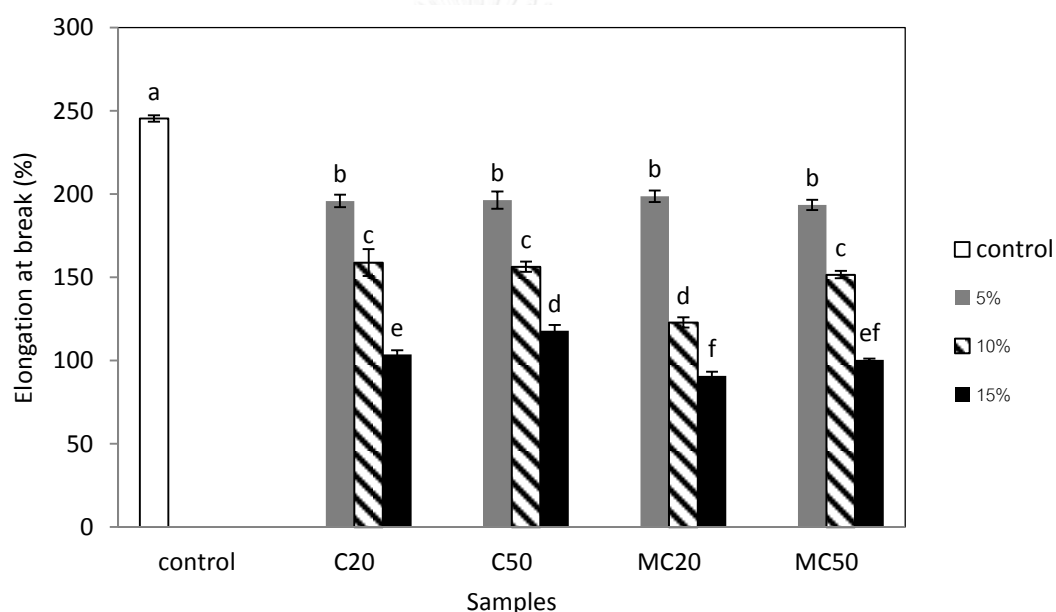
Wang et al. (2013) ศึกษาสมบัติเชิงกลของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสจากรำข้าวสาลี โดยแปรอัตราส่วนโปรตีนต่อเซลลูโลสในช่วง 10:0 ถึง 3:7 พบว่าปริมาณของเส้นใยเซลลูโลสมีผลต่อความต้านทานแรงดึงขาดอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยความต้านทานแรงดึงขาดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นจนถึงอัตราส่วน 7:3 แต่เมื่ออัตราส่วนของเซลลูโลสสูงขึ้น ความต้านทานแรงดึงขาดกลับมีค่าลดลง ผู้วิจัยระบุว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างเซลลูโลสและโปรตีนมีส่วนในการทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น แต่ปริมาณเซลลูโลสที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดการรวมตัวกันของเซลลูโลสและทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเซลลูโลสและโปรตีนลดลง

นอกจากฟิล์มแล้ว ยังมีการใช้เส้นใยเพื่อเสริมความแข็งแรงของวัสดุอื่นๆ เช่น Bras et al. (2010) ศึกษาการใช้เส้นใยเซลลูโลสจากชานอ้อยเพื่อเสริมความแข็งแรงของฟิล์มจากยางธรรมชาติ โดยแปรปริมาณเส้นใยเซลลูโลสตั้งแต่ 0-10% พบว่าการเติมเส้นใยเซลลูโลสทำให้ความต้านทานแรงดึงขาดและยังกัมมอดูลัสของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสสูงกว่า 7.5% ในทำนองเดียวกัน Coa et al. (2013) ศึกษาการใช้เซลลูโลสนาโนคริสตัลเสริมความแข็งแรงของยางไนไตรล์ (nitrile rubber) พบว่ายางที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสในปริมาณ 20

ส่วนต่ออย่าง 100 ส่วน มีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 15.7 เมกะพาสคาลในขณะที่ตัวอย่าง ควบคุมที่ไม่เสริมเส้นใยมีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 7.7 เมกะพาสคาล

#### 4.1.2.2 การยืดตัวถึงจุดขาด

การยืดตัวถึงจุดขาด คือร้อยละของระยะทางที่ฟิล์มยืดออกด้วยแรงดึงจน ขาดต่อความยาวเดิม รูปที่ 4.3 แสดงการยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริม เส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส



รูปที่ 4.3 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและ ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

จากผลการทดลองพบว่า ตัวอย่างควบคุมมีการยืดตัวถึงจุดขาดสูงที่สุด (228.54%) สำหรับตัวอย่างที่เสริมเส้นใยพบว่าการยืดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใย เพิ่มขึ้น และโดยทั่วไปพบว่าชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยไม่มีผลต่อการยืดตัวถึงจุดขาด โดยผลที่ ได้นี้สอดคล้องกับรายงานของ Teaca et al. (2013) ซึ่งพบว่าการเสริมเส้นใยเซลลูโลสทำให้ฟิล์ม สตาร์ชข้าวโพดตัดแปรมีการยืดตัวถึงจุดขาดลดลง ซึ่งผู้วิจัยอธิบายว่าโครงสร้างที่แข็งแรงของเส้นใย

เซลลูโลส รวมทั้งการเกิดอันตรกิริยา เช่น พันธะไฮโดรเจน ภายในโครงสร้างฟิล์ม ทำให้จำกัดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ โครงสร้างจึงแน่น (compact) ขึ้น การที่โครงสร้างมีปริมาตรอิสระ (free volume) ลดลงนี้จึงทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นลดลง และอาจเนื่องมาจากการเติมเส้นใยเซลลูโลสทำให้ความต่อเนื่องของเนื้อฟิล์มลดลง ดังสังเกตได้จากลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มในหัวข้อ 4.1.7

ในทำนองเดียวกัน Khan et al. (2012) รายงานว่าเมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น การยึดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มไคโตซานมีค่าลดลง รวมทั้ง Huq et al. (2012) ที่ศึกษาการเสริมเส้นใยเซลลูโลสในฟิล์มแอลจินต พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเซลลูโลสเพิ่มขึ้น การยึดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มมีค่าลดลง

นอกจากนี้ Cao et al. (2013) รายงานว่าการเสริมเซลลูโลสนาโนคริสตัลในยางไนโตรลทำให้การยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลง และ Ma et al. (2005) ศึกษาการเสริมเส้นใยนาโนจากฝ้ายชนิด wince yette ในวัสดุคอมพอสิตที่ผลิตจากเทอร์โมพลาสติกสตาเรซในปริมาณ 0-20% พบว่าการยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยวัสดุคอมพอสิตที่เสริมเส้นใยในปริมาณ 20% มีการยึดตัวถึงจุดขาดเพียง 19% เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมที่ไม่เสริมเส้นใยซึ่งมีการยึดตัวถึงจุดขาด 105%

Pöllänen et al. (2013) ศึกษาการเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสและเส้นใยวิสโคส (viscose fiber) ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (high density polyethylene, HDPE) โดยแปรปริมาณเส้นใยเป็น 5, 10, 20 และ 40% พบว่าการยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นนอกจากนี้ Korpela et al. (2014) ซึ่งศึกษาการเสริมเส้นใยวิสโคสในพอลิพรอพิลีนก็รายงานผลในทำนองเดียวกัน

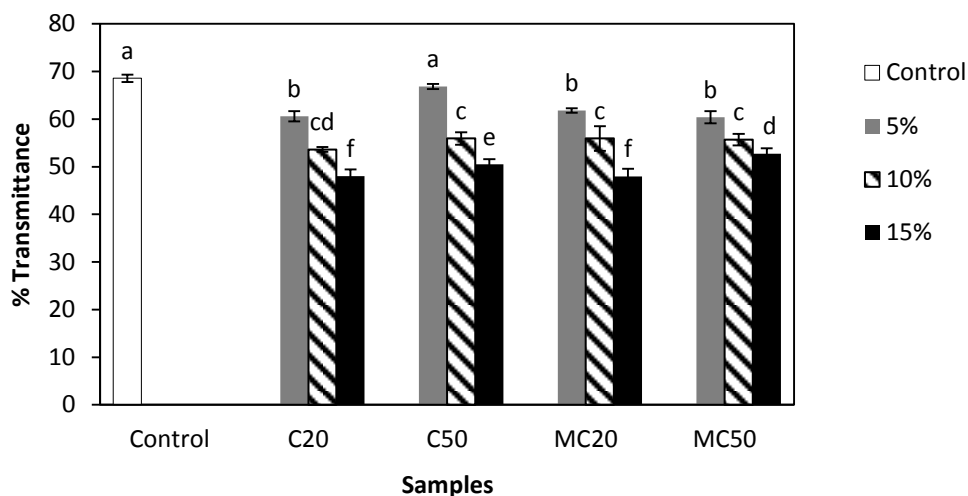


อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยอื่นที่รายงานแตกต่างกันไป เช่น Azeredo et al. (2012) รายงานว่าแม้ว่าการเติมเส้นใยเซลลูโลสในปริมาณ 5% จะทำให้ฟิล์มประกอบจากแอลจินตและอะเซโรลาเพียวเรมีการยึดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) แต่การเพิ่มปริมาณเส้นใยเป็น 10 และ 15% ไม่มีผลทำให้การยึดตัวถึงจุดขาดลดลงต่ำกว่าฟิล์มที่เติมเส้นใย 5% ในขณะเดียวกัน Reddy and Rhim (2014) รายงานว่าการเติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสจากเยื่อปอสาในฟิล์มเอการ์ ทำให้การยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงปริมาณเส้นใยเท่ากับ 5% แต่หากเติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสในปริมาณมากกว่า 5% จะทำให้การยึดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลง

#### 4.1.3 ความโปร่งแสง

รูปที่ 4.4 แสดงความโปร่งแสงของตัวอย่างฟิล์มในรูปร้อยละของแสงส่องผ่านจากการทดลองพบว่าชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยมีผลค่อนข้างน้อยต่อความโปร่งแสงของฟิล์ม ในขณะที่ปริมาณของเส้นใยมีผลต่อความโปร่งแสง โดยฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีค่าร้อยละของแสงส่องผ่านต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น ร้อยละของแสงส่องผ่านมีค่าลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเป็นเส้นใยที่ไม่ละลายน้ำ จึงแขวนลอยอยู่ในเนื้อฟิล์มและมีผลขัดขวางแสงที่ส่องผ่านฟิล์ม (Reddy and Rhim, 2014)

Bilbao-Sainz et al. (2011) ศึกษาผลของการเสริมเส้นใยจากเซลลูโลสต่อความโปร่งแสงของฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลส ชนิดเส้นใยที่ใช้ ได้แก่เส้นใยนาโนเซลลูโลส (NFC) เส้นใยนาโนเซลลูโลสตัดแปร (NFCT) และนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลส (NCC) พบว่าชนิดและปริมาณของเส้นใยมีผลต่อร้อยละของแสงส่องผ่าน เมื่อปริมาณเส้นใยจากเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ฟิล์มมีความโปร่งแสงลดลง และฟิล์มที่เติม NFC หรือ NFCT มีความโปร่งแสงต่ำกว่าฟิล์มที่เติม NCC ที่ความเข้มข้นเดียวกันผู้วิจัยอธิบายว่าเนื่องจาก NCC มีการกระจายตัวในฟิล์มไฮดรอกซีโพรพิลเมทิลเซลลูโลสที่ต่ำกว่า NFC และ NFCT จึงทำให้ฟิล์มมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและมีความโปร่งแสงสูง



รูปที่ 4.4 ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

Reddy and Rhim (2014) รายงานว่าการเติมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสจากเยื่อปอสาในฟิล์มเอการ์ โดยแปรปริมาณนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสเป็น 1, 3, 5 และ 10% ทำให้ร้อยละของแสงส่องผ่านมีค่าลดลงเมื่อปริมาณนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

Stepan et al. (2014) พัฒนาฟิล์มอะเซททิเลเตด อะราบินโนไซแลน (acetylated arabinoxylan) เสริมนาโนเซลลูโลส โดยแปรปริมาณนาโนเซลลูโลสเป็น 1, 3, 5 และ 10% พบว่าฟิล์มมีความโปร่งแสงลดลงเมื่อปริมาณนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน Fernandes et al. (2010) รายงานว่าฟิล์มไคโตซานเสริมนาโนเซลลูโลสมีร้อยละของแสงส่องผ่านลดลงเมื่อปริมาณนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

#### 4.1.4 ค่าสี

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสีในระบบ CIELAB ของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส พบว่าฟิล์มที่เติมเส้นใยมี  $L^*$  ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) และ  $L^*$  มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปพบว่าชนิดของเส้นใยไม่มี

ผลต่อ  $L^*$  ในขณะที่ขนาดอนุภาคมีผลต่อความสว่างโดยฟิล์มที่เติมเส้นใยที่มีขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตรมี  $L^*$  ต่ำกว่าฟิล์มที่เติมเส้นใยที่มีขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตรเล็กน้อย

สำหรับ  $a^*$  พบว่าตัวอย่างที่เติมเส้นใยมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) และฟิล์มที่เติมเซลลูโลสมี  $a^*$  สูงกว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส นอกจากนี้ขนาดอนุภาคของเส้นใยก็มีผลต่อ  $a^*$  โดยฟิล์มที่เติมเส้นใยขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตรมี  $a^*$  สูงกว่าฟิล์มที่เติมเส้นใยขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร และ  $a^*$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น

สำหรับ  $b^*$  โดยทั่วไปพบว่าตัวอย่างที่เติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีค่า  $b^*$  สูงกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ในขณะที่ชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยไม่มีผลต่อ  $b^*$  อย่างไรก็ตามพบว่า  $b^*$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงมุมสีและความเข้มสีของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส พบว่าทุกตัวอย่างรวมทั้งตัวอย่างควบคุมมีมุมสีประมาณ 90 องศา ซึ่งเป็นค่ามุมของสีเหลือง (Sule, 1997) การเติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้มุมสีเข้าใกล้ 90 องศามากขึ้น สำหรับความเข้มสี พบว่าชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยไม่มีผลต่อความเข้มตัวสี ( $p > 0.05$ ) ในขณะที่ความเข้มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น

Pereira et al. (2014) ศึกษาผลของการเติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พบว่าเมื่อปริมาณนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ความสว่างมีค่าลดลง ในขณะที่มุมสีมีค่าเข้าใกล้มุมของสีเหลืองมากขึ้น และความเข้มสีมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ค่าสีของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	$L^*$	$a^*$	$b^*$
Control	0	89.02 <sup>a</sup> ± 0.03	-0.77 <sup>j</sup> ± 0.00	13.83 <sup>e</sup> ± 0.15
C20	5	88.51 <sup>b</sup> ± 0.11	-0.55 <sup>gh</sup> ± 0.03	13.71 <sup>de</sup> ± 0.21
	10	87.86 <sup>cd</sup> ± 0.24	-0.43 <sup>ef</sup> ± 0.04	14.83 <sup>cd</sup> ± 0.39
	15	86.65 <sup>g</sup> ± 0.23	-0.07 <sup>b</sup> ± 0.03	16.23 <sup>a</sup> ± 0.32
C50	5	87.82 <sup>cd</sup> ± 0.09	-0.39 <sup>f</sup> ± 0.02	14.29 <sup>de</sup> ± 0.32
	10	87.78 <sup>d</sup> ± 0.14	-0.22 <sup>d</sup> ± 0.02	14.74 <sup>cd</sup> ± 0.18
	15	85.92 <sup>h</sup> ± 0.11	0.07 <sup>a</sup> ± 0.02	15.63 <sup>ab</sup> ± 0.13
MC20	5	88.21 <sup>bc</sup> ± 0.15	-0.70 <sup>i</sup> ± 0.02	14.89 <sup>cd</sup> ± 0.25
	10	87.92 <sup>cd</sup> ± 0.09	-0.49 <sup>fg</sup> ± 0.01	15.18 <sup>bc</sup> ± 0.17
	15	87.10 <sup>ef</sup> ± 0.07	-0.27 <sup>d</sup> ± 0.00	16.36 <sup>a</sup> ± 0.14
MC50	5	88.16 <sup>cd</sup> ± 0.02	-0.59 <sup>h</sup> ± 0.01	14.83 <sup>cd</sup> ± 0.01
	10	87.32 <sup>e</sup> ± 0.07	-0.39 <sup>e</sup> ± 0.01	15.79 <sup>abc</sup> ± 0.14
	15	86.83 <sup>fg</sup> ± 0.11	-0.14 <sup>c</sup> ± 0.04	16.14 <sup>a</sup> ± 0.31

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.2 มุมสีและความเข้มสีของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	มุมสี (องศา)	ความเข้มสี
Control	0	86.83 <sup>f</sup> ± 0.03	13.85 <sup>e</sup> ± 0.15
C20	5	87.69 <sup>e</sup> ± 0.15	13.72 <sup>de</sup> ± 0.21
	10	88.33 <sup>cd</sup> ± 0.17	14.84 <sup>cd</sup> ± 0.39
	15	89.74 <sup>a</sup> ± 0.09	16.23 <sup>a</sup> ± 0.32
C50	5	88.42 <sup>d</sup> ± 0.06	14.30 <sup>de</sup> ± 0.32
	10	89.14 <sup>c</sup> ± 0.05	14.74 <sup>cd</sup> ± 0.18
	15	89.75 <sup>a</sup> ± 0.06	15.63 <sup>ab</sup> ± 0.13
MC20	5	87.32 <sup>e</sup> ± 0.10	14.90 <sup>cd</sup> ± 0.25
	10	88.15 <sup>d</sup> ± 0.07	15.19 <sup>bc</sup> ± 0.17
	15	89.05 <sup>a</sup> ± 0.02	16.36 <sup>a</sup> ± 0.14
MC50	5	87.71 <sup>e</sup> ± 0.06	14.84 <sup>cd</sup> ± 0.01
	10	88.58 <sup>c</sup> ± 0.03	15.79 <sup>abc</sup> ± 0.14
	15	89.50 <sup>a</sup> ± 0.14	16.14 <sup>a</sup> ± 0.31

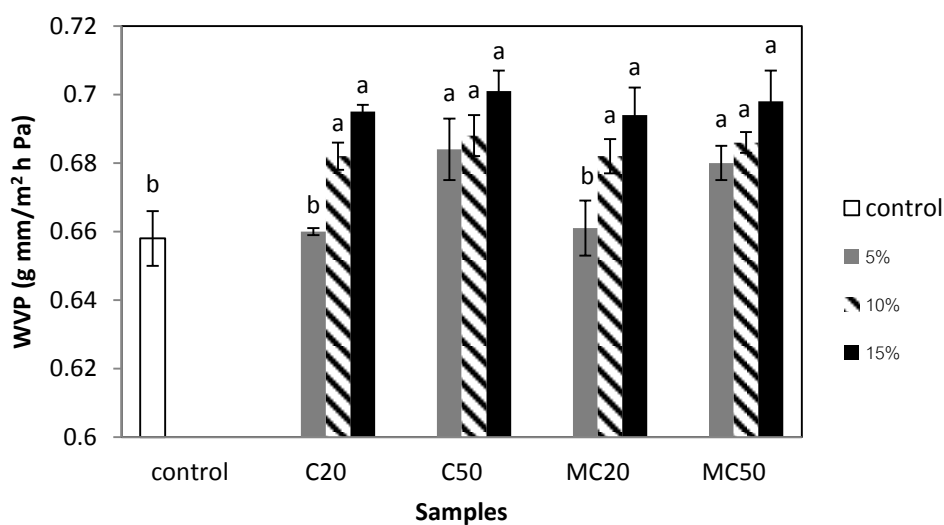
ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

( $p \leq 0.05$ )

#### 4.1.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ

รูปที่ 4.5 แสดงสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสโดยทั่วไปพบว่าฟิล์มที่เสริมเส้นใยมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ยกเว้นตัวอย่างที่เติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 5% อย่างไรก็ตามพบว่าชนิดขนาดอนุภาค และปริมาณของเส้นใยไม่มีผลต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์ม สาเหตุที่ฟิล์มที่เสริมเส้นใยมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงขึ้นอาจเนื่องมาจากการเกิดการรวมตัวกันของเส้นใย ทำให้ฟิล์มมีโครงสร้างที่ไม่สม่ำเสมอ (inhomogeneous) ไอน้ำจึงเคลื่อนที่ผ่านได้ง่ายขึ้น (Reddy and Rhim, 2014)



รูปที่ 4.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

Ma et al. (2008) ศึกษาผลการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มสตาร์ชถั่วพี (pea starch) แปรปริมาณเส้นใยเป็น 3, 6, 9 และ 12% พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นในช่วง 3-9% ฟิล์มที่ได้มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำลดลง แต่เมื่อ

ปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้นสูงกว่า 9% สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำกลับมีค่าสูงขึ้น ผู้วิจัยเสนอว่าการเติมเส้นใยในปริมาณต่ำทำให้เกิดช่องทางที่คดเคี้ยว (tortuous path) ภายในเนื้อฟิล์ม ไอน้ำจึงเคลื่อนที่ผ่านได้ในอัตราที่ช้าลง ในขณะที่การเติมเส้นใยในปริมาณที่สูงอาจทำให้เกิดการรวมตัวกันของเส้นใย ส่งผลให้สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น

เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Reddy and Rhim (2014) ซึ่งศึกษาสมบัติของฟิล์มเอคาร์ทีเติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสจากเยื่อปอสาในปริมาณ 1, 3, 5 และ 10% พบว่าตัวอย่างควบคุมมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเท่ากับ  $2.11 \times 10^{-9}$  กรัม เมตร/ตารางเมตร พาสคาล วินาที เมื่อปริมาณนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นในช่วง 1-3% สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำมีค่าลดลง โดยตัวอย่างที่เติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสปริมาณ 3% มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำต่ำที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ  $1.63 \times 10^{-9}$  กรัม เมตร/ตารางเมตร พาสคาล วินาทีเมื่อปริมาณนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นสูงกว่า 3% สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยอธิบายว่าการเติมนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสในปริมาณต่ำจะทำให้นาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อฟิล์ม ซึ่งจะช่วยเพิ่มความคดเคี้ยวและระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านของไอน้ำ แต่เมื่อปริมาณนาโนคริสตัลลีนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดการรวมตัวกันของเส้นใย

นอกจากนี้ Abdulkhani et al. (2014) ศึกษาการเสริมนาโนเซลลูโลสในฟิล์มพอลิแลกติกแอซิดในปริมาณ 1, 3 และ 5% และรายงานว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่เติมนาโนเซลลูโลสมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเท่ากับ  $1.87 \times 10^{-11}$  กรัม เมตร/ตารางเมตร พาสคาล วินาที และเมื่อเติมนาโนเซลลูโลส ฟิล์มที่ได้มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มที่เติมนาโนเซลลูโลสปริมาณ 5% มีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำเพิ่มจากตัวอย่างควบคุมถึง 38.5%

#### 4.1.6 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์ม

มุมสัมผัส คือมุมระหว่างหยดน้ำวัดเทียบกับผิวของแข็ง ณ จุดที่ผิวทั้งสองสัมผัสกัน (Kwok and Neumann, 1999) มุมสัมผัสเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการเปียก (wettability) หรือความชอบน้ำ (hydrophilicity) ของพื้นผิวถ้าพื้นผิววัสดุมีสมบัติชอบน้ำจะทำให้มุมสัมผัสมีค่าต่ำ เนื่องจากหยดน้ำจะสามารถแผ่ขยาย (spread) และมีพื้นที่สัมผัสกับพื้นผิววัสดุมาก ในทางกลับกัน หากพื้นผิววัสดุมีสมบัติไม่ชอบน้ำ หยดน้ำนั้นจะไม่แผ่ขยายเพื่อลดพื้นที่สัมผัสกับพื้นผิววัสดุ จึงสามารถคงลักษณะเป็นหยดไว้ได้และทำให้มุมสัมผัสมีค่าสูง (Förch, 2009)

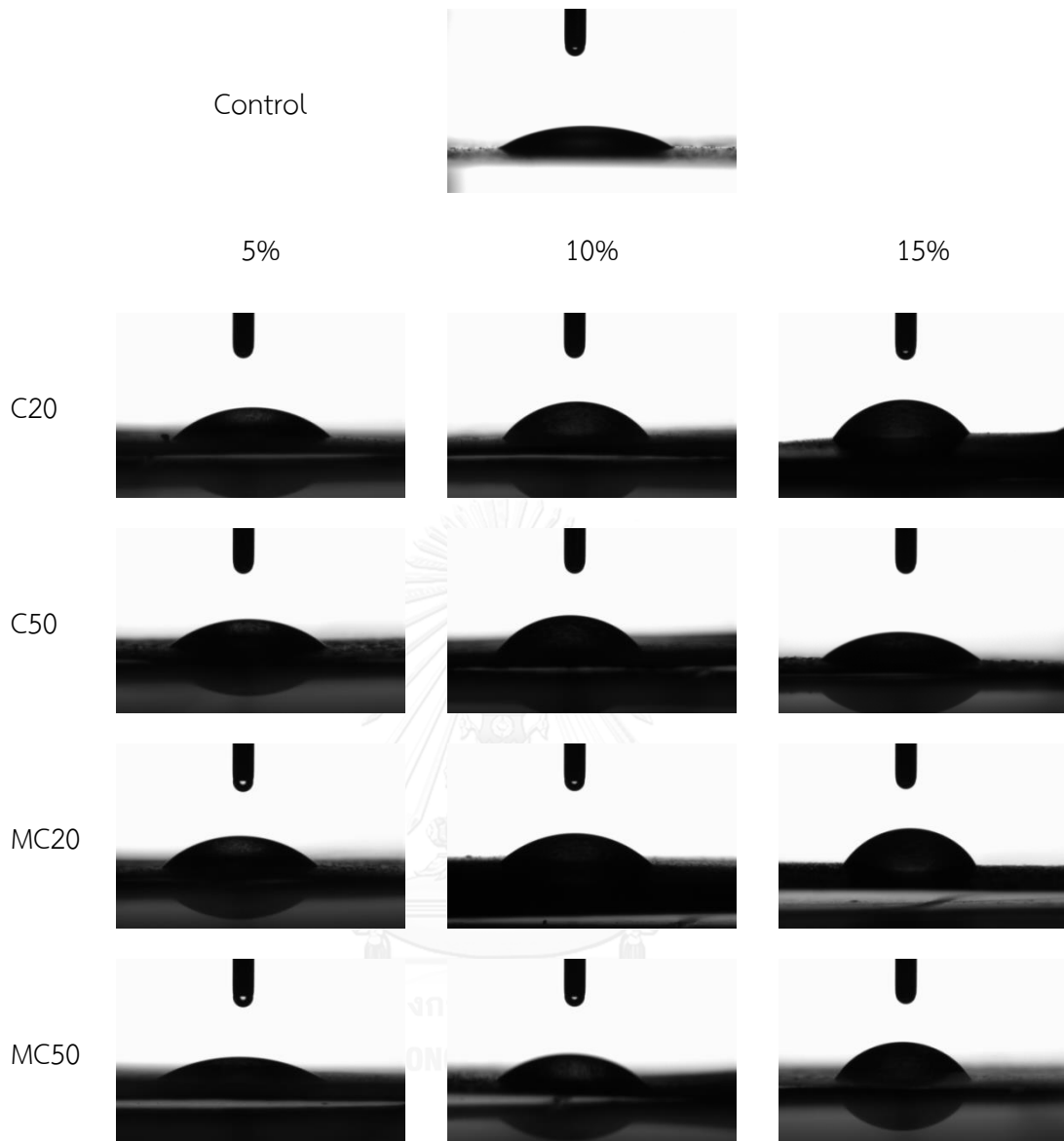
ภาพถ่ายของมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.6 และค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มแสดงดังรูปที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่าการเติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีผลต่อมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองโดยตัวอย่างควบคุมมีมุมสัมผัสเท่ากับ 30.84 องศา โดยทั่วไปฟิล์มที่เติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส ปริมาณ 5% มีมุมสัมผัสใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม แต่การเติมเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสในปริมาณ 10 และ 15% ทำให้มุมสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ในปริมาณ 15% มีมุมสัมผัสเพิ่มสูงเป็น 54.98 และ 54.94 องศา ตามลำดับ ค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากการเติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระ (rough) มากขึ้น Herrara et al. (2014) รายงานว่าความขรุขระของพื้นผิวส่งผลให้มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำและพื้นผิวของวัสดุมีค่าสูง

Förch et al. (2009) จำแนกประเภทของพื้นผิวตามสมบัติความชอบน้ำหรือไม่ชอบน้ำ โดยระบุว่าพื้นผิวที่มีมุมสัมผัสระหว่าง 0 ถึง 90 องศา จัดว่าพื้นผิวนั้นมีสมบัติชอบน้ำ หากมุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 90 องศา จัดว่าพื้นผิวนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามุมสัมผัสมีค่ามากกว่า 150 องศา จัดว่าพื้นผิวนั้นมีสมบัติไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวด (superhydrophobic surface)

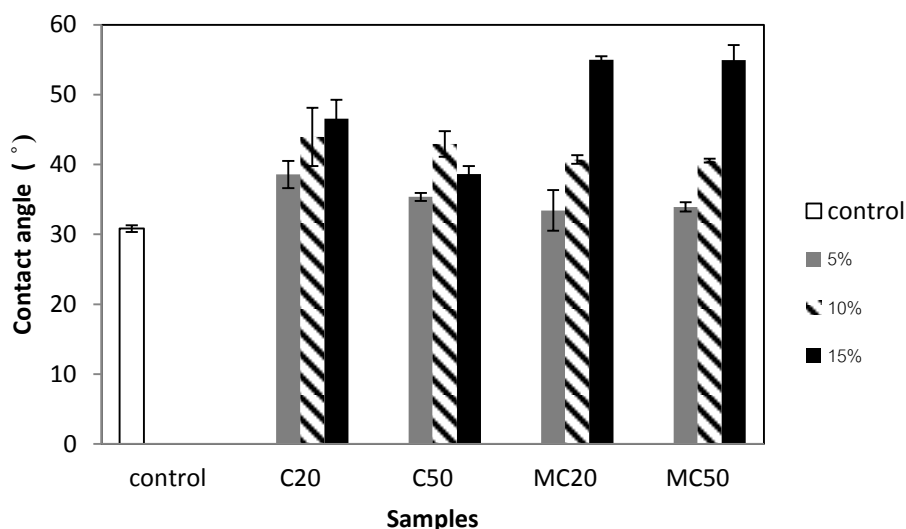


จากการทดลองนี้พบว่าฟิล์มทุกตัวอย่างมีมุมสัมผัสต่ำกว่า 90 องศา จึงจัดว่าฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองทั้งที่เสริมและไม่เสริมเส้นใยมีพื้นผิวที่ชอบน้ำ ทั้งนี้อาจเนื่องจากในระบบของฟิล์มที่ผลิตในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยโพรตีนถั่วเหลืองกลีเซอรอล และเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสซึ่งทั้งหมดเป็นโมเลกุลที่มีความชอบน้ำสูง Su et al. (2010) ศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัด พบว่าเมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น มุมสัมผัสมีค่าลดลง

อย่างไรก็ตามมีบางงานวิจัยที่รายงานแตกต่างออกไป เช่น Reddy and Rhim (2014) รายงานว่าการเติมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสจากเยื่อปอสาในฟิล์มเอการ์ทำให้มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยฟิล์มตัวอย่างควบคุมมีมุมสัมผัสเท่ากับ 52.3 องศา และเมื่อเติมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสปริมาณ 10% ฟิล์มที่ได้มีมุมสัมผัสเท่ากับ 44.4 องศา ผู้วิจัยอธิบายว่าสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสมีสมบัติชอบน้ำมากกว่าเอการ์



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายของมุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%



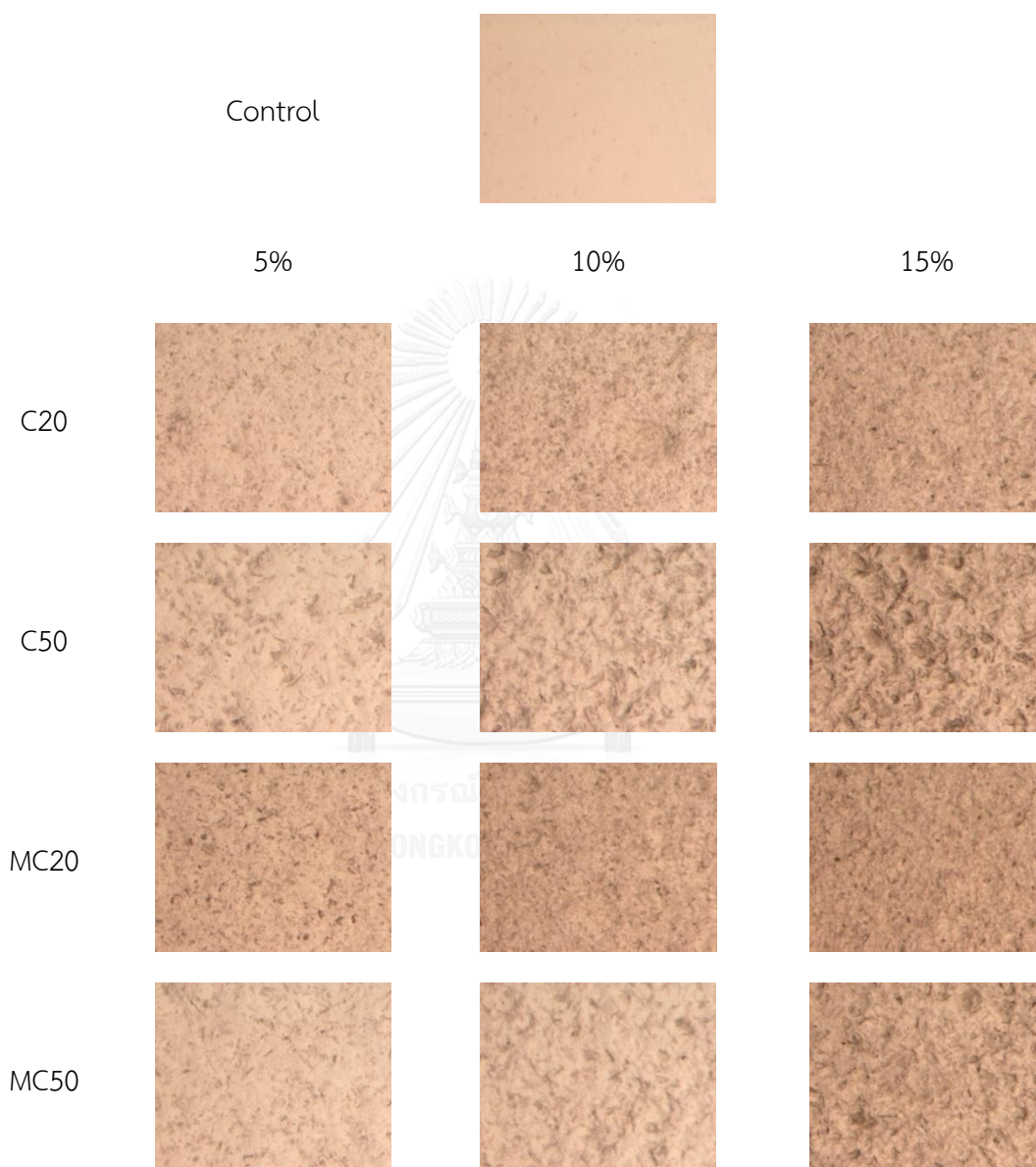
รูปที่ 4.7 มุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

#### 4.1.7 ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์ม

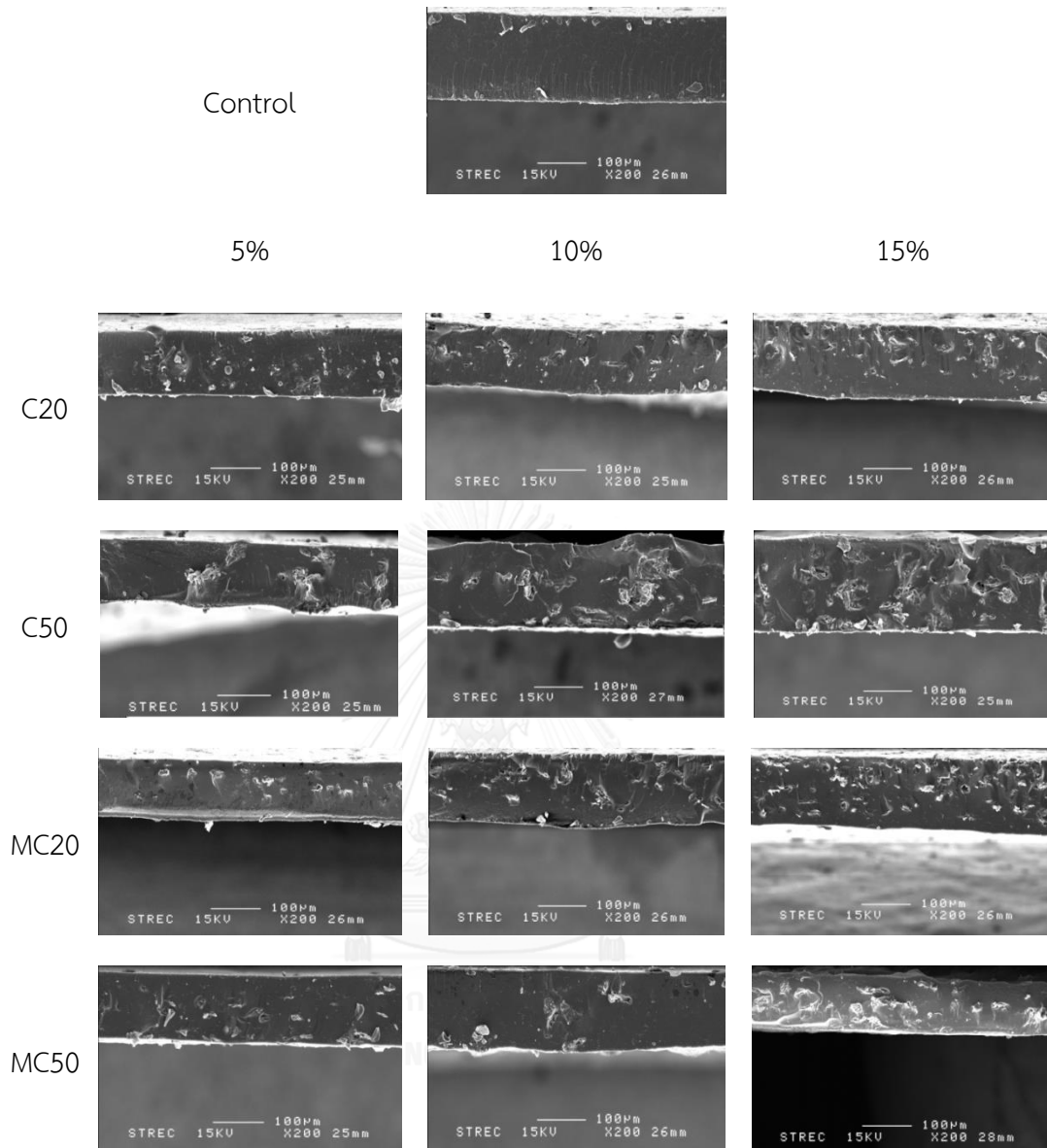
ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดเสริมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสแสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวอย่างควบคุมมีลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางที่เรียบ แน่น เป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อเติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ลักษณะพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มจะมีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลง พื้นผิวมีลักษณะที่ขรุขระ (รูปที่ 4.8) ส่วนภาคตัดขวางจะเห็นเส้นใยในเนื้อฟิล์ม (รูปที่ 4.9) โดยลักษณะดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเส้นใยมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นหรือปริมาณเส้นใยเพิ่มมากขึ้น

Teixeira et al. (2009) ศึกษาลักษณะของเทอร์โมพลาสติกที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่เสริมด้วยเส้นใยนาโนจากกากมันสำปะหลัง พบว่าพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกที่เสริมด้วยเส้นใยมีลักษณะขรุขระมากกว่าตัวอย่างควบคุม และปรากฏเส้นใยกระจายทั่วไปในเนื้อเทอร์โมพลาสติก ส่วน Ma et al. (2008) ศึกษาผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสต่อสมบัติของฟิล์มสตาร์ชถั่วพี พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยมากขึ้น พื้นผิวจะมีความขรุขระมาก

ขึ้นซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของเส้นใย และ Khan et al. (2012) พบว่าฟิล์มไคโตซานที่เติมเส้นใย เซลลูโลสมีลักษณะที่ขรุขระมากขึ้น มีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลง และสามารถสังเกตเห็นเส้นใย เซลลูโลสในเนื้อฟิล์ม



รูปที่ 4.8 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลิน เซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15% ที่กำลังขยาย 40 เท่า



รูปที่ 4.9 ลักษณะภาคตัดขวางของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15% ที่กำลังขยาย 200 เท่า

#### 4.2 ผลของเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสต่อเสถียรภาพของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัด

การวิจัยในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาผลของการเติมเส้นใยจากเซลลูโลสต่อเสถียรภาพของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยแปรชนิดของเส้นใยเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลส (C) และไมโครคริสตัลลีน

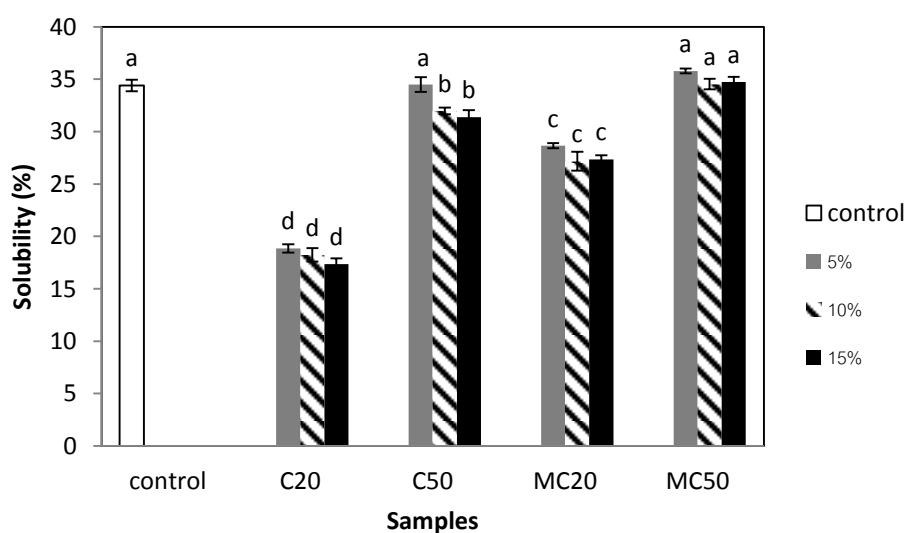
เซลลูโลส (MC) แปรขนาดอนุภาคของเส้นใยเป็น 2 ระดับ ได้แก่ 20 และ 50 ไมโครเมตร และแปรปริมาณของเส้นใยเป็น 3 ระดับ ได้แก่ 5, 10 และ 15% โดยน้ำหนักของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

#### 4.2.1 ความสามารถในการละลายน้ำ

ความสามารถในการละลายน้ำของตัวอย่างฟิล์มแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าการเติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีผลทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการละลายน้ำลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ( $p \leq 0.05$ ) ยกเว้นฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำไม่ต่างจากตัวอย่างควบคุม ( $p > 0.05$ ) ความสามารถในการละลายน้ำที่ลดต่ำลงนี้อาจเนื่องมาจากการที่เซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเองไม่ละลายน้ำ นอกจากนี้การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ที่ชอบน้ำของโปรตีนและเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสทำให้ปริมาณหมู่เคมีที่ชอบน้ำมีจำนวนลดลง ประกอบกับพลังงานการยึดเกาะกันในเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้น จึงทำให้ฟิล์มละลายน้ำได้ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มที่เติมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร พบว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร ในทำนองเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร พบว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร การที่ฟิล์มที่เติมเส้นใยที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ามีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่า อาจเนื่องมาจากการที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยเซลลูโลสกับโปรตีนสามารถเกิดขึ้นได้มากกว่า และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดของเส้นใยที่ขนาดอนุภาคเท่ากัน พบว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีความเฉื่อยทางเคมีมากกว่าจึงเกิดอันตรกิริยากับโปรตีนได้น้อยกว่า

Pereda et al. (2014) ศึกษาผลของการเติมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสในฟิล์มไคโตซาน พบว่าการเติมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มไคโตซานลดลง ผู้วิจัยอธิบายว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นพันธะไฮโดรเจนหรืออันตรกิริยา ไอออนิกส่งผลให้พลังงานการยึดเกาะกันในเนื้อฟิล์มเพิ่มขึ้นในทำนองเดียวกัน Rafierian et al. (2014) รายงานว่าการเติมคาร์บอกซีเลเตดเซลลูโลสนาโนคริสตัล (carboxylated cellulose nanocrystal) ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มกลูเตนมีค่าลดลง



รูปที่ 4.10 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

#### 4.2.2 พฤติกรรมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์

##### กับวอเตอร์แอกทิวิตี

สมบัติของตัวอย่างฟิล์มที่รายงานมาข้างต้นเป็นสมบัติของฟิล์มที่ทำให้อยู่ในสมดุลกับภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50% อย่างไรก็ตามในการนำมาใช้งาน ฟิล์มอาจเผชิญภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์แตกต่างกันไป ซึ่งฟิล์มจะมีการถ่ายเทความชื้นกับบรรยากาศแวดล้อมและวอเตอร์แอกทิวิตีที่

เปลี่ยนแปลงไปอาจส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์ม ในการทดลองนี้จึงติดตามพฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส รวมทั้งวิเคราะห์สมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไป

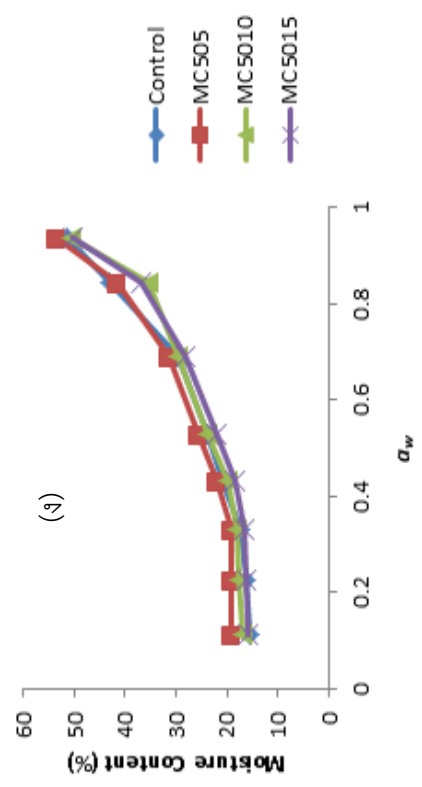
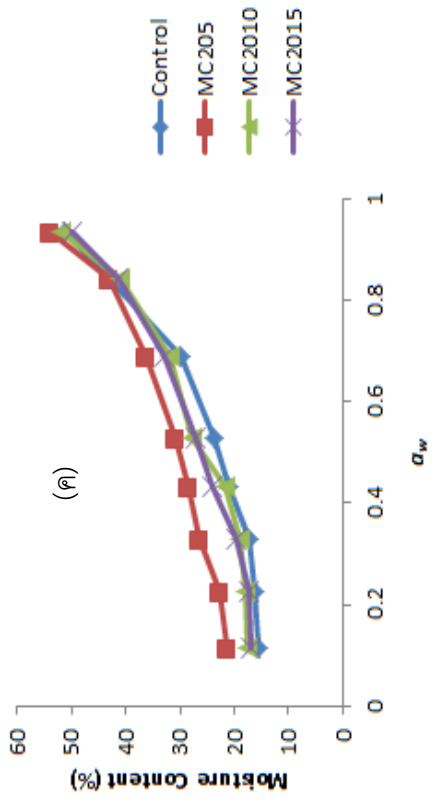
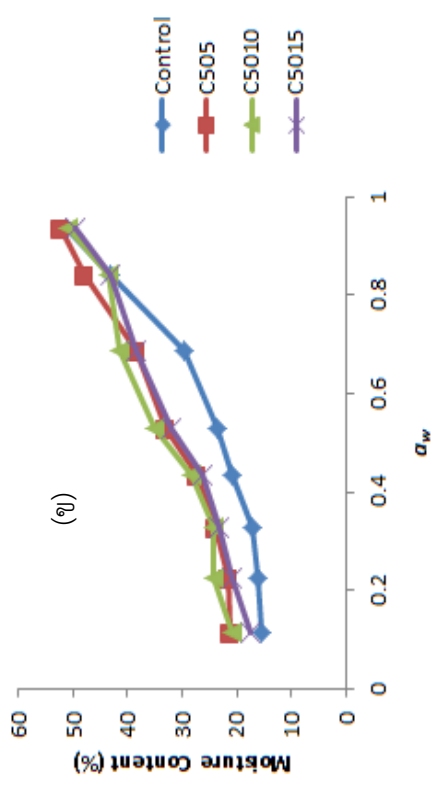
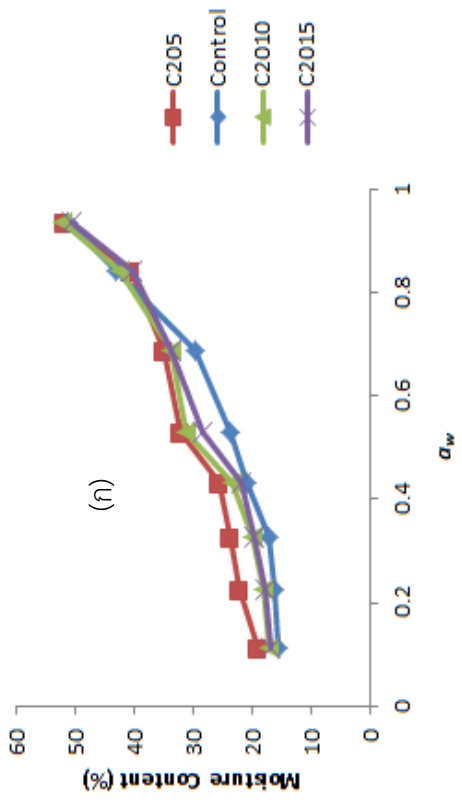
รูปที่ 4.11 แสดงเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองที่เติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส ที่อุณหภูมิคงที่ 25 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีรูปแบบของเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นที่ใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้รูปแบบของเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นขึ้นอยู่กับโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของระบบ (Fennema, 1996) แต่เนื่องจากฟิล์มทุกตัวอย่างในการทดลองนี้มีโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบเหมือนกัน คือ โพรตีน เส้นใย และกลีเซอรอล โดยทั่วไปพบว่าที่วอเตอร์แอกทิวิตีหนึ่งๆ ฟิล์มที่เสริมเส้นใยมีปริมาณความชื้นสูงกว่าตัวอย่างควบคุมเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีสมบัติชอบน้ำเป็นจำนวนมากจึงจับน้ำไว้ได้ดี

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัวถึงจุดขาดของตัวอย่างฟิล์มที่มีวอเตอร์แอกทิวิตีต่างๆ พบว่าเมื่อวอเตอร์แอกทิวิตีมีค่าสูงขึ้น ฟิล์มทุกตัวอย่างมีความต้านทานแรงดึงขาดลดลง และมีการยืดตัวถึงจุดขาดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มแต่ละตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับวอเตอร์แอกทิวิตีที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ที่วอเตอร์แอกทิวิตีเท่ากับ 0.53 ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% มีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 1.41 เมกะพาสคาล ซึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมซึ่งมีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 1.13 เมกะพาสคาล แต่เมื่อวอเตอร์แอกทิวิตีเพิ่มขึ้นเป็น 0.94 ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% กลับมีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 0.98 เมกะพาสคาล ซึ่งต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมที่มีความต้านทานแรงดึงขาดเท่ากับ 1.06 เมกะพาสคาล การศึกษาในขั้นตอนนี้ชี้ให้เห็นว่าการพิจารณานำ



ฟิล์มไปใช้กับผลิตภัณฑ์จะต้องคำนึงถึงวอเตอร์แอกทิวิตี้ของผลิตภัณฑ์ซึ่งจะส่งผลต่อวอเตอร์แอกทิวิตี้ของฟิล์มและสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย





รูปที่ 4.11 เส้นพฤติกรรมรวมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของ (ก) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลล์ulos ขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร (ข) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลล์ulos ขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร (ค) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลล์ulos ขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร และ (ง) फिल्मโปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลล์ulos ขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.3 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไม่โครคริสตลีนเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

$\alpha_w$	Control			C20			C50		
	2.26 <sup>a</sup> ± 0.03	1.77 <sup>b</sup> ± 0.03	1.49 <sup>c</sup> ± 0.02	5%		10%		15%	
				2.53 <sup>a</sup>	1.82 <sup>b</sup>	1.72 <sup>c</sup>	1.47 <sup>d</sup>	1.40 <sup>de</sup>	1.35 <sup>e</sup>
0.11	2.26 <sup>a</sup> ± 0.03	1.77 <sup>b</sup> ± 0.03	1.49 <sup>c</sup> ± 0.02	2.53 <sup>a</sup> ± 0.05	1.92 <sup>a</sup> ± 0.01	1.94 <sup>b</sup> ± 0.03	2.23 <sup>a</sup> ± 0.03	2.22 <sup>a</sup> ± 0.02	1.85 <sup>a</sup> ± 0.02
0.22	1.77 <sup>b</sup> ± 0.03	1.49 <sup>c</sup> ± 0.02	1.39 <sup>d</sup> ± 0.01	1.82 <sup>b</sup> ± 0.04	1.93 <sup>a</sup> ± 0.01	2.14 <sup>a</sup> ± 0.01	1.86 <sup>b</sup> ± 0.01	1.89 <sup>b</sup> ± 0.03	1.92 <sup>a</sup> ± 0.02
0.33	1.49 <sup>c</sup> ± 0.02	1.39 <sup>d</sup> ± 0.01	1.13 <sup>e</sup> ± 0.02	1.72 <sup>c</sup> ± 0.02	1.61 <sup>b</sup> ± 0.02	1.30 <sup>c</sup> ± 0.02	1.74 <sup>c</sup> ± 0.01	1.68 <sup>c</sup> ± 0.01	1.50 <sup>b</sup> ± 0.05
0.43	1.39 <sup>d</sup> ± 0.01	1.13 <sup>e</sup> ± 0.02	1.06 <sup>f</sup> ± 0.03	1.47 <sup>d</sup> ± 0.06	1.38 <sup>c</sup> ± 0.04	1.32 <sup>c</sup> ± 0.04	1.53 <sup>d</sup> ± 0.02	1.51 <sup>d</sup> ± 0.03	1.42 <sup>bc</sup> ± 0.03
0.53	1.13 <sup>e</sup> ± 0.02	1.06 <sup>f</sup> ± 0.03	0.99 <sup>e</sup> ± 0.02	1.40 <sup>de</sup> ± 0.01	1.32 <sup>d</sup> ± 0.01	1.11 <sup>d</sup> ± 0.02	1.52 <sup>d</sup> ± 0.01	1.35 <sup>e</sup> ± 0.02	1.34 <sup>c</sup> ± 0.05
0.69	1.13 <sup>ef</sup> ± 0.00	0.99 <sup>e</sup> ± 0.02	0.92 <sup>f</sup> ± 0.03	1.35 <sup>e</sup> ± 0.02	1.22 <sup>e</sup> ± 0.01	1.11 <sup>d</sup> ± 0.01	1.42 <sup>e</sup> ± 0.01	1.30 <sup>e</sup> ± 0.01	1.14 <sup>d</sup> ± 0.01
0.84	1.13 <sup>ef</sup> ± 0.02	0.92 <sup>f</sup> ± 0.03	0.84 <sup>f</sup> ± 0.03	1.16 <sup>f</sup> ± 0.02	0.98 <sup>f</sup> ± 0.03	0.97 <sup>e</sup> ± 0.01	1.03 <sup>f</sup> ± 0.01	0.98 <sup>f</sup> ± 0.01	0.99 <sup>e</sup> ± 0.02
0.94	1.06 <sup>f</sup> ± 0.03	0.84 <sup>f</sup> ± 0.03	0.78 <sup>f</sup> ± 0.03	0.96 <sup>s</sup> ± 0.04	0.96 <sup>f</sup> ± 0.00	0.88 <sup>f</sup> ± 0.02	0.85 <sup>s</sup> ± 0.02	0.85 <sup>s</sup> ± 0.02	0.84 <sup>f</sup> ± 0.03

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

$a_w$	MC20			MC50		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
0.11	1.61 <sup>a</sup> ± 0.02	1.52 <sup>a</sup> ± 0.02	1.56 <sup>a</sup> ± 0.04	2.00 <sup>a</sup> ± 0.03	1.70 <sup>a</sup> ± 0.01	1.67 <sup>a</sup> ± 0.05
0.22	1.62 <sup>a</sup> ± 0.03	1.55 <sup>a</sup> ± 0.02	1.53 <sup>a</sup> ± 0.02	1.78 <sup>b</sup> ± 0.02	1.46 <sup>b</sup> ± 0.02	1.34 <sup>b</sup> ± 0.01
0.33	1.60 <sup>a</sup> ± 0.02	1.56 <sup>a</sup> ± 0.01	1.57 <sup>a</sup> ± 0.04	1.45 <sup>c</sup> ± 0.03	1.38 <sup>c</sup> ± 0.03	1.33 <sup>b</sup> ± 0.01
0.43	1.60 <sup>a</sup> ± 0.01	1.44 <sup>b</sup> ± 0.05	1.44 <sup>b</sup> ± 0.02	1.34 <sup>d</sup> ± 0.04	1.31 <sup>c</sup> ± 0.05	1.21 <sup>c</sup> ± 0.02
0.53	1.26 <sup>b</sup> ± 0.03	1.31 <sup>c</sup> ± 0.02	1.41 <sup>bc</sup> ± 0.01	1.23 <sup>e</sup> ± 0.03	1.17 <sup>d</sup> ± 0.01	1.14 <sup>d</sup> ± 0.03
0.69	1.16 <sup>c</sup> ± 0.01	1.32 <sup>c</sup> ± 0.01	1.34 <sup>c</sup> ± 0.02	1.19 <sup>ef</sup> ± 0.02	1.13 <sup>d</sup> ± 0.00	1.14 <sup>d</sup> ± 0.02
0.84	1.13 <sup>cd</sup> ± 0.01	1.14 <sup>d</sup> ± 0.01	1.12 <sup>d</sup> ± 0.03	1.19 <sup>ef</sup> ± 0.02	1.00 <sup>e</sup> ± 0.05	0.93 <sup>e</sup> ± 0.02
0.94	1.10 <sup>d</sup> ± 0.02	1.06 <sup>e</sup> ± 0.03	0.98 <sup>e</sup> ± 0.03	1.15 <sup>f</sup> ± 0.01	0.89 <sup>f</sup> ± 0.05	0.88 <sup>e</sup> ± 0.00

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยในสตรมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ 4.4 การยืตัวถึงจุดขาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไม่โครริสตีลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

$\alpha_w$	Control	C20			C50		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%
0.11	218.72 <sup>c</sup> ± 2.44	187.11 <sup>e</sup> ± 3.57	112.03 <sup>e</sup> ± 5.28	25.19 <sup>c</sup> ± 0.99	151.18 <sup>e</sup> ± 4.09	35.82 <sup>f</sup> ± 1.26	22.89 <sup>f</sup> ± 0.49
0.22	217.60 <sup>c</sup> ± 5.71	191.69 <sup>e</sup> ± 4.19	136.91 <sup>d</sup> ± 3.92	24.84 <sup>c</sup> ± 0.67	163.15 <sup>d</sup> ± 2.92	67.96 <sup>e</sup> ± 2.35	29.55 <sup>f</sup> ± 1.44
0.33	250.84 <sup>b</sup> ± 2.84	213.03 <sup>d</sup> ± 1.91	192.54 <sup>c</sup> ± 3.66	146.86 <sup>b</sup> ± 2.25	164.71 <sup>d</sup> ± 1.74	132.68 <sup>d</sup> ± 2.97	50.19 <sup>e</sup> ± 2.82
0.43	251.94 <sup>b</sup> ± 2.92	221.79 <sup>c</sup> ± 2.02	196.11 <sup>c</sup> ± 2.88	147.14 <sup>b</sup> ± 3.94	180.54 <sup>c</sup> ± 2.60	155.86 <sup>c</sup> ± 4.95	123.59 <sup>d</sup> ± 3.18
0.53	246.39 <sup>b</sup> ± 2.82	233.14 <sup>b</sup> ± 3.03	213.83 <sup>b</sup> ± 6.62	151.22 <sup>b</sup> ± 4.51	205.01 <sup>b</sup> ± 2.22	173.41 <sup>b</sup> ± 1.22	153.64 <sup>c</sup> ± 3.32
0.69	257.12 <sup>ab</sup> ± 2.64	250.73 <sup>b</sup> ± 1.85	232.87 <sup>b</sup> ± 2.84	173.44 <sup>a</sup> ± 1.17	209.69 <sup>b</sup> ± 5.22	173.72 <sup>b</sup> ± 3.04	162.33 <sup>b</sup> ± 2.38
0.84	265.54 <sup>a</sup> ± 5.25	250.46 <sup>b</sup> ± 0.28	233.00 <sup>b</sup> ± 2.38	179.37 <sup>a</sup> ± 0.85	210.69 <sup>b</sup> ± 3.97	179.71 <sup>b</sup> ± 1.28	167.75 <sup>ab</sup> ± 3.46
0.94	264.72 <sup>a</sup> ± 3.54	256.97 <sup>a</sup> ± 2.62	238.28 <sup>a</sup> ± 7.67	180.33 <sup>a</sup> ± 2.15	222.62 <sup>a</sup> ± 2.36	192.94 <sup>a</sup> ± 1.00	174.81 <sup>a</sup> ± 0.77

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยในสดมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

$C_w$	MC20				MC50				
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
0.11	182.81 <sup>c</sup> ± 0.30	111.09 <sup>e</sup> ± 2.60	36.33 <sup>d</sup> ± 1.35	193.88 <sup>d</sup> ± 5.60	132.36 <sup>d</sup> ± 3.05	64.89 <sup>e</sup> ± 2.64			
0.22	216.79 <sup>b</sup> ± 6.41	113.30 <sup>e</sup> ± 1.81	36.09 <sup>d</sup> ± 0.44	192.82 <sup>d</sup> ± 3.75	140.59 <sup>c</sup> ± 2.99	69.23 <sup>e</sup> ± 2.42			
0.33	236.68 <sup>a</sup> ± 5.00	156.67 <sup>d</sup> ± 2.29	128.31 <sup>c</sup> ± 1.55	199.03 <sup>cd</sup> ± 1.17	157.64 <sup>b</sup> ± 3.49	124.37 <sup>d</sup> ± 1.10			
0.43	238.22 <sup>a</sup> ± 3.65	161.95 <sup>cd</sup> ± 1.99	135.92 <sup>c</sup> ± 2.57	203.06 <sup>cd</sup> ± 2.56	159.23 <sup>b</sup> ± 2.21	149.64 <sup>c</sup> ± 4.50			
0.53	238.24 <sup>a</sup> ± 3.26	171.96 <sup>bc</sup> ± 2.74	151.72 <sup>b</sup> ± 5.09	207.05 <sup>c</sup> ± 2.58	181.59 <sup>a</sup> ± 1.54	160.29 <sup>b</sup> ± 2.39			
0.69	241.73 <sup>a</sup> ± 2.85	181.66 <sup>b</sup> ± 3.99	152.32 <sup>b</sup> ± 1.51	225.46 <sup>b</sup> ± 6.01	182.43 <sup>a</sup> ± 1.95	171.33 <sup>a</sup> ± 3.62			
0.84	240.92 <sup>a</sup> ± 2.09	180.95 <sup>b</sup> ± 7.29	159.76 <sup>b</sup> ± 3.92	226.30 <sup>b</sup> ± 0.74	187.24 <sup>a</sup> ± 3.30	172.99 <sup>a</sup> ± 1.39			
0.94	242.31 <sup>a</sup> ± 3.74	199.09 <sup>a</sup> ± 1.27	170.21 <sup>a</sup> ± 5.12	239.44 <sup>a</sup> ± 3.21	187.52 <sup>a</sup> ± 1.91	172.27 <sup>a</sup> ± 3.25			

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยในสตมภ์เดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

### 4.2.3 การสลายตัวด้วยความร้อน

การสลายตัวด้วยความร้อนของตัวอย่างฟิล์มวิเคราะห์โดยใช้ thermogravimetric analysis รูปที่ 4.12 แสดงกราฟ thermogravimetric analysis (TGA) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ส่วนรูปที่ 4.13 แสดงกราฟ derivative thermogravimetric analysis (DTG) ซึ่งแสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ และตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างที่อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้เกิดการสลายตัวด้วยความร้อนของตัวอย่าง ( $T_{max}$ )

จากการทดลองพบว่าทุกตัวอย่างมีรูปแบบการสลายตัวด้วยความร้อนที่คล้ายคลึงกัน โดยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเกิดขึ้นเป็น 3 ช่วง (รูปที่ 4.12 และ 4.13 และตารางที่ 4.5) การเปลี่ยนแปลงช่วงแรกเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักในช่วงแรกนี้เกิดจากการระเหยของน้ำ การเปลี่ยนแปลงช่วงที่สองเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 180-260 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักในช่วงนี้เกิดจากการระเหยของกลีเซอรอล ส่วนการเปลี่ยนแปลงช่วงที่สามเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 300-320 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักที่สูญเสียน้ำหนักในช่วงนี้เกิดจากการสลายตัวเนื่องจากออกซิเดชัน (oxidative decomposition) ของพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่สามนี้พบว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าตัวอย่างควบคุมเล็กน้อย (รูปที่ 4.13) ทั้งนี้เนื่องจากเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีความทนทานต่อการสลายตัวด้วยความร้อนต่ำกว่าโปรตีน (Muralidhara and Sreenivasan, 2010)

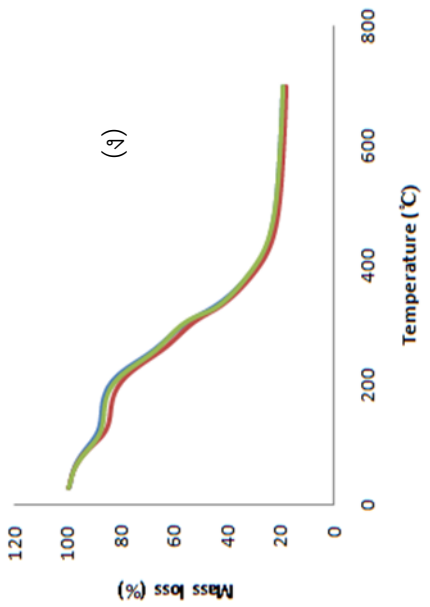
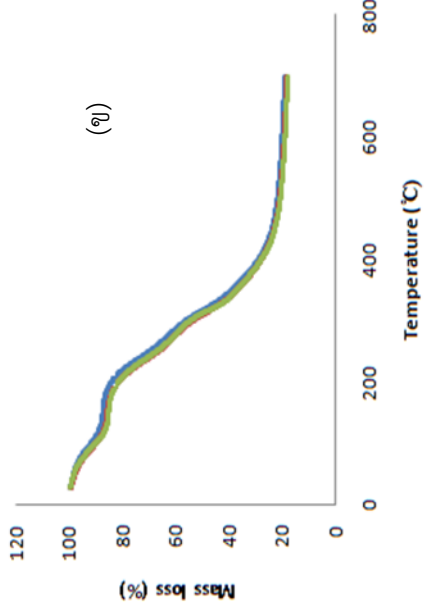
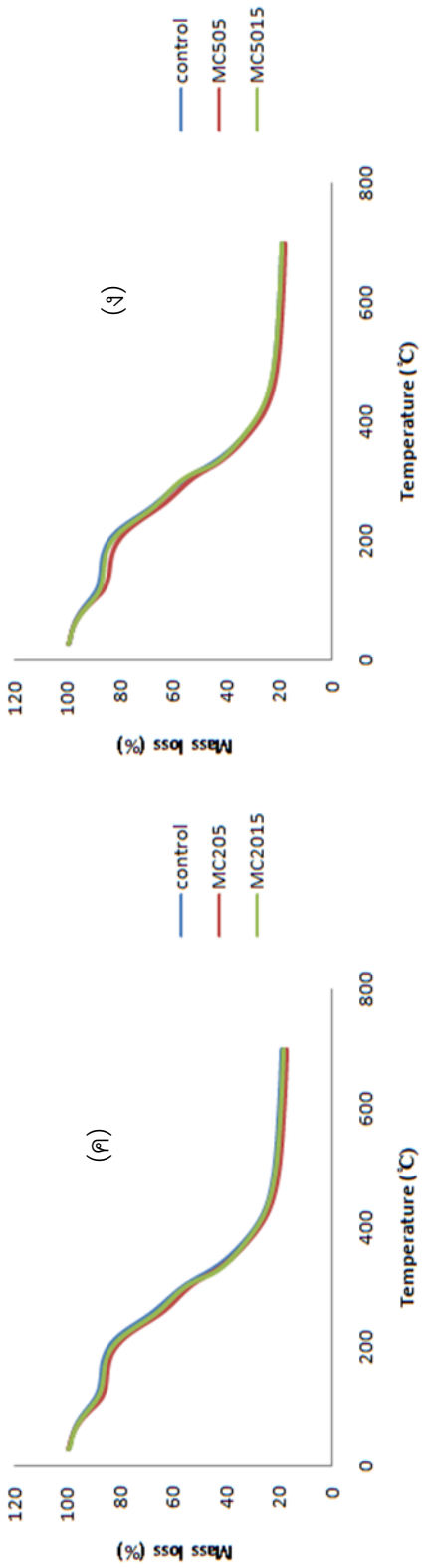
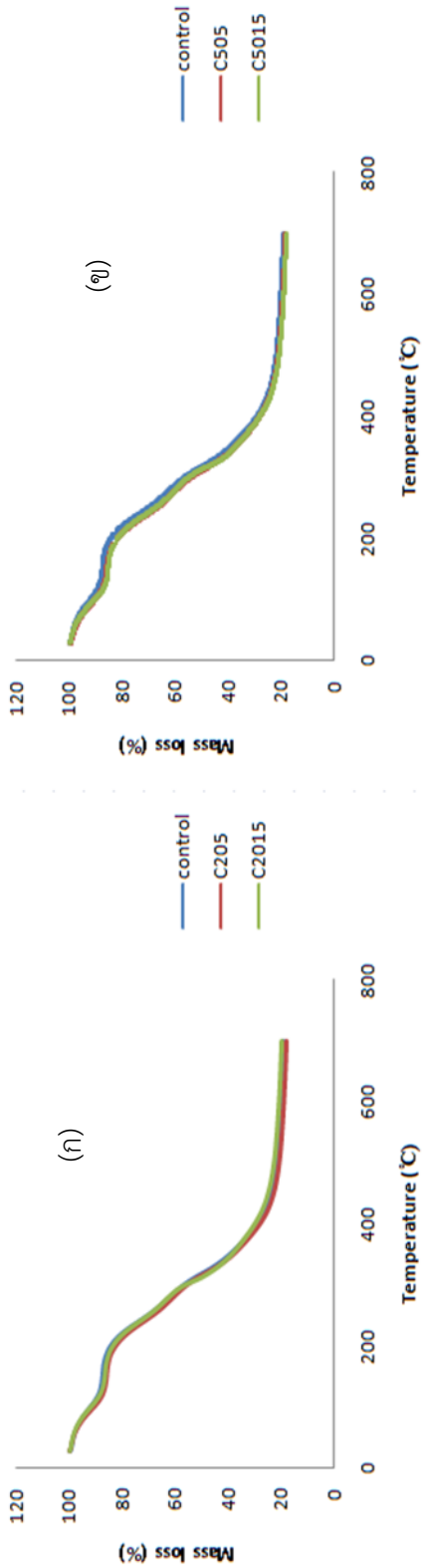
ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับ Reddy and Rhim (2014) ที่พบว่าฟิล์มเอการ์ที่เสริมนาโนคริสตัลลินเซลลูโลสจากเยื่อปอสามมีการสลายตัวด้วยความร้อนเป็น 3 ช่วงเช่นกัน โดยการสลายตัวในช่วงแรกเกิดจากการระเหยของน้ำ โดยมีเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 80-150 องศาเซลเซียส ช่วงที่สองเกิดที่อุณหภูมิประมาณ 190-250 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการ

ระเหยของกลีเซอรอล และช่วงที่สามเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสซึ่งเกิดการสลายตัวของสารชีวภาพ

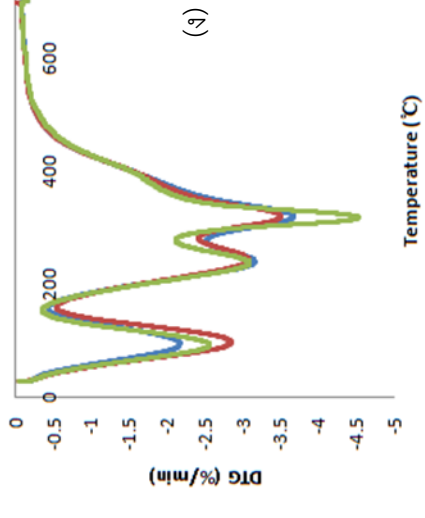
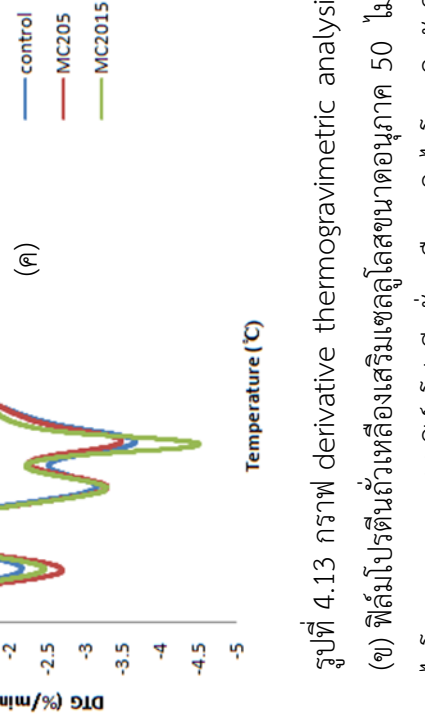
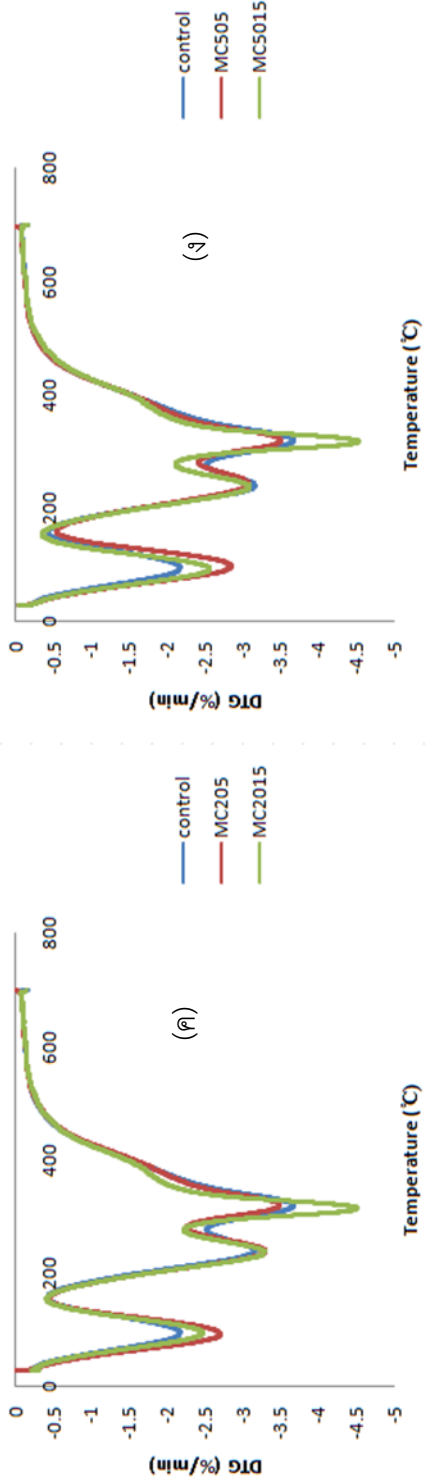
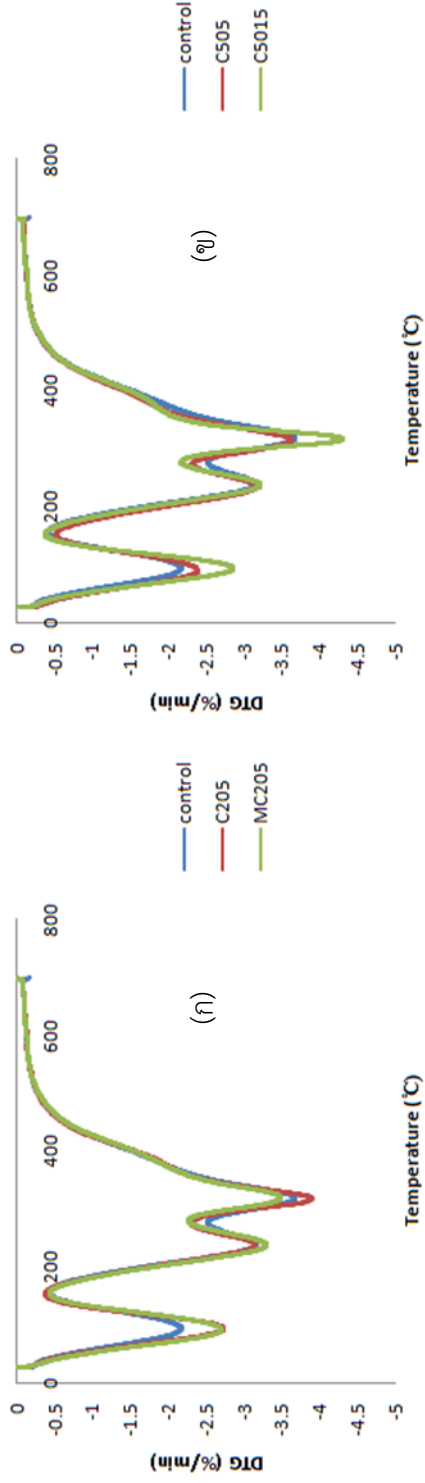
นอกจากนี้ Guo et al. (2014) รายงานว่าฟิล์มประกอบของโปรตีนถั่วเหลืองสกัดและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์มีการสลายตัวในช่วงแรกซึ่งเกิดจากการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นพบว่าเกิดการสูญเสียน้ำหนักจากการระเหยของกลีเซอรอล และที่อุณหภูมิสูงกว่า 290 องศาเซลเซียส โปรตีนถั่วเหลืองจะเริ่มสลายตัว







รูปที่ 4.12 กราฟ thermogravimetric analysis (TGA) ของ (ก) พิล์มโพรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร (ข) พิล์มโพรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร (ค) พิล์มโพรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร และ (ง) พิล์มโพรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.13 กราฟ derivative thermogravimetric analysis (DTG) ของ (ก) พิสูจน์โปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร (ข) พิสูจน์โปรตีนถั่วเหลืองเสริมเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร (ค) พิสูจน์โปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร และ (ง) พิสูจน์โปรตีนถั่วเหลืองเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 50 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิสูงสุดที่ทำให้เกิดการสลายตัวของตัวความร้อนของตัวอย่าง ( $T_{max}$ ) และร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียไปของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไม่โครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

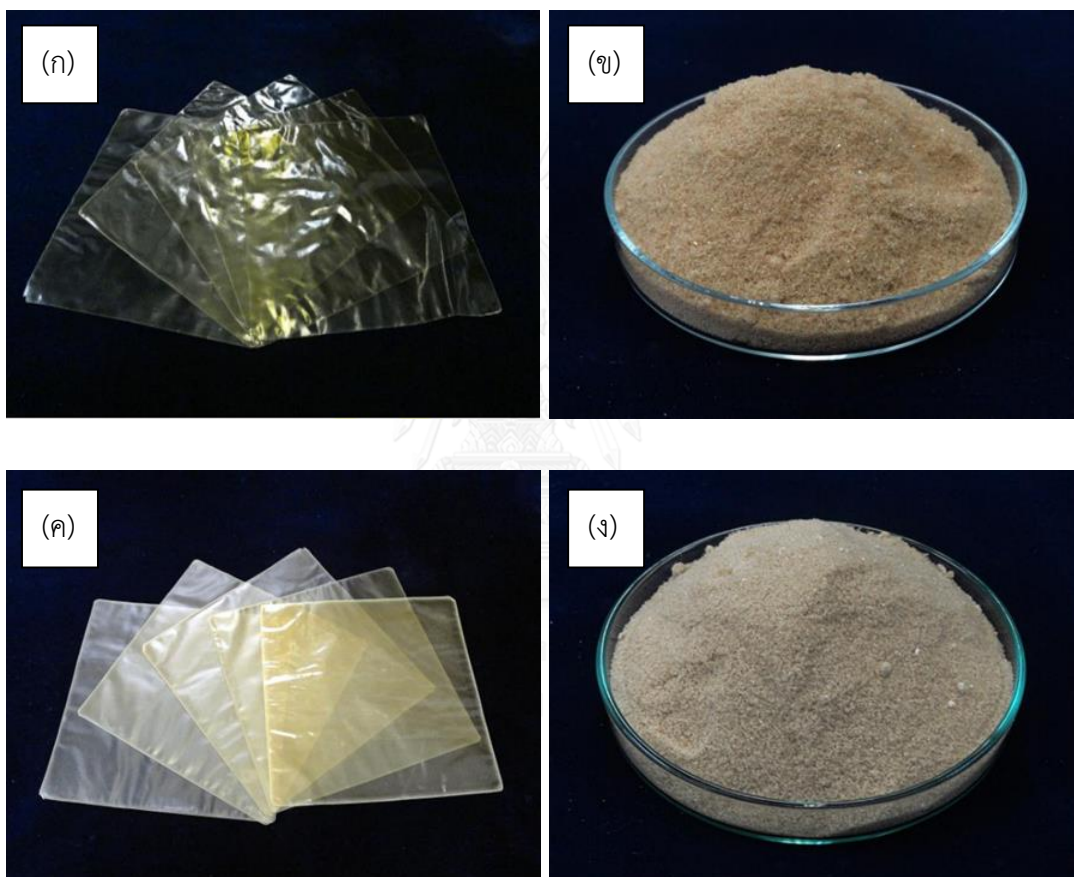
ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	$T_{max}(^{\circ}C)$			Weight loss (%)		
		$T_{max1}$	$T_{max2}$	$T_{max3}$	WL <sub>1</sub>	WL <sub>2</sub>	WL <sub>3</sub>
Control	0	94.0	237.8	317.5	12.58	24.34	48.86
C20	5	93.3	236.1	317.3	14.02	24.27	43.54
	15	96.1	239.1	308.8	13.53	22.33	44.47
C50	5	89.8	234.1	314.1	14.14	24.83	42.61
	15	93.2	237.3	316.7	14.69	24.72	42.52
MC20	5	91.5	237.7	318.7	14.79	26.17	41.34
	15	94.7	237.2	313.8	13.40	25.05	42.91
MC50	5	97.1	243.5	320.4	16.07	25.41	40.71
	15	91.0	236.3	316.4	13.38	24.37	42.75

### 4.3 ผลของการเสริมความแข็งแรงด้วยเส้นใยต่อสภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

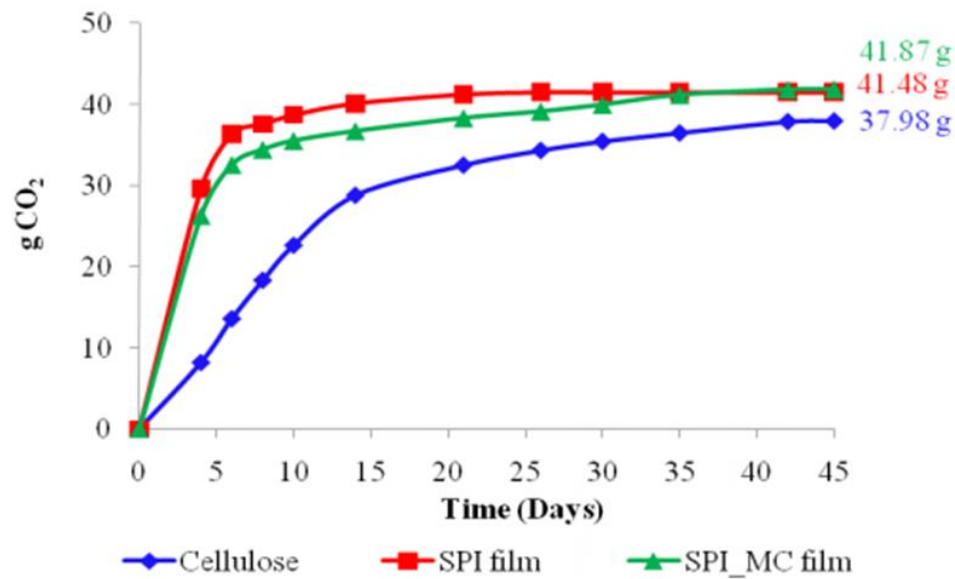
ในการทดลองขั้นตอนนี้ได้คัดเลือกตัวอย่างฟิล์มที่มีความต้านทานแรงดึงสูงสุดในช่วง 4.1 ซึ่งได้แก่ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% มาวิเคราะห์สภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพในภาวะที่มีอากาศภายใต้ภาวะการหมักขยะที่ควบคุม เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม รูปที่ 4.14 แสดงรูปของตัวอย่างฟิล์มที่นำมาศึกษาสภาพสลายได้ทางชีวภาพ และรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและร้อยละของการย่อยสลายได้ทางชีวภาพตามลำดับ

จากการคำนวณพบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีของตัวอย่างควบคุม และฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% มีค่าเท่ากับ 48.56 และ 48.14 กรัม/ถึงปฏิกรณ์ ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจริงที่วัดได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 41.48 และ 41.87 กรัม/ถึงปฏิกรณ์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.15) เมื่อคำนวณร้อยละของการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (รูปที่ 4.16) พบว่าในช่วง 5 วันแรกของการวิเคราะห์สภาพสลายได้ทางชีวภาพ ฟิล์มทั้งสองตัวอย่างมีอัตราการย่อยสลายเร็วกว่าเซลลูโลสซึ่งเป็น positive control reference material ทั้งนี้อาจเนื่องจากฟิล์มโปรตีนเป็นแหล่งอาหารที่พร้อมทั้งคาร์บอนและไนโตรเจนซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเจริญของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองยังละลายน้ำได้ ในขณะที่เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ จุลินทรีย์จึงนำไปใช้ได้ง่ายกว่า จุลินทรีย์ที่สามารถใช้โปรตีนเป็นแหล่งอาหารได้ ได้แก่ จุลินทรีย์ที่ผลิตโปรตีนได้ เช่น *Staphylococcus*, *Aspergillus* และ *Bacillus* ซึ่งพบตามธรรมชาติในดิน (Kuberan et al., 2010; Josephine et al., 2012; Abebe Bizuye et al., 2014) และในการทดลองนี้พบว่าตัวอย่างควบคุมเริ่มมีอัตราการย่อยสลายคงที่ ณ วันที่ 25 ของการทดลอง ในขณะที่ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสยังคงมีการย่อยสลายเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากจุลินทรีย์ยังสามารถใช้ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสเป็นแหล่งอาหารสำหรับการ

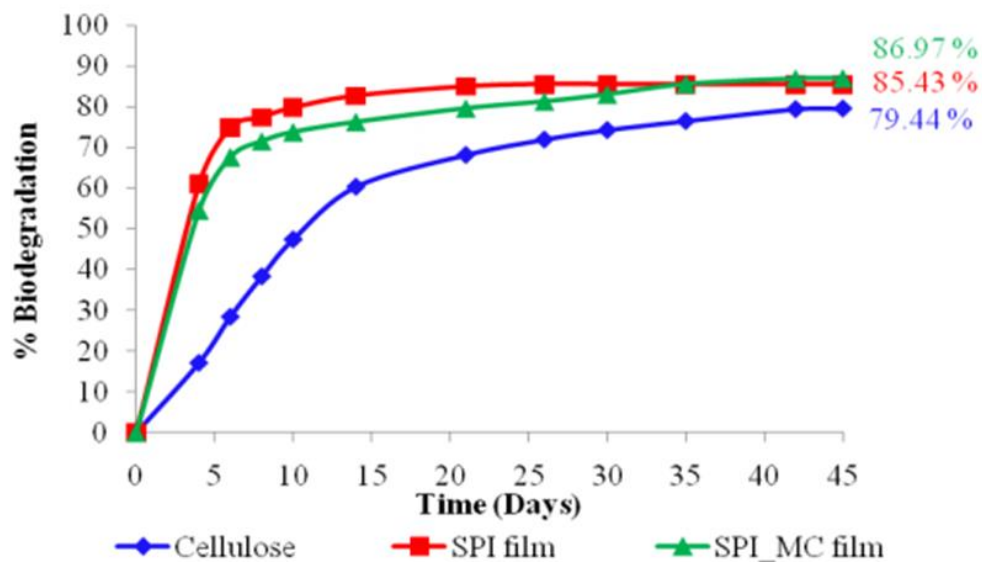
เจริญได้ โดยจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้จากดินและสามารถผลิตเซลลูเลสได้ ได้แก่ จุลินทรีย์ในกลุ่ม Cellulomonas, Cellvibrio, Pseudomonas, Bacillus และ Micrococcus (Irfan et al., 2012) และเมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์ที่ 45 วัน พบว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 86.97 ซึ่งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างควบคุมที่มีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 85.43 เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.14 ตัวอย่างฟิล์มที่ใช้ศึกษาสภาพสลายได้ทางชีวภาพ (ก) และ (ข) ตัวอย่างควบคุมก่อนและหลังบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1000 ไมโครเมตร (ค) และ (ง) ฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% ก่อนและหลังบดให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1000 ไมโครเมตร



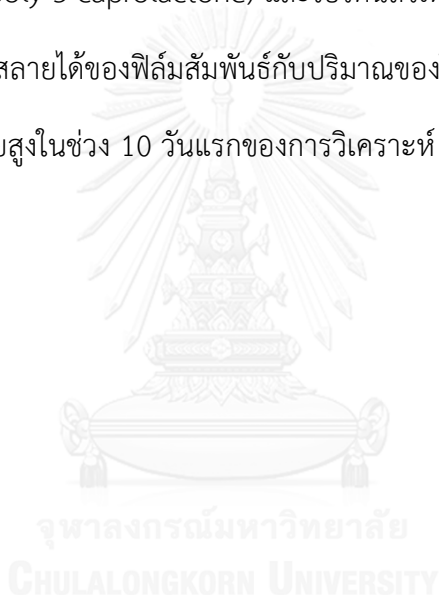
รูปที่ 4.15 ปริมาณสุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์สภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และเซลลูโลสซึ่งใช้เป็น positive control reference material



รูปที่ 4.16 ร้อยละของการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% เปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และเซลลูโลสซึ่งใช้เป็น positive control reference material

Su et al. (2010) ศึกษาผลของการเติมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และกลีเซอรอลต่อสภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดพบว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมและไม่เติมกลีเซอรอลมีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับโปรตีนถั่วเหลืองสกัด และการขึ้นรูปเป็นฟิล์มไม่มีผลต่อการย่อยสลายของโปรตีนถั่วเหลืองโดยจุลินทรีย์ผู้วิจัยรายงานว่าฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสามารถย่อยสลายได้เร็วในช่วง 10 วันแรกของการวิเคราะห์ จากนั้นอัตราการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ช้าลง

Hong et al. (2009) ศึกษาสภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มประกอบของพอลิ-3-คาโพรแลกโตน (poly-3-caprolactone) และโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยเติมน้ำมันมะพร้าวลงในฟิล์มด้วย พบว่าสภาพสลายได้ของฟิล์มสัมพันธ์กับปริมาณของโปรตีนถั่วเหลืองสกัด โดยตัวอย่างฟิล์มมีอัตราการย่อยสลายสูงในช่วง 10 วันแรกของการวิเคราะห์ จากนั้นการย่อยสลายจะเกิดขึ้นได้ช้าลง และเริ่มมีค่าคงที่



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของชนิด (เซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส) ขนาดอนุภาค (20 และ 50 ไมโครเมตร) และปริมาณ (5, 10 และ 15%) ของเส้นใยจากเซลลูโลส ต่อสมบัติ เสถียรภาพ และสภาพสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด ซึ่งมีผลการทดลองโดยสรุปดังนี้

การเสริมเส้นใยจากเซลลูโลสมีผลต่อความหนาของฟิล์ม โดยความหนามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยไม่มีผลต่อความหนาของฟิล์ม สำหรับสมบัติเชิงกลโดยทั่วไปพบว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสมีความต้านทานแรงดึงขาดใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ในขณะที่การเติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสทำให้ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ซึ่งพบว่ามีค่าต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) ทั้งนี้เนื่องจากไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสประกอบด้วยเฉพาะส่วนที่เป็นผลึกซึ่งมีความแข็งแรงสูง ในทางตรงกันข้ามพบว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมีการยืดตัวถึงจุดขาดต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) โดยการยืดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยไม่มีผลต่อการยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์ม

สำหรับสมบัติด้านแสง (optical property) พบว่าชนิดและขนาดอนุภาคของเส้นใยมีผลค่อนข้างน้อยต่อความโปร่งแสงของฟิล์ม ในขณะที่การเติมเส้นใยในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้ความโปร่งแสงของฟิล์มลดลง การเติมเส้นใยทำให้ฟิล์มมี  $L^*$  ลดลง ในขณะที่  $a^*$  และ  $b^*$  มีค่าสูงขึ้น มุมสีของทุกตัวอย่างฟิล์มมีค่าประมาณ 90 องศา ซึ่งเป็นมุมของสีเหลือง และความเข้มสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น



สำหรับสมบัติด้านการต้านทานความชื้น (moisture barrier property) พบว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลส และไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำสูงกว่าตัวอย่างควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ ) แต่ชนิด ขนาดอนุภาค และปริมาณของเส้นใยไม่มีผลต่อสภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์ม ยกเว้นฟิล์มเสริมเส้นใยเซลลูโลส และไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลส ขนาดอนุภาค 20 ไมครอนที่ระดับปริมาณ 5% นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสมีพื้นผิวที่มีสมบัติชอบน้ำลดลงซึ่งเห็นได้จากค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามยังจัดว่าฟิล์มทุกตัวอย่างมีพื้นผิวที่ชอบน้ำ โดยค่ามุมสัมผัสที่เพิ่มขึ้นของฟิล์มที่เติมเส้นใยนี้เนื่องมาจากพื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น ในขณะที่สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากเนื้อฟิล์มมีความเป็นเนื้อเดียวกันลดลง

สำหรับเสถียรภาพของฟิล์ม พบว่าการเติมเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการละลายน้ำลดลงเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิล์มที่เติมเส้นใยขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร โดยฟิล์มที่เติมเซลลูโลสมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลีนเซลลูโลสเมื่อเปรียบเทียบที่ขนาดอนุภาคและปริมาณเส้นใยที่เท่ากัน

ในด้านพฤติกรรมการดูดความชื้น พบว่าฟิล์มที่เติมเส้นใยมีรูปแบบของเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุม ฟิล์มทุกตัวอย่างมีความต้านทานแรงดึงขาดลดลง ในขณะที่การยืดตัวถึงจุดขาดเพิ่มขึ้น เมื่อวอเตอร์แอคติวิตีสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มแต่ละตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงของสมบัติเชิงกลที่สัมพันธ์กับวอเตอร์แอคติวิตีที่แตกต่างกัน

สำหรับการสลายตัวด้วยความร้อน พบว่าฟิล์มทุกตัวอย่างมีรูปแบบการสลายตัวด้วยความร้อนที่คล้ายคลึงกัน โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วง การเปลี่ยนแปลงช่วงแรกเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 80-120 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงแรกนี้เกิดจากการระเหยของน้ำ การเปลี่ยนแปลงช่วงที่สองเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 180-260 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงนี้เกิดจากการระเหยของกลีเซอรอล ส่วนการเปลี่ยนแปลงช่วงที่สามเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 300-320

องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงนี้เกิดจากการสลายตัวเนื่องจากออกซิเดชันของพอลิเมอร์ชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงในช่วงที่สามนี้พบว่าฟิล์มที่เติมเซลลูโลสหรือไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสมืออัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าตัวอย่างควบคุม

สำหรับสภาพย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ทดสอบในภาวะที่มีอากาศภายใต้ภาวะการหมักขยะที่ควบคุม พบว่าฟิล์มที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15% มีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 86.97 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับตัวอย่างควบคุมที่มีร้อยละการย่อยสลายเท่ากับ 85.43 โดยเริ่มมีการย่อยสลายคงที่ ณ วันที่ 25 ของการวิเคราะห์

สำหรับตัวอย่างฟิล์มเสริมเส้นใยที่มีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ฟิล์มเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ในปริมาณ 15% โดยตัวอย่างดังกล่าวมีความต้านทานแรงดึงขาดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม 81.37% อย่างไรก็ตามพบว่าการยืดตัวถึงจุดขาดมีค่าลดลง ในแง่การนำไปใช้งานฟิล์มดังกล่าวจึงเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเพิ่มความคงตัว (integrity) และไม่ต้องการความยืดหยุ่นมากนัก ทั้งนี้การเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสไม่ทำให้เสถียรภาพและสภาพสลายได้ของฟิล์มแตกต่างจากตัวอย่างควบคุม

## รายการอ้างอิง

- สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร. 2544. หมวดที่ 4: ด้านของเสีย [ออนไลน์]. จาก <http://bangkokgreencity.bangkok.go.th/greencity/waste.aspx> [1 พฤศจิกายน 2557].
- Abdulkhani, A., Hosseinzadeh, J., Ashori, A., Dadashi, S., and Takzare, Z. 2014. Preparation and characterization of modified cellulose nanofibers reinforced polylactic acid nanocomposite. *Polymer Testing* 35: 73-79.
- Abebe Bizuye, Abrham Sago, Genet Admasu, Hiwot Getachew, Paulos Kassa, and Amsaya, M. 2014. Isolation, optimization and characterization of protease producing bacteria from soil and water in Gondar town, North West Ethiopia. *International Journal of Bacteriology, Virology and Immunology* 1: 020-024.
- Ahvenainen, R. 2003. Introduction. In: R. Ahvenainen (ed.) *Novel Food Packaging Techniques*. p 1-2. Boca Raton: CRC Press.
- Andrady, A. L. 2007. Biodegradability of Polymers. In: J. E. Mark (ed.) *Physical Properties of Polymers Handbook*. p 951-964. New York: Springer Science&Business Media.
- ASTM. 1999. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.
- Avérous, L., and Pollet, E. 2012. Biodegradable Polymers. In: L. Avérous and E. Pollet (eds.) *Environmental Silicate Nano-Biocomposites*. p 13-39. New York: Springer.
- Azeredo, H., Miranda, K. W., Rosa, M. F., Nascimento, D. M., and de Moura, M. R. 2012. Edible films from alginate-acerola puree reinforced with cellulose whiskers. *LWT-Food Science and Technology* 46: 294-297.
- Belgacem, M. N., and Gandini, A. 2011. Production, Chemistry and Properties of Cellulose-Based Materials. In: D. Plackett (ed.) *Biopolymers – New Materials for Sustainable Films and Coatings*. p 151-178. West Sussex: John Wiley & Sons.

- Bilbao-Sainz, C., Bras, J., Williams, T., Sénechal, T., and Orts, W. 2011. HPMC reinforced with different cellulose nano-particles. *Carbohydrate Polymers* 86: 1549-1557.
- Bledzki, A. K., and Gassan, J. 1999. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science* 24: 221-274.
- Borges, J. P., Godinho, M. H., and Martins, A. F. 2004. Tensile properties of cellulose fiber reinforced hydroxypropylcellulose films. *Polymer Composites* 25: 102-110.
- Bourtoom, T. 2008. Edible films and coatings: characteristics and properties. *International Food Research Journal* 15.
- Bourtoom, T., and Chinnan, M. S. 2008. Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film. *LWT - Food Science and Technology* 41: 1633-1641.
- Bras, J., Hassan, M. L., Bruzesse, C., Hassan, E. A., El-Wakil, N. A., and Dufresne, A. 2010. Mechanical, barrier, and biodegradability properties of bagasse cellulose whiskers reinforced natural rubber nanocomposites. *Industrial Crops and Products* 32: 627-633.
- Cao, N., Fu, Y., and He, J. 2007. Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films. *Food Hydrocolloids* 21: 1153-1162.
- Cao, X., Xu, C., Wang, Y., Liu, Y., Liu, Y., and Chen, Y. 2013. New nanocomposite materials reinforced with cellulose nanocrystals in nitrile rubber. *Polymer Testing* 32: 819-826.
- Carvalho, R. A., and Grosso, C. R. F. 2004. Characterization of gelatin based films modified with transglutaminase, glyoxal and formaldehyde. *Food Hydrocolloids* 18: 717-726.
- Cavanito, C. 2011. Anaerobic digestion fundamentals [Online]. Available from: [http://www.valorgas.soton.ac.uk/Pub\\_docs/JyU%20SS%202013/VALORGAS\\_JyU\\_2013\\_Lecture%201.pdf](http://www.valorgas.soton.ac.uk/Pub_docs/JyU%20SS%202013/VALORGAS_JyU_2013_Lecture%201.pdf) [2014, October 1].
- Cho, S. Y., and Rhee, C. 2004. Mechanical properties and water vapor permeability of edible films made from fractionated soy proteins with ultrafiltration. *LWT - Food Science and Technology* 37: 833-839.

- Cochran, W. G., and Cox, G. M. 1957. *Experimental Designs*. 2 ed. Oxford:John Wiley & Sons.
- Cuq, B., Gontard, N., and Guilbert, S. 1997. Thermal properties of fish myofibrillar protein-based films as affected by moisture content. *Polymer* 38: 2399-2405.
- Dangaran, K., Tomasula, P. M., and Qi, P. 2009. Structure and Function of Protein-Based Edible Films and Coatings. In: M. E. Embuscado and K. C. Huber (eds.) *Edible Films and Coatings for Food Applications*. p 25-56. New York:Springer Science&Business Media.
- De Moura, M. R., Avena-Bustillos, R. J., McHugh, T. H., Wood, D. F., Otoni, C. G., and Mattoso, L. H. 2011. Miniaturization of cellulose fibers and effect of addition on the mechanical and barrier properties of hydroxypropyl methylcellulose films. *Journal of Food Engineering* 104: 154-160.
- Debeaufort, F., and Voilley, A. 2009. Lipid-Based Edible Films and Coatings. In: M. E. Embuscado and K. C. Huber (eds.) *Edible Films and Coatings for Food Applications*. p 135-168. New York:Springer Science&Business Media.
- Di Pasquale, M. G. 2007. *Amino Acids and Proteins for the Athlete: The Anabolic Edge*. 2 ed. Boca Raton: CRC Press.
- Dong, X., Dong, Y., Jiang, M., Wang, L., Tong, J., and Zhou, J. 2013. Modification of microcrystalline cellulose by using soybean oil for surface hydrophobization. *Industrial Crops and Products* 46: 301-303.
- Elsakhawy, M., and Hassan, M. 2007. Physical and mechanical properties of microcrystalline cellulose prepared from agricultural residues. *Carbohydrate Polymers* 67: 1-10.
- Fennema, O. R. 1996. Water and ice. In: O. R. Fennema (ed.) *Food Chemistry*. p 17-94. New York:Taylor&Francis.
- Fernandes, S., Freire, C. S., Silvestre, A. J., Pascoal Neto, C., Gandini, A., Berglund, L. A., and Salmén, L. 2010. Transparent chitosan films reinforced with a high content of nanofibrillated cellulose. *Carbohydrate Polymers* 81: 394-401.
2014. FMC Corporation. Cellulose gel/manufacturing [Online]. Available from: <http://www.fmcbiopolymer.com/Food/Ingredients/CelluloseGel/Manufacturing.aspx> [2014, October 1].

- Förch, R. 2009. Tutorial review: surface modification and adhesion. In: R. Förch, H. Schönher and A. T. A. Jenkins (eds.) *Surface Design: Applications in Bioscience and Nanotechnology*. p 1-102. Weinheim:John Wiler & Sons.
- Förch, R., Schönherr, H., and Jenkins, A. T. A. 2009. Surface design: applications in bioscience and nanotechnology. In: R. Förch, H. Schönherr and A. T. A. Jenkins (eds.) *Surface Design: Applications in Bioscience and Nanotechnology*. p 471-473. Weinheim:John Wiley & Sons.
- Fujimori, E. 1965. Ultraviolet light-induced change in collagen macromolecules. *Biopolymers* 3: 115-119.
- Gennadios, A., Brandenburg, A. H., Weller, C. L., and Testin, R. F. 1993. Effect of pH on properties of wheat gluten and soy protein isolate films. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 41: 1835-1839.
- Gennadios, A., Ghorpade, V. M., Weller, C. L., and Hanna, M. A. 1996. Heat curing of soy protein films. *Transactions of the ASAE* 39: 575-579.
- Gennadios, A., Rhim, J. W., Handa, A., Weller, C. L., and Hanna, M. A. 1998. Ultraviolet radiation affects physical and molecular properties of soy protein films. *Journal of Food Science* 63: 225-228.
- Guo, G., Zhang, C., Du, Z., Zou, W., and Li, H. 2014. Structure and properties of poly (vinyl alcohol)/soy protein isolate blend film fabricated through melt processing. *Journal of Polymer Environment* 22: 1-7.
- Haafiz, M. K., Hassan, A., Zakaria, Z., Inuwa, I. M., Islam, M. S., and Jawaid, M. 2013. Properties of polylactic acid composites reinforced with oil palm biomass microcrystalline cellulose. *Carbohydrate Polymers* 98: 139-145.
- Herrera, M. A., Mathew, A. P., and Oksman, K. 2014. Gas permeability and selectivity of cellulose nanocrystals films (layers) deposited by spin coating. *Carbohydrate Polymers* 112: 494-501.
- Hong, S. I., Choi, W. Y., Cho, S. Y., Jung, S. H., Shin, B. Y., and Park, H. J. 2009. Mechanical properties and biodegradability of poly- $\epsilon$ -caprolactone/soy protein isolate blends compatibilized by coconut oil. *Polymer Degradation and Stability* 94: 1876-1881.

- Huq, T., Salmieri, S., Khan, A., Khan, R. A., Le Tien, C., Riedl, B., Frascini, C., Bouchard, J., Uribe-Calderon, J., Kamal, M. R., and Lacroix, M. 2012. Nanocrystalline cellulose (NCC) reinforced alginate based biodegradable nanocomposite film. *Carbohydrate Polymers* 90: 1757-1763.
- Irfan, M., Safdar, A., Syed, Q., and Nadeem, M. 2012. Isolation and screening of cellulolytic bacteria from soil and optimization of cellulase production and activity. *Turkish Journal of Biochemistry* 37: 287-293.
- ISO. 2005. ISO 14855-1: 2005 Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions -- method by analysis of evolved carbon dioxide -- part 1: general method [Online]. Available from: [http://www.iso.org/iso/catalogue\\_detail.htm?csnumber=42155](http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=42155) [2014, October, 1].
- Jensen, E. V. 1959. Sulfhydryl-disulfide interchange. *Science* 130: 1319-1323.
- Jiang, L., and Zhang, J. 2013. Biodegradable Polymers and Polymer Blends. In: S. Ebnesajjad (ed.) *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*. p 109-128. Oxford:Elsevier.
- Jiang, Y., Tang, C. H., Wen, Q. B., Li, L., and Yang, X. Q. 2007. Effect of processing parameters on the properties of transglutaminase-treated soy protein isolate films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 8: 218-225.
- Jones and Bartlett Publishers. *Carbohydrates* [Online]. Available from: <http://nutrition.jbpub.com/resources/chemistryreview9.cfm> [2014, October 1].
- Josephine, F. S., Ramya, V., Devi, N., Ganapa, S. B., Siddalingshwara, K., Venugopal, N., and Vishwanatha, T. 2012. Isolation, production and characterization of protease from *Bacillus* sp. isolated from soil sample. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research* 2: 163-168.
- Khan, A., Khan, R. A., Salmieri, S., Le Tien, C., Riedl, B., Bouchard, J., Chauve, G., Tan, V., Kamal, M. R., and Lacroix, M. 2012. Mechanical and barrier properties of nanocrystalline cellulose reinforced chitosan based nanocomposite films. *Carbohydrate Polymers* 90: 1601-1608.

- Kim, K. M., Weller, C. L., Hanna, M. A., and Gennadios, A. 2002. Heat curing of soy protein films at selected temperatures and pressures. *LWT - Food Science and Technology* 35: 140-145.
- Kokoszka, S., Debeaufort, F., Hambleton, A., Lenart, A., and Voilley, A. 2010. Protein and glycerol contents affect physico-chemical properties of soy protein isolate-based edible films. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 11: 503-510.
- Korpela, T. E., Salstela, J., Suvanto, M., and Pakkanen, T. T. 2014. Periodically micro-patterned viscose fiber-reinforced polypropylene composites with low surface friction. *Wear* 310: 20-26.
- Korpela, T. E., Salstela, J., Suvanto, M., and Pakkanen, T. T. 2014. Periodically micro-patterned viscose fiber-reinforced polypropylene composites with low surface friction. *Wear* 310: 20-26.
- Krochta, J. M. 2002. Proteins as Raw Materials for Films and Coating: Definitions, Current Status, and Opportunities. In: A. Gennadios (ed.) *Protein-Based Films and Coating*. p 1-42. Danves:CRC Press.
- Kuberan, T., Sangaralingam, S., and Thirumalaiarasu, V. 2010. Isolation and optimization of Protease producing Bacteria from Halophilic soil. *Journal of Biological Sciences Research* 1: 163-174.
- Kwok, D., and Neumann, A. 1999. Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface science* 81: 167-249.
- Lacroix, M., and Vu, K. D. 2014. Edible Coating and Film Materials: Proteins. In: S. H. Han (ed.) *Innovations in Food Packaging*. p 277-304. London:Elsevier Science.
- Lee, M., Lee, S., and Song, K. B. 2005. Effect of  $\gamma$ -irradiation on the physicochemical properties of soy protein isolate films. *Radiation Physics and Chemistry* 72: 35-40.
- Leejarkpai, T. 2014. Biodegradability Testing Laboratory [Online]. Available form: [http://www.nstda.or.th/nac2\\_0\\_1\\_4/download/presentation/CC4\\_0\\_4\\_01/NAC2014\\_testing-lab.pdf](http://www.nstda.or.th/nac2_0_1_4/download/presentation/CC4_0_4_01/NAC2014_testing-lab.pdf) [2014, October 1].
- Leja, K., and Lewandowicz, G. 2010. Polymer biodegradation and biodegradable polymers - a review. *Polish Journal of Environmental Studies* 19: 255-266.



- Liu, K. 1999. Oriental Soyfoods. In: C. Y. W. Ang, K. Liu and T. Huang, W (eds.) Asian Foods: Science and Technology. p 139-200. Pennsylvania:CRC Press.
- Lodha, P., and Netravali, A. N. 2005. Characterization of Phytigel® modified soy protein isolate resin and unidirectional flax yarn reinforced “green” composites. *Polymer Composites* 26: 647-659.
- Lu, B., Xu, A., and Wang, J. 2014. Cation does matter: how cationic structure affects the dissolution of cellulose in ionic liquids. *Green Chemistry* 16: 1326-1335.
- Lusas, E. W., and Riaz, M. N. 1995. Soy protein products: processing and use. *The Journal of Nutrition* 125: 573-580.
- Ma, X., Chang, P. R., and Yu, J. 2008. Properties of biodegradable thermoplastic pea starch/carboxymethyl cellulose and pea starch/microcrystalline cellulose composites. *Carbohydrate Polymers* 72: 369-375.
- Ma, X., Yu, J., and Kennedy, J. F. 2005. Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites. *Carbohydrate Polymers* 62: 19-24.
- Mallick, P. K. 1993. *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 2 ed. New York:CRC Press.
- Marquié, C. 2001. Chemical reactions in cottonseed protein cross-linking by formaldehyde, glutaraldehyde, and glyoxal for the formation of protein films with enhanced mechanical properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49: 4676-4681.
- Marquié, C., Tessier, A.-M., Aymard, C., and Guilbert, S. 1997. HPLC determination of the reactive lysine content of cottonseed protein films to monitor the extent of cross-linking by formaldehyde, glutaraldehyde, and glyoxal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45: 922-926.
- Marsh, K., and Bugusu, B. 2007. Food packaging--roles, materials, and environmental issues. *Journal of Food Science* 72: R39-R55.
- Muralidhara, K., and Sreenivasan, S. 2010. Thermal degradation and burning behavior of cellulose based and cellulose-silk blended upholstery fabric. *Journal of Scientific and Industrial Research* 69: 879-885.

- Murphy, P. A., and Resurreccion, A. P. 1984. Varietal and environmental differences in soybean glycinin and beta-conglycinin content. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 32: 911-915.
- Nuthong, P., Benjakul, S., and Prodpran, T. 2009. Effect of phenolic compounds on the properties of porcine plasma protein-based film. *Food Hydrocolloids* 23: 736-741.
- Orliac, O., Rouilly, A., Silvestre, F., and Rigal, L. 2002. Effects of additives on the mechanical properties, hydrophobicity and water uptake of thermo-moulded films produced from sunflower protein isolate. *Polymer* 43: 5417-5425.
- Ou, S., Wang, Y., Tang, S., Huang, C., and Jackson, M. G. 2005. Role of ferulic acid in preparing edible films from soy protein isolate. *Journal of Food Engineering* 70: 205-210.
- Park, S. K., Bae, D. H., and Rhee, K. C. 2000. Soy protein biopolymers cross-linked with glutaraldehyde. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 77: 879-884.
- Park, S. K., Hettiarachchy, N. S., Ju, Z. Y., and Gennadios, A. 2002. Formation and Properties of Soy Protein Films and Coatings. In: A. Gennadios (ed.) *Protein-Based Films and Coatings*. p 123-137. New York: CRC Press.
- Patnaik, P. 2007. *A Comprehensive Guide to the Hazardous Properties of Chemical Substances*. 3 ed. New York: John Wiley & Sons.
- Pereda, M., Dufresne, A., Aranguren, M. I., and Marcovich, N. E. 2014. Polyelectrolyte films based on chitosan/olive oil and reinforced with cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers* 101: 1018-1026.
- Pereira, A. L., do Nascimento, D. M., Souza Filho Mde, S., Morais, J. P., Vasconcelos, N. F., Feitosa, J. P., Brigida, A. I., and Rosa Mde, F. 2014. Improvement of polyvinyl alcohol properties by adding nanocrystalline cellulose isolated from banana pseudostems. *Carbohydrate Polymers* 112: 165-172.
- Perez-Gago, M. B., and Krochta, J. M. 2001. Denaturation time and temperature effects on solubility, tensile properties, and oxygen permeability of whey protein edible films. *Journal of Food Science* 65: 705-710.

- Pöllänen, M., Suvanto, M., and Pakkanen, T. T. 2013. Cellulose reinforced high density polyethylene composites—Morphology, mechanical and thermal expansion properties. *Composites Science and Technology* 76: 21-28.
- Rafieian, F., Shahedi, M., Keramat, J., and Simonsen, J. 2014. Mechanical, thermal and barrier properties of nano-biocomposite based on gluten and carboxylated cellulose nanocrystals. *Industrial Crops and Products* 53: 282-288.
- Ramos, L. P. 2003. The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. *Química Nova* 26: 863-871.
- Rasal, R. M., Janorkar, A. V., and Hirt, D. E. 2010. Poly(lactic acid) modifications. *Progress in Polymer Science* 35: 338-356.
- Reddy, J. P., and Rhim, J. W. 2014. Characterization of bionanocomposite films prepared with agar and paper-mulberry pulp nanocellulose. *Carbohydrate Polymers* 110: 480-488.
- Restuccia, D., Spizzirri, U. G., Parisi, O. I., Cirillo, G., Curcio, M., Iemma, F., Puoci, F., Vinci, G., and Picci, N. 2010. New EU regulation aspects and global market of active and intelligent packaging for food industry applications. *Food Control* 21: 1425-1435.
- Rhim, J. W., Gennadios, A., Fu, D., Weller, C. L., and Hanna, M. A. 1999. Properties of ultraviolet irradiated protein films. *Food Science and Technology* 32: 129-133.
- Rhim, J. W., Gennadios, A., Handa, A., Weller, C. L., and Hanna, M. A. 2000. Solubility, tensile, and color properties of modified soy protein isolate films. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* 48: 1937-1941.
- Rhim, J. W., Gennadios, A., Weller, C. L., Cezeirat, C., and Hanna, M. A. 1998. Soy protein isolate–dialdehyde starch films. *Industrial Crops and Products* 8: 195-203.
- Rockland, L. B. 1960. Saturated salt solutions for static control of relative humidity between 5° and 40°. *Analytical Chemistry* 32: 1375-1376.
- Saxena, A., and Ragauskas, A. J. 2009. Water transmission barrier properties of biodegradable films based on cellulosic whiskers and xylan. *Carbohydrate Polymers* 78: 357-360.

- Shrivastav, A., Mishra, S. K., Pancha, I., Jain, D., Bhattacharya, S., Patel, S., and Mishra, S. 2011. Biodegradability studies of polyhydroxyalkanoate (PHA) film produced by a marine bacteria using *Jatropha* biodiesel byproduct as a substrate. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 27: 1531-1541.
- Siqueira, G., Bras, J., and Dufresne, A. 2010. Cellulosic bionanocomposites: a review of preparation, properties and applications. *Polymers* 2: 728-765.
- Sirviö, J. A., Kolehmainen, A., Liimatainen, H., Niinimäki, J., and Hormi, O. E. 2014. Biocomposite cellulose-alginate films: promising packaging materials. *Food Chemistry* 151: 343-351.
- Smith, L. G. 2001. Plant cell division: building walls in the right places. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 2: 33-39.
- Song, J., Kay, M., and Coles, R. 2011. Bioplastics. In: R. Coles and M. Kirwan (eds.) *Food and beverage packaging technology*. p 295-320 Wiley-blackwell.
- Stepan, A. M., Ansari, F., Berglund, L., and Gatenholm, P. 2014. Nanofibrillated cellulose reinforced acetylated arabinoxylan films. *Composites Science and Technology* 98: 72-78.
- Stuchell, Y. M., and Krochta, J. M. 1994. Enzymatic treatments and thermal effects on edible soy protein films. *Journal of Food Science* 59: 1332-1337.
- Su, J. F., Yuan, X. Y., Huang, Z., and Xia, W. L. 2010. Properties stability and biodegradation behaviors of soy protein isolate/poly(vinyl alcohol) blend films. *Polymer Degradation and Stability* 95: 1226-1237.
- Tang, C. H., Jiang, Y., Wen, Q. B., and Yang, X. Q. 2005. Effect of transglutaminase treatment on the properties of cast films of soy protein isolates. *Journal of Biotechnology* 120: 296-307.
- Teaca, C. A., Bodirlau, R., and Spiridon, I. 2013. Effect of cellulose reinforcement on the properties of organic acid modified starch microparticles/plasticized starch bio-composite films. *Carbohydrate Polymers* 93: 307-315.
- Teixeira, E. d. M., Pasquini, D., Curvelo, A. A., Corradini, E., Belgacem, M. N., and Dufresne, A. 2009. Cassava bagasse cellulose nanofibrils reinforced thermoplastic cassava starch. *Carbohydrate Polymers* 78: 422-431.

- Tharanathan, R. N. 2003. Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. *Trends in Food Science & Technology* 14: 71-78.
- Thoorens, G., Krier, F., Leclercq, B., Carlin, B., and Evrard, B. 2014. Microcrystalline cellulose, a direct compression binder in a quality by design environment-A review. *International Journal of Pharmaceutics* 473: 64-72.
- United States Environmental Protection Agency. 2012. Municipal solid waste generation, recycling and disposal in the United States: facts and figures for 2012 [Online]. Retrieved from:  
[http://www.epa.gov/solidwaste/nonhaz/municipal/pubs/2012\\_msw\\_fs.pdf](http://www.epa.gov/solidwaste/nonhaz/municipal/pubs/2012_msw_fs.pdf)  
[November 1, 2014]
- Vazquez, A., Foresti, M. L., and Cyrus, V. 2011. Production, Chemistry and Degradation of Starch-Based Polymers. In: D. Plackett (ed.) *Biopolymers – New Materials for Sustainable Films and Coating*. p 15-42. West Sussex: John Wiley & Sons.
- Wang, L., Xiao, M., Dai, S., Song, J., Ni, X., Fang, Y., Corke, H., and Jiang, F. 2014. Interactions between carboxymethyl konjac glucomannan and soy protein isolate in blended films. *Carbohydrate Polymers* 101: 136-145.
- Wang, Z., Sun, X.-x., Lian, Z.-x., Wang, X.-x., Zhou, J., and Ma, Z.-s. 2013. The effects of ultrasonic/microwave assisted treatment on the properties of soy protein isolate/microcrystalline wheat-bran cellulose film. *Journal of Food Engineering* 114: 183-191.
- Wihodo, M., and Moraru, C. I. 2013. Physical and chemical methods used to enhance the structure and mechanical properties of protein films: a review. *Journal of Food Engineering* 114: 292-302.
- Wijeratne, W. B. 1993a. Composite of soybean In: Tanteeratarm (ed.) *Soybean Processing for Food Uses*. p 9-17 Urbana: International Soybean Program.
- Wijeratne, W. B. 1993b. Functional properties of soy proteins in food systems. In: Tanteeratarm (ed.) *Soybean Processing for Food Uses*. p 29-42 Urbana: International Soybean Program.
- Wikimedia Foundation. 2014. Cellulase [Online]. Available from:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulase> [2014, October 1].

Zahedi, Y., Ghanbarzadeh, B., and Sedaghat, N. 2010. Physical properties of edible emulsified films based on pistachio globulin protein and fatty acids. *Journal of Food Engineering* 100: 102-108.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

## ลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ (Product Specification)

## ก.1 โปรตีนถั่วเหลืองสกัด (ผลิตภัณฑ์ของบริษัท ไมท์ตี้ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด)

Product name : SOY- PROTEIN

Manufacture date : 09-04-13

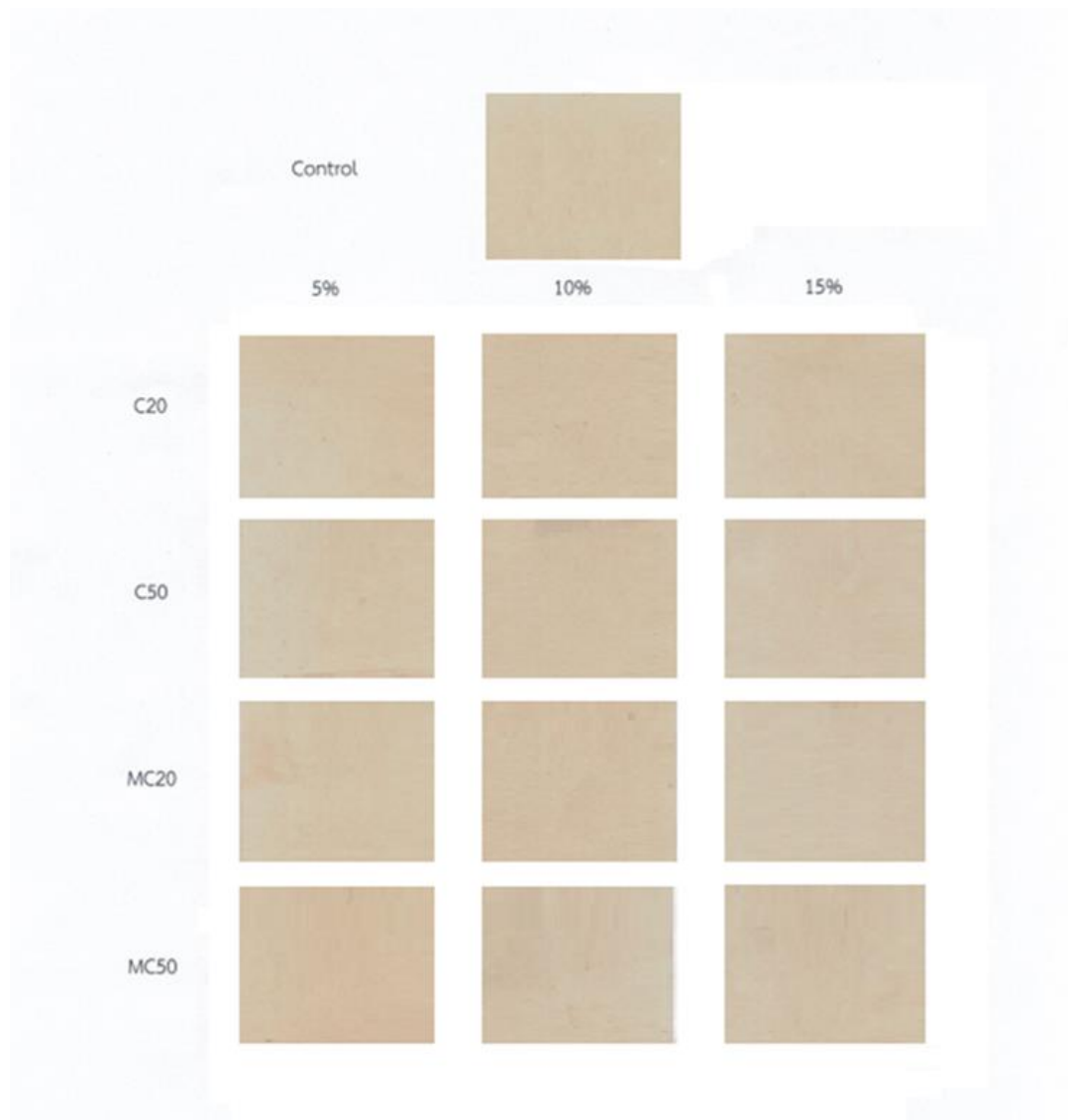
Expiration date : 09-04-15

ตารางที่ ก.1 Certificate of analysis of soy protein isolate

Parameters	Actual value	Standard value
Sieve test (Pass through#100)	Conform	Min. 90%
Moisture content	5.36	Max. 6.0%
pH (10% solution)	7.01	7.0-7.4
Protein	92.0	Min. 90%
Total plate count	<100	Max. $1 \times 10^5$ CFU/g
<i>E. coli</i>	Negative	Negative
Salmonella	Negative	Negative



ภาคผนวก ข  
รูปตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัด

## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ความหนาของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	ความหนา (มิลลิเมตร)
Control	0	0.117 <sup>f</sup> ± 0.002
C20	5	0.124 <sup>e</sup> ± 0.002
	10	0.136 <sup>c</sup> ± 0.001
	15	0.146 <sup>b</sup> ± 0.001
C50	5	0.130 <sup>d</sup> ± 0.005
	10	0.146 <sup>b</sup> ± 0.003
	15	0.152 <sup>a</sup> ± 0.002
MC20	5	0.125 <sup>e</sup> ± 0.001
	10	0.135 <sup>c</sup> ± 0.000
	15	0.145 <sup>b</sup> ± 0.001
MC50	5	0.125 <sup>e</sup> ± 0.003
	10	0.133 <sup>cd</sup> ± 0.001
	15	0.147 <sup>b</sup> ± 0.001

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ )

ตารางที่ ค.2 ความต้านทานแรงดึงขาดของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	ความต้านทานแรงดึงขาด (เมกะพาสคาล)
Control	0	1.02 <sup>f</sup> ± 0.02
C20	5	1.04 <sup>f</sup> ± 0.06
	10	1.12 <sup>ef</sup> ± 0.04
	15	1.03 <sup>f</sup> ± 0.05
C50	5	1.10 <sup>ef</sup> ± 0.02
	10	1.18 <sup>de</sup> ± 0.07
	15	1.08 <sup>ef</sup> ± 0.06
MC20	5	1.44 <sup>c</sup> ± 0.01
	10	1.65 <sup>b</sup> ± 0.03
	15	1.85 <sup>a</sup> ± 0.03
MC50	5	1.03 <sup>f</sup> ± 0.01
	10	1.10 <sup>ef</sup> ± 0.08
	15	1.29 <sup>d</sup> ± 0.01

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ค.3 การยืดตัวถึงจุดขาดของฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและ  
ไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	การยืดตัวถึงจุดขาด(%)
Control	0	228.54 <sup>a</sup> ± 3.84
C20	5	96.62 <sup>e</sup> ± 4.25
	10	44.81 <sup>f</sup> ± 2.65
	15	30.57 <sup>h</sup> ± 3.00
C50	5	156.06 <sup>c</sup> ± 7.32
	10	101.22 <sup>e</sup> ± 3.91
	15	47.16 <sup>fg</sup> ± 1.93
MC20	5	159.08 <sup>c</sup> ± 7.37
	10	37.73 <sup>gh</sup> ± 1.99
	15	30.00 <sup>h</sup> ± 0.72
MC50	5	182.80 <sup>b</sup> ± 5.94
	10	126.69 <sup>d</sup> ± 8.04
	15	40.50 <sup>gh</sup> ± 2.44

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ค.4 ร้อยละของแสงส่องผ่านของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	ร้อยละของแสงส่องผ่าน
Control	0	68.56 <sup>a</sup> ± 0.43
C20	5	60.59 <sup>b</sup> ± 0.61
	10	53.63 <sup>cd</sup> ± 0.30
	15	48.00 <sup>f</sup> ± 0.84
C50	5	66.83 <sup>a</sup> ± 0.32
	10	55.94 <sup>c</sup> ± 0.75
	15	50.49 <sup>e</sup> ± 0.73
MC20	5	61.82 <sup>b</sup> ± 0.27
	10	55.94 <sup>c</sup> ± 1.50
	15	47.92 <sup>f</sup> ± 0.94
MC50	5	60.38 <sup>b</sup> ± 0.74
	10	55.68 <sup>c</sup> ± 0.68
	15	52.74 <sup>d</sup> ± 0.64

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ค.5 สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (กรัม มิลลิเมตร/ตารางเมตร ชั่วโมง พาสคาล)
Control	0	0.658 <sup>b</sup> ± 0.008
C20	5	0.660 <sup>b</sup> ± 0.001
	10	0.682 <sup>a</sup> ± 0.004
	15	0.695 <sup>a</sup> ± 0.002
C50	5	0.684 <sup>a</sup> ± 0.009
	10	0.688 <sup>a</sup> ± 0.006
	15	0.701 <sup>a</sup> ± 0.006
MC20	5	0.661 <sup>b</sup> ± 0.008
	10	0.682 <sup>a</sup> ± 0.005
	15	0.694 <sup>a</sup> ± 0.008
MC50	5	0.680 <sup>a</sup> ± 0.005
	10	0.686 <sup>a</sup> ± 0.003
	15	0.698 <sup>a</sup> ± 0.009

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ค.6 มุมสัมพัทธ์ระหว่างหยดน้ำกับผิวฟิล์มโพรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	มุมสัมพัทธ์ (องศา)
Control	0	30.84 <sup>f</sup> ± 0.48
C20	5	38.57 <sup>cde</sup> ± 1.94
	10	43.94 <sup>bc</sup> ± 4.16
	15	46.56 <sup>bc</sup> ± 2.70
C50	5	35.36 <sup>def</sup> ± 0.59
	10	42.91 <sup>cde</sup> ± 1.84
	15	38.64 <sup>bcd</sup> ± 1.12
MC20	5	33.42 <sup>ef</sup> ± 2.89
	10	40.70 <sup>cde</sup> ± 0.61
	15	54.99 <sup>a</sup> ± 0.50
MC50	5	33.92 <sup>ef</sup> ± 0.67
	10	40.57 <sup>cde</sup> ± 0.28
	15	54.94 <sup>a</sup> ± 2.17

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ค.7 ความสามารถในการละลายน้ำของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยเซลลูโลสและไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15%

ตัวอย่างฟิล์ม	ปริมาณเส้นใย (%)	ความสามารถในการละลายน้ำ(%)
Control	0	34.39 <sup>a</sup> ± 0.54
C20	5	18.86 <sup>d</sup> ± 0.40
	10	18.25 <sup>d</sup> ± 0.64
	15	17.35 <sup>d</sup> ± 0.56
C50	5	34.49 <sup>a</sup> ± 0.69
	10	31.97 <sup>b</sup> ± 0.31
	15	31.36 <sup>b</sup> ± 0.68
MC20	5	28.66 <sup>c</sup> ± 0.24
	10	27.17 <sup>c</sup> ± 0.90
	15	27.35 <sup>c</sup> ± 0.39
MC50	5	35.78 <sup>a</sup> ± 0.23
	10	34.53 <sup>a</sup> ± 0.51
	15	34.73 <sup>a</sup> ± 0.49

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )



ตารางที่ ค. 8 ความเข้มข้นของฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองสกัดที่เสริมเส้นใยชดถั่วโกลและไมโครคริสตัลลินชดถั่วโกลขนาดอนุภาค 20 และ 50 ไมโครเมตร ปริมาณ 5-15% ที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ

$a_w$	Control	C20			C50		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%
0.113	15.60 <sup>s</sup> ± 0.09	19.04 <sup>s</sup> ± 1.04	17.18 <sup>s</sup> ± 2.52	16.91 <sup>s</sup> ± 1.42	21.09 <sup>s</sup> ± 0.44	20.79 <sup>d</sup> ± 0.93	17.65 <sup>t</sup> ± 0.86
0.225	16.10 <sup>s</sup> ± 0.77	22.25 <sup>f</sup> ± 0.22	18.06 <sup>s</sup> ± 1.09	17.81 <sup>s</sup> ± 0.94	21.48 <sup>s</sup> ± 0.37	24.14 <sup>d</sup> ± 0.79	20.97 <sup>f</sup> ± 0.38
0.328	17.33 <sup>f</sup> ± 0.15	23.87 <sup>f</sup> ± 2.11	20.04 <sup>f</sup> ± 0.32	19.83 <sup>f</sup> ± 0.86	23.87 <sup>f</sup> ± 0.25	24.15 <sup>d</sup> ± 0.38	23.38 <sup>f</sup> ± 1.09
0.432	20.93 <sup>e</sup> ± 0.51	25.57 <sup>e</sup> ± 0.52	23.36 <sup>e</sup> ± 1.11	22.01 <sup>e</sup> ± 0.62	27.25 <sup>e</sup> ± 2.12	27.79 <sup>c</sup> ± 1.20	26.45 <sup>e</sup> ± 0.62
0.529	23.70 <sup>d</sup> ± 0.16	35.14 <sup>d</sup> ± 1.79	22.94 <sup>d</sup> ± 0.37	28.44 <sup>d</sup> ± 0.54	35.19 <sup>d</sup> ± 0.72	40.37 <sup>b</sup> ± 4.14	34.03 <sup>d</sup> ± 1.62
0.689	29.78 <sup>c</sup> ± 0.23	32.36 <sup>c</sup> ± 2.08	31.47 <sup>c</sup> ± 0.11	33.64 <sup>c</sup> ± 0.88	38.32 <sup>c</sup> ± 0.98	41.56 <sup>b</sup> ± 1.83	40.02 <sup>c</sup> ± 3.06
0.843	43.16 <sup>b</sup> ± 1.25	40.59 <sup>b</sup> ± 1.13	42.54 <sup>b</sup> ± 1.33	40.26 <sup>b</sup> ± 0.96	47.91 <sup>b</sup> ± 0.88	43.60 <sup>b</sup> ± 1.38	43.35 <sup>b</sup> ± 0.66
0.936	51.30 <sup>a</sup> ± 0.93	52.06 <sup>a</sup> ± 0.81	52.26 <sup>a</sup> ± 0.16	50.58 <sup>a</sup> ± 0.23	52.24 <sup>a</sup> ± 0.29	50.93 <sup>a</sup> ± 1.54	49.67 <sup>a</sup> ± 1.10

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

ตารางที่ ค.8 (ต่อ)

$Q_w$	MC20			MC50		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
0.113	21.35 <sup>h</sup> ± 1.43	17.71 <sup>f</sup> ± 0.85	16.89 <sup>s</sup> ± 0.42	19.05 <sup>f</sup> ± 0.87	17.00 <sup>f</sup> ± 0.49	16.33 <sup>s</sup> ± 1.33
0.225	22.81 <sup>s</sup> ± 0.35	17.91 <sup>f</sup> ± 0.68	17.36 <sup>s</sup> ± 0.29	19.32 <sup>f</sup> ± 1.70	17.60 <sup>f</sup> ± 0.69	15.84 <sup>s</sup> ± 0.37
0.328	26.47 <sup>f</sup> ± 0.60	19.21 <sup>f</sup> ± 0.37	19.57 <sup>f</sup> ± 0.23	19.30 <sup>f</sup> ± 2.14	18.08 <sup>f</sup> ± 0.28	14.68 <sup>f</sup> ± 0.65
0.432	28.41 <sup>e</sup> ± 0.32	21.78 <sup>e</sup> ± 0.26	21.18 <sup>e</sup> ± 0.59	22.12 <sup>e</sup> ± 0.60	19.79 <sup>e</sup> ± 0.44	18.56 <sup>e</sup> ± 0.29
0.529	36.28 <sup>d</sup> ± 0.35	27.74 <sup>d</sup> ± 0.38	27.04 <sup>d</sup> ± 0.14	25.80 <sup>d</sup> ± 0.66	23.80 <sup>d</sup> ± 0.69	22.12 <sup>d</sup> ± 0.64
0.689	40.93 <sup>c</sup> ± 0.72	31.94 <sup>c</sup> ± 1.12	33.02 <sup>c</sup> ± 0.32	31.53 <sup>c</sup> ± 0.60	29.57 <sup>c</sup> ± 0.34	28.38 <sup>c</sup> ± 1.08
0.843	43.23 <sup>b</sup> ± 0.45	41.06 <sup>b</sup> ± 3.26	41.32 <sup>b</sup> ± 0.19	37.71 <sup>b</sup> ± 0.46	35.47 <sup>b</sup> ± 1.12	36.82 <sup>b</sup> ± 0.39
0.936	53.83 <sup>a</sup> ± 0.39	51.94 <sup>a</sup> ± 0.82	49.92 <sup>a</sup> ± 0.59	53.68 <sup>a</sup> ± 0.98	50.77 <sup>a</sup> ± 0.57	50.17 <sup>a</sup> ± 0.30

ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง 3 ซ้ำ

a, b, c, ... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p \leq 0.05$ )

## ภาคผนวก ง

### ข้อมูลการวิเคราะห์สภาพสลายได้ทางชีวภาพ

ตารางที่ ง.1 ลักษณะเฉพาะของหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการทดสอบสภาพสลายได้ทางชีวภาพ

ลักษณะเฉพาะ (characteristics)	หัวเชื้อจุลินทรีย์ (inoculums)
ค่าความเป็นกรดต่าง	7.65
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total dry solid (TS), %)	52.63
ปริมาณความชื้น (%)	47.37
ปริมาณของแข็งระเหยได้ (volatile solid (VS), % on TS)	60.78
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (total organic carbon, % on TS)	28.91
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen, % on TS)	2.41
แอกทิวิตี (activity*, mg CO <sub>2</sub> /g VS )	51.31

\* แอกทิวิตี คือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในช่วง 10 วันแรกของการวิเคราะห์สภาพสลายได้ทางชีวภาพ

ตารางที่ ง.2 ลักษณะเฉพาะของเซลลูโลส (positive control reference material) และตัวอย่างฟิล์ม

ลักษณะเฉพาะ (characteristics)	วัสดุทดสอบ(test materials)		
	Cellulose (reference)	SPI film*	SPI_MC20 film**
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total dry solid (TS), %)	94.47	84.61	83.74
ปริมาณความชื้น (%)	5.53	15.39	16.26
ปริมาณของแข็งระเหยได้ (volatile solid (VS), % on TS)	99.99	97.41	97.63
ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (total organic carbon, % on TS)	43.46	44.14	43.76

\*ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง (ตัวอย่างควบคุม)

\*\*ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลืองที่เติมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15%

ตารางที่ ง.3 ร้อยละของสภาพสลายได้ทางชีวภาพของเซลลูโลส (positive control reference material) และฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง (ตัวอย่างควบคุม)

เซลลูโลส :  $[CO_2]_{Th} = 47.81$  กรัม/ถึงปฏิกิริยา  
 ฟิล์มโปรตีนถั่วเหลือง :  $[CO_2]_{Th} = 48.56$  กรัม/ถึงปฏิกิริยา

จำนวน วัน	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น (กรัม/ถึงปฏิกิริยา)					ร้อยละของสภาพสลาย ได้ทางชีวภาพ	
	Blank	Cellulose	SPI film	Cellulose*	SPI film*	Cellulose	SPI film
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	3.10	11.31	32.71	8.21	29.61	17.17	60.98
6	3.91	17.52	40.22	13.61	36.31	28.46	74.77
8	4.73	23.07	42.28	18.34	37.55	38.36	77.33
10	5.61	28.27	44.31	22.66	38.70	47.39	79.70
14	6.88	35.70	46.99	28.82	40.11	60.29	82.60
21	8.97	41.51	50.19	32.54	41.22	68.06	84.88
26	10.58	44.93	52.06	34.35	41.48	71.84	85.43
30	11.53	46.99	53.01	35.46	41.48	74.16	85.43
35	12.48	48.99	53.96	36.51	41.48	76.37	85.43
42	14.32	52.22	55.80	37.90	41.48	79.28	85.43
45	15.17	53.15	56.65	37.98	41.48	79.44	85.43

\*คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิที่เกิดขึ้นหลังจากหักลบแบลنگ์แล้ว

ตารางที่ ง.4 ร้อยละของสภาพสลายได้ทางชีวภาพของเซลลูโลส (positive control reference material) และตัวอย่างฟิล์มเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลสขนาดอนุภาค 20 ไมโครเมตร ปริมาณ 15%

เซลลูโลส :  $[CO_2]_{Th}$  = 47.81 กรัม/ถึงปฏิกรณ์  
 ฟิล์มเสริมไมโครคริสตัลลินเซลลูโลส :  $[CO_2]_{Th}$  = 48.14 กรัม/ถึงปฏิกรณ์

จำนวน วัน	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น (กรัม/ถึงปฏิกรณ์)					ร้อยละของสภาพสลาย ได้ทางชีวภาพ	
	Blank	Cellulose	SPI_MC20 film	Cellulose*	SPI_MC20 film*	Cellulose	SPI_MC20 film
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	3.10	11.31	29.37	8.21	26.27	17.17	54.56
6	3.91	17.52	36.47	13.61	32.56	28.46	67.63
8	4.73	23.07	39.16	18.34	34.43	38.36	71.52
10	5.61	28.27	41.13	22.66	35.52	47.39	73.79
14	6.88	35.70	43.59	28.82	36.71	60.29	76.26
21	8.97	41.51	47.28	32.54	38.31	68.06	79.59
26	10.58	44.93	49.71	34.35	39.13	71.84	81.28
30	11.53	46.99	51.49	35.46	39.96	74.16	83.01
35	12.48	48.99	53.65	36.51	41.17	76.37	85.53
42	14.32	52.22	56.13	37.90	41.81	79.28	86.86
45	15.17	53.15	57.04	37.98	41.87	79.44	86.97

\*คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สุทธิที่เกิดขึ้นหลังจากหักลบแบลنگ์แล้ว

ตารางที่ ง.5 ร้อยละของสภาพสลายได้ทางชีวภาพโดยสรุป

ตัวอย่าง	ร้อยละของสภาพสลายได้ทางชีวภาพ		
	ผลเฉลี่ย (Average)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)	ค่าสัมพัทธ์กับเซลลูโลส (Relative to cellulose)
Cellulose	79.44	3.75	100.00
SPI film	85.43	1.09	107.54
SPI_MC film	86.97	1.28	109.48



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนันทพร โพธิ์ฉิมคุณ เกิดเมื่อวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2532 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2555

รายการสิ่งตีพิมพ์และเผยแพร่

Phothiwutthikhun, N., Duangmal, K., Mahawanich, T. 2014. Mechanical, barrier and optical properties of cellulosic fiber-reinforced soy protein isolate film. Proceedings of the International Conference on Sustainable Global Agricultural and Food Security. The Emerald Hotel, Bangkok, Thailand. July 16-18.

